

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS**

ALGORITMOS GENÉTICOS COMPACTOS APLICADOS À ESTIMAÇÃO FASORIAL EM TEMPO REAL

MARCOS VINÍCIUS GALLI CASSEB

ORIENTADOR: Prof. Tit. Denis Vinicius Coury

São Carlos
2012

MARCOS VINÍCIUS GALLI CASSEB

ALGORITMOS GENÉTICOS COMPACTOS APLICADOS À ESTIMAÇÃO FASORIAL EM TEMPO REAL

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
2012

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

G344a Galli Casseb, Marcos Vinícius
Algoritmos Genéticos Compactos Aplicados à
Estimação Fasorial em Tempo Real / Marcos Vinícius
Galli Casseb; orientador Denis Vinicius Coury. São
Carlos, 2012.

Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica com
ênfase em Sistemas de Energia e Automação) -- Escola de
Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo,
2012.

1. Estimação Fasorial. 2. Algoritmos Genéticos. 3.
Sistemas Elétricos de Potência. 4. Alternative
Transient Program. I. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Nome: Marcos Vinícius Galli Casseb

Título: “Algoritmos Genéticos Compactos Aplicados à Estimação Fasorial em Tempo Real”

*Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado
em 29/11/2012,*

com NOTA 9,0 (nove,zero) pela Comissão Julgadora:

Prof. Titular Denis Vinicius Coury (Orientador)
SEL/EESC/USP

Prof. Dr. José Carlos de Melo Vieira Júnior
SEL/EESC/USP

Prof. Dr. Mário Oleskovicz
SEL/EESC/USP

Coordenador da CoC-Engenharia Elétrica – EESC/USP:
Prof. Associado Homero Schiabel

Dedicatória

Dedico este trabalho ao meu avô Augusto Coghi.

Agradecimentos

Acima de tudo a Deus, por privilegiar uma vida repleta de amor e sucesso.

Aos meus pais, Marcos e Márcia, pois não há palavras para descrever o amor, o carinho, o respeito e o apoio que sempre recebi durante todas as fases da minha vida.

Aos meus irmãos, Diego e Gabriele, por sempre estarem ao meu lado durante todas as conquistas e por todo amor fraternal.

À minha namorada, Marina, por todo amor, carinho e dedicação, além de sempre ser uma fiel companheira, dividindo todos os maus e bons momentos que vivenciei.

Ao professor Denis Vinicius Coury, pela confiança que sempre teve em meu trabalho, pela atenção e disposição, além de toda contribuição para meu crescimento intelectual e profissional.

Aos professores Mário Oleskovicz e José Carlos de Melo Vieira Júnior, por todos ensinamentos e conselhos durante toda a graduação e, em especial ao Mário, por ter me aberto as portas ao LSEE.

Aos meus tios, em especial, Isabel Cristina e Luis Cláudio, que sempre me incentivaram o crescimento pessoal e profissional.

Aos meus avós, Augusto, Neusa e Edmar, por todo o amor e preocupação durante toda minha vida.

Ao Raphael Philipe Mendes da Silva e Renato Monaro, que sempre estiveram ao meu lado sanando todas as dúvidas que surgiam no decorrer deste trabalho.

Ao Vinicius Cover, por me auxiliar em todas decisões profissionais, bem como no empréstimo de todo seu material de graduação.

Ao Fabricio Silva Pires de Camargo pela amizade e companheirismo, por todas discussões e descontrações durante toda graduação.

Ao Diego Martins, Rafael Menezes e Vinícius Gibertoni pelas cervejas e risadas durante todo o período de estágio.

Aos amigos Edson, Leonardo, Gustavo, Bruno (Toyo), Pedro Jean, Thiago Cardoso, Guilherme (Régis), Diego Barros, André Antunes, Rafael (Mil), Gabriel Rogatto, entre outros, pelas alegrias e conquistas compartilhadas.

À todos professores e funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica (SEL), da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) que de alguma forma contribuíram para a elaboração deste trabalho.

Sumário

Dedicatória.....	v
Agradecimentos	vii
Resumo.....	xi
Abstract.....	xiii
1. Introdução	1
1.1. Objetivos do trabalho	2
1.2. Estrutura do trabalho.....	2
2. Revisão Bibliográfica.....	5
2.1. Histórico da Medição Fasorial	5
2.2. Importância da Medição Fasorial Sincronizada	7
2.3. Norma IEEE C37.118-2005	8
2.4. Algoritmo Proposto.....	9
3. Algoritmos Genéticos	11
3.1. Seleção.....	11
3.2. Cruzamento	12
3.3. Mutação	14
3.4. Estrutura geral de um AG.....	14
3.5. Algoritmos Genéticos Compactos	15
4. Simulações de Sistemas Elétricos de Potência.....	17
4.1. O <i>software</i> ATP	17
4.2. Sistema proposto	19
4.2.1. Reguladores.....	20
4.2.2. Componentes do Sistema	22
4.3. Simulações realizadas	23
5. Aplicação em Estimação Fasorial.....	27
5.1. Modelagem do AG	27
5.1.1. Função de avaliação e indivíduos	27
5.1.2. Características do AG	28
5.2. Algoritmos Clássicos	29
5.2.1. Transformada Discreta de Fourier.....	30
5.2.2. <i>Phase-locked Loop</i>	32
6. Resultados da Aplicação em Estimação Fasorial	35
6.1. Aplicação em dados sintéticos	35
6.2. Aplicação no Sistema Elétrico Simulado	41

6.2.1.	Entrada de Carga	42
6.2.2.	Saída de Carga.....	44
6.2.3.	Ilhamento do Sistema 2	45
6.2.4.	Ilhamento Sistema 3	47
6.2.5.	Retirada da Unidade de Geração 2.....	48
6.2.6.	Retirada da Unidade de Geração 3.....	49
7.	Implementação do AGc em <i>Hardware</i>	51
7.1.	<i>Field-Programmable Gate Array</i>	51
7.2.	Considerações para a Implementação em FPGA	51
7.2.1.	Geração de Sequências Pseudoaleatórias	52
7.2.2.	Máquina de Estados do Algoritmo Genético Compacto	53
7.2.3.	Implementação da Função Trigonométrica Seno	54
7.2.4.	Forma de Avaliação da Função Objetivo.....	54
7.3.	Arquitetura proposta	55
7.4.	Resultados obtidos	57
7.4.1.	Ilhamento de subsistema	57
7.4.2.	Entrada de Carga	61
7.4.3.	Situação de Falta Sustentada na Linha de Transmissão.....	63
8.	Conclusões.....	65
	Referências Bibliográficas.....	67

Resumo

Casseb, M. V. G. – **Algoritmos Genéticos Compactos Aplicados à Estimação Fasorial em Tempo Real**. 2012. 69 pg. Trabalho de Conclusão de Curso – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

Este trabalho apresenta o estudo dos Algoritmos Genéticos (AGs) para a Estimação Fasorial em Sistemas Elétricos de Potência (SEP). Os fasores são de grande utilidade para a análise de SEP em regime permanente por caracterizar a corrente e a tensão e, neste trabalho, a estimação fasorial é formulada como um problema de otimização, cuja função a ser otimizada visa diminuir o erro entre o fasor a ser estimado e os valores reais do SEP. Para solucioná-lo é utilizado o AG, um algoritmo evolutivo de busca e pesquisa aplicado a problemas de otimização e que tem se mostrado muito eficiente para este propósito. O AG aplica operadores baseadas na evolução das espécies, como seleção, mutação e *crossover* em uma população, que representa um conjunto de soluções possíveis, aleatoriamente inicializadas. A aplicação sucessiva destes operadores faz a população convergir para solução ótima do problema. Neste trabalho, Algoritmos Genéticos serão utilizados como ferramenta para a estimação fasorial e serão implementados em *software* e em *hardware* através de uma FPGA (*Field Programmable Gate Array*), visando diminuir o tempo de estimação para que seja possível aplicá-lo em tempo real. Para validação do algoritmo proposto, serão utilizados dados utilizados obtidos através de simulações realizadas com o auxílio do *software Alternative Transient Program* (ATP) e também comparações com algoritmos clássicos, como a Transformada Discreta de Fourier (TDF) e o *Phaselocked Loop* (PLL). Os resultados apresentados mostram a eficácia e alta velocidade do AG como ferramenta na estimação fasorial.

Palavras chaves: Sistemas Elétricos de Potência, Estimação Fasorial, Algoritmos Genéticos, *Alternative Transient Program*.

Abstract

Casseb, M. V. G. – **Compacts Genetics Algorithms Applied in Real-time Phasor Measurement** . 2012. 69 pg. Trabalho de Conclusão de Curso – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

This work presents a study of Genetic Algorithms (GAs) for Phasor Estimation in Electric Power Systems (EPS). Phasors are very useful for EPS analyzes in steady state and, in this work, the phasor estimation is formulated as an optimization problem and the function to be optimized is the error between the estimate and the actual values of the EPS. To solve it, an evolutionary algorithm applied in optimization problems was used and that has proven to be very effective for this purpose. The GA applies operators based on the evolution of species, such as selection, mutation and crossover in a random population, which represents a set of possible solutions randomly initialized. The successive application of these operators make the population converge to an optimal solution of the problem. In this work, Genetic Algorithms are used as a tool for phasor estimation and will be implemented in software and hardware through an FPGA (Field Programmable Gate Array) in order to decrease the processing time, making possible its application in real time. To validate the algorithm, the GA will be applied in data obtained through simulations performed in the software Alternative Transient Program (ATP) and the result will be compared with classical algorithms such as Discrete Fourier Function (DFT) and Phaselocked Loop (PLL). The results show that GA has great effectiveness and high speed in phasor estimation.

Keywords: Electric Power Systems, Phasor Estimation, Genetic Algorithm, Alternative Transient Program.

1. Introdução

Em 1885, foi instalado nos Estados Unidos o primeiro sistema de distribuição de energia elétrica com a utilização de corrente alternada para alimentar 150 lâmpadas. Desde então, a energia elétrica tem se tornado cada vez mais uma necessidade na sociedade moderna e, atualmente, o homem demanda uma grande quantidade de energia para a sua sobrevivência e seu bem-estar.

O contínuo crescimento da população mundial aliado com uma maior necessidade do fornecimento de energia elétrica em toda a extensão territorial ocasionou a criação de uma gigante malha de rede elétrica, chamada hoje de Sistema Elétrico de Potência (SEP).

Os SEPs têm a função de gerar, transmitir e distribuir a energia elétrica para toda população. Considerando o aumento da demanda da energia elétrica, intrínseco ao avanço da tecnologia, os SEPs estão sempre em expansão e operando cada vez mais perto de sua capacidade máxima. Porém, ao mesmo tempo em que há o aumento da demanda, é preciso também aumentar a confiabilidade no fornecimento de energia elétrica. Dessa forma, é crucial a utilização de um sistema de monitoramento que possibilite a correta medição, controle e proteção do sistema elétrico.

É nesse contexto que foi introduzida a medição sincronizada de fasores em meados da década de 1980. Desde então, a medição de parâmetros dos sinais elétricos de tensão e corrente nos sistemas elétricos de potência de barramentos relativamente distantes entre si, tem recebido atenção considerável de pesquisadores [1]. Essas medições são realizadas pelas unidades de medição fasorial, ou PMUs (do inglês *Phasor Measurement Unit*), sincronizadas através de satélites do Sistema Global de Posicionamento (GPS – *Global Positioning System*).

As medições sincronizadas em pontos separados por longas distâncias não são questões triviais. No início, na tentativa de obter uma sincronização precisa, foram utilizados métodos como micro-ondas, ondas AM e linhas dedicadas. Porém estes métodos não forneceram a precisão desejada, com erros de sincronização inferiores a 1 microssegundo. O emprego de fibra-ótica pode resolver o problema da sincronização, especialmente se esta for inteiramente dedicada para este propósito. No entanto, o elevado custo torna inviável a utilização destas fibras dedicadas. Somente com a utilização de sinais advindos de satélites do GPS é que as medidas puderam ser sincronizadas com erros menores que 1 microssegundo, num processo

economicamente viável.

Os fasores são ferramentas básicas de análise de circuitos de corrente alternada (CA), usualmente introduzidos para representação em regime permanente da forma de onda senoidal fundamental do SEP. Porém, mesmo que o sistema não esteja completamente em regime permanente, os fasores são úteis na descrição de seu comportamento [2]. A importância da medição fasorial sincronizada pode ser evidenciada com os quatro próximos exemplos de aplicações [3]: monitoramento do SEP, controle avançado, proteção avançada de redes e validação de modelos computacionais.

Visando uma padronização das PMUs, o *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) lançou em 1995 a norma 1344-1995, que posteriormente veio a ser revisada e atualizada na atual norma C37.118-2005. Conforme [4], esta norma define convenções para a realização de medições fasoriais, fornece um método para avaliar a precisão das medições e define requerimentos de desempenho em condições de estado permanente, porém não especifica o método de medição fasorial de uma PMU [5]. Desta forma, pode-se utilizar inúmeros métodos para efetuar essa medição, desde que o método utilizado esteja em conformidade com as determinações do IEEE.

1.1. Objetivos do trabalho

Neste contexto, este trabalho possui como objetivos propor o Algoritmo Genético como ferramenta na estimação fasorial em uma PMU. Para tal finalidade, será implementado o AG em *software*, bem como a sua versão compacta (Algoritmo Genético Compacto, AGc) e por fim a implementação do AGc em *Field Programmable Gate Array* (FPGA), que é um circuito integrado dedicado.

Os algoritmos propostos serão aplicados aos testes sugeridos na norma C37.118-2005 para verificação de sua eficiência dentro dos limites estabelecidos, bem como a dados obtidos através da simulação de um SEP no *software Alternative Transient Program* (ATP).

1.2. Estrutura do trabalho

Primeiramente, é importante evidenciar como o estudo do AG como ferramenta para a estimação fasorial será abordado. O Algoritmo Genético será implementado em *software* através da linguagem de programação C++, tanto na sua forma tradicional quanto em sua forma compacta, visando uma futura implementação em *hardware*.

Serão aplicados casos sintéticos citados na norma C37.118 com a finalidade de validar a estimação fasorial do algoritmo proposto e depois serão aplicados casos obtidos através do SEP simulado via ATP. Para fins de comparação, também serão implementados outros métodos capazes de realizar a estimação fasorial. Posteriormente, serão apresentados os resultados e o Algoritmo Genético em sua versão compacta será implementado em FPGA (*Field Programmable Gate Array*) e serão aplicados casos simulados no *software* ATP para verificar sua resposta.

Para apresentar o trabalho conforme descrito anteriormente, o mesmo foi dividido em 9 capítulos. O Capítulo 1 tem por finalidade introduzir o assunto discutido, através de uma breve introdução histórica, evidenciando o desenvolvimento dos SEPs e dos PMUs, a norma C37.118-2005 definida pelo IEEE e propondo o Algoritmo Genético como ferramenta nas unidades de medição fasorial. O segundo capítulo tem o objetivo de levantar os principais trabalhos relevantes a esta pesquisa, abordando também outros métodos de realizar a estimação fasorial. A introdução e explicação sobre o Algoritmo Genético e seu funcionamento são descritos no Capítulo 4. Para testar o algoritmo proposto, foi utilizada uma simulação de um SEP, através do *software* ATP, que será abordada no Capítulo 5. No Capítulo 6, será apresentado o modelo do AG aplicado em estimação fasorial e os outros métodos implementados para fins de comparação. Os resultados desses algoritmos serão apresentados no Capítulo 7. No Capítulo 8, será abordada a implementação do Algoritmo Genético em *hardware*, com todas suas considerações e a apresentação dos resultados. Por fim, o Capítulo 9 contém as conclusões obtidas durante o desenvolvimento deste trabalho.

2. Revisão Bibliográfica

Nesta seção, será abordado o conceito de fasores, medição fasorial sincronizada, a história referente a esta tecnologia e também sua importância, para fornecer conceitos necessários para um melhor entendimento deste trabalho e de seus resultados, além de trabalhos relevantes para o desenvolvimento da atual pesquisa.

2.1. Histórico da Medição Fasorial

Fasores são ferramentas básicas de análise de circuitos CA (corrente alternada), utilizados como representação das formas de ondas senoidais da tensão e da corrente em regime permanente na frequência nominal do sistema. Porém, até mesmo quando o sistema não está em regime permanente, os fasores são úteis na descrição do comportamento do sistema. Por exemplo, quando um sistema está sofrendo oscilações eletromecânicas, as formas de ondas da tensão e da corrente não estão em regime permanente e nem a frequência se encontra na frequência nominal. Nessas condições porém, as variações de tensão e de corrente são lentas, podendo ser representadas como vários intervalos de regime permanente, fazendo com que os fasores sejam úteis também [2]. Mesmo quando há variações rápidas na forma de onda, como a abertura de uma linha de transmissão através da atuação do sistema de proteção, a tentativa de rastreamento de tal variação por um estimador fasorial já fornece informações úteis para caracterizar o sistema.

