



**Universidade de São Paulo
Escola de Engenharia de São Carlos
Departamento de Engenharia Elétrica**

Trabalho de Conclusão de Curso

Estimação de Parâmetros de um Sinal Elétrico no Contexto da Proteção Digital Baseado em Algoritmos Genéticos

Autor:

Rubens Daniel Silva do Prado

Número USP:

5656140

Orientador:

Prof. Tit. Denis Vinicius Coury

São Carlos, Dezembro de 2010.

Rubens Daniel Silva do Prado

**Estimação de Parâmetros de um Sinal
Elétrico no contexto da Proteção Digital
Baseado em Algoritmos Genéticos**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Escola de Engenharia de São
Carlos da Universidade de São Paulo

Curso de Engenharia Elétrica com ênfase
em Sistemas de Energia e Automação

ORIENTADOR: Prof. Tit. Denis Vinicius Coury

São Carlos

2010

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTES TRABALHOS, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

P896e Prado, Rubens Daniel Silva do
Estimação de parâmetros de um sinal elétrico no contexto da proteção digital baseado em algoritmos genéticos / Rubens Daniel Silva do Prado ; orientador Denis Vinicius Coury. -- São Carlos, 2010.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica com ênfase em Sistemas de Energia e Automação) -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2010.

1. Algoritmos genéticos. 2. Tempo real - estimativa. 3. Proteção de equipamentos elétricos. 4. Sistemas elétricos de potência. I. Título.

Dedicatória

Aos meus pais, Arcelino e Ana, e meus
irmãos, Diego e Nathália, com amor.

Agradecimentos

- Aos companheiros de laboratório Daniel, Janison, Monaro, Ulisses e Wesley, pela colaboração essencial na construção deste trabalho.
- À Jaqueline, por todo amor, carinho e paciência em todos os momentos.
- Ao professor Denis Vinicius Coury, pela orientação, atenção, apoio e incentivo na elaboração deste trabalho.
- Ao professor Mário Oleskovicz, pelo auxílio durante todo o período de minha graduação.
- À todos os professores e funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica, que de algum modo colaboraram durante a minha graduação nesta universidade.
- Ao próprio Departamento de Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) – Universidade de São Paulo.
- Ao Laboratório de Sistemas de Energia Elétrica – LSEE, pela participação e fornecimento de todas as condições necessárias para o desenvolvimento deste trabalho.
- À Deus, por toda minha família e amigos.

Sumário

Dedicatória	i
Agradecimentos	iii
Sumário	v
Lista de Figuras	ix
Lista de Tabelas	xi
Lista de Siglas, Símbolos e Abreviaturas	xiii
Resumo	xv
Abstract	xvii
Capítulo 1	1
Introdução	1
1.1) Organização do Trabalho	4
Capítulo 2	7
Algoritmos Genéticos	7
2.1) Características Gerais	8
2.2) Avaliação da Aptidão	10
2.3) Seleção	10
2.3.1) Método da Roleta.....	11
2.3.2) Método do Torneio	12
2.3.3) Método da Amostragem Universal.....	13
2.4) Elitismo	13
2.5) Operadores Genéticos.....	13
2.5.1) Operadores Genéticos Reais.....	14
2.5.2) Operadores Genéticos Binários.....	15
2.6) Parâmetros Genéticos	16
2.7) Vantagens e Desvantagens dos Algoritmos Genéticos.....	17
2.7.1) Vantagens dos Algoritmos Genéticos.....	18
2.7.2) Desvantagens dos Algoritmos Genéticos	18
Capítulo 3	19
Transformada de Fourier	19
3.1) A modelagem matemática da Transformada de Fourier	19
3.2) Amostragem de Sinais.....	20
3.3) Transformada de Fourier para Tempos Discretos	24
3.4) Transformada Discreta de Fourier	25

Capítulo 4	27
Modelagem do Algoritmo Genético e da Transformada Discreta de Fourier	27
4.1) A modelagem do Algoritmo Genético.....	27
4.2) O Problema de Otimização e o Algoritmo Genético Proposto	29
4.2.1) Codificação.....	30
4.2.2) Operador Seleção proposto	31
4.2.3) Operador Cruzamento proposto.....	31
4.2.4) Operador Mutação proposto	32
4.3) Regularização do processo de estimação: A limitação da frequência	33
4.4) A modelagem da TDF	35
4.4.1) Passo 1	36
4.4.2) Passo 2	37
4.4.3) Passo 3	38
4.5) Obtenção dos sinais para validação das metodologias	39
4.5.1) Representação do Sinal A.....	39
4.5.2) Representação do Sinal B.....	40
4.5.3) Representação do Sinal C	40
Capítulo 5	41
Modelagem do Sistema Elétrico de Potência através do Software ATP	41
5.1) O Sistema Elétrico de Potência Simulado.....	41
5.1.1) Gerador Síncrono.....	43
5.1.2) Transformadores	44
5.1.3) Linhas de Transmissão	45
5.1.4) Cargas Conectadas ao SEP	46
5.2) Obtenção dos sinais para comparação das metodologias.....	46
5.2.1) Sinal I: Falta Monofásica em 50% da Linha 1	46
5.2.2) Sinal II: Energização do Transformador TR1E.....	47
5.2.3) Sinal III: Desconexão Repentina dos Transformadores TR1E e TR3E.....	48
5.2.4) Sinal IV: Conexão Repentina de um Bloco de Carga.....	49
5.2.5) Sinal V: Falta Monofásica no Barramento do Gerador.....	49
Capítulo 6	51
Resultados da Aplicação dos Algoritmos Genéticos e TDF no Sistema Estudado	
– Um Estudo Comparativo	51
6.1) Validação dos algoritmos implementados.....	51
6.1.1) Análise do Sinal A	51

6.1.2) Análise do Sinal B.....	53
6.1.3) Análise do Sinal C.....	55
6.1.4) Conclusões parciais.....	56
6.2) Comparação dos algoritmos implementados.....	56
6.2.1) Sinal I: Falta Monofásica em 50% da Linha 1.....	56
6.2.2) Sinal II: Energização do Transformador TR1E.....	59
6.2.3) Sinal III: Desconexão Repentina dos Transformadores TR1E e TR3E.....	62
6.2.4) Sinal IV: Conexão Repentina de um Bloco de Carga.....	64
6.2.5) Sinal V: Falta Monofásica no Barramento do Gerador.....	65
6.3) Análises das metodologias.....	68
6.3.1) Complexidade de implementação.....	68
6.3.2) Tempo de processamento.....	69
6.3.3) Exatidão e precisão das respostas.....	70
6.3.4) Emprego na estimação em tempo real.....	71
Capítulo 7.....	73
Conclusões.....	73
7.1) Considerações sobre as metodologias apresentadas.....	73
7.2) Sugestões para continuidade da pesquisa.....	75
Referências Bibliográficas.....	77
Apêndice A.....	81
Dados do Sistema Elétrico.....	81
Apêndice B.....	85
Divulgação do Trabalho em Artigos Científicos.....	85

Lista de Figuras

Figura 1: Fluxograma da Execução do AG.....	9
Figura 2: Método da Roleta.	12
Figura 3: Método do Torneio.....	12
Figura 4: Método da Amostragem Universal.....	13
Figura 5: Exemplo do cruzamento de Um-Ponto.....	15
Figura 6: Exemplo do cruzamento de Dois-Pontos.....	16
Figura 7: Exemplo do cruzamento uniforme.....	16
Figura 8: Exemplo de Mutação.....	16
Figura 9: Amostragem de um sinal.....	21
Figura 10: Representação gráfica de $X(\Omega)$	22
Figura 11: Representação gráfica de $P(\Omega)$	22
Figura 12: Representação gráfica do sinal $X(\Omega)$ amostrado.....	23
Figura 13: Representação gráfica do <i>aliasing</i> na amostragem de um sinal.....	24
Figura 14: Relação da TDF com o plano z.....	26
Figura 15: Janela deslizante de um ciclo.....	29
Figura 16: População do AG na (a) Primeira geração e, (b) Vigésima geração.....	30
Figura 17: Representação individual da codificação binária.....	31
Figura 18: O operador cruzamento.....	32
Figura 19: Análise gráfica da localização de uma solução ótima.....	34
Figura 20: Características do Sinal A.....	39
Figura 21: Características do Sinal B.....	40
Figura 22: Características do Sinal C.....	40
Figura 23: O sistema elétrico de potência simulado.....	42
Figura 24: Sinal I: Falta permanente em 50% da linha 1.....	47
Figura 25: Sinal II: Energização do Transformador TR1E.....	48
Figura 26: Sinal III: Desconexão repentina dos Transformadores TR1E e TR3E.....	49
Figura 27: Sinal IV: Conexão repentina de um bloco de carga em BCGH3.....	50

Figura 28: Sinal V: Falta permanente no barramento BGER.	50
Figura 29: Processo de estimação da amplitude e frequência do sinal A.....	52
Figura 30: Processo de estimação da amplitude e frequência do sinal B.....	54
Figura 31: Processo de estimação da amplitude e frequência do sinal C.	55
Figura 32: Estimação da frequência do Sinal I.....	57
Figura 33: Estimação da amplitude do Sinal I.....	58
Figura 34: Estimação da fase do Sinal I.....	59
Figura 35: Estimação da frequência do Sinal II.....	60
Figura 36: Estimação da amplitude do Sinal II.....	61
Figura 37: Estimação da fase do Sinal II.....	61
Figura 38: Estimação da frequência do Sinal III.....	62
Figura 39: Estimação da amplitude do Sinal III.....	63
Figura 40: Estimação da fase do Sinal III.....	63
Figura 41: Estimação da frequência do Sinal IV.	64
Figura 42: Estimação da amplitude do Sinal IV.	65
Figura 43: Estimação da fase do Sinal IV.	66
Figura 44: Estimação da frequência do Sinal V.	66
Figura 45: Estimação da amplitude do Sinal V.	67
Figura 46: Estimação da fase do Sinal V.	67
Figura 47: Diagrama de blocos simplificado do sistema de excitação.....	82

Lista de Tabelas

Tabela 1: Valores de aptidão de indivíduos de uma população	11
Tabela 2: Codificação dos parâmetros e espaço de busca.	31
Tabela 3: Dados do gerador síncrono.....	81
Tabela 4: Parâmetros do sistema de controle de velocidade	82
Tabela 5: Dados dos transformadores.....	82
Tabela 6: Dados da linha de transmissão - condutor de fase.....	83
Tabela 7: Dados da linha de transmissão - cabos de pára-raios.....	83
Tabela 8: Dados da linha de transmissão - resistividade do solo e flechas.....	83
Tabela 9: Dados das cargas em estrela conectadas ao SEP.....	83

Lista de Siglas, Símbolos e Abreviaturas

AD - Analógico-Digital

AG - Algoritmo Genético

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica

ATP - *Alternative Transients Program*

CE - Computação Evolutiva

CPFL - Companhia Paulista de Força e Luz

DA - Digital-Analógico

EE - Energia Elétrica

FFT - *Fast Fourier Transform*

FPGA - *Field-Programmable Gate Array*

MATLAB - *Matrix Laboratory*

QEE - Qualidade da Energia Elétrica

SEP - Sistema Elétrico de Potência

TDF - Transformada Discreta de Fourier

TFTD - Transformada de Fourier para Tempos Discretos

Resumo

PRADO, R. D. S. (2010). *Estimação de Parâmetros de um Sinal Elétrico no Contexto da Proteção Digital Baseado em Algoritmos Genéticos*. São Carlos, 2010. Trabalho de Conclusão de Curso – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Dentro do contexto da proteção de Sistemas Elétricos de Potência (SEP), a estimativa em tempo real de parâmetros dos sinais elétricos é fundamental para se projetar uma proteção confiável, garantindo sua atuação em situações de subfrequência, sobrefrequência e perda de sincronismo. A partir desta visão, este trabalho propõe uma nova maneira de estimar a amplitude, frequência e fase de um sinal elétrico, utilizando um modelo de problema de otimização e um algoritmo genético (AG) para solucioná-lo. Após a implementação desta técnica, uma comparação será realizada com uma variação proposta por Wang & Sun do tradicional e amplamente difundido método para estimação de parâmetros de sinais elétricos: A Transformada Discreta de Fourier (TDF). Finalmente, após esta comparação, serão analisadas vantagens e desvantagens destas duas metodologias, analisando desde o processo de implementação até o processo de estimação de parâmetros em tempo real.

Palavras-chaves: Algoritmo Genético (AG); Estimação em tempo real; Perda de Sincronismo; Proteção de Sistemas Elétricos de Potência (SEP); Sobrefrequência; Subfrequência.

Abstract

PRADO, R. D. S. (2010). *Estimation of Electrical Signals Parameters in the Digital Protection Context Based on Genetic Algorithms*. São Carlos, 2010. Course Conclusion Work – Engineering School of São Carlos, University of São Paulo.

In the context of Electrical Power Systems (EPS) protection, real-time electrical signal estimation of parameters is fundamental to design a reliable protection in order to enable the EPS operation in situations of under-frequency, over-frequency and loss of synchronism. Based on this scenario, this work proposes a new method of estimating the amplitude, frequency and phase angle of an electrical signal. The approach uses an optimization problem model and a genetic algorithm (GA) implementation to solve it. After the implementation of this technique, a comparison is carried out with a variation proposed by Wang & Sun of the well-known and disseminated method used in the estimation of electrical signal parameters: the Discrete Fourier Transform (DFT). Finally, after this comparison, the advantages and disadvantages of both methods will be presented, since the implementation process until real-time estimation of the parameters.

Keywords: Electrical Power Systems (EPS) protection; Genetic Algorithm (GA); Loss of synchronism; Over-frequency; Real-time estimation; Under-frequency.

Capítulo 1

Introdução

Na história do desenvolvimento da sociedade, a Energia Elétrica (EE), desde a sua descoberta, sempre ocupou lugar de destaque no cotidiano das pessoas, tendo em vista a dependência da qualidade de vida, do progresso econômico, da qualidade do produto e dos serviços relacionados à energia elétrica. Estas por sua vez dependem de como as empresas de eletricidade projetam, operam e mantêm os sistemas elétricos de potência (SEP).

A EE proporciona à sociedade trabalho, produtividade e desenvolvimento, e a todas as pessoas conforto, comodidade, bem-estar e praticidade, o que torna toda sociedade cada vez mais dependente de seu fornecimento e mais sensível às eventuais falhas do sistema elétrico. Em contrapartida, esta dependência dos usuários vem se traduzindo em exigências por melhor qualidade de serviço e do produto. Pelo fato da EE ser uma fonte de energia limpa, ela é tida como uma das mais nobres formas de energia secundária. A sua facilidade de geração, transporte, distribuição e utilização, com as conseqüentes transformações em outras formas de energia, atribuem à eletricidade uma característica de universalização, disseminando o seu uso ao redor de toda sociedade. No mundo de hoje, a importância dada à eletricidade é tão grande que é considerada por muitas organizações como um direito humano básico, assim como o alimento e a moradia. A eletricidade, nos dias de hoje, é a forma de energia moderna dominante, e esta supremacia é facilmente observável no desenvolvimento de tecnologias nas áreas de telecomunicações, de informações e da produção de bens e serviços.

O contínuo crescimento da população mundial e da economia dos países desenvolvidos e em desenvolvimento implica, necessariamente, no aumento do consumo de energia. Porém, nos dias de hoje, em que a sociedade vem aumentando o seu engajamento com as questões sustentáveis e ambientais, a produção de energia passa a seguir os conceitos de desenvolvimento sustentável e de responsabilidade ambiental. Desta forma, o crescimento

da geração de EE é esperado, já que se trata de uma forma de energia limpa, sendo estimado em 50% para os próximos 20 anos [1].

Diante deste quadro, os SEPs ganham uma grande importância, já que estes se caracterizam por compreender todo o processo de geração, transmissão e de distribuição. O conjunto destes processos garante que toda EE gerada, seja em qualquer forma ou qualquer lugar, seja levada aos centros urbanos, onde poderá ser utilizada em residências, comércios e indústrias. De uma forma mais técnica, o objetivo de um SEP é gerar, transmitir e distribuir energia elétrica atendendo a determinados padrões de confiabilidade, disponibilidade, qualidade, segurança e custos, com o mínimo impacto ambiental e o máximo de segurança.

A confiabilidade representa a probabilidade de componentes, partes e sistemas realizarem suas funções requeridas por um dado período de tempo sem apresentar falhas. Esta característica representa o tempo que o componente, parte ou sistema levará para falhar [2]. É importante salientar que a confiabilidade não tem relação com o tempo necessário para uma unidade em reparo retornar à condição normal de trabalho. Já a disponibilidade é definida como a probabilidade do sistema estar operando adequadamente. Esta propriedade, ao contrário da confiabilidade, relaciona-se diretamente com o tempo de reparo de uma unidade retornar as condições normais de trabalho.

A Qualidade da Energia Elétrica (QEE) está relacionada com a condição de compatibilidade entre sistema supridor e carga atendendo critérios de conformidade senoidal, como índices de distorção e flutuações de frequência. A Segurança está relacionada com a capacidade de o sistema responder a distúrbios que possam ocorrer em seu funcionamento. Em geral, os sistemas elétricos são construídos para continuar operando após ser submetido a uma contingência, como uma falta ou a manutenção de algum elemento do sistema [1].

A estrutura do sistema elétrico de potência compreende os sistemas de geração, transmissão, distribuição e subestações de energia elétrica, em geral cobrindo uma grande área geográfica. As subestações de energia elétrica se caracterizam por realizar a transição entre os sistemas de geração, transmissão e distribuição. Por exemplo, existem subestações elevadoras de tensão, as quais são responsáveis pelo aumento da tensão e realizam esta função entre os sistemas de geração e transmissão. Existem também as subestações abaixadoras, as quais realizam a diminuição da tensão entre os sistemas de transmissão e distribuição, a fim de fornecer a EE aos seus usuários compatíveis com os valores requeridos.

O sistema de geração é responsável por gerar EE a partir de outras formas de energia. No Brasil, a geração hidrelétrica é predominante em sua matriz energética, devido ao grande potencial hidrográfico do país. Em termos mundiais, a utilização de combustíveis fósseis (petróleo, carvão mineral e gás natural) em termelétricas ainda são predominantes na geração. Existem ainda outras formas de geração, como a nuclear, solar, eólica e maremotriz.

O sistema de transmissão tem a função de levar a energia gerada nos pólos geradores para os centros consumidores. Em países como o Brasil, caracterizado fisicamente pela grande dimensão territorial e pelas grandes distâncias entre a geração e os centros consumidores, a transmissão tem uma importância ainda mais significativa.

O sistema de distribuição é caracterizado por distribuir a EE advinda da transmissão para cada unidade dos centros consumidores. Essa função é realizada pelas concessionárias de energia e fiscalizada pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), a qual se caracteriza por regularizar a distribuição da EE através da criação de leis, garantindo critérios de segurança e qualidade na atuação das concessionárias neste sistema [2].

Devido à grande dimensão dos SEPs, diversas áreas de estudos relacionadas aos sistemas de potência aparecem, entre elas, a área de estudo da proteção, a qual tem a função de criar soluções para a proteção dos elementos dos SEP (motores, geradores, linhas de transmissão, transformadores, etc.) contra situações de não conformidade na geração, transmissão e distribuição, como curtos-circuitos, alterações na frequência e perda de sincronismo.

No contexto de proteção de SEP, a estimação em tempo real da frequência se apresenta como uma importante ferramenta em muitos campos da engenharia elétrica. Os relés digitais de frequência utilizam a estimativa da frequência para tomar a decisão de abertura diante de situações de sua não conformidade. A precisão da estimativa de frequência também é essencial para a estabilidade dos SEP, pelo fato do balanço dinâmico entre geração e carga, o qual é um pré-requisito para uma operação estável, ter se tornado mais complexo, considerando a grande expansão dos sistemas elétricos. O crescente interesse em Qualidade da Energia Elétrica (QEE) também tem estimulado pesquisas para se encontrar novas ferramentas e métodos para estimar precisamente a frequência instantânea [3].

Alguns pesquisadores têm proposto diferentes técnicas para resolver o problema da estimação da frequência. Algoritmos baseados no erro de fase utilizando a Transformada Discreta de Fourier (TDF) são apresentados em [4] e [5]. Métodos baseados na abordagem

com filtros de Kalman são utilizados para a estimação da frequência complexa em [6] e [7]. Outras referências apresentam métodos obtidos pela modelagem da tarefa de estimação como problemas de otimização. Em [8], utiliza-se o algoritmo de Newton para solucionar o problema. O método do gradiente é usado em [9] e [10] e os conjuntos resultantes das equações não-lineares são chamados EPLL (*Enhanced Phase-Locked Loop*). Um algoritmo baseado no erro dos mínimos quadrados é derivado em [11], levando em consideração alguns coeficientes da série expandida de Taylor para o modelo do sinal de entrada. Uma técnica de filtragem adaptativa, o algoritmo da média do mínimo quadrado, é apresentada em [12]. As demais referências a seguir utilizam técnicas inteligentes para estimar a frequência dos SEP. A abordagem de redes neurais artificiais é usada em [13]. Já a técnica de algoritmos genéticos (AG) é utilizada na solução de problemas de otimização em [14], [15] e [16].

Este trabalho apresenta um método eficiente baseado em AG para estimação dos parâmetros de um sinal elétrico, destacando a estimação da frequência. Uma janela deslizante com amostras capturadas do sinal de entrada é usada para ajustar uma onda senoidal pura. A principal contribuição deste trabalho é realizar a comparação desta nova abordagem proposta com a técnica proposta em [5], a qual já apresenta resultados eficientes quando comparados a técnicas de estimação tradicionais.

1.1) Organização do Trabalho

Este trabalho está organizado da seguinte maneira:

- **Capítulo 2:** apresenta o desenvolvimento teórico dos Algoritmos Genéticos. Neste capítulo é realizado um breve resumo histórico da evolução da computação evolutiva e da utilização de ferramentas inteligentes na solução de problemas de otimização. Além disso, a estrutura básica de algoritmos genéticos é detalhadamente explicada com base nas referências bibliográficas estudadas. Por fim, são mostradas vantagens e desvantagens associadas a esta ferramenta.
- **Capítulo 3:** expõe, de forma sucinta, a teoria matemática associada à Transformada de Fourier e da amostragem de sinais. O principal objetivo deste capítulo é dar embasamento teórico a ferramenta proposta por [5], a qual será comparada com o algoritmo genético proposto.
- **Capítulo 4:** mostra a modelagem do Algoritmo Genético e da Transformada de Fourier para a estimação de parâmetros de um sinal elétrico. Neste capítulo são abordados todos os procedimentos, considerações e métodos utilizados na implementação destes

algoritmos. Além disso, também são apresentados os sinais gerados para validação das metodologias.

- **Capítulo 5:** neste capítulo, a modelagem do SEP no *software* ATP (*Alternative Transients Program*) é apresentada, com minuciosa descrição de cada elemento pertencente ao sistema. Ademais, são apresentados os sinais que serão utilizados para comparação do Algoritmo Genético e da Transformada de Fourier, os quais foram obtidos através de simulações realizadas com o SEP.

- **Capítulo 6:** apresenta todas as discussões sobre os resultados obtidos neste trabalho. Em primeiro lugar é realizada a validação dos modelos implementados no capítulo 4 através da análise de três sinais propostos. Por fim, é feita a apresentação de cinco situações de não-conformidade simuladas no sistema de potência implementado. A partir destes casos, é realizada a comparação dos modelos de AG e da TDF proposta em [5], considerando aspectos como o tempo de processamento envolvido na simulação e a eficiência dos resultados estimados.

- **Capítulo 7:** expõe uma síntese dos assuntos que foram abordados no trabalho, as principais conclusões obtidas e as sugestões de trabalhos futuros para a continuidade desta linha de pesquisa.

- **Apêndice A:** apresenta os dados do sistema elétrico utilizado nas simulações.
- **Apêndice B:** mostra a divulgação deste trabalho em artigos científicos.

Capítulo 2

Algoritmos Genéticos

Há muito tempo, o homem tem se servido das características e princípios existentes na natureza para a criação de máquinas, métodos e técnicas que melhorem sua qualidade de vida. Alguns exemplos típicos desta afirmação são: os aviões, baseado nas características dos pássaros; sonares, baseados nos morcegos e; a criação da técnica inteligente de redes neurais inspirada no cérebro humano.

Diante deste contexto, surgiu em meados do século XIX um dos mais importantes princípios no campo da ciência evolutiva, A Seleção Natural de Darwin, a qual defende a idéia de que na natureza dos seres vivos, aqueles que melhor se adaptem às condições impostas, tendem a sobreviver frente aos demais [17].

Tendo em vista estas idéias e o contínuo avanço computacional, surgem técnicas baseadas nestes princípios com a finalidade de gerar soluções para os atuais problemas práticos, dando origem a mais uma técnica de inteligência computacional, denominada Algoritmo Genético (AG), sendo esta uma das subáreas da Computação Evolutiva (CE). A CE é baseada em mecanismos evolutivos encontrados na natureza, tais como a auto-organização e o comportamento adaptativo, os quais derivam da teoria da evolução natural de Darwin [18].

Historicamente, as primeiras iniciativas em CE foram na área da biologia e genética, com o interesse em simular os processos vitais em computadores. Em meados do século XX, iniciaram-se pesquisas na área de sistemas evolucionários com o intuito de utilizá-las na solução de problemas de otimização. Tratava-se de sistemas modelados por meio de princípios da seleção natural aplicados a ambientes mutáveis. A idéia básica deste modelo era evoluir uma população de possíveis soluções iniciais, utilizando técnicas inspiradas na seleção natural e na genética [19].

Posteriormente, iniciaram-se pesquisas e estudos relacionados com os sistemas adaptativos, os quais foram modelados como sistemas de aprendizagem de máquinas. Esses modelos, que são conhecidos como AG, programavam populações de indivíduos

representados por cadeias de bits e, sob eles, eram aplicados operadores de seleção, cruzamento e mutação.

Os AGs empregam uma estratégia de busca paralela, estruturada e aleatória voltada em direção ao reforço da busca de pontos de alta aptidão, a qual, do ponto de vista da otimização, representa a busca pelos pontos ótimos de uma função a ser minimizada ou maximizada. Apesar de aleatórios, não se trata de caminhos aleatórios não direcionados, pois exploram informações históricas para encontrar novos pontos de busca, nos quais são esperados melhores desempenhos. Este processo é feito de forma iterativa e cada etapa finalizada é denominada geração.

Durante cada iteração, os princípios de seleção e reprodução são aplicados a uma população de candidatos que pode variar dependendo da complexidade do problema e dos recursos computacionais disponíveis. Através da seleção, determinam-se quais indivíduos conseguirão se reproduzir gerando um número determinado de descendentes para a próxima geração, com uma probabilidade determinada pelo seu índice de aptidão. De uma maneira geral, os indivíduos com maior adaptação relativa têm maiores chances de se reproduzirem [17].

2.1) Características Gerais

Os AGs têm sido usados na ciência e na engenharia como algoritmos adaptativos de busca de soluções em problemas e como modelo computacional de sistemas naturais evolucionários. Vale lembrar que os AGs são uma classe de procedimentos com um conjunto de passos distintos e bem especificados, no qual cada um destes passos possui muitas possíveis variações.

As tarefas de busca ou otimização possuem vários componentes, entre eles o espaço de busca, no qual são consideradas todas as possibilidades de solução de um determinado problema; e a função de avaliação, a qual avalia as soluções no espaço de busca [20].

