



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

CÁLCULO DE EQUIVALENTES DINÂMICOS DE SISTEMA DE POTÊNCIA
USANDO ALGORITMOS GENÉTICOS.

PITTHER NEGRÃO DOS SANTOS

DM: 17/2014

UFPA / ITEC / PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil
2014

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

PITTHER NEGRÃO DOS SANTOS

CÁLCULO DE EQUIVALENTES DINÂMICOS DE SISTEMAS DE POTÊNCIA
USANDO ALGORITMOS GENÉTICOS

DM: 17/2014

UFPA / ITEC / PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil
2014

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

PITTHER NEGRÃO DOS SANTOS

CÁLCULO DE EQUIVALENTES DINÂMICOS DE POTÊNCIA USANDO
ALGORITMOS GENÉTICOS

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, PPGEE, da Universidade Federal do Pará, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

UFPA / ITEC / PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil
2014

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)

Santos, Pitther Negrão, 1988-
Cálculo de equivalentes dinâmicos de
sistemas de potência usando algoritmos
genéticos / Pitther Negrão Santos. - 2014.

Orientador: João Paulo Abreu Vieira;
Coorientador: Ubiratan Holanda Bezerra.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal
do Pará, Instituto de Tecnologia, Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Belém,
2014.

1. Sistemas de energia elétrica - modelos
matemáticos. 2. Algoritmos genéticos. 3.
Sistemas de energia elétrica - estabilidade. 4.
Estatística matemática. I. Título.

CDD 22. ed. 621.3191

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

CÁLCULO DE EQUIVALENTES DINÂMICOS DE SISTEMA DE POTÊNCIA USANDO
ALGORITMOS GENÉTICOS

AUTOR: PITTHER NEGRÃO DOS SANTOS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA À AVALIAÇÃO DA BANCA EXAMINADORA E PELO COLEGIADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA NA ÁREA DE SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA.

AVALIADA EM 07/08/2014

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. João Paulo Vieira Abreu
(Orientador – UFPA)

Prof. Dr. Ubiratan Holanda Bezerra
(Co-orientador – UFPA)

Prof. Dr. Carolina de Mattos Affonso
(Membro – PPGEE/UFPA)

Prof. Dr. Raidson Jenner Negreiros de Alencar
(Membro Externo – UFPA)

VISTO: **celivan essa folha sai e entra a folha assinada pela banca em anexo**

Prof. Dr. Evaldo Pelaes
(Coordenador do PPGEE/ITEC/UFPA)

Este trabalho é dedicado à minha família:
Ao meu Pai, Pedro da Silva, à minha mãe,
Maria de Nazaré, as minhas irmãs,
Patrícia, Marcelina, Onecelina, Daniele e
Bruna.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus por todas as conquistas em minha vida.

A minha mãe Maria de Nazaré e meu pai Pedro da Silva, por toda dedicação e esforço em garantir a melhor educação e formação.

As minha irmã Patrícia, Marcelina, Onecelina, Danielle e Bruna, com as quais eu compartilhei todas as dificuldades encontradas durante a jornada do curso de mestrado.

Ao meu amigo (Irmão) Omilton Corrêa por todo o apoio demonstrado nas horas mais difíceis e por acreditar no sucesso deste trabalho.

Aos professores João Paulo Abreu Vieira e Ubiratan Holanda Bezerra, pela forma dedicada e paciente que me orientaram neste trabalho.

Aos colegas de trabalho do CEAMAZON, especialmente ao Dione Vieira e ao Bernard Carvalho pela grande participação e incentivo dado para a conclusão deste trabalho.

Obrigado a todos.

“Dê-me uma alavanca e um suporte forte o suficiente que eu poderei sozinho levantar o mundo.”

Arquimedes

SUMÁRIO

| | |
|--|-------|
| DEDICATÓRIA..... | VII |
| AGRADECIMENTOS..... | VIII |
| EPIGRAFE..... | IX |
| LISTA DE FIGURAS..... | XII |
| LISTA DE TABELAS..... | XVI |
| RESUMO..... | XVII |
| ABSTRACT..... | XVIII |
| Capítulo 1 – Introdução..... | 1 |
| 1.1 - Motivações | 1 |
| 1.2–Objetivos | 2 |
| 1.3–Revisão Bibliográfica..... | 3 |
| 1.4- Organização do Trabalho..... | 5 |
| Capítulo 2 - Equivalentes Dinâmicos | 6 |
| 2.1 – Introdução | 6 |
| 2.2 - Construções de Equivalentes Dinâmicos..... | 6 |
| 2.2.1 - Delimitação de Áreas do SEP | 7 |
| 2.2.2 - Equivalente Estático da rede..... | 8 |
| 2.2.6 - Equivalente dinâmico de máquinas síncronas | 14 |
| 2.2.6.1- Desenvolvimento do modelo de máquina síncrona. | 14 |
| Capitulo 3 - Algoritmos Genéticos..... | 24 |
| 3.1 Introdução | 24 |
| 3.2 - Algoritmos Genéticos | 24 |
| 3.3 - Operadores Genéticos..... | 27 |
| 3.3.1– Operador de seleção | 27 |
| 3.3.2 - Operadores Genéticos de cruzamento..... | 28 |
| 3.3.3 - Operadores Genéticos de Mutação | 29 |
| 3.4 – Codificação | 30 |
| 3.4.1 - Codificação do tipo binária..... | 30 |
| 3.4.2 - Codificação do tipo real | 31 |
| Capitulo 4 - Metodologia Proposta..... | 33 |
| 4.1 – Introdução | 33 |

| | |
|--|----|
| 4.2 - Metodologia..... | 34 |
| Capítulo 5 - Resultados | 39 |
| 5.1-Introdução..... | 39 |
| 5.2- Sistema Duas Áreas | 39 |
| 5.3 – Sistema Interligado Nacional..... | 46 |
| CAPITULO 6.0 – CONCLUSÕES | 66 |
| 6.1 – Conclusões gerais | 66 |
| 6.2 – Sugestões para trabalhos futuros | 66 |
| Referências Bibliográficas..... | 67 |

LISTA DE FIGURAS

Capítulo 2

| | |
|--|----|
| Figura 2.0- Figura representando rede Interna, fronteira e externa..... | 7 |
| Figura 2.1 – Rede Equivalente..... | 10 |
| Figura 2.3- sistema de 6 barras..... | 12 |
| Figura2. 4-Sistema de 6 barras reduzido..... | 13 |
| Figura 2.5: Circuitos equivalentes de eixo direto (d) e em quadratura (q)..... | 16 |
| Figura 2.6-Diagrama operacional da máquina síncrona..... | 18 |

Capítulo 3

| | |
|----------------------------------|----|
| Figura 3.1-fluxograma do AG..... | 27 |
|----------------------------------|----|

Capítulo 4

| | |
|--|----|
| Figura 4.1- Processo de ajuste dos parâmetros..... | 34 |
| Figura 4.2 – Fluxograma da metodologia proposta..... | 36 |

Capítulo 5

| | |
|--|----|
| Figura 5.1 – Diagrama unifilar do sistema duas áreas..... | 38 |
| Figura 5.2 – Diagrama Unifilar do sistema Duas Áreas equivalente..... | 39 |
| Figura5. 3 – Os ângulos δ_{4-3} do sistema duas áreas para um cenário de carga leve..... | 40 |
| Figura 5.4 - Os ângulos δ_{4-3} do sistema duas áreas para um cenário de carga média... | 41 |
| Figura 5.5 - Os ângulos δ_{4-3} do sistema duas áreas para um cenário de carga pesada.. | 41 |
| Figura 5.6 – O fluxo de potências ativa da barra 7 para barra 8 do sistema 2 área - carga leve..... | 42 |
| Figura 5.7 – O fluxo de potências ativa da barra 7 para barra 8 do sistema 2 área - carga média..... | 42 |

| | |
|--|----|
| Figura 5.8 – O fluxo de potências ativa da barra 7 para barra 8 do sistema 2 área – carga pesada..... | 43 |
| Figura 5.9 – O fluxo de potências reativa da barra 7 para barra 8 do sistema 2 área - carga leve..... | 43 |
| Figura 5.10 – O fluxo de potências reativa da barra 7 para barra 8 do sistema 2 área – carga média..... | 44 |
| Figura 5.11 – O fluxo de potências reativa da barra 7 para barra 8 do sistema 2 área – carga pesada..... | 44 |
| Fig. 5.12 – Evolução da função de avaliação..... | 45 |
| Figura 5.13 – Mapa do sistema interligado nacional com as interligações Tucuruí-Macapá-Manaus..... | 46 |
| Figura 5.14 – Diagrama Unifilar do Equivalente com suas barras de Fronteiras..... | 47 |
| Figura 5.15 - Função Fitness relação ao número de gerações..... | 49 |
| Figura 5.16 – Fluxo de Potência ativa da barra de Fronteira 7200 – Miracema – Carga Leve..... | 50 |
| Figura 5.17- Fluxo da Potência Ativa da Barra de fronteira 7200– Miracema - Carga Media..... | 50 |
| Figura 5.18 – Fluxo de Potência Ativa da Barra de fronteira 7200 – Miracema – Carga Pesada..... | 51 |
| Figura 5.19– Fluxo de Potência Reativa na barra de fronteira 7200 – Miracema – Carga leve..... | 51 |
| Figura 5.20 – Fluxo de Potência Reativa na barra de Fronteira 7200 – Miracema – Carga Media..... | 52 |
| Figura 5.21 – Fluxo de Potência Reativa na barra de Fronteira 7200 – Miracema – Carga Pesada..... | 52 |
| Figura 5.22 – Fluxo de Potência Ativa na barra de Fronteira 5525 – C. Neto – Carga Leve..... | 53 |

| | |
|---|----|
| Figura 5.23 – Fluxo de Potência Ativa na barra de Fronteira 5525 – C. Neto – Carga Média..... | 53 |
| Figura 5.24 – Fluxo de Potência Ativa na barra de Fronteira 5525 – C. Neto – Carga Pesada..... | 53 |
| Figura 5.25 – Fluxo de Potência Reativa na barra de Fronteira 5525 – C. Neto – Carga Leve..... | 54 |
| Figura 5.26 – Fluxo de Potência Reativa na barra de Fronteira 5525 – C. Neto – Carga Média..... | 54 |
| Figura 5.27 – Fluxo de Potência Reativa na barra de Fronteira 5525 – C. Neto – Carga Pesada..... | 54 |
| Figura 5.28 – Fluxo de Potência Ativa na barra de Fronteira 5436 – R. Gonçalves – Carga Leve..... | 55 |
| Figura 5.29 – Fluxo de Potência Ativa na barra de Fronteira 5436 – R. Gonçalves – Carga Média..... | 55 |
| Figura 5.30 – Fluxo de Potência Ativa na barra de Fronteira 5436 – R. Gonçalves – Carga Pesada..... | 56 |
| Figura 5.31 – Fluxo de Potência Reativa na barra de Fronteira 5436 – R. Gonçalves – Carga Leve..... | 56 |
| Figura 5.32 – Fluxo de Potência Reativa na barra de Fronteira 5436 – R. Gonçalves – Carga Média..... | 57 |
| Figura 5.33 – Fluxo de Potência Reativa na barra de Fronteira 5436 – R. Gonçalves – Carga Pesada..... | 58 |
| Figura 5.34 – Fluxo de Potência Ativa na barra de Fronteira 5580– P. Dutra – Carga Leve..... | 58 |
| Figura 5.35 – Fluxo de Potência Ativa na barra de Fronteira 5580– P. Dutra – Carga Média..... | 58 |

| | |
|--|----|
| Figura 5.36 – Fluxo de Potência Ativa na barra de Fronteira 5580– P. Dutra – Carga Pesada..... | 58 |
| Figura 5.37 – Fluxo de Potência Reativa na barra de Fronteira 5580– P. Dutra – Carga Leve..... | 59 |
| Figura 5.38 – Fluxo de Potência Reativa na barra de Fronteira 5580– P. Dutra – Carga Média..... | 59 |
| Figura 5.39 – Fluxo de Potência Reativa na barra de Fronteira 5580– P. Dutra – Carga Pesada..... | 59 |
| Figura 5.40 – Ângulo da máquina do sistema completo e equivalente da V. conde..... | 60 |
| Figura 5.41 – Ângulo da máquina do sistema completo e equivalente de Tucuruí..... | 60 |
| Figura 5.42 – Ângulo da máquina do sistema completo e equivalente de Manaus..... | 61 |
| Figura 5.43 – Ângulo da máquina do sistema completo e equivalente de Macapá..... | 61 |
| Figura 5.44 – Fluxo de Potência ativa Tucuruí sentido a Manaus – Carga Leve..... | 62 |
| Figura 5.45 – Fluxo de Potência Reativa Tucuruí sentido a Manaus – Carga Leve..... | 62 |
| Figura 5.46 – Fluxo de Potência ativa Tucuruí sentido a Manaus – Carga Média..... | 63 |
| Figura 5.47 – Fluxo de Potência Reativa Tucuruí sentido a Manaus – Carga Média..... | 63 |
| Figura 5.48 – Fluxo de Potência ativa Tucuruí sentido a Manaus – Carga Pesada..... | 63 |

| | |
|--|----|
| Figura 5.49 – Fluxo de Potência Reativa Tucuruí sentido a Manaus – Carga Pesada..... | 64 |
| Figura 5.50 – Ângulo da máquina do sistema completo e equivalente de Manaus..... | 64 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 2.1 – Solução de fluxo de potência..... | 12 |
| Tabela 2.2 – Solução de fluxo de potência com o sistema reduzido..... | 13 |
| Tabela 2.3 – Modelo do gerador síncrono de polos salientes..... | 15 |
| Tabela 2.4: Parâmetros derivados de uma máquina síncrona..... | 22 |
| Tabela 5.1- Parâmetros da máquina equivalente, conectada a barra 7 do sistema duas áreas, obtidos pelo algoritmo genético..... | 40 |
| Tabela 5.2 – Definição dos limites máximos e mínimos dos parâmetros da máquina..... | 40 |
| Tabela 5.3 – Comparação dos Tempos de Simulação entre o Sistema Equivalente e o Completo..... | 45 |
| Tabela 5.4 – Definição dos limites máximos e mínimos dos parâmetros da máquina..... | 47 |
| Tabela 5.5 – Parâmetros dos geradores equivalentes de Miracema..... | 48 |
| Tabela 5.6 – Parâmetros dos geradores equivalentes de C. Neto..... | 48 |
| Tabela 5.7 – Parâmetros dos geradores equivalentes de R. Gonçalves..... | 48 |
| Tabela 5.8 – Parâmetros dos geradores equivalentes de P. Dutra..... | 48 |
| Tabela 5.10 – Comparação dos Tempos de Simulação entre o Sistema Equivalente e o Completo..... | 64 |

RESUMO

Esta dissertação apresenta um método baseado em algoritmos genéticos para cálculo de equivalentes dinâmicos de sistemas de potência visando representar partes de um sistema para estudos de análise de estabilidade transitória. O modelo do equivalente dinâmico é obtido por meio da identificação de parâmetros de geradores síncronos, localizados nas barras de fronteira entre o sistema externo e o subsistema em estudo. Um índice é usado para avaliar a proximidade entre as simulações realizadas usando o modelo completo e o modelo reduzido, após serem submetidos a grandes distúrbios no subsistema em estudo. Diferentes condições operacionais foram levadas em conta. As simulações foram realizadas usando os softwares GAOT “*The Genetic Algorithm Optimization Toolbox*”, ANAREDE e ANATEM. Esse método foi testado no sistema teste duas áreas do Kundur e no Sistema Interligado Nacional (SIN). Os resultados validaram a eficácia do método desenvolvido para o cálculo de equivalentes dinâmicos robustos.

PALAVRAS-CHAVE: Equivalentes dinâmicos, algoritmos genéticos, estabilidade transitória, identificação de parâmetros.

ABSTRACT

This dissertation presents a genetic algorithm-based method for calculating of power system dynamic equivalents aiming to represent parts of a power system for transient stability analysis. The dynamic equivalent calculation is obtained through carrying out the parameter identification of synchronous generators located on frontier buses, linking the external and the studied subsystem. An index is used to assess the proximity between simulations carried out using the full and the reduced model following the large disturbances emerged in the studied subsystem. Different operating conditions are taken into account. The simulations were conducted using the softwares GAOT “*The Genetic Algorithm Optimization Toolbox*”, ANAREDE and ANATEM. This method is tested on a Kundur’s two-area test system and on a Brazilian Interconnect Power System (BIPS). Test results validate the efficacy of the developed methodology in calculating the robust dynamic equivalents.

KEYWORDS: Dynamic equivalents, genetic algorithm, parameter identification, transient stability.

Capítulo 1 – Introdução

1.1 - Motivações

Os sistemas de potência atuais são constituídos de imensas redes elétricas interconectadas que abrangem grandes áreas geográficas e que muitas vezes atravessam as fronteiras de países vizinhos. Novas interconexões aumentam o tamanho e a complexidade desses sistemas, e esta ampliação é uma tendência de particular interesse do Brasil, onde interligações adicionais foram recentemente realizadas.

Com essa tendência, novos desafios associados ao planejamento, operação e controle dos sistemas de potência de grande porte irão surgir. Este fato vai tornar a simulação dinâmica de sistemas de potência uma tarefa ainda mais difícil e onerosa para programas de estabilidade de sistemas de potência [1], incluindo aqueles que realizam a avaliação de segurança dinâmica (DSA, do inglês “*Dynamic Security Assessment*”).

Essa complexidade faz com que o uso de modelos de equivalentes dinâmicos de sistemas de potência seja muito atrativo para muitas aplicações e estudos, particularmente para a rápida e eficiente avaliação da estabilidade em termos de custo computacional e de armazenamento de dados.

Modelos de equivalentes dinâmicos de sistemas de potência têm como principal objetivo reproduzir as características dinâmicas do sistema completo sem perda significativa de precisão. Ao mesmo tempo, os modelos equivalentes devem ser compatíveis com as ferramentas computacionais disponíveis para análise da estabilidade de sistemas de potência.

Os modelos equivalentes possibilitam que área em estudo seja preservada, mantendo intacta a sua descrição matemática, enquanto que a área externa, que consiste na parte restante do sistema, seja representada por um modelo matemático reduzido.

Atualmente, operadores de rede e concessionárias de energia elétrica do mundo todo utilizam diferentes técnicas para calcular equivalentes dinâmicos de sistemas de potência. Nos Estados Unidos e no Canadá, vários operadores e grandes concessionárias utilizam as metodologias disponíveis, todas baseadas em coerência, no software DYNRED da EPRI [2]. No Brasil, sabe-se que o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) e a grande maioria das concessionárias realizam estudos de estabilidade transitória utilizando o software ANATEM [3], o qual ainda não

disponibiliza modelos de equivalentes dinâmicos que represente parte de um sistema de potência.

Modelos de equivalentes dinâmicos de sistemas de potência baseados em coerência têm sido bem aceitos pela comunidade de engenheiros de sistemas de potência e pelos desenvolvedores de softwares de análise dinâmica. Esses métodos consideram duas fases importantes, a primeira é a identificação dos geradores coerentes, ou seja, geradores fortemente acoplados, e a segunda fase é a redução da dinâmica do sistema. Contudo, os geradores que constituem o novo sistema reduzido podem não fazer parte da área de atuação de uma concessionária específica.

Para atacar essa limitação dos métodos baseados em coerência, técnicas de identificação de sistemas, baseadas em simulações ou medições, podem ser utilizadas para identificar os parâmetros de um modelo dinâmico equivalente. A identificação dos parâmetros é realizada pelo uso de algoritmos de otimização que estimem e reavalie o modelo equivalente em relação ao sistema original até a função custo atingir um valor mínimo.

1.2–Objetivos

O objetivo desta dissertação é apresentar uma metodologia para cálculo de equivalentes dinâmicos de sistemas de potência, compostos por geradores síncronos localizados nas barras de fronteira, usando algoritmos genéticos, de tal forma a representar a dinâmica de parte de um sistema delimitado pela área de atuação de uma empresa concessionária de energia elétrica. Para tanto o método proposto fez uso da biblioteca GAOT do MATLAB e dos softwares ANAREDE e ANATEM do CEPEL. Outro objetivo da dissertação é demonstrar a eficácia do método por meio da aplicação em dois sistemas testes, um de pequeno porte, conhecido como sistema duas áreas do IEEE, e um de grande porte, conhecido como SIN (Sistema Interligado Nacional).

1.3–Revisão Bibliográfica

A revisão bibliográfica da presente dissertação de mestrado será focada nos trabalhos que abordam o tema cálculo de equivalentes dinâmicos de sistemas de potência a partir da identificação de parâmetros, sem a necessidade do uso de técnicas baseadas em coerência de geradores.

No trabalho de A. H. M. A. Rahim e A. J. Al-Ramadhan, (2002) em [4] propuseram uma metodologia para estudos de equivalentes dinâmicos de sistemas de potência a partir da identificação de parâmetros, utilizando as redes neurais do tipo *backpropagation* e de base radiais, para estimar os parâmetros desconhecidos do equivalente dinâmico. Índices de estabilidade transitória, como *overshoot*, constante de decaimento e a frequência das oscilações do gerador são utilizados como entrada para treinar as redes neurais. Enquanto o algoritmo back-propagation, em geral, não dá estimativas muito satisfatórias, as funções de base radial podem ser treinadas para prever os parâmetros do equivalente com extrema precisão.

J. M. R. Arredondo e R. G. Valle, (2004) em [5] propuseram um problema de otimização para estimar os parâmetros de geradores fictícios que representam um equivalente dinâmico de um subsistema externo; esses geradores estão localizados nos nós de fronteira, ligando o sistema externo ao subsistema em estudo. O problema é baseado rigorosamente na preservação dos modos altamente relacionados com a dinâmica do subsistema estudado. Diferentes condições de operação podem ser levadas em conta; além disso, os estabilizadores de sistemas de potência também podem ser incluídos. As simulações no domínio do tempo são realizadas para comparar os sinais obtidos a partir do uso dos modelos completo e reduzido, cuja proximidade é avaliada por meio da diferença do valor rms (root mean square). Os resultados mostram que metodologia é viável.

Em [6] J. Yang, J. Zhang, W. Pan, (2007) apresentaram uma metodologia baseada no uso de sincrofasores ou PMUs (*Phasor Measurement Units*) para determinação de equivalentes dinâmicos de sistemas de potência. Neste método o sistema externo é reduzido de forma dinâmica usando variáveis obtidas pelas PMUs. Um método de otimização por enxame de partículas ou PSO (*Particle Swarm Optimization*) foi utilizado para identificar os parâmetros do sistema equivalente. O método proposto é demonstrado e comparado com o sistema teste New England. A

comparação mostra que o método proposto pode preservar as propriedades dinâmicas do sistema original.

Na tese de G. L. R. de Brito, (2009) em [7] foi apresentada uma metodologia para a determinação de equivalentes dinâmicos baseada na agregação de geradores e de seus respectivos controladores, seguida da identificação dos parâmetros pertinentes por meio da técnica dos Mínimos Quadrados. Para que a agregação dos geradores tenha uma solução viável, em cada barra do equivalente conecta-se um gerador e uma carga fictícia. Dessa forma, o gerador equivalente tem inicialmente os seus parâmetros determinados, sendo que em geral são utilizados os parâmetros de uma máquina real pertencente à área equivalente. Na etapa seguinte, os parâmetros são reajustados através da técnica dos Mínimos Quadrados (MQ). Por fim, a verificação da metodologia proposta foi realizada por meio de dois sistemas testes. O primeiro tratou do sistema New England, e o segundo foi com o Sistema Interligado Nacional (SIN).

No trabalho de J. M. Ramirez, B. V. Hernandez, R. E. Correa, (2012) em [8] foi proposto um método de cálculo de equivalência dinâmica robusta para reduzir o esforço computacional e o tempo de processamento em estudos de estabilidade transitória de sistemas de potência de grande porte. A técnica baseia-se em uma formulação multiobjetivo, a qual é solucionada por um algoritmo genético. Testes são realizados no sistema elétrico interligado mexicano, considerando simplificações no modelo. Um índice é usado para avaliar a proximidade entre as simulações realizadas pelo uso dos modelos completo e reduzido. Da mesma forma, presume-se o uso de informações decorrentes de medições de PMUs, o que propicia melhores estimativas.

Em [9], os autores C. Sturk, L. Vanfretti, Y. Chompoobutrgool, e H. Sandberg, (2012) demonstram como a redução do modelo pode ser usada para reduzir a ordem de sistemas de potência, sem a necessidade de identificar os grupos de geradores coerentes. Para tanto, o sistema 2-área do Klein-Rogers-Kundur é estudado em detalhe. O sistema de potência é dividido em uma área de estudo e em uma área externa, e o algoritmo é utilizado para reduzir a área externa, mantendo a descrição não linear da área de estudo. Os resultados apresentados mostraram-se precisos quando a abordagem proposta é usada.

1.4- Organização do Trabalho

A dissertação está organizada em capítulos conforme descrito a seguir:

O capítulo 2 apresenta o processo de determinação de um equivalente dinâmico pela delimitação das áreas de um determinado SEP.

O capítulo 3 descreve sobre os fundamentos básicos a respeito do método de otimização e busca denominado algoritmo genético.

O capítulo 4 aborda detalhadamente a metodologia do cálculo de equivalentes dinâmicos de sistemas de potência utilizando algoritmos genéticos.

O capítulo 5 apresenta os resultados dos testes relativos à metodologia para determinação dos equivalentes dinâmicos.

O capítulo 6 apresenta as conclusões da dissertação e as recomendações para trabalhos futuros.

Capítulo 2 - Equivalentes Dinâmicos

2.1 – Introdução

Com o crescimento em tamanho e complexidade dos modernos sistemas interligados de energia elétrica, o esforço computacional dos estudos de avaliação da segurança dinâmica tornou-se bastante elevado.

Assim, cada vez mais, é necessário analisar uma grande quantidade de situações que podem ocorrer, o que requer o desenvolvimento de técnicas de análise de estabilidade mais rápidas e com menores custos para reduzir o esforço computacional nos estudos da segurança dinâmica do sistema, com isso torna-se conveniente dividir a rede elétrica em dois subsistemas.

O principal motivo de utilizar equivalente dinâmico consiste de um número menor de barras, transformadores, linhas, geradores e seus controles, resultando na redução do esforço computacional e, conseqüentemente, do tempo necessário para a obtenção dos resultados, sem perda significativa de precisão do comportamento dinâmico do sistema completo original. Além disto, possibilita ao engenheiro de estudos focalizar a área de interesse.

2.2 - Construções de Equivalentes Dinâmicos

O uso de equivalentes dinâmicos em sistemas de potência foi motivado pelo problema do elevado custo computacional em estudos de estabilidade eletromecânica de sistemas de potência de grande porte, que nem sempre necessitavam ser representadas pelo modelo completo. Para amenizar este problema, lança-se mão da redução de uma parte da rede, em que não há necessidade de análise detalhada.

O procedimento de construção de um equivalente dinâmico de um SEP consiste de: A) Delimitação das áreas do SEP B) Redução estática de rede interconectada, C) Determinação dos parâmetros do equivalente dinâmico [7], [8], [12], [15], [16] e [17].

Diversos métodos estão disponíveis na literatura para a construção desse equivalente dinâmico. Neste trabalho é apresentada a abordagem baseada na delimitação das áreas geográficas do sistema elétrico de potência em função da jurisdição das empresas de energia elétrica, pois muitas vezes as áreas de um sistema

não são determinadas utilizando apenas métodos matemáticos ou probabilísticos. Essas áreas podem abranger muitas vezes distâncias consideráveis, ultrapassando limites estaduais, como por exemplo, o caso das empresas transmissoras de energia elétrica do Brasil, que representam as regiões Sudeste / Centro-Oeste, Sul, Norte e Nordeste. Nesse caso o usuário determina um critério de exclusão que servirá de base de comparação para a determinação da seleção de linhas a serem retiradas do equivalente de rede [8].