A importância da medição de fasores sempre foi reconhecida, porém foi necessária uma crise no mercado de energia elétrica para que intensificassem as pesquisas sobre medidores de fasores e sua utilização e implementação nos SEPs. Esta crise foi o blecaute no nordeste dos Estados Unidos em 1965 [1]. Desde então, os esforços na procura de uma PMU economicamente viável e eficiente para monitorar todo o sistema foram intensificados, e diversas metodologias começaram a ser estudadas. Os estimadores pesquisados e já conhecidos na época eram capazes de fornecer dados em tempo real, porém o maior potencial referente a utilização dos fasores é quando utiliza-se medições sincronizadas em diversos pontos do SEP. E, com a tecnologia disponível, não era possível realizar a sincronização das medições entre PMUs alocados em regiões muito distantes entre si com erros aceitáveis. Para uma boa sincronização, o erro deve ser inferior 1 microssegundo, pois tal erro corresponde a $0,021^\circ$ em um sistema elétrico cuja frequência seja 60 Hz, tal precisão é ideal para medições de frequência das correntes e tensões [1].

O poder computacional existente na época da intensificação da pesquisa sobre PMUs não era tão grande e economicamente acessível como é no dia de hoje. Mesmo assim, foram realizadas grandes pesquisas para desenvolver algoritmos que realizassem a estimação fasorial com a finalidade proteger os equipamentos do sistema elétrico. Uma dessas pesquisas foi o desenvolvimento do SCDR (*Symmetrical Component Distance Relay*) para a proteção das linhas de alta tensão. Com o avanço da computação juntamente com outras áreas da engenharia, este algoritmo mostrou seu verdadeiro potencial, permitindo a localização de faltas de forma precisa e rápida, permitindo que as medidas pudessem ser sincronizadas através do sistema de potência, visando uma melhor proteção do sistema [1].

O avanço computacional possibilitou o aumento significativo na velocidade de execução do algoritmo SCDR, o que trouxe uma nova ambição aos engenheiros da época: sincronizar os dados fornecidos pelas diversas unidades implementadas. Não é uma tarefa trivial realizar a sincronização de pontos que estão separados por grandes distâncias. Para realizar este feito, estudou-se a utilização de micro-ondas, ondas de rádio AM e outros métodos normalmente utilizados para a comunicação à distância, porém nenhum desses métodos forneceu a precisão necessária [2]. Fibras óticas dedicadas cumpriram os requisitos desejados, porém é financeiramente inviável a instalação de fibras óticas exclusivamente para este propósito, e a utilização de um canal de fibra ótica compartilhado também não permitiria a precisão desejada. Por fim, estudou-se a utilização do GPS (*Global Positioning System*), que depois de várias melhorias em seu sistema, permitiu uma precisão de 1 microssegundo em qualquer local da Terra [2].

Com o sistema de sincronização definido, bastava então o desenvolvimento completo das unidades de medição fasoriais. A partir do algoritmo SCDR, a equipe de pesquisa da *Virginia Tech* desenvolveu o primeiro protótipo em 1988, o que permitiu o começo da fabricação comercial dos PMUs [1]. Com o tempo, eles foram recebendo melhorias, como o aprimoramento da interface com o usuário, um receptor interno de GPS, entre outros avanços. Também foi desenvolvida uma central de dados, capaz de colher informações de vários PMUs, compará-las e armazená-las em um único local. Neste período, também foi criada a norma IEEE 1344-1995 que definia o formato de saída dos PMUs, um grande avanço para o futuro estudo dos fasores sincronizados, agora chamados de sincrofasores. Esta norma seria futuramente substituída pela atual norma IEEE C37-118-2005.

As primeiras instalações dos PMUs ocorreram nos próprios locais de pesquisa e estudos. Com o modelo comercial já sendo fabricado, começou-se então a instalação

dos PMUs no sistema elétrico de potência dos EUA e do mundo todo. O número de PMUs instalados já estava na ordem de centenas de unidades na década de 90.

2.2. Importância da Medição Fasorial Sincronizada

A função do sistema elétrico de potência é de gerar, transmitir e distribuir a energia elétrica com confiabilidade, segurança, qualidade e economia. Para alcançar estas qualidades, é necessário obter informações sobre os diversos parâmetros em vários pontos do sistema. Quanto melhor for o método de análise das condições do sistema, melhor será a qualidade do serviço prestado

Os sistemas de energia elétrica vêm experimentando situações de operações críticas até então não presenciadas, devido ao constante aumento da demanda energética, a escassez de recursos financeiros para grandes investimentos e restrições técnicas e ambientais [13].

Neste cenário, está inserida a medição fasorial sincronizada. Os Sistemas de Medição Fasorial Sincronizada (SMFS) são uma das formas mais recentes de monitoramento de SEPs e poderão trazer significativas melhorias para o sistema como um todo. E esta é a grande importância dos SMFS. Com a medição fasorial sincronizada é possível conhecer simultaneamente dados de pontos cruciais do sistema. E a possibilidade de tê-los simultaneamente e centralizados, torna os PMUs uma ferramenta muito poderosa para o monitoramento do sistema, como pode ser observado pelas aplicações citadas abaixo [7] :

- Monitoramento de um SEP: um dos mais importantes elementos de um sistema de gerenciamento de energia é a estimação de estados de um SEP através de medições em tempo real;
- Proteção Avançada de Redes: da teoria de proteção, sabe-se que a lógica diferencial tornou-se o principal meio de proteção para os grandes transformadores de potência e também para quase todos os sistemas onde a saída de corrente se encontra relativamente próxima à entrada [14];
- Controle Avançado: dispositivos controladores como *Static VAR Compensators* (SVC's), estabilizadores, etc. São projetados para atuar no SEP, de tal forma que otimizem uma função objetiva. Desde que os fenômenos a serem controlados sejam definidos em função de variáveis de barramentos distantes do sistema, a medição sincronizada oferece a oportunidade de buscar essas medidas “remotas” para o controlador.

- Um último, mas não menos importante exemplo de aplicação de PMUs citado aqui, consiste na verificação da modelagem dos sistemas de transmissão e geração através da comparação com os dados dos sistemas reais [5].

2.3. Norma IEEE C37.118-2005

A norma IEEE que rege requisitos e especificações relacionados à medição fasorial sincronizada é a C37.118-2005 [15]. Ela substituiu a antiga IEEE 1344 e foi publicada em Abril de 2006.

Esta norma define basicamente quatro aspectos sobre a utilização dos PMUs: a convenção das medidas, como determinar a precisão das mesmas, exigências para desempenho em regime permanente e o formato de comunicação para transmissão em tempo real. Algumas definições feitas pela C37.118-2005 extrapolam o escopo deste trabalho, portanto, serão melhor descritos apenas os aspectos relevantes à pesquisa. Um dos pontos mais importantes da norma é que ela não define qual deve ser o algoritmo utilizado pela Unidade de Medição Fasorial, apenas faz exigências quanto a sua precisão e velocidade.

Em relação as convenções, define-se que o PMU deve ser capaz de fornecer de 10 a 30 relatórios por segundo. Os relatórios devem iniciar no começo de cada segundo (xx,00000 s) e serem igualmente espaçados até o fim do segundo. Independente de qual for o algoritmo utilizado, ele deverá fornecer uma estimativa da frequência e também a taxa de variação da mesma. Além disso, a norma estipula como deve ser calculada a precisão das medidas e também o limite de erro permitido. Ela define a precisão como a diferença vetorial entre o valor medido e o valor real (ideal) do valor do fasor em um dado instante de tempo. Esta diferença é chamada de erro vetorial total (TVE, *total vector error*).

O TVE é obtido através da seguinte equação:

$$TVE = \frac{|X_{medido} - X_{ideal}|}{|X_{ideal}|}$$

em que X_{medido} é o fasor estimado pelo PMU e o X_{ideal} é o valor do fasor teórico no sinal de entrada. Para o cálculo do TVE, admite-se que a magnitude, o ângulo e a frequência sejam constantes no período amostrado. A norma exige que o valor deste erro seja menor do que 1%.

Outro ponto importante, é que a norma não especifica o desempenho do PMU em estados transitórios. Ela apenas exige que o PMU especifique qual o tempo

necessário para a estimação fornecida voltar a possuir TVE menor do que 1% após passar por situações transitórias.

Em seu anexo G, ela sugere 3 testes para verificar o desempenho do PMU em regime transitório e, portanto, poder estipular quanto tempo ele leva para possuir erro dentro dos limites. Seguem os testes:

- 1) Degrau de amplitude de 10% da magnitude (0,1 pu)
- 2) Degrau de 90° na fase
- 3) Degrau de 5 Hz na frequência.

Os três testes se baseiam na aplicação de um degrau, ou seja, uma variação instantânea em algum dos parâmetros fasoriais. Em um dos casos propostos pela norma, um degrau de 5 Hz na frequência é a alteração instantânea da frequência em um valor de 5 Hz. Estes testes possuem a finalidade de verificar a resposta do algoritmo a ser utilizado na estimação fasorial frente à uma variação em qualquer um de seus parâmetros.

2.4. Algoritmo Proposto

Como evidenciado anteriormente, a norma não especifica qual algoritmo deve realizar a estimação fasorial. Devido a este fato, foram estudados e elaborados diversos algoritmos capazes de realizar tal estimação com eficiência. El-Naggar *et. al.* [6] propuseram a utilização de AGs em problemas de estimação em SEPs, , em uma das publicações pioneiras sobre o tema, principalmente para aplicações em relés de frequência. Apesar da possibilidade do AG fazer a estimação da amplitude e da fase, neste trabalho, os AGs visam prioritariamente realizar o rastreamento da frequência em um SEP, ou seja, o principal foco do trabalho é a estimação da frequência.

Em [7], Coury e de Carvalho *et. al.* apresentam um algoritmo genético para a estimação fasorial e também para o rastreamento de frequência. Os resultados desta implementação do AG mostram a extrema adequabilidade da metodologia utilizada, apresentando inclusive um protótipo de uma Unidade de Medição Fasorial (PMU) baseada no AG implementado em uma plataforma FPGA.

Delbem *et. al.* [8] utilizam o AG para estimação fasorial afirmando que este algoritmo possui, além de baixo erro em suas estimações, uma maior imunidade contra ruídos presentes nos dados de medição quando comparados com métodos tradicionais. Além disso, para a utilização em tempo real, também estuda a implementação em FPGA, devido ao aumento da velocidade de processamento através do paralelismo

fornecido pela implementação em *hardware*.

Em [9], Coury *et. al.* também estudam a implementação de AG em plataformas FPGA, mostrando mais uma vez a eficiência do AG aliado à velocidade de uma implementação em *hardware*. É explicado o princípio de funcionamento do algoritmo genético e do FPGA, tornando esse trabalho de grande influência para a realização e desenvolvimento desta atual pesquisa.

Entre os outros métodos conhecidos por também realizar a estimação fasorial, Maohai Wang e Yuanzhang Sun [10] apresentam um algoritmo que utiliza a transformada discreta de Fourier (*Discrete Fourier transform*, DFT) para rastreamento da frequência e estimação fasorial. O grande diferencial deste método é que, além de preciso, ele é muito simples, pois se baseia em um conjunto definido de somatórias e multiplicações. Além disso, em [11], Wang e Sun apresentam um método para melhorar a estimação fasorial realizadas por algoritmos baseados em DFT. Este algoritmo, através do método descrito nesse artigo, será implementado neste trabalho para servir de comparação para o Algoritmo Genético. A principal limitação do DFT é a precisão do algoritmo em casos em que a frequência do sinal amostrado está distante da frequência nominal do sistema.

Em [12], Karimi-Ghartemani *et. al.* propõem a utilização de um algoritmo baseado em PLL (*Phase-locked Loop*) para a estimação fasorial e rastreamento de frequência. PLL é basicamente um filtro projetado através do gradiente da função a ser analisada. Por ser um filtro, ele é de simples implementação e os resultados apresentados nesse trabalho mostram que, apesar de sua simplicidade, ele fornece bons resultados nos casos aplicados. Porém, por ser um método recursivo, este algoritmo apresenta um alto tempo de recuperação em casos de estados transitórios no SEP.

Neste trabalho é proposto a continuidade do estudo do Algoritmo Genético como ferramenta de um PMU na estimação fasorial em Sistemas Elétricos de Potência, pois seu desempenho nos casos estudados mostram que este algoritmo é uma alternativa viável aos algoritmos clássicos. Para fins comparativos, também serão implementados estimadores fasoriais que utilizam outros métodos, como a Transformada Discreta de Fourier, (*Discrete Fourier Function*, DFT) [10] e o *Phaselocked Loop* (PLL) [12], citados anteriormente.

3. Algoritmos Genéticos

Os algoritmos genéticos (AG) são um dos métodos mais populares da utilização dos algoritmos evolutivos (AE). Os AEs se baseiam na evolução e na seleção natural das espécies e na teoria de genética populacional e fazem parte de um processo iterativo e aleatório que atua sobre certa população. Cada indivíduo da população representa uma possível solução da função a ser otimizada [16].

Os AGs utilizam técnicas de seleção, *crossover* e mutação inspiradas pela bioevolução. Inicialmente, são escolhidos alguns indivíduos, geralmente de forma aleatória e, a partir daí, começam a agir os operadores citados anteriormente. Esses operadores são responsáveis pela evolução da população e, com o processo de evolução, as características dos indivíduos são alteradas e assim, pode-se alcançar a solução do problema [7].

A ideia principal desses algoritmos é a geração de novas populações cada vez melhores. Portanto, é importante a avaliação de cada indivíduo segundo uma regra para determinar quão bom é um indivíduo. Essa avaliação ocorre atribuindo um valor de *fitness* (aptidão) a cada um deles, calculado através de uma determinada função específica para cada problema [7]. Quanto maior a aptidão, melhores são os indivíduos e esses terão mais chance de serem selecionados para gerar filhos para a próxima geração.

3.1. Seleção

O operador seleção consiste na escolha aleatória de indivíduos para serem candidatos a serem reprodutores [7]. Esses candidatos “competem” entre si e, geralmente, os indivíduos com a melhor aptidão serão os pais da próxima geração, como mostra a Figura 1.

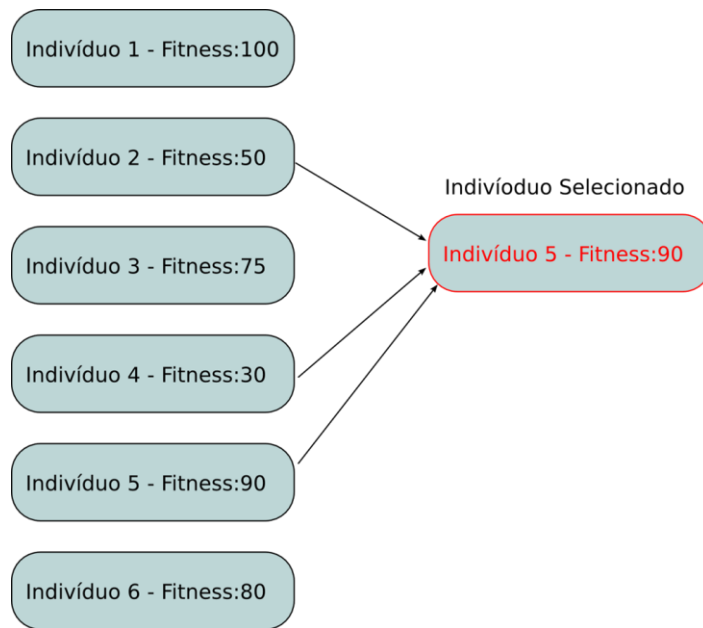


Figura 1: Exemplificação da seleção

A Figura 1 supõe uma população de 6 indivíduos. Esta é uma das formas mais simples de seleção: escolhe-se aleatoriamente um certo número de indivíduos, no caso, 3, compara-se o *fitness* entre eles e o melhor indivíduo é selecionado.

Há outros tipos de seleção, alguns nada intuitivos como este. Este método exemplificado é chamado de torneio. Este caso representa um torneio de 3, pois são escolhidos 3 indivíduos para competirem entre si.