Os métodos e técnicas de busca e otimização tradicionais iniciam-se com um único candidato que é manipulado utilizando, geralmente, métodos determinísticos para resolução de um problema. Por outro lado, as técnicas mais recentes, fundamentadas na computação evolucionária, operam sobre uma população de candidatos em paralelo. Assim, elas podem fazer a busca em diferentes áreas do espaço de soluções, alocando um número de soluções apropriadas para a busca em várias regiões. Portanto, essas técnicas têm maiores chances de atingir as áreas mais promissoras do espaço de busca.

Segundo [21], O AG difere dos métodos tradicionais de busca e otimização em quatro aspectos:

- O AG trabalha com uma codificação do conjunto de parâmetros e não com os próprios parâmetros;
- O AG explora um espaço de busca, no qual estão todas as possíveis soluções do problema;
- O AG utiliza informações de custo e não derivadas ou conhecimento auxiliar; e
- O AG utiliza regras de transição probabilísticas e determinísticas.

O AG se baseia, inicialmente, na geração de uma população formada por um conjunto aleatório de indivíduos que podem ser vistos como possíveis soluções do problema. Durante o processo evolutivo, esta população é avaliada de maneira que para cada indivíduo é dado um índice, o qual reflete sua habilidade de adaptação a determinado ambiente. Uma porcentagem dos mais adaptados é mantida, enquanto os outros são descartados. Os membros mantidos pela seleção podem sofrer modificações em suas características, através dos operadores genéticos, gerando descendentes para a próxima geração. Este processo, chamado de reprodução, é repetido até que um conjunto de soluções satisfatórias seja encontrado, conforme apresentado na Figura 1 [17]. Cada uma das fases do algoritmo será comentada com mais detalhes a seguir.

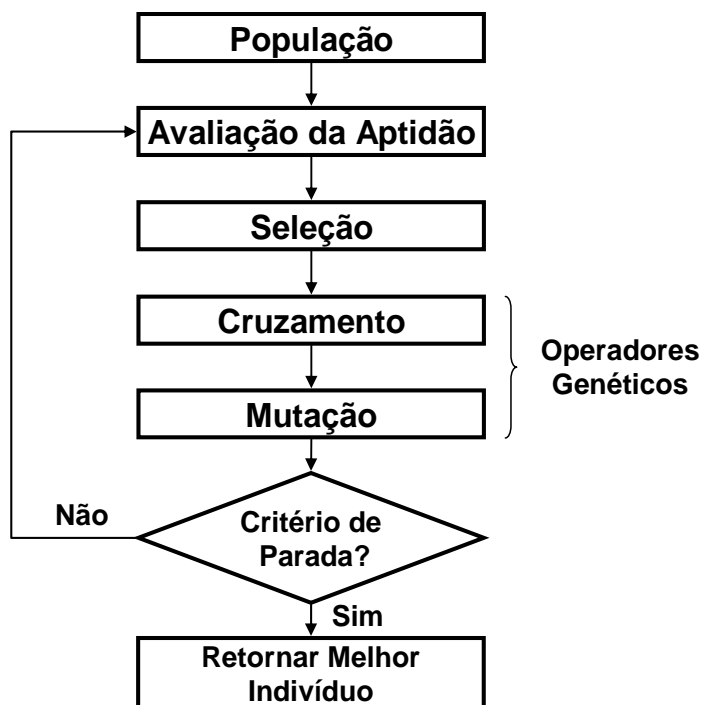


Figura 1: Fluxograma da Execução do AG.

Embora possam parecer simplistas do ponto de vista biológico, esses algoritmos são suficientemente complexos para fornecer mecanismos poderosos e robustos de busca adaptativa [18]. Ressalta-se que o desempenho da implementação do AG dependerá da

escolha da melhor representação do problema, do tamanho da população inicial, dos tipos de operadores genéticos escolhidos, das probabilidades de tais operações ocorrerem e da escolha da função de avaliação.

2.2) Avaliação da Aptidão

A avaliação da aptidão é realizada por uma função matemática, a qual avalia a evolução dos indivíduos da população a cada geração. O valor de saída da função classifica cada indivíduo em relação à solução encontrada pelo AG. A partir desta classificação, os melhores indivíduos obtidos serão selecionados na função Seleção e originarão os futuros indivíduos da próxima geração.

A função de aptidão normalmente é modelada baseada em um erro calculado pela diferença entre os valores tomados como base e aqueles estimados pelo AG. O resultado da função, calculado a cada iteração, indicará a qualidade da resposta encontrada pelo AG em relação aos valores de referência. Do ponto de vista adaptativo, a avaliação da aptidão determina a capacidade do indivíduo sobreviver perante as variações dos parâmetros envolvidos.

2.3) Seleção

A idéia principal do operador de seleção é oferecer aos melhores indivíduos da atual população preferência para o processo de reprodução, permitindo que estes indivíduos passem suas características genéticas para as próximas populações, resultando em melhores gerações para o problema apresentado. Analogamente, este processo ocorre na natureza, em que os indivíduos mais adaptados ao ambiente possuem melhores condições de reprodução que os indivíduos menos adaptados [17].

No processo de seleção, após a classificação realizada pela função aptidão, é gerada uma população intermediária e, a partir desta população, são selecionados os indivíduos para a função Cruzamento. A importância da etapa de Seleção se dá em virtude da mesma ser completamente independente do restante do AG. Assim, qualquer operador de seleção pode ser transferido independente da representação do problema, caracterizando o operador Seleção como universal.

Existem vários métodos propostos para o operador Seleção, entre os quais serão destacados o Método da Roleta, o Método do Torneio e o Método da Amostragem Universal. Para facilitar a compreensão e a diferença entre os métodos, considera-se uma

população com sete indivíduos de aptidão e aptidão relativa ilustrados na Tabela 1. As informações dessa tabela serão utilizadas para o entendimento dos três métodos.

Tabela 1: Valores de aptidão de indivíduos de uma população

Indivíduo	Aptidão	Aptidão Relativa
I1	1	0,025
I2	3	0,075
I3	4	0,100
I4	6	0,150
I5	7	0,175
I6	9	0,225
I7	10	0,250

2.3.1) Método da Roleta

É o método mais simples e também o mais usado. Os indivíduos de uma geração são selecionados para a próxima geração utilizando uma roleta, semelhante à roleta utilizada em jogos de cassino. Cada indivíduo da população é representado na roleta por uma porção proporcional ao seu índice de aptidão. Assim, os indivíduos com melhor aptidão ocupam porções maiores da roleta e os indivíduos de pior aptidão recebem porções menores.

A Figura 2 ilustra uma roleta a partir de valores de aptidão dos indivíduos de uma população. Para a seleção dos indivíduos, a roleta é girada um determinado número de vezes, definido pelo tamanho da população. A cada giro da roleta, um indivíduo apontado pela agulha é selecionado.

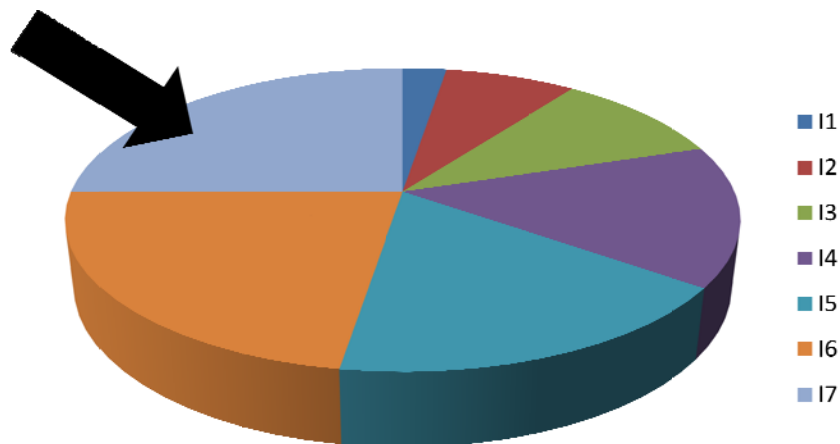


Figura 2: Método da Roleta.

O método da roleta apresenta a desvantagem de possuir uma alta variância, podendo levar a um grande número de cópias de uma boa característica de um indivíduo, diminuindo a variabilidade da população.

2.3.2) Método do Torneio

Nesse método n indivíduos da população são selecionados aleatoriamente, com a mesma probabilidade. O indivíduo com a melhor aptidão dentre estes n cromossomos é selecionado para a população intermediária. O processo se repete até que a população intermediária seja preenchida. O valor utilizado para n varia conforme a necessidade de cada caso. O uso do método de seleção por torneio para $n = 3$ é ilustrado na Figura 3.

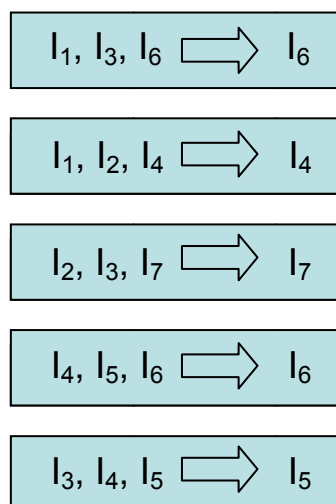


Figura 3: Método do Torneio.

2.3.3) Método da Amostragem Universal

Esse método é uma variação do método da roleta em que, em vez de uma única agulha, n agulhas são utilizadas. O n depende do número de indivíduos a serem selecionados para a próxima geração. Assim, ao invés de girar n vezes a roleta, gira-se apenas uma vez, exibindo menos variância que as repetidas chamadas do método da roleta. Tal método é ilustrado na Figura 4.

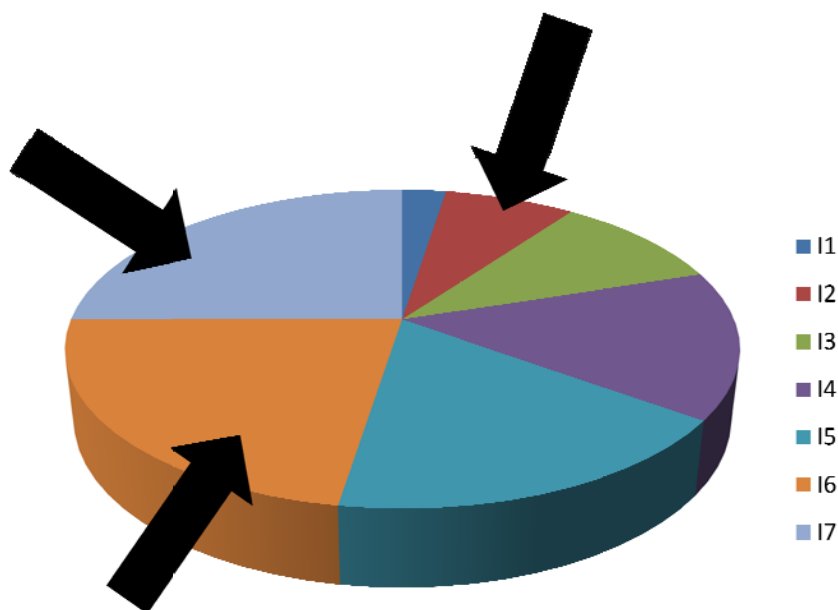


Figura 4: Método da Amostragem Universal.

2.4) Elitismo

Quando se aplicam os operadores genéticos, todos os indivíduos de uma população são substituídos por novos indivíduos e este processo se repete a cada geração. Então, devido a este processo, corre-se o risco de perder um indivíduo de boa aptidão podendo este não ser criado nas gerações sucessivas. Para que isso não ocorra, aplica-se a técnica do Elitismo. Portanto, a função principal do Elitismo é evitar que os melhores indivíduos desapareçam da população pela manipulação dos operadores genéticos. Sendo assim, tais indivíduos são automaticamente colocados na próxima geração [17].

2.5) Operadores Genéticos

Um conjunto de operadores é necessário para que, dada uma população, seja possível gerar populações sucessivas que melhorem sua aptidão com o tempo. Estes operadores são: cruzamento (*crossover*) e mutação.

O cruzamento, o qual é baseado no mecanismo de reprodução natural de todos os seres vivos, tem a função de criar uma nova população a partir de combinações de partes de indivíduos previamente selecionados. Já o operador mutação é responsável pela introdução e manutenção da diversidade genética da população. Este processo é realizado através da alteração, de forma arbitrária, de um ou mais parâmetros de um indivíduo, o que fornece meios para introdução de novos elementos na população. Esses operadores são utilizados para assegurar que os descendentes de uma geração sejam totalmente novos, mas que possuam de alguma forma, características de seus pais. Estes são necessários para que a população se diversifique e mantenha características de adaptação adquiridas pelas gerações anteriores. De uma forma geral, o princípio básico dos operadores genéticos é transformar a população por meio de sucessivas gerações, estendendo a busca até se obter um resultado satisfatório.

2.5.1) Operadores Genéticos Reais

Os operadores convencionais, cruzamento de um ponto, dois pontos e uniforme funcionam bem na representação binária. Já na representação real eles basicamente trocam valores dos genes e, portanto, não criam informações novas. Em decorrência disto, os melhores resultados para os operadores genéticos reais são obtidos utilizando-se operadores aritméticos [22]. A seguir serão apresentados os operadores genéticos reais normalmente apontados pela literatura.

Cruzamento Média Aritmética: O novo indivíduo (f), mostrado abaixo, origina-se dos indivíduos p_1 e p_2 já conhecidos.

$$f_i = \frac{p_1 + p_2}{2} \quad (1)$$

Cruzamento Média Geométrica: É uma variação do cruzamento média aritmética, no qual cada parâmetro f_i do filho f é dado por:

$$f_i = \sqrt{p_{1i} p_{2i}} \quad (2)$$

Esses tipos de cruzamento podem causar perda da diversidade, uma vez que o mesmo tende a levar genes para o meio do intervalo permitido. Este problema pode ser melhorado com o cruzamento BLX- α .

Cruzamento BLX- α : dado os indivíduos p_1 e p_2 , é produzido um novo indivíduo f_i como representado abaixo:

$$f_i = p_1 + \beta(p_1 + p_2) \quad (3)$$

onde $\beta \in (-\alpha; 1+\alpha)$.

O BLX- α , fazendo $\alpha=0,5$, balanceia a tendência de gerar filhos próximos ao centro do intervalo evitando a perda de diversidade.

Mutação Uniforme Real: Ocorre devido à simples substituição de um parâmetro por um número aleatório. Dado o indivíduo p com o j -ésimo gene selecionado para mutação, um novo indivíduo f será produzido da seguinte forma:

$$f = \begin{cases} U(a_i, b_i), & i = j \\ p_i & i \neq j \end{cases} \quad (4)$$

onde a_i e b_i representam os limites do intervalo permitido para o parâmetro de f .

Mutação Gaussiana Real: é a substituição de um gene por um número aleatório de uma distribuição normal. Assim, para um dado indivíduo p com o j -ésimo selecionado para mutação, um novo indivíduo f será produzido da seguinte forma:

$$f = \begin{cases} N(p_i, \sigma), & i = j \\ p_i & i \neq j \end{cases} \quad (5)$$

Em que $N(p_i, \sigma)$ é uma distribuição normal com média p_i e desvio padrão σ [17].

2.5.2) Operadores Genéticos Binários

Com o cruzamento de dois indivíduos progenitores, uma ou mais soluções são criadas a partir do intercâmbio de suas informações genéticas. Este operador pode ser utilizado de várias maneiras. As mais empregadas são descritas a seguir.

Cruzamento de Um-Ponto: Um ponto de cruzamento é escolhido e a partir dele as informações genéticas dos progenitores são trocadas. As informações anteriores a este ponto em um dos pais são ligadas às informações posteriores a este ponto no outro pai, como ilustrado na Figura 5.

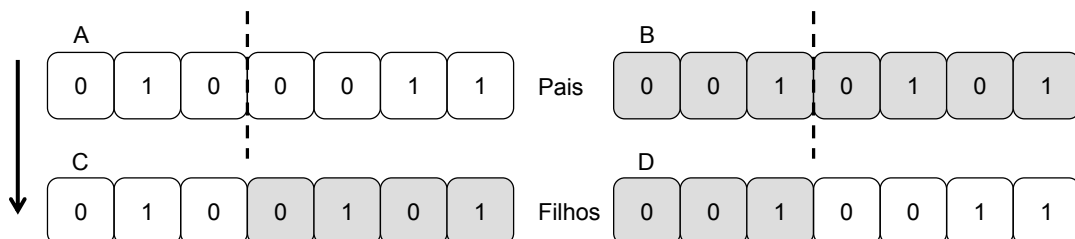


Figura 5: Exemplo do cruzamento de Um-Ponto.

Cruzamento Multipontos: É uma generalização da idéia de troca de material genético através de pontos, em que vários pontos de cruzamento podem ser utilizados. O funcionamento deste operador é mostrado na Figura 6.

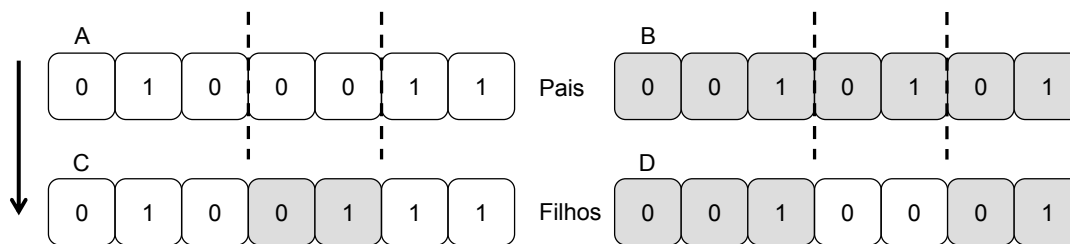


Figura 6: Exemplo do cruzamento de Dois-Pontos.

Cruzamento Uniforme: Não utiliza pontos de cruzamento, mas determina, por meio de uma máscara, quais os genes de cada cromossomo que cada filho herdará. Um exemplo da troca de informações provocada por este operador pode ser visto na Figura 7, no qual a máscara é definida por 0101000. Um valor 1 na máscara indica que o gene correspondente do pai A será herdado pelo filho C, e o gene correspondente do pai B será herdado pelo filho D. Para um valor igual a 0 na máscara, ocorre o inverso.

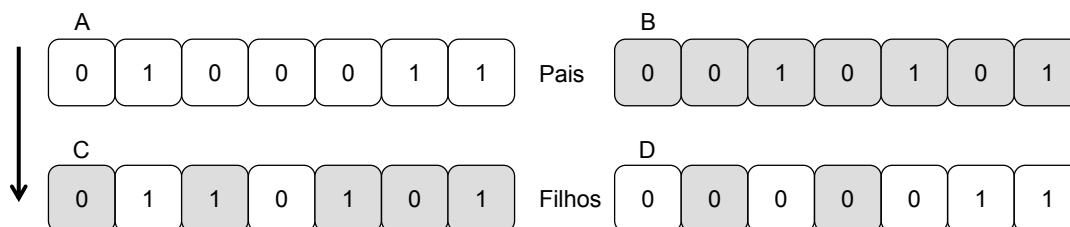


Figura 7: Exemplo do cruzamento uniforme.

Mutação: Após a operação de cruzamento, o operador de mutação é aplicado, com uma determinada probabilidade, em cada *bit* dos filhos gerados. O operador de mutação inverte os valores dos *bits*, de 1 para 0 e vice-versa. A Figura 8 apresenta um exemplo da mutação. É importante salientar que a mutação melhora a diversidade cromossômica da população, mas destrói parte da informação contida nos indivíduos. Portanto, este operador deve ser utilizado com uma taxa pequena.

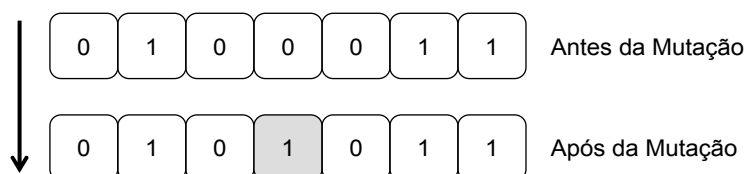


Figura 8: Exemplo de Mutação.

2.6) Parâmetros Genéticos

O desempenho de um AG é influenciado pela definição dos parâmetros a serem utilizados no algoritmo. Portanto, é importante analisar como os parâmetros podem ser utilizados diante das necessidades dos problemas e dos recursos disponíveis. Os principais parâmetros serão apresentados a seguir.

Tamanho da População: O tamanho afeta o desempenho global e a eficiência dos AGs. Em uma população pequena o desempenho pode cair, pois ela fornece uma pequena cobertura do espaço de busca do problema. Uma grande população geralmente fornece uma cobertura representativa do domínio do problema, além de prevenir convergências prematuras para soluções locais em vez de globais. No entanto, para trabalhar com grandes populações, são necessários mais recursos computacionais, ou que o algoritmo trabalhe por um período de tempo muito maior.

Taxa de Cruzamento: Quanto maior for essa taxa, mais rapidamente novas estruturas serão introduzidas na população. Mas se for muito alta, estruturas com boas aptidões poderão ser retiradas mais rapidamente que a capacidade da seleção em criar melhores estruturas. Se a taxa for muito baixa, a busca pode estagnar.

Taxa de Mutação: Uma baixa taxa de mutação previne que a busca fique estagnada em sub-regiões do espaço de busca. Além disso, possibilita que qualquer ponto do espaço de busca seja atingido. Com uma taxa muito alta a busca se torna essencialmente aleatória.

Intervalo de Geração: Controla a porcentagem da população que será substituída para a próxima geração. Com um intervalo grande, a maior parte da população será substituída e isso pode levar à perda de estruturas de alta aptidão. Com um intervalo pequeno, o algoritmo pode se tornar muito lento.

Critério de Parada: Diferentes critérios podem ser adotados para terminar a execução de um AG, como por exemplo, após um dado número de gerações, quando a aptidão média ou do melhor indivíduo não melhorar ou quando as aptidões dos indivíduos de uma população se tornar muito parecidas. Ao conhecer a resposta máxima da função-objetivo, é possível utilizar este valor como critério de parada.

2.7) Vantagens e Desvantagens dos Algoritmos Genéticos

As buscas em problemas reais são repletas de descontinuidades, ruídos e outros problemas. Por este motivo, métodos de busca de soluções ótimas que dependem fortemente de restrições de continuidade e existência de derivadas são adequadas apenas para problemas em um domínio limitado.

As técnicas de busca e otimização tradicionais, como os métodos derivativos e o método da penalidade, geralmente iniciam com um único candidato e este, por meio de processos iterativos, é manipulado utilizando condições associadas ao problema. Na maioria das vezes, os métodos utilizados não são algorítmicos e sua implementação em computadores pode ser muito complexa.

Já as técnicas de computação evolucionária operam sobre uma população de candidatos em paralelo. Assim, elas podem fazer a busca em diferentes áreas do espaço de solução, alocando um número de membros apropriado para a busca em várias regiões.

A seguir, serão abordadas as principais vantagens e desvantagens da utilização dos AGs.

2.7.1) Vantagens dos Algoritmos Genéticos

Segundo [17], as principais vantagens a se destacar são:

- Funcionam tanto com parâmetros contínuos quanto com discretos, ou ainda com a combinação destes;
- Realizam buscas simultâneas em várias regiões do espaço de soluções, pois trabalham com uma população e não com um único ponto;
- Utilizam informações de custo e recompensa e não funções de derivadas ou conhecimento auxiliar;
- Adaptam-se bem a computadores paralelos;
- Trabalham com uma codificação do conjunto de parâmetros e não com os próprios parâmetros; e
- Fornecem uma lista de parâmetros e não uma simples solução.

O principal campo de aplicação dos AGs é voltado para problemas complexos, com múltiplos máximos e mínimos, e para os quais não existe em algoritmo de otimização eficiente conhecido para resolvê-los.

2.7.2) Desvantagens dos Algoritmos Genéticos

As principais desvantagens são:

- Requerem um grande número de avaliações das funções de aptidão e suas restrições; e
- Grandes possibilidades de configurações, podendo complicar a resolução do processo.

Capítulo 3

Transformada de Fourier

Os métodos de análise de Fourier são muito utilizados em engenharia elétrica para converter sinais no domínio do tempo para o da frequência. No domínio da frequência, termos tais como, espectro de amplitude e espectro de fase são muito comuns de se encontrar e os seus cálculos facilitam a obtenção de informações sobre os sinais que não são aparentes no domínio do tempo. Sabe-se que quando trabalhamos com sinais contínuos no domínio do tempo, utilizamos a série ou a transformada de Fourier para a sua análise. Neste capítulo será apresentada uma breve descrição a respeito da teoria da Transformada de Fourier e da amostragem de sinais, a qual foi utilizada para embasar a proposta de [5] e para implementar o algoritmo da TDF utilizado neste trabalho.

3.1) A modelagem matemática da Transformada de Fourier

Um sinal $x(t)$, com período T , pode ser representado pela seguinte série de Fourier na forma exponencial por (6).

$$x(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_k e^{j(2\pi k f_0 t)} \quad (6)$$

em que os coeficientes c_k e f_0 são dados em (7) e (8), respectivamente.

$$c_k = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) e^{-j(2\pi k f_0 t)} dt \quad (7)$$

$$f_0 = \frac{1}{T} \quad (8)$$

A Transformada de Fourier representa sinais não periódicos no domínio da frequência. Neste caso, ela é definida por (9).

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j(2\pi f t)} dt \quad (9)$$

em que, o módulo de $X(f)$ é chamado de espectro de amplitude do sinal $x(t)$, e a fase é chamada de espectro de fase de $x(t)$ [23].

A relação inversa que relaciona o sinal no domínio da frequência com o do tempo é chamada de transformada de Fourier inversa, e é definida pela relação (10).

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X(f) e^{j(2\pi ft)} df \quad (10)$$

Com o avanço da tecnologia de circuitos integrados e o conseqüente avanço do desempenho e uso intensivo dos computadores pessoais, tanto em pesquisa quanto em desenvolvimento, tornou-se prático e eficiente utilizá-los na análise de Fourier. A transformada de Fourier discreta é particularmente aplicada em processamento digital de sinais, pois ela estende os conceitos do tempo contínuo para o tempo discreto, conduzindo a muitos algoritmos eficientes que podem ser implementados em computadores ou em processadores digitais.

Neste contexto, métodos de Fourier foram desenvolvidos para aplicação em sinais discretos no tempo. Eles incluem a transformada de Fourier para tempos discretos (TFTD) e a transformada de Fourier discreta (TDF). Elas nada mais são do que uma extensão dos conceitos da análise de Fourier para sinais contínuos no tempo [24].

Uma propriedade importante de um sinal discreto no tempo, $s(n)$, é que ele é definido somente para valores inteiros de n . A relação entre os tempos contínuos e discretos é estabelecida pela amostragem uniforme nos sinais. Sendo $x(t)$ o sinal contínuo no tempo, então o sinal amostrado é somente uma seqüência de valores definidos pelos valores de $x(t)$ nos instantes de tempo representados por (11).

$$x(n) = x(t) \quad t = nT \quad (11)$$

Pode-se observar que $x(t)$ e $x(n)$ são modelos equivalentes do mesmo sinal nos domínios dos tempos contínuos e discretos. Para sinais contínuos no tempo, utiliza-se a transformada de Fourier; e para sinais discretos, utiliza-se a transformada de Fourier para tempos discretos (TFTD). Para sinais discretos e com duração finita, utilizamos a transformada discreta de Fourier, a qual será abordada nos próximos tópicos.

3.2) Amostragem de Sinais

Antes de se apresentar os conceitos da transformada de Fourier para tempos discretos e transformada discreta de Fourier, é necessário a apresentação dos conceitos de amostragem de sinais, o qual estabelece as condições básicas para que um sinal contínuo no tempo seja representado unicamente por suas amostras.