2.2.1 - Delimitação de Áreas do SEP

A grande maioria dos estudos relacionados a equivalentes dinâmicos considera a separação dos SEP em duas áreas, uma delas a de estudo (sistema interno) e o outro relativo ao equivalente (sistema externo) como ilustrado na figura 2.0. Nesses casos, o sistema externo é substituído por um equivalente dinâmico que consiga reproduzir a dinâmica dessa parcela quando submetido a uma determinada perturbação. Contudo, os SEP podem ser separados em áreas que delimitam uma ou mais parte do sistema. Essas áreas podem ser escolhidas por critérios técnicos, como por exemplo, através da coerência entre geradores de uma determinada região ou por delimitação física ou jurisdicional sendo essa o critério técnico utilizado para o desenvolvimento dessa dissertação. Por delimitação física pode-se entender os limites geográficos de uma empresa concessionária de energia elétrica [6].

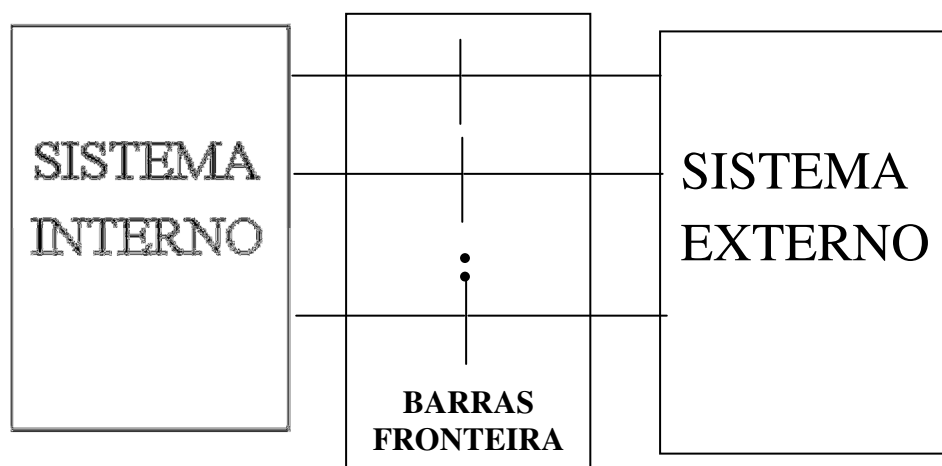


Figura 2.0- Figura representando rede Interna, fronteira e externa.

Países extensos, geralmente, têm SEP de grande porte com um elevado número de interligações que percorrem todo o seu território visando abastecer os centros consumidores de energia, mesmo os mais afastados dos grandes centros geradores. Logo, a delimitação das responsabilidades de um determinado trecho ou parcelas de um sistema desse tipo é de extrema importância para a manutenção do perfeito

funcionamento e operação do sistema. Contudo, todos os geradores pertencentes a uma determinada área não são obrigatoriamente coerentes, mas podem ser substituídos por um ou mais geradores equivalentes [18] [19].

No Brasil, o SIN é operado pelo NOS, que por sua vez é fiscalizado pela ANEEL. O SIN é separado em diversas áreas. Cada área está sob a responsabilidade de uma empresa concessionária. O SIN é dividido em quatro grandes subsistemas: Sul, Sudeste/Centro-Oeste, Norte e Nordeste. A divisão do SIN por subsistemas facilita o critério de delimitação da região reduzida pelo equivalente dinâmico, como é o caso de uma das aplicações dessa dissertação, onde o SIN é reduzido até ao subsistema Norte [10].

2.2.2 - Equivalente Estático da rede

A redução estática da rede resume-se à eliminação das barras de carga e das barras de geração que serão agregadas na(s) barra(s) equivalente(s) fictícia(s). A esta(s) barra(s), propõe-se ligar um gerador e suas respectivas cargas equivalentes.

A barra onde é conectado o equivalente deve conter todas as equações algébricas do conjunto das barras que serão eliminadas. Ou seja, o fluxo de potência entre a parcela do sistema que será preservada e a barra equivalente deve ser o mesmo.

A redução da rede elétrica deve ser realizada convenientemente. Essencialmente, um primeiro passo consiste da eliminação das barras geradoras e barras de carga com impedância constante, permitindo assim a formação de uma rede elétrica equivalente.

Diversas técnicas para determinação de equivalentes de redes estáticas existem na literatura [12], dentre elas duas se destacam: a técnica do equivalente tipo REI e a do equivalente tipo Ward [12] [15] [16].

O equivalente tipo Ward apresenta algumas questões que merecem destaque, tais como:

- a) Fornece resultados razoavelmente exatos para fluxos de potência reais e;
- b) A precisão dos fluxos de potência reativa não é garantida quando as condições de operação do sistema variam.

O equivalente Ward é um método clássico de determinação de equivalentes externos desenvolvido por Ward. Ele pode ser utilizado para redes de características lineares e não-lineares [12].

Nessa dissertação sobre o estudo de equivalente externo utilizou-se o método por Ward não-linear.

- **Modelo Ward Linear**

Considere-se, inicialmente, uma rede representada pelo modelo linear do tipo:

$$YE = I \quad (2.0)$$

Onde: Y é a matriz admitância nodal;

E é o vetor das tensões complexas dos nós;

I é o vetor das injeções nodais de corrente.

Considerando a representação vista na figura 2.1, a equação 2.0 pode assumir a seguinte forma.

$$\begin{pmatrix} Y_{EE} & Y_{EF} & 0 \\ Y_{FE} & Y_{FF} & Y_{FI} \\ 0 & Y_{IF} & Y_{II} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_E \\ E_F \\ E_I \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I_E \\ I_F \\ I_I \end{pmatrix} \quad (2.1)$$

Explicitando-se E_E a partir da equação 2.1 obtém-se:

$$E_E = Y_{EE}^{-1}(I_E - Y_{EF}E_F) \quad (2.2)$$

Explicitando I_F a partir da equação 2.1, obtém-se:

$$I_F = YE_{FE} + Y_{FF}E_F + Y_{FI}E_I \quad (2.3)$$

Substituindo-se a equação 2.2 na equação 2.3, encontra-se:

$$(Y_{FF} - Y_{FE}Y_{EE}^{-1}Y_{EF})E_F + Y_{FI}E_I = I_F - Y_{FE}Y_{EE}^{-1}I_E \quad (2.4)$$

A partir da equação 2.4, defini-se:

$$Y_{FF}^{eq} = Y_{FF} - Y_{FE}Y_{EE}^{-1}Y_{EF} \quad (2.5)$$

$$I_F^{EQ} = I_F - Y_{FE}Y_{EE}^{-1}I_E \quad (2.6)$$

Com base nas equações 2.5 e 2.6, reduz-se o sistema 2.1 ao 2.7.

$$\begin{pmatrix} Y_{FF}^{eq} & Y_{FI} \\ Y_{IF} & Y_{II} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_F \\ E_I \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I_F^{eq} \\ I_I \end{pmatrix} \quad (2.7)$$

Na equação 2.7, a matriz Y_{FF}^{eq} contém as admitâncias das ligações entre as barras de fronteiras e também as admitâncias shunt das barras de fronteiras; a matriz Y_{FF} corresponde aos elementos existentes na rede original e a matriz $-Y_{FE}Y_{EE}^{-1}Y_{EF}$ corresponde aos elementos que aparecem devido ao processo de redução. Já o vetor I_F^{eq} contém as injeções de corrente equivalentes. A figura 2.1 mostra a rede da figura 2.1 reduzida.

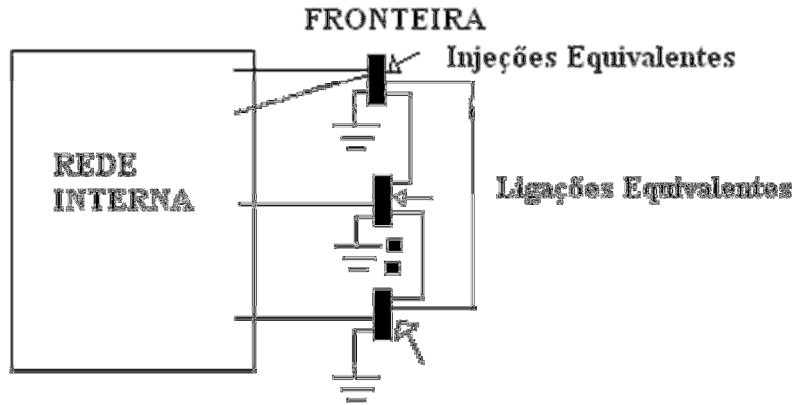


Figura 2.1 – Rede Equivalente

De acordo com a equação 2.6, verifica-se que as injeções I_F^{eq} dependem das injeções de corrente nas barras externas I_E , no entanto em aplicações de tempo real esses valores não estão geralmente disponíveis. Então, nesses tipos de aplicações, I_F^{eq} pode ser determinado a partir do sistema 2.7, conforme a equação 2.8.

$$I_F^{eq} = Y_{FF}^{eq} E_F + Y_{FI} E_I \quad (2.8)$$

- **Modelo Não-Linear**

No equivalente Ward para modelos lineares, os geradores e cargas são representados por admitâncias constantes ou por corrente constante, no entanto, nas aplicações mais comuns do fluxo de carga, esses dois equipamentos são representados por injeções de potência constante, o exige uma abordagem não-linear do problema. A utilização de um modelo não-linear faz com que a rede equivalente forneça resultados aproximados, mas aceitáveis para a maioria das aplicações práticas [12].

A utilização de um modelo não-linear de uma rede transmissão pode ser dividida em duas etapas. A primeira é responsável por determinar a rede equivalente (admitâncias equivalentes na fronteira) seguindo o mesmo procedimento utilizado para modelos lineares. E a segunda é responsável por calcular as injeções equivalentes nas barras de fronteira, ou seja, calcular as injeções equivalentes de potências ativa e reativa em vez das injeções de corrente. Essas injeções de potência são melhores visualizadas com as equações 2.9 e 2.10.

$$P_k^{eq} = V_m^0 \sum_{m \in K} V_m^0 (G_{km}^{eq} \cos \theta_{km}^0 + B_{km}^{eq} \sin \theta_{km}^0) \quad (2.9)$$

$$Q_k^{eq} = V_m^0 \sum_{m \in K} V_m^0 (G_{km}^{eq} \sin \theta_{km}^0 - B_{km}^{eq} \cos \theta_{km}^0) \quad (2.10)$$

Em que V^0 e θ^0 são as variáveis de estado correspondentes ao caso básico, K é o conjunto de barras de fronteiras e internas vizinhas à barra K , incluindo a própria barra, e $G_{km}^{eq} + jB_{km}^{eq}$ é um elemento da matriz de admitância nodal.

Quando esse equivalente é utilizado na análise de perturbações na rede de interesse, ele geralmente apresenta boa precisão para os fluxos de potência ativa, mas apresenta resultados pouco aceitáveis para a parte reativa (magnitudes das tensões e fluxo de potência reativa). Essas dificuldades vêm do fato que este equivalente não considera o efeito das barras PV do sistema externo, ou seja, essas barras são tratadas da mesma forma que as barras PQ .

O fato é que uma barra PV do sistema externo, localizada próxima às barras de fronteira, pode ser responsável por um suporte significativo de reativos durante uma contingência. Segundo [12], existem pelo menos duas maneiras de se representar o efeito das barras PV externas sem prejudicar as boas características do equivalente de Ward com relação ao comportamento da parte ativa. Uma delas consiste simplesmente na retenção das barras PV externas que estejam eletricamente próximas da fronteira, ou seja, estas barras são excluídas do processo de redução da rede externa. Outra maneira é o equivalente Ward estendido

Esse equivalente, quando utilizado na análise de perturbações na rede, apresenta uma boa exatidão para a parte ativa da potência, no entanto resultados pobres para a potência reativa. Isso ocorre devido ele não considerar os efeitos das barras PV do sistema externo, ou seja, tratar as barras PV do mesmo modo que as barras PQ [12].

Considere o diagrama unifilar da rede a seguir.

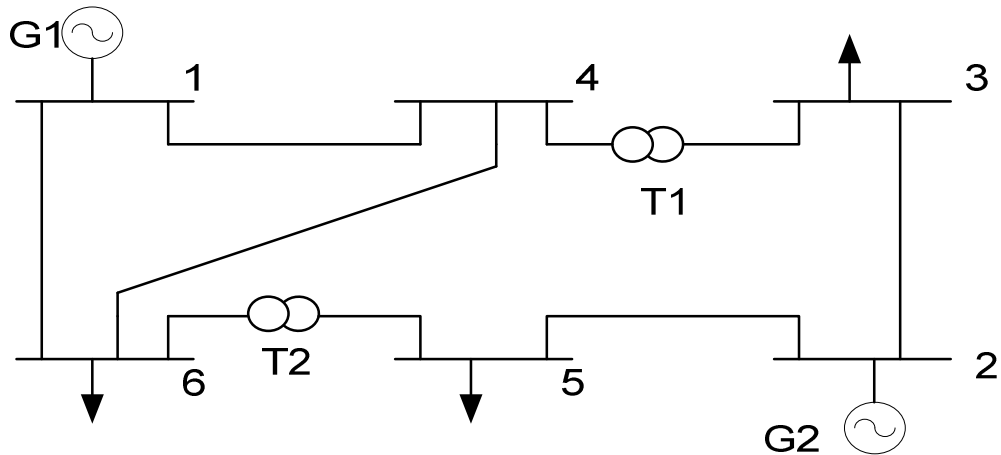


Figura 2.3- sistema de 6 barras

A solução do fluxo de potência do sistema de 6 barras não reduzido é mostrado na tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Solução de fluxo de potência.

| Barra | Tipo | V (V) | ζ (graus) | P_g (MW) | Q_g (Mvar) | P_d (Mw) | Q_d (Mvar) |
|-------|-------|-------|-----------------|------------|--------------|------------|--------------|
| 1 | folga | 1,100 | 0,0000 | 135,0 | 43,28 | - | - |
| 2 | PV | 1,046 | -21,21 | 10,0 | 30,00 | - | - |
| 3 | PQ | 0,896 | -17,28 | - | - | 55,0 | 13,0 |
| 4 | PQ | 0,991 | -13,12 | - | - | 0,00 | 0,00 |
| 5 | PQ | 0,924 | -21,07 | - | - | 30,0 | 18,0 |
| 6 | PQ | 0,960 | -16,57 | - | - | 50,0 | 5,00 |
| Total | | | | 145,0 | 73,28 | 135,00 | 36,00 |

Equivalente externo via injeção de potência constante.

- Sistema externo: composto pelas barras 2 e 3;
- Solução trivial: substituir os fluxos entre barras de fronteira e o sistema externo por injeções equivalentes;
- Injeção de potência aparente na barra 4: $0,0+j0,0$ Mva;
- Injeção de potência aparente na barra 5: $-30,0 - j18,0$ MVA;
- Fluxo de potência aparente saindo da barra 4 através da linha 4-3: $53,27 + j5,33$ MVA;
- Fluxo de potência aparente saindo da barra 5 através da linha 5-2: $-6,21 - j14,92$ MVA;

O diagrama unifilar do equivalente baseado em injeções na fronteira é mostrado na figura 2.4.

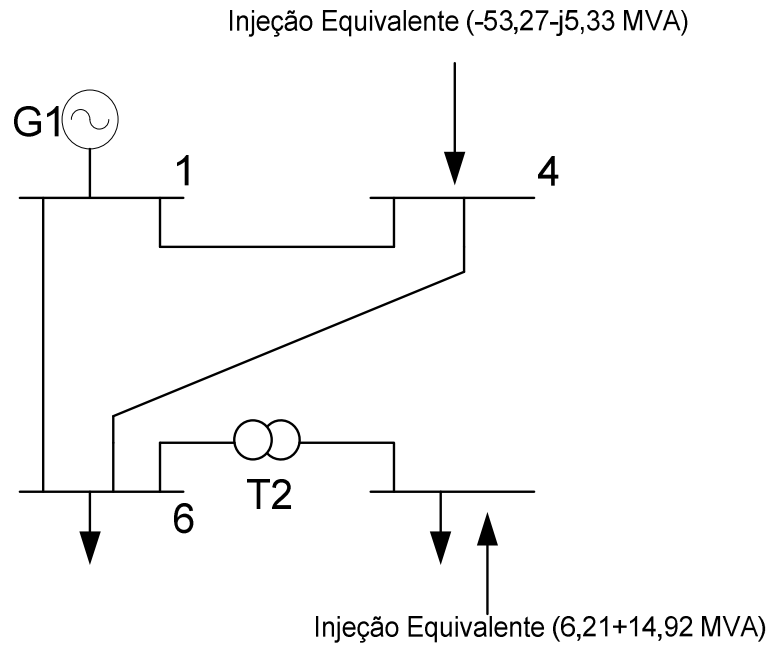


Figura2.4-Sistema de 6 barras reduzido

A tabela 2.2 apresenta os resultados do fluxo de potência com equivalente baseado em injeção na fronteira.

Tabela 2.2 – Solução de fluxo de potência com o sistema reduzido

| Barra | Tipo | V (V) | ζ (graus) | P_g (MW) | Q_g (Mvar) | P_d (Mw) | Q_d (Mvar) |
|-------|-----------|-------|-----------------|------------|--------------|------------|--------------|
| 1 | Interno | 1,100 | 0,0000 | 135,0 | 43,28 | - | - |
| 2 | Eliminado | - | - | - | - | - | - |
| 3 | Eliminado | - | - | - | - | - | - |
| 4 | Fronteira | 0,991 | -13,12 | - | - | 53,27 | 5,33 |
| 5 | Fronteira | 0,924 | -21,07 | - | - | 23,79 | 3,08 |
| 6 | Interno | 0,960 | -16,57 | - | - | 50,0 | 5,00 |
| Total | | | | 135,78 | 43,02 | 127,06 | 13,41 |

As injeções equivalentes de fronteira podem ser vistas como:

$$P_k^{eq} + jQ_k^{eq} = \sum (\text{fluxos de potência nos ramos conectados a } k + \text{injeções})$$

2.2.6 - Equivalente dinâmico de máquinas síncronas

Nesta seção é apresentado o modelo de máquina síncrona adotado neste trabalho. Os parâmetros derivados, os quais são utilizados no processo de identificação, são definidos em função dos parâmetros primitivos do modelo. Finalmente, são apresentados os parâmetros necessários a serem identificados de forma a especificar completamente as características elétricas de uma máquina síncrona de polos salientes.

2.2.6.1- Desenvolvimento do modelo de máquina síncrona.

O modelo de máquina síncrona utilizado nesta dissertação foi o modelo de gerador síncrono de polos salientes para estudos de estabilidade de sistemas de potência [21]. Esse modelo é adequado para representação de geradores síncronos hídricos e que possuem rotor laminado construídos com barras amortecedoras localizadas nas faces dos polos.

Estas barras amortecedoras normalmente são conectadas de forma a criar um circuito de amortecimento no formato de uma gaiola de esquilo que é efetivo tanto no eixo direto quanto no eixo em quadratura. Desta forma, o rotor será representado por três enrolamentos, sendo eles: enrolamento de campo (F), enrolamento amortecedor de eixo direto (D) e o enrolamento amortecedor de eixo em quadratura (Q). O estator é representado pelo enrolamento de eixo direto (d) e pelo enrolamento de eixo em quadratura (q). De forma a facilitar as discussões ao longo do desenvolvimento desta dissertação, neste capítulo será brevemente apresentado o desenvolvimento do modelo utilizado de máquina síncrona identificando as relações entre os parâmetros operacionais e os parâmetros primitivos [14].

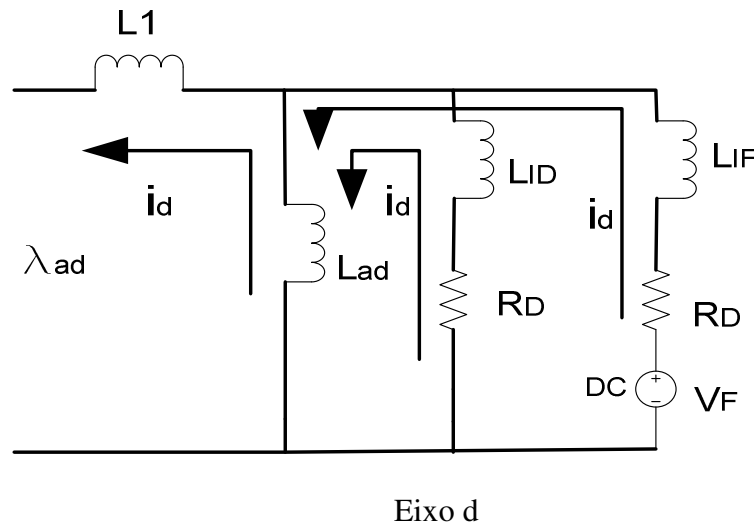
O desenvolvimento será feito a partir do modelo nas variáveis de Park [22,23], representado em valores por unidade (pu), normalizado na base X_{ad} recíproca [24] e desprezando o acoplamento adicional entre os circuitos do rotor. Os detalhes das transformações d-q, representação em pu, circuitos equivalentes e análise em regime permanente e transitório são descritos na referência [22]. A referência [25] apresenta a transformação de Park e detalha a derivação das equações da máquina síncrona referidas ao rotor. Em [26] é fornecida uma análise extensa de máquinas síncronas e das equações no eixo direto e no eixo em quadratura.

A partir das premissas apresentadas, as equações de tensão e de enlace de fluxo dos circuitos do estator e do rotor são mostradas na Tabela 2.3:

Tabela 2.3 – Modelo do gerador síncrono de polos salientes

| Estator | Rotor |
|---|---|
| $v_d = -R_a \cdot i_a - \omega \cdot \lambda_q + \frac{d}{dt} \lambda_d$ | $v_{fd} = R_{fd} \cdot i_{fd} + \frac{\partial \lambda_{fd}}{\partial t}$ |
| $v_q = -R_a \cdot i_q + \omega \cdot \lambda_d + \frac{d}{dt} \lambda_q$ | $0 = v_{ld} = R_{ld} \cdot i_{ld} + \frac{\partial \lambda_{ld}}{\partial t}$ |
| - | $0 = v_{lq} = R_{lq} \cdot i_{lq} + \frac{\partial \lambda_{lq}}{\partial t}$ |
| $\lambda_d = -(L_{ad} + L_l) \cdot i_d + L_{ad} \cdot i_{ld} + L_{ad} \cdot i_{fd}$ | $\lambda_{fd} = -L_{ad} \cdot i_d + L_{ad} \cdot i_{ld} + (L_{fd} + L_{ad}) \cdot i_{fd}$ |
| $\lambda_q = -(L_{aq} + L_l) \cdot i_q + L_{aq} \cdot i_{lq}$ | $\lambda_{ld} = -L_{ad} \cdot i_d + (L_{ad} + L_{ld}) \cdot i_{ld} + L_{ad} \cdot i_{fd}$ |
| - | $\lambda_q = -L_{aq} \cdot i_q + (L_{aq} + L_l) \cdot i_{lq}$ |

Este sistema de equações pode ser representado pelos circuitos equivalentes da Figura 2.5:



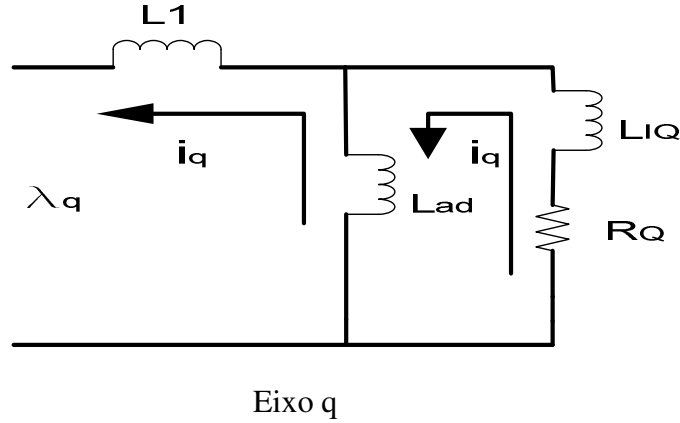


Figura 2.5: Circuitos equivalentes de eixo direto (d) e em quadratura (q)

As indutâncias e resistências dos circuitos equivalentes apresentados na Figura 2.5, denominados parâmetros primitivos da máquina síncrona, são descritos abaixo:

R_a : Resistência do enrolamento da armadura (pu).

L_{ad} : Indutância mútua de eixo direto entre a armadura e o rotor (pu).

L_{aq} : Indutância mútua de eixo em quadratura entre a armadura e o rotor (pu).

L_l : Indutância de dispersão (pu).

R_f : Resistência do enrolamento de campo (pu).

L_{lf} : Indutância de dispersão do enrolamento de campo (pu).

R_D : Resistência do enrolamento amortecedor do eixo direto (pu).

L_{lD} : Indutância de dispersão do enrolamento amortecedor de eixo direto (pu).

R_Q : Resistência do enrolamento amortecedor de eixo em quadratura (pu).

L_{lQ} : Indutância de dispersão do enrolamento amortecedor de eixo em quadratura (pu).

O procedimento, agora, consiste em aplicar o cálculo operacional, isto é, a Transformada de Laplace ao modelo de Park apresentado na Tabela 2.2. Adotando $A(s) = \zeta(a)$, e sabendo que o tempo está em pu – isto implica que as constantes de tempo aqui derivadas devem se divididas por ω_{base} para serem expressas em segundos – tem-se:

$$V_F = S\lambda_F(S) + r_F I_F \quad (2.11)$$

$$0 = S\lambda_D(S) + r_D I_D \quad (2.12)$$

$$0 = S\lambda_Q(S) + r_Q I_Q \quad (2.13)$$

$$\lambda_d(S) = -L_d I_d + L_{ad} I_F + L_{ad} I_D \quad (2.14)$$

$$\lambda_q(S) = -L_q I_q + L_{aq} I_q \quad (2.15)$$

$$\lambda_F(S) = -L_{ad} I_d + L_F I_F + L_{ad} I_D \quad (2.16)$$

$$\lambda_D(S) = -L_{ad} I_d + L_{ad} I_F + L_D I_D \quad (2.17)$$

$$\lambda_Q(S) = -L_{aq} I_q + L_Q I_Q \quad (2.18)$$

sendo

$$L_d = L_{ad} + L_l$$

$$L_F = L_{ad} + L_{lF}$$

$$L_D = L_{ad} + L_{lD}$$

$$L_Q = L_{aq} + L_{lQ}$$

Combinando-se expressões, pode-se escrever:

• Eixo q:

$$\lambda_q = -G_3(S) I_q \quad (2.19)$$

sendo

$$G_3(S) = L_q - \frac{sL_{aq}^2}{r_Q + sL_Q}$$

• Eixo d:

$$\lambda_d(S) = G_1(S) V_F - G_2(S) I_d \quad (2.20)$$

sendo

$$G_1(S) = \frac{L_{ad}(r_D + sL_D) - sL_{ad}^2}{-s^2 L_{ad}^2 + (r_D + sL_D)(r_F + sL_F)}$$

$$G_2(S) = \left(L_d - \frac{sL_{ad}^2(r_D + sL_D) - 2s^2 L_{ad}^3 + sL_{ad}^2(r_F + sL_F)}{-s^2 L_{ad}^2 + (r_D + sL_D)(r_F + sL_F)} \right)$$

Pode-se perceber que $G_1(s)$, $G_2(s)$ e $G_3(s)$ se apresentam como funções de transferência entre as excitações e os enlaces de fluxo, e as relações (2.19) e (2.20) podem ser representadas conforme o diagrama da Figura 2.6:

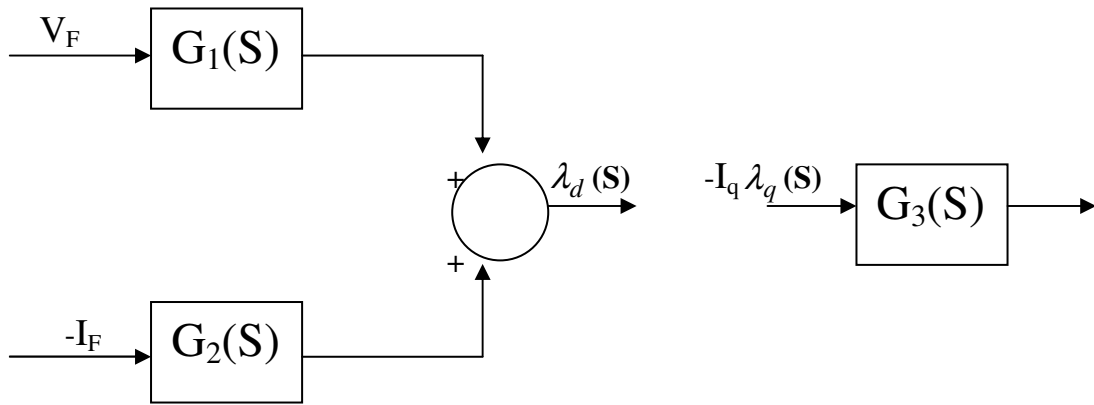


Figura 2.6-Diagrama operacional da máquina síncrona

$G_2(s)$ e $G_3(s)$ relacionam enlace de fluxo e corrente, sendo chamadas indutâncias operacionais e são anotadas na literatura por: $G_2(s) \rightarrow L_d(s)$ e $G_3(s) \rightarrow L_q(s)$.