A ideia por trás da seleção é intuitiva: a chance de se obter bons filhos é maior sabendo que os pais já são bons. E esse raciocínio se desenvolve para todos os próximos operadores. Porém, indivíduos com baixo *fitness*, ou seja, menos aptos a gerarem filhos, também podem se tornar pais, assim como na natureza. Portanto, para a seleção dos melhores reprodutores foram desenvolvidos vários métodos que privilegiam os indivíduos mais aptos, mas também permitem que piores indivíduos também se reproduzam, dentre eles se destacam [17]: método da roleta, seleção por torneio, método da amostragem estocástica uniforme, seleção local, seleção truncada e seleção por *ranking*.

3.2. Cruzamento

O operador cruzamento ou *crossover*, é a reprodução entre dois pais selecionados. Essa técnica gera um descendente pelo cruzamento de genes, que no caso podem ser bits ou até mesmo valores reais, na tentativa de gerar filhos melhores que os pais.

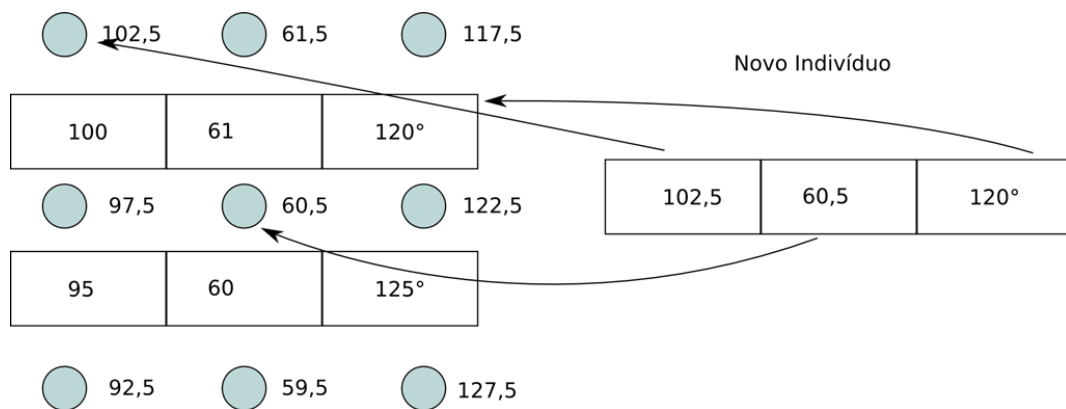


Figura 2: Exemplificação de crossover

O exemplo da Figura 2 mostra um par de pais frutos da seleção realizada anteriormente. Cada indivíduo (ou cromossomo) é uma solução para o problema de estimação fasorial. O primeiro gene representa a amplitude, o segundo representa a frequência e o terceiro, o ângulo de fase.

Esta forma de *crossover* é realizada da seguinte maneira: a diferença entre um gene de um pai com o respectivo gene do outro pai é dividida por 2. O valor obtido é então somado e subtraído de ambos os genes, fornecendo então 5 valores, representados no exemplo por 102,5, 100, 97,5, 95 e 92,5 em relação ao gene 1, os novos genes são representados na Figura 1 com os círculos. O gene do filho será a escolha aleatória de um desses valores, ou os novos genes ou o gene de algum pai.

A eficiência deste método é observada na eficiência da reprodução sexuada no meio ambiente. A troca genética propicia o aparecimento de características novas. Pelo ponto de vista da engenharia, se tivermos duas soluções com boa resposta para um dado problema, a combinação delas pode levar a uma melhor solução [18]. A seleção se encarrega de eliminar as que não se tornarem melhores soluções.

Muitas vezes, esses operadores podem fugir da regra da evolução natural. Por exemplo, há técnicas que envolvem o cruzamento entre mais de dois pais.

Uma das características do AG é sua taxa de *crossover*. Nem sempre todos os filhos precisam ser gerados através do *crossover*, ou comparativamente com a evolução natural, de forma sexuada. Apenas certa porcentagem dos filhos será gerada dessa forma, a outra parte poderá receber diretamente os genes de seu pai. A porcentagem de filhos que serão gerados através do *crossover* é chamada de taxa de *crossover*.

3.3. Mutação

O operador mutação simula as mutações que ocorrem naturalmente nos genes dos seres vivos. A mutação ocorre em apenas certa quantidade de filhos e nada mais é do que a alteração de algum dado que o indivíduo possui. Os filhos que não sofrerem mutação apenas receberam os genes de seus pais (através do *crossover* ou não) sem nenhuma alteração. A chance de cada novo indivíduo de sofrer a mutação é chamada de taxa de mutação. Este operador é apresentado na Figura 3.

			Novo Indivíduo		
100	61	120°	100,1	61,9	120°
+	+	+			
rnd(0,1)	rnd(0,1)	rnd(0,1)			

Figura 3: Exemplificação de mutação

Suponha que o indivíduo representado na Figura 3 sofreu a atuação da ferramenta mutação. Um valor aleatório entre 0 e 1, representado por $\text{rnd}(0,1)$, é somado ao valor de cada gene. Este número aleatório pode possuir outros limites, como -1 e 1, -2 e 2.

O principal objetivo é gerar diversidade do material genético da população, evitando que o algoritmo fique preso em um ótimo local da região de soluções referentes a função de otimização, ao invés do ótimo global, que representa o melhor indivíduo possível, ou seja, a melhor solução para a função de otimização.

3.4. Estrutura geral de um AG

Uma estrutura geral de um algoritmo genético é apresentada a seguir, onde t é o índice de gerações e $P(t)$ é a população de indivíduos na geração t , e P_{aux} é a população auxiliar [7].

- $t \leftarrow 0$;
- Iniciar $P(t)$ aleatoriamente
- Avaliar $P(t)$
- Enquanto (critério de parada) é falso
 - Aplicar seleção a $P(t)$ para gerar P_{aux}

- Aplicar Cruzamento e Mutação a *Paux*
- $P(t+1) \leftarrow Paux$
- Avaliar $P(t+1)$
- $t \leftarrow t+1$

O critério de parada determina o fim do processo iterativo e há várias formas de realizá-lo, como: tempo de processamento, número de gerações, todos indivíduos iguais (ou quase todos, em torno de 95%) indicando boa convergência da população, etc.

Os métodos descritos neste capítulo referem-se a uma população que possui indivíduos com cromossomos representados por números decimais. Quando se pretende realizar a implementação em *hardware*, é necessário que estes operadores sejam feitos em números binários.

A seguir, serão abordados estes operadores binários que são utilizados em uma variação do AG desenvolvido especificamente para ser implementado em *hardware*: o Algoritmo Genético Compacto.

3.5. Algoritmos Genéticos Compactos

Os Algoritmos Genéticos Compactos (AGc) representam a população como uma distribuição de probabilidade sobre o espaço de soluções e são equivalentes ao algoritmo genético simples com *crossover* uniforme [19]. O AGc foi proposto para sua utilização com parâmetros binários.

Um dos problemas da utilização do Algoritmo Genético é que as populações podem ser muito grandes exigindo uma grande alocação de memória no sistema. Visando solucionar este problema e fornecer uma outra perspectiva das características dos AGs, Goldberg *et. al.* em [19] propuseram o Algoritmo Genético Compacto.

O desenvolvimento do AGc revelou que não é necessário gerar uma população inteira com a finalidade de escolher apenas alguns indivíduos. Uma performance similar ocorre por gerar apenas os indivíduos a serem utilizados através de um vetor de probabilidade e depois atualizar tal vetor baseado nos indivíduos gerados. Cada valor do vetor de probabilidade contém a chance de um gene do indivíduo ser igual a 1.

O *fitness* dos dois indivíduos gerados serão comparados, de novo numa espécie de competição, e o vetor de probabilidade será modificado pendendo ao melhor indivíduo. Para simular uma população de n indivíduos, o vetor probabilidade será

incrementado ou decrementado em $1/n$ unidades. Este processo se repete até que todos os valores do vetor probabilidade sejam 0 ou 1.

Usualmente, o vetor de probabilidade é inicializado contendo apenas um número binário que representa a chance de 50% de cada bit do indivíduo ser 1. Dentre os indivíduos geradores, escolhe-se o melhor deles e o vetor de probabilidade é atualizado, fazendo as probabilidades tenderem a este melhor indivíduo em um fator de $1/n$.

Este processo é repetido até que o vetor probabilidade atinja seu critério de parada, que é similar ao de um algoritmo genético comum, tal como o tempo de execução, número de gerações, ou, neste caso, quando o vetor de probabilidade possuir apenas chances nulas (0%) ou máximas (100%).

Este método citado simula a seleção e o *crossover* assim como há no AG, porém não o faz com a mutação. Há outros métodos que simulam também a mutação, como em [20]. Porém, os resultados obtidos através da utilização do AGc conforme explicado já fornece uma precisão e velocidade suficientes para fornecer uma boa estimativa fasorial.

Como é possível perceber, a alocação de memória do AGc é muito menor do que o AG simples, sendo este o principal motivo de sua utilização. Goldberg *et. al.* mostram em [19] que este método simula muito bem o AG, apesar de não substituí-lo em sua integridade, e os resultados obtidos também mostram a similaridade com os resultados obtidos através do AG. Levando esse trabalho em consideração, a estimativa fasorial também será estudada utilizando o AGc, que posteriormente será implementado em *hardware*.

Para fazer a correspondência dos genes em números reais com os genes representados de forma binária no AGc, utilizou-se neste trabalho uma relação entre o espaço real e o binário, através da representação do limite inferior real ao vetor binário contendo apenas 0 e o limite superior real relacionado ao vetor binário que contém apenas 1. Desta forma, relacionados os limites, os demais valores binários são associados de maneira uniforme com os números reais.

A implementação em *hardware* é de grande valia para o AG, pois é possível se beneficiar do paralelismo intrínseco à estes algoritmos, ou seja, através do paralelismo dos cálculos de todos os operadores do AG, a velocidade de processamento é suficiente para uma estimativa em tempo real.

4. Simulações de Sistemas Elétricos de Potência

A fim de validar os algoritmos implementados e verificar seu funcionamento em um SEP real, serão utilizados dados provenientes de simulações computacionais. Neste capítulo, será apresentado o sistema proposto para as simulações bem como seus componentes.

4.1. O software ATP

Os sistemas elétricos de potência são planejados para disponibilizar energia com qualidade, confiabilidade e continuidade. No entanto, os SEPs estão constantemente expostos às várias contingências, tais como, descargas atmosféricas e outras intempéries, curtos-circuitos, falhas na operação e dispositivos (geradores, transformadores, cabos, disjuntores, chaves de manobra, barramentos, relés e motores, entre outros). Das consequências, tais contingências podem prejudicar não só o equipamento atingido, mas como equipamentos distribuídos em todo o sistema elétrico.

Neste contexto, torna-se necessário a execução de um prévio estudo dos possíveis transitórios que podem ocorrer em um sistema elétrico. Este estudo poderá ter o intuito, tanto para a definição de uma adequada especificação dos dispositivos de proteção, quanto para se determinar os motivos que ocasionaram uma anomalia na operação do sistema elétrico [21]. Dentre os mecanismos existentes para a realização de tal estudo, os simuladores digitais têm se mostrado uma ferramenta em potencial devido ao aumento no poder de processamento dos computadores atuais. Afirma-se em [21] que não existem relevantes limitações no ato de modelar qualquer componente do sistema elétrico em programas digitais. Devido ao seu rápido avanço e aos custos envolvidos, os computadores são vistos como a nova tendência no que tange o desenvolvimento dos simuladores de transitórios.

Um dos simuladores digitais mais utilizados é o EMTP (*ElectroMagnetic Transient Program*) da *Bonneville Power Administration* (BPA). Este foi desenvolvido com base no trabalho de Frey e Althammer, por Herman W. Dommel, na década de 60 em Munique, Alemanha. Inicialmente, o programa possibilitava a modelagem de circuitos monofásicos, contendo uma chave e uma fonte de excitação, por modelos de indutâncias, capacitâncias, resistências e linhas sem perdas.

Com a saída de Herman W. Dommel para a *University of British Columbia* (UBC), a coordenação do projeto de desenvolvimento do simulador ficou sob responsabilidade de Scott Meyer. Com isso, deu-se início a um processo de desenvolvimento

coordenado, tornando o simulador uma ferramenta muito poderosa.

Após a saída de Scott Meyer da coordenação do projeto na BPA, foi criada uma nova versão do EMTP pelo LEC (*Leuven EMTP Center*) na Bélgica, baseada na versão M39. Esta nova versão é conhecida como *Alternative Transient Program*. A distribuição do programa ficou centralizada até 1992, momento em que a BPA e Scott Meyer voltaram a trabalhar em conjunto.

Atualmente, o ATP possibilita a utilização de configurações arbitrárias em simulações de transitórios eletromagnéticos em redes polifásicas. Além destas, outras características constituem o grupo de definições passíveis de utilização, tais como não-linearidades, elementos com parâmetros concentrados e distribuídos, diversos tipos de chaves, transformadores e reatores, dentre outros.

Vale frisar que por ser um programa digital, pelo ATP não é possível se obter uma resposta contínua no tempo, sendo assim, caracterizada por valores a intervalos de tempo discretos.

Entretanto, este fato não reduz a precisão nos resultados obtidos pelo ATP. Este software apresenta precisão suficiente para ser utilizado em diversas categorias de estudos. Conforme pode ser comprovado, realizando-se uma comparação dos resultados obtidos pela utilização do ATP com dados reais, percebe-se uma boa correlação entre os mesmos [21].

Contudo, a documentação do *software* ATP consiste basicamente de um manual (*ATP Rule Book*), o qual possui todas as informações sobre os modelos disponíveis. A utilização do ATP abrange tanto a área acadêmica quanto empresarial [22]. Os resultados apresentados por sua utilização possuem uma elevada aceitação e validação, o que pode ser verificado, por exemplo, por sua grande utilização em trabalhos publicados nos periódicos do CIGRE (*Conseil International des Grands Réseaux Electriques*) e do IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*).

4.2. Sistema proposto

Foi projetado um sistema elétrico de forma a evidenciar a dinâmica presente nestes sistemas. O sistema projetado contém modelos completos de geradores com regulador de tensão e velocidade [23], possibilitando visualizar os efeitos do desequilíbrio entre geração e carga. O sistema simulado no ATP está descrito na Figura 4 abaixo.

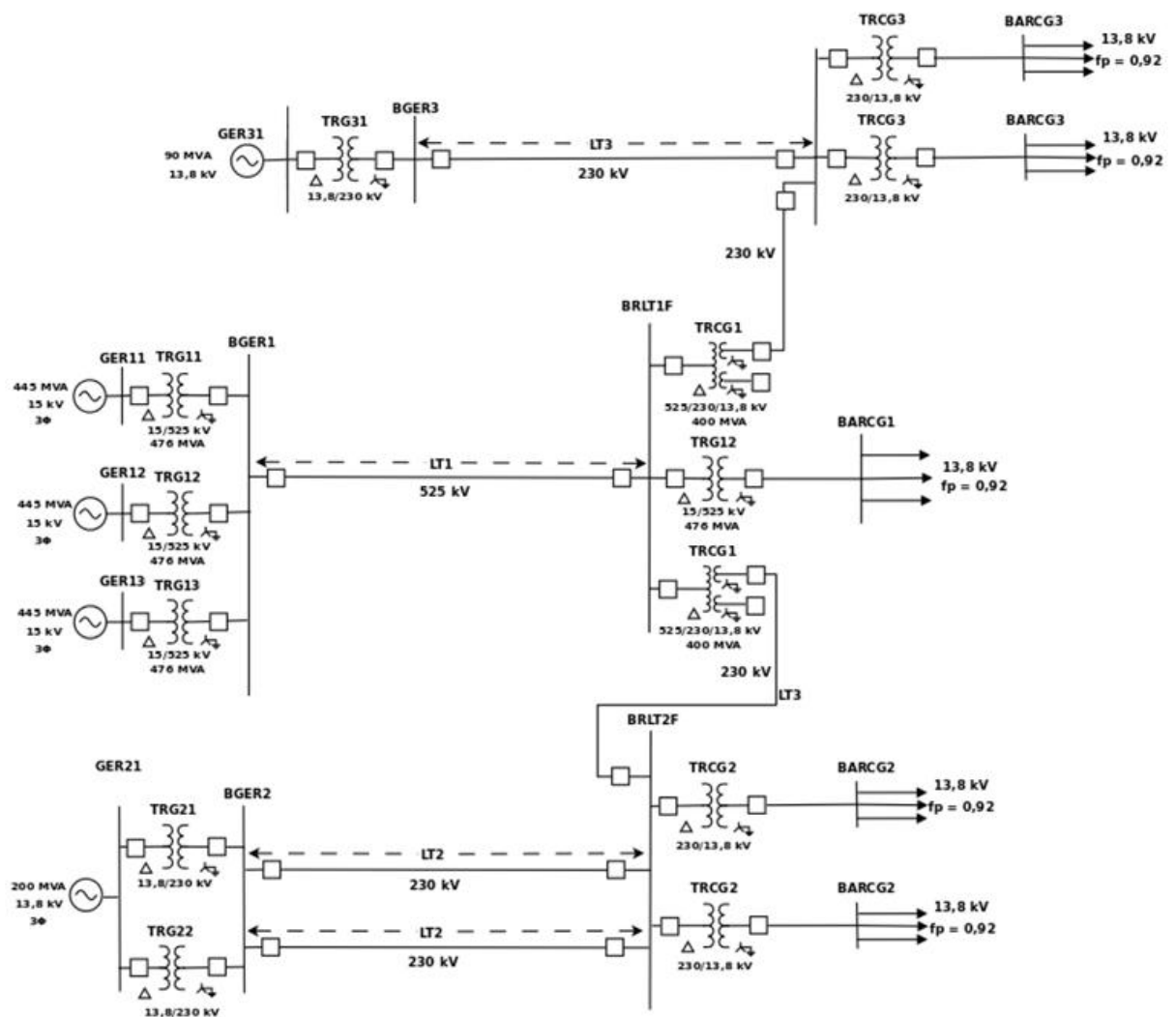


Figura 4: Sistema Elétrico Proposto

O sistema elétrico consiste em três subsistemas interligados. O subsistema superior, enumerado por 3, possui um gerador síncrono de 13,8 kV com potência de 90MVA conectado a um transformador elevador delta-estrela aterrada com relação de 13,8kV/230kV. Esse transformador o conecta a linha de transmissão 3 de 230kV. A linha

termina no barramento de interligação 3 onde, através de transformadores abaixadores 230/13,8kV delta-estrela aterrada serão conectadas as duas cargas de 125 MVA cada.