Os sinais discretos no tempo apresentam valores definidos somente em determinados instantes do tempo. Geralmente eles provêm de funções (ou sinais) no tempo contínuo que são medidas ou gravadas em intervalos de tempo regularmente espaçados. Nas últimas décadas estes sinais assumiram grande importância devido ao desenvolvimento da eletrônica digital e dos computadores. Por ser impossível introduzir dados contínuos nos computadores digitais, qualquer sinal ou dado necessita ser representado por um conjunto de números, para posterior processamento. Se pretendermos trabalhar com sinais discretos no tempo, primeiramente se deve amostrá-los. Na prática, a operação de amostragem é executada por um conversor analógico-digital (AD) que inclui também a quantização das amplitudes das amostras e a digitalização. A operação reversa para a reconstrução de um sinal contínuo a partir de suas amostras é conhecida como conversão digital analógica (DA) [24].

A teoria da amostragem é a base matemática para se obter um sinal $x(n)$ discreto no tempo a partir de um sinal $x(t)$ contínuo no tempo. A obtenção de uma seqüência de amostras $x(n)$ a partir de um sinal $x(t)$ contínuo no tempo pode ser representada por (11), na qual T_a é chamado de período de amostragem e n é um número pertencente ao conjunto dos números inteiros. A frequência de amostragem, dada por F_a , é o inverso do período de amostragem.

Um exemplo de um sinal discreto no tempo é mostrado na Figura 9, em que as amostras são tomadas em intervalos regularmente espaçados por T_a segundos. Observe que entre dois intervalos de tempo sucessivos nada é definido sobre o sinal.

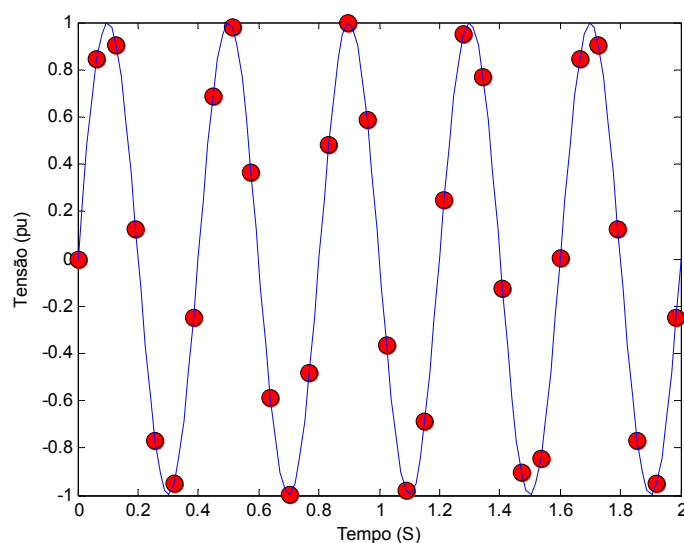


Figura 9: Amostragem de um sinal.

Com a obtenção das amostras a partir do sinal contínuo no tempo, tem-se a possibilidade de transmitir ou de armazenar esta seqüência de números em um computador para posterior tratamento digital do sinal.

A fim de se garantir que a amostragem de um sinal contínuo seja feita de forma correta, surge o Teorema da Amostragem. Para explicar claramente o conteúdo do Teorema da Amostragem, far-se-á o uso de um exemplo matemático.

Seja um sinal $x(t)$, dado em (11) e um sinal de trem de impulsos representado em (12).

$$p(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t - nT_a) \quad (12)$$

A transformada de Fourier de um sinal dado pela multiplicação de $x(t)$ e $p(t)$ será representada pela convolução entre as transformadas dos mesmos sinais. Assim, teremos a função representada por (13).

$$X_a(\Omega) = \frac{1}{2\pi} X(\Omega) * P(\Omega) \quad (13)$$

Graficamente, têm-se as representações das figuras 10 e 11 para os sinais $X(\Omega)$ e $P(\Omega)$ no domínio da frequência, na qual Ω_M é a frequência máxima presente no sinal e Ω_a é a frequência de amostragem.

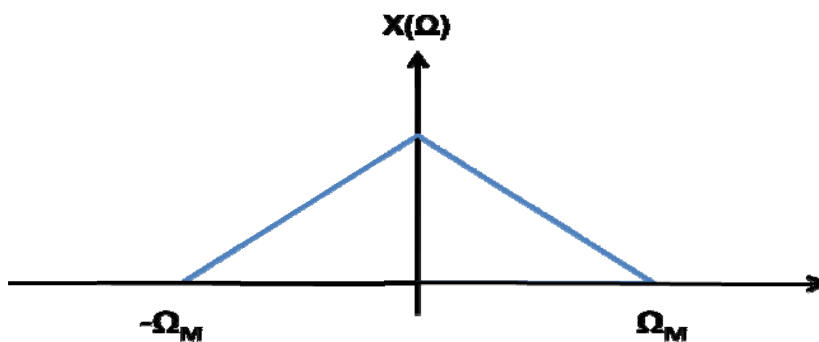


Figura 10: Representação gráfica de $X(\Omega)$.

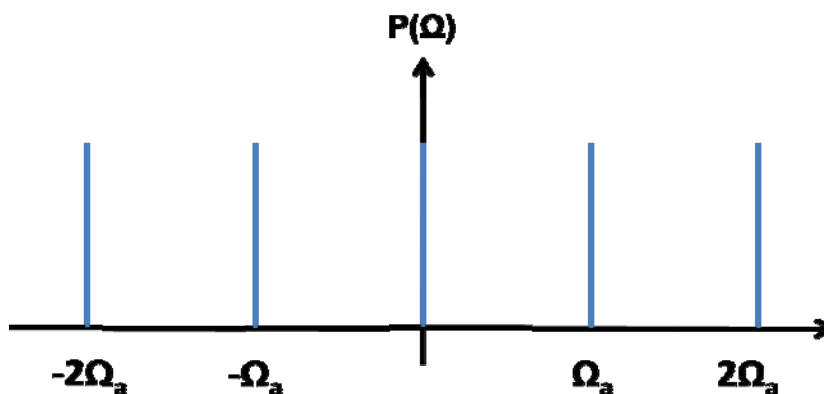


Figura 11: Representação gráfica de $P(\Omega)$.

Desenvolvendo individualmente cada termo e aplicando as propriedades específicas em (13), teremos o desenvolvimento matemático mostrado em (14), (15) e (16).

$$X_a(\Omega) = \frac{1}{2\pi} X(\Omega) * \frac{2\pi}{T_a} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \delta(\Omega - k\Omega_a) \quad (14)$$

$$X_a(\Omega) = \frac{1}{T_a} \sum_{k=-\infty}^{\infty} X(\Omega) * \delta(\Omega - k\Omega_a) \quad (15)$$

$$X_a(\Omega) = \frac{1}{T_a} \sum_{k=-\infty}^{\infty} X(\Omega - k\Omega_a) \quad (16)$$

É possível observar que o sinal amostrado resultante é periódico, consistindo em um número infinito de cópias do espectro $X(\Omega)$ do sinal contínuo no tempo. Estas cópias são regularmente espaçadas segundo o valor da frequência de amostragem Ω_a . A Figura 12 mostra o espectro do sinal amostrado no domínio da frequência [24].

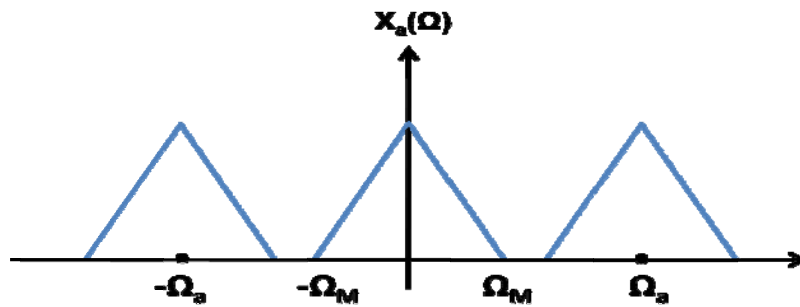


Figura 12: Representação gráfica do sinal $X(\Omega)$ amostrado.

Entretanto, em determinadas situações pode ocorrer a sobreposição dos espectros dos sinais amostrados. Para que isso não ocorra, primeiramente deve-se observar que o espectro de $x(t)$ deve ser limitado em uma frequência máxima. Observando a Figura 12, é possível verificar que para não ocorrer a sobreposição dos espectros a relação (17) precisa ser satisfeita.

$$\Omega_M \leq \Omega_a - \Omega_M \quad (17)$$

Portanto, obtém-se o Teorema da amostragem, o qual enuncia que para realizar a amostragem correta de um sinal, a frequência de amostragem deve ser maior que o dobro da máxima frequência presente no sinal amostrado, como matematicamente ilustrado em (18).

$$\Omega_a \geq 2\Omega_M \quad (18)$$

Caso a condição (18) não seja satisfeita, ocorrerá à sobreposição espectral do sinal amostrado, fenômeno este chamado de *aliasing*. A Figura 13 ilustra a ocorrência deste fenômeno na amostragem de um sinal.

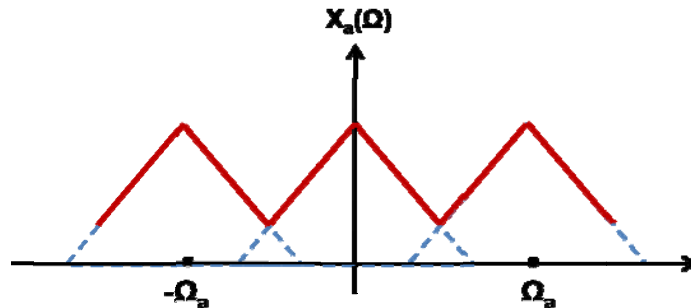


Figura 13: Representação gráfica do *aliasing* na amostragem de um sinal.

O grande problema da sobreposição espectral está relacionado com a conversão do sinal no domínio da frequência para o domínio do tempo. Quando este processo é executado, o sinal obtido não será idêntico ao sinal $x(t)$ inicialmente utilizado no processo.

Após a introdução destes conceitos de amostragem, será possível abordar os tópicos relacionados com a Transformada de Fourier para Tempos Discretos e a Transformada Discreta de Fourier na seqüência do trabalho.

3.3) Transformada de Fourier para Tempos Discretos

Com o conceito de amostragem apresentado, a próxima etapa é apresentar a Transformada de Fourier para Tempos Discretos (TFTD). O par de TFTD pode ser definido pelas equações (19) e (20).

$$X(e^{j\omega}) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n)e^{-j\omega n} \quad (19)$$

$$x(n) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} X(e^{j\omega})e^{j\omega n} d\omega \quad (20)$$

em que $\omega = \Omega T_a$ é referida como frequência digital normalizada e T_a é o período de amostragem [24].

O espectro $X(e^{j\omega})$ é periódico, com o período de 2π . Por causa desta propriedade, a faixa usual de frequência para a representação dos sistemas discretos é dada por (21) ou (22).

$$-\pi < \omega \leq \pi \quad (21)$$

$$0 < \omega \leq 2\pi \quad (22)$$

Como dito anteriormente, os sinais discretos no tempo são usualmente originados dos sinais contínuos no tempo e, portanto, é importante lembrar que a relação entre os seus espectros é dada por (23).

$$X(e^{j\omega}) = \frac{1}{T_a} \sum_{n=-\infty}^{\infty} X\left(\frac{\omega}{T_a} - k \frac{2\pi}{T_a}\right) \quad (23)$$

Baseado no tópico anterior, pode-se observar que o espectro do sinal amostrado consiste de um número infinito de réplicas do espectro do sinal contínuo, centradas nos múltiplos inteiros da frequência de amostragem. Estas réplicas são fiéis somente se o sinal contínuo for de banda limitada e que a frequência de amostragem respeite a condição imposta pelo Teorema da Amostragem, para que não haja superposição espectral. Como o espectro da TFTD é periódico e admitindo-se que Ω_M é a máxima componente de frequência do sinal, a condição para a correta amostragem do sinal é dada por (24).

$$T_a \leq \frac{\Omega_M}{\pi} \quad (24)$$

3.4) Transformada Discreta de Fourier

A Transformada Discreta de Fourier (TDF) considera que a seqüência dada apresenta duração finita e a transformada é calculada no domínio da frequência discreta. Admitindo um sinal discreto no tempo $x(n)$, com duração finita igual a N , a TDF é definida pela equação (25) e (26) [24].

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) W_N^{nk} \quad (25)$$

$$W_N = e^{-j\frac{2\pi}{N}} \quad (26)$$

Assim, a TDF é um mapeamento da seqüência $x(n)$ em outra seqüência $X(k)$, a qual representa um conjunto de frequências discretas W_k no intervalo de 0 a 2π .

A quantidade W_{Nk} é periódica, com período N , e com módulo igual a 1. Ela define pontos regularmente espaçados no círculo de raio unitário do plano z , cujo valor de cada arco vale $2\pi/N$ radianos, como mostra a Figura 14.

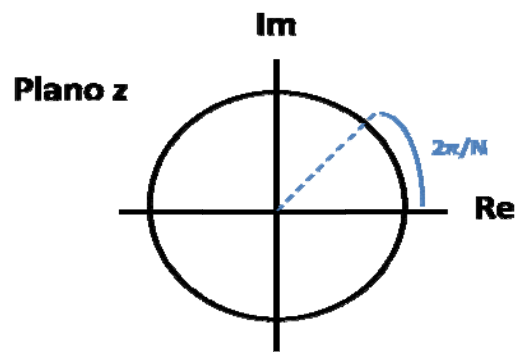


Figura 14: Relação da TDF com o plano z.

Os pontos representados na Figura 14 correspondem a incrementos de frequência digital de valor $1/N$ (ou $2\pi/N$). Assim, o espectro $X(k)$ é determinado nas frequências digitais dadas por (27).

$$\omega_k = \frac{2\pi}{N} k \quad (27)$$

Para o caso da frequência analógica, estes pontos correspondem a incrementos de frequência analógica (F_a) de valor F_a/N . Assim, o espectro $X(k)$ é determinado em pontos de frequências discretas dadas por (28).

$$F_k = \frac{F_a}{N} k \quad (28)$$

Capítulo 4

Modelagem do Algoritmo Genético e da Transformada Discreta de Fourier

Neste capítulo será apresentada a modelagem do AG e da TDF utilizada neste trabalho, com o foco voltado para o escopo proposto pelo mesmo, o qual trata da estimação de parâmetros de um sinal elétrico. Portanto, nos próximos tópicos serão apresentados todos os procedimentos, considerações e métodos utilizados para a implementação destas metodologias. Além disso, será mostrado neste capítulo o modo como foi gerado as formas de onda para validação dos algoritmos implementados (AG e TDF).

4.1) A modelagem do Algoritmo Genético

Como destacado anteriormente, o Algoritmo Genético é um algoritmo de busca adaptativa utilizado na otimização de problemas. Seu mecanismo de busca de uma solução ótima é heurístico, inspirado na seleção natural e na teoria genética. Esse algoritmo é aplicado em uma população formada por soluções possíveis (indivíduos) para o problema, com inicialização randômica na maioria dos casos. Com a evolução da população inicial, as suas características passam por modificações através dos operadores genéticos e, desta forma, uma melhoria das soluções possíveis do problema pode ser alcançada. Os indivíduos, os quais representam as possíveis soluções, podem ser codificados de forma real ou binária. A codificação real foi utilizada neste modelo.

Basicamente, o princípio fundamental do AG é que os indivíduos mais adaptados de uma população têm maiores possibilidades de sobreviverem. Desta forma, é importante evoluir cada possível solução do problema, a fim de se obter o melhor resultado possível com o método. Essa evolução é realizada de forma a avaliar a aptidão de cada indivíduo através de uma função matemática, chamada de função objetivo, a qual deve ser cuidadosamente escolhida para cada problema. Em funções de maximização, maiores

valores para a aptidão indicam os melhores indivíduos, enquanto em problemas de minimização, menores valores para a aptidão indicam as melhores soluções. Conseqüentemente, os melhores indivíduos terão maior probabilidade de sobreviverem e produzirem descendentes para as próximas gerações.

Os principais operadores genéticos usados na produção de uma nova geração são o cruzamento e a mutação. Esses operadores são responsáveis por determinar a forma como os indivíduos vão trocar ou simplesmente mudar as suas características genéticas, de forma a produzir novos indivíduos. A estrutura geral da implementação de um AG é mostrada abaixo, na qual t é o índice de geração e $P(t)$ é a população na geração t .

- $t = 0$;
- *Início randômico de $P(t)$* ;
- *Avaliação de $P(t)$* ;
- *Enquanto (O critério de parada é falso)*
 - *Aplicar operador genético "seleção" em $P(t)$ para gerar P_{AUX}* ;
 - *Aplicar operador genético "Mutação" em P_{AUX}* ;
 - $P(t+1) = P_{AUX}$;
 - *Avalia o de $P(t+1)$* ;
 - $t = t+1$;

Antes de iniciarmos a abordagem proposta neste algoritmo genético, três importantes características do AG merecem destaque. Primeiramente, o AG pode determinar a soluço ótima de fun es objetivo extremamente complexas, mesmo se elas são discretas ou suas derivadas não são definidas. Em segundo lugar, os indivíduos inseridos inicialmente em uma popula o são definidos dentro de um espaço de busca global, o qual   limitado pelos valores de máximo e mínimo de cada parâmetro da fun o objetivo. Geralmente, esse processo melhora a busca por solu es ótimas globais ao invés de ótimos locais. Finalmente, o implícito paralelismo do AG pode gerar nova popula o com processamento paralelo, desde que a gera o com novos indivíduos dependa somente dos indivíduos anteriores.

4.2) O Problema de Otimização e o Algoritmo Genético Proposto

O problema de otimização usando AG para estimar os parâmetros de um sinal elétrico é definido considerando um modelo senoidal para o sinal de tensão. A análise de um sinal elétrico pode ser realizada considerando uma janela deslizante como a mostrada na Figura 15, para determinar a dinâmica do sistema. Essa figura exemplifica o processo com a utilização de uma janela de tamanho igual a um ciclo.

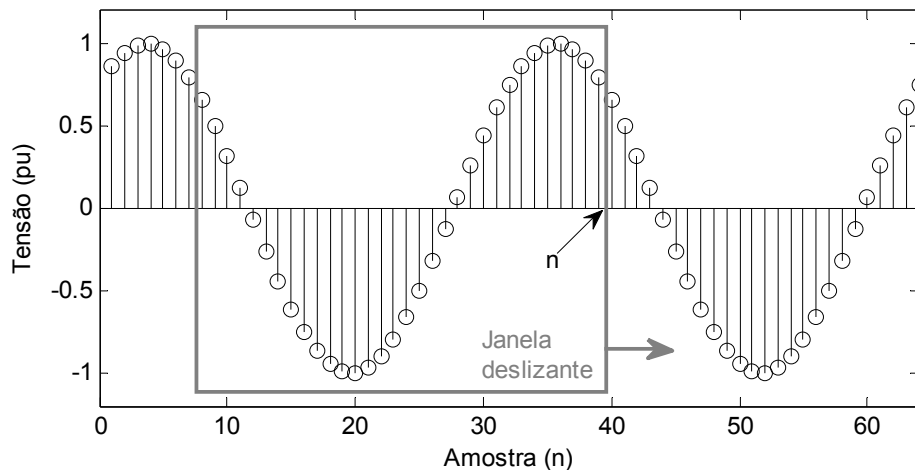


Figura 15: Janela deslizante de um ciclo [3].

Matematicamente, o valor da função objetivo no instante de tempo n é definido segundo (29), na qual N representa o número de amostras da janela deslizante, u é o sinal de entrada utilizado, k é o índice que representa as amostras anteriores a n e o vetor $\{A, f, \theta\}$ é o conjunto de parâmetros que deve ser encontrado, a fim de se minimizar a somatória, aproximando o sinal estimado do sinal de entrada.

$$e[n] = C(n, A, f, \theta) = \sum_{k=0}^{N-1} (u[n-k] - A \sin(2\pi f k T_s + \theta))^2 \quad (29)$$

O processo de se obter uma solução ótima para minimizar (29) é exemplificado na Figura 16. Neste exemplo é executado o AG utilizando uma janela de um ciclo de um sinal elétrico com amplitude, frequência e fase igual a 1.0 pu, 60 Hz e 4.1888 radianos, respectivamente. A Figura 16a mostra a população inicial, a qual é originada de forma randômica. Após 20 gerações, o processo de convergência do algoritmo pode ser observado na Figura 16b. O melhor indivíduo de cada população é indicado na própria figura através de setas.

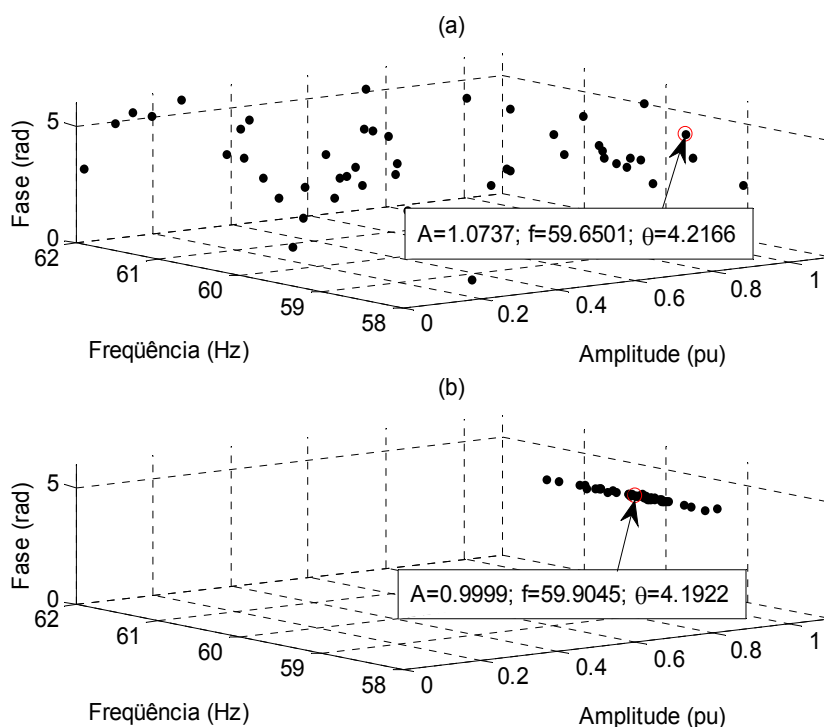


Figura 16: População do AG na (a) Primeira geração e, (b) Vigésima geração [3].

É possível observar na Figura 16 que à medida que se aumenta o número de gerações do AG, ocorre uma melhoria dos valores estimados de amplitude, frequência e fase, implicando na aproximação destes valores com os valores reais de entrada.

Nos próximos itens serão mostrados os procedimentos implementados para se obter o algoritmo genético. Vale ressaltar que a implementação do AG foi realizada utilizando a linguagem de programação "c".

4.2.1) Codificação

No modelo implementado neste trabalho, a codificação binária não foi utilizada, pois os testes realizados com este tipo de implementação mostraram-se menos eficientes quando comparados com os resultados obtidos utilizando a codificação real. Entretanto, é importante destacá-la a fim de se criar condições para elaboração de futuros trabalhos relacionados com este tema, como a implementação do AG em FPGA (*Field-Programmable Gate Array*).

A codificação binária pode ser utilizada para representar os parâmetros do conjunto $\{A, f, \theta\}$. Cada indivíduo da população possuirá três seqüências de bits, os quais correspondem a três números inteiros, como mostrado na Figura 17. Cada parâmetro utiliza certo número de bits para a sua representação binária. Esse número é escolhido baseado

na precisão requerida para a obtenção dos resultados. A Tabela 2 apresenta o número de bits utilizado na modelagem do AG segundo [3].

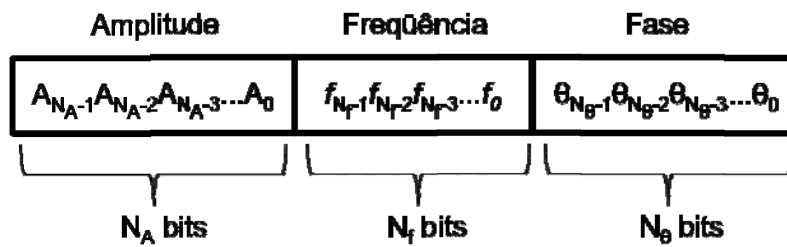


Figura 17: Representação individual da codificação binária [3].

Assumindo a normalização do sinal de entrada e um limite de 2 Hz para a variação da frequência, o espaço de busca utilizado pelo AG para a obtenção dos parâmetros ótimos também é mostrado na Tabela 2.

Tabela 2: Codificação dos parâmetros e espaço de busca.

Parâmetros	Número de bits	Espaço de busca	Unidade
Amplitude	12	[0,0;1,1]	p.u.
Frequência	12	[58,0;62,0]	Hz
Fase	16	[0,0;2 π]	rad

4.2.2) Operador Seleção proposto

O processo de seleção consiste na escolha randômica de indivíduos para a reprodução. Neste modelo, o operador torneio [18] foi utilizado para este estágio. Este procedimento tem sido relatado por dar resultados adequados para os mais diversos domínios de aplicação. A seleção de dois pais é realizada segundo o algoritmo mostrado abaixo. Quatro indivíduos $\{a,b,c,d\}$ são selecionados randomicamente da população atual. Os pais p_1 e p_2 são obtidos a partir da comparação entre o *fitness* dos indivíduos $\{a,b\}$ e $\{c,d\}$, respectivamente.

- **Escolha randômica dos indivíduos $\{a,b,c,d\}$**
- $P_1 =$ Melhor entre $\{a,b\}$ (Comparação de *fitness*)
- $P_2 =$ Melhor entre $\{c,d\}$ (Comparação de *fitness*)

4.2.3) Operador Cruzamento proposto

O processo de cruzamento orienta o processo evolucionário da população em direção a potenciais melhores soluções. Esse operador realiza a troca de material genético entre os

cromossomos de p_1 e p_2 , os quais foram obtidos do processo de seleção. Deste processo, é criada uma descendência, a qual pode conter indivíduos que possuam melhores *fitness* que os seus ancestrais. No modelo implementado para o AG neste trabalho, o processo de cruzamento pode ser genericamente representado de acordo com a Figura 18, na qual $\Psi = \{A, f, \theta\}$.

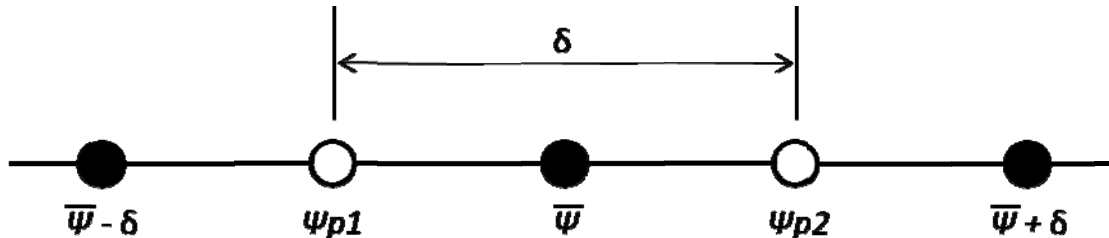


Figura 18: O operador cruzamento [3].

Conforme mostra a Figura 18, cada parâmetro Ψ é combinado utilizando o valor médio entre Ψ_{p1} e Ψ_{p2} e a distância δ entre eles. O parâmetro escolhido para os descendentes é randomicamente determinado a partir das cinco possibilidades apresentadas. Este procedimento leva para 20% a probabilidade de escolha de cada valor e são repetidas três vezes em cada cruzamento (uma vez para cada parâmetro de $\Psi = \{A, f, \theta\}$). O algoritmo utilizado na implementação deste estágio é mostrado a seguir.