O desenvolvimento dos parâmetros operacionais da máquina síncrona, com enrolamentos F, D e Q no rotor está terminado. Estes parâmetros estão em função dos parâmetros básicos da máquina. O que será feito a seguir é um rápido comentários dos parâmetros operacionais de modo a se obter expressões para os parâmetros derivados, os quais são utilizados nos modelos de máquina síncrona para estudos de estabilidade eletromecânica. Iniciaremos o desenvolvimento com $G_1(s)$, o qual, através de manipulações algébricas, pode ser reescrito como:

$$G_1(S) = G_0 \frac{1 + ST_{kD}}{1 + s(T_F + T_D) + s^2 T_F T_3} \quad (2.21)$$

sendo

$$G_0 = \frac{L_{ad}}{r_F} T_D = \frac{L_D}{r_D} T_{KD} = \frac{L_{lD}}{r_D} T_F = \frac{L_F}{r_F} T_3 = \frac{1}{r_D} \left(L_{lD} + \frac{L_{ad} L_{lF}}{L_F} \right)$$

Pode-se ver que as diversas constantes de tempo acima, em essência, elas são constates de tempo a vazio, ou seja, o estator é um circuito aberto. Deve-se lembrar de que as constantes de tempo estão em radianos e devem, portanto, ser divididas pela velocidade base em radianos/segundo (ω_{base}).

Trabalhando-se com $L_d(s)$ chega-se a:

$$L_d(S) = L_d \frac{1 + s(T_4 + T_5) + s^2 T_4 T_6}{1 + s(T_F + T_D) + s^2 T_F T_3} \quad (2.22)$$

sendo

$$T_4 = \frac{1}{r_F} \left(\frac{L_{ad} L_l}{L_{ad} + L_l} + L_{lF} \right) T_5 = \frac{1}{r_D} \left(\frac{L_{ad} L_l}{L_{ad} + L_l} + L_{lD} \right)$$

$$T_6 = \frac{1}{r_D} \left(L_{lD} + \frac{L_{ad} L_{ld} L_{lF}}{L_{lF} L_{ad} + L_{lF} L_l + L_{ad} L_l} \right)$$

Pode-se ver que, as diversas constantes de tempo acima, neste caso, são constantes de tempo da máquina com a armadura em curto-circuito. Novamente, essas constantes de tempo devem ser divididas pela velocidade base em radianos/segundo (ω_{base}).

O mesmo procedimento pode ser desenvolvido para o eixo q, obtendo-se:

$$L_q(S) = L_q \frac{1 + sT_7}{1 + sT_Q} \quad (2.23)$$

sendo

$$T_Q = \frac{L_Q}{r_Q} T_7 = \frac{1}{r_Q} \left(L_{lQ} \frac{L_l L_{aq}}{L_q} \right)$$

As constantes de tempo T_Q e T_7 estão relacionadas, respectivamente, ao circuito equivalente do eixo em quadratura com a armadura em circuito aberto e em curto-circuito. As funções de transferência (2.21), (2.22) e (2.23) representam os parâmetros operacionais da máquina síncrona dentro das simplificações já mencionadas. Outro passo neste estudo é dado analisando-se os polos e zeros destas funções de transferência, os quais recebem denominações particulares na literatura.

$$G_1(S) = G_0 \frac{1 + ST_{kD}}{1 + s(T'_{do} + T''_{do}) + s^2 T'_{do} T''_{do}} \quad (2.24)$$

$$L_d(S) = L_d \frac{1 + s(T'_d + T''_d) + s^2 T'_d T''_d}{1 + s(T'_{do} + T''_{do}) + s^2 T'_{do} T''_{do}} \quad (2.25)$$

$$L_q(S) = L_q \frac{1 + sT''_q}{1 + sT''_{qo}} \quad (2.26)$$

Comparando-se (2.18), (2.19) e (2.20) com (2.15), (2.16) e (2.17), tem-se que:

$$T'_{do} + T''_{do} = T_D + T_F$$

$$T'_{do} + T''_{do} = T_D T_3$$

A solução deste sistema levaria a expressões complicadas para T'_{do} e T''_{do} em função de T_D , T_F e T_3 . Porém, analisando-se as expressões para T_D , T_F e T_3 e levando-se em conta que $R_D \gg R_F$, tem-se que $T_F > T_D > T_3$. Deste modo, costuma-se utilizar valores aproximados, onde:

$T'_{do} = T_F \longrightarrow$ Constante de tempo transitória de eixo direto, em circuito aberto.

$T''_{do} = T_3 \longrightarrow$ Constante de tempo subtransitória de eixo direto, em circuito aberto.

Seguindo o mesmo procedimento, tem-se.

$T'_d = T_4 \longrightarrow$ Constante de tempo transitória de eixo direto, em curto-circuito.

$T''_d = T_6 \longrightarrow$ Constante de tempo subtransitória de eixo direto, em curto-circuito.

Para o eixo q a comparação é direta e tem-se:

$T''_{qo} = T_7 \longrightarrow$ Constante de tempo subtransitória de eixo em quadratura, em curto-circuito.

$T'''_{qo} = T_Q \longrightarrow$ Constante de tempo subtransitória de eixo em quadratura, em circuito aberto.

Desta forma, pode-se escrever:

$$G_1(S) = G_0 \frac{1 + ST_{kD}}{(1 + sT'_{do})(1 + sT''_{do})} \quad (2.27)$$

$$L_d(S) = L_d \frac{(1 + sT'_d)(1 + sT''_d)}{(1 + sT'_{do}) + (1 + sT''_{do})} \quad (2.24)$$

$$L_q(S) = L_q \frac{1 + sT''_q}{1 + sT''_{qo}} \quad (2.25)$$

As equações apresentadas na seção acima possuem resistências e reatâncias dos circuitos da armadura e do rotor como parâmetros, os quais são denominados parâmetros primitivos ou parâmetros básicos. Embora estes parâmetros especifiquem completamente as características elétricas da máquina síncrona, eles não podem ser diretamente determinados através de ensaios.

Portanto, é conveniente modelar matematicamente as máquinas síncronas através de parâmetros derivados, obtidos através da análise da resposta estatórica da máquina perante ensaios padronizados, como aqueles descritos em [25]. As características de interesse em uma modelagem de máquina síncrona para estudos de estabilidade são as indutâncias (ou reatâncias) vistas dos terminais da máquina, as quais associadas às correntes elétricas de frequência fundamental durante os regimes permanente, transitório e subtransitório da resposta estatórica perante um distúrbio. Além dessas indutâncias, as correspondentes constantes de tempo que determinam a taxa de decaimento das tensões e correntes estatóricas formam o conjunto de parâmetros derivados utilizados na especificação das características elétricas de uma máquina síncrona [26].

Os parâmetros derivados podem ser divididos em subgrupos de acordo com o período da resposta estatórica que mais fortemente influenciam como exemplificados na Tabela 2.4.

Tabela 2.4: Parâmetros derivados de uma máquina síncrona.

| | | |
|-----------------------------------|-------------------------|--|
| Parâmetros Síncronos | R_a | Resistência da armadura (pu) |
| | L_d | Indutância síncrona de eixo direto (pu) |
| | L_q | Indutância síncrona de eixo em quadratura (pu) |
| | L_l | Indutância de dispersão (pu) |
| Parâmetros Transitórios | L'_d | Indutância transitória de eixo direto (pu) |
| | L'_q | Indutância transitória de eixo em quadratura (pu) |
| | T'_{do} | Constante de tempo transitória de eixo direto em circuito aberto (s). |
| | T'_{qo} | Constante de tempo transitória de eixo em quadratura em circuito aberto (s) |
| Parâmetros subtransitórios | L''_d | Indutância subtransitória de eixo direto (pu) |
| | L''_q | Indutância subtransitória de eixo em quadratura (pu) |
| | T''_{do} | Constante de tempo subtransitória de eixo direto em circuito aberto (s) |
| | T''_{qo} | Constante de tempo subtransitória de eixo em quadratura em circuito aberto (s) |

Os parâmetros da máquina que influenciam no período de decaimento mais rápido da resposta estatórica são denominados parâmetros subtransitórios, enquanto aqueles que influenciam no período de decaimento mais lento são denominados parâmetros transitórios. Finalmente, os parâmetros que determinam a característica da resposta em regime permanente são denominados parâmetros síncronos.

A indutância transitória de eixo em quadratura e a constante de tempo transitória de eixo em quadratura em circuito aberto, representados respectivamente por L'_q e T'_{qo} , não são utilizadas em modelos de máquinas síncronas de pólos salientes, pois, devido às características físicas dos rotores, este tipo de máquina não possui um segundo enrolamento amortecedor representado em seu circuito equivalente de eixo em quadratura.

Além disso, em estudos de estabilidade eletromecânica é comum desconsiderar a saliência subtransitória, ou seja, assumir $L''_d = L''_q$. Esta simplificação é motivada pelo fato destes parâmetros possuírem valores muito próximos, além de facilitar a conexão do modelo matemático da máquina síncrona ao modelo matemático da rede elétrica. Por conseguinte, o conjunto de parâmetros derivados que necessitam

ser estimados para a completa modelagem das características elétricas de uma máquina síncrona de polos salientes é definido por:

$$\theta = \left[R_a \ L_a \ L_q \ L_l \ L'_d \ L''_d \ T'_d \ T''_{do} \ T''_{qo} \right]^T \quad (2.20)$$

Capítulo 3 - Algoritmos Genéticos

3.1 Introdução

Os problemas de otimização em geral envolvem a escolha de um conjunto de variáveis para maximizar (ou minimizar) uma função, que representa o critério de otimização, o que pode ser feito por métodos determinísticos ou probabilísticos, através de uma busca no espaço multidimensional das variáveis do problema [31]. Muitos problemas têm métodos determinísticos convencionais eficazes, sejam eles analíticos numéricos ou enumerativos, mas eles podem falhar quando há não-linearidade, ruído, descontinuidade, inexistência de derivadas, multimodalidade, vários objetivos de otimização ou vastos espaços de busca (sem ponto de partida pré-estabelecido) [30-31-32].

Nessas situações, os métodos probabilísticos demonstram a sua utilidade, onde se destacam os Algoritmos Genéticos (AGs), que, baseados nos conceitos de genética e seleção natural, exploram espaços de busca de grandes dimensões e manipulam um grande número de restrições, fatores esses comuns em projetos. Os AGs possuem um processo bastante criativo, no qual, de um conjunto de possíveis soluções do problema, as melhores são selecionadas, de modo a aproveitar o que há de ótimo em cada uma para fazer recombinação e mutação, gerando soluções novas e, provavelmente, ainda melhores.

Esse refinamento iterativo é aplicado a problemas de todas as áreas, mostrando a flexibilidade dos AGs, que também são fáceis de hibridizar com outras técnicas [31]. Além disso, o custo computacional de implementação dos AGs é relativamente baixo, sendo um algoritmo simples e também facilmente paralelizável. Todos esses fatores têm tornado os AGs amplamente populares em áreas bem distintas, tais como engenharias, desenho industrial, pesquisa operacional, computação, bioquímica, biologia, composição musical e ciências sociais [33].

3.2 - Algoritmos Genéticos

Os algoritmos genéticos (AGs) são métodos de busca e otimização que simulam basicamente os processos naturais da evolução e da genética. Os indivíduos mais aptos possuem maior probabilidade de ter os seus genes propagados ao longo de sucessivas gerações por meio da combinação entre os genes dos indivíduos que

perduram na espécie, produzido novos indivíduos com uma melhor adaptação às características do seu meio ambiente [27].

O propósito geral dos AG independe da forma do domínio de busca, combinando elementos de busca dirigida e estocástica, onde é executado um balanço entre aproveitamento da melhor solução e exploração de novos pontos no espaço de busca. Assim, no início da busca, existe uma população altamente aleatória com grande diversidade, e aptidão média baixa (valor numérico médio considerando as funções objetivo da toda a população).

Através dos operadores probabilísticos de transição, a busca é feita explorando inicialmente todo o espaço de busca. Quando as soluções com altos valores das funções objetivo são obtidas, estes operadores executam a exploração na vizinhança destas soluções. O processo de exploração do espaço de busca é realizado principalmente pelo operador de seleção (denominado também operador de evolução). Porém, busca local (na vizinhança da solução) corresponde aos operadores de cruzamento e mutação (denominados também operadores genéticos). Nestes operadores, são manipuladas estruturas codificadas (cromossomos), que contém parte do conjunto ótimo de parâmetros, os quais são propagados pelos operadores probabilísticos ao longo do processo evolutivo do AG [37].

A seguir, são descritas as principais características que determinam o desempenho dos algoritmos genéticos:

- Os AGs trabalham com a codificação das variáveis independentes que definem a função objetivo. As variáveis independentes podem ser codificadas usando um sistema binário (um vetor de uns e zeros), números reais e outros. Na literatura, a representação codificada das variáveis independentes é denominada de cromossomo;
- Nos AGs, a busca começa a partir de uma população de possíveis (pontos do espaço de busca), e não a partir de um único ponto. A busca, feita desta forma, tem um paralelismo implícito [27]. No AG, cada indivíduo corresponde a uma estrutura de dados formada pelo vetor de variáveis independentes, o cromossomo, e o valor numérico da função objetivo;
- Precisam somente do valor numérico da função objetivo para guiar a busca; ao contrário do que acontece com os métodos determinísticos tradicionais de

otimização que requerem, além do valor numérico da função objetivo, outras informações para caracterizar a região de busca (como por exemplo, o gradiente da função);

- Utilizam regras de transição probabilísticas para obter novos indivíduos;

Os AGs são métodos de busca e otimização que simulam basicamente os processos naturais da evolução e da genética. Os indivíduos mais aptos possuem maior probabilidade de ter os seus genes propagados ao longo de sucessivas gerações por meio da combinação entre os genes dos indivíduos que perduram na espécie, produzindo novos indivíduos com uma melhor adaptação às características do seu meio ambiente [34].

O AG aplicado nesta dissertação é conhecido como Algoritmo Genético Simples, que abrange um conjunto de indivíduos ou população e um conjunto de operadores genéticos que atua sobre a população. Possui um número fixo de indivíduos, no qual as cadeias de caracteres estão em codificação real. Após analisar o problema a ser otimizado, deve-se definir a quantidade de indivíduos que terá a população, a formação cromossômica do indivíduo e as probabilidades de aplicação dos operadores genéticos. De acordo com a teoria da evolução, somente os indivíduos mais aptos de uma população sobrevivem, gerando descendentes.

O AG analisa um conjunto de soluções potenciais devidamente codificados que constitui a população, em seguida manipula os indivíduos mais aptos, utilizando dois operadores genéticos para a obtenção de uma população otimizada.

O programa com AG pode ser descrito pelo fluxograma mostrado na figura 3.1. Tendo definido os parâmetros, é escolhida uma população inicial e a qualidade ou aptidão desta população é determinada pela função objetivo. Em seguida, parte dos indivíduos é selecionada por elitismo para a próxima geração e o restante passa pelos operadores genéticos de cruzamento e mutação, originando novos indivíduos. Esse ciclo permanece até se atingido

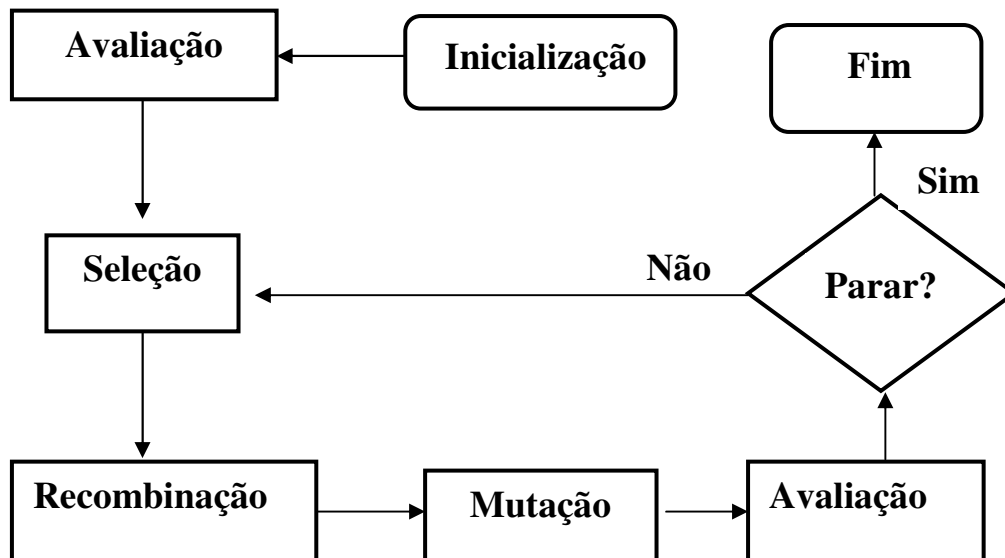


Figura 3.1 - fluxograma do AG

Na criação da população inicial deve se ter indivíduos com a maior variedade possível de genes para abranger todo espaço de busca, na qual são aplicados os operadores probabilísticos. Esses operadores possibilitam que uma dada solução ótima seja encontrada, devido à população de indivíduos explorar paralelamente o espaço de busca de soluções. Entretanto, para encontra a melhor solução, que nessa dissertação se considera o mínimo global, é necessário que se tenha uma população com variedade genética suficiente para evitar a estagnação prematura em mínimos locais.

3.3 - Operadores Genéticos

Os operadores genéticos imitam o processo hereditário dos genes para criar novos indivíduos em cada geração. Neste tópico, serão descritos os operadores genéticos de seleção, cruzamento e mutação, considerando a representação real dos cromossomos (ponto flutuante) utilizada neste trabalho.

3.3.1– Operador de seleção

A obtenção de melhores soluções ao longo do processo de otimização depende em primeiro lugar do operador de seleção, que imita o processo de seleção natural das espécies, onde os indivíduos mais fortes de adaptados ao ambiente são os que sobrevivem.

A seleção de indivíduos é feita em cada geração, aplicando-se sobre uma população de tamanho N (número de soluções consideradas no AG para a busca do ponto ótimo). Cada indivíduo tem uma probabilidade de escolha proporcional ao valor numérico da sua função objetivo. Assim, o operador de seleção é executado N vezes com a finalidade de escolher probabilisticamente os N melhores indivíduos sobre os quais serão aplicados os outros operadores (cruzamento e mutação).

Em [33] detalha os principais métodos de seleção desenvolvidos para escolher os indivíduos:

- Método da Roleta “*roulette-wheel*” ;
- Torneio Estocástico;
- Seleção Baseada em “*Ranking*” Geométrico Normalizado;
- Seleção de Boltzmann;
- Seleção de Corte;
- Seleção por Ordenação não Linear;
- Outros

Na presente dissertação, deu-se destaque ao método de seleção do tipo “*ranking*” geométrico normalizado, implementado na biblioteca GAOT “The Genetic Algorithm Optimization Toolbox”, desenvolvida em código MATLAB pela NCSU “*North Carolina State University*” [29]

3.3.2 - Operadores Genéticos de cruzamento

O operador de cruzamento é aplicado sobre cada par de indivíduos previamente selecionados. Atua especificamente inter-cambiando genes (componentes do cromossomo) entre os indivíduos. O cruzamento gera outros dois novos cromossomos possuindo características combinadas dos anteriores. O operador de cruzamento contribui para propagar partes da solução ótima contidas nestes cromossomos, para as seguintes gerações, mediante a uma taxa de cruzamento P_c , que controla o número esperado de indivíduos que serão submetidos para recombinação ou cruzamento.

Uma maior taxa ou probabilidade de cruzamento permite uma maior exploração do espaço de busca e reduz a chance de estacionar em um mínimo local. No entanto, se esta probabilidade for muito elevada, resultará em muitos indivíduos com

valores ruins para a sua função objetivo correspondente, resultando em um maior tempo computacional despendido na exploração de regiões não promissoras do espaço de busca. Logo, o valor da probabilidade de cruzamento deverá ter um compromisso entre a melhor exploração da região de busca e o menor tempo para explorá-la [27].

Quando o sistema em estudo for muito grande e complexo, geralmente a função matemática é do tipo multi-variável e multi-modal. Portanto, a utilização de uma representação binária que codifique uma quantidade considerável de parâmetros deste sistema poderia requerer muitos recursos computacionais na exploração do espaço de busca. Nesse caso, é conveniente usar operadores genéticos projetados para trabalhar com codificação real. A seguir, serão descritos os operadores de cruzamento mais utilizados no caso de cromossomos reais:

- Cruzamento Simples;
- Cruzamento Aritmético;
- Cruzamento Heurístico.

Em [33] relatam que os melhores resultados de problemas de otimização são conseguidos utilizando-se os operadores de cruzamentos aritméticos. Este decorreria deste argumento, na presente dissertação, utilizou-se o operador de cruzamento aritmético, implementado também na biblioteca GAOT.

3.3.3 - Operadores Genéticos de Mutação

A mutação é geralmente vista como um operador de “*background*”, responsável pela introdução e manutenção da diversidade genética na população [28]. Este operador altera arbitrariamente um ou mais componentes de uma estrutura escolhida entre a descendência, logo após o cruzamento, de forma a fornecer meios para introdução de novos elementos na população. Assim, a mutação assegura que a probabilidade de se chegar a qualquer ponto do espaço de busca nunca será zero.

O efeito da mutação é aumentar a diversidade da população reduzindo a probabilidade de estagná-la, por meio da introdução de genes (bons ou ruins) nos cromossomos. Os genes ruins podem ser eliminados na população por meio do operador de seleção.

A taxa ou probabilidade de mutação é definida como o percentual do número total de genes da população que irão multar, e que controla a quantidade de

novos genes que serão introduzidos na população. Se esta taxa for muito baixa, muitos cromossomos de populações anteriores deixarão de ser utilizados nas gerações seguintes. Se a taxa muito elevada, existirá maior aleatoriedade no processo de busca. Mas, fazendo analogia com a natureza, no AG a probabilidade de ocorrência de mutação, P_m , é baixa.

Os operadores genéticos de mutação mais utilizados na representação real das variáveis independentes são:

- Mutação uniforme;
- Mutação não uniforme;
- Mutação não uniforme múltipla.

No presente trabalho, foi utilizada a mutação não-uniforme, também implementado na biblioteca GAOT “*The Genetic Algorithm Optimization Toolbox*”, desenvolvida em código MATLAB. A análise teórica do operador mutação não-uniforme está detalhada no trabalho de [33].

3.4 – Codificação

A codificação não consta na Figura 3.1, porque não faz parte do funcionamento, mas sim da estrutura do AG, sendo o primeiro passo para aplicá-lo num problema real, e, se for inadequada, o problema pode ficar difícil ou até impossível para o AG [28]. Por outro lado, a codificação torna o AG independente dos parâmetros diretos do problema e, portanto, livre de eventuais restrições do espaço de solução inicial. Na codificação, as variáveis do problema são representadas, dentro do espaço de busca, por uma sequência de símbolos (genes), que advêm de um alfabeto finito de opções (alelos). Após a codificação, as variáveis são reunidas num conjunto, formando um cromossomo e um ou mais cromossomos associados formam um indivíduo. Para facilitar a compreensão e simplificar o tratamento computacional, é comum usar indivíduos com um só cromossomo de tamanho fixo e o conjunto desses indivíduos gerar uma população também de tamanho constante.

3.4.1 - Codificação do tipo binária

A estrutura simples e analogia direta com a genética natural fazem da codificação binária uma das mais usadas. No caso elementar, o alfabeto de alelos pode ser binário, 0 ou 1, e a dimensão da sequência que compõe o cromossomo depende da

precisão requerida. Se o problema é de valores contínuos e a variável é codificada no espaço discreto binário de base N, a decodificação, primeiramente converte a solução para decimal, X_d e, depois, usando (3), a transforma para o espaço de busca do problema, cujos limites são $X_{mín}$ e $X_{máx}$.

$$x = -x_{mín} + \frac{x_{máx} - x_{mín}}{2^N - 1} \cdot x_d \quad (3)$$

O uso da codificação binária dá origem a alguns problemas, como vetores muito extensos para representar indivíduos com alta precisão e o fenômeno conhecido por colinas de Hamming [27]. Se fenômeno consiste em grandes diferenças nas cadeias de “bits” que codificam dois números inteiros adjacentes, o que é enfatizado em ambientes dinâmicos e evidenciado em perturbações no “bit” mais significativo do parâmetro codificado, podendo causar um grande deslocamento no espaço de busca. Apesar de ampliar a busca em alguns casos, a presença de colinas de Hamming pode atrapalhar a otimização, pois, a menos de saltos aleatórios no espaço de busca codificado, haverá dificuldades de alcançar o ponto ótimo, se ele tem muitos “bits” diferentes de seus pontos vizinhos (grandes colinas).

3.4.2 - Codificação do tipo real

Os problemas físicos em geral têm melhor codificação se ela for semelhante ao parâmetro modelado [29], ou seja, na otimização de variáveis contínuas por natureza, é muito útil usar números reais, empregando a codificação real ou contínua. Se comparada à binária, a codificação real pode reduzir a complexidade computacional, aumentar a precisão sem restringir a codificação e facilitar a hibridização, pois não há transformações decimal-binário-decimal para formar cromossomos e calcular a aptidão, a precisão não depende de número de bits dos parâmetros e é mais compatível com outros algoritmos de otimização. A codificação real também minimiza o fenômeno das colinas de Hamming e, segundo [27], é mais rápida, mais precisa e tem resultados mais consistentes ao longo de repetições da execução do algoritmo.

Contudo, a codificação real possui um espaço de busca infinito (contínuo), exigindo certas adaptações na codificação e tornando os processos de recombinação e mutação mais complexos. Muitas vezes, essa complexidade requer soluções específicas, o que restringe a característica de flexibilidade proposta nos AGs, onde problemas distintos são tratados usando poucas ou nenhuma alteração. Vale ressaltar que alguns

projetos com grande variedade de parâmetros e alto tempo de processamento podem utilizar indivíduos com cromossomos de codificação híbrida, isto é, contendo partes binárias e partes reais, de acordo com as variáveis contidas no problema [29].

Capítulo 4 - Metodologia Proposta

4.1 – Introdução

Este capítulo visa apresentar uma metodologia de cálculo de equivalentes dinâmicos de sistemas de potência utilizando algoritmos genéticos. O método consiste em uma formulação multiobjetiva solucionada por um AG para minimizar os erros quadráticos dos ângulos das máquinas da área interna e das potências ativas e reativas entre o sistema elétrico completo e o sistema elétrico reduzido [7].

A técnica proposta, com base no algoritmo genético, substitui o modelo original por um de ordem reduzida, preservando o significado físico das variáveis de estado retidos. O equivalente dinâmico baseado em AG complementa o equivalente estático baseado na delimitação das áreas geográficas do sistema elétrico de potência em função da jurisdição das empresas de energia elétrica. Esse equivalente estático é projetado para compensar a discrepância entre o modelo de sistema completo e o equivalente reduzido desenvolvido usando o software comercial ANAREDE, fornecendo injeções de alimentação adequada para todas as barras de fronteira.

A figura 4.1 ilustra as ferramentas utilizadas para a simulação do equivalente dinâmico e o processo de simulação.