O subsistema enumerado por 1, possui 2 geradores 15 kV com potência 445 MVA. Cada gerador está conectado a um transformador elevador delta-estrela aterrada com a relação de 15/525kV com potência de 476 MVA. Os transformadores conectam os geradores a barra de geração 1 que será ligada a linha de transmissão 1 de 525 kV. Essa linha levará ao barramento de interligação 1, onde haverá outro transformador igual ao utilizado nos geradores, porém agora abaixador, para conectar o barramento com a carga de 400 MVA.

O subsistema enumerado por 2, consiste de um gerador de 13,8kV com potência de 200MVA, 4 transformadores (2 elevador, 2 abaixadores) 13,8/230 kV, duas linhas de transmissão de 230kV e duas cargas de 175 MVA cada uma cuja tensão é 13,8kV.

O subsistema 1 é interligado com o subsistema 2 e 3 através das linhas de transmissão de interligação de 230kV.

No sistema simulado através do *software ATP*, as cargas são representadas por impedância e reatância capacitiva ou indutiva, desta forma, elas foram calculadas para que o sistema seja operado a aproximadamente 85% da carga total. Esses 85% foram calculados de acordo com a tensão nominal de cada um dos barramentos de carga. Como estas cargas são impedância constantes com a queda de tensão entre a geração e as cargas, ou devido à algum dos testes realizados, a potência consumida acaba sendo menor.

4.2.1. Reguladores

O estado de equilíbrio do Sistema Elétrico depende basicamente da relação entre geração e carga. A variação constante do estado de equilíbrio faz com que haja uma busca contínua pelo restabelecimento do equilíbrio operativo do SEP, ou seja, que a potência gerada seja igual a consumida pelas cargas. O SEP tem a capacidade de alcançar um novo ponto de equilíbrio sem nenhum tipo de ação reguladora. Porém, a utilização da regulação própria do sistema é desaconselhada, uma vez que propicia uma grande variação da frequência [17].

Portanto, os geradores são dotados de mecanismos de regulação de velocidade, para desvios de frequência do gerador, e de reguladores de tensão, utilizados para manter a saída da tensão do gerador constante.

4.2.1.1. Regulador de velocidade

No sistema proposto, foram utilizados tantos geradores hidráulicos e quanto térmicos, assim como há na maioria dos SEP do Brasil. Dos 5 geradores utilizados, apenas o gerador com potência igual a 200 MVA é térmico.

O sistema de controle de velocidade varia de acordo com a sua forma de geração. Portanto, o regulador de velocidade para os geradores hidráulicos é diferente dos reguladores utilizados em geradores térmicos. Porém, todos eles possuem o mesmo esquema de diagrama de bloco, mostrado na Figura 5.

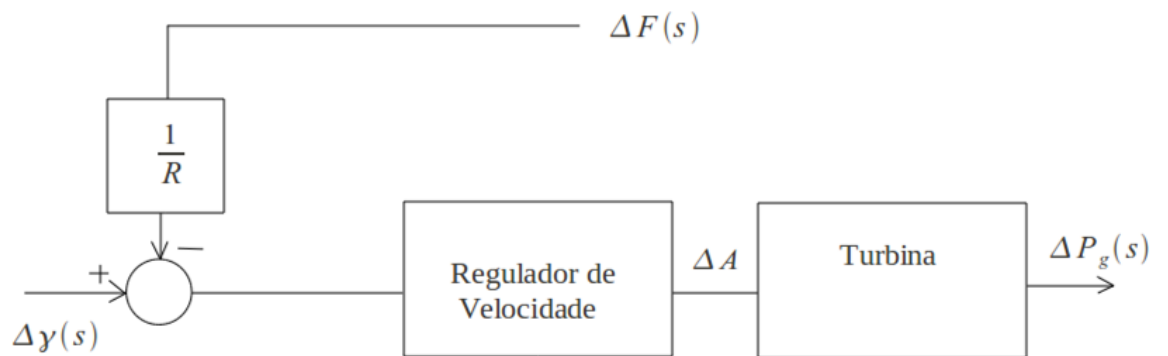


Figura 5: Diagrama de bloco regulador de velocidade

As funções de transferência do regulador de velocidade e da turbina para turbinas térmicas com reaquecimento são: [23]

$$Regulador de Velocidade = \frac{1}{1 + sT_1} \quad (1)$$

$$Turbina = \left(\frac{1 + sCT_r}{1 + sT_r} \right) \left(\frac{1}{1 + sT_s} \right) \quad (2)$$

Para a turbina hidráulica, têm-se as seguintes funções de transferências: [23]

$$Regulador de Velocidade = \left(\frac{1 + sT_t}{1 + sT_t \frac{r}{R}} \right) \left(\frac{1}{1 + sT_g} \right) \quad (3)$$

$$Turbina = \frac{1 - sT_w}{1 + s\frac{T_w}{2}} \quad (4)$$

Os valores utilizados nestas funções de transferência são os valores típicos, citados em [23].

Estes tipos de controladores de velocidades são considerados reguladores primários pois geram uma pequena variação na frequência final, necessitando a utilização de um regulador de velocidade secundário. Este último, apesar de ser utilizado em situações reais, não será simulado pois leva vários minutos para agir e as simulações deste trabalho não são longas o suficientes para que seja possível notar qualquer forma de ação controladora secundária.

4.2.1.2. Regulador de tensão

O regulador de tensão é um componente essencial nos sistemas modernos de excitação, pois é este dispositivo responsável por manter a tensão de saída constante independente das variações que ocorrerem no SEP.

Os geradores do sistema proposto utilizam o mesmo regulador de tensão, representado no diagrama de bloco representado na Figura 6 [17].

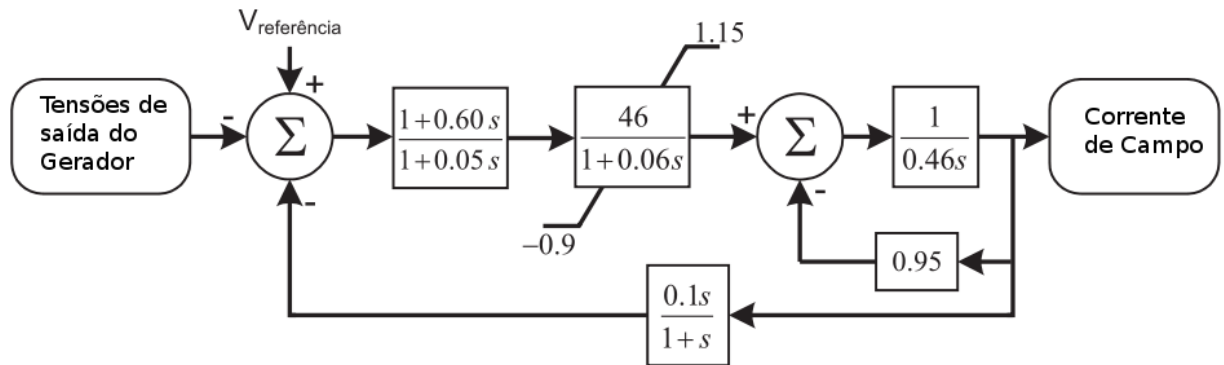


Figura 6: Regulador de tensão

Os valores para as funções de transferências aqui utilizados também são valores típicos de reguladores de tensão [23].

4.2.2. Componentes do Sistema

Para melhor simular mais precisamente um SEP, são necessários bons modelos para cada um dos componentes. Devido a este fato, decidiu-se por utilizar modelos

completos para representar linhas de transmissão, transformadores e geradores.

Nestes modelos, é necessário que sejam coletados e analisados dados que abrangem desde o sistema de aterramento do gerador até a altura de linhas de transmissão. Os dados utilizados na modelagem completa são os mesmos utilizados em [17].

4.3. Simulações realizadas

Com a finalidade de verificar o funcionamento do sistema proposto no *software* ATP, foram realizadas algumas medições em momentos específicos durante as simulações. Através do ATP é possível simular vários tipos de faltas, entradas e saídas de cargas, ilhamentos de sistemas elétricos, entre outros.

Os gráficos a seguir mostram a tensão e a corrente do SEP na barra de geração BGER1 em uma situação de falta franca, com impedância aproximadamente nula, ocorrida na Fase A na barra de interligação BINT1 no instante de tempo de 20 segundos. A tensão e a corrente foram medidos em um local diferente da falta, a barra de interligação 3, para mostrar a influência que ela gera no SEP como um todo.

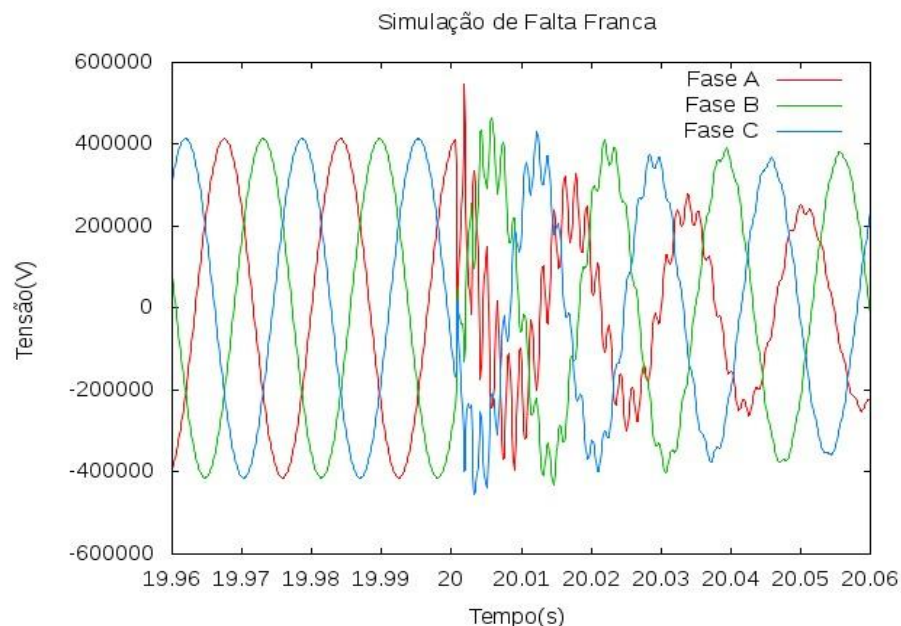


Figura 7: Tensão em uma situação de falta franca

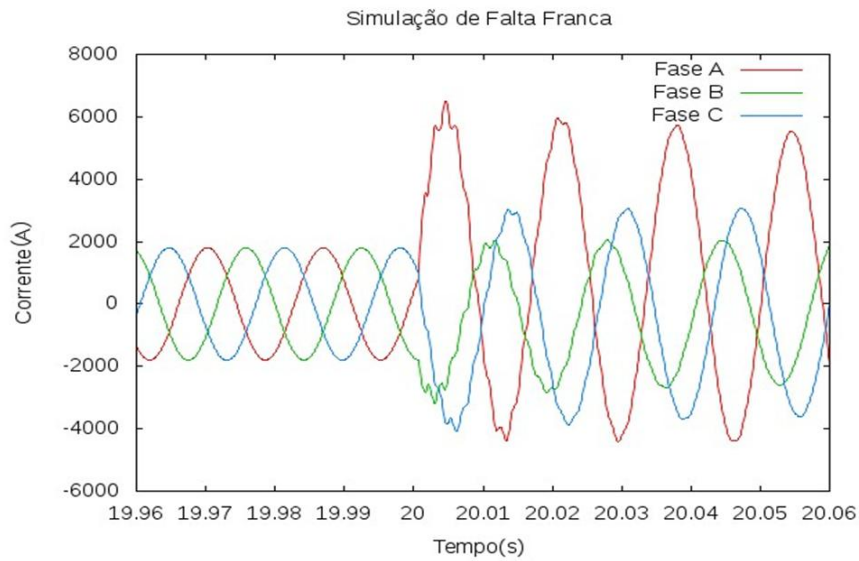


Figura 8: Corrente em uma situação de falta franca

Na Figura 7 é possível ver o afundamento da tensão, resposta comum neste tipo de falta, e o estado transitório, gerados pela falta que ocorre na fase A.

Na Figura 8 é possível observar o aumento da corrente na fase A, devido a corrente de falta. A falta também influencia as outras fases, gerando sobrecorrente. Também é possível observar componentes de alta frequência gerados pelo transiente provocados pela falta.

Foi simulado também o desligamento de cargas no sistema. A Figura 9 representa a variação na velocidade dos geradores causada por uma saída de carga de 65MVA.

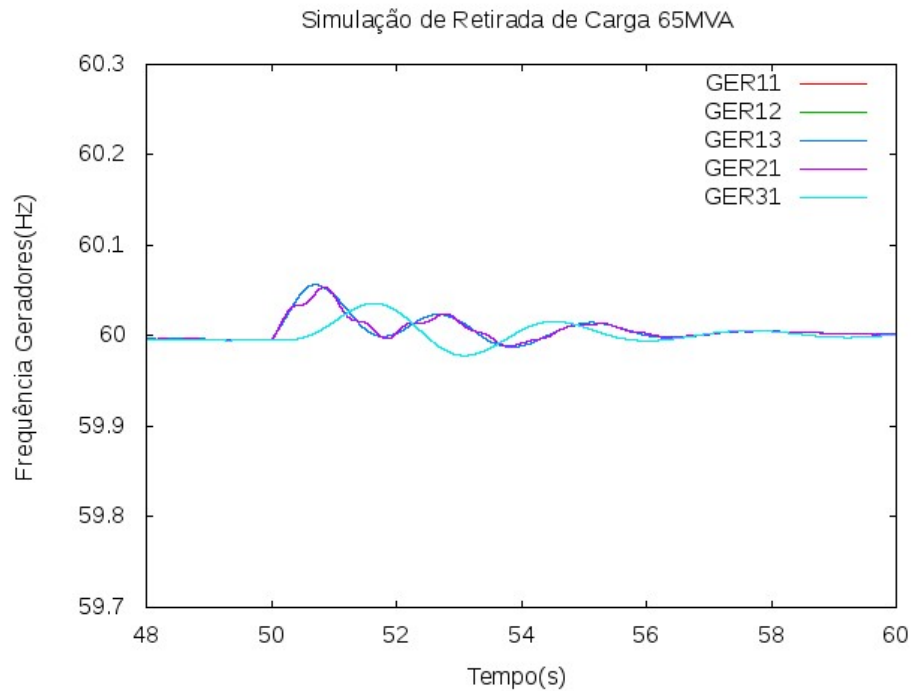


Figura 9: Variação na frequência dos geradores devido a saída de carga.

Como há uma retirada de carga de 65 MVA, há um desequilíbrio na relação entre geração/carga. A diminuição do consumo faz com que a energia, previamente utilizada para abastecer a carga retirada, se transforme em energia cinética nos geradores, aumentando assim a velocidade de cada um deles. É possível ver no gráfico, esse aumento na frequência e também a atuação dos reguladores de velocidade. Além disso, é possível ver a diferença do tempo necessário para cada um dos geradores se estabilizar. A resposta de um sistema elétrico a uma variação de carga ou geração será melhor explicada na apresentação das estimativas fasoriais.