- $\delta = \Psi_{p1} - \Psi_{p2}$;
- $\bar{\Psi} = (\Psi_{p1} + \Psi_{p2}) / 2$;
- Sorteio randômico de N entre $[0,4]$;
 - Se $N = 0$
 - $\Psi_{filho} = \bar{\Psi} - \delta$
 - Se $N = 1$
 - $\Psi_{filho} = \Psi_{p1}$
 - Se $N = 2$
 - $\Psi_{filho} = \bar{\Psi}$
 - Se $N = 3$
 - $\Psi_{filho} = \Psi_{p2}$
 - Se $N = 4$
 - $\Psi_{filho} = \bar{\Psi} + \delta$

4.2.4) Operador Mutação proposto

A mutação é o operador genético responsável por gerar diversidade do material genético da população. Basicamente, este procedimento é aplicado individualmente sobre cada

parâmetro da descendência de indivíduos resultantes do processo de cruzamento. No modelo de AG implementado, a mutação ocorre de acordo com uma probabilidade, a qual é chamada de taxa de mutação, e a estratégia de somar ou subtrair um pequeno valor percentual sobre cada parâmetro. A taxa de mutação utilizada neste modelo foi de 10% e o acréscimo ou decréscimo Δ foi baseado na amplitude do espaço de busca de cada parâmetro. O algoritmo utilizado na implementação desta etapa é mostrado abaixo, no qual M é uma variável binária e Ψ é a variável associada a cada um dos parâmetros do indivíduo.

- ***Sorteio randômico de N entre $[0,99]$;***
- ***Se $N < \text{Taxa de Mutação}$***
- ***Sorteio binário de M ;***
- ***Se $M = 0$***
- ***$\Psi = \Psi + \Delta\Psi$;***
- ***Se $M = 1$***
- ***$\Psi = \Psi - \Delta\Psi$.***

4.3) Regularização do processo de estimação: A limitação da frequência

Durante as simulações inicialmente realizadas com o modelo do algoritmo genético, a estimação dos parâmetros elétricos, principalmente da frequência, apresentou problemas em determinadas situações. Essas situações eram caracterizadas pela presença de sinais de ruído, erros significativos na medição da amplitude do sinal e presença de harmônicas com alta amplitude, o que resultava no deslocamento do ponto de mínimo global, afastando-o do valor original. Desta forma, embora exista um ponto de mínimo global no problema de otimização, ele pode não ser adequado para a proposta prática da estimação de parâmetros elétricos. É importante salientar que a função objetivo $C(A, f, \theta)$ do modelo é convexa, por se tratar de uma soma quadrática dos erros e, por essa propriedade, apresenta somente um ponto de mínimo global.

A Figura 19 exemplifica como pequenas mudanças nos dados de entrada, devido aos fatores comentados anteriormente, podem alterar a estimação da frequência utilizando a função $C(A, f, \theta)$ como função objetivo. Na Figura 19(a), é plotado a função objetivo $C(A, f, \theta)$ com $\theta = 1,0$ rad obtido através dos dados de uma onda senoidal pura. Na Figura 19(b), altera-se a superfície da função objetivo e, conseqüentemente, seu ponto de mínimo global,

o qual é caracterizado pelo ponto circular cinza, quando os dados de entrada estão sujeitos a ruídos, harmônicos ou ambos. Este comportamento instável produzido por pequenas alterações nos dados caracteriza o problema de estimação de frequência como um problema inverso mal-condicionado [25]. No entanto, sabe-se que distorções e pequenos erros nos dados de entrada são inevitáveis e, desta forma, deve-se empregar procedimentos que estabilizem com sucesso os problemas mal-condicionados. Tais procedimentos são chamados de métodos de regularização.

Alguns métodos são usados para guiar o processo de otimização, levando-o a soluções que são consistentes com os requerimentos práticos de problemas inversos. Os métodos de regularização são geralmente baseados na manutenção de um número de condições em uma faixa aceitável de valores para o problema. Desta forma, aplicando este método para o problema de estimação de frequência, o espaço de busca para este parâmetro seria diminuído de [58,62] Hz para um espaço menor, evitando flutuações desnecessárias da frequência e, conseqüentemente, erros graves no processo de estimação [25]. O novo espaço de busca será dependente da frequência anteriormente estimada (f_{ant}) e da função matemática regularizadora (F_{reg}), sendo portanto $[f_{ant}-F_{reg}, f_{ant}+F_{reg}]$

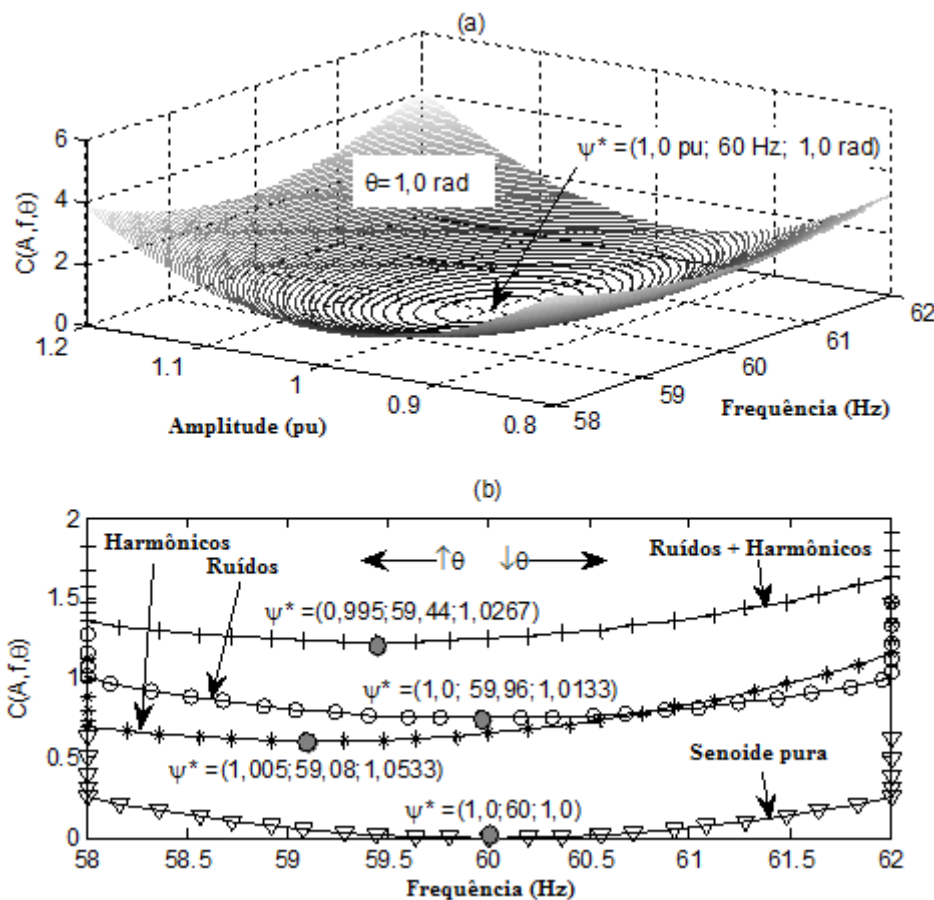


Figura 19: Análise gráfica da localização de uma solução ótima.

A regularização para a estimação de frequência em sistemas elétricos de potência pode ser derivada da equação de balanço apresentada em (30) [26], a qual considera que a estimação da frequência depende da inércia do gerador, dada pela constante H , da diferença entre suas potências elétrica (P_e) e mecânica (P_m), da posição angular do rotor e da velocidade síncrona.

$$\frac{2H}{\omega_s} \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_m - P_e \quad (30)$$

A fim de simplificar essa análise, a variação da frequência pode ser obtida a partir da expressão dada em (31).

$$\Delta f = f_0 \frac{P_m - P_e}{2H} \Delta t \quad (31)$$

A fim de se eliminar a dependência da estimação de Δf com relação à informação da carga e do gerador, a diferença entre as potências mecânica e elétrica foi considerada unitária (1 p.u.). Desta forma, utilizando as considerações da equação (31), o espaço de busca para a frequência fica restrito a faixa $[f-\Delta f, f+\Delta f]$, guiando o processo de otimização a uma solução mais plausível. Assim sendo, o AG modelado realiza a estimação da frequência utilizando a informação da faixa restrita calculada. Por exemplo, adotando o valor de $H = 24$ s, o espaço de busca para cada ciclo estimado pertencerá ao intervalo $[f_{ant}-0,00531, f_{ant}+0,00531]$ Hz, o que significa que o AG permitirá uma variação máxima de 0,00531 Hz para cada ciclo estimado.

Os valores típicos da constante de inércia H para geradores de sistemas de potência estão na faixa de 3 a 12 segundos [27]. A inércia do sistema vista do barramento, combina as inércias de vários geradores e cargas. Além disso, uma diferença sobre a constante H pode ser considerada em situações transitórias. Nestas situações, pode-se considerar o dobro do valor real de H , o qual passaria a variar entre 6 e 24 segundos [28]. A combinação destes efeitos pode resultar em valores significativamente altos de inércia individual dos geradores. Assim, um valor adequado para a constante H é usado na proposta deste AG, valor este que será apresentado e justificado no tópico de resultados. A idéia apresentada neste item ficará mais bem compreendida na etapa de resultados.

4.4) A modelagem da TDF

Findada a apresentação de toda modelagem do AG, através da explicação dos procedimentos e considerações adotadas em sua implementação, apresenta-se à modelagem da TDF proposta em [5]. Esta modelagem deriva do método tradicional da TDF,

que é utilizado em âmbito mundial para a estimação de parâmetros de sinais elétricos, com destaque para a estimação da frequência.

A principal contribuição que esta modelagem proposta para a TDF fornece para área da estimação de parâmetros está relacionada com a precisão do método, o qual possui uma implementação bastante simples e apresenta resultados extremamente eficientes.

Na implementação do método proposto em [5], são utilizadas fórmulas que fornecem como resultado o ângulo de fase real e a amplitude do sinal de entrada. A partir da obtenção desses dados, juntamente com a teoria de Fourier, conseguiu-se desenvolver um novo método de estimação de parâmetros de um sinal elétrico. Além disso, esta metodologia pode ser implementada utilizando cálculos recursivos dos parâmetros internos do programa, os quais têm o objetivo de melhorar o desempenho do algoritmo. Por fim, o procedimento apresenta características adaptativas, as quais têm a função de considerar as distorções causadas pela presença de harmônicos no sinal de entrada, fornecendo uma resposta adequada, mesmo em sua presença. Evidentemente, a implementação dos cálculos recursivos e das características adaptativas ocasiona maior tempo de processamento e, por este motivo, o método apresenta maior tempo de estimação quando comparado com a TDF tradicional. De uma forma simplificada, este algoritmo estima a frequência do sinal elétrico da janela atual utilizando o ciclo anterior para corrigir as estimativas.

Ressalta-se que todas as informações para codificação desta metodologia em linguagem C foram obtidas com as informações contidas em [5] e foram utilizados os seus resultados para validação do modelo implementado para este trabalho. Em [5], existe um sumário que enumera as etapas envolvendo cálculos para a estimação dos parâmetros desejados. Para simplificar a teoria e a matemática envolvida na modelagem proposta, estes passos serão analisados e discutidos a seguir.

4.4.1) Passo 1

Inicialmente, deve-se determinar o tamanho da janela utilizada para amostragem dos dados de entrada, tamanho este que será igual ao utilizado na modelagem do AG (128 amostras na janela); e calcular as constantes do algoritmo que não sofrem modificações devido à dinâmica do programa.

Para tornar inteligível esta idéia, exemplificar-se-á uma determinada situação. Um sinal $x_a(t)$, que não sofre a interferência de harmônicos, é amostrado a uma frequência de amostragem f_s , obtendo-se $x(n)$. A partir deste novo sinal, é realizado o seu janelamento utilizando dois sinais retangulares $d(n)$ e $d(n-M)$, criando-se duas seqüências consecutivas.

Através do janelamento, obtemos os resultados apresentados em (32), em que x_d e x_d^M são os resultados da convolução entre o sinal amostrado e os respectivos sinais retangulares de janelamento e M representa o tamanho do sinal retangular.

$$\begin{aligned} x_d(n) &= x(n) * d(n) \\ x_d^M(n) &= x(n) * d(n-M) \end{aligned} \quad (32)$$

Assim, utilizando a representação fasorial para representar os sinais x_d e x_d^M , respectivamente, obtêm-se as expressões mostradas em (33) [5].

$$\begin{aligned} \vec{x}_1 &= NF e^{j\sigma_1} \\ \vec{x}_2 &= NF e^{j\sigma_2} \end{aligned} \quad (33)$$

Em (33), N representa os pontos amostrados, F a frequência calculada e σ o ângulo calculado para cada um dos sinais x_1 e x_2 .

Conforme dito anteriormente, esta metodologia é baseada no cálculo prático da diferença de fase entre estes dois sinais janelados. Em [5], é proposto uma fórmula que calcula o ângulo de fase real (34), o qual é necessário para se obter o grau do desvio do sinal de frequência, dado por $\Delta\lambda$.

$$\sigma_m = \sigma + \Delta\lambda\pi \frac{N-1}{N} + \frac{\Delta\lambda\pi}{N \text{sen}(\frac{2\pi}{N})} \text{sen}(\frac{2\pi}{N} - 2\sigma_m) \quad (34)$$

A partir desta equação é possível definir os parâmetros mostrados de (35) a (37), os quais são constantes e são utilizados nas equações que possibilitarão o cálculo da frequência estimada.

$$K = \frac{\pi}{N \text{sen}(\frac{2\pi}{N})} \quad (35)$$

$$K_i = \text{sen}(\frac{2\pi}{N} - 2\sigma_{im}) \quad (36)$$

$$K_3 = \frac{2\pi M}{N} \quad (37)$$

4.4.2) Passo 2

Após a formulação matemática apresentada no tópico anterior, é necessário calcular a diferença entre as fases mensuradas entre os dois sinais janelados e o valor do grau do desvio envolvido no sinal de frequência. A partir destes valores, é possível realizar a

estimação da frequência do sinal de entrada. Assim, a equação proposta em [5] para se obter a diferença de fase é dada (38).

$$\sigma_{2m} - \sigma_{1m} = (1 + \Delta\lambda)K_3 + K(K_2 - K_1)\Delta\lambda \quad (38)$$

Com a simples manipulação de (38), é possível descobrir, enfim, o valor do grau de desvio da frequência, que é dado pela equação (39).

$$\Delta\lambda = \frac{(\sigma_{2m} - \sigma_{1m}) - K_3}{K_3 + K(K_2 - K_1)} \quad (39)$$

Como todos os valores de (39) são conhecidos, é possível encontrar o valor de $\Delta\lambda$ e, conseqüentemente, obter o valor da frequência estimada, através da equação (40), na qual f_s representa a frequência de amostragem do sinal [5].

$$f = \frac{f_s(1 + \Delta\lambda)}{N} \quad (40)$$

Para se obter um resultado ainda mais preciso, é possível realizar a correção do valor de K utilizando a equação (41) [5].

$$K = \frac{\pi}{N \text{sen}\left(\frac{(2 + \Delta\lambda)\pi}{N}\right)} \quad (41)$$

4.4.3) Passo 3

A modelagem apresentada nos passos anteriores realiza a estimação da frequência sem a consideração de efeitos harmônicos. Para finalizar a implementação deste método, será mostrado o equacionamento adicional que deve ser codificado para que o programa forneça resultados precisos quando o sinal de entrada apresentar influência harmônica.

As equações (42) e (43) mostram como deve ser calculado os valores dos parâmetros M e K_3 quando levando em conta a influência harmônica.

$$M = \text{round}\left(\frac{N}{1 + \Delta\lambda}\right) \quad (42)$$

$$K_3 = \frac{2\pi M}{N} \quad (43)$$

Fisicamente, a adaptação implementada simplesmente realiza uma modificação na distância entre as duas seqüências janeladas.

4.5) Obtenção dos sinais para validação das metodologias

Agora que já foi mostrado todas as etapas executadas durante a modelagem das metodologias do AG e da TDF proposta por Wang & Sun, precisa-se realizar a validação destes modelos para se comprovar o sucesso das respectivas implementações.

Seguindo a orientação de várias bibliografias e considerando o principal objetivo deste trabalho, o qual é a estimação de parâmetros elétricos, com destaque para a estimação da frequência, utilizar-se-á três sinais com diferentes variações de frequência e discutir-se-á a respeito dos resultados obtidos, verificando se os mesmos são coerentes com a modelagem proposta. Todos os sinais foram gerados com o *software MATLAB*.

Assim, para realizar a validação, utilizar-se-ão os sinais descritos abaixo:

- A) Um sinal com duração de um segundo, com amplitude constante de 1 p.u., frequência inicial de 60 Hz e final de 60,6 Hz, de forma que esta variação seja realizada em forma de degrau no instante $t = 0,5$ s;
- B) Um sinal com duração de um segundo, com amplitude constante de 1 p.u., frequência inicial de 60 Hz e final de 60,6 Hz, de forma que esta variação seja realizada em forma de rampa, com início da transição em $t_1 = 0,35$ s e finalização em $t_2 = 0,65$ s;
- C) Um sinal com duração de dois segundos, com amplitude constante de 1 p.u. e frequência variando de forma senoidal entre os valores 59,5 Hz e 60,5 Hz.

4.5.1) Representação do Sinal A

O primeiro sinal a ser representado é caracterizado pela presença de um degrau de frequência no instante $t = 0,5$ s. O objetivo da análise deste sinal é de avaliar o comportamento dos algoritmos implementados em condições de mudança abrupta da frequência. A Figura 20 mostra o Sinal A através do gráfico de frequência em função do tempo.

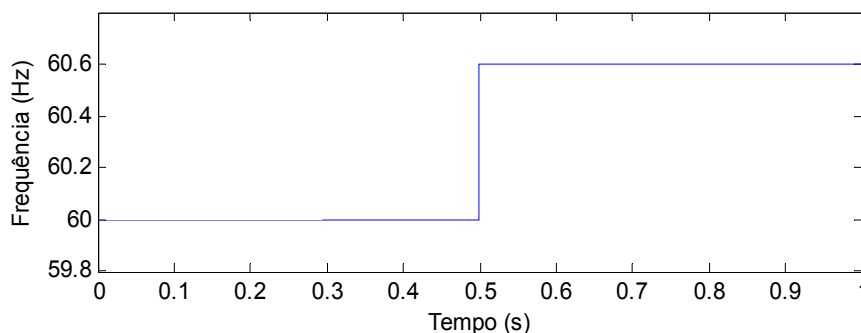


Figura 20: Características do Sinal A.

4.5.2) Representação do Sinal B

O próximo sinal a ser mostrado é caracterizado por apresentar uma transição em rampa, o que garante uma alteração mais suave no valor da frequência. Essa mudança é iniciada no instante $t = 0,35$ s e finalizada no instante $t = 0,65$ s, aproximadamente. O objetivo da análise do sinal B é observar como os algoritmos de estimação trabalham quando a variação do parâmetro é realizada de forma lenta e gradual, ao contrário do sinal A, o qual apresenta uma variação em degrau. A Figura 21 mostra o Sinal B através do gráfico de frequência em função do tempo.

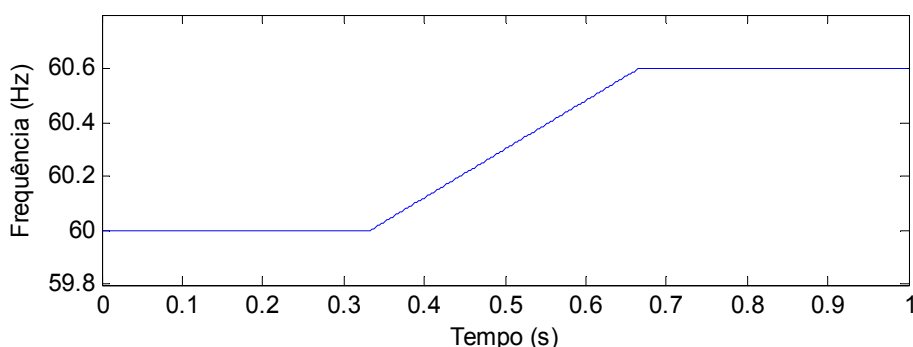


Figura 21: Características do Sinal B.

4.5.3) Representação do Sinal C

Finalmente, revelar-se-á o último sinal que será utilizado para validação dos modelos, o qual apresenta variação senoidal no valor da frequência. Essa variação é realizada entre o intervalo [59,5;60,5] Hz. A finalidade da análise deste sinal é validar que, tanto o AG, quanto a metodologia proposta por Wang & Sun, estimam com eficiência sinais que apresentem variações positivas e negativas de forma constante. A Figura 22 mostra a comportamento do Sinal C em termos de amplitude e frequência.

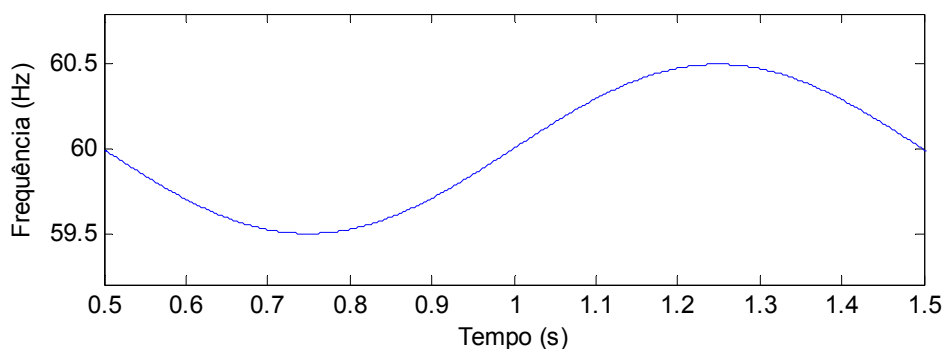


Figura 22: Características do Sinal C.

Capítulo 5

Modelagem do Sistema Elétrico de Potência através do *Software ATP*

O capítulo trata da modelagem do sistema elétrico de potência utilizando o *software ATP* para complementação dos testes realizados. Todos os elementos pertencentes ao sistema de potência são apresentados detalhadamente, incluindo o gerador síncrono, os transformadores, as linhas de transmissão e as cargas. Todos estes elementos foram modelados por dados reais encontrados em campo. Todos os parâmetros utilizados na implementação são apresentados no Apêndice A.

Por fim, o último item deste capítulo trata da apresentação dos sinais utilizados na comparação entre o AG e a TDF. Estes sinais foram obtidos através da simulação de situações de não-conformidade no SEP implementado. As situações simuladas retratam faltas em uma linha de transmissão e em um barramento, energização e desconexão de transformadores e conexões de cargas. Todas as situações foram cuidadosamente escolhidas, para que os resultados e conclusões obtidos neste trabalho mostrem a eficiência e as limitações associadas a cada metodologia.

5.1) O Sistema Elétrico de Potência Simulado

Este tópico tem por finalidade apresentar a modelagem realizada do sistema de potência, do qual serão obtidos os sinais elétricos que serão utilizados para comparar as duas metodologias propostas neste trabalho. Este SEP simulado é formado por elementos de geração, transmissão e distribuição, e tendo como objetivo gerar sinais elétricos a partir da simulação de situações reais que ocorrem nos sistemas de potência, para que com os casos simulados se possa realizar a comparação das metodologias propostas por este trabalho. A modelagem deste sistema foi feita utilizando o *software ATP (Alternative Transients Program)* [29] e sua representação é mostrada na Figura 23. Deve ser colocado que este SEP foi obtido da referência [30].

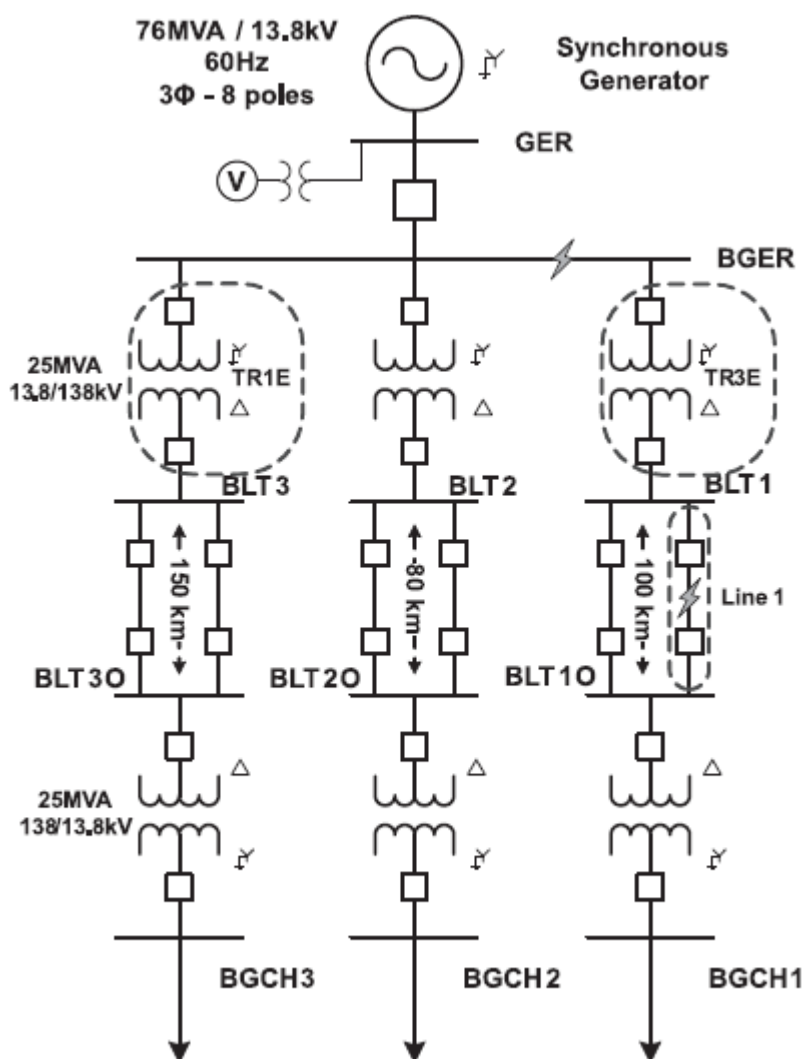


Figura 23: O sistema elétrico de potência simulado.

Resumidamente, este SEP é constituído por um gerador síncrono de tensão e potência nominais de 13,8 kV e 76 MVA, respectivamente, transformadores trifásicos elevadores de 13,8:138 kV com potência de 25 MVA, transformadores trifásicos abaixadores de 138:13,8 kV com potência de 25 MVA, linhas de transmissão com comprimentos de 80, 100 e 150 km e cargas variando entre 5 e 25 MVA com fator de potência indutivo ($fp = 0,92$). As conexões dos transformadores são em delta e estrela aterrado para os enrolamentos de alta e baixa tensão, respectivamente.

A seguir, será apresentada uma breve descrição a respeito de cada elemento simulado pertencente a este SEP.

5.1.1) Gerador Síncrono

Os geradores são equipamentos fundamentais para o sistema elétrico, pois estes são responsáveis pelo fornecimento da energia elétrica e pela manutenção da potência disponibilizada nos diversos ramos que constituem uma rede elétrica. Os geradores síncronos são utilizados na maioria das aplicações, pois estes, em sistemas isolados, suprem a potência consumida pelas cargas e age como uma fonte de tensão cuja frequência é determinada pela velocidade da fonte primária de energia [31].