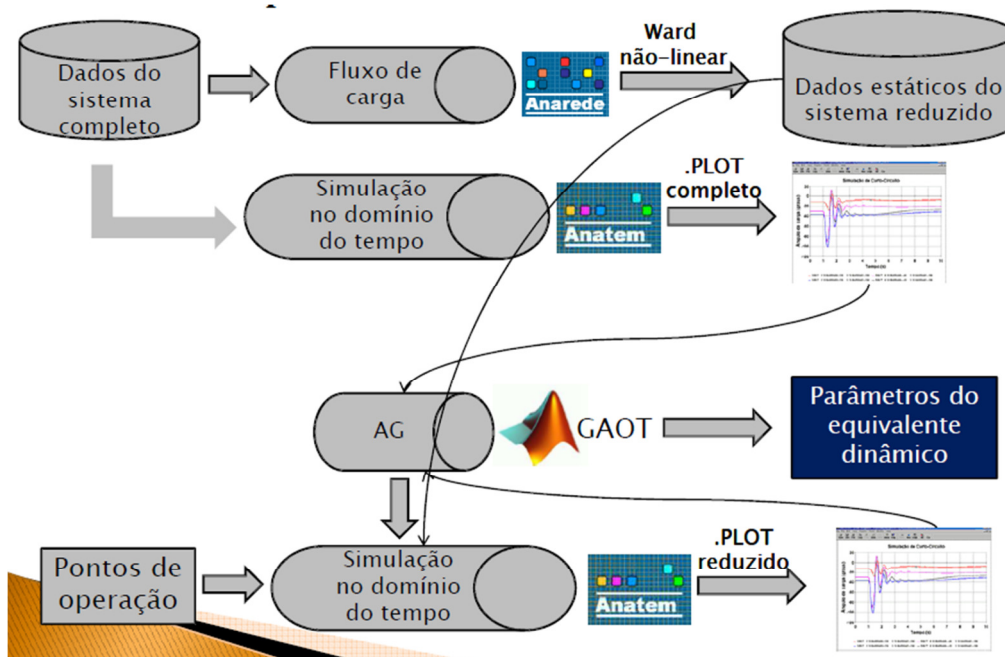


Figura 4.1- Ferramentas computacionais utilizadas

4.2 - Metodologia

A técnica de obtenção dos parâmetros do equivalente dinâmico baseia-se nas respostas dinâmicas fornecidas por meio de simulações no domínio do tempo, quando se aplica um curto-circuito, simultaneamente, em cada uma das barras de fronteiras entre as áreas interna e externa.

A busca dos parâmetros é formulada como um problema de otimização multi-objetivo, cujas grandezas são monitoradas nas barras de fronteira e nos geradores síncronos pertencentes à área interna, de tal forma que os valores observados para o modelo de sistema completo sejam iguais aos obtidos para o sistema com equivalente. A função objetivo é definida como a seguir:

$$\text{Min} \sum_{i=1}^{N_{po}} \sum_{j=1}^{N_i} \left\{ \left| P_{k_orig}(t) - P_{k_equiv}(t) \right| + \left| Q_{k_orig}(t) - Q_{k_equiv}(t) \right| + \left| \delta_{m_orig}(t) - \delta_{m_equiv}(t) \right| \right\} \quad (4.1)$$

Onde: $P_{k_orig}(t)$ e $Q_{k_orig}(t)$ são as potências ativa e reativa injetadas/absorvidas nas barras de fronteira do sistema completo; $P_{k_equiv}(t)$ e $Q_{k_equiv}(t)$ são as potências ativa e reativa injetadas/absorvidas nas barras de fronteira do sistema reduzido; $\delta_{m_orig}(t)$ e $\delta_{m_equiv}(t)$ são os ângulos relativos dos rotores das máquinas pertencentes à área interna dos sistemas completo e reduzido, respectivamente. N_{po} é número de pontos de operação e N_i é o número de iterações na simulação no domínio do tempo.

Em (4.1), pode ser adicionada também parcela correspondente para controle dos desvios de tensão na barra de fronteira. A introdução desse termo, apesar de propiciar maior precisão ao modelo de equivalente, restringe mais a busca dos parâmetros ótimos. Conseqüentemente, dificulta o processo de cálculo visando à convergência do problema. A busca dos parâmetros ótimos desenvolvido neste trabalho segue basicamente o princípio ilustrado no diagrama de blocos da figura 4.1.

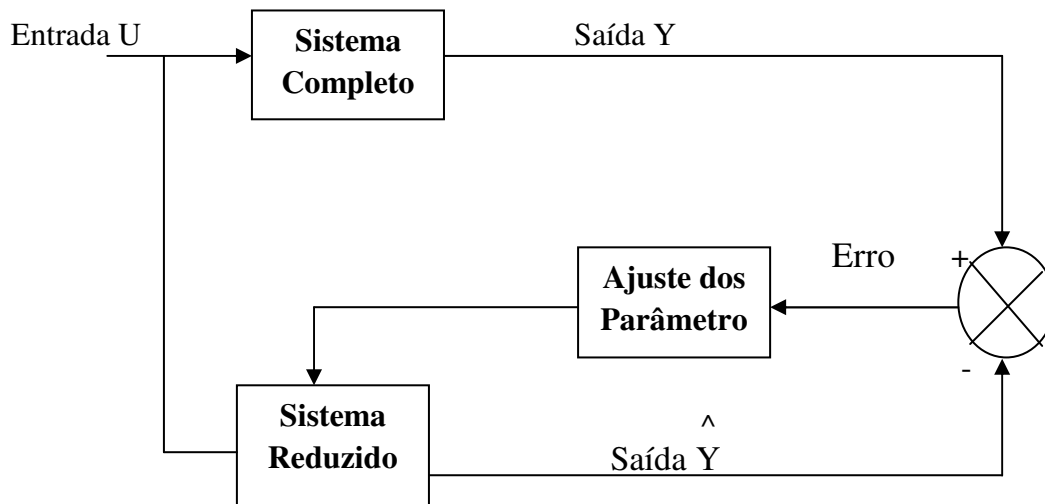


Figura 4.2- Processo de ajuste dos parâmetros

Na estrutura mostrada na figura 4.1, tanto o bloco do sistema completo quanto o bloco do sistema reduzido possuem a mesma entrada U . Assim ambas as saídas podem ser comparadas. Se as saídas dos blocos do sistema completo e do sistema reduzido forem diferentes, um erro é verificado e pelo AG o ajuste é obtido. O processo é repetido até que ambas as saídas estejam próximas ou dentro de uma tolerância aceitável.

A seguir, é descrita a metodologia proposta por meio de um código com os seguintes passos:

- Passo 1: Calcula-se o equivalente estático do sistema elétrico pela área de delimitação do sistema reduzido a ser estudado;
- Passo 2: Realiza-se as simulações no domínio do tempo do sistema completo original para diferentes condições operacionais, para posterior aquisição das variáveis $P_{k_orig}(t)$, $Q_{k_orig}(t)$ e $\delta_{m_orig}(t)$.
- Passo 3: Inicia-se o processo gerando aleatoriamente 100 indivíduos da população inicial. Os valores numéricos de cada parâmetro estão restritos a valores máximos e mínimos;
- Passo 2: Uma vez gerada as componentes de cada cromossomo da população inicial, procede-se a avaliação da função objetivo descrita na equação (4.1) por meio da simulação no domínio do tempo;

- Passo 3: Após a avaliação inicial ser concluída, os operadores genéticos do AG são aplicados, para se obter novos indivíduos, no espaço de busca da solução ótima;
- Passo 4 : o valor da função objetivo é calculado para cada geração, avaliando-se a evolução do AG. O processo de otimização é finalizado quando algum critério de parada é satisfeito. Na presente dissertação, o critério de parada considerado corresponde ao número máximo de gerações.
- Passo 5: Se o critério de convergência não é satisfeito, o processo iterativo ao passo 2.

Com a finalidade de descrever melhor a metodologia proposta, um fluxograma do procedimento iterativo é apresentado na figura 4.2.

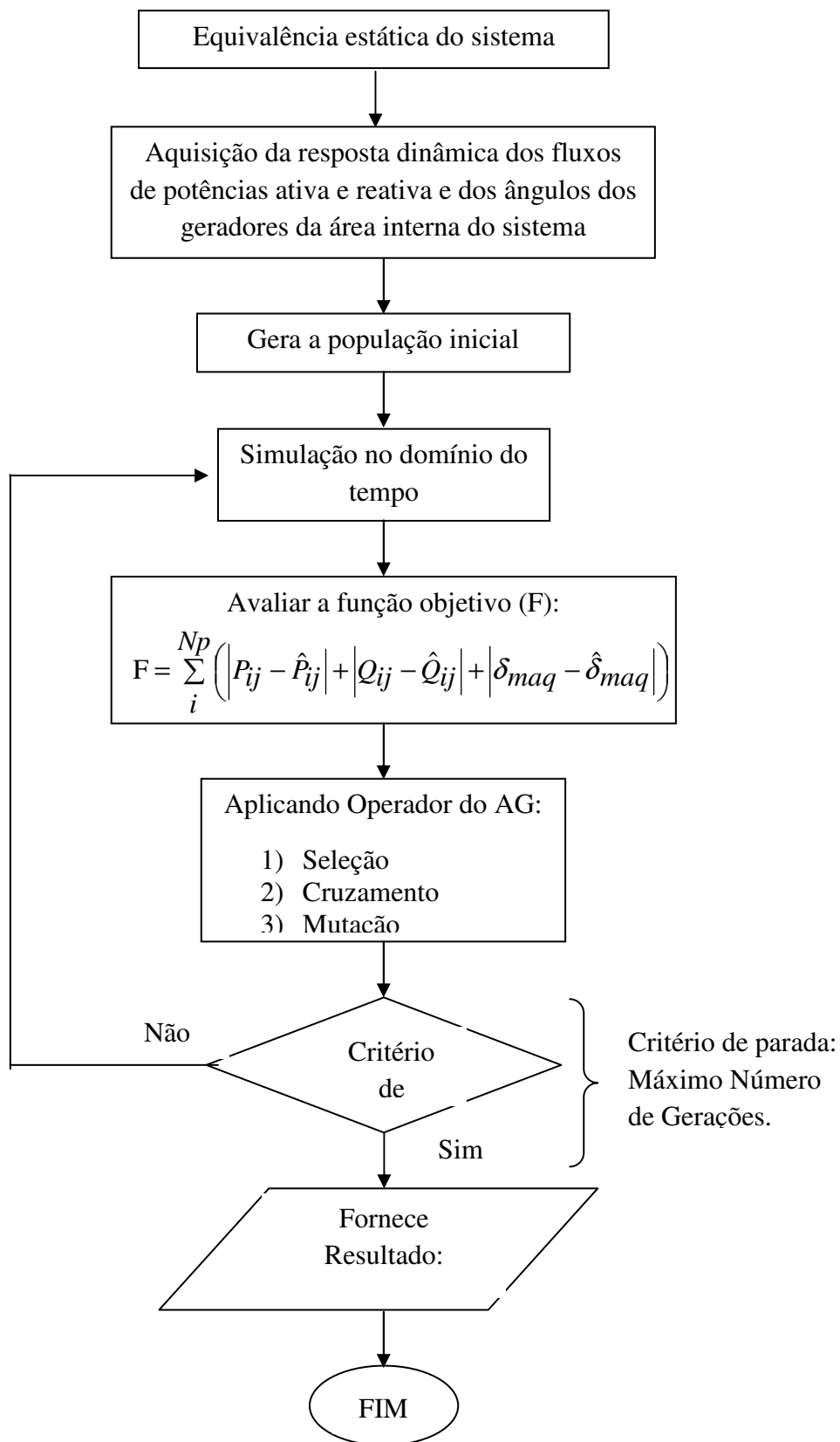


Figura 4.3– Fluxograma da metodologia proposta

A metodologia aqui desenvolvida pode ser aplicada em qualquer sistema elétrico de grande porte que seja possibilite a desagregação em dois sistemas (um externo e um interno), mantendo intactos os componentes (barras, geradores, linhas, transformadores, etc) do sistema interno.

Capítulo 5 - Resultados

5.1-Introdução

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados fornecidos pelo uso da metodologia proposta para cálculo de equivalentes dinâmicos de sistemas de potência usando algoritmos genéticos, os quais buscam identificar os parâmetros do modelo de geradores síncronos de polos salientes conectados nas barras de fronteiras. A metodologia foi testada no sistema duas áreas do IEEE e no Sistema Interligado Nacional (SIN), já considerando a interligação Tucuruí-Manaus-Macapá ao subsistema norte.

Inicialmente, a área interna em estudo é delimitada para posterior cálculo dos equivalentes estáticos por meio do método do Ward não-linear com o auxílio do programa ANAREDE. Em seguida, os equivalentes dinâmicos são calculados com o auxílio dos programas ANATEM e GAOT, considerando os patamares de carga leve, media e pesada.

5.2- Sistema Duas Áreas

O sistema duas áreas, considerado de pequeno porte neste estudo, possui 11 barras, 4 geradores, 10 linhas e 4 transformadores, e é originalmente descrito na referência [13]. A figura 5.1 ilustra o diagrama unifilar do sistema duas áreas, com área externa tracejada (pertencente à área 1) a ser substituída por um equivalente conectado a área interna em estudo.

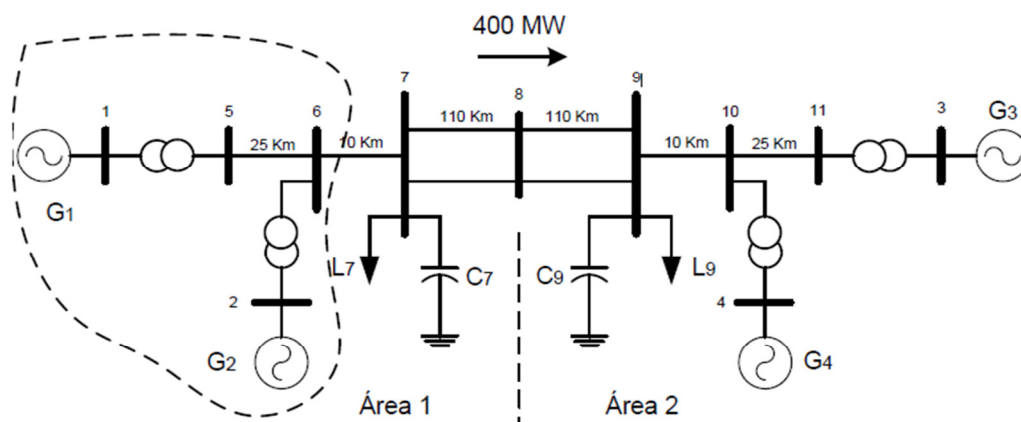


Figura 5.1 – Diagrama unifilar do sistema duas áreas

A área tracejada foi reduzida à barra 7 por meio do método de Ward não-linear sem comprometer os valores do fluxo de carga. Como os fluxos de potência fluem da área 1 para a área 2, foi conectado um gerador equivalente na barra 7 que será denominada de barra de fronteira. Esta barra foi modificada para uma barra do tipo PV, pois esses tipos de barra são, geralmente, utilizados para representar barras de geração, mantendo-se os valores do módulo da tensão e da potência ativa injetada pelo gerador equivalente. A figura 5.2 ilustra o diagrama unifilar do sistema duas áreas com o equivalente dinâmico conectado na barra 7.

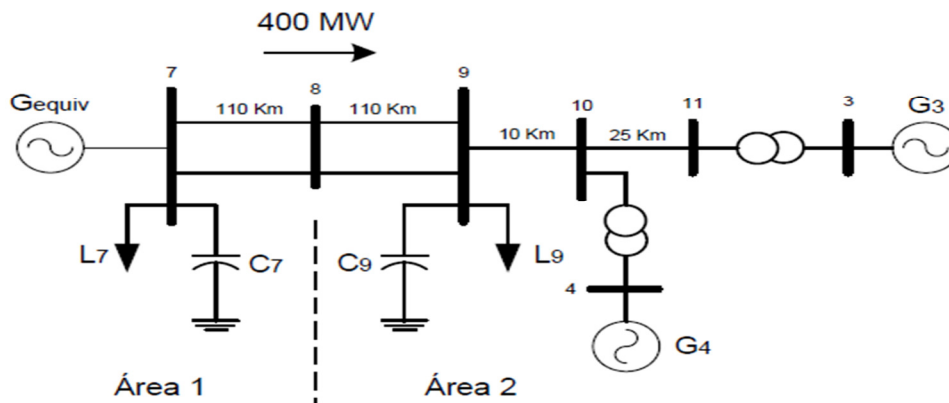


Figura 5.2 – Diagrama Unifilar do sistema Duas Áreas equivalente

Para calcular o equivalente dinâmico conectado a barra 7 do sistema duas áreas, inicialmente são definidos os limites máximos e mínimos dos parâmetros do gerador síncrono. Posteriormente, é aplicado um curto-circuito trifásico de 100 ms na barra de fronteira (barra 7) em $t=1,0$ s, seguido da abertura do circuito entre as barras 7 e 8, considerando três condições operacionais distintas (carga leve, média e pesada). O tempo de simulação no domínio do tempo para cada condição operacional é de 15 s.

O procedimento de identificação dos parâmetros do equivalente dinâmico conectado a barra 7 do sistema duas áreas foi realizado em uma estação de trabalho com um microcomputador com 2,4 GHz de velocidade de processamento 4 Gb de memória RAM. O tempo de processamento para obtenção dos parâmetros foi de 12 minutos. O procedimento de otimização é finalizado quando o número máximo de gerações é alcançado, onde o melhor indivíduo da população pertence à última geração da solução.

A tabela 5.1 mostra os parâmetros de máquinas do gerador equivalente obtidos pelo algoritmo genético.

Tabela 5.1- Parâmetros da máquina equivalente, conectada a barra 7 do sistema duas áreas, obtidos pelo algoritmo genético

| | Ld | Lq | L'd | L''d | Ll | T'd | T''d | T''q | Ra | H |
|---|-------|-------|------|------|-------|------|------|------|------|------|
| Parâmetros otimizados pelo algoritmo genético | 152,9 | 165,6 | 33,5 | 15,7 | 10,99 | 8,10 | 0,02 | 0,04 | 0,17 | 5,80 |

O espaço de busca (limites máximos e mínimos) definido para cada parâmetro do equivalente dinâmico é apresentado na tabela 5.2, cujos valores foram escolhidos de acordo com os valores típicos de parâmetros de máquinas síncronas de polos salientes [13].

Tabela 5.2 – Definição dos limites máximos e mínimos dos parâmetros da máquina.

| | Ld | Lq | L'd | L''d | Ll | T'd | T''d | T''q | Ra | H |
|---------------|-----|-----|-----|------|----|-----|------|------|------|-----|
| Limite máximo | 230 | 230 | 40 | 25 | 20 | 10 | 0,05 | 0,05 | 0,5 | 20 |
| Limite mínimo | 100 | 100 | 15 | 12 | 10 | 3,0 | 0,02 | 0,02 | 0,15 | 1,0 |

As figuras 5.3, 5.4 e 5.5 mostram o comportamento do ângulo do rotor do gerador 4 relativo ao gerador 3, para os cenários de carga leve, média e pesada, respectivamente. Observa-se aderência entre as curvas do modelo completo (cor azul) e do modelo reduzido (cor vermelha) é bastante satisfatória.

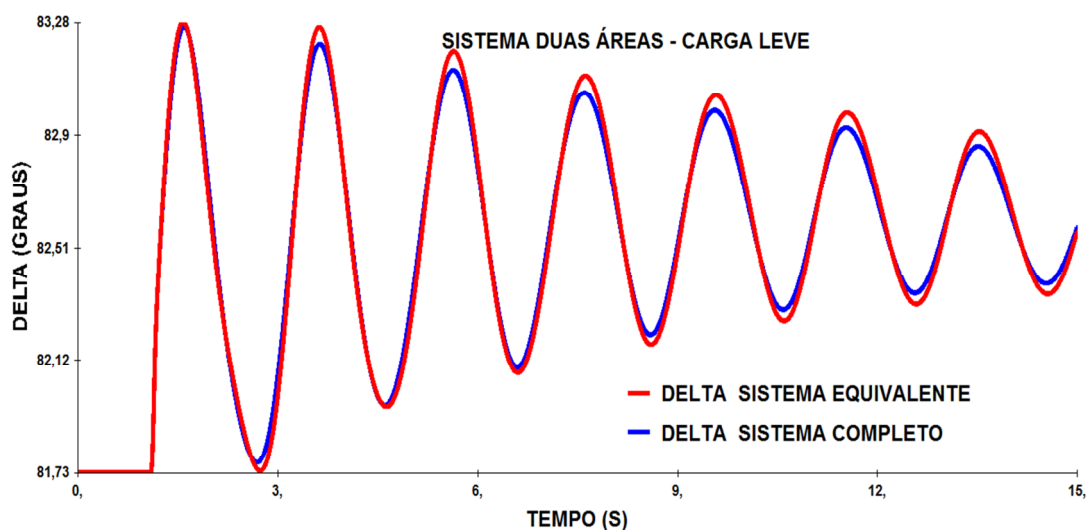


Figura5. 3 – Os ângulos δ_{4-3} do sistema duas áreas para um cenário de carga leve.

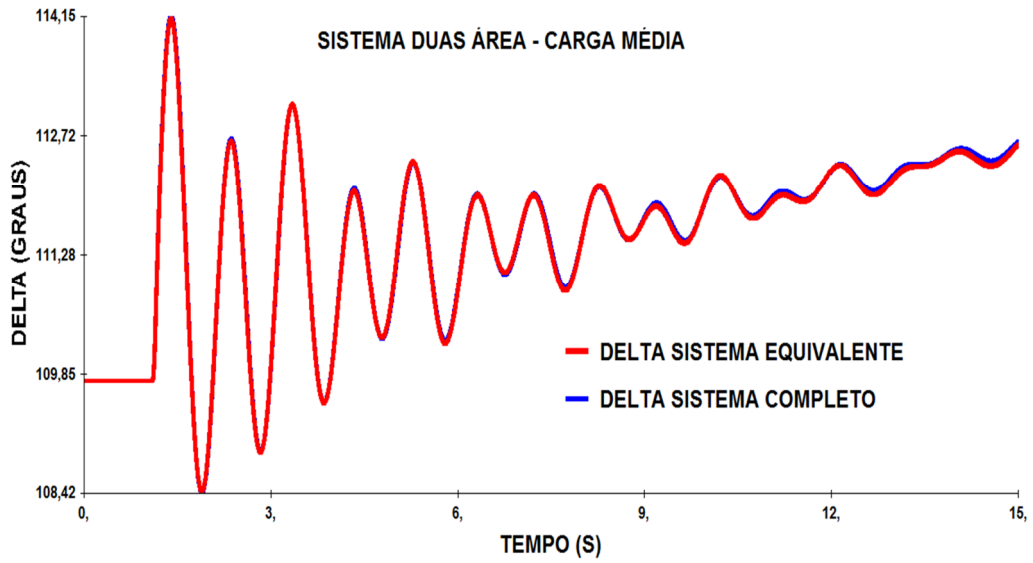


Figura 5.4 - Os ângulos δ_{4-3} do sistema duas áreas para um cenário de carga média.

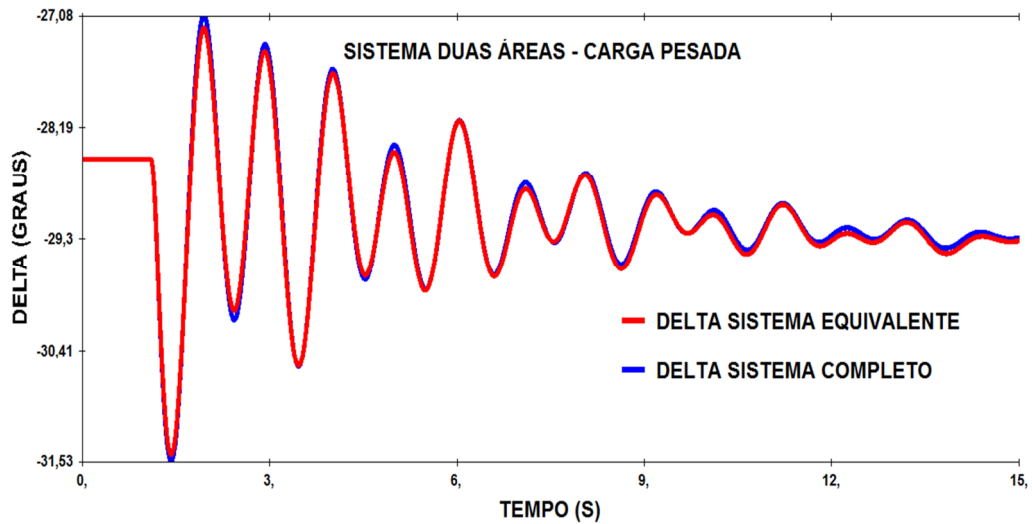


Figura 5.5 - Os ângulos δ_{4-3} do sistema duas áreas para um cenário de carga pesada.

Nota-se nas figuras 5.6, 5.7 e 5.8 que as excursões do fluxo de potência ativa entre as barras 7 e 8 oriundas do modelo reduzido (cor vermelha) são similares as do modelo completo (cor azul), para os patamares de carga leve, média e pesada, respectivamente.

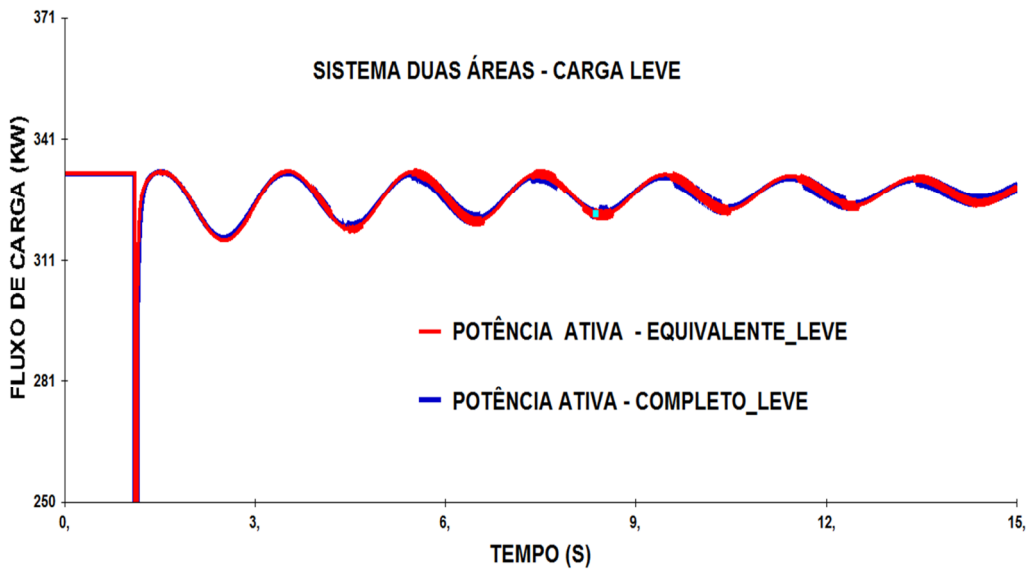


Figura 5.6 – O fluxo de potências ativa da barra 7 para barra 8 do sistema 2 área - carga leve.