É importante frisar que a Figura 9 representa a velocidade dos geradores, e não a frequência do SEP, pois a última é comum a todos os pontos do SEP. Nessa figura, cada curva representa a frequência de cada um dos geradores e a composição das mesmas que será responsável pela frequência do SEP durante um estado transitório. Em regime permanente, todas as unidades geradores possuem a mesma frequência.

Para coletar dados que serão utilizados para que seja realizada a estimativa fasorial através dos algoritmos propostos, serão realizadas outras simulações que serão descritas nos próximos capítulos.

5. Aplicação em Estimação Fasorial

Com a finalidade de testar o Algoritmo Genético na Estimação Fasorial, ele foi implementado primeiramente em *software* através da linguagem de programação C++.

O algoritmo recebeu como entrada os arquivos resultantes das simulações realizadas no ATP. Estes arquivos contêm a forma de onda de tensão e de corrente obtidas nos pontos de medição simulando a presença de PMUs. Para a estimação fasorial, o AG foi aplicado em uma janela de dados referente a um ciclo da forma de onda fundamental e deslocada de uma amostra a cada estimação realizada, com frequência de amostragem de 128 amostras por ciclo.

Para isto, foi necessário modelar o AG de forma que atinja os objetivos esperados. Suas características são específicas para estimação fasorial, como por exemplo, o número de genes, a função de avaliação de *fitness* e até as taxas de mutação e *crossover* são adaptadas para melhor otimizar a função de erro desejada.

Neste capítulo também serão brevemente explicados a modelagem dos algoritmos utilizados para comparação, a Transformada Discreta de Fourier (TDF) e o *Phase-locked Loop* (PLL).

5.1. Modelagem do AG

Para que o AG possa ser utilizado para a estimação fasorial, é necessário que ele seja modelado para este propósito. Esta modelagem envolve as características dos indivíduos, a função de avaliação, a escolha das taxas de mutação e *crossover* adequadas, o tamanho da população inicial e o critério de parada.

5.1.1. Função de avaliação e indivíduos

Um sinal de tensão proveniente de um de um sistema elétrico em condições normais de operação pode ser simplificado pela Equação 5:

$$v(t) = A \sin(2\pi f t + \theta) \quad (5)$$

em que: A é a amplitude; f é a frequência; θ é o ângulo de fase.

Assim, para a determinação dos fasores, é necessário encontrar os parâmetros de amplitude, frequência e ângulo de fase.

Dispondo dos sinais de onda discretizados proveniente das simulações, é possível utilizar algoritmos genéticos para a minimização de uma função de erro, possibilitando a determinação dos parâmetros fasoriais de amplitude, frequência e ângulo de fase. A

função de erro a ser minimizada é descrita na Equação 6:

$$e[n] = C(n, A', f', \theta') = \sum_{k=0}^{N-1} [u[n - k] - A' \sin(2\pi f' kT + \theta')]^2 \quad (6)$$

Em que:

A' é a amplitude estimada;

f' é a frequência estimada;

θ' é o ângulo de fase estimado;

T é o período amostral;

N número de amostras utilizadas para a estimação e

k é o número da amostra.

Do ponto de vista de algoritmos genéticos, cada indivíduo (cromossomo) será composto por 3 genes, que são os parâmetros de amplitude, frequência e ângulo de fase. Espera-se que a aplicação dos algoritmos genéticos, com seus operadores de cruzamento, mutação e seleção, durante um número razoável de gerações produza indivíduos com um alto fitness (neste caso, menores valores da função de erro), tornando-se uma boa estimativa para os parâmetros de amplitude, frequência e ângulo de fase. É importante salientar que foram estudados diversos tipos operadores genéticos para a solução do problema apresentado, bem como a variação de sua parametrização (número de indivíduos, número de gerações, elitismo, etc.) e utilizou-se a configuração que apresentou melhor resposta.

5.1.2. Características do AG

As ideias básicas das ferramentas de evolução utilizadas pelo AG já foram introduzidas. O objetivo desta seção é descrever quais foram as características utilizadas em cada ferramenta do algoritmo genético modelado para estimação fasorial.

A inicialização da população é feita de forma aleatória. Cada gene pode ser gerado dentro de um limite superior e inferior, que podem ser alterados dependendo da aplicação. Nos testes realizados, o AG foi aplicado as medições de tensão. Para este objetivo, utilizaram-se os limites inferiores e superiores na geração de cada um dos genes de 0 e 2 *per unit* (pu) na amplitude, 55 e 65 na frequência e 0 e 360 graus na fase. Estes limites são amplos para que o AG consiga realizar a estimação fasorial mesmo quando os valores estão distantes da frequência nominal.

A seleção utilizada no AG implementado é o Torneio. O torneio consiste na

escolha de N indivíduos de forma aleatória e, dentre eles, é selecionado aquele com maior *fitness*. O valor de N pode ser escolhido livremente, porém estudos indicam um melhor tamanho do torneio dependendo do tamanho da população. O tamanho da população utilizada é de 40 indivíduos, e o método de seleção é o Torneio de 3, conforme apresentado no capítulo 3.

O *crossover* utilizado é o mesmo citado durante o capítulo Algoritmos Genéticos. Com o gene dos dois pais, são gerados no total 5 genes e escolhido um deles de forma aleatória para passar para seu descendente. No AG implementado, caso o gene escolhido esteja fora de um limite estabelecido, o filho receberá diretamente o gene de um dos pais. Os limites utilizados aqui são os mesmos utilizados na inicialização aleatória da população. A taxa de *crossover* utilizada é 98%.

A forma de mutação utilizada é descrita a seguir. Cada gene de cada indivíduo possui uma chance de sofrer a mutação, que nada mais é do que a soma de um número pequeno obtido de forma aleatória entre -1 e 1. Nos testes realizados aqui, a taxa de mutação é de 20%. Na literatura, a taxa de mutação citada é 10 vezes menor do que a utilizada, porém devido a inúmeros testes, esta foi a que apresentou melhores resultados.

O indivíduo que gerará a estimativa fasorial será aquele que apresentar o menor *fitness* durante todo o processo de evolução.

O número de amostras por ciclo fundamental de onda utilizado é de 128.

Uma das características do AG é o critério de parada. O critério de parada utilizado é o número de gerações. O AG aplica as ferramentas de evolução até que seja atingido uma geração limite, que no caso, é 600.

O Algoritmo Genético Compacto utilizado simula o AG simples modelado aqui. Desejou-se então que ambos os métodos empregados possuam o mesmo número de avaliações da função objetivo. Desta forma, utilizou-se como critério de parada a população de número 1200. A função de avaliação de *fitness* e os indivíduos são os mesmos utilizados no AG, porém adaptados para a utilização de números binários.

5.2. Algoritmos Clássicos

Nesta seção será explicada, de forma resumida, a implementação dos algoritmos clássicos que serão utilizados para comparar com o algoritmo genético proposto. Estes algoritmos clássicos são algoritmos algébricos e sempre fornecerão a mesma resposta para uma certa onda amostrada. Portanto, a versão implementada em *software* destes

algoritmos é mais rápida do que a versão do AG implementada na linguagem C++. Para buscar a alta velocidade de processamento, o AG deve ser implementado em plataformas FPGA que realizam o paralelismo dos cálculos, deixando-os muito mais rápidos, como comentado nos capítulos anteriores.

Primeiramente será explicado o algoritmo que utiliza a Transformada Discreta de Fourier (TDF), e depois o algoritmo chamado de *Phase-locked loop*.

5.2.1. Transformada Discreta de Fourier

A TDF tem sido utilizada em muitas aplicações para medição em SEPs. Porém, a TDF é precisa apenas quando o teorema da amostragem é satisfeito e a frequência de amostragem do sinal está sincronizada com a frequência do sinal analógico, evitando assim erros por *leakage* ou *aliasing*. Mas esta sincronização é apenas teórica, pois na prática há imprecisões durante o processo de amostragem e inevitavelmente, o efeito *leakage* está presente.

Para estimar fasores utilizando a TDF utiliza-se o erro inserido no ângulo de fase devido a imprecisão da amostragem, como mostram Wang e Sun em [10] e [11]. O método apresentado utiliza uma compensação para que seja realizada a estimação correta da frequência, da amplitude e do ângulo de fase, dispondo informações do erro de ângulo de fase proveniente da aplicação da TDF em duas janelas de dados distintas, como mostra a Figura 10.

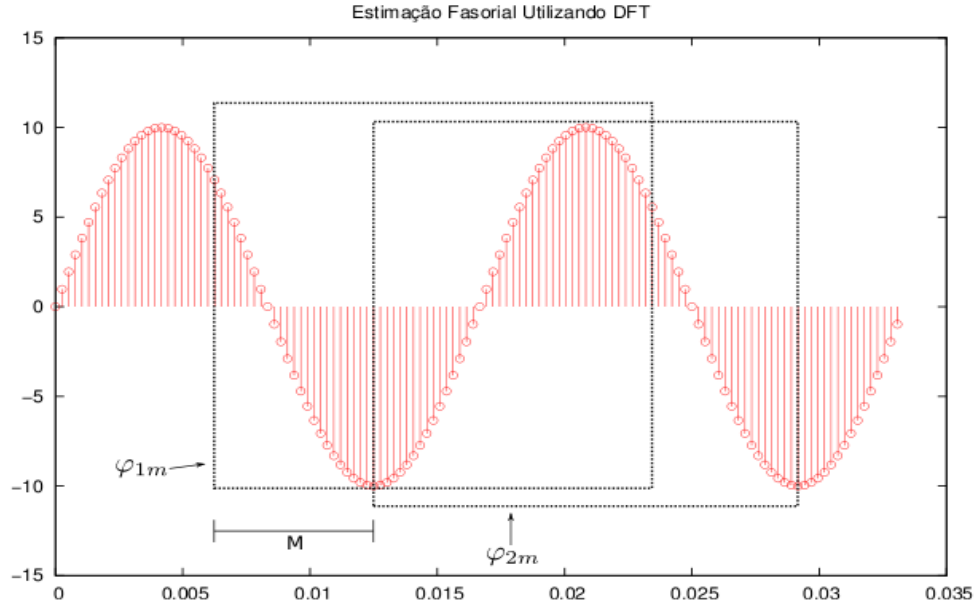


Figura 10: Estimação fasorial utilizando a Transformada Discreta de Fourier

Um resumo prático da implementação realizada do algoritmo para estimação fasorial utilizando TDF desenvolvido por Wang e Sun em [10] e em [11] é apresentada nos passos a seguir.

1. Determine o tamanho da janela de dados N e calcule

$$M = N \quad (7)$$

$$K = \frac{\pi}{(N \cdot \sin(\frac{2\pi}{N}))} \quad (8)$$

$$K_3 = \frac{2\pi M}{N} = 2\pi \quad (9)$$

$$K_4 = \frac{\pi(N-1)}{N} \quad (10)$$

Estas constantes são calculadas somente uma vez no início do programa.

2. Cálculo da TDF recursiva

$$X^{(r+1)} = (X^{(r)} - x(0))e^{j(\frac{2\pi}{N})} + x(N) \cdot e^{j(\frac{2\pi}{N})} \quad (11)$$

3. Estimação dos parâmetros fasoriais

$$K_1 = \sin\left(\frac{2\pi}{N} - 2\varphi_{1m}\right) \quad (12)$$

$$K_2 = \text{sen}\left(\frac{2\pi}{N} - 2\varphi_{2m}\right) \quad (13)$$

$$\Delta\lambda = \frac{(2\varphi_{2m} - 2\varphi_{1m}) - K_3}{K_3 + K(K_2 - K_1)} \quad (14)$$

$$\varphi_2 \approx \varphi_{2m} - \Delta\lambda \cdot K_4 - \Delta\lambda \cdot K \cdot K_2 \quad (15)$$

$$f = \frac{f_s(1 + \Delta\lambda)}{N} \quad (16)$$

$$F = F_m + \left[1 + \frac{\pi^2}{6} \cdot \Delta\lambda^2 - K \cdot \Delta\lambda \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{N} - 2\varphi_m\right) \right] \quad (17)$$

Em que φ_1 e φ_2 são obtidos pelas janelas representadas na Figura 10, F é o valor da frequência estimada.

4. Codificar M e K_3 de forma a suprimir os harmônicos

$$M = \text{round}\left(\frac{N}{(1 + \Delta\lambda)}\right) \quad (18)$$

$$K_3 = \frac{2\pi M}{N} \quad (19)$$

então volte para o passo 2.

5.2.2. Phase-locked Loop

Um outro algoritmo capaz de realizar a estimação fasorial é apresentado em [12], que é governado por um conjunto de equações diferenciais não lineares. Este algoritmo utiliza o método do gradiente descendente para minimizar o erro mínimo quadrático entre o sinal de entrada e o sinal senoidal desejado, que será a saída do algoritmo. O erro mínimo quadrático já é conhecido, pois é utilizado também como função objetivo do Algoritmo Genético.

Como mostrado por Karimi-Ghartemani *et al.* [12], as equações diferenciais que regem o comportamento do sistema PLL utilizado neste trabalho são

$$\frac{A(t)}{dt} = \mu_1 e(t) \text{sen}(\phi(t)) \quad (20)$$

$$\frac{\omega(t)}{dt} = \mu_2 e(t) \cos(\phi(t)) \quad (21)$$

$$\frac{\phi(t)}{dt} = \omega(t) + \mu_3 e(t) \cos(\phi(t)) \quad (22)$$

em que A é amplitude do fasor, ϕ é a fase em radianos, ω é a frequência em radianos por segundos e $e(t)$ é o erro entre o sinal da entrada e o sinal desejado.

Para sua utilização digital, o conjunto de equações acima deve ser discretizado. Tal processo pode ser realizado através utilizando-se o método *Euler Forward*, que resulta em

$$A_{[n+1]} = A_{[n]} + \mu_1 T_s e_{[n]} \cdot \text{sen}(\phi_{[n]}) \quad (23)$$

$$\omega_{[n+1]} = \omega_{[n]} + \mu_2 T_s e_{[n]} \cdot \cos(\phi_{[n]}) \quad (24)$$

$$\phi_{[n+1]} = \phi_{[n]} + T_s \omega_{[n]} + \mu_3 T_s e_{[n]} \cdot \cos(\phi_{[n]}) \quad (25)$$

em que T_s é o período de amostragem, e os fatores μ são as constantes positivas que ditam o comportamento do algoritmo em regime transitório e permanente [12].

O sinal de erro discretizado é

$$e_{[n]} = u_{[n]} - y_{[n]} = u_{[n]} - A_{[n]} \text{sen}(\phi_{[n]}) \quad (26)$$

Em que $u[n]$ é o sinal de entrada amostrado com período T_s . Deve-se notar que os valores de $A[0]$, $\omega[0]$ e $\phi[0]$ devem ser inicializados próximos aos valores nominais.

Desta forma, com a otimização da função objetivo, o erro será cada vez menor e a resposta do algoritmo irá se aproximando cada vez mais do sinal de entrada.

Todo este procedimento foi implementado na linguagem C++, juntamente com o algoritmo que utiliza a TDF. No próximo capítulo, serão apresentados os resultados da implementação dos AGs em *software* juntamente com estes dois métodos para fins de comparação.

6. Resultados da Aplicação em Estimação Fasorial

Com o Algoritmo Genético, simples e compacto, e os algoritmos clássicos, modelados da forma descrita anteriormente e implementados na linguagem C++, foram inicializadas as estimações fasoriais.

Os algoritmos foram aplicados a ondas criadas de forma sintética que visam simular os casos transitórios citados na norma IEEE C37.118-2005, ou seja, elas possuem degrau de frequência, de fase e de amplitude. Nestes testes é possível observar a performance do AG em regime permanente e também em estado transitório e compará-los à TDF e ao PLL. Os resultados serão mostrados na forma de gráficos comparativos entre o AG com o AGc e a TDF com o PLL. Para cada algoritmo, foram feitos gráficos do rastreamento da frequência e do TVE em porcentagem, ambos em função do tempo.

Os algoritmos também foram aplicados aos dados obtidos através do SEP simulado no *software ATP*. Os dados foram obtidos através da simulação de 6 diferentes casos que englobam entrada e saída de carga, ilhamento de um sistema e perda de uma unidade geradora. Para todos os testes, foi escolhida a barra de interligação 3 que está contida no sistema 3.

6.1. Aplicação em dados sintéticos

Os dados sintéticos são utilizados para observar o comportamento dos algoritmos em regime transitório. A norma não faz exigências em relação a performance em estado transitório, porém exige que o tempo máximo que o algoritmo utilizado leva para voltar a possuir um TVE dentro do limite imposto, no caso 1%, seja determinado.