Devido a esta característica em sistemas isolados, adotou-se um sistema que possui apenas um único gerador síncrono em sua topologia, viabilizando as análises do comportamento do mesmo às variações de carga e alterações estruturais da rede elétrica, como por exemplo, quando da saída de uma determinada linha de transmissão. Os parâmetros utilizados na simulação deste gerador são apresentados no Apêndice A.

Para esta simulação foi utilizado o modelo de máquina trifásica síncrona dinâmica. A aplicação deste modelo de máquina elétrica permite a obtenção de diversos parâmetros de operação, incluindo as correntes de campo, de fase e de armadura, os torques magnético e elétrico, os ângulos mecânicos, entre outros. Entretanto, a principal variável de saída para este trabalho é o desvio da velocidade mecânica em relação a velocidade síncrona, pois é através desta diferença que a frequência da tensão de saída é encontrada [30].

A constante variação do estado de equilíbrio carga/geração faz com que haja uma busca contínua pelo restabelecimento do equilíbrio operativo do SEP, ou seja, que as potências geradas e consumidas sejam iguais. Desta forma, verifica-se a necessidade da implantação de um sistema de controle capaz de corrigir tais oscilações de potência e manter a condição normal de operação [32].

Assim, considerando o sistema elétrico apresentado e que o gerador síncrono é diretamente influenciado pelas variações de equilíbrio, pode-se considerar que a ação do regulador de velocidade será responsável pela manutenção e pela busca do equilíbrio entre carga e geração [30].

Vale lembrar que o sistema de potência tem a propriedade de alcançar um novo ponto de equilíbrio, mesmo que este não apresenta nenhum tipo de ação reguladora. Essa condição pode ser explicada pelo fato de que a carga varia com a frequência, fazendo com que, em geral, o valor absoluto da carga diminua com o decréscimo de frequência. Essa característica inerente do SEP é conhecida como regulação própria [32].

Apesar de o sistema elétrico apresentar esta característica, sua utilização não é aconselhada, já que a mesma provoca uma alta variação de frequência ao SEP. Por este

motivo, faz-se necessário a aplicação de sistemas automáticos de controle que garantam o retorno do equilíbrio entre carga e geração durante a operação do SEP.

Em função do apresentado, os geradores possuem mecanismos de regulação de velocidade, para controlar desvios de frequência, a qual se relaciona com a velocidade do gerador, e mecanismos de regulação de tensão, os quais são utilizados para manter a tensão de saída do gerador constante [30]. O diagrama de blocos do sistema de controle de excitação é mostrado no apêndice A.

Além dos comentários acima realizados, a simulação também considerou a influência do regulador de velocidade no controle da máquina, proporcionando uma melhor representação do sistema elétrico estudado. A inclusão deste controle permite observar o comportamento do gerador frente às variações de carga e evita a perda de sincronismo durante o comportamento dinâmico do SEP.

Dentre os diversos tipos de reguladores de velocidade encontrados na literatura, optou-se pela aplicação do regulador com queda de velocidade, cujas características de realimentação o tornam rápido e estável [30]. O comportamento do regulador utilizado pode ser expresso através da função de transferência apresentada em (44), na qual a dependência da variação de frequência fica evidenciada. Os parâmetros utilizados neste regulador são também mostrados no Apêndice A.

$$\frac{\eta(s)}{\Delta F(s)} = -\frac{1}{R} \frac{1 + sT_r}{(1 + sT_g)(1 + s\frac{r}{R}T_r)} \quad (44)$$

5.1.2) Transformadores

Os transformadores de potência desempenham uma grande importância para o SEP, uma vez que estes são os responsáveis pela interligação dos três principais ramos dos sistemas de potência (geração, transmissão e distribuição), além de determinar os níveis de tensões desejados, elevando ou diminuindo a tensão de rede ao longo do sistema.

Devido a grande relevância destes equipamentos para a composição do modelo do sistema elétrico utilizado, empregou-se uma modelagem completa utilizando o *ATP* para representar o comportamento destes, incluindo a relação de transformação, curva de saturação e conexões dos rolamentos delta e estrela.

A curva de saturação do transformador foi obtida pela utilização da rotina SATURATION [29], a qual fornece os dados de corrente e de fluxo a partir dos valores de tensão e de corrente do transformador provenientes de ensaios, possibilitando a utilização dessas informações na caracterização do equipamento [30].

No Apêndice A, são apresentados os parâmetros utilizados na modelagem dos transformadores utilizados na simulação.

5.1.3) Linhas de Transmissão

A estrutura da linha de transmissão de 138 kV simulada segue a configuração típica empregada na Companhia Paulista de Força e Luz (CPFL) no interior paulista. Tomando como base esta topologia, faz-se necessário realizar o levantamento dos parâmetros e das características da linha de transmissão, dados estes que foram baseados em [33] e são mostrados no Apêndice A.

Para a realização da simulação do sistema no *software ATP*, algumas considerações foram efetuadas em função das disposições geométricas dos condutores nas torres de transmissão. Dentre as considerações realizadas, decidiu-se realizar as simulações utilizando linhas transpostas, uma vez que essa situação compensa os desequilíbrios magnéticos entre os condutores, as estruturas metálicas e o solo sob a linha de transmissão. Este modelo foi escolhido pelo fato de que sistemas não transpostos provocam dissimetrias indesejáveis entre os condutores, ocasionando uma conseqüente diferença entre as reatâncias dos mesmos [26].

A modelagem da linha de transmissão foi efetuada considerando-se parâmetros distribuídos e variantes com a frequência, o que possibilita um estudo mais detalhado do comportamento da mesma perante o dinamismo do SEP. Para tal situação, empregou-se a rotina JMARTI incluída no *software ATP*.

Segundo [34], a garantia de uma solução precisa e exata para os parâmetros de qualquer linha de transmissão se deve à consideração da distribuição uniforme dos parâmetros no decorrer do comprimento da linha, ou seja, não existindo uma concentração destes em um único ponto. Devido a esta observação, o modelo de parâmetros distribuídos variantes em função da frequência utilizado pela rotina JMARTI foi empregado.

A rotina JMARTI é uma função incorporada ao *ATP* capaz de gerar um modelo para linhas de transmissão baseado na teoria de ondas viajantes, considerando a variação dos parâmetros destas com a frequência. Nesta rotina são consideradas diversas características do sistema a ser modelado, como por exemplo, a estrutura da torre, o número de condutores por fase, a resistividade do solo, o intervalo de frequência a ser utilizado, a disposição da linha, dentre outros [30].

Devido à grande flexibilidade proporcionada por este procedimento, utilizou-se desta rotina para o cálculo dos parâmetros das linhas de transmissão definidas no modelo do sistema elétrico aplicado.

5.1.4) Cargas Conectadas ao SEP

A variação dinâmica entre as potências gerada e a consumida pelas cargas produz alguns fenômenos no sistema elétrico, entre os quais se destaca a variação da frequência. Nesse contexto, e a fim de se consolidar a simulação, optou-se pela utilização de um conjunto de cargas com características específicas que serão inseridas à rede elétrica em tempos distintos, com o objetivo de verificar o comportamento dinâmico e a resultante flutuação da frequência. Os valores de resistência e indutância das cargas utilizadas na simulação são apresentados no Apêndice A.

É importante lembrar que as cargas simuladas nesse sistema são compostas por elementos resistivos e indutivos, dimensionados para que o conjunto tenha um fator de potência de 0,92 indutivos e que a potência total instalada e observada pelo gerador varia de 25 a 110% da potência nominal do mesmo.

5.2) Obtenção dos sinais para comparação das metodologias

Findada a explicação da modelagem do SEP, faz-se necessário gerar sinais elétricos originados de situações reais de não conformidade para se avaliar a eficácia das metodologias implementadas neste trabalho e realizar a comparação entre elas.

Esta seção apresentará os sinais elétricos gerados do SEP simulado no tópico 4.5. Durante o período de simulações, uma grande quantidade de dados foi gerada para se testar os modelos implementados. Entretanto, escolheram-se cuidadosamente cinco casos de operação anormal do sistema para se realizar a comparação proposta entre as metodologias. Cada caso gerado impõe um determinado comportamento dinâmico ao balanço de potência do sistema e, conseqüentemente, uma variação da frequência sobre o SEP. A medição das variáveis foi realizada no barramento do gerador para todas as situações. Os casos simulados serão apresentados nos itens abaixo.

5.2.1) Sinal I: Falta Monofásica em 50% da Linha 1

O primeiro sinal que será utilizado para comparar as metodologias representará uma falta permanente em 50% da linha 1. Esta falta será monofásica (Fase A - Terra) e se

iniciará no tempo $t = 2,5$ s e seu comportamento é ilustrado na Figura 24. Na figura, é possível observar que a frequência apresenta uma característica oscilatória, a qual se extingue ao longo do tempo.

A escolha deste caso na comparação se deve pelo fato de que situações de falta em linhas de transmissão serem comuns em sistemas elétricos de potência e, por se tratar de um problema recorrente, sua análise tem uma grande importância na estimação de frequência.

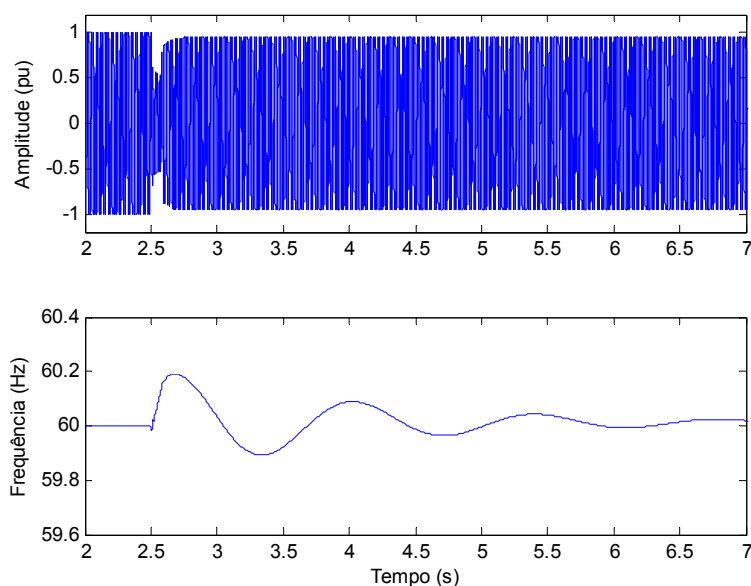


Figura 24: Sinal I: Falta permanente em 50% da linha 1.

5.2.2) Sinal II: Energização do Transformador TR1E

O segundo sinal mostra o comportamento da amplitude e da frequência durante a energização do transformador TR1E, a qual é iniciada no instante $t = 1,0$ s. Este sinal já possui características diferentes do Sinal I, conforme é observado na Figura 25. Enquanto o primeiro sinal sofre uma pequena variação em torno da frequência de 60 Hz, este sinal se caracteriza por sofrer uma forte variação no valor da frequência, caindo de 60 Hz para 58 Hz em aproximadamente 5,0 s.

A energização de transformadores se apresenta como uma situação complicada para a estimação de frequência, visto que durante este processo, ocorre à geração de harmônicas de 2ª ordem, o que pode influenciar o valor encontrado da frequência. Por este motivo e pelo fato deste tipo de situação ocorrer no SEP, é que este caso foi escolhido para se realizar a comparação.

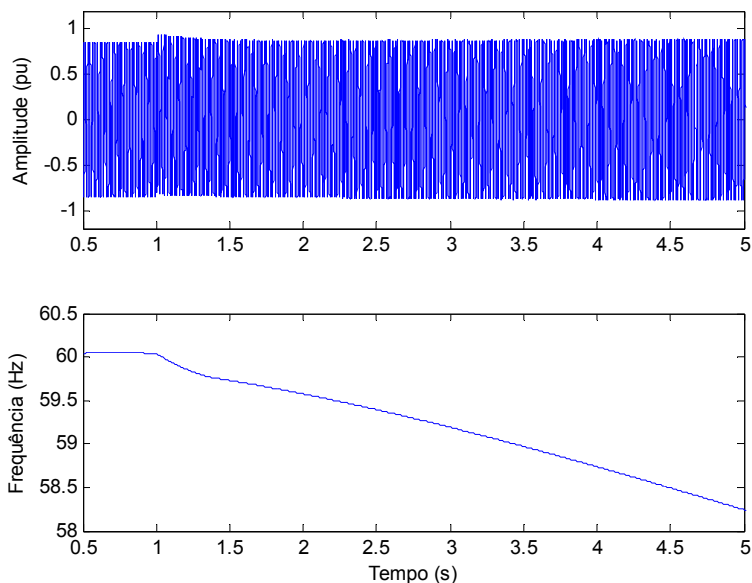


Figura 25: Sinal II: Energização do Transformador TR1E.

5.2.3) Sinal III: Desconexão Repentina dos Transformadores TR1E e TR3E

Este sinal se caracteriza pela desconexão repentina dos transformadores TR1E e TR3E do sistema no instante $t = 1,0$ s. O impacto desta situação na amplitude e na frequência é mostrado na Figura 26. Analisando o sinal de frequência, observa-se que a desconexão dos transformadores representa uma saída de carga do sistema, o que, conseqüentemente, causa um aumento da velocidade do gerador, implicando no aumento da frequência. Assim, nesta situação, somente o transformador TR2E estaria recebendo potência. Este sinal se comporta de forma contrária ao sinal anterior, pois retrata um aumento significativo do valor de frequência.

A escolha desta situação para a comparação entre as metodologias propostas neste trabalho se deve pelo fato dos sistemas elétricos estarem sujeitos a desconexões de transformadores e também pelo fato do sinal de frequência apresentar um forte aumento em seu valor, caracterizando-se uma situação contrária ao Sinal II.

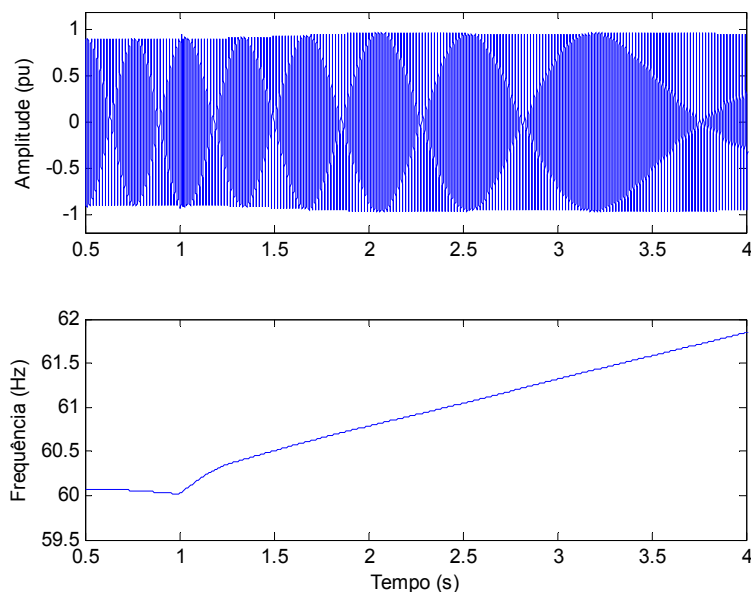


Figura 26: Sinal III: Desconexão repentina dos Transformadores TR1E e TR3E.

5.2.4) Sinal IV: Conexão Repentina de um Bloco de Carga

O penúltimo sinal gerado que será utilizado para comparar as metodologias representa uma conexão repentina de um bloco de carga em BCGH3 no instante $t = 2,0$ s. O comportamento deste sinal é mostrado na Figura 27. Analisando a figura, pode-se observar que a frequência antes da conexão está estabilizada e muito próxima ao valor de 60 Hz. Após a conexão, o sinal de frequência sofre uma oscilação natural.

Este caso foi escolhido para se realizar a comparação pois os sistemas de potência constantemente sofrem conexões e desconexões de cargas durante a sua operação, o que mostra a importância de se analisar este tipo de situação.

5.2.5) Sinal V: Falta Monofásica no Barramento do Gerador

Por fim, o último sinal analisado representa uma falta monofásica permanente (Fase A - Terra) no barramento BGER no instante $t = 2,0$ s. A Figura 28 ilustra o comportamento dos sinais de amplitude e frequência do sistema nesta situação.

Esse caso foi escolhido pelo fato de se tratar de uma falta grave ao sistema, a qual afeta diretamente os três transformadores e, conseqüentemente, aos três blocos de carga conectados a eles.

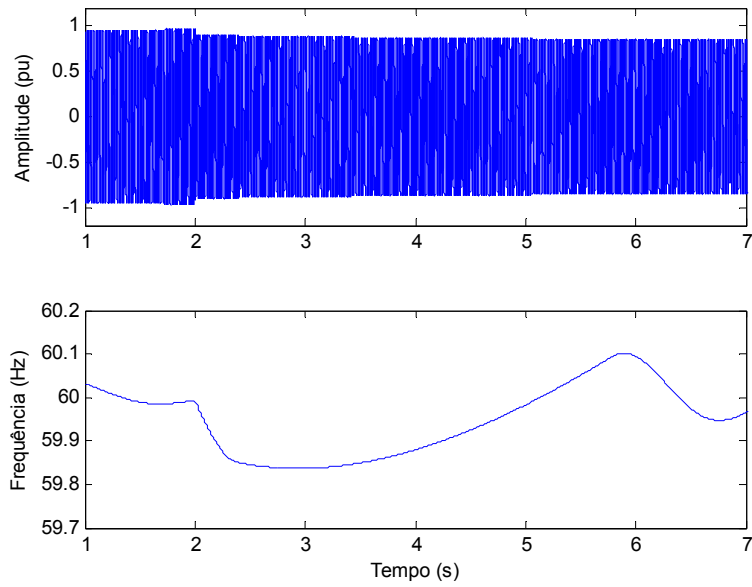


Figura 27: Sinal IV: Conexão repentina de um bloco de carga em BCGH3.

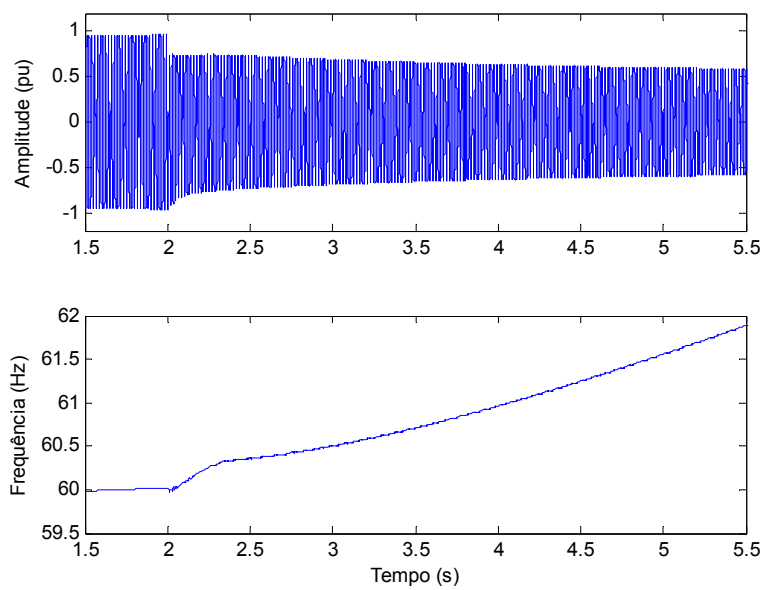


Figura 28: Sinal V: Falta permanente no barramento BGER.

Capítulo 6

Resultados da Aplicação dos Algoritmos Genéticos e TDF no Sistema Estudado – Um Estudo Comparativo

Este capítulo é dividido em três partes. A primeira etapa está relacionada com a validação dos modelos implementados, utilizando os sinais sintéticos gerados no capítulo 4. Com os algoritmos validados, entra-se na segunda etapa, a qual corresponde à comparação das metodologias utilizando os sinais gerados na simulação do SEP. Por fim, a terceira fase compreende a análise dos prós e contras de cada implementação, abordando aspectos desde a complexidade de implementação até a resposta da estimação de parâmetros em tempo real.

6.1) Validação dos algoritmos implementados

Seguindo a organização proposta, inicia-se este capítulo com a validação dos algoritmos implementados. Esta validação será realizada utilizando os sinais gerados em *MATLAB* no capítulo anterior. Os resultados obtidos serão discutidos minuciosamente nos próximos três tópicos.

6.1.1) Análise do Sinal A

O primeiro sinal a ser analisado é caracterizado pela presença de um degrau de frequência no instante $t = 0,5s$, como foi salientado no item 4.5.1. Os resultados obtidos são mostrados na Figura 29.

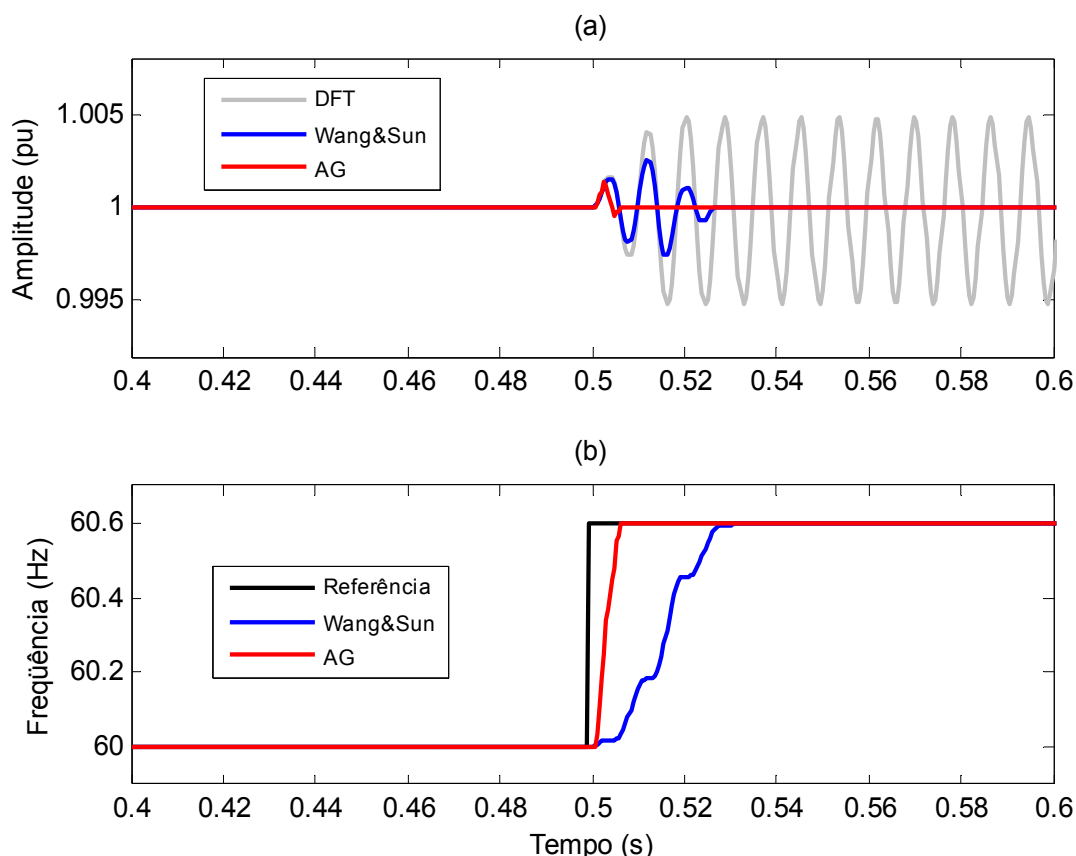


Figura 29: Processo de estimação da amplitude e frequência do sinal A.

Esta Figura ilustra em (a) a estimação da amplitude pelas duas metodologias propostas e pelo tradicional método da TDF e em (b) o sinal de referência dado pelo MATLAB para a frequência e os sinais estimados pelo AG e pela TDF proposta por Wang & Sun. O período de tempo apresentado na figura se refere ao intervalo entre 0,4 s e 0,6 s, assim é possível se avaliar mais detalhadamente as respostas fornecidas pelos modelos estimadores. Primeiramente, será analisada a figura da estimação da frequência, a qual possui informações que podem ser mais facilmente entendíveis.

Observando-se a Figura 29 (b), a primeira conclusão que se obtém é que as duas metodologias apresentaram respostas muito eficientes e rápidas, levando menos de 40 ms para estabilizar a frequência no valor de 60,6 Hz. Ao se observar a curva do AG (em vermelho), pode-se dizer que houve uma estabilização da resposta em aproximadamente 10 ms. Isso acontece, pois a janela deslizante implementada para este caso tem o tamanho de meio-ciclo de onda. Desta forma, a janela deslizante passa a efetuar a estimação da nova frequência em meio-ciclo, ou seja, 8,33 ms. Já para a resposta do modelo de TDF proposto por Wang & Sun (em azul), podemos observar que o tempo para a estabilização ficou próximo dos 30 ms a 35 ms. Relembrando os conceitos dados no item 4.4, sabe-se que nesta metodologia o ciclo atual contido na janela deslizante é corrigido pelo ciclo

anterior, através da diferença entre os valores de fase reais. Portanto, para que os efeitos do ciclo anterior não afetem mais a estimação da frequência, deve se esperar que dois ciclos inteiros sejam completados para a estimação correta do novo valor de frequência, o que resulta em um tempo de 33,3 ms considerando um sinal de 60 Hz. Desta forma, verifica-se que para o sinal A, as duas metodologias forneceram os resultados esperados segundo a teoria elaborada.

Findada a questão da estimação da frequência, analisar-se-á o comportamento da amplitude estimada do sinal A. A Figura 29(a) ilustra os resultados obtidos pelos processos de estimação. Conforme o esperado, a resposta obtida para a estimação da amplitude tem comportamento similar à estimação da frequência. Através do eixo das abscissas, é possível verificar que os tempos para a estabilização das metodologias são iguais aos tempos de estabilização da frequência. A nova informação contida neste gráfico se refere ao processo de estimação da amplitude utilizando o método da TDF tradicional. Observa-se que a partir do instante em que ocorre o degrau de frequência, o valor estimado da amplitude do sinal sofre uma pequena distorção, distorção esta que apesar de ser praticamente insignificante (menor que 0,5%), mostra a maior eficiência das duas metodologias implementadas quando comparadas com a TDF tradicional.

6.1.2) Análise do Sinal B

O próximo sinal a ser analisado foi apresentado no item 4.5.2 e é caracterizado por apresentar uma transição em rampa entre o período [0,35; 0,65] s, o que garante uma alteração mais suave no valor da frequência.

A Figura 30 ilustra os resultados obtidos com a aplicação do sinal B nas metodologias implementadas e é dividida em quatro partes. A Figura 30(a) além de mostrar os resultados da estimação da amplitude pelo AG e pela TDF proposta por Wang & Sun, também fornece o resultado obtido com o método da TDF tradicional, como apresentado na análise do sinal A. A Figura 30(b) revela os valores obtidos na estimação da frequência. As figuras 30(c) e 30(d) são ampliações das figuras 30(a) e 30(b), respectivamente. Estas ampliações são utilizadas, pois para transições que acontecem de forma lenta, o comportamento dos algoritmos estimadores é mais bem analisado com maior riqueza de detalhes, o que é conseguido a partir do *zoom* realizado a partir das figuras 30(a) e 30(b).

Estudando o comportamento das estimativas realizadas na Figura 30(a), observamos que, novamente, o tradicional método da TDF se apresenta menos eficiente quando comparado com as outras duas metodologias. Com relação aos dois outros métodos, a nova informação obtida é o fato da estimativa da amplitude manter valores aceitáveis de erro,

mesmo durante o período de mudança da frequência, o que ocorre no intervalo [0,35;0,65] s. Assim, mostra-se que os métodos implementados são eficientes quando aplicados em situações de transições suaves.