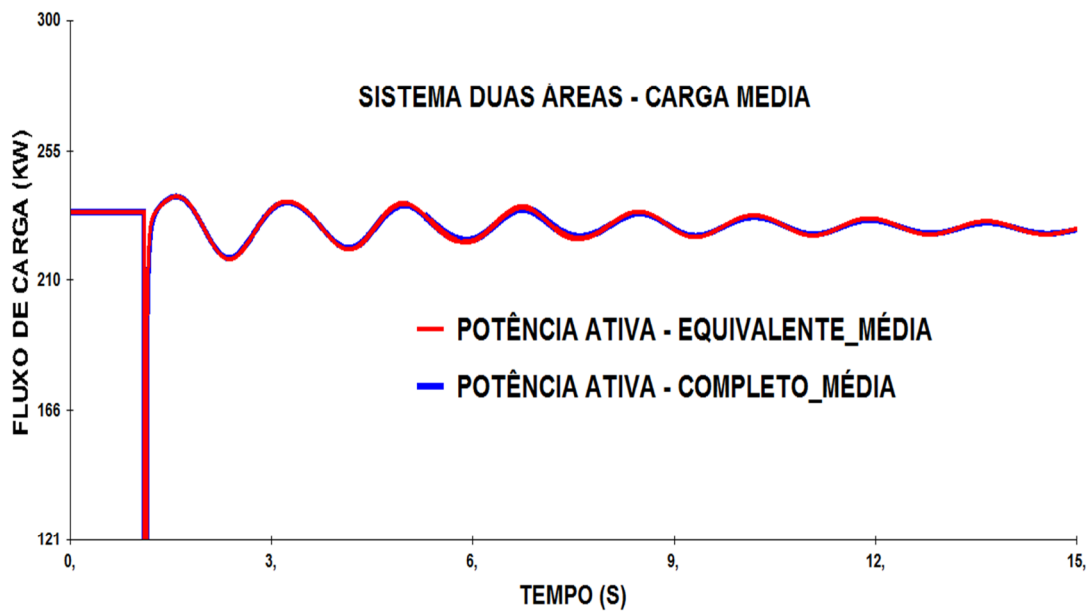


Figura 5.7 – O fluxo de potências ativa da barra 7 para barra 8 do sistema 2 área - carga média.

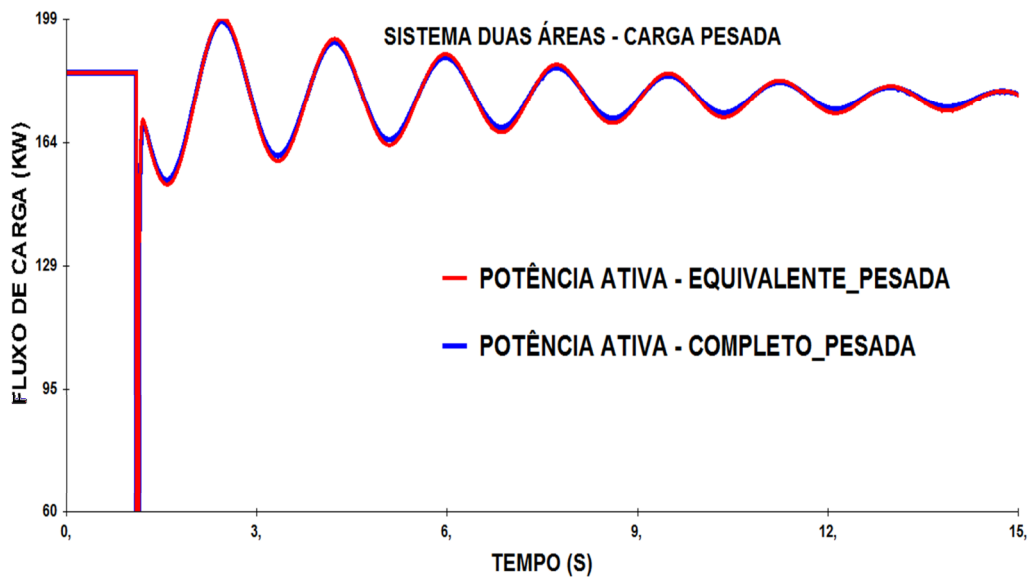


Figura 5.8 – O fluxo de potências ativa da barra 7 para barra 8 do sistema 2 área – carga pesada.

As figuras 5.9, 5.19 e 5.11 mostram o comportamento do fluxo de potência reativa entre as barras 7 e 8, para os três cenários de carga, respectivamente. Pode-se observar que as respostas obtidas pelo uso do modelo do equivalente são similares as do modelo completo.

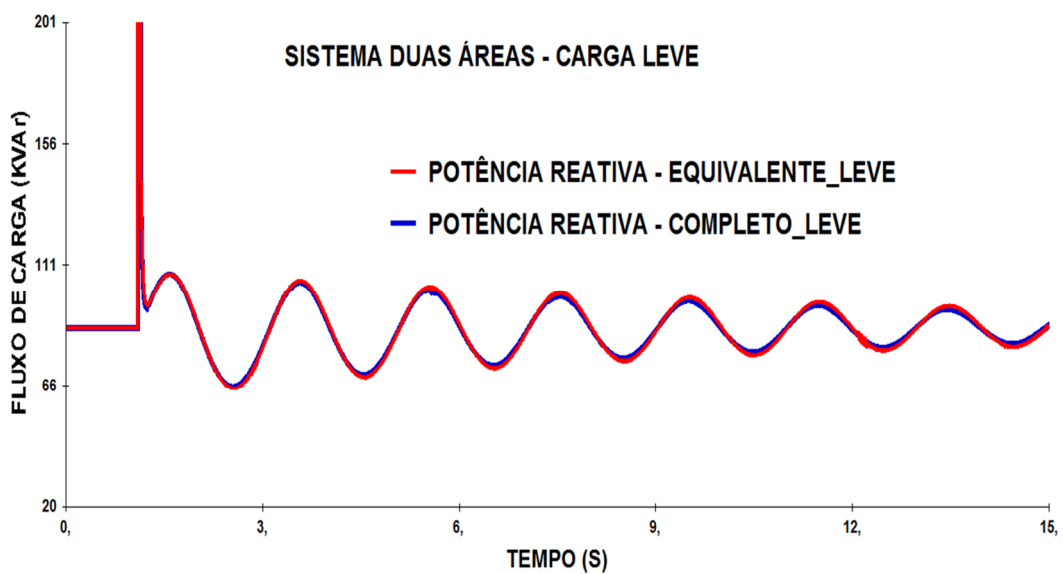


Figura 5.9 – O fluxo de potências reativa da barra 7 para barra 8 do sistema 2 área – carga leve.

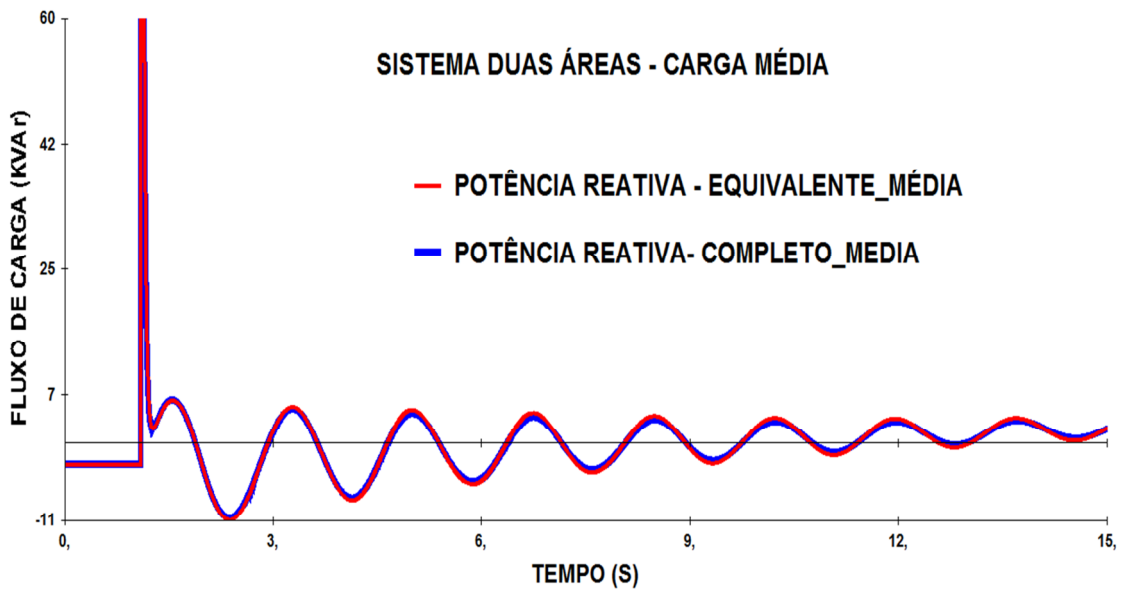


Figura 5.10 – O fluxo de potências reativa da barra 7 para barra 8 do sistema 2 área – carga média.

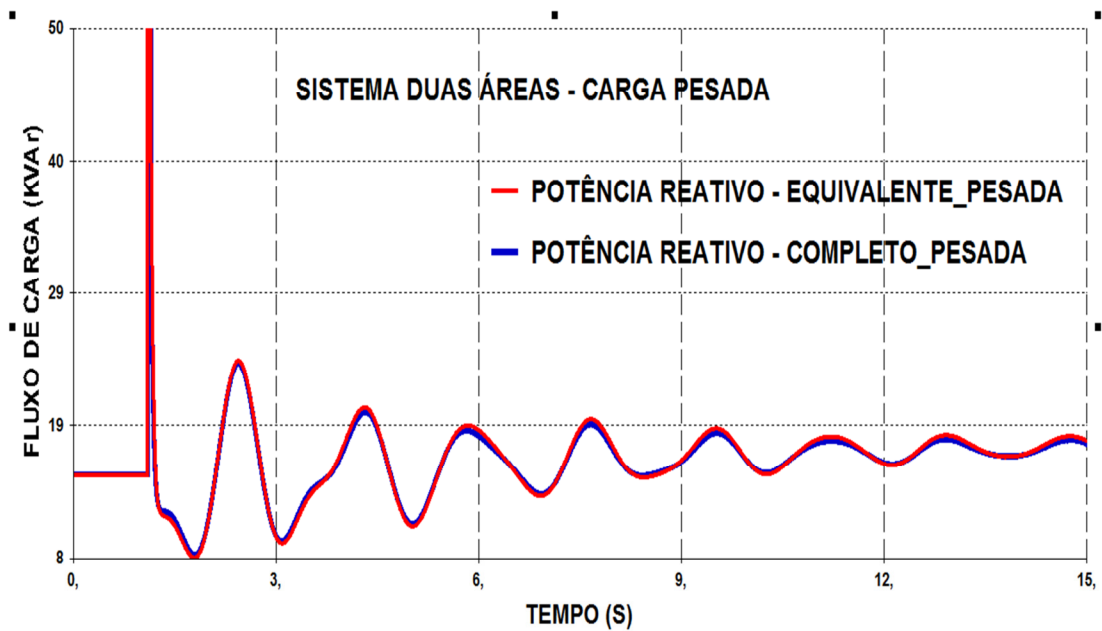


Figura 5.11 – O fluxo de potências reativa da barra 7 para barra 8 do sistema 2 área – carga pesada.

Conclui-se nesse estudo que a resposta dinâmica proveniente do uso do modelo equivalente dinâmico é considerada satisfatória para representar a área 1 do sistema duas áreas (sistema de pequeno porte), haja vista que apresentam curvas com o mesmo perfil de resposta do modelo detalhado e com muita precisão, tanto para o ângulo do relativo do rotor quando para os fluxos de potências ativa e reativa entre as barras 7 e 8.

O valor da função objetivo definida na equação (4.0) é calculado para cada geração, para fins de avaliação da evolução do AG. Na presente dissertação, o critério de parada considerado corresponde ao número máximo de gerações igual a 100, como ilustrado na figura 5.12.

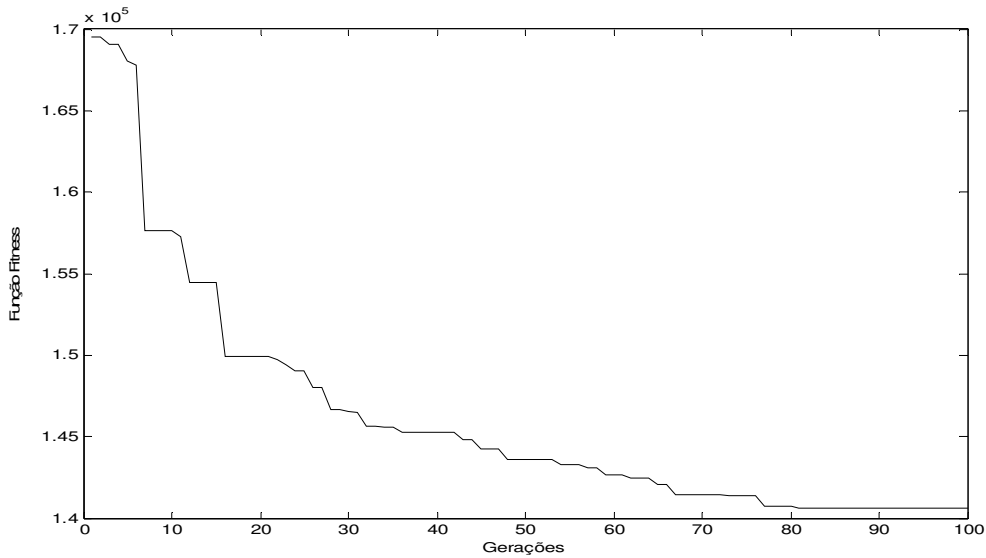


Figura 5.12 – Evolução da função de avaliação

A tabela 5.3 mostra a redução significativa do custo computacional a partir do uso do sistema equivalente em relação ao sistema completo

Tabela 5.3 – Comparação dos Tempos de Simulação entre o Sistema Equivalente e o Completo.

| Sistema | Completo | Equivalente |
|--------------------|------------|-------------|
| Tempo de Simulação | 15 segundo | 3 segundos |

5.3 – Sistema Interligado Nacional

O sistema interligado nacional com a interligação Tucuruí-Manaus-Macapá passou a apresentar um total de 4803 barras, 722 geradores, 6845 linhas e 2483 transformadores. Todas as informações estáticas e dinâmicas, para realização destes estudos, foram obtidas a partir da base de dados do ONS [10]. A figura 5.13 ilustra o mapa da configuração do SIN com as interligações, com a área circulada (pertencente ao subsistema norte do SIN) a ser sistema a ser estudado.

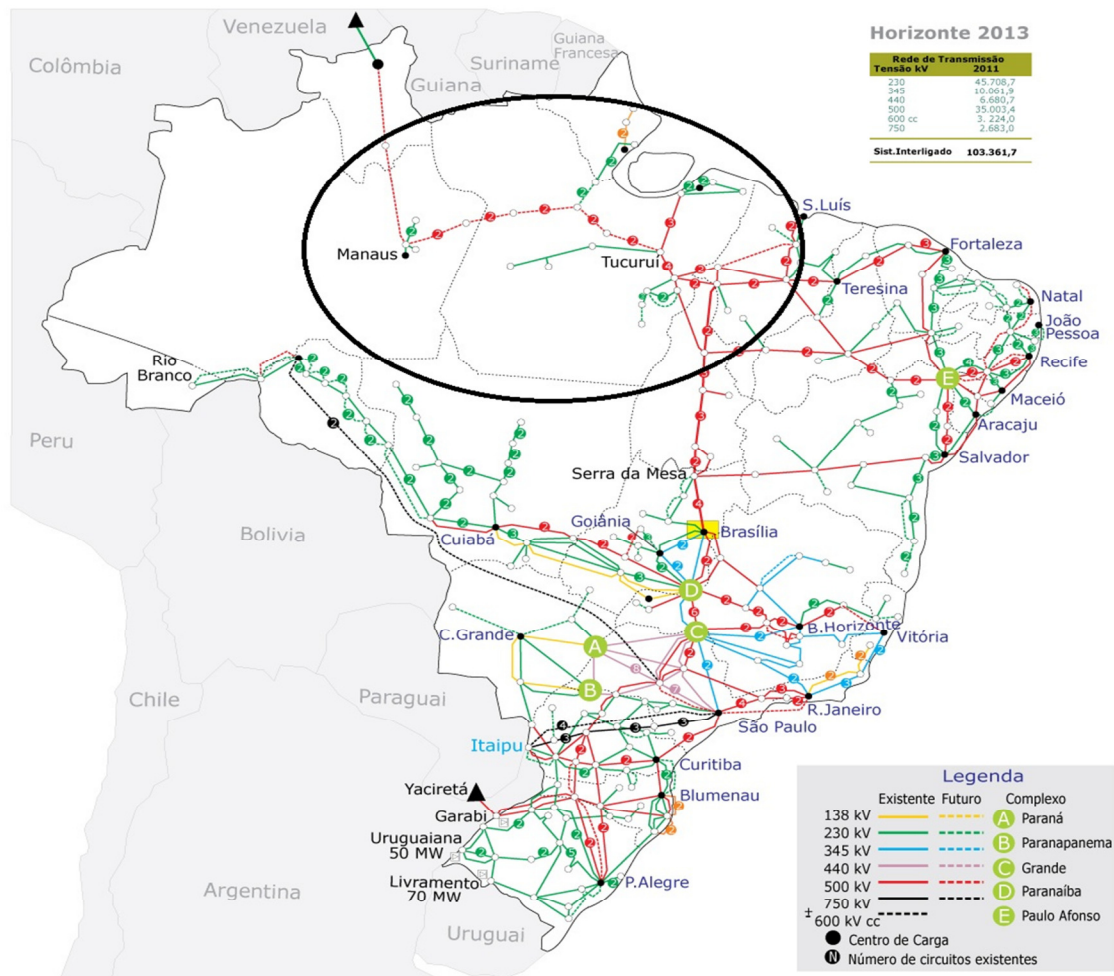


Figura 5.13 – Mapa do sistema interligado nacional com a interligação Tucuruí-Macapá-Manaus

Este sistema interligado nacional foi reduzido até às barras 7200 de Miracema, 5525 de C. Neto, 5436 de R. Gonçalves e 5580 de P. Dutra, que passam a representar os trechos que interligam o subsistema norte do País, as regiões Sudeste/centro-oeste/Sul e Nordeste, respectivamente, conhecido como barra de fronteira, a partir do método do Ward não-linear do software ANAREDE, sem comprometer os valores do fluxo de carga do sistema completo como ilustrado na figura 5.14.

Em cada uma das barras de fronteira 7200, 5525, 5436 e 5580 foi conectado um gerador síncrono (equivalente dinâmico), de tal forma a representar o restante do SIN com resposta dinâmica similar e ao do sistema completo. Estas barras de fronteiras foram alteradas para o modo de controle PV. A figura 5.14 ilustra a área interna com os equivalentes representando a área externa.

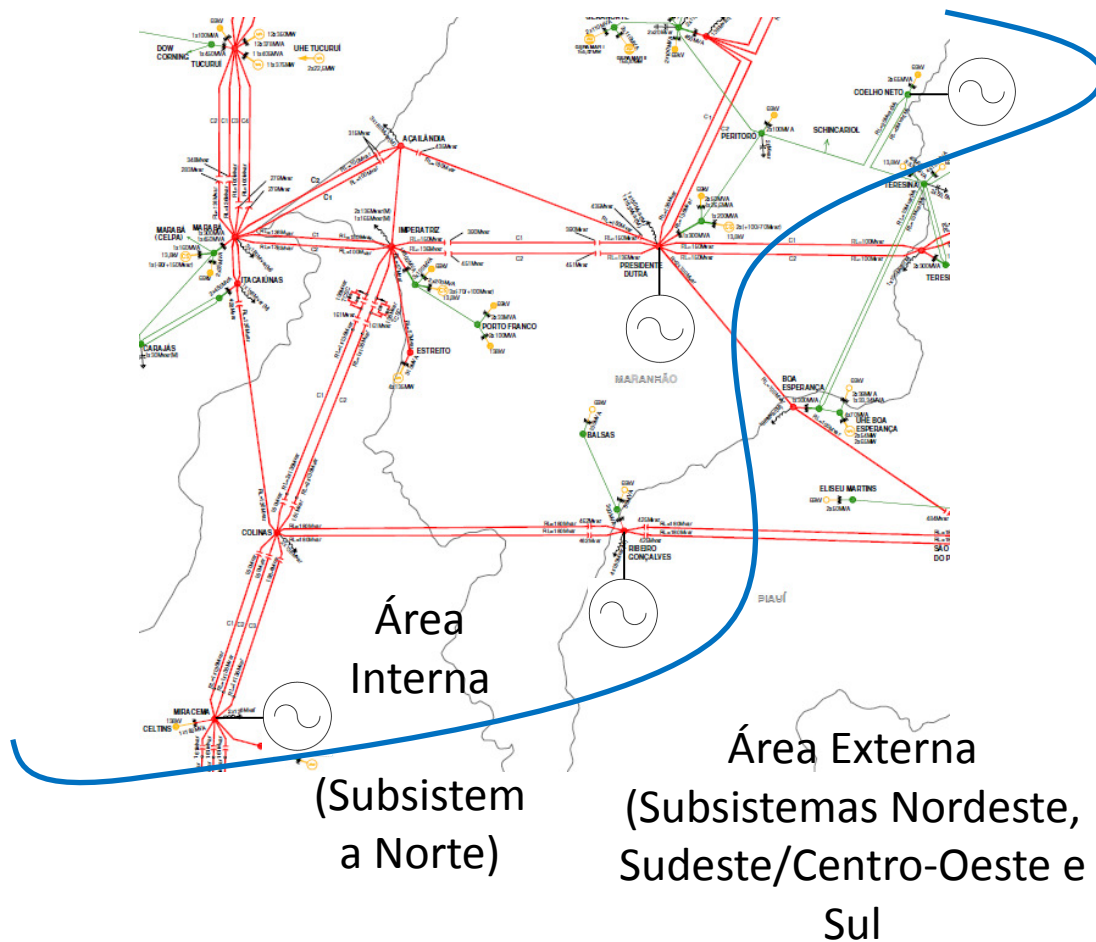


Figura 5.14 – Diagrama Unifilar da área interna com os equivalentes

Para a determinação dos parâmetros dos geradores equivalentes de Miracema, C. Neto, R. Gonçalves e P. Dutra adotou-se o modelo de gerador síncrono de polos salientes. Primeiro são definidos os limites máximos e mínimos dos parâmetros do gerador síncrono que serve de espaço de busca para AG otimizar os parâmetros. Posteriormente, é aplicado quartos curto-circuito trifásico simultâneos de 100 ms, um em cada barra de fronteira em $t=1,0$ s, seguido da abertura do circuito adjacente a cada barra de fronteira, considerando três condições operacionais distintas (carga leve, média e pesada). O tempo de simulação no domínio do tempo para cada condição operacional é de 15 s.

O espaço de busca (limites máximos e mínimos) definido para cada parâmetro do equivalente dinâmico é apresentado na tabela 5.4, cujos valores foram escolhidos de acordo com os valores típicos de parâmetros de máquinas síncronas de pólos salientes [13].

Tabela 5.4 – Definição dos limites máximos e mínimos dos parâmetros da máquina.

| | Ld | Lq | L'd | L''d | Ll | T'd | T''d | T''q | Ra | H |
|---------------|-----|-----|-----|------|----|-----|------|------|------|-----|
| Limite máximo | 230 | 230 | 40 | 25 | 20 | 10 | 0,05 | 0,05 | 0,5 | 20 |
| Limite mínimo | 100 | 100 | 15 | 12 | 10 | 3,0 | 0,02 | 0,02 | 0,15 | 1,0 |

O procedimento de identificação dos parâmetros do equivalente dinâmico conectado nas barras de fronteiras do SIN reduzido foi realizado em uma estação de trabalho com um microcomputador com 2,4 GHz de velocidade de processamento 4 Gb de memória RAM. O tempo de processamento para obtenção dos parâmetros foi de aproximadamente 24 horas. O procedimento de otimização é finalizado quando o número máximo de gerações é alcançado, onde o melhor indivíduo da população pertence à última geração da solução. Os dados obtidos pelo AG encontram-se nas tabelas abaixo.

Tabela 5.5 – Parâmetros do equivalente dinâmico conectado na barra de Miracema.

| | Ld | Lq | L'd | L''d | Ll | T'd | T''d | T''q | Ra | H |
|--|-----|-----|------|------|------|-----|------|------|------|------|
| Parâmetros otimizados pelo algoritmo genéticos | 223 | 177 | 37,3 | 23,6 | 15,3 | 3,4 | 0,02 | 0,03 | 0,22 | 16,7 |

Tabela 5.6 – Parâmetros do equivalente dinâmico conectado na barra de C. Neto.

| | Ld | Lq | L'd | L''d | Ll | T'd | T''d | T''q | Ra | H |
|--|-----|-----|------|------|------|-----|------|------|------|------|
| Parâmetros otimizados pelo algoritmo genéticos | 202 | 120 | 38,3 | 23,6 | 20,3 | 4,4 | 0,03 | 0,03 | 0,28 | 19,7 |

Tabela 5.7 – Parâmetros do equivalente dinâmico conectado na barra de R. Gonçalves.

| | Ld | Lq | L'd | L''d | Ll | T'd | T''d | T''q | Ra | H |
|--|-----|-----|------|------|------|-----|------|------|------|------|
| Parâmetros otimizados pelo algoritmo genéticos | 220 | 157 | 37,3 | 25,6 | 18,3 | 3,1 | 0,02 | 0,04 | 0,21 | 16,5 |

Tabela 5.8 – Parâmetros do equivalente dinâmico conectado na barra de P. Dutra.

| | Ld | Lq | L'd | L''d | Ll | T'd | T''d | T''q | Ra | H |
|--|-----|-----|------|------|------|-----|------|------|------|------|
| Parâmetros otimizados pelo algoritmo genéticos | 222 | 182 | 39,3 | 23,6 | 15,3 | 3,4 | 0,02 | 0,03 | 0,22 | 16,7 |

A figura 5.15 demonstra o comportamento da evolução genética do AG em relação as 100 gerações, sendo esse o critério de parada da simulação.

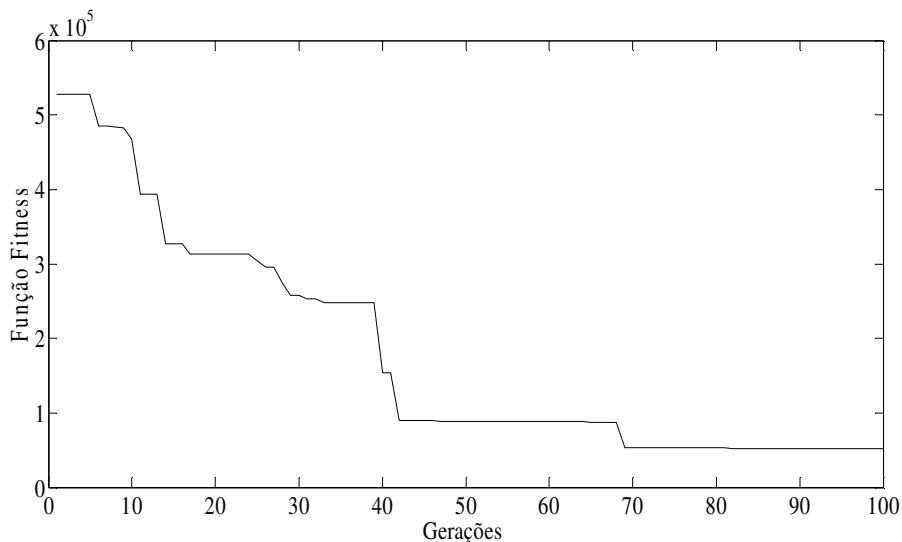


Figura 5.15 - Função Fitness relação ao número de gerações

Para testar a eficácia do método, as respostas das simulações dinâmicas do sistema reduzido provenientes da centésima geração do AG, considerando os três tipos de patamares de carga leve, média e pesada, são comparadas as respostas obtidas pelo modelo completo do SIN. Para cada barra de fronteira são mostrados os fluxos de potência ativa e potência reativa, e posteriormente são mostrados os ângulos relativos de rotores de máquinas síncronas conectadas área interna (subsistema norte do SIN).

- **Barra de fronteira 7200 Miracema (Carga Leve, Média e Pesada).**

Observa-se que há variações nas magnitudes dos fluxos de potências ativa e reativa na barra fronteira 7200 Miracema para os três cenários de cargas, do sistema completo e do sistema equivalente. Pode-se observar uma pequena diferença, quase desprezível, porém perceptível, no entanto, as curvas apresentam a mesma tendência de oscilação, ou seja, o sistema reduzido tende acompanhar o comportamento das curvas das potências ativa e reativa do sistema completo. Esses resultados ilustram a possibilidade de substituição de uma parcela significativa do Sistema Interligado Nacional por um gerador equivalente, sem prejuízo para o comportamento dinâmico do sistema como ilustrado nas figuras 5.16, 5.17, 5.18, 5.19, 5.20 e 5.21.