Foram realizados então três testes com cada um dos algoritmos: degrau de 0,1 pu na amplitude, degrau de 5 Hz na frequência e degrau de 90° na fase. Com exceção do último caso em que a frequência sobe para 65 Hz, a frequência dos testes é mantida em 60 Hz.

Em todos os dados sintéticos, o degrau ocorre no instante de tempo igual a 0. Antes disso, encontra-se em regime permanente com frequência 60 Hz.

Seguem, primeiramente, os resultados obtidos através do teste

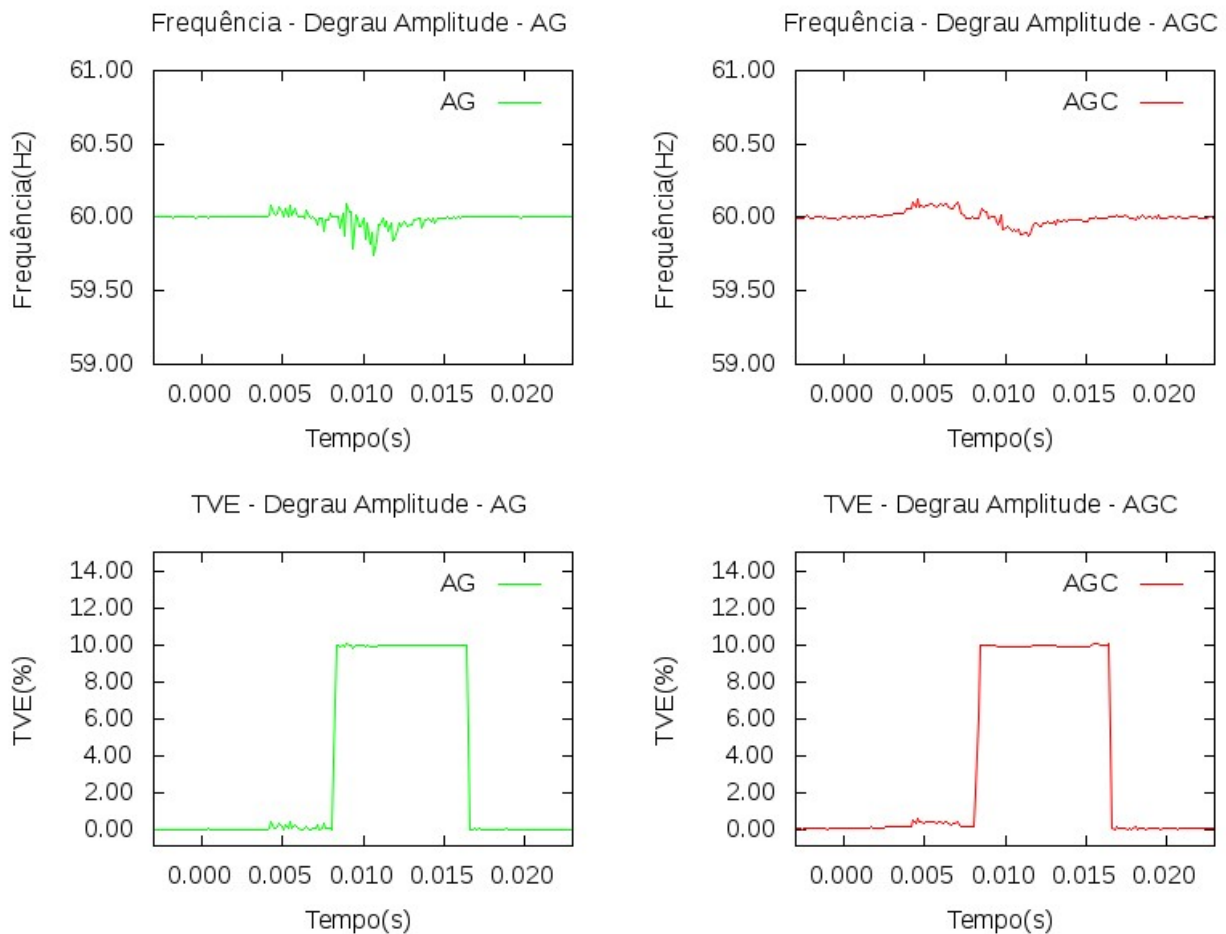


Figura 11: Resposta AG e AGC para o Degrau de Amplitude

O primeiro aspecto a ser observado é a semelhança entre a resposta obtida através da aplicação do AG com a do AGC. Esta semelhança ocorre pois o algoritmo genético compacto simula o AG simples de uma forma bem eficiente, portanto gera resultados com características semelhantes.

Apesar do rastreamento da frequência não se distanciar muito, o TVE se eleva devido a incorreta estimação do fasor como um todo devido à variação de amplitude. Não há limites para o TVE em regime transitório, ou seja, não convém comparar picos do erro, pois isto não é especificado pela norma.

O tempo necessário para que o TVE de ambos algoritmos volte a ficar dentro dos limites impostos pela norma IEEE C37.118-2005, 1%, é 16,6 ms, exatamente um ciclo de onda fundamental, o que indica a alta velocidade do AG para sair de regimes transitórios. Este tempo será chamado aqui de tempo de recuperação, pois refere-se ao tempo necessário para que o algoritmo se *recupere* de um transitório.

Segue na Figura 12 o mesmo teste realizado para os algoritmos clássicos.

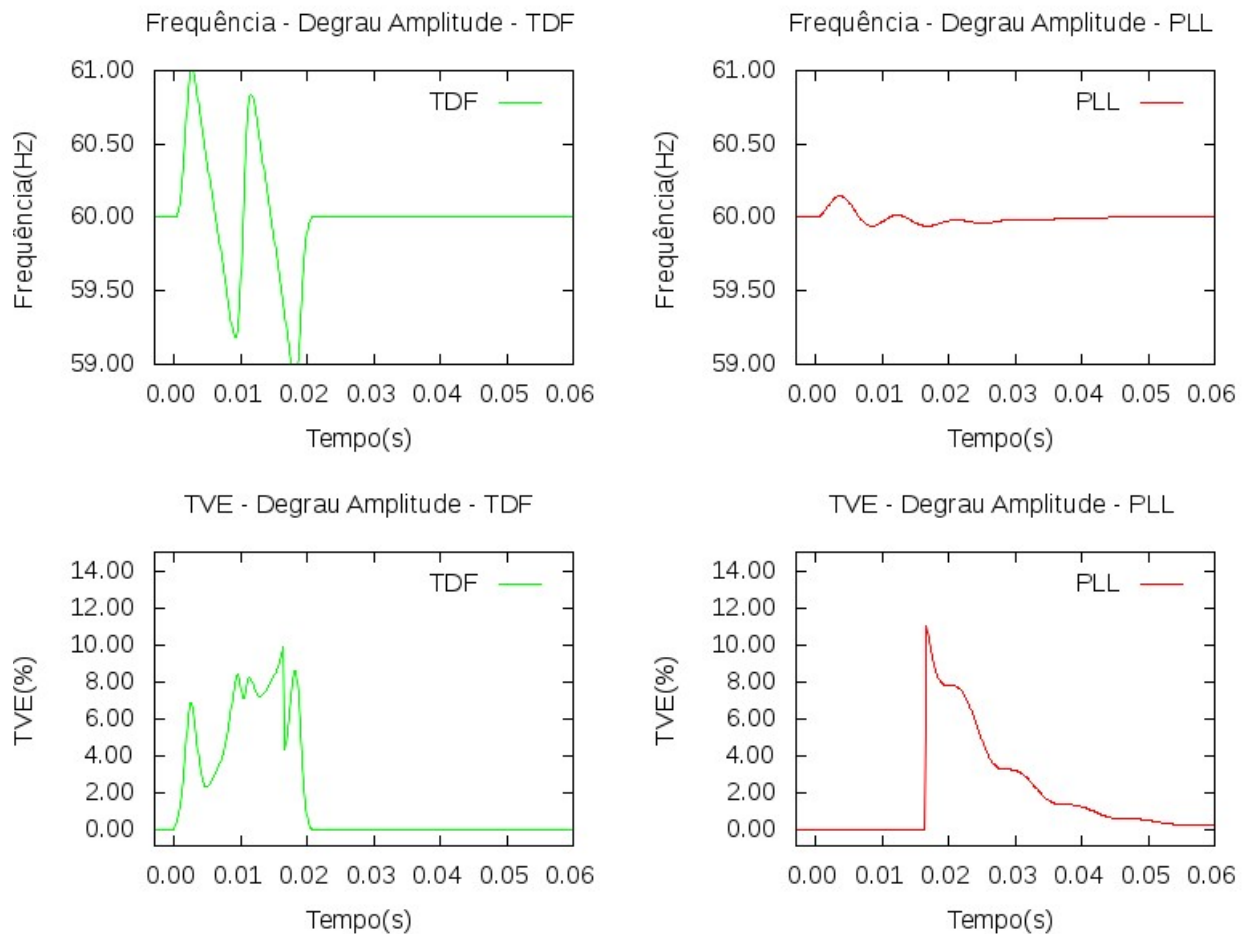


Figura 12: Resposta da TDF e PLL para Degrau de Amplitude

O tempo de recuperação do algoritmo que utiliza a TDF é de aproximadamente 0,02 segundos e o tempo do PLL é de aproximadamente 0,042 segundos. Apesar deste tempo, o PLL ainda não está totalmente recuperado e irá, gradualmente, retornando a fornecer uma estimativa mais precisa.

Comparando estes métodos com o AG já é possível notar que o PLL é o que possui o maior tempo de recuperação, pois utiliza um método recursivo, ou seja, a resposta atual depende de respostas passadas, como mostrado na explicação do método. Porém, como será visto adiante, isto auxilia quando o mesmo opera em regime permanente, fazendo com que o PLL forneça a melhor resposta neste regime.

O algoritmo que utiliza a TDF possui um tempo de recuperação intermediário, menor que o tempo necessário pelo PLL e maior do que dos algoritmos que envolvem o AG.

Estes dois algoritmos clássicos são métodos analíticos e portanto fornecerão as mesmas respostas para os mesmos dados, diferentemente do AG que cada vez que opera, encontra uma solução próxima da solução ótimo, porém, nem sempre é a ótima

ou a mesma.

Seguem agora as respostas ao segundo teste, o degrau de 90° na fase.

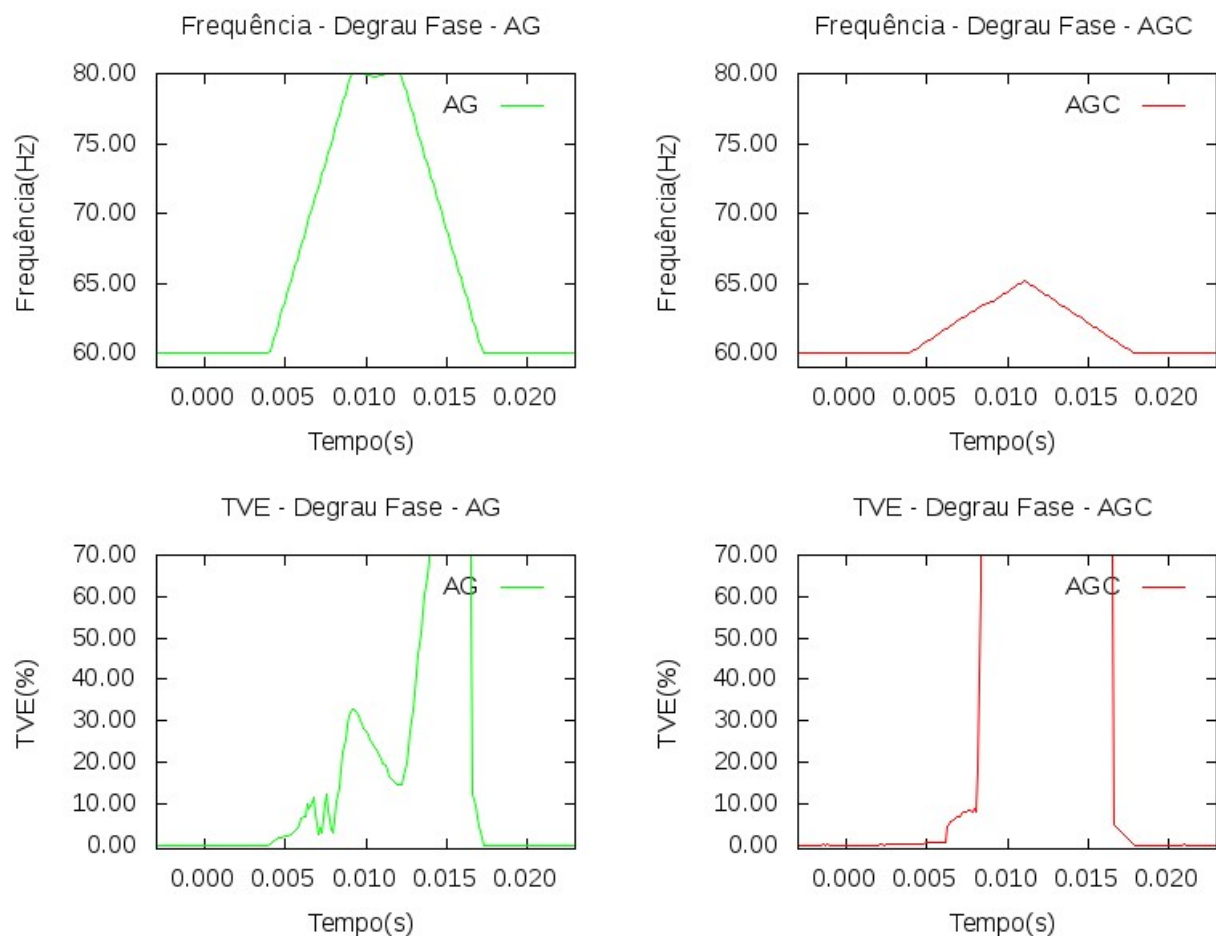


Figura 13: Resposta do AG e AGC para Degrau de Fase

Novamente é possível observar a eficácia dos métodos que utilizam o AG para se *recuperar* de um transitório. O tempo de recuperação neste caso é igual ao do primeiro teste, 16,6 ms, ou seja, um ciclo de onda fundamental.

Dentre todos os testes, este é o que fornece o maior TVE durante o regime transitório. O valor máximo de TVE não está contido nos gráficos, mas é uma informação irrelevante perante a norma, devido à explicação dada anteriormente: não há restrições para o erro em regime transitório.

Desta vez é possível notar maiores diferenças entre o Algoritmo Genético Simples e o AGC, como no gráfico do rastreamento de frequência. O AGC utiliza números binários em seus cálculos e, assim como explicado anteriormente, estes números necessitam ser representados no espaço real. Para isto, cada valor binário corresponde a um valor real em um espaço pré-determinado, ou seja, limitado. Essa

limitação evita que o AGc possua grandes variações em sua resposta. Mesmo assim, a aparência da curva é a mesma, um aumento linear, depois um decréscimo linear.

A resposta dos algoritmos clássicos quando aplicados neste teste está mostrada na Figura 14.