Já com relação à Figura 30(b), o comportamento da estimação da frequência é similar ao descrito para a estimação da amplitude. Novamente, é observado o pequeno erro que os algoritmos geram durante a estimação da frequência. As figuras 30(c) e 30(d) são apresentadas para mostrar o tempo de estimação dos métodos, o qual foi explicado no tópico anterior. O AG foi implementado com tamanho de janela de meio-ciclo e o TDF com janela de um ciclo.

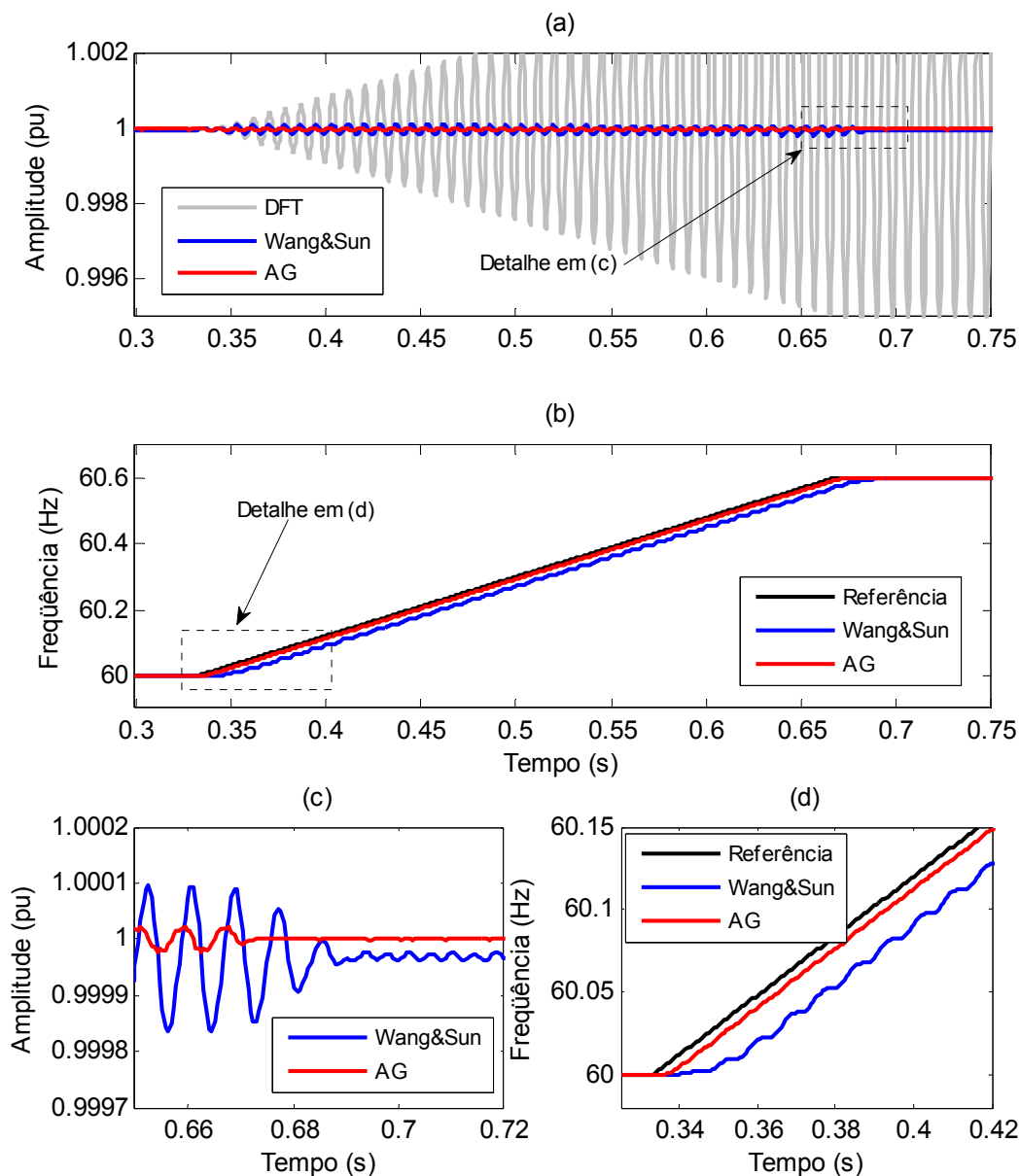


Figura 30: Processo de estimação da amplitude e frequência do sinal B.

6.1.3) Análise do Sinal C

Finalmente, analisar-se-á o sinal mostrado em 4.5.3, o qual apresenta variação senoidal no valor da frequência. Essa variação é realizada entre o intervalo [59,5;60,5] Hz. A Figura 31 mostra os resultados obtidos neste caso.

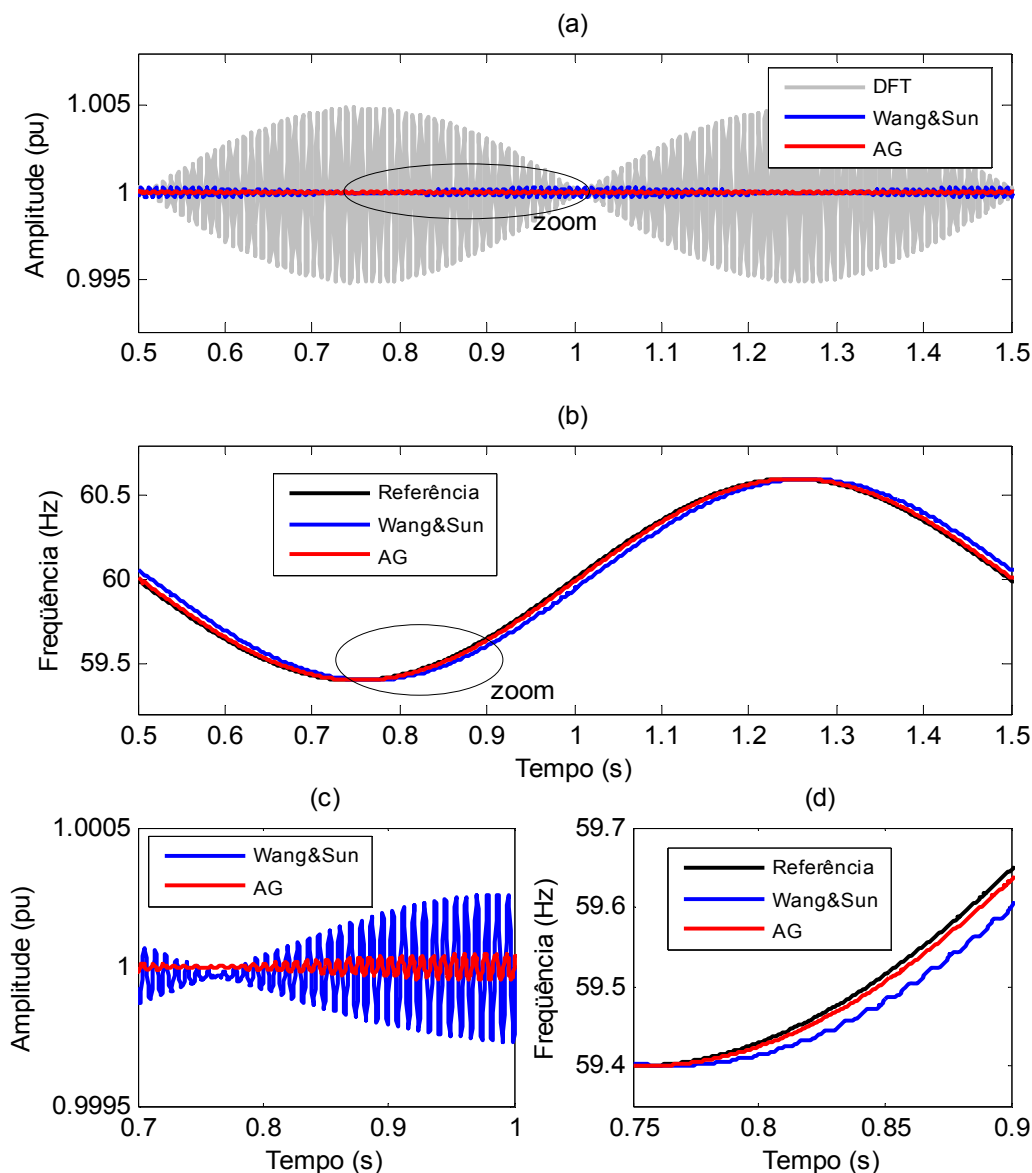


Figura 31: Processo de estimação da amplitude e frequência do sinal C.

A maneira como as imagens são apresentadas na Figura 31 segue o padrão do caso anterior. As figuras 31(a) e 31(b) apresentam os resultados da estimação da amplitude e da frequência, respectivamente, e as figuras 31(c) e 31(d) são ampliações das áreas de transição dos respectivos gráficos de estimação.

Analisando a Figura 31 como um todo, observa-se que o comportamento dos algoritmos implementados segue o padrão dos resultados fornecidos nos demais casos estudados,

mesmo considerando variações constantes e bipolares nos valores estimados para amplitude e frequência.

6.1.4) Conclusões parciais

Através das análises realizadas nos itens anteriores a respeito dos resultados obtidos com a simulação dos três casos gerados para a validação, pode-se concluir que os dois algoritmos implementados responderam de forma satisfatória nas três situações colocadas.

Observando atentamente as curvas geradas pelo AG e pela implementação proposta por Wang & Sun, pode-se observar que para os três casos a resposta fornecida pelo AG foi mais adequada em termos de tempo de resposta e precisão. Entretanto, é importante ressaltar que os sinais sinteticamente gerados para a validação não sofrem a influência de ruídos e de harmônicos, o que simplifica o trabalho de estimação dos algoritmos. Portanto, qualquer conclusão a respeito da comparação entre as metodologias obtida nesta etapa é superficial. A partir do próximo item, será possível obter conclusões mais concretas e realistas a respeito de cada método.

6.2) Comparação dos algoritmos implementados

Findada a etapa de validação dos resultados, entra-se na segunda fase dos resultados, a qual se refere à comparação dos algoritmos implementados. Nesta fase, cinco sinais foram obtidos de situações de não conformidade de um SEP simulado e, a partir dos resultados obtidos destas situações, foram realizadas as análises necessárias para se atingir o escopo deste trabalho.

Vale lembrar que o AG utilizado para as simulações contém uma janela deslizante com 128 amostras e abrange um ciclo do sinal. Além disso, foi utilizada uma população com 50 indivíduos e 200 gerações como critério de parada do AG. A TDF proposta por Wang & Sun foi implementada com uma janela deslizante de 128 amostras em um ciclo do sinal, identicamente a utilizada no AG.

Nesta etapa do trabalho, procurou-se minimizar as diferenças algorítmicas entre as metodologias para que os resultados e as conclusões obtidas não fossem distorcidos.

6.2.1) Sinal I: Falta Monofásica em 50% da Linha 1

O primeiro sinal utilizado na comparação das metodologias já foi mostrado no item 5.2.1. Este sinal é resultante da simulação de uma falta monofásica em 50% da linha 1 contida no

sistema elétrico simulado. As Figuras 32, 33 e 34 mostram os resultados obtidos da estimação de frequência, amplitude e fase, respectivamente.

A primeira análise a ser realizada será feita sobre o parâmetro frequência. Este primeiro caso foi utilizado para calibrar o parâmetro H do sistema elétrico, o qual foi descrito no tópico de regularização (tópico 4.3). A curva da Figura 32 para H=0 apresenta um comportamento muito oscilatório logo após a falta, indicando que existem vários pontos de mínimos na função objetivo $C(A,f,\theta)$. Outra observação é que esta curva está relativamente longe do valor da frequência de referência. Então, aumentou-se o valor da constante H até o valor máximo (H=24) e constatou-se que com incremento gradual do valor de H, a curva se comporta de maneira menos oscilatória, garantindo melhores respostas para o AG. Esta afirmação pode ser observada através das curvas obtidas com H=6 e H=24. Portanto, nos próximos itens, utilizar-se-á H=24.

Por outro lado, o algoritmo proposto por Wang & Sun apresentou um resultado caracterizado por ser fortemente oscilatório durante 10 ciclos e retornou a um valor satisfatório após este tempo.

Em termos de aplicação, o AG seria uma ótima alternativa, visto que a variação da frequência estimada é inferior a 0,1Hz. Já o TDF não seria aconselhável, uma vez que acontece variações de mais de 1Hz na estimação da frequência.

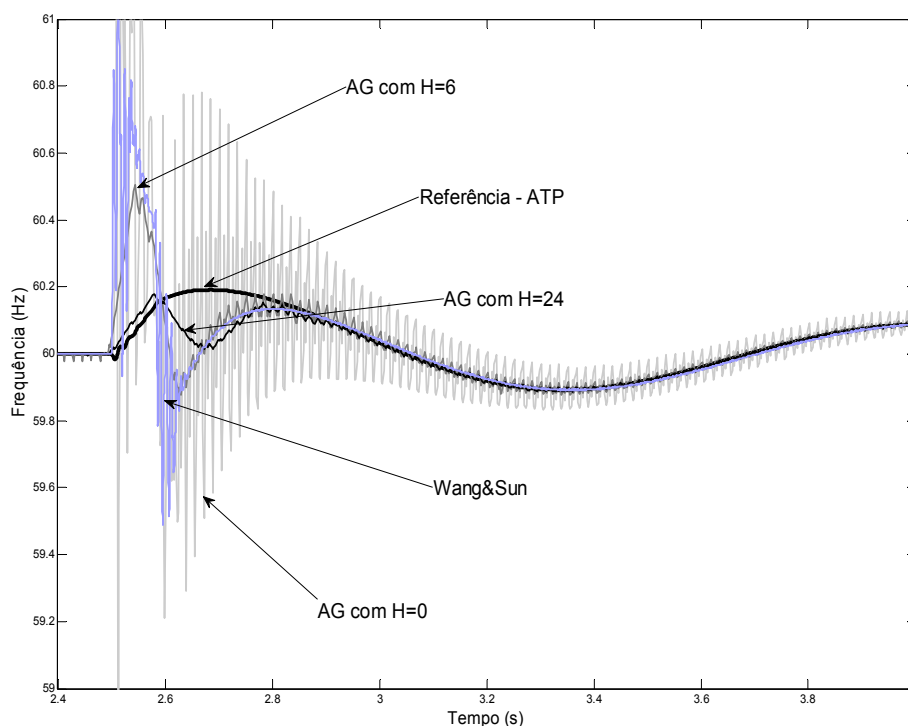


Figura 32: Estimação da frequência do Sinal I.

Com relação a amplitude, a primeira importante observação a ser feita é que os dois algoritmos implementados fornecem o valor máximo do sinal, assim como acontece na representação fasorial. Essa observação pode ser visualizada na Figura 33, na qual as respostas do AG e do algoritmo de Wang & Sun criam uma espécie de envoltória sobre o sinal analisado, já que os mesmos retornam os valores máximos de amplitude.

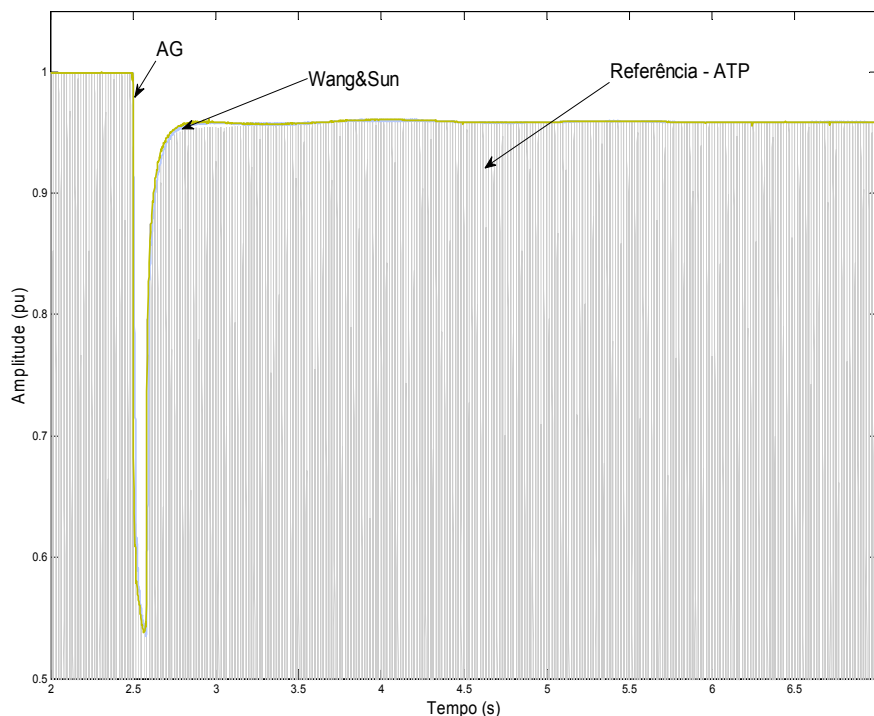


Figura 33: Estimação da amplitude do Sinal I.

Do ponto de vista comparativo, pode-se observar pelo gráfico que as duas metodologias apresentaram respostas praticamente iguais, uma vez que os sinais de respostas estão praticamente sobrepostos. Nos próximos itens será possível visualizar diferenças mais claras entre os métodos propostos.

Já a Figura 34 é dividida em dois gráficos, nos quais mostra-se apenas um pequeno intervalo de tempo dos resultados para que se possa visualizar claramente o processo de estimativa dos modelos. O primeiro gráfico mostra a estimativa da fase pelo método do AG, enquanto o segundo ilustra os resultados obtidos com o algoritmo de Wang & Sun.

Observando os gráficos, nota-se que os mesmos realizam a estimativa em pequenos passos, ou seja, a cada janela deslizante utilizada na estimativa, um pequeno incremento ao valor da fase é adicionado ao resultado posterior. A segunda observação se refere à faixa relativa aos dois resultados apresentados. Na estimativa do AG, o valor da fase estimada pertence ao intervalo $[0, 2\pi]$, enquanto que nos resultados do modelo de Wang & Sun, o valor da fase pertence ao intervalo $[-\pi/2, \pi/2]$. É importante observar que essa diferença se deve à forma de implementação dos algoritmos e que isso não interfere nos

resultados relativos a estimação. Isso pode ser comprovado pelo fato de que como o intervalo utilizado no algoritmo de Wang & Sun corresponde à metade do utilizado no código do AG, a frequência do sinal de estimação de fase tem o dobro da frequência.

Desta forma, pode-se concluir que ambos os algoritmos estimam a fase de forma semelhante e que, diferentemente da estimação de frequência e de amplitude, é complexo fazer qualquer tipo de análise observando individualmente os valores estimados para a fase.

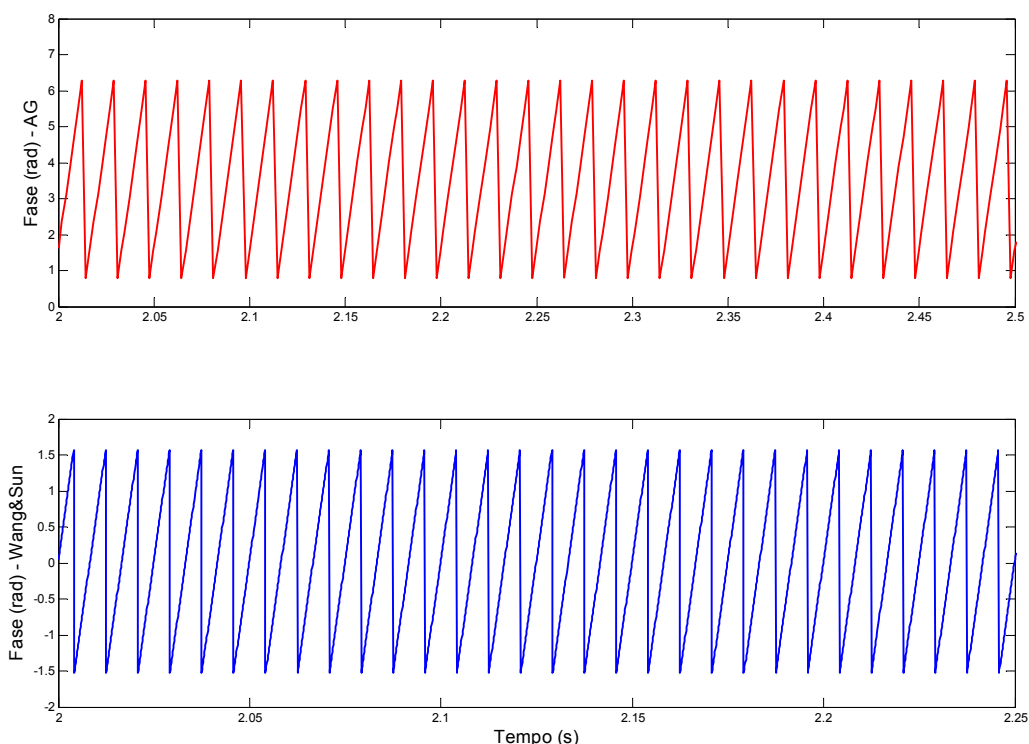


Figura 34: Estimação da fase do Sinal I.

6.2.2) Sinal II: Energização do Transformador TR1E

O segundo sinal gerado para comparação foi apresentado no item 5.2.2. Este sinal retrata a situação de energização do transformador TR1E do SEP. A seguir, as Figuras 35, 36 e 37 mostram os resultados gerados pelas metodologias para o valor de frequência, amplitude e fase, respectivamente.

Como o valor do parâmetro H já foi ajustado no item anterior, a Figura 34 apresenta somente uma curva de resposta do AG. A fim de comparar tanto o AG quanto a TDF de Wang & Sun com algum método de medição da frequência utilizado atualmente, foi adicionado aos gráficos de frequência uma curva de resposta de um relé comercial.

Observando as respostas obtidas, nota-se, mais uma vez, que o AG apresenta melhores resultados quando comparado com o método de Wang & Sun. Além disso, a resposta dada pelo AG chega a ser tão eficiente quanto a fornecida pelo relé comercial.

Com relação à TDF de Wang & Sun, é possível observar que durante um curto tempo após a não conformidade, o valor estimado para a frequência foge do valor de referência dado pelo ATP. Esta tendência também pode ser observada no caso anterior. O comportamento da estimação das duas metodologias e a resposta do relé comercial podem ser visualizadas no *zoom* dado sobre a estimação da frequência.

Através da Figura 35, pode-se observar que existe um período crítico durante a estimação da frequência, o qual corresponde a aproximadamente 30 ciclos (0,5s) após a ocorrência da não conformidade. Antes e após este tempo, os valores das respostas fornecidos pelas metodologias são praticamente idênticas, o que mostra a robustez das implementações, mesmo com a contínua variação da frequência após os 30 ciclos.

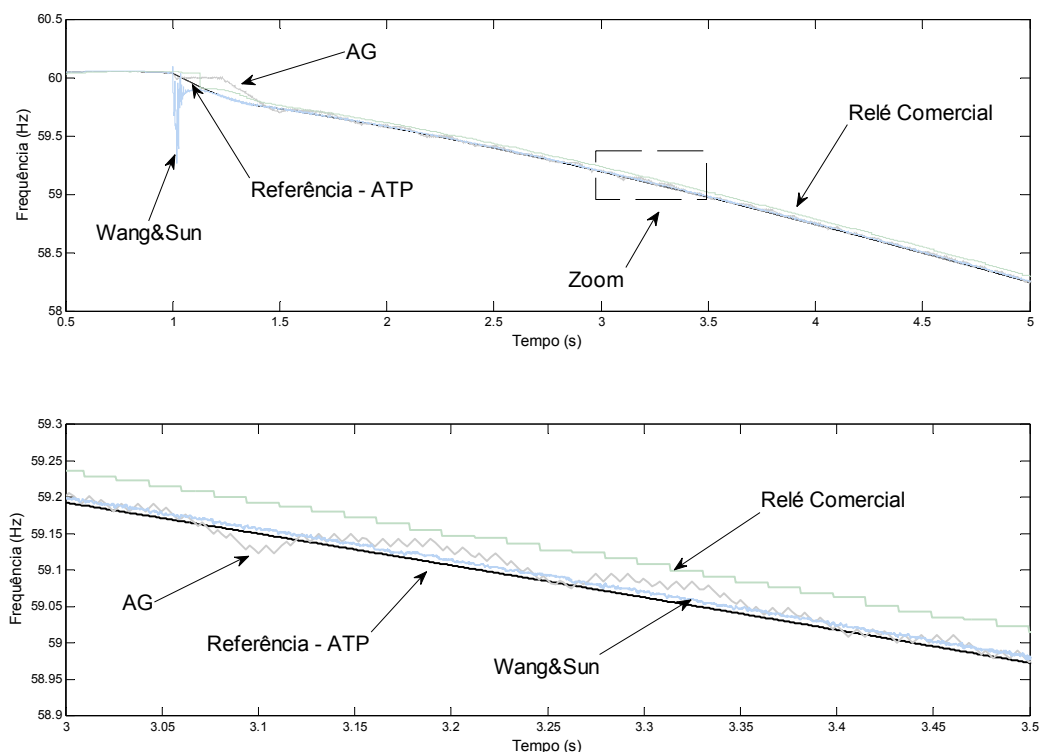


Figura 35: Estimação da frequência do Sinal II.

Já através da Figura 36, é possível notar que os valores obtidos para a amplitude não conseguiram acompanhar os valores de referência, resultando em respostas menos precisas. Entretanto, como observado na figura anterior, após o período crítico citado, as respostas para o valor de amplitude fornecidas pelas metodologias começam a tender ao valor de referência. Do ponto de vista comparativo, ambas metodologias fornecem

respostas satisfatórias. Entretanto, o valor fornecido pelo algoritmo de Wang & Sun apresenta uma maior oscilação do que o AG, o que torna a resposta do AG mais adequada.

Com relação às estimativas de fase mostradas na Figura 37, têm-se as mesmas observações e conclusões realizadas anteriormente.

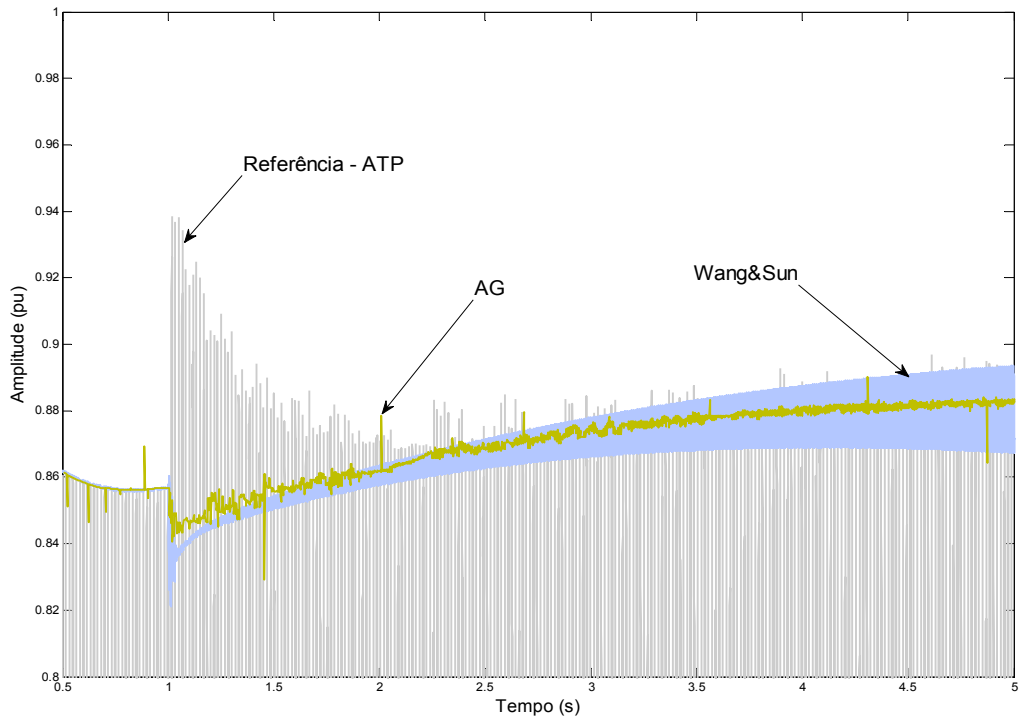


Figura 36: Estimação da amplitude do Sinal II.