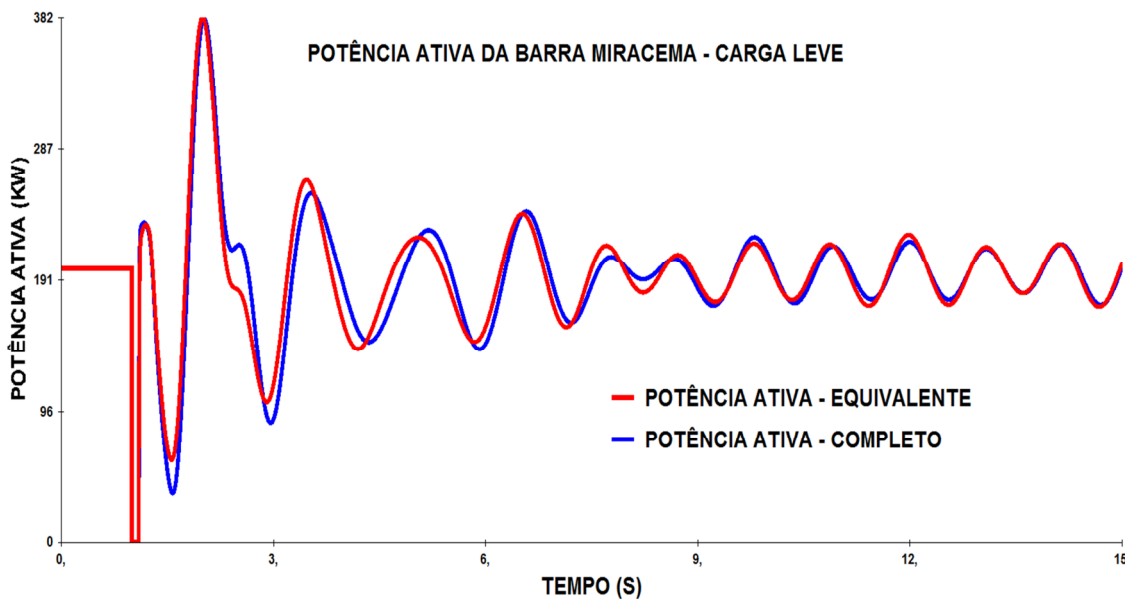


Figura 5.16–Fluxo de Potência ativa (MW) da barra de Fronteira 7200 – Miracema – Carga Leve

Leve

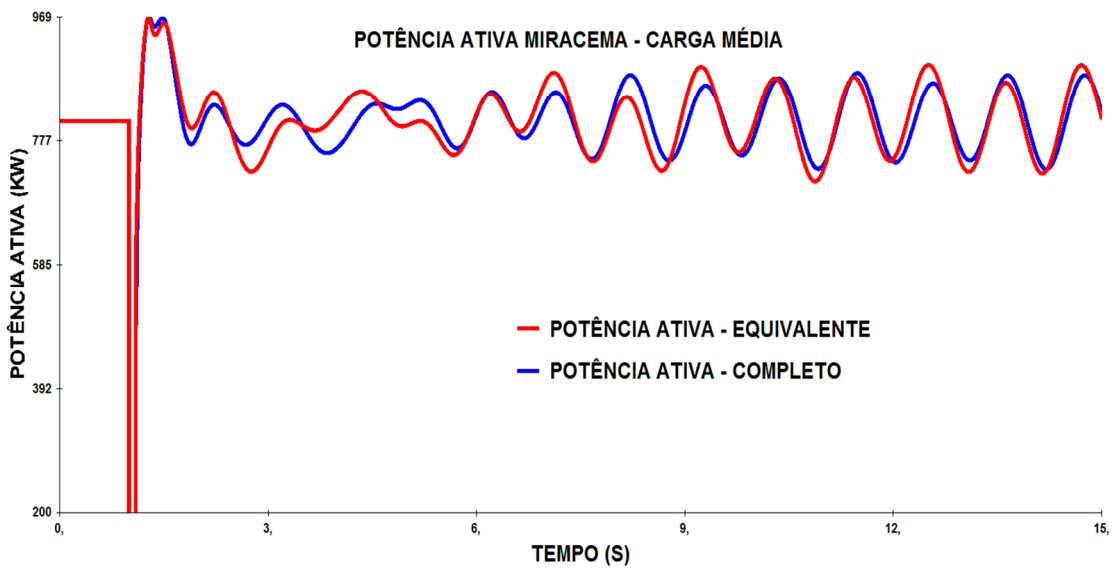


Figura 5.17- Fluxo da Potência Ativa (MW) da Barra de fronteira 7200– Miracema - Carga Media

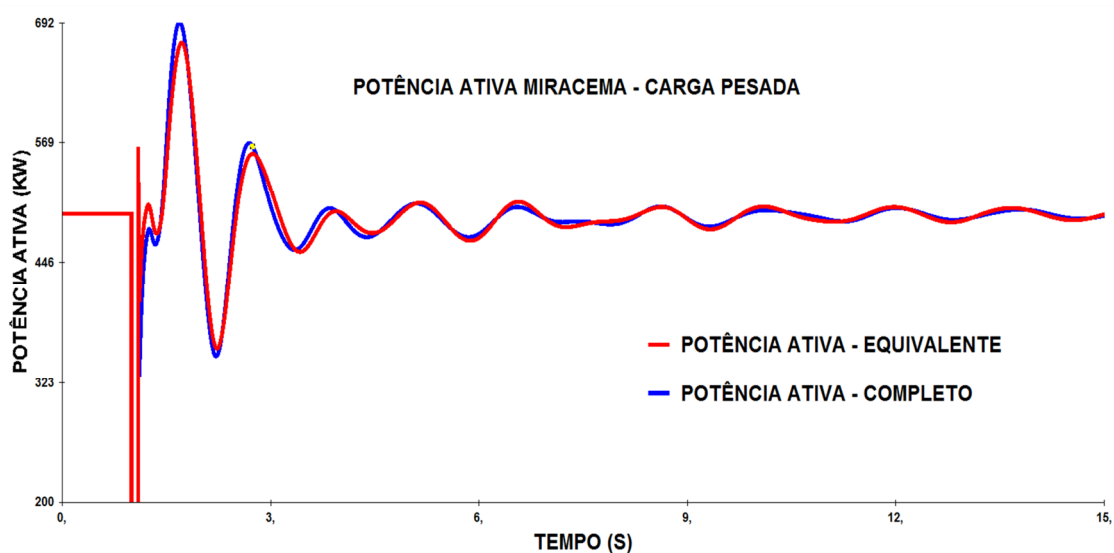


Figura 5.18 – Fluxo de Potência Ativa (MW) da Barra de fronteira 7200 – Miracema – Carga Pesada

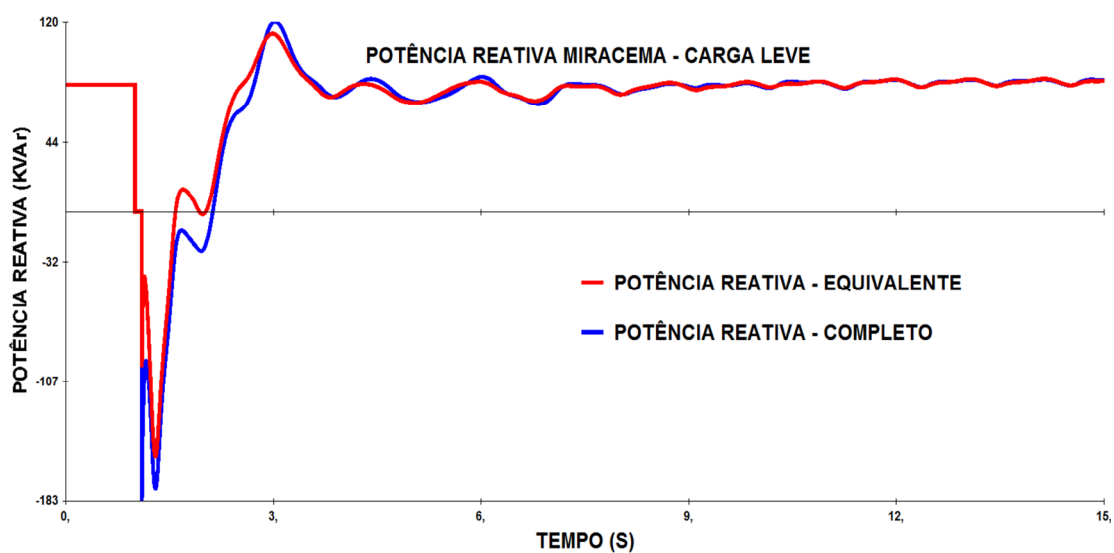


Figura 5.19 – Fluxo de Potência Reativa (MVar) na barra de fronteira 7200 – Miracema – Carga leve.

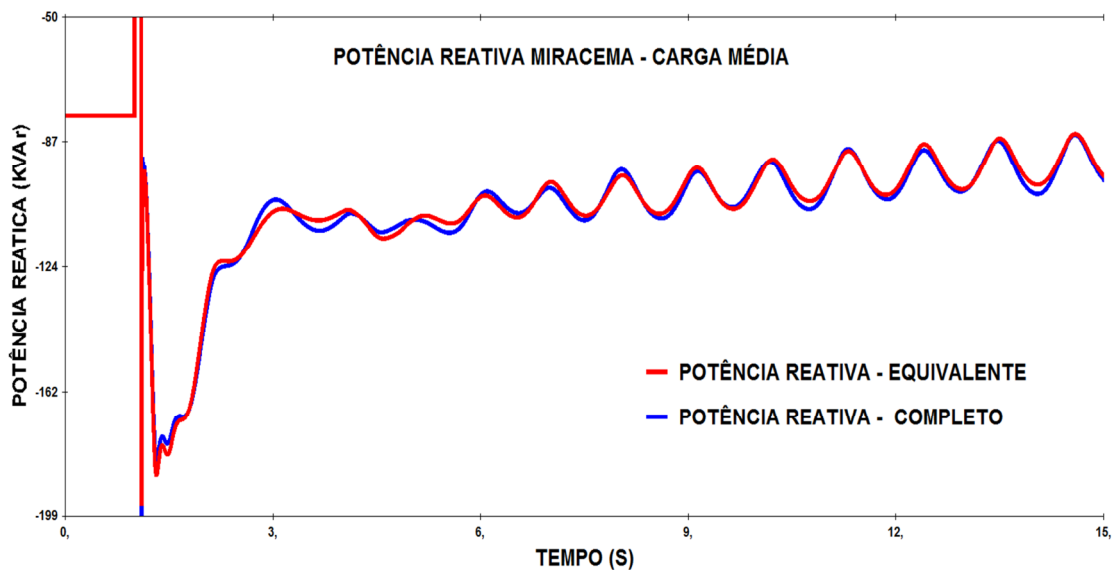


Figura 5.20 – Fluxo de Potência Reativa (MVar) na barra de Fronteira 7200 – Miracema – Carga Média

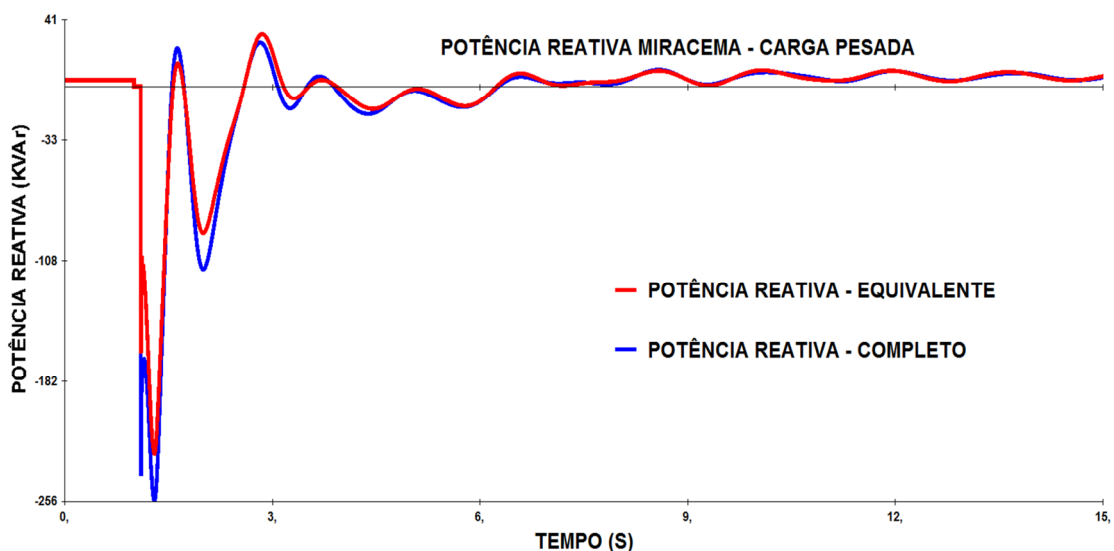


Figura 5.21 – Fluxo de Potência Reativa (MVar) na barra de Fronteira 7200 – Miracema – Carga Pesada.

- **Barra de fronteira 5525 C. Neto (Carga Leve, Média e Pesada).**

Analisando os fluxos de potência ativa e reativa saindo da barra de fronteira 5525 C. Neto, considerando três cenários de carga, pode-se observar que as excursões das curvas das potências são consideradas satisfatórias quando o sistema é reduzido pela substituição de parte do sistema por equivalentes dinâmicos obtidos via AG, como mostrado nas figuras 5.22, 5.23, 5.24, 5.25, 5.26 e 5.27.

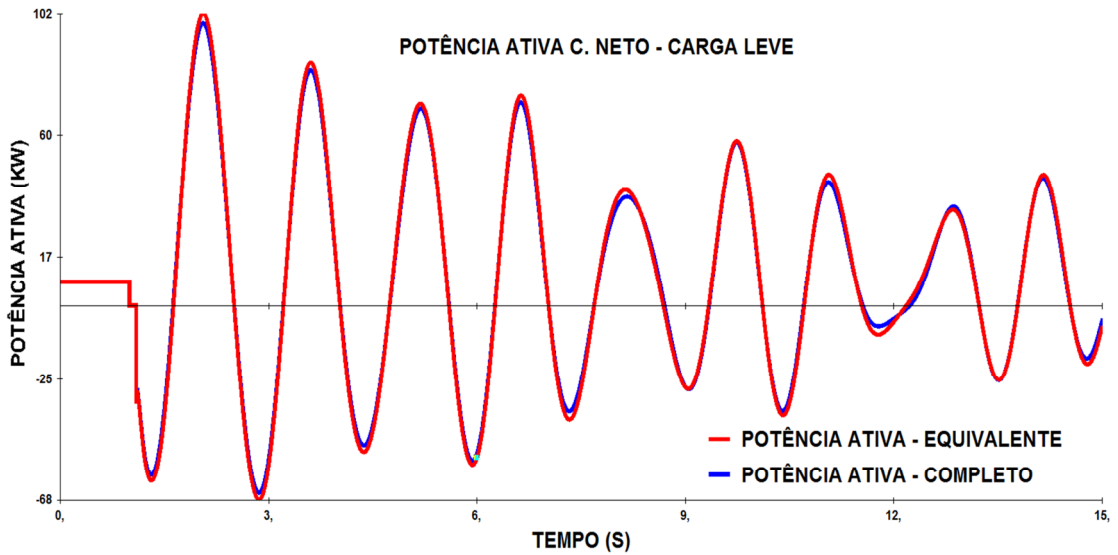


Figura 5.22 – Fluxo de Potência Ativa (MW) na barra de Fronteira 5525 – C. Neto – Carga Leve

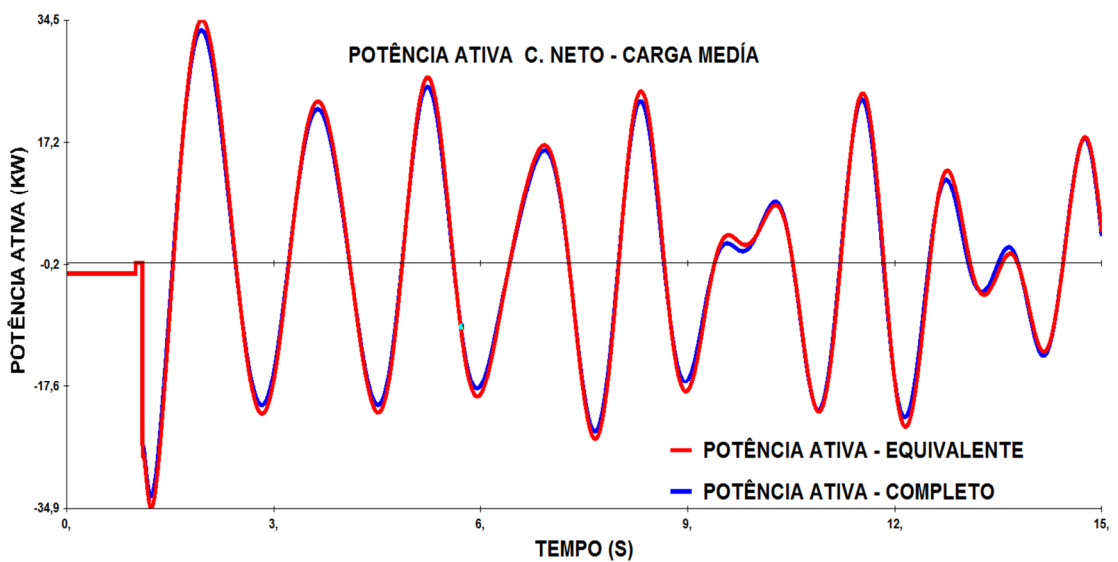


Figura 5.23 – Fluxo de Potência Ativa (MW) na barra de Fronteira 5525 – C. Neto – Carga Média

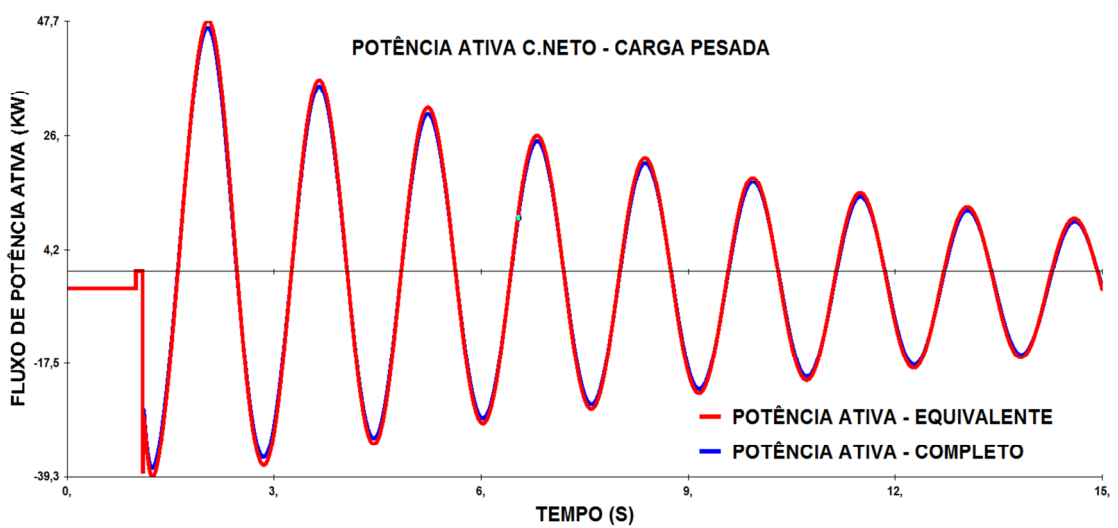


Figura 5.24 – Fluxo de Potência Ativa (MW) na barra de Fronteira 5525 – C. Neto – Carga Pesada

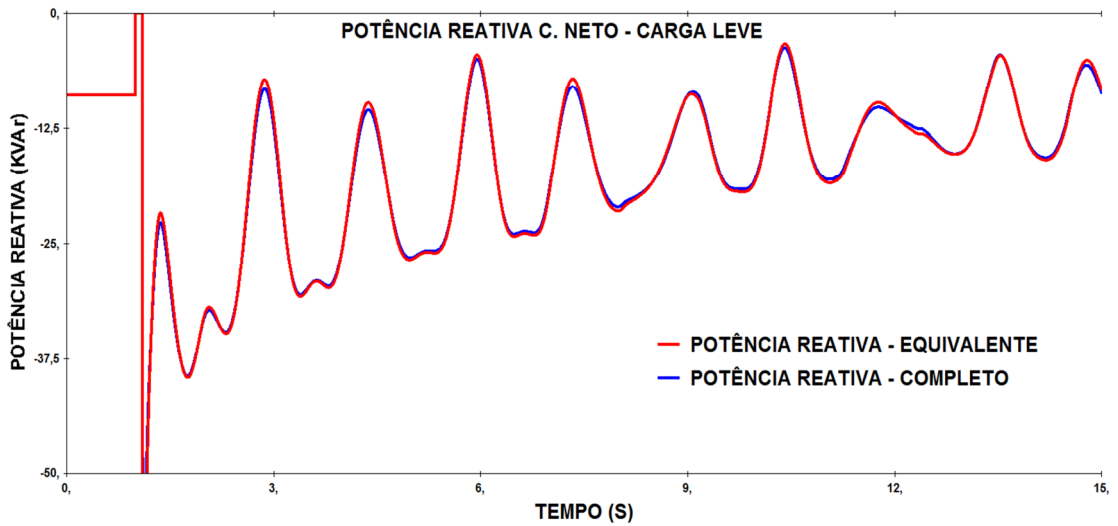


Figura 5.25 – Fluxo de Potência Reativa (MVA_r) na barra de Fronteira 5525 – C. Neto – Carga Leve

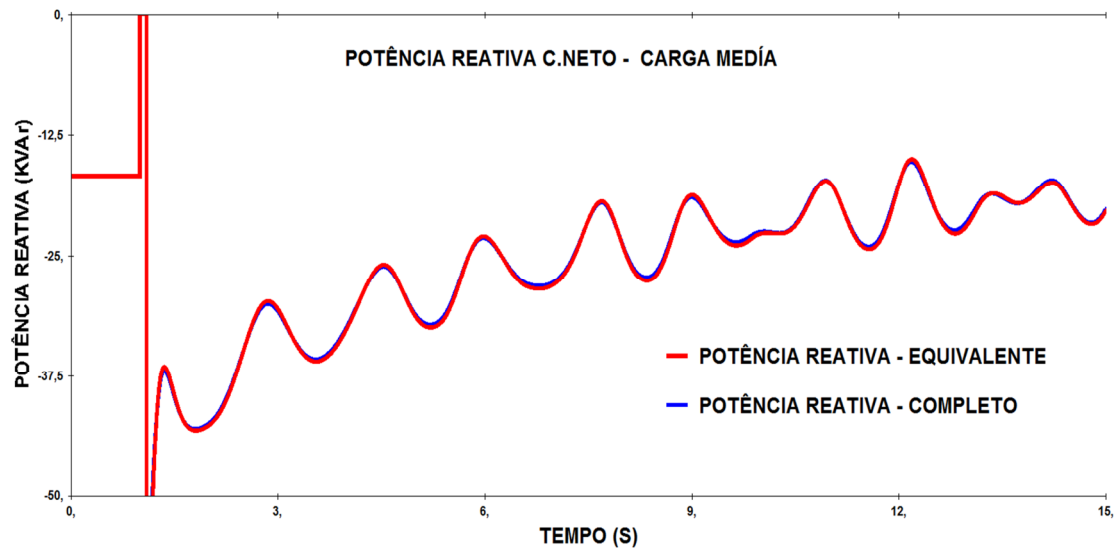


Figura 5.26 – Fluxo de Potência Reativa (MVA_r) na barra de Fronteira 5525 – C. Neto – Carga Média

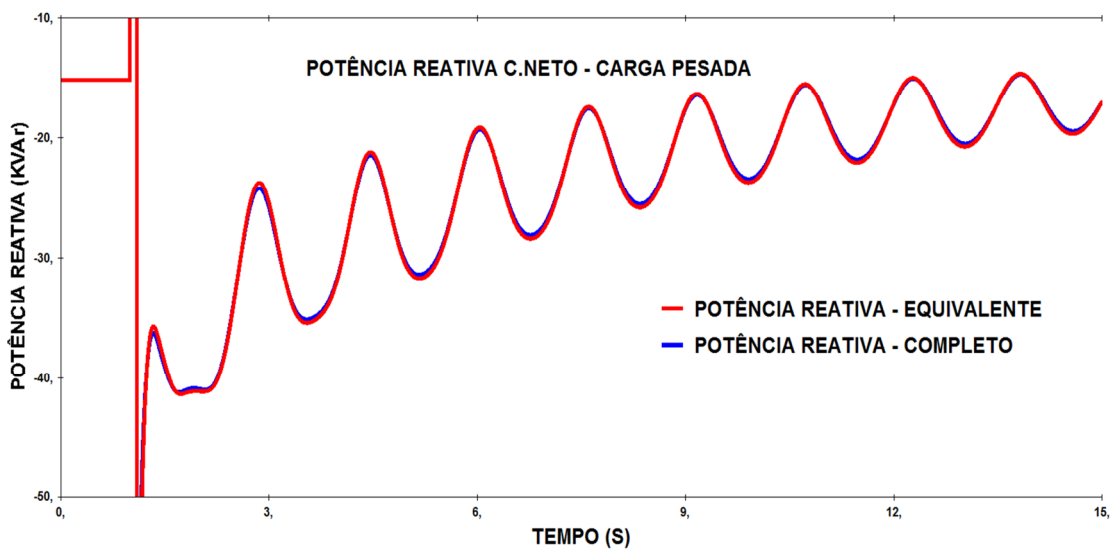


Figura 5.27 – Fluxo de Potência Reativa (MVA_r) na barra de Fronteira 5525 – C. Neto – Carga Pesada.

- **Barra de fronteira 5436 R. Gonçalves (Carga Leve, Média e Pesada).**

Os resultados dos fluxos de potências ativa e reativa que saem da barra de fronteira 5436 R. Gonçalves, para três cenários de carga, aprestaram grande semelhança de oscilações ao se comparar aos fluxos de potências do sistema completo, como pode ser observado nas figuras 5.28, 5.29, 5.30, 5.31, 5.32 e 5.33.

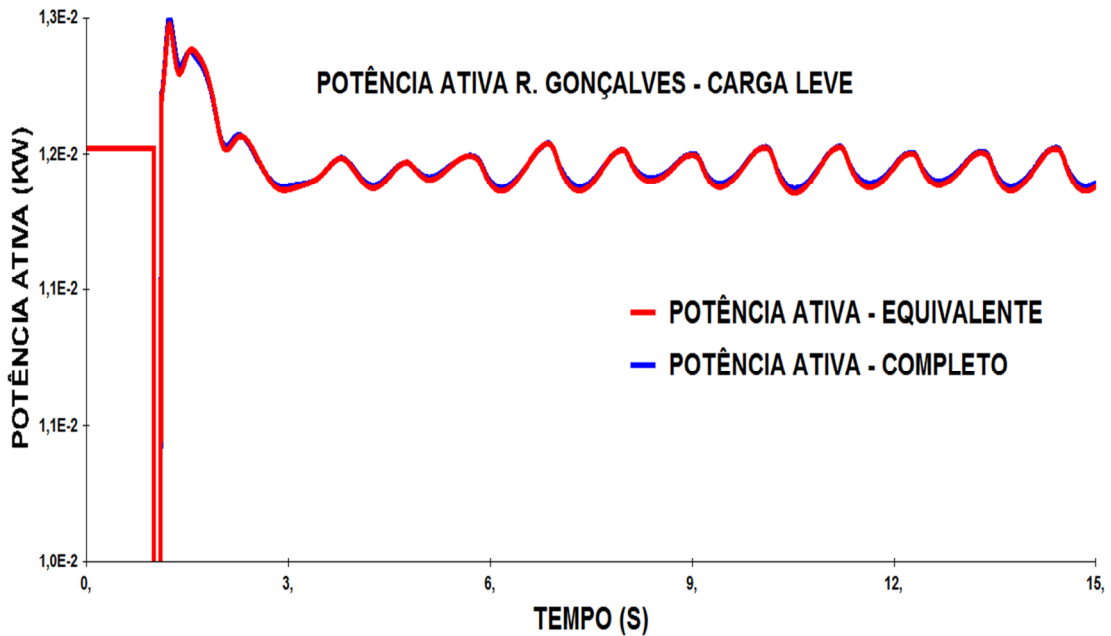


Figura 5.28 – Fluxo de Potência Ativa (MW) na barra de Fronteira 5436 – R. Gonçalves – Carga Leve.