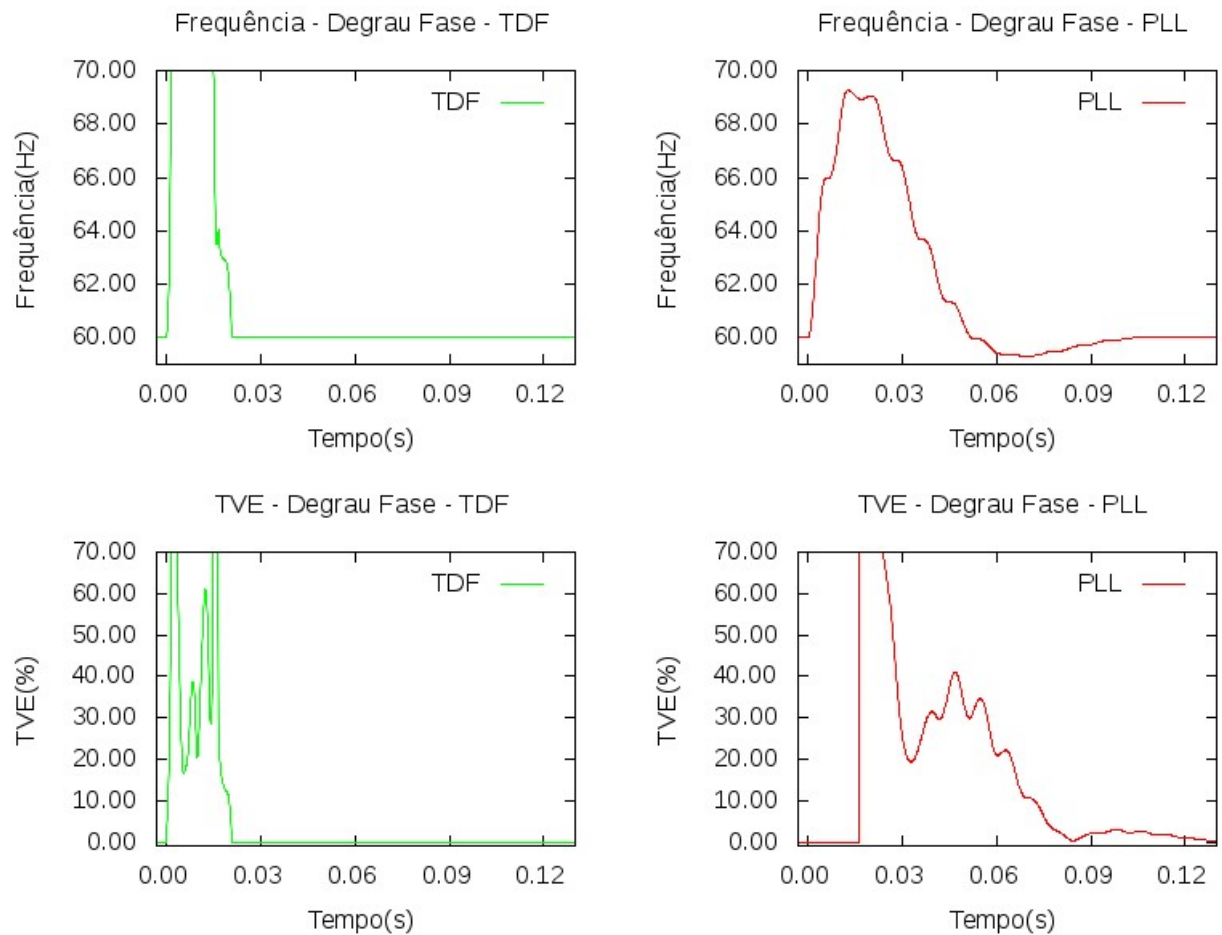


Figura 14: Resposta da TDF e PLL para Degrau de Fase

Novamente é possível notar as características já citadas anteriormente: PLL possuindo maior tempo de recuperação, TDF com um tempo de recuperação menor que o PLL e maior do que os algoritmos que utilizam o AG e boa resposta em regime permanente.

Segue então o último teste sugerido pela norma, a aplicação de um degrau na frequência de 5 Hz.

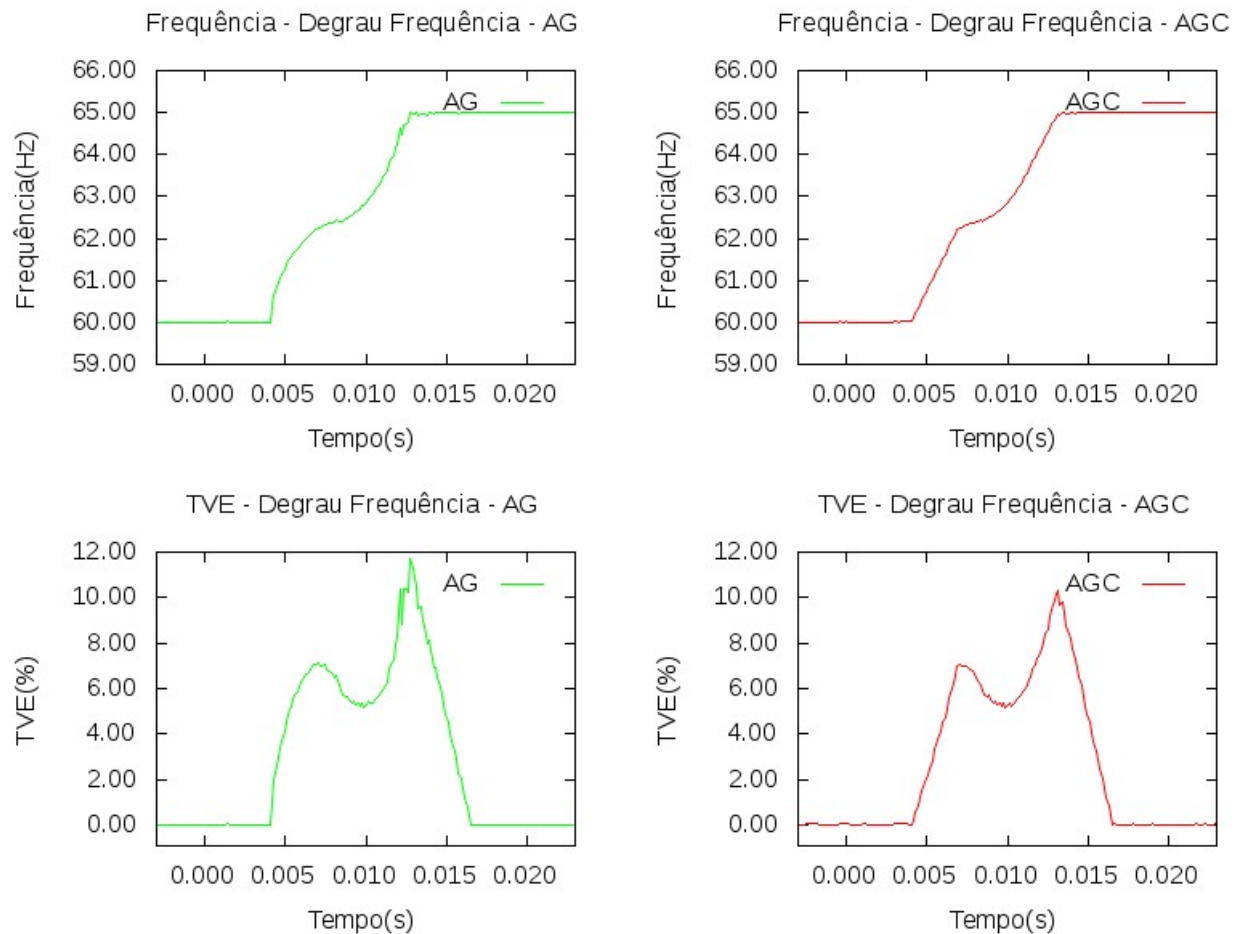


Figura 15: Resposta do AG e AGc para Degrau de Frequência

Estes gráficos mostram a excelente resposta do AG e do AGc mesmo com um degrau na frequência consideravelmente alto, pois uma variação de 5 Hz permanente não ocorre em sistemas elétricos reais. É possível notar que mesmo longe da frequência nominal, estas conseguem rastrear corretamente depois de um curto intervalo de tempo, um ciclo de onda fundamental, voltando a fornecer TVE menor do que o limite estipulado pelo IEEE.

A Figura 16 apresenta as respostas dos algoritmos que utilizam a TDF e o PLL.

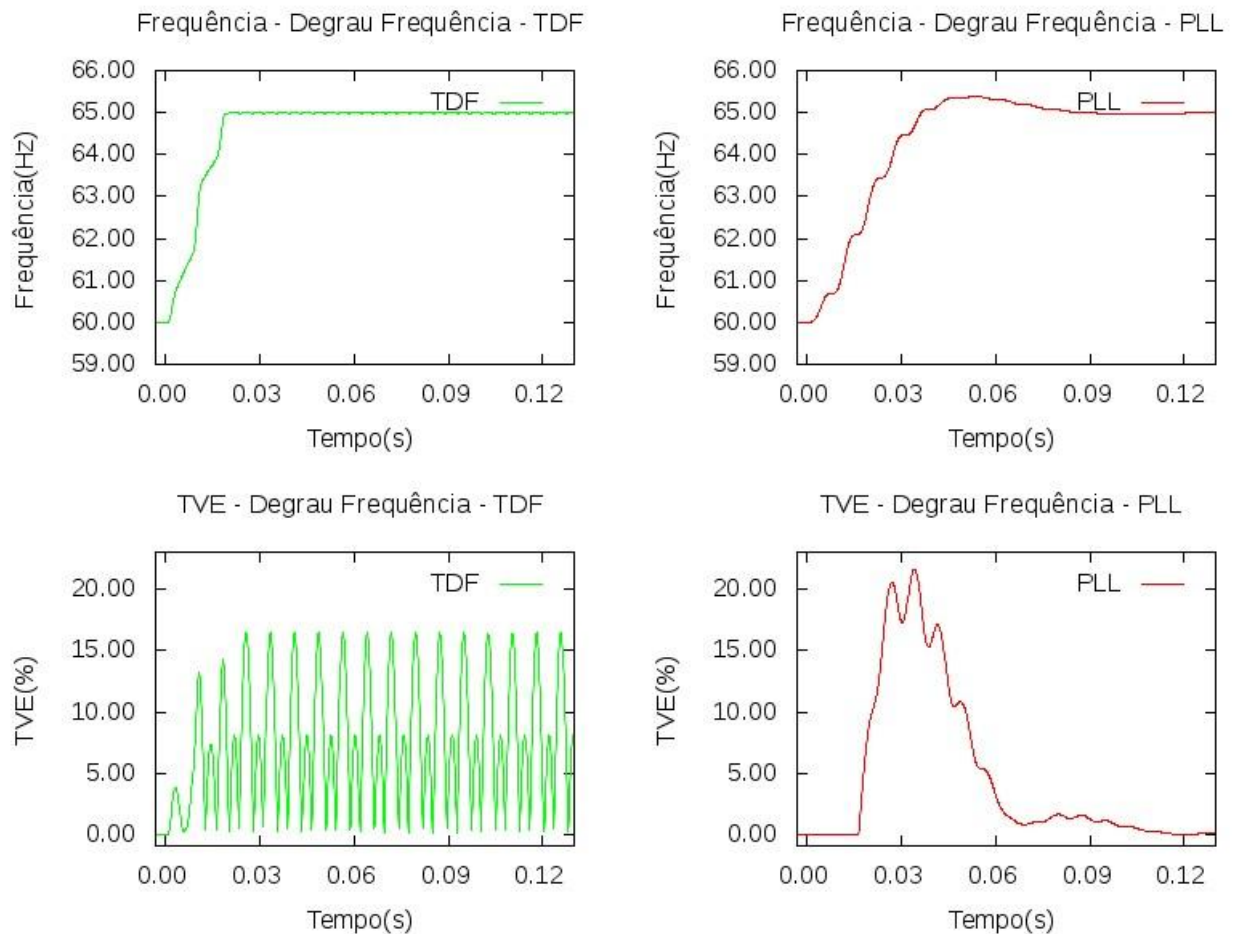


Figura 16: Resposta da TDF e PLL para Degrau de Frequência

A resposta do algoritmo PLL possui as mesmas características anteriores e, mesmo com um degrau de 5 Hz, consegue se recuperar e volta a possuir TVE menor que 1%.

Já o algoritmo que utiliza a TDF não se recuperou. Apesar do rastreamento de frequência não apresentar grandes erros, é possível notar uma oscilação periódica no TVE, com erros muito elevados, pois o fasor como um todo não está sendo bem estimado. Como os próprios autores dizem em [11], a imprecisão deste método aumenta de acordo com a distância da frequência nominal utilizada, no caso, 60 Hz. Como depois do degrau a frequência se encontra em 65 Hz, a estimativa é imprecisa.

6.2. Aplicação no Sistema Elétrico Simulado

Nesta seção serão expostos os resultados obtidos através da aplicação dos estimadores fasoriais nos dados coletados a partir das simulações realizadas através do *software ATP*. A barra escolhida para o rastreamento da frequência foi a barra de interligação 3. Todos os testes foram realizados no instante de tempo de 30 segundos.

Para comparar os métodos entre si e servir de referência, foi utilizada também a frequência estimada pelo próprio ATP. Como o SEP simulado possui mais de uma máquina, a frequência do sistema consiste em uma combinação das frequências das máquinas. Em regime permanente, todas as máquinas estarão na mesma velocidade de rotação, porém na presença de situações transtóricas, como elas são diferentes entre si, cada uma estará em uma frequência. Desta forma, o próprio *software* ATP utiliza um método para calcular a frequência em um determinado ponto do SEP. O método utilizado é chamado de Cruzamento por Zero e consiste na medição do tempo entre dois zeros, sendo a frequência obtida através da seguinte equação:

$$f = \frac{1}{(2(T_1 - T_2))} \quad (27)$$

em que T1 e T2 são os tempos em que ocorreu o cruzamento por zero.

Porém, dificilmente ocorrerá exatamente um zero nos pontos amostrados, portanto, utiliza-se uma interpolação linear entre os dois pontos consecutivos com sinais opostos para estimar o tempo de cruzamento por zero.

6.2.1. Entrada de Carga

Para simular a entrada de carga, o sistema foi inicializado apenas com 125 MVA de carga no sistema 3. Aos 30 segundos, foi inserida a outra carga com 125 MVA de potência na mesma barra. Os quatro algoritmos foram utilizados para estimar os fasores e a resposta de cada um segue na figura 17.

Como é possível observar, a frequência do sistema diminuiu com o acréscimo de carga. Isto ocorre pois o torque mecânico e elétrico nos geradores está relacionado com a variação de frequência de acordo com a equação abaixo:

$$T_a = T_{mec} - T_{ele} = J * \left(\frac{\partial \omega}{\partial t} \right) \quad (28)$$

Em que: T_a é o torque de aceleração, T_{mec} é o torque mecânico fornecido, T_{ele} é o torque elétrico e ω é a frequência do sistema em rad/s.

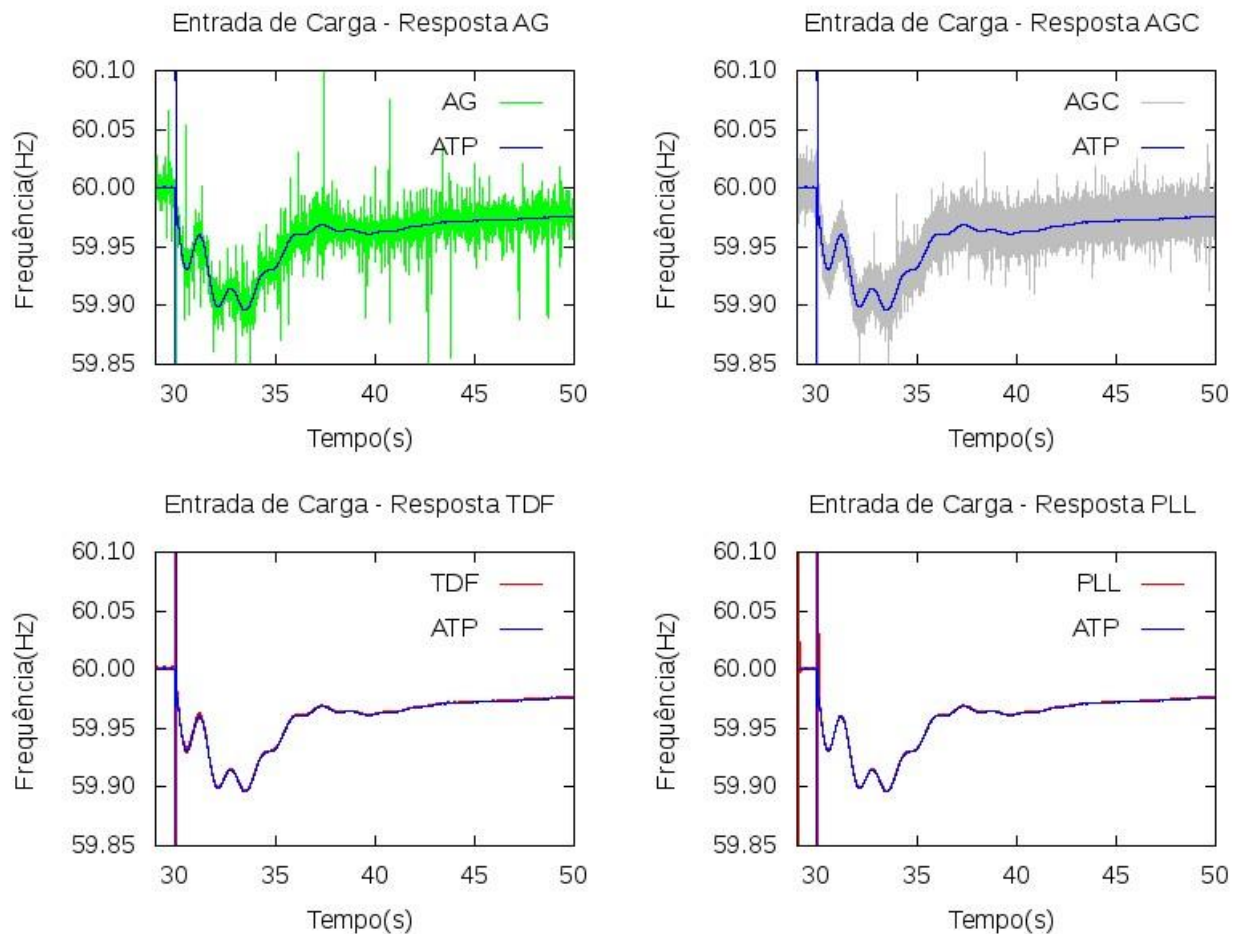


Figura 17: Resposta dos algoritmos para Entrada de Carga

Quando há a entrada de carga no sistema, há o aumento instantâneo do torque elétrico. Como o torque mecânico não aumenta instantaneamente, pois o regulador de velocidade necessita abrir a comporta ou regular a queima de carvão, a derivada da frequência se torna negativa, o que implica na queda de frequência. Quando o regulador começa agir aumentando o torque mecânico, a frequência para de cair e retorna próximo da frequência nominal 60 Hz, mas sempre um pouco distante, pois apenas foi implementado o regulador primário, que apenas age para manter a frequência próxima da nominal. Para fazer com que a mesma retorne ao valor inicial, há reguladores secundários, que demoram minutos para agir. Como o tempo de simulação não passa dos 50 segundos, estes não foram implementados.