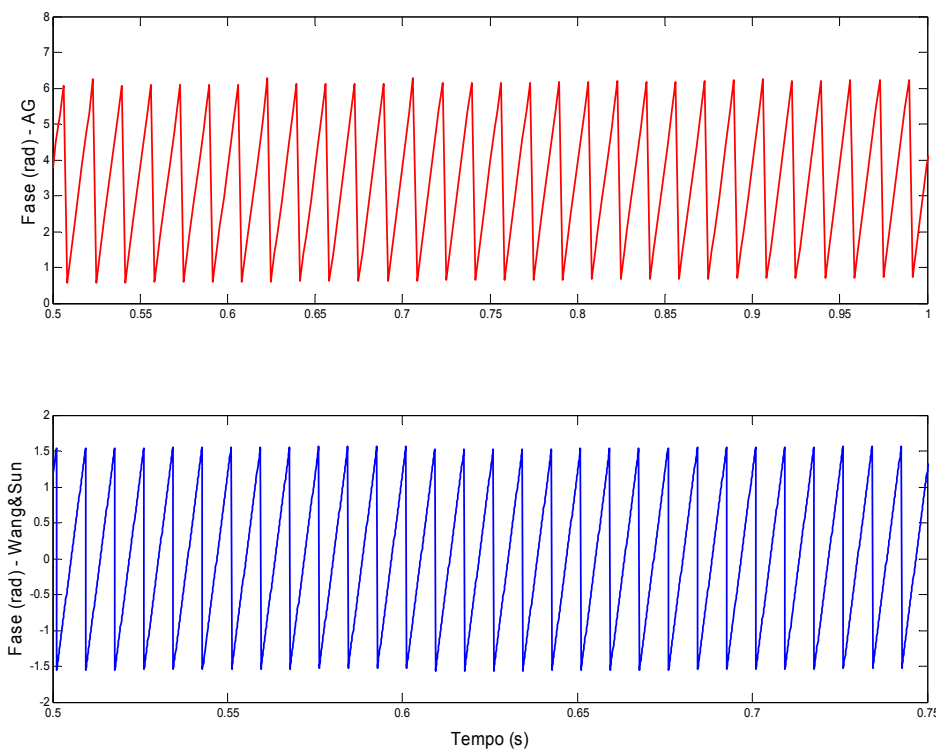


Figura 37: Estimação da fase do Sinal II.

6.2.3) Sinal III: Desconexão Repentina dos Transformadores TR1E e TR3E

O Sinal III foi apresentado no item 5.2.3. Este sinal é caracterizado pela desconexão repentina de dois transformadores do sistema, situação esta que é exatamente oposta à mostrada no item anterior. As respostas geradas pelas metodologias são mostradas nas Figuras 38, 39 e 40.

A partir da Figura 38 é possível visualizar que ambas as metodologias seguem com precisão o aumento da frequência do sistema e que mais uma vez é nítido o problema da estimação de frequência do algoritmo de Wang & Sun durante o período crítico da estimação. Na Figura 38, é nítido que as respostas fornecidas pelas metodologias são mais rápidas que a fornecida pelo relé. A explicação para isto é que nas metodologias o atraso dado à resposta é proporcional ao tamanho da janela deslizante, a qual foi explicada em suas modelagens. Já ao relé existem outras razões associadas ao atraso como, por exemplo, a filtragem do sinal. O *zoom* dado no intervalo de 0,5 s deixa ainda mais claro as respostas das metodologias e do relé comercial.

Com relação às resposta de amplitude mostrada na Figura 39, confirma-se a tendência mais oscilatória da resposta da TDF de Wang & Sun contra a resposta menos oscilatória e mais adequada do AG. Com relação à Figura 40, o mesmo comportamento da estimação de fase é visualizado.

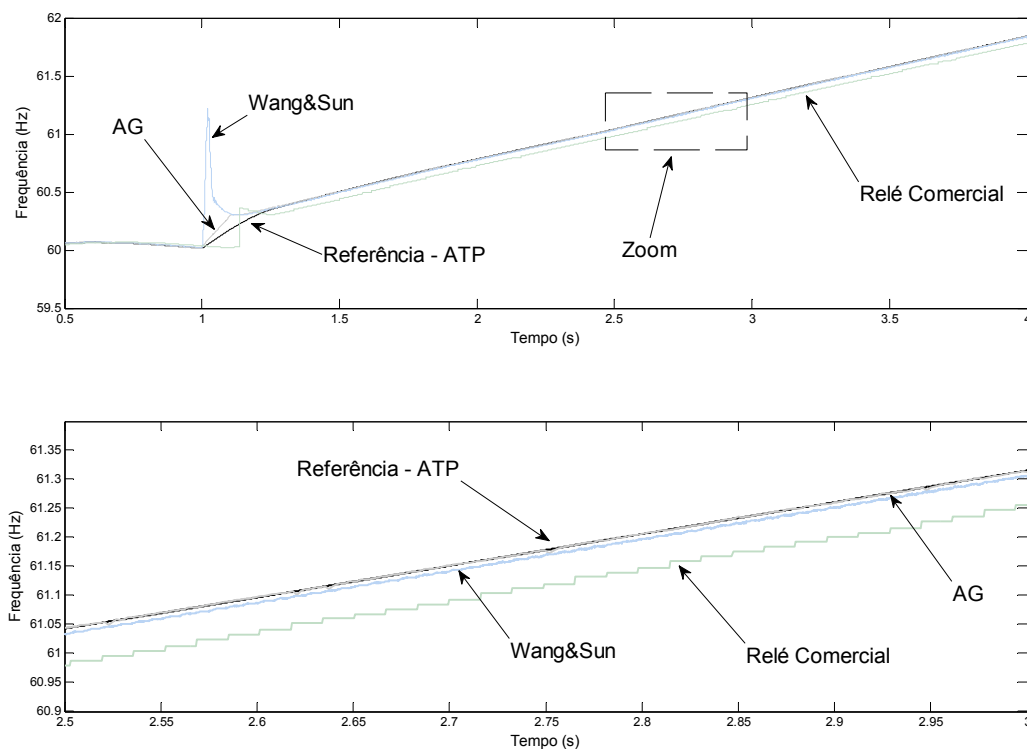


Figura 38: Estimação da frequência do Sinal III.

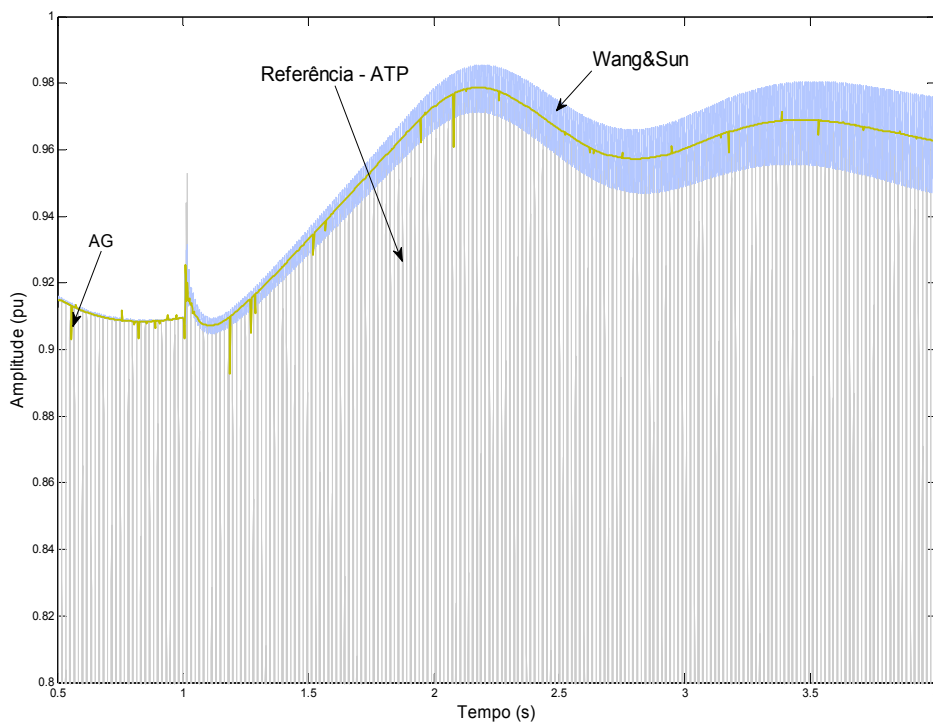


Figura 39: Estimação da amplitude do Sinal III.

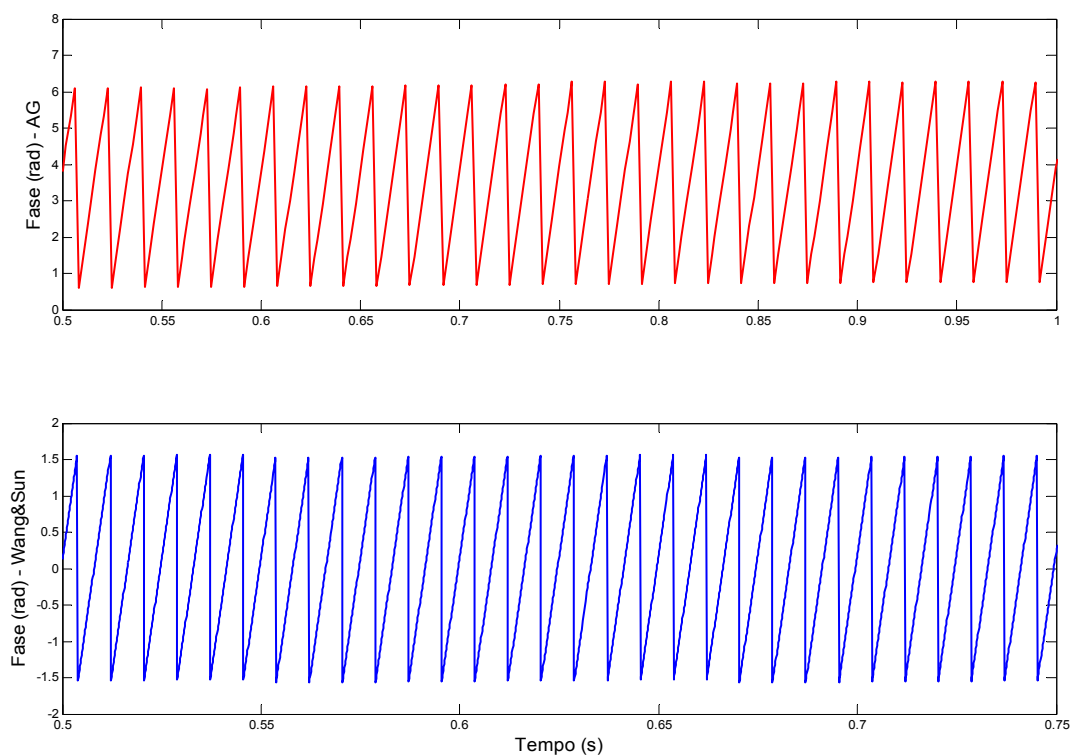


Figura 40: Estimação da fase do Sinal III.

6.2.4) Sinal IV: Conexão Repentina de um Bloco de Carga

O penúltimo sinal utilizado na comparação, assim como os outros, foi apresentado no item 5.2.4. O Sinal IV representa a conexão repentina de um bloco de carga no SEP. A Figura 41 ilustra as respostas obtidas para a estimação de frequência, a Figura 42 para a estimação da amplitude e a Figura 43 para as respostas de fase.

Baseado nas respostas da estimação de frequência é possível concluir que o comportamento das respostas é idêntico aos dos itens anteriores, o que leva as mesmas análises, nas quais o algoritmo de Wang & Sun apresenta resultados pouco precisos no período crítico da estimação e resultados satisfatórios após este período e que o AG apresenta resultados adequados em ambos os períodos. Na Figura em zoom, é possível verificar a tendência de estimação das duas metodologias e observar o atraso associado a estimação de frequência do relé comercial.

Já para a Figura 42, o algoritmo de Wang & Sun mostra um resultado mais satisfatório do que o apresentado nos itens anteriores. Entretanto, a característica oscilatória da resposta ainda é perceptível durante todo o período de estimação. Já o AG mantém a mesma natureza de resposta que foi apresentada nos três primeiros sinais.

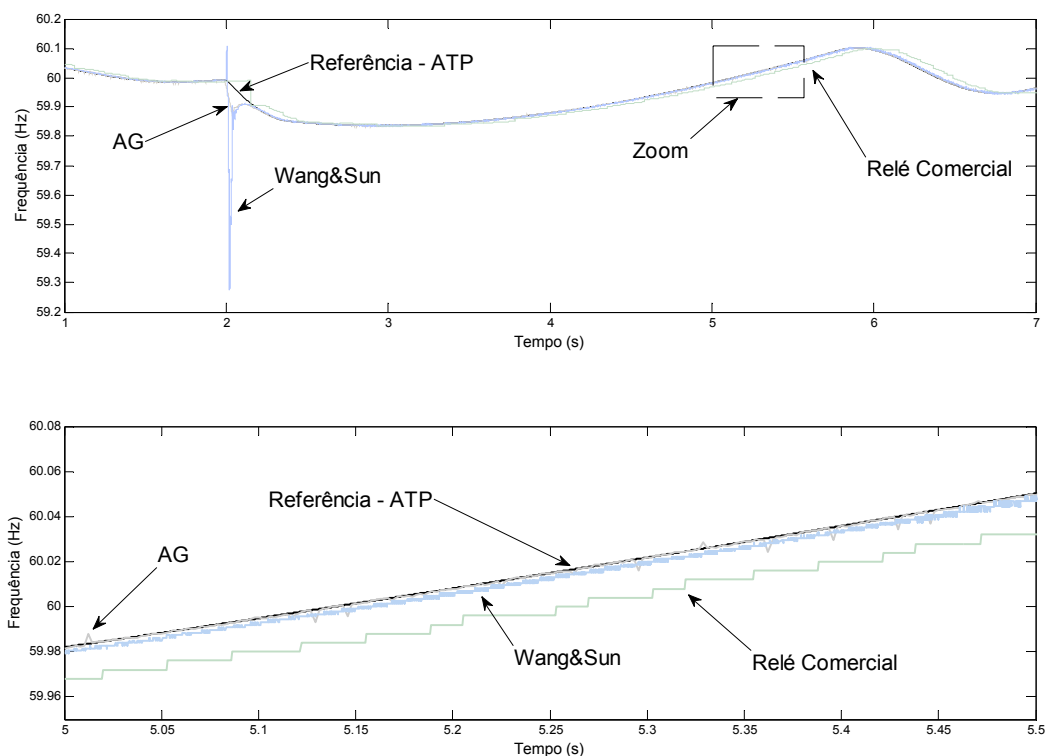


Figura 41: Estimação da frequência do Sinal IV.

6.2.5) Sinal V: Falta Monofásica no Barramento do Gerador

O último sinal utilizado na comparação das metodologias já foi mostrado no item 5.2.5. Este sinal é resultante da simulação de uma falta monofásica no barramento BGER do sistema de potência. As Figuras 44 a 46 mostram os resultados obtidos da estimação de frequência, amplitude e fase, respectivamente.

Analisando a Figura 44, pode ser visto que o relé comercial perde a sua referência de tensão e, por este motivo, não fornece o valor da frequência compatível com o valor de referência do ATP. Além disso, novamente é possível observar a tendência discutida anteriormente sobre o algoritmo de Wang & Sun para a estimação de frequência e também nota-se a resposta satisfatória do AG, mesmo demorando um pouco mais de tempo para sua estabilização quando comparada aos casos analisados anteriormente.

Com relação à amplitude, este caso se mostra como o de pior estimação. Este problema pode ser justificado pelo fato da estimação da frequência também ter sido de pior qualidade em comparação com os demais casos. Neste item deve ser enfatizado que mesmo em situações desfavoráveis, as duas metodologias propostas responderam de forma satisfatória a estimação de frequência, a qual é o principal foco do trabalho.

A Figura 46 que responde a estimação de fase continua seguindo o mesmo comportamento ilustrado nos casos anteriores, confirmando a dificuldade de se traduzir concretamente os resultados obtidos individualmente pela estimação de fase.

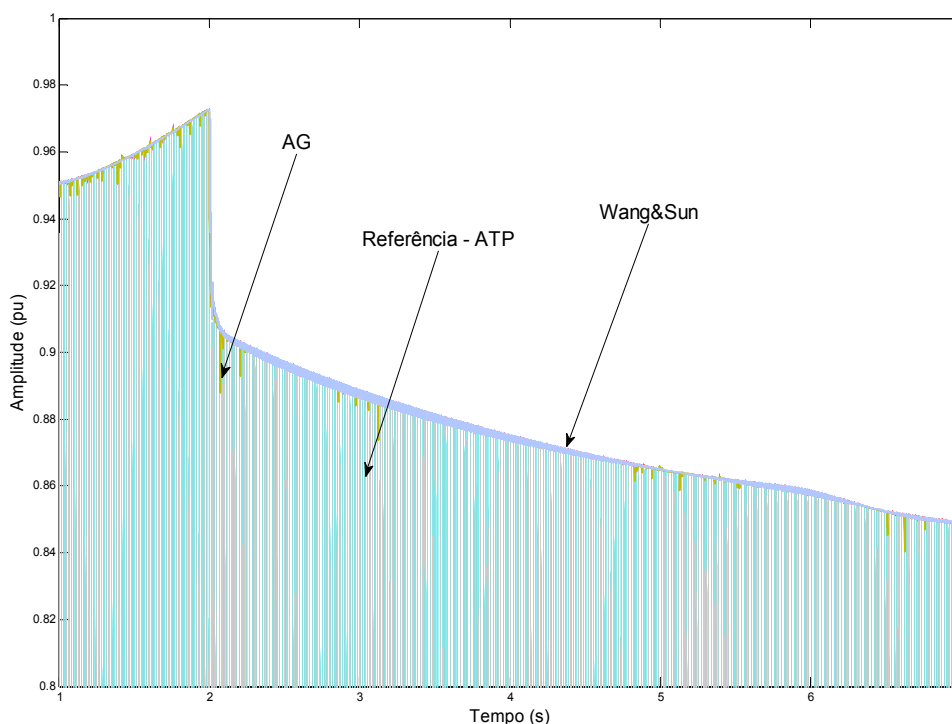


Figura 42: Estimação da amplitude do Sinal IV.

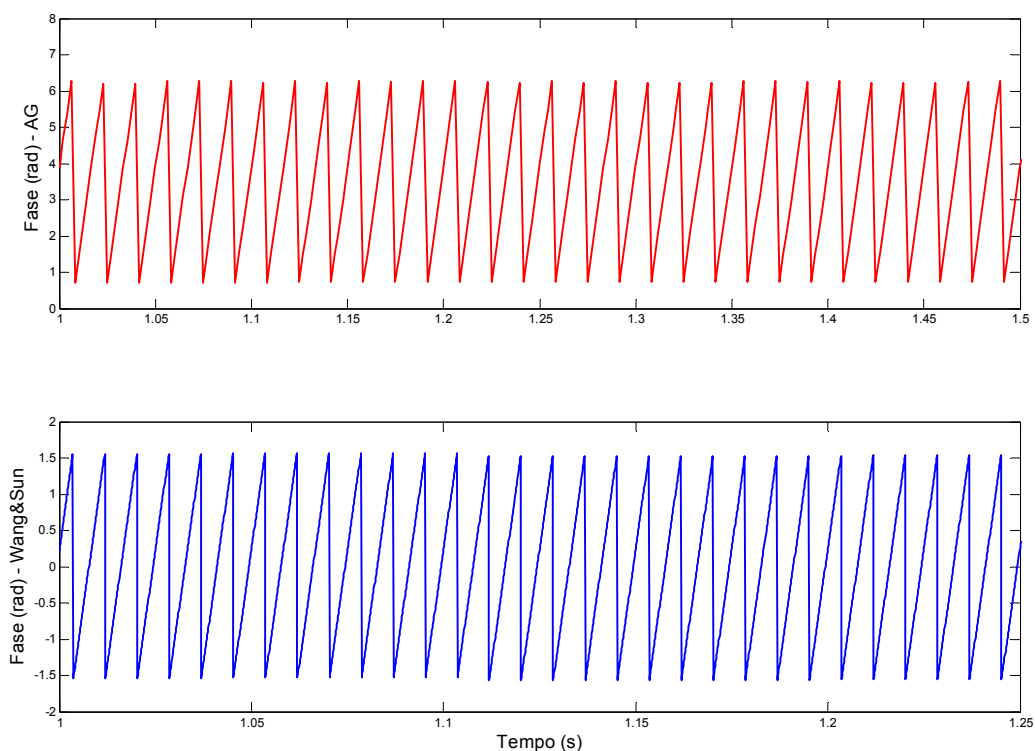


Figura 43: Estimação da fase do Sinal IV.

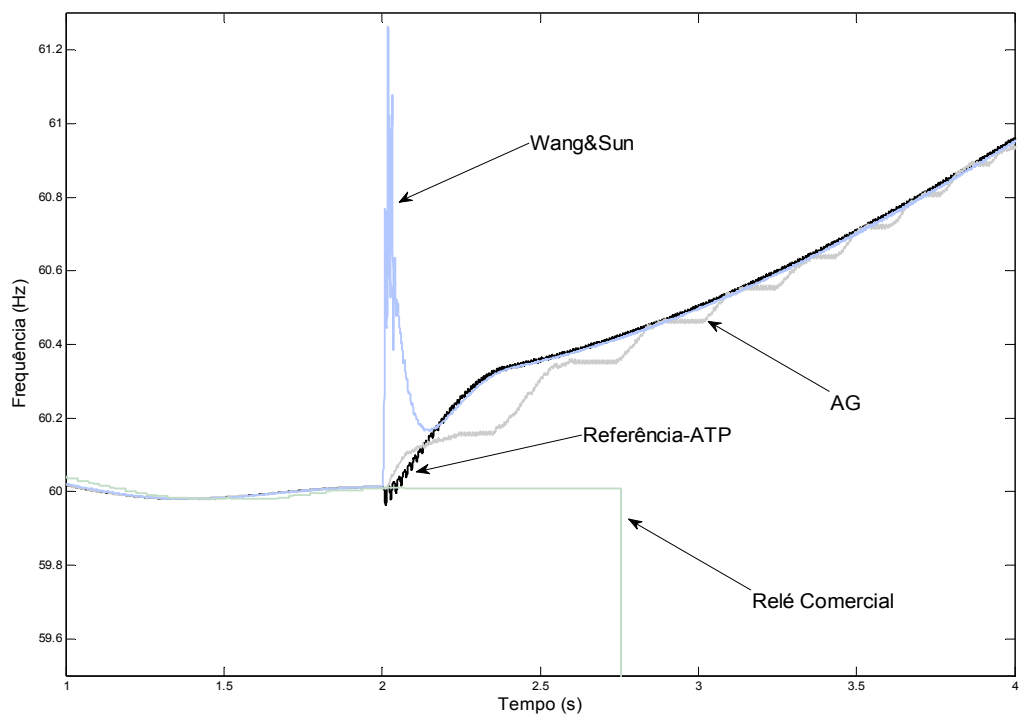


Figura 44: Estimação da frequência do Sinal V.

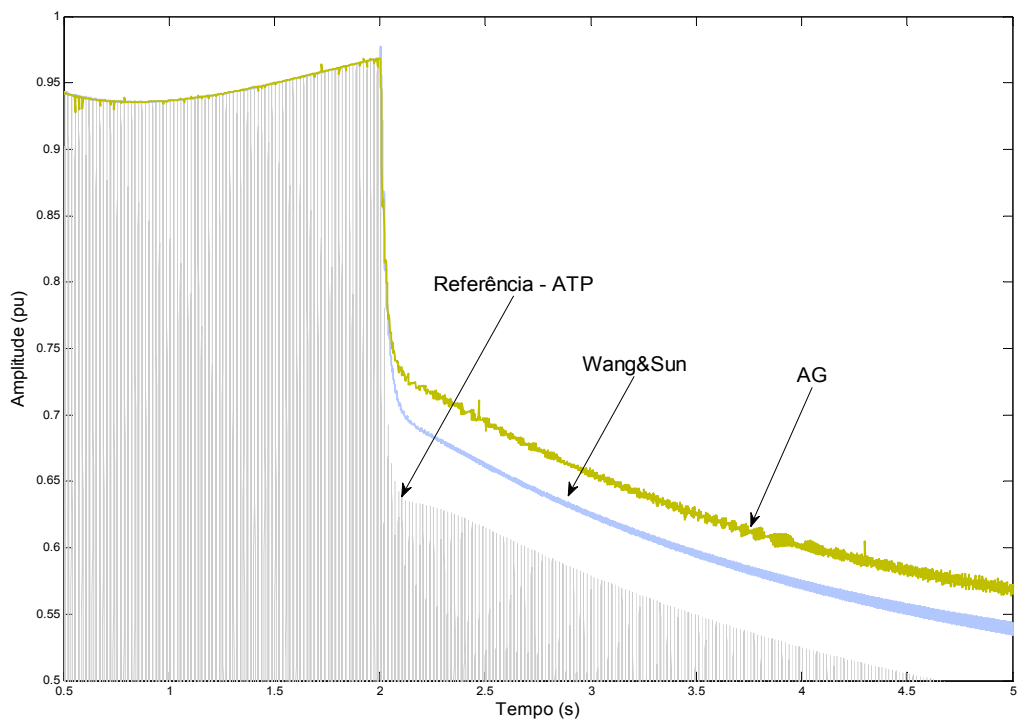


Figura 45: Estimação da amplitude do Sinal V.

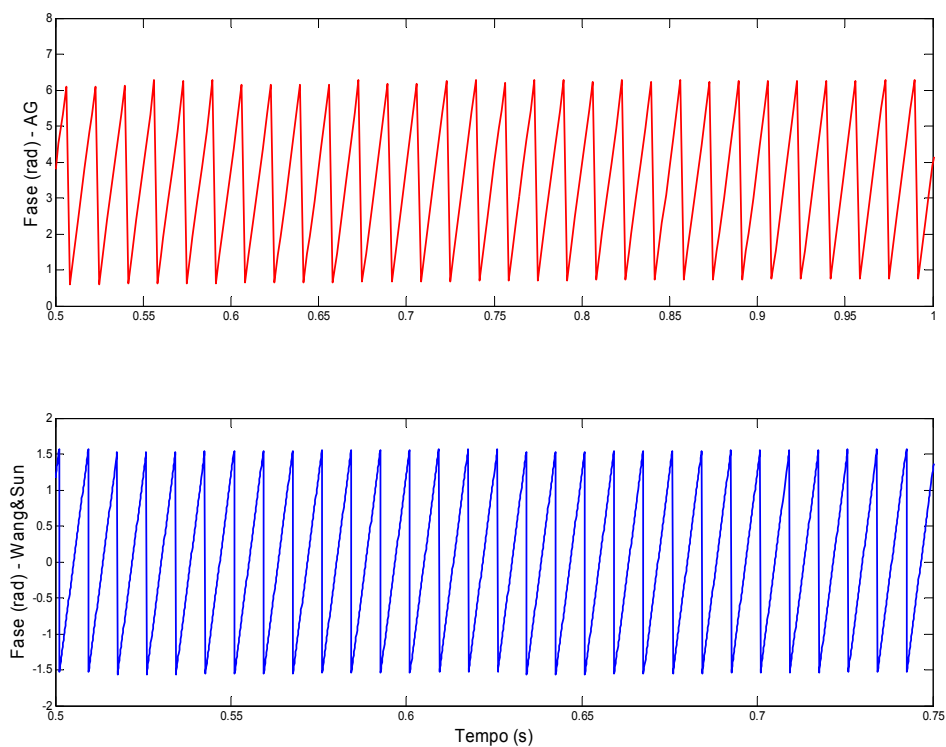


Figura 46: Estimação da fase do Sinal V.