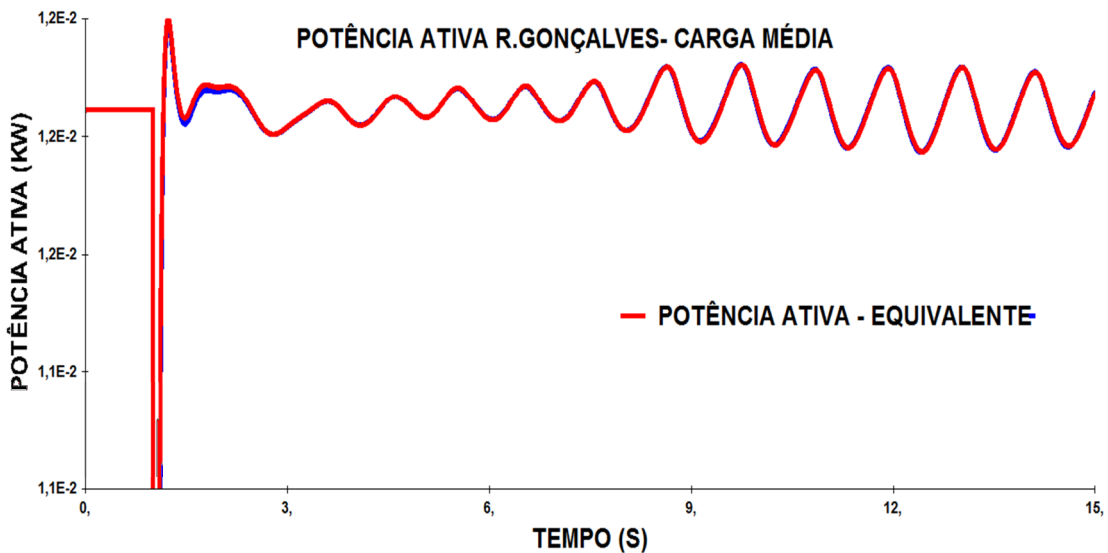


Figura 5.29 – Fluxo de Potência Ativa (MW) na barra de Fronteira 5436 – R. Gonçalves – Carga Média.

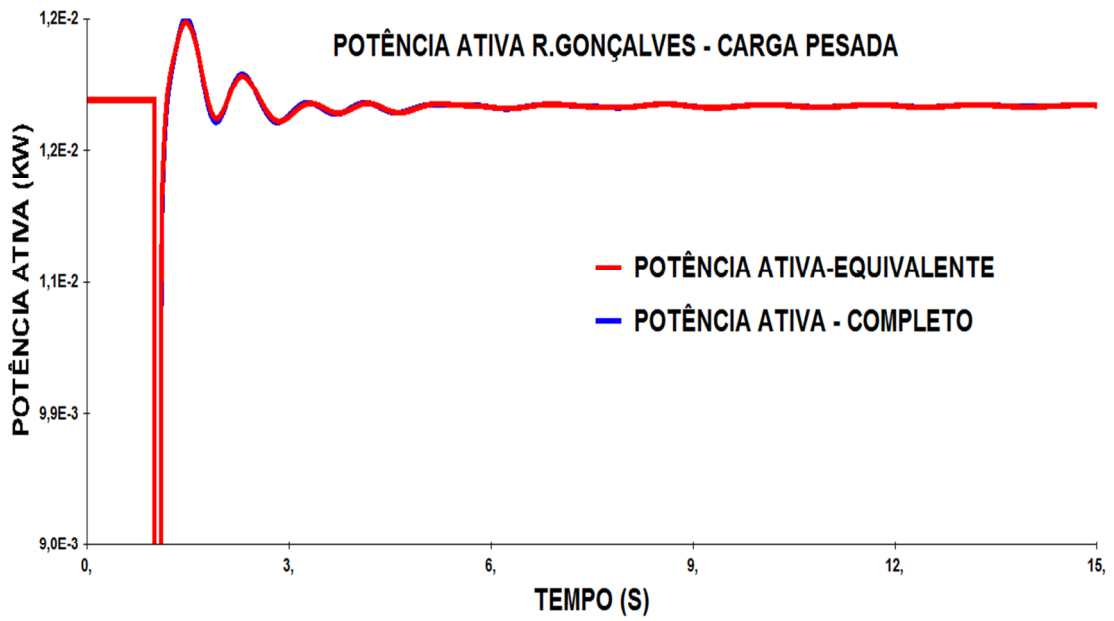


Figura 5.30 – Fluxo de Potência Ativa (MW) na barra de Fronteira 5436 – R. Gonçalves – Carga Pesada.

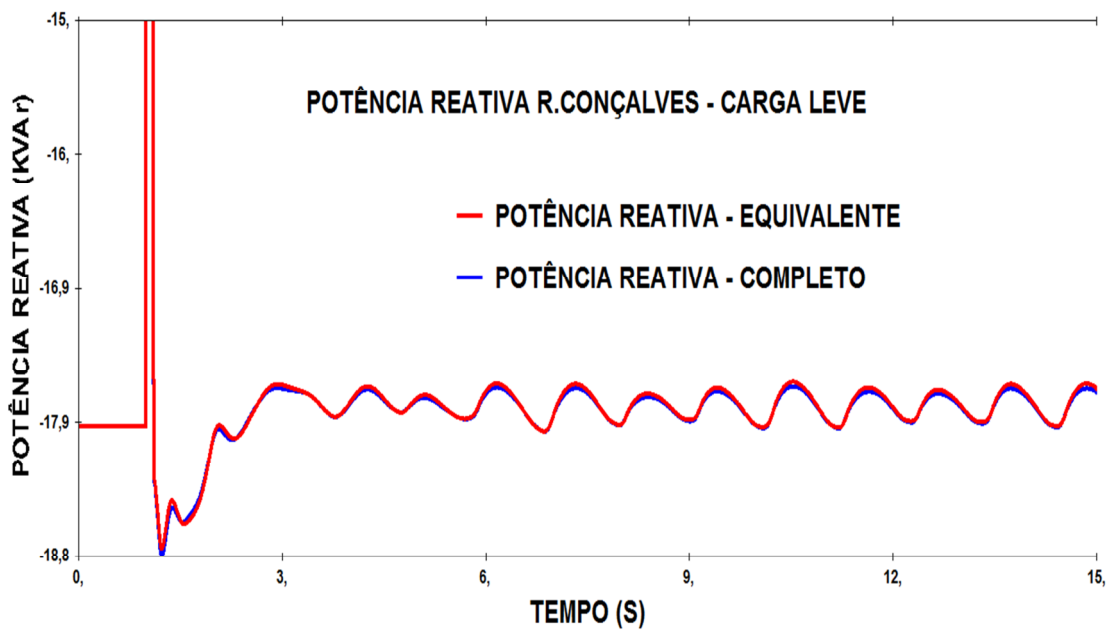


Figura 5.31 – Fluxo de Potência Reativa (MVA_r) na barra de Fronteira 5436 – R. Gonçalves – Carga Leve.

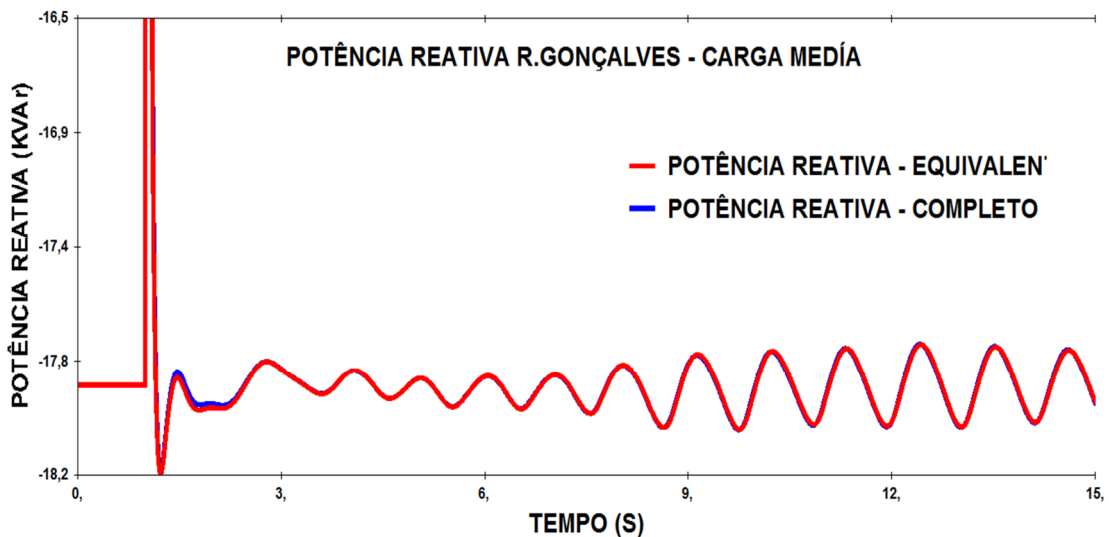


Figura 5.32 – Fluxo de Potência Reativa (MVAr) na barra de Fronteira 5436 – R. Gonçalves – Carga Média.

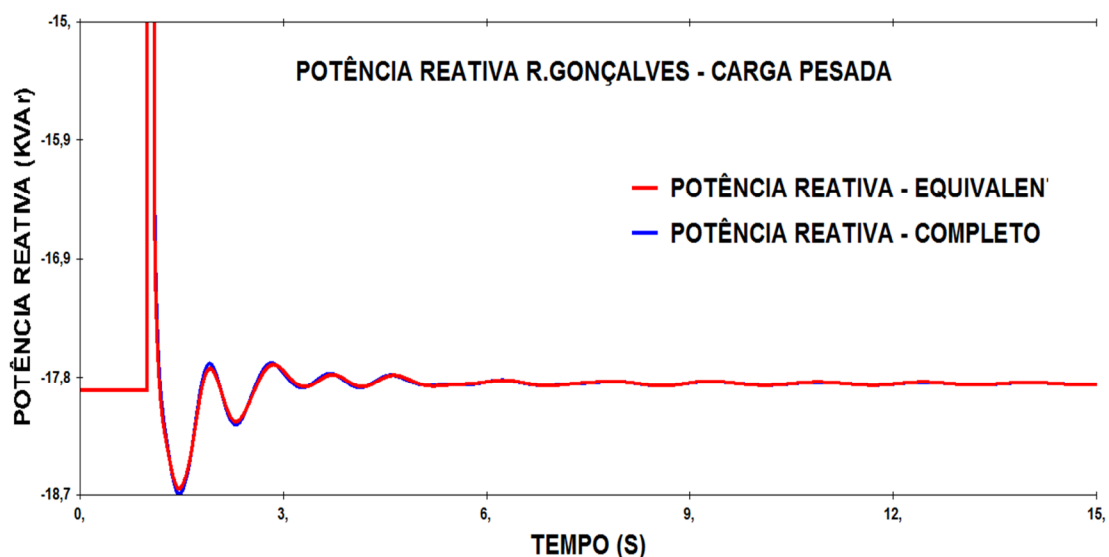


Figura 5.33 – Fluxo de Potência Reativa (MVAr) na barra de Fronteira 5436 – R. Gonçalves – Carga Pesada.

- **Barra de fronteira 5580 P. Dutra (Carga Leve, Média e Pesada).**

Para a barra de fronteira 5580 P. Dutra, os resultados não fogem muitos dos já apresentados anteriormente nessa seção. As figuras 5.34, 5.35, 5.36, 5.37, 5.38 e 5.39, apresentam as potências ativas e reativas injetadas na barra 5580 P. Dutra do sistema original (em cor azul) e do sistema equivalente (em cor vermelha).

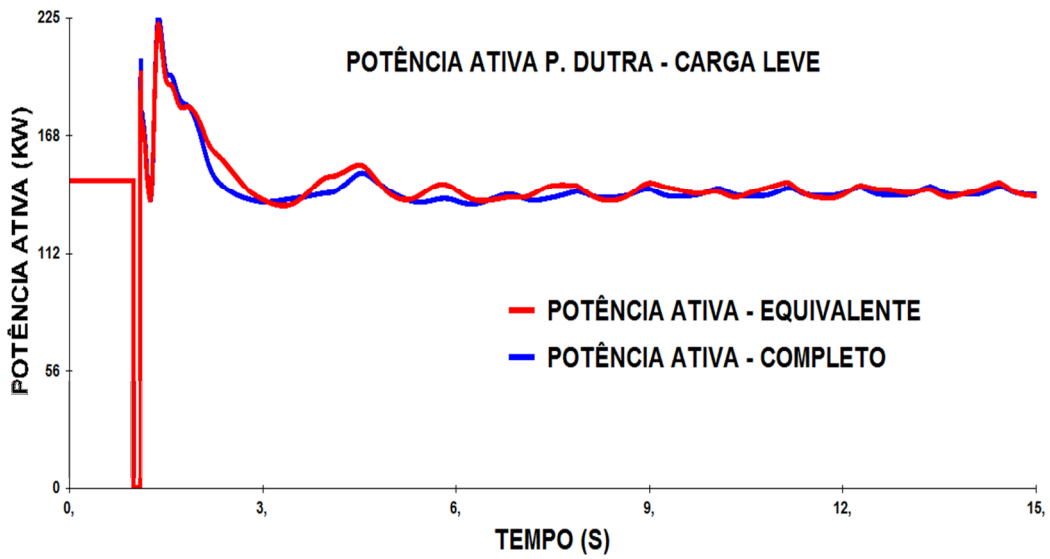


Figura 5.34 – Fluxo de Potência Ativa (MW) na barra de Fronteira 5580– P. Dutra – Carga Leve.

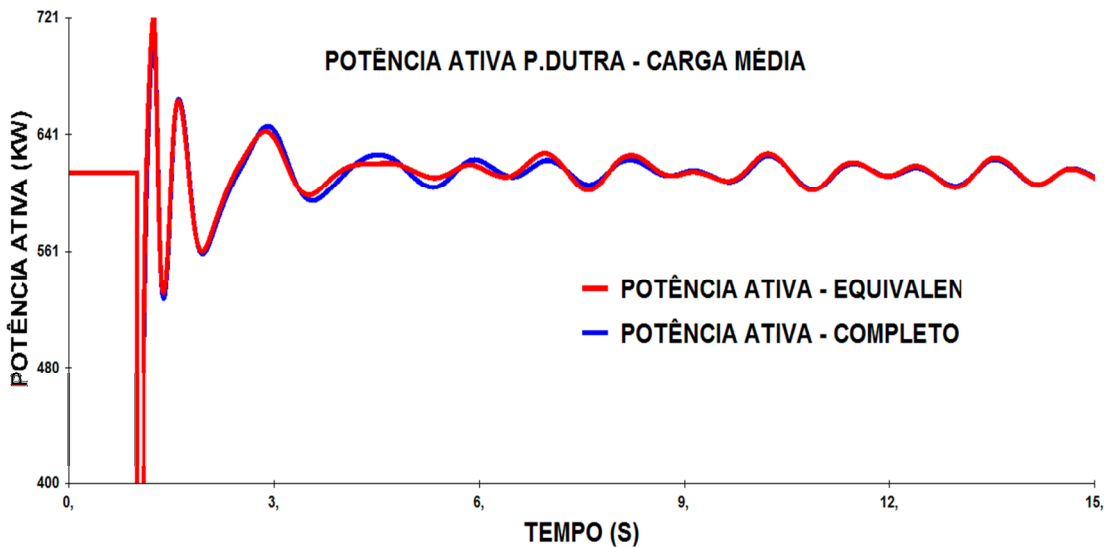


Figura 5.35 – Fluxo de Potência Ativa (MW) na barra de Fronteira 5580– P. Dutra – Carga Média.

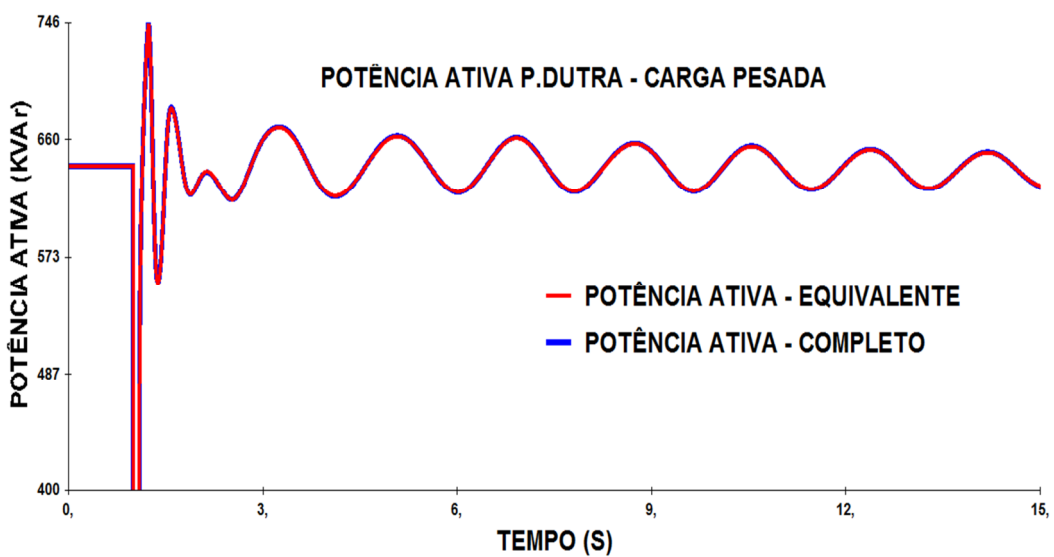


Figura 5.36 – Fluxo de Potência Ativa (MW) na barra de Fronteira 5580– P. Dutra – Carga Pesada.

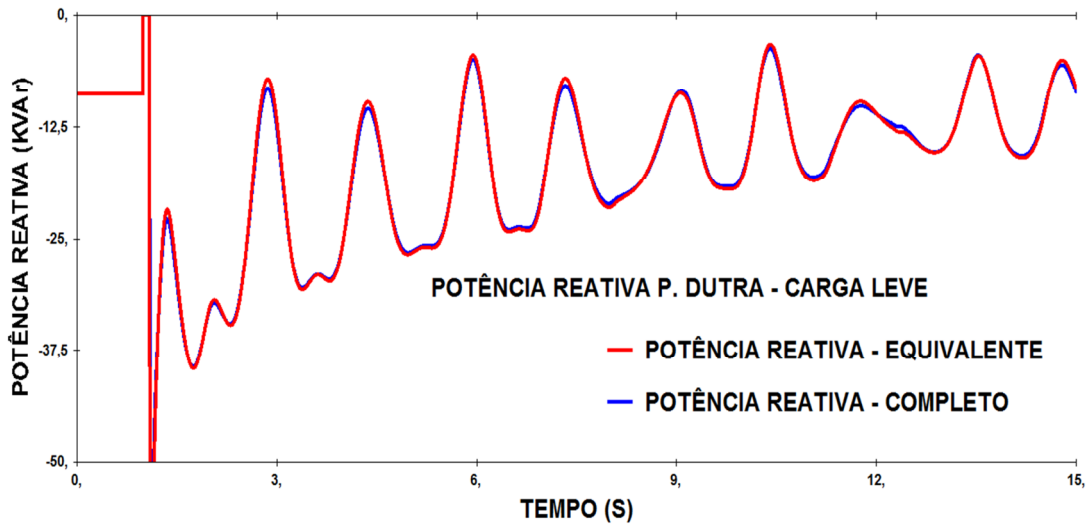


Figura 5.37 – Fluxo de Potência Reativa (MVA_r) na barra de Fronteira 5580– P. Dutra – Carga Leve.

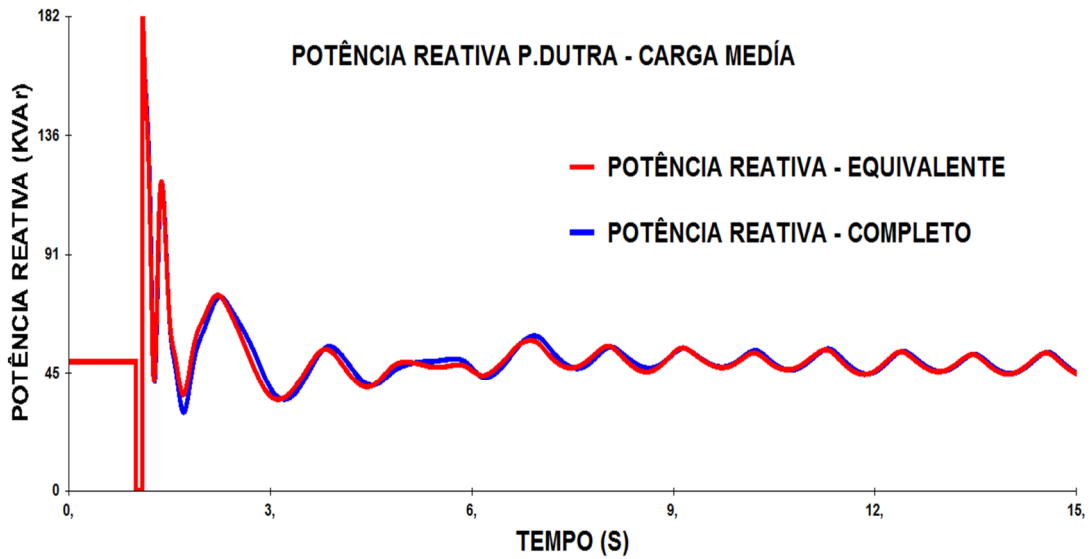


Figura 5.38 – Fluxo de Potência Reativa (MVA_r) na barra de Fronteira 5580– P. Dutra – Carga Média.

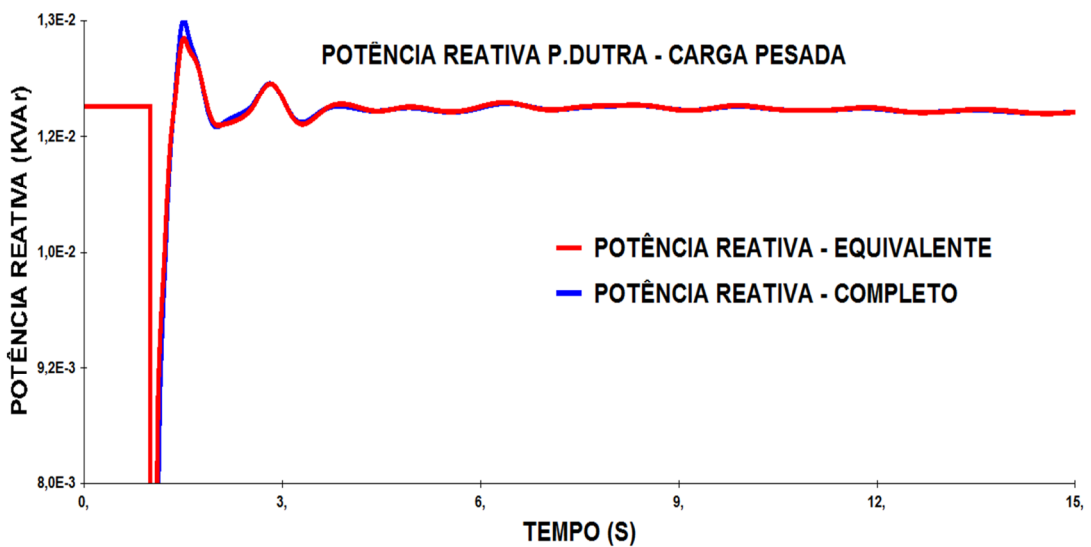


Figura 5.39 – Fluxo de Potência Reativa (MVA_r) na barra de Fronteira 5580– P. Dutra – Carga Pesada.

Nessa seção são também analisados os ângulos relativos dos rotores das máquinas de Tucuruí, Manaus, Macapá e Vila do Conde, ambas conectadas ao sistema interno. Nas figuras 5.40, 5.41, 5.42 e 5.43 são mostrados os ângulos relativos dos rotores de algumas máquinas conectadas ao sistema interno, comparando o modelo completo (em cor azul) e o modelo reduzido (em cor vermelha). Nota-se que o uso do modelo reduzido com equivalentes dinâmicos apresenta comportamento dinâmico similar ao do sistema detalhado, validando a eficácia do método proposto.

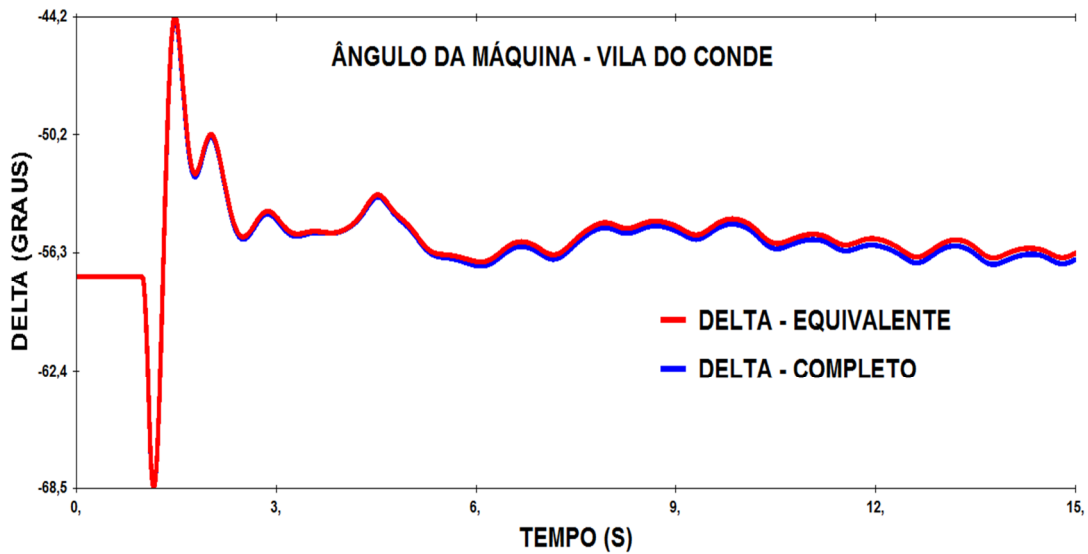


Figura 5.40 – Ângulo relativo do rotor máquina de V. conde

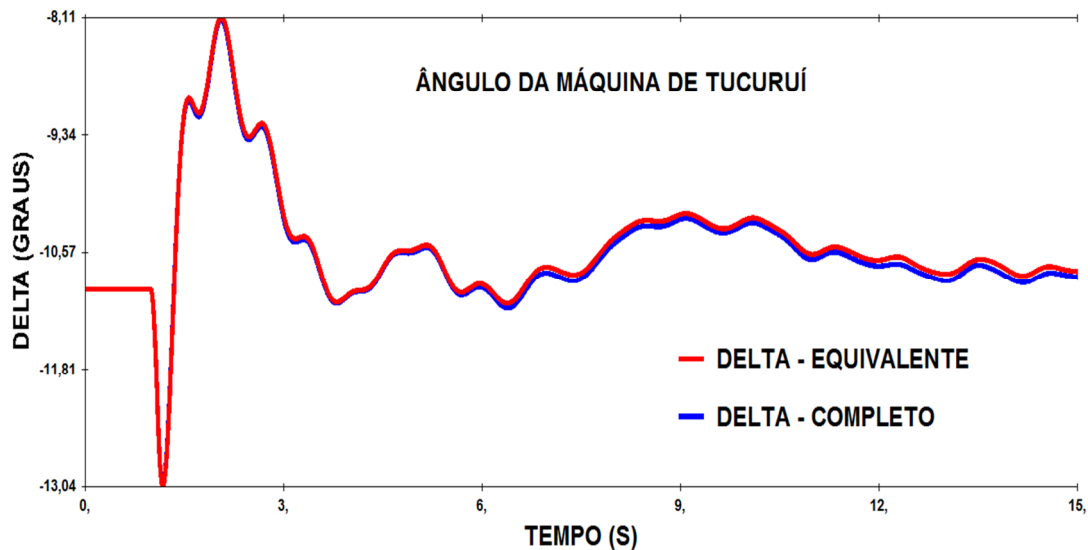


Figura 5.41 – Ângulo relativo do rotor de uma máquina da usina UHE-Tucuruí.