6.3) Análises das metodologias

Com a exposição e análise dos resultados obtidos pelo AG e pela TDF proposta por Wang & Sun a partir das simulações dos casos gerados no SEP, chega-se a etapa final do trabalho, na qual será discutido os prós e contras de cada uma das implementações. Existem quatro aspectos principais sobre os quais foram focadas as conclusões:

- a) Complexidade de implementação;
- b) Tempo de processamento;
- c) Exatidão e precisão das respostas; e
- d) Emprego na estimação em tempo real.

Essas características serão discutidas a seguir e todas as conclusões obtidas são baseadas nas simulações realizadas, considerando todas as características citadas e explicadas na etapa de modelagem.

6.3.1) Complexidade de implementação

A primeira característica a ser analisada está relacionada com o grau de dificuldade em se implementar os algoritmos do AG e da TDF de Wang & Sun em linguagem C, a qual foi utilizada na elaboração deste trabalho.

Analisando o código do algoritmo genético, a primeira observação que se faz é com relação à composição particionada da implementação. Cada uma das etapas do AG (seleção, cruzamento, mutação e cálculo da aptidão) é realizada por uma sub-rotina do programa principal. Assim, fica evidente que apesar dos procedimentos executados pelo algoritmo serem simples, a sua implementação é trabalhosa e requer organização. Partindo desta primeira observação, chega-se a conclusão que o processo executado pelo AG é lógico, desde que se tenha o conhecimento prévio a respeito do funcionamento de trabalho do AG, o qual é baseado na seleção natural e na genética. Portanto, a conclusão que se chega é de que a implementação do AG é simples e trabalhosa.

Por sua vez, a implementação da TDF proposta por Wang & Sun tem característica oposta ao da implementação do AG. Relembrando, os métodos de análise da Transformada de Fourier são utilizados para se realizar a conversão de sinais no domínio do tempo para o da frequência, para que informações que não sejam claras no domínio do tempo sejam visualizadas no domínio da frequência. Assim sendo, o entendimento da teoria de Fourier é mais complexo quando comparado ao funcionamento do AG, o que torna a implementação mais complicada. No entanto, uma vez entendida a teoria e visualizada suas possíveis

aplicações, a implementação é pouco trabalhosa e é formada por um conjunto de definições e fórmulas simples.

A confirmação destas conclusões pode ser claramente observada no tópico de modelagem. Neste tópico é mostrado que a implementação do AG é bastante trabalhosa e requer atenção em toda a organização do programa. Já na implementação do algoritmo de Wang & Sun, é visível a simplicidade da implementação, uma vez que com a sumarização de três passos já é possível resumir a elaboração do algoritmo implementado.

Assim, com a exposição destas idéias, fica clara a oposição entre as metodologias. O AG caracterizado pelo raciocínio lógico simples e implementação trabalhosa e o código de Wang & Sun pela teoria complexa e pelo pouco trabalho durante a implementação.

6.3.2) Tempo de processamento

A próxima característica estudada está ligada ao tempo de processamento das simulações realizadas com as duas metodologias. Antes de entrar nas conclusões, é importante salientar que as simulações foram realizadas sob as mesmas condições de processamento, como, por exemplo, a utilização do mesmo computador exclusivamente para as simulações e a implementação de um mesmo código para a leitura dos arquivos de entrada obtidos a partir do *ATP* para as duas metodologias.

Neste quesito aparece o primeiro problema do algoritmo genético. Pelo fato da natureza iterativa ser intrínseca ao processo, o processamento do AG é bastante demorado e requer um computador bastante eficiente para o seu melhor desempenho. Outro ponto negativo ao AG está no fato do processo executado pelo programa ser realizado em série, ou seja, durante as etapas da avaliação do *fitness*, do cruzamento de indivíduos e de outras etapas do algoritmo, o processo é feito uma vez para cada indivíduo, o que causa um alto tempo de processamento a este modelo. Existem formas de se eliminar estes pontos negativos, como a paralelização entre as atividades independentes executadas pelo programa, o que pode ser realizado com a implementação do algoritmo genético em FPGA (*Field-Programmable Gate Array*), a implementação de parâmetros ótimos (taxa de mutação, tamanho da população) e modificações dos procedimentos (modo de cruzamento, avaliação do *fitness*) a cada aplicação específica.

Já com relação ao algoritmo de Wang & Sun, o tempo de processamento não é um problema. Em sua essência, a Transformada de Fourier é um procedimento extremamente rápido, caracterizado pela integralização de uma função, ou seja, para tempos discretos, pela somatória de uma função. Atualmente, existem códigos criados baseados na

transformada de Fourier extremamente rápidos, como a *Fast Fourier Transform (FFT)*, conhecida em português como a Transforma Rápida de Fourier, que obtém os resultados de forma muito mais rápida que o método tradicional, apresentando um desvio na precisão pouco significativo.

Portanto, neste item fica evidenciado, inicialmente, a vantagem do algoritmo de Wang & Sun quando comparado ao AG. Entretanto, como comentado anteriormente, a implementação do algoritmo genético em *hardware* compatível ao FPGA pode diminuir significativamente o tempo de processamento associado ao AG, o que eliminaria esta desvantagem. Além disso, pode-se realizar um estudo ainda mais profundo sobre os parâmetros e procedimentos do AG de forma que se otimize o tempo de processamento desta implementação.

6.3.3) Exatidão e precisão das respostas

O terceiro critério a ser analisado se refere à qualidade das respostas dadas pelos modelos quanto à exatidão e precisão. Essa característica se apresenta como a mais importante dentro do contexto da comparação, uma vez que sem respostas exatas e precisas não teria lógica a tentativa de evolução do modelo, enquanto que com elas seria totalmente viável desenvolver o modelo, realizando ações como, por exemplo, otimizar a implementação para que se obtenha um menor tempo de processamento.

Com base nos resultados obtidos e gráficos mostrados nos itens 5.1 e 5.2, o AG se mostrou extremamente eficiente na estimação de parâmetros. Em todos os casos analisados, os valores obtidos com o AG nunca se desviaram do sinal de referência de forma significativa, caracterizando a boa exatidão dos resultados, e também não foram observadas variações significativas entre estimações consecutivas e fora do período crítico da estimação, o que mostra a precisão do modelo. É muito importante lembrar que o algoritmo genético implementado foi regularizado com a inclusão do parâmetro H na modelagem, conforme mostrado em 4.3, devido aos problemas encontrados no mesmo quando os dados de entrada da implementação estavam sujeitos a ruídos e harmônicos. A qualidade das respostas obtidas também se deve a esta regularização do algoritmo.

Por outro lado, o algoritmo de Wang & Sun apresentou alguns problemas com relação a este critério. O primeiro problema foi mostrado nos casos do item 6.2 e se refere à baixa qualidade dos resultados relativos a frequência apontados durante o período crítico da estimação. Em todos os casos simulados foram observados picos relativamente distantes dos valores de referência variando de 1% a 2%, o que corresponde a variações de 0,6 e 1,2 Hertz. Para os demais períodos, a estimação da frequência apresentou resultados exatos e

precisos. O segundo problema encontrado se refere à estimação da amplitude. Em três dos casos simulados (5.2.2, 5.2.3 e 5.2.4) ficou claro uma variação entre estimativas consecutivas da amplitude, o que caracteriza uma baixa precisão do modelo. Ao contrário da estimação da frequência, este período de baixa precisão é recorrente durante todo período de simulação dos casos. Finalmente, o último problema visualizado foi que na maioria dos resultados obtidos, mesmo desconsiderando o período crítico, a TDF de Wang & Sun apresentou resultados um pouco piores que o AG.

Desta forma, para o critério julgado mais importante, fica evidenciado a vantagem da metodologia que utiliza o algoritmo genético sobre a que utiliza o algoritmo de Fourier, principalmente quando analisado o período crítico de estimação da frequência e a precisão dos resultados da estimação da amplitude.

6.3.4) Emprego na estimação em tempo real

Por fim, entra-se no último critério de análise das metodologias, o qual analisa a possibilidade da utilização dos modelos apresentados na estimação de parâmetros de sinais elétricos em tempo real.

Ao se pensar objetivamente na estimação de tempo real, duas características que foram anteriormente discutidas ganham grande destaque: o tempo de processamento e a exatidão e precisão das estimações realizadas. Não seria interessante utilizar uma técnica extremamente rápida e que não apresenta uma boa qualidade de exatidão e precisão dos resultados e também seria ineficaz fazer uso de uma metodologia que embora apresente resultados altamente exatos e precisos, não consiga realizar as estimações em um tempo suficientemente pequeno.

É importante lembrar que os dispositivos de proteção devem atuar o mais rápido possível em situações de não-conformidade, para que prejuízos sejam evitados, como a queima de motor, danificação de linhas de transmissão e distribuição e outra infinidade de problemas que podem ocorrer.

Dentro deste contexto, novamente uma oposição entre as metodologias pode ser claramente evidenciada. Conforme discutido anteriormente, o AG apresenta resultados muito eficientes tanto na precisão quanto na exatidão requerida para a estimação em tempo real. No entanto, por ser um modelo iterativo, necessita de um tempo relativamente alto para a estimação em tempo real. Já o algoritmo de Wang & Sun apresenta resultados pouco exatos durante um certo período de tempo para a frequência e resultados pouco

precisos para a amplitude, entretanto é um algoritmo extremamente rápido, características estas que são exatamente opostas ao AG.

O modelo ideal para a medição em tempo real deveria possuir a exatidão e precisão do modelo do AG e a velocidade de estimação do modelo de Wang & Sun. Como isto não é possível, existem duas possibilidades para se concluir sobre a melhor metodologia. A primeira é analisar o que se pode otimizar sobre o processamento do AG e a segunda é estudar alguma ferramenta que pode ser adicionada a implementação do algoritmo de Wang & Sun, como a regularização feita sobre o AG, para se melhorar a exatidão e precisão dos resultados obtidos.

Analisando a primeira possibilidade, é possível pensar em algumas alternativas para se otimizar o processamento do AG. Algumas delas já foram apresentadas no decorrer deste trabalho como a otimização dos parâmetros e da função objetivo do algoritmo e a elaboração de rotinas paralelas de processamento. Já a segunda possibilidade se mostra um pouco mais complicada, uma vez que o processo de regularização requer muito estudo e resultados práticos eficientes para se validar um modelo regularizado, assim como foi feito para o AG.

Por fim, sabe-se que a teoria de Fourier vem sendo amplamente utilizada na área de proteção de sistemas elétricos de potência e seus resultados se apresentam adequados neste contexto. No entanto, este trabalho mostrou um modelo para a estimação de parâmetros de um sinal elétrico baseado em algoritmos genéticos, o qual apresenta resultados extremamente eficientes, contendo uma única limitação relacionada ao tempo de processamento.

Portanto, se houver a possibilidade de se implementar esta metodologia em *hardware* compatível ao FPGA, permitindo o processamento paralelo e, conseqüentemente, diminuição significativa do tempo de processamento associado a esta ferramenta, o modelo proposto baseado em algoritmos genéticos terá vantagens sobre o modelo proposto por Wang & Sun.

Capítulo 7

Conclusões

Este trabalho apresentou inicialmente um desenvolvimento a respeito da teoria envolvida na implementação das duas metodologias apresentadas no mesmo. A primeira envolvendo a utilização de uma técnica inteligente, o Algoritmo Genético, e a segunda baseada no algoritmo proposto por Wang & Sun, o qual tem como fundamentação a teoria de Fourier.

Posteriormente, foi apresentado toda a modelagem desenvolvida para a obtenção do resultados deste trabalho, envolvendo desde as implementações dos algoritmos, do sistema elétrico simulado e dos sinais utilizados na validação, gerados a partir do MatLab, e comparação das metodologias, originários do *ATP*.

Por fim, foram apresentados os resultados obtidos com as metodologias na estimação de parâmetros de um sinal elétrico, considerando situações de não-conformidade do SEP simulado e, a partir destes resultados, foram realizadas análises sobre os prós e contras de cada metodologia.

7.1) Considerações sobre as metodologias apresentadas

A partir dos resultados obtidos com as metodologias para a estimação de parâmetros de um sinal elétrico, é possível concluir que ambas as metodologias apresentaram resultados satisfatórios, tanto na etapa de validação dos modelos, quanto na etapa de comparação entre os mesmos.

É importante destacar que na etapa de modelagem foi implementado um algoritmo genético regularizado, o qual contava com a inclusão de um parâmetro que considera a inércia do sistema elétrico da potência, devido aos problemas encontrados na implementação quando os dados de entrada do algoritmo estavam sujeitos a ruídos e harmônicos. Já o algoritmo de Wang & Sun implementado foi baseado em [5], seguindo os passos sumarizados fornecidos pela referência.

Na etapa de validação das metodologias, foram utilizados sinais sintetizados que não apresentavam à influência de harmônicos e ruídos. Nesta fase, ambos os modelos apresentaram resultados muito eficientes com um pequeno atraso na estimação justificado pelo tempo de leitura do sinal de entrada (meio ciclo para o AG e um ciclo para a TDF), o qual é intrínseco as metodologias.

Com as metodologias validadas, buscou-se avaliar algumas características importantes associadas à área de estimação de parâmetros de um sinal elétrico, como o tempo de processamento e exatidão e precisão dos resultados. Os modelos também foram avaliados do ponto de vista da complexidade de implementação e da possibilidade de utilização na estimação em tempo real.

Os resultados obtidos com o AG se mostraram muito eficientes em termos de exatidão e precisão, no entanto foram falhos quando avaliado do ponto de vista do tempo de processamento necessário para a estimação. Já o algoritmo de Wang & Sun apresentou resultados de forma muito rápida, entretanto com limitações em termos de exatidão, durante o período crítico de estimação da frequência, e precisão, durante toda a estimação da amplitude.

Entretanto, existe a possibilidade de diminuir significativamente o tempo de processamento associado ao algoritmo genético através da sua implementação em *hardware* compatível ao FPGA, o qual possibilita o processamento paralelo dos procedimentos implementados para o AG. Desta forma, o processamento seria otimizado e, conseqüentemente, o tempo associado à estimação dos parâmetros de sinais elétricos não seria mais uma limitação.

Assim, considerando tudo o que foi levantado neste trabalho e todas as possibilidades de evolução dos modelos, é possível concluir que a implementação utilizando o AG está a frente da implementação utilizando a TDF por três fatores importantes. O primeiro se deve ao fato da implementação utilizando AG ser mais eficiente no critério mais importante da estimação, o qual é a precisão e exatidão dos resultados. Em segundo lugar, a implementação do AG em *hardware* compatível ao FPGA pode fornecer resultados de estimação em tempo adequado, tornando esta metodologia ideal sob todos os aspectos. Por fim, as possibilidades de melhoria do algoritmo de Wang & Sun baseado na TDF são desconhecidas, sendo necessário tempo de estudo e testes para validação de possíveis melhorias, como a implementação de alguma função ou procedimento regularizador no algoritmo de Wang & Sun.

7.2) Sugestões para continuidade da pesquisa

Considerando os resultados obtidos neste trabalho, é possível visualizar alguns pontos em que existe a possibilidade de melhorias das metodologias apresentadas e novos horizontes de pesquisa para a continuidade deste trabalho, como:

- a) Discretização do algoritmo genético, visando a sua implementação em FPGA, o que possibilitará a paralelização de processos do algoritmo e, conseqüentemente, otimização do tempo de processamento,
- b) Estudo de formas de regularizar a implementação baseada em Wang & Sun, visando a melhoria dos resultados quanto a exatidão e precisão, e
- c) Elaboração de novas comparações entre o AG e o algoritmo de Wang & Sun com outras metodologias que existam e que futuramente possam surgir, a fim de se fortalecer a qualidade e robustez das implementações apresentadas.

Referências Bibliográficas

- [1] R. Leão, "GTD – Geração, Transmissão e Distribuição de Energia Elétrica", Universidade Federal do Ceará, 2009.
- [2] N. Kagan, C. C. B. Oliveira, E. J. Robba, "*Introdução aos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica*", Edgard Blucher, 1ª Edição, 2005.
- [3] D. V. Coury, M. Oleskovicz, A. C. B. Delbem, E. V. Simões, T. V. Silva, D. Barbosa, "*A genetic based algorithm for frequency relaying using FPGAs*", in Proc. 2009 IEEE PES General Meeting, Calgary CA, pp. 1-6.
- [4] A. G. Phadke, J. S. Thorp, M. G. Adamiak, "*A new measurement technique for tracking voltage phasors, local system frequency, and rate of change of frequency*", IEEE Trans. Power App. Syst., vol. PAS-102, pp. 1025-1038, Maio, 1983.
- [5] M. Wang, Y. Sun, "*A practical, precise method for frequency tracking and phasor estimation*", IEEE Trans. Power Del., vol. 19, pp. 1547-1552, Outubro, 2004.
- [6] P. K. Dash, A. K. Pradhan, G. Panda, "*Frequency estimation of distorted power system signals using extended complex Kalman filter*", IEEE Trans. Power Del., vol. 14, pp. 761-766, Julho, 2004.
- [7] A. Routray, S. K. Pradhan, K. P. Rao, "*A novel Kalman filter for frequency estimation of distorted signals in power systems*", IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 51, pp. 469-479, Junho, 2002.
- [8] V. V. Terzija, M. B. Djuric, B. D. Kovacevic, "*Voltage phasor and local system frequency estimation using Newton type algorithm*", IEEE Trans. Power Del., vol. 9, pp. 1368-1374, Julho, 1994.

- [9] A. K. Ziarani, A. Konrad, "A method of extraction of nonstationary sinusoids", *Signal Processing*, vol. 84, pp. 1323-1346, Agosto, 2004.
- [10] H. Karimi, M. Karimi-Ghartemani, M. R. Iravani, "Estimation of frequency and its rate of change for applications in Power Systems", *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 19, pp. 472-480, Abril, 2004.
- [11] M. S. Sachdev, M. M. giray, "A least error squares technique for determining power systems frequency". *IEEE Trans. Power App. Syst.*, vol. PAS-104, pp. 437-444, Fevereiro, 1985.
- [12] A. K. Pradhan, A. Routray, A. Basak, "Power systems frequency estimation using least mean square techniques", *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 20, pp. 1812-1816, Julho, 2005.
- [13] P. K. Dash, D. P. Swain, A. Routray, A. C. Liew, "An adaptive neural network approach for the estimation of power systems frequency", *Electrical Power Systems Research*, vol. 41, pp. 203-210, Junho, 1997.
- [14] K. M. El-Naggar, H. K. M. Youssed, "A genetic based algorithm for frequency-relaying applications", *Electrical Power Systems Research*, vol. 55, pp. 173-178, 2000.
- [15] S. A. Souza, M. Oleskovicz, D. V. Coury, T. V. Silva, A. C. B. Delbem, E. V. Simões, "FPGA implementation of genetic algorithms for frequency estimation in power systems", in *Proc. 2008 IEEE PES General Meeting*, pp. 1-6.
- [16] S. A. Souza, M. Oleskovicz, D. V. Coury, T. V. Silva, A. C. B. Delbem, E. V. Simões, "An Efficient frequency estimation methodology using genetic algorithms in FPGA", in *Proc. 2007 The 33rd Annual Conf. of the IEEE Industry Electronics Society*, pp. 2020-2025.

- [17] S. A. Souza, "*Algoritmos Genéticos Aplicados À Proteção e Estimação de Harmônicos em Sistemas Elétricos de Potência*", Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.
- [18] D. E. Goldberg, J. H. Holland, "*Genetic Algorithm and Machine Learning: Introduction to the special Issue on Genetic Algorithms*", Machine Learning, 3, 1998.
- [19] T. Back, H. P. Schwefel, "*Evolutionary Computation: An Overview*", Proceedings of IEEE International Conference on Evolutionary Computation, Japão, pp. 20-29, Maio, 1996.
- [20] P. H. Winston, "*Artificial Intelligence*", Vol. 1, Addison Wesley Pub Co., 1992.
- [21] T. Back, "*Selective Pressure in Evolutionary Algorithms: A Characterization of Selection Mechanisms*", The First IEEE Conference on Computational Intelligence Proceedings of the First IEEE World Congress on Computational Intelligence, Vol. 1, pp. 57-62, 1994.
- [22] C. O. Galvão, M. J. S. Valença, "*Sistemas Inteligentes: Aplicações e Recursos Hídricos e Ciências Ambientais*", Porto Alegre, Ed. Universitária, 1999.
- [23] P. S. R. Diniz, E. A. B. da Silva, S. L. Netto, "*Processamento Digital de Sinais*", Bookman Editora, 2004.
- [24] M. B. Joaquim, "*Transformada Discreta de Fourier*", Universidade de São Paulo, São Carlos, pp. 58-67.
- [25] H. W. Engl, M. Hanke, A. Neubauer, "*Regularization of Inverse Problems, Kluwer*", Dordrecht, 2000.
- [26] W. D. Stevenson, "*Elements of Power System Analysis*", McGraw Hill 4th Edition, 1982.
- [27] H. W. Beaty, "*Handbook of electric power calculations*", MacGraw-Hill, 2001.

- [28] W. Freitas, W. Xu, "*False operation of vector surge relay*", IEEE Trans. Power Del., vol. 19, pp. 436-438, 2004.
- [29] EEUG, "*Alternative Transients Program Rule Book*", LEC, 1987.
- [30] D. Barbosa, "*Estimação de Frequência em Sistemas Elétricos de Potência através da Filtragem Adaptativa*", Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.
- [31] A. E. Fitzgerald, C. Kingsley Jr, A. Kusko, "*Máquinas Elétricas*", São Paulo, Editora McGraw-Hill do Brasil, 1975.
- [32] X. Vieira Filho, "*Operation of Power System with Automatic Controls*", Rio de Janeiro, Editora Campus Ltda, 1984.
- [33] R. D. Fuchs, "*Transmissão de Energia Elétrica*", Volume 2, Rio de Janeiro, LTC/EFEL, 1977.
- [34] M. Silva, "*Localização de Falhas em Linhas de Transmissão Utilizando a Teoria de Ondas Viajantes e Transformada Wavelet*", Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

Apêndice A

Dados do Sistema Elétrico

Neste apêndice, os parâmetros do sistema elétrico (Figura 23) utilizado nas simulações deste trabalho são apresentados nas tabelas seguintes. As demais informações dadas sobre o mesmo se encontram no item 5.1.

Tabela 3: Dados do gerador síncrono.

Número de pólos	8
Frequência (Hz)	60
Potência nominal (MVA)	76
Tensão nominal (kV)	13,8
Corrente de campo (A)	250
X_d (p.u.)	1,150
X'_d (p.u.)	0,310
X''_d (p.u.)	0,210
X_q (p.u.)	0,685
X''_q (p.u.)	0,182
T'_{do} (s)	5,850
T''_{do} (s)	0,036
T'_{qo} (s)	0,073
X_o (p.u.)	0,132
Resistência do estator (p.u.)	0,004
Reatância de dispersão (p.u.)	0,175

Tabela 4: Parâmetros do sistema de controle de velocidade

Constante de tempo do servo-motor (T_g)	0,600 s
Tempo de <i>Reset</i> (T_r)	0,838 s
Queda de velocidade transitória (r)	0,279
Queda de velocidade em regime permanente (R)	0,100
Momento de Inércia (M)	1,344 s
Constante de atraso da água (T_w)	0,150 s

A Figura 47 apresenta o diagrama de blocos do sistema de excitação do gerador.

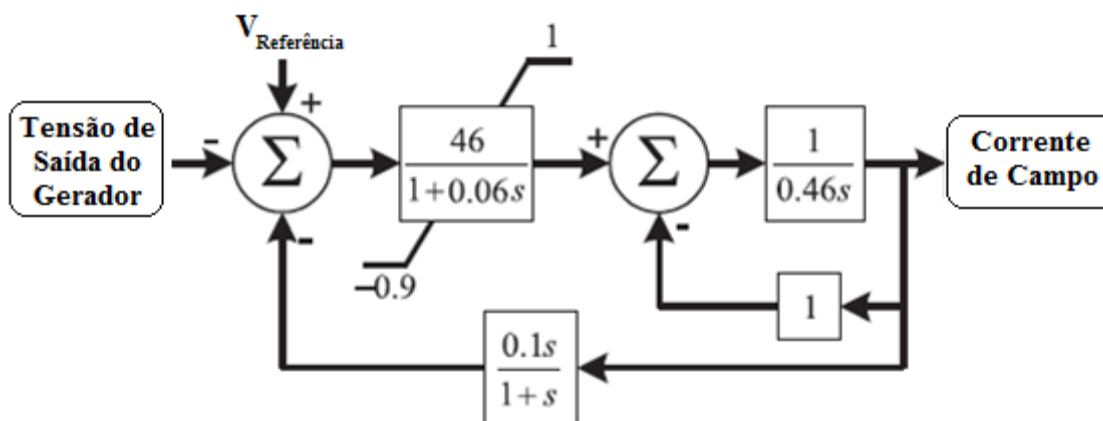


Figura 47: Diagrama de blocos simplificado do sistema de excitação.

Tabela 5: Dados dos transformadores.

Potência Nominal (MVA)	25
Conexão na alta tensão	Triângulo
Tensão nominal do primário (kV)	138
Resistência do primário (Ω)	1,7462
Indutância do primário (mH)	151,37
Conexão do secundário	Estrela com neutro aterrado
Tensão nominal do secundário (kV)	13,8
Resistência do secundário (Ω)	0,0175
Indutância do secundário (mH)	1,514

Tabela 6: Dados da linha de transmissão - condutor de fase.

Condutor de Fase: Cabo Linnet	
Diâmetro externo (mm)	18,313
Resistência CC a 50°C (Ω/m)	0,19017
Raio Médio Geométrico (mm)	7,4
Corrente de campo (A)	250

Tabela 7: Dados da linha de transmissão - cabos de pára-raios.

Cabos Pára-raios: EHS 5-16"	
Raio externo (mm)	8,68
Resistência CC (Ω/m)	5,592

Tabela 8: Dados da linha de transmissão - resistividade do solo e flechas.

Resistividade do Solo ($\Omega.km$)	1000
Flecha - Condutor de Fase (m)	7,5
Flecha - Cabos Pára-raios (m)	6

Tabela 9: Dados das cargas em estrela conectadas ao SEP.

Potência (MVA)	Resistência (Ω)	Indutância (mH)
25,00	7,008192	7,919224
15,00	11,68032	13,19871
10,00	17,52048	19,79806
5,00	35,04096	39,59612

Apêndice B

Divulgação do Trabalho em Artigos Científicos

D. V. Coury, A. C. B. Delbem, J. R. de Carvalho, M. Oleskovicz, E. V. Simões, D. Barbosa, R. D. S. do Prado, T. V. Silva, "A Genetic Based Algorithm for Frequency Relaying using FPGAs" - **Proceedings of 2009 IEEE PES General Meeting, Calgary-Canada** - 2009.