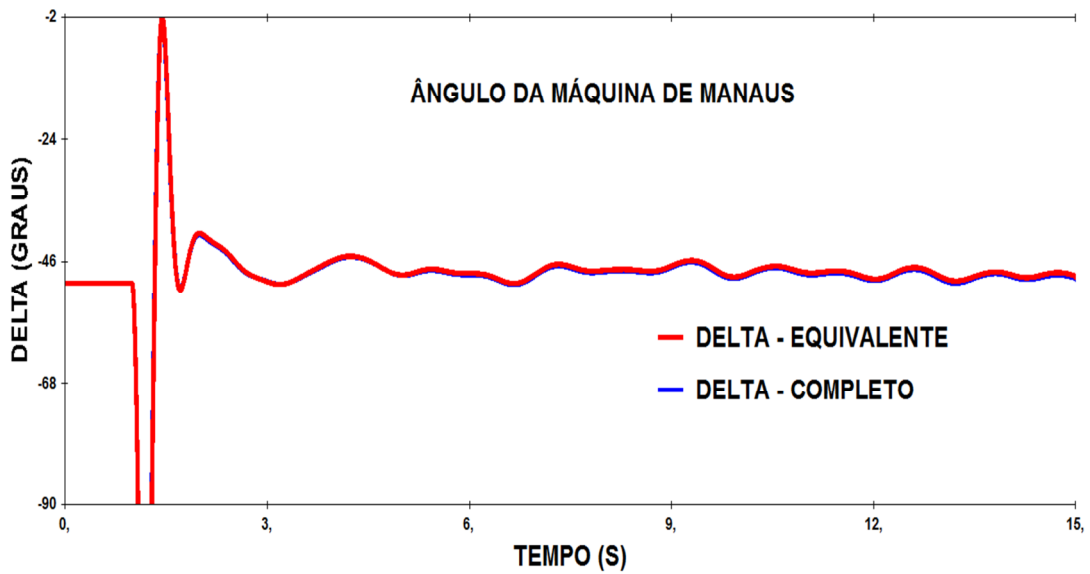


Figura 5.42 – Ângulo relativo do rotor de uma máquina do sistema elétrico de Manaus

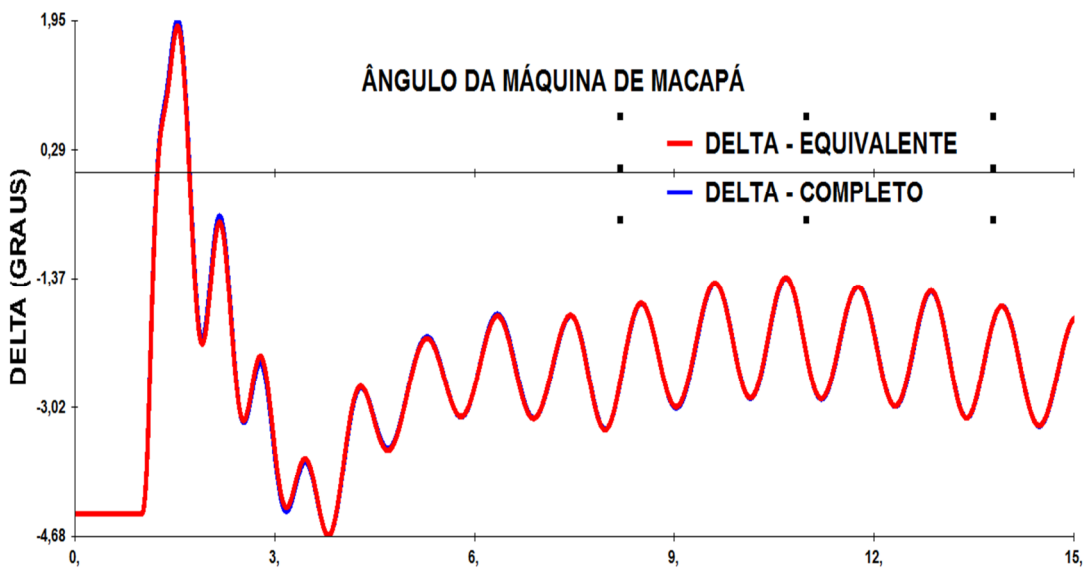


Figura 5.43 – Ângulo relativo do rotor de uma máquina do sistema elétrico de Macapá.

Por fim, para validação da metodologia baseada em AG, um curto-circuito trifásico de 100ms foi aplicado em $t=1,0$ s no trecho de Tucuruí a Manaus, seguido da abertura do mesmo após a eliminação do curto. O tempo de simulação foi de 10s de simulação, considerando os patamares de carga leve, media e pesada. As figuras 5.44, 5.45, 5.46, 5.47, 5.48, 5.49 e 5.50 mostram os ângulos relativos das máquinas do sistema interno e os fluxos de potência ativa e potência reativa, tanto para o sistema completo e quanto para o sistema reduzido.

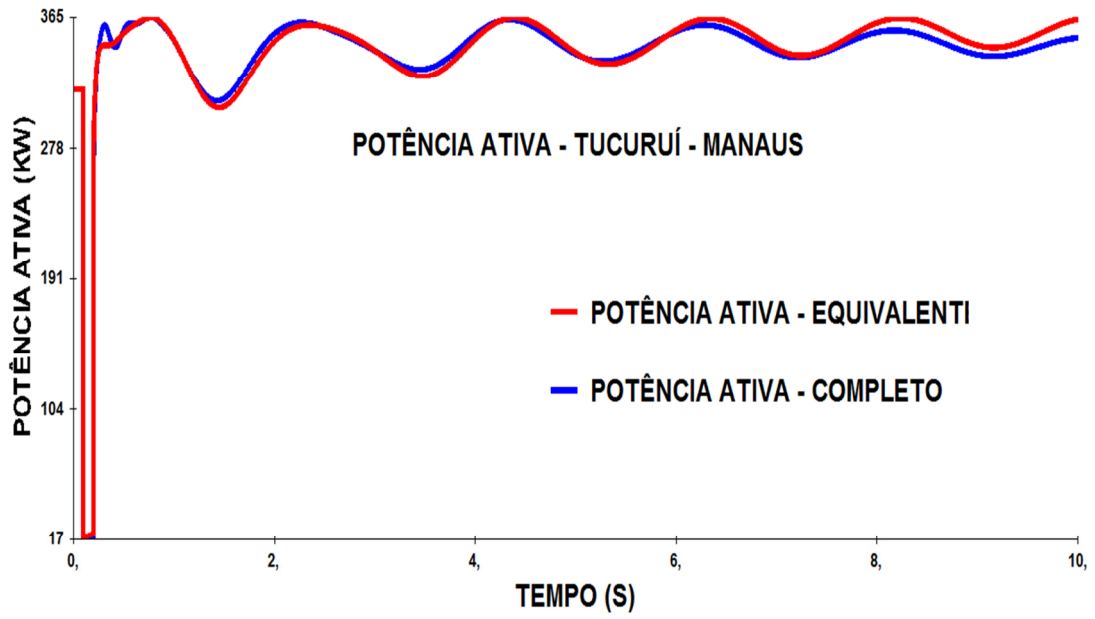


Figura 5.44 – Fluxo de Potência ativa de Tucuruí a Manaus – Carga Leve.

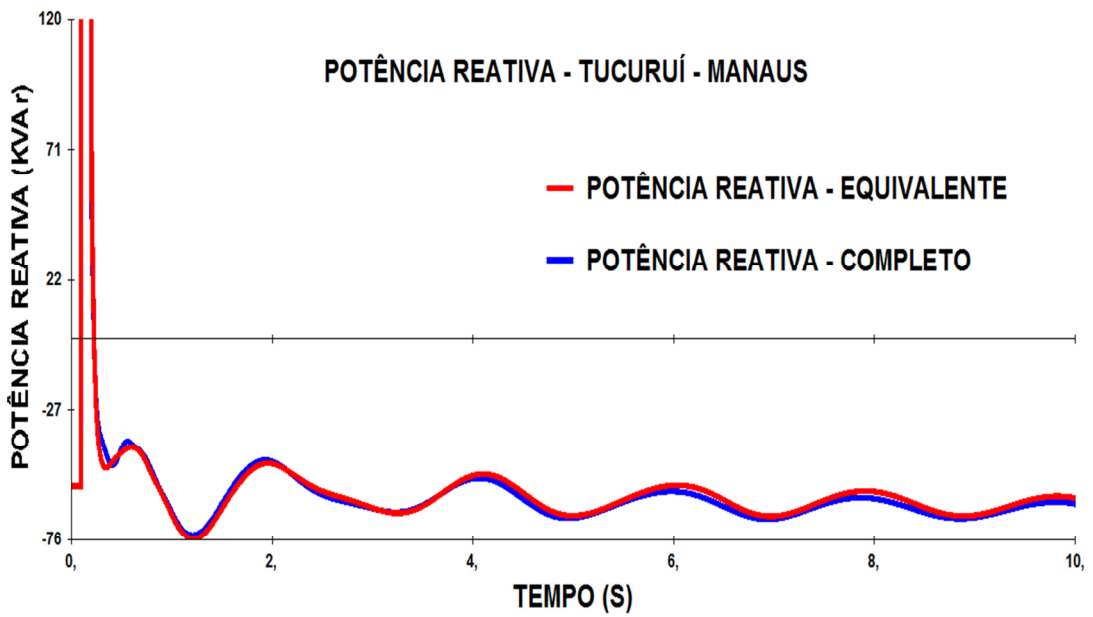


Figura 5.45 – Fluxo de Potência Reativa de Tucuruí a Manaus – Carga Leve.

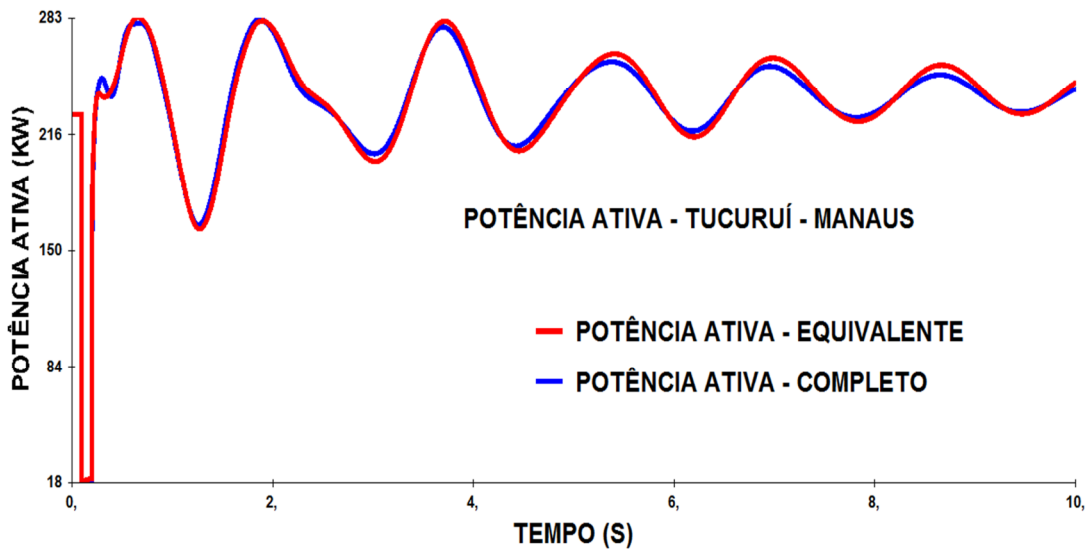


Figura 5.46 – Fluxo de Potência ativa Tucuruí sentido a Manaus – Carga Média.

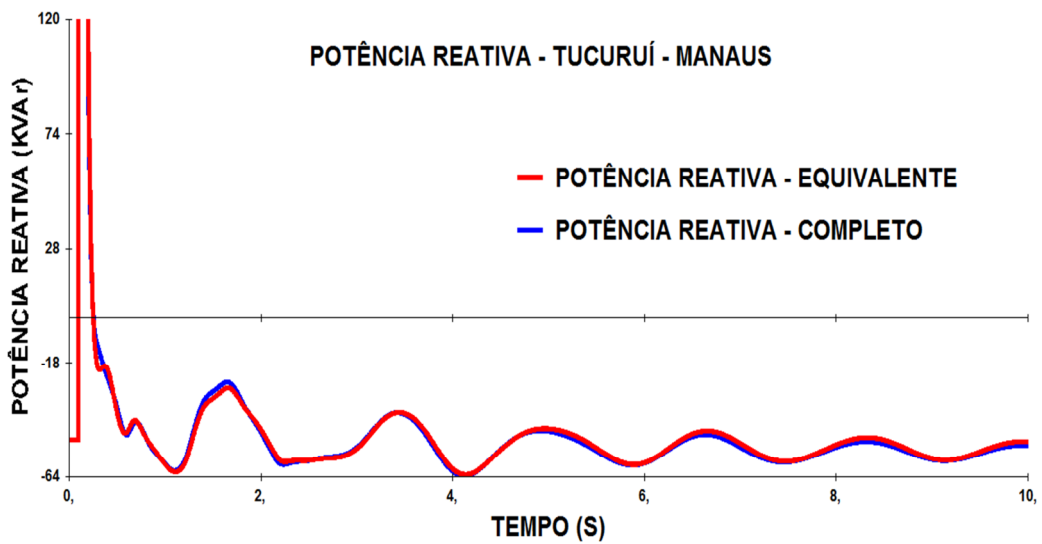


Figura 5.47 – Fluxo de Potência Reativa de Tucuruí a Manaus – Carga Média.

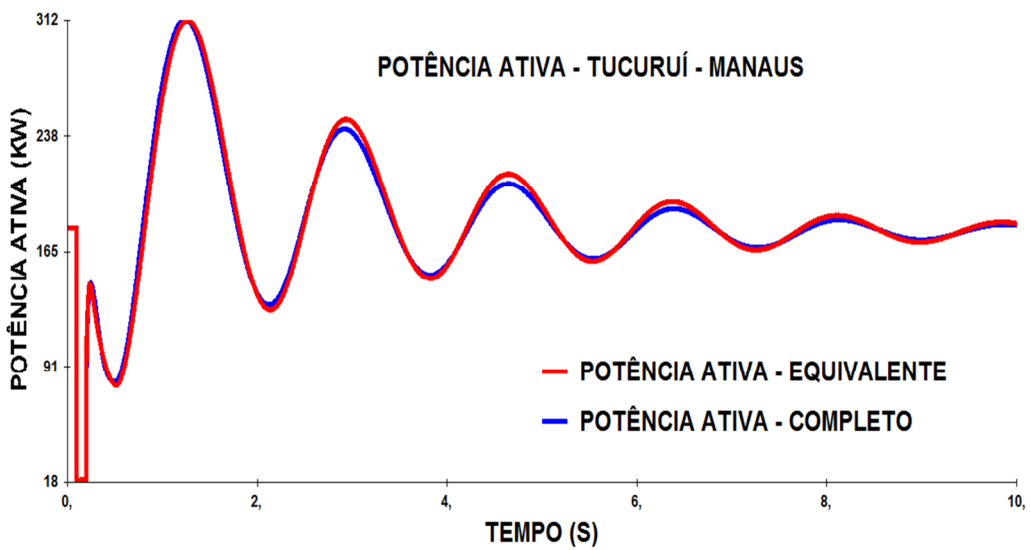


Figura 5.48 – Fluxo de Potência ativa de Tucuruí a Manaus – Carga Pesada.

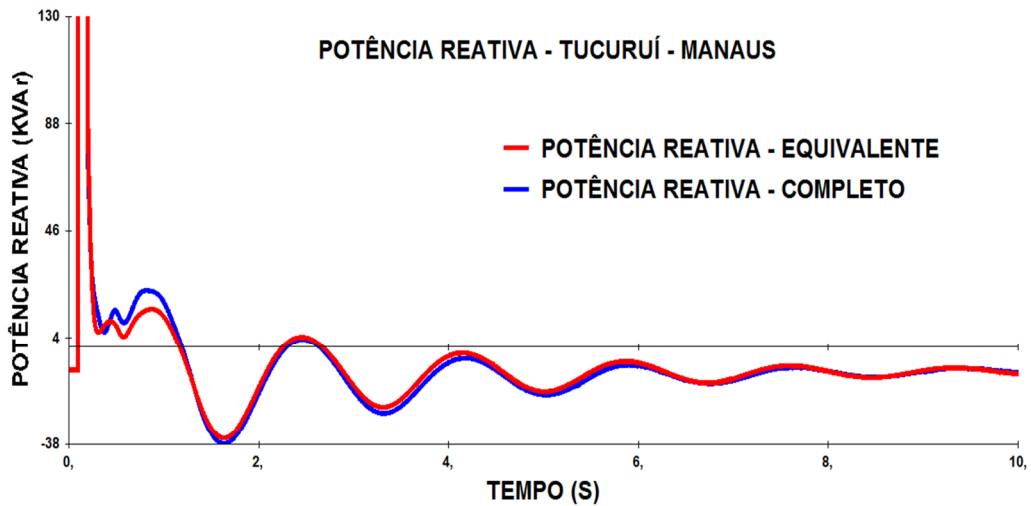


Figura 5.49 – Fluxo de Potência Reativa de Tucuruí a Manaus – Carga Pesada.

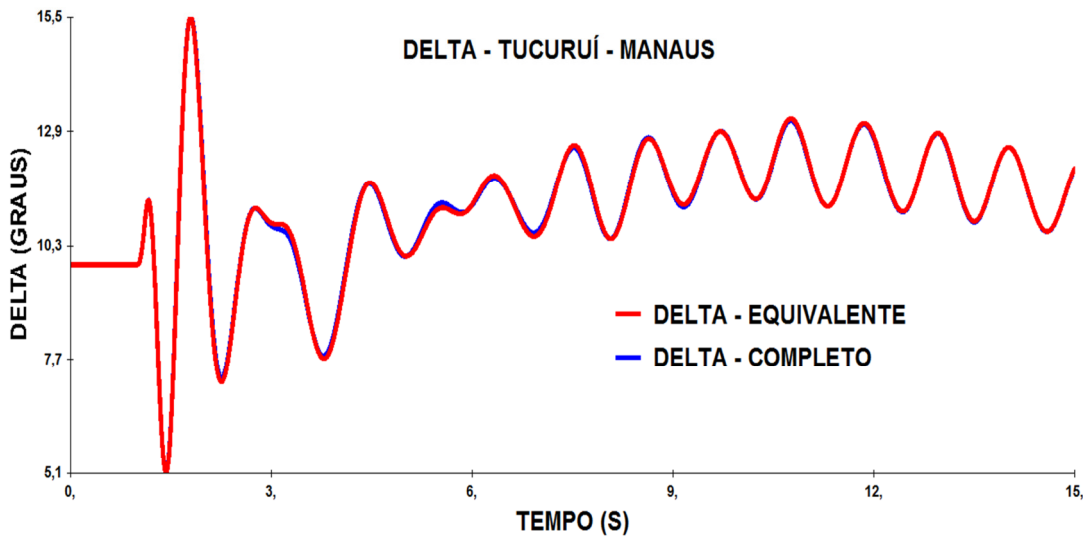


Figura 5.50 – Ângulo relativo do rotor de uma máquina do sistema elétrico de Manaus.

Os resultados obtidos mostraram que a identificação dos parâmetros via AG para os quatro equivalentes dinâmicos conectados ao subsistema norte é confiável e robusta, de tal forma a substituir uma parcela significativa do SIN por equivalentes, sem prejuízos para o comportamento dinâmico do sistema. A tabela 5.10 mostra a redução significativa do custo computacional a partir do uso do sistema equivalente em relação ao sistema completo.

Tabela 5.10 – Comparação dos Tempos de Simulação entre o Sistema Equivalente e o Completo.

| Sistema | Completo | Equivalente |
|--------------------|-----------|-------------|
| Tempo de Simulação | 6 minutos | 12 segundos |

CAPITULO 6.0 – CONCLUSÕES

6.1 – Conclusões gerais

Esta dissertação demonstrou o mérito da aplicação dos algoritmos genéticos no cálculo de equivalentes dinâmicos de sistemas de potência, a partir de testes em um sistema de pequeno porte, conhecido como sistema duas áreas, e um sistema de grande porte, conhecido como SIN, já com a interligação Tucuruí-Manaus-Macapá. A metodologia proposta propiciou a redução do modelo de sistemas de potência sem perda significativa de precisão, reproduzindo resultados similares aos do modelo completo em estudos de estabilidade transitória.

A redução estática da rede elétrica foi realizado pelo método do Ward não-linear, o qual demonstrou ser capaz de reduzir sistemas de grande porte, utilizando o programa ANAREDE. Os algoritmos genéticos foram utilizados para buscar os parâmetros dos equivalentes dinâmicos utilizando a integração das ferramentas GAOT e ANATEM. Os resultados mostraram que o método proposto é adequado para representar um sistema externo por equivalentes dinâmicos, apresentando similaridade no comportamento dinâmico, além de reduzir significativamente o tempo computacional de simulação no programa ANATEM.

6.2 – Sugestões para trabalhos futuros

- Cálculo de equivalentes dinâmicos de sistemas de potência usando dados da medição fasorial sincronizada;
- Utilização de outras metaheurísticas, como por exemplo, o enxame de partículas ou colônia de formigas, para comparar com os algoritmos genéticos.

Referências Bibliográficas

- [1] S. T. Y. Lee and F. C. Schweppe, “Distance measures and coherency recognition for transient stability equivalents,” *IEEE Trans. Power App. Syst.*, vol. PAS-92, no. 5, pp. 1550–1557, 1973.
- [2] R. Podmore, “Development of dynamic equivalents for transient stability studies,” EPRI, Report EPRI Project 763, May 1997.
- [3] CEPEL, Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, ANATEM: Análise de Transitórios Eletromecânicos, Manual Guide, 09 Version, Dec.2002.
- [4] A. H. M. A. Rahim e A. J. Al-Ramadhan. Dynamic Equivalent of External Power System and its Parameter Estimation through Artificial Neural Networks, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. vol. 24, no. 2, pp. 113-120. 2002.
- [5] J. M. R. Arredondo e R. G. Valle. An Optimal Power System Model Order Reduction Technique, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. vol. 26, no. 7, pp 493-500. 2004.
- [6] J. Yang, J. Zhang, W. Pan. Dynamic Equivalents of Power System Based on Extended Two Particle Swarm Optimization. *The International Conference on Natural Computation*, 2007.
- [7] G. L. R. de Brito, *Equivalentes Dinâmicos de Sistemas de Potência com Estruturas de Modelos de Geradores e seus Controladores*. Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica. Universidade de Brasília. 2009.
- [8] J. M. Ramirez, B. V. Hernandez, R. E. Correa. Dynamic Equivalence by an Optimal Strategy, *Electric Power System Research*, vol. 84, no. 01, pp.56-64. 2012.
- [9] C. Sturk, L. Vanfretti, Y. Chompoobutrgool, e H. Sandberg. Structured Power System Model Reduction of Non-Coherent Areas, *PES General Meeting*, San Diego, 2012.

- [10]Feng Ma, Student Member, IEEE, and Vijay Vittal, Fellow, IEEE A Hybrid Dynamic Equivalent Using ANN-Based Boundary Matching Technique IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS, VOL. 27, NO. 3, AUGUST 2012.
- [11] Savo D. Đukić, Andrija T. Sarić. A new approach to physics-based reduction of power system dynamic models. Electric Power Systems Research 101 (2013) 17– 24
- [12] A. J. Monticelli, Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica, Edgard Blücher, 1983.
- [13] KUNDUR, P. S., Power System Stability and Control. 4 ed. New York, McGraw-Hill, 1994.
- [14] ANDERSON, P. M., FOUAD, A. A., Power System Control and Stability. Iowa State University Press, Ames, 1977.
- [15] A.Chang and M.M. Adibi. Power system dynamics equivalentes. IEEE Transactions Power Apparatus and Systems, PAS-89(8):1737 1744, Nov/Dec 1970.
- [16] J.B. Ward, Equivalent circuits for Power flow studies, AIEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1949.
- [17] S. Deckmann et al., Studies on Power System load flow equivalencing, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1980.
- [18] W.L.Snyder,Jr; Load flow equivalent circuits – an overview, IEEE PES Winter Meeting, New York, Jan 1972.
- [19] X. Lei, D. Povh, and O. Ruhle. Industrial approaches for dynamic equivalents of large power systems. Proceedings of IEEE Power Engineering Society Winter Meeting.2:1036 - 10042, 2002.
- [20] www.ons.org.br.
- [21] “IEEE Guide for Synchronous Generator Modeling Practices and Applications in Power System Stability Analyses”, IEEE Std 1110-2002 (Revision of IEEE Std 1110-1991), vol., no., pp.0_1-72, 2003.
- [22] PARK R.H., “Two Reaction Theory of Synchronous Machines”, AIEE Trans. Part 1, vol. 46, pp. 716-727, 1929.
- [23] PARK R.H., “Two Reaction Theory of Synchronous Machines”, AIEE Trans. Part 2, vol. 52, pp. 352-354, 1933.

- [24] RANKIN, A. W., "Per-Unit Impedances of Synchronous Machines", American Institute of Electrical Engineers, Transactions of the, vol.64, no.8, pp.569-573, Aug. 1945.
- [25] B. B. Firouzi, E. Jamshidpour, and T. Niknam. A new method form estimation of large synchoronous geretator parameters by genetic algorithm. World Applied Sciences Journal, 4(3): 326 331 2008.
- [26] S. K. Wang, J. P. Chiou, and C. W. Liu. Parameters tuning of power system stabilizers using improved ant direction hybrid differential evolution. Electrical Power e Energy Systems, #1 (Issue 1) January 2009.
- [27] GOLDBERG, D. – Gentic Algorithm in Search, Optimization and Machine Learningng – Addison Wesley, 1989.
- [28] GOLDBERG, D.; HOLLAND, J. H. – Genetic Algorithms and Machine Learning- Springer Netherlans, 2005.
- [29] HOUCK, C.; JOINES, C.; KAY, M. – A Genetic Algorithm for Funtion Optimization: A Matlab Implementation – NCSU-IE TR 95-09, 1995. Disponível em www.ise.ncsu.edu/mirage/GAToolBox/gaot/
- [30] R. L. Haupt and S. E. Haupt, Practical Genetic Algorithms. Hoboken, NJ, USA: Wiley-Interscience, 2004.
- [31] S. L. Lopes, "Algoritmos Genéticos em Projetos de Engenharia: Aplicações e Perspectivas Futuras," Anais do IV Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente, São Paulo, SP, Brasil, Set. 1999, pp. 01-11.
- [32] D. S. Weile and E. Michielssen, "Genetic Algorithm Optimization Applied to Electromagnetics: A Review," IEEE Trans. on Antennas and Propagation, vol. 45, no. 3, pp. 343-353, Mar. 1997.
- [33] J.P. Vieira "Otimização de Controladores Utilizando Algoritmos Genéticos para Melhoria da Capacidade de Sobrevivência de Afundamento de Tensão de Aero geradores de Indução Duplamente Excitados" TD 11/2009.
- [34] GEN,M.; CHENG, R. - Genetic Algorithms and Engineering Design. New York, John Wiley & Sons, INC. 1997.

[35] GOLDBERG, D.; KUO, C.H. – Genetic algorithms in pipeline optimization. Journal of Computing in Civil Engineering, Vol.1, n° 2, Abril 1987

[36] GOLDBERG, D. E., Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning. Addison-Wesley, Reading, MA, 1989.

[37] MICHALEWICS, Z., Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs, 3 ed. Springer-Verlag, New York, 1992.

[38] GEN, M.; CHENG, R., Genetic Algorithms and Engineering Design, John Wiley & Sons, New York. 1997.