É possível perceber que todos os 4 algoritmos conseguiram rastrear a frequência corretamente e todos fornecem erro dentro dos limites estabelecidos pela norma. Como a variação de frequência em uma situação real não ocorre de forma tão brusca como nos testes sintéticos, o sinal se aproxima a uma sequência de estados permanentes, pois a resposta dos algoritmos é muito mais rápida do que a variação de frequência.

Assim, os algoritmos clássicos apresentam melhor resposta do que os métodos que utilizam o Algoritmo Genético, pois nem sempre estes fornecem a resposta ótima, mas sim respostas próximas do ótimo.

O erro presente nos AGs, muito similar a um ruído, provém do fato de que cada estimativa para um conjunto de pontos amostrados é totalmente independente da anterior e da próxima, e como a resposta do AG não é necessariamente o melhor indivíduo da população, acaba apresentando um erro aleatório, característico de algoritmos evolutivos. Porém, é possível implementar um filtro de saída para amenizar esta variação natural do AG e do AGc. Na implementação em *hardware*, é utilizado um filtro de média móvel que elimina este aspecto ruidoso, que não foi implementado nos testes em *software* para que estas respostas mostrem como é a saída de um AG puro.

Os algoritmos clássicos apresentam erro muito baixo em regime permanente, o que é mostrado pelo gráfico, pois a curva fornecida pelo *software* ATP sobrepõe praticamente toda a curva fornecida pela TDF e pelo PLL.

6.2.2. Saída de Carga

Para simular a resposta do sistema a saída de uma carga, o sistema foi inicializado com todas as cargas descritas na figura 4 e aos 30 segundos, foi retirada 50% da carga do sistema 3, ou seja, 125 MVA.

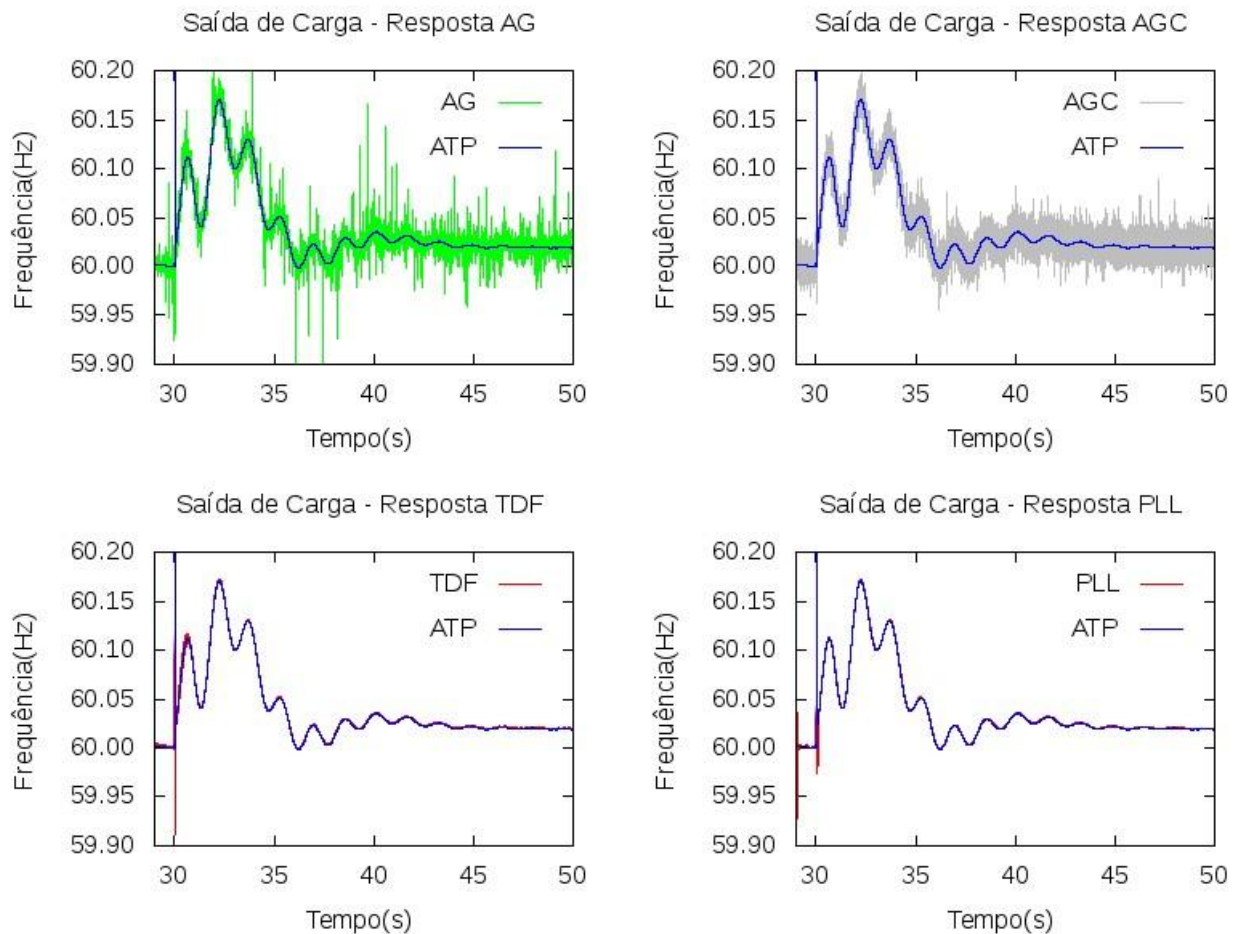


Figura 18: Resposta dos algoritmos para Saída de Carga

Neste caso, houve o aumento momentâneo da frequência, pois com a saída de carga, o torque elétrico diminui, e como o torque mecânico não aumenta instantaneamente, a derivada da frequência se torna positiva, fazendo com que haja o aumento da frequência.

É possível também perceber que todos os algoritmos rastream corretamente a frequência e que a resposta do AG e do AGC fornece também os erros aleatórios característicos do algoritmo genético para equações com muitos ótimos locais.

Como é possível observar no aumento da frequência deste caso, ou na queda de frequência do caso anterior, estas variações não são uniformes no tempo. Elas possuem oscilações devido a interação que há entre as máquinas do sistema, e entre a relação de geração-demanda de energia.

6.2.3. Ilhamento do Sistema 2

Para simular o ilhamento do sistema 2, aos 30 segundos foram abertas as

chaves entre os transformadores da linha de interligação LT12 e a própria linha. Segue então a resposta dos algoritmos na Figura 19.

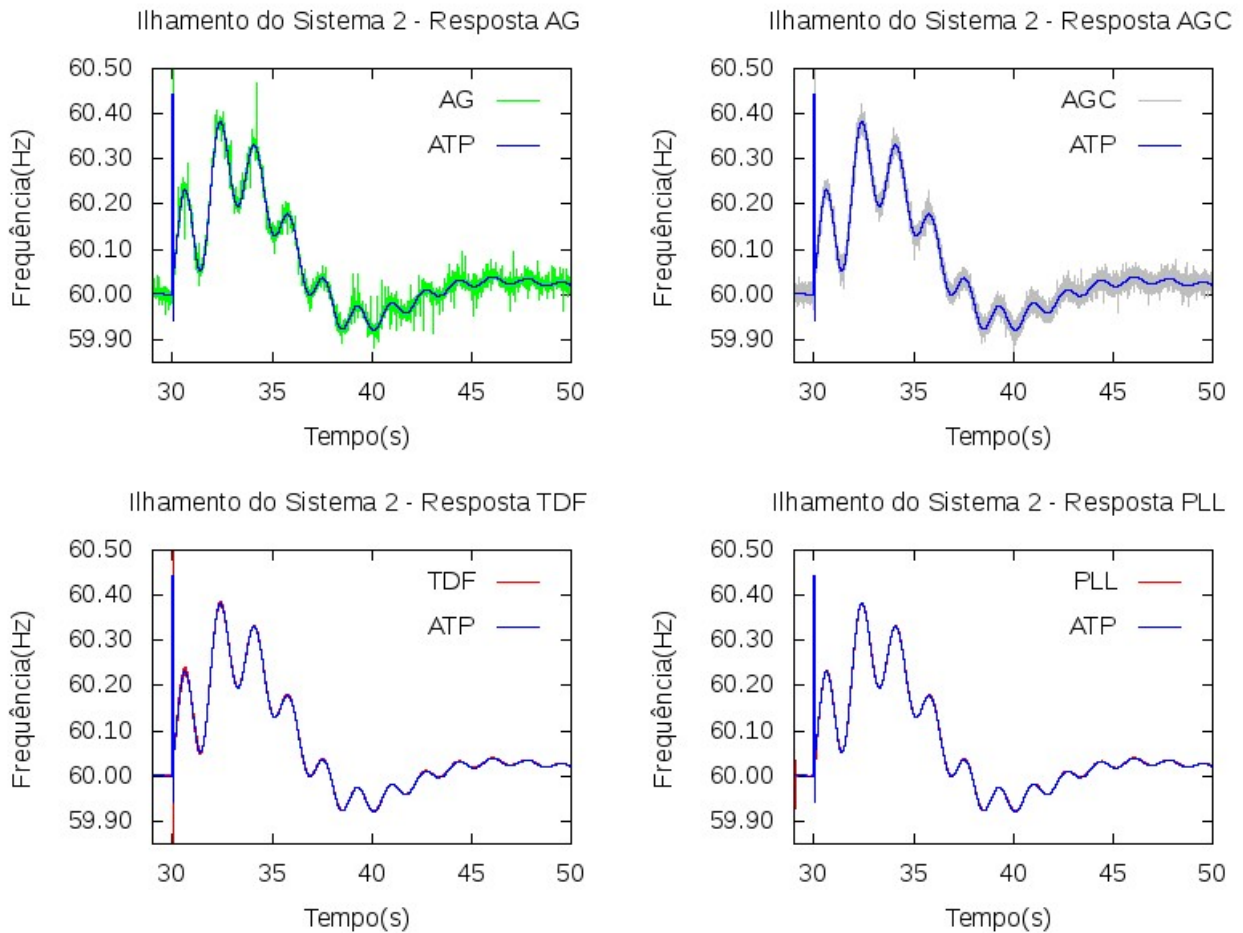


Figura 19: Resposta dos algoritmos para Ilhamento do Sistema 2

Houve o aumento da frequência, pois o sistema 2 estava recebendo potência do sistema interligado, com mais demanda de energia elétrica do que sua unidade geradora conseguia suprir. Assim, quando o sistema 2 foi ilhado, a frequência do Sistema Interligado reage como se tivesse sido retirada uma carga, ou houvesse um aumento de geração.

Vale ressaltar que neste caso, o sistema ilhado não irá manter a frequência nominal, pois sua geração não conseguirá suprir a demanda, o que implicará em uma queda contínua de frequência, o que fornecerá uma representação gráfica similar ao próximo teste realizado.

Neste caso do ilhamento do sistema 2, houve uma variação de frequência maior do que nos casos anteriores e, portanto, os limites do eixo da frequência foram

aumentados, o que acarreta na diminuição dos detalhes de todos gráficos, fazendo com que seja menos visível ainda a resposta do algoritmo que utiliza a TDF e o PLL e também mostra que, apesar de nos outros gráficos o erro do AG e do AGC parecerem grandes, é apenas uma impressão visual graças a escala menor.

6.2.4. Ilhamento Sistema 3

Neste teste, foi realizado o mesmo procedimento que o teste anterior, porém agora com a linha de interligação 1-3. Assim, o sistema 3 ficou ilhado e o rastreamento da frequência da barra de interligação 3 feita pelos algoritmos segue na Figura 20.

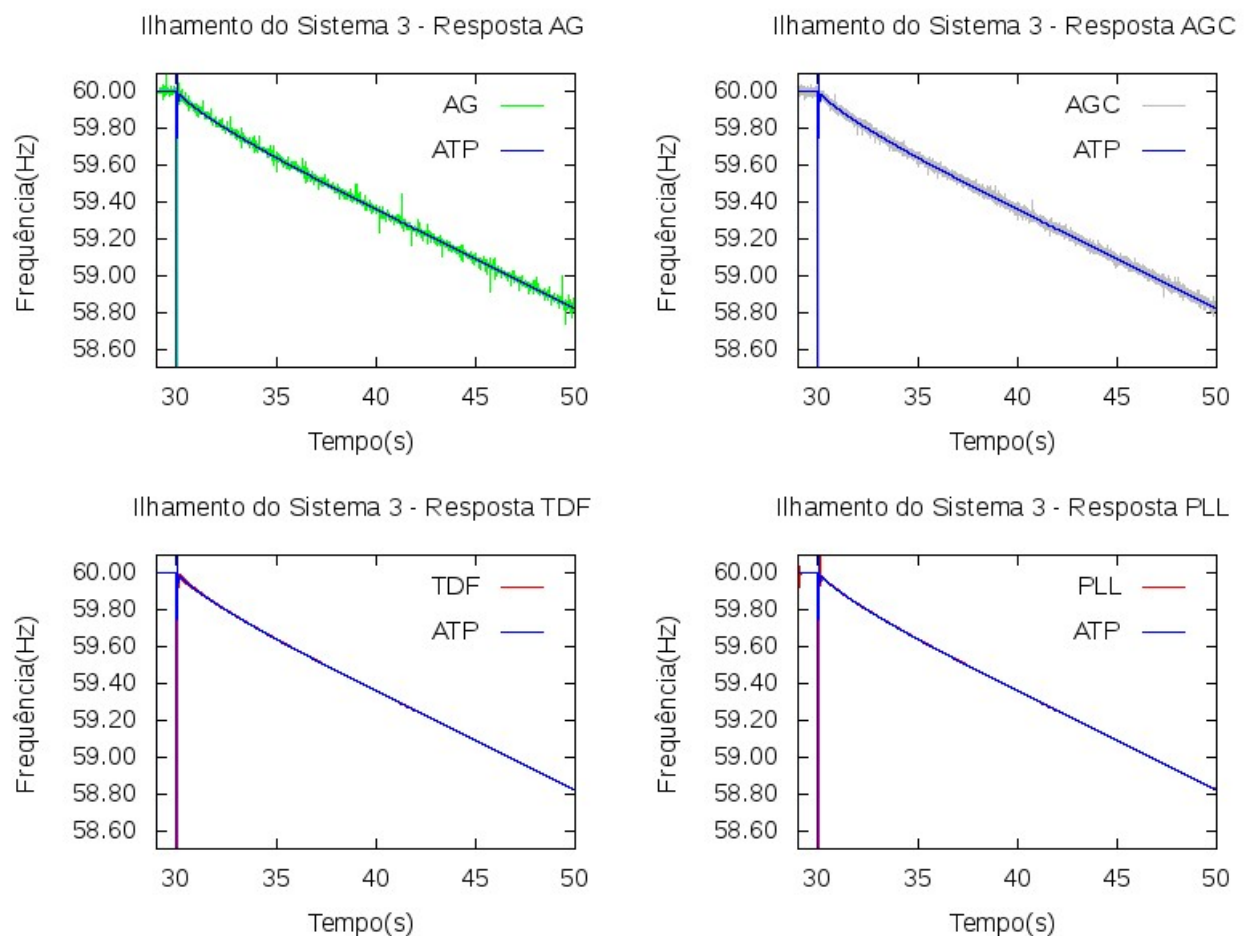


Figura 20: Resposta dos algoritmos para Ilhamento do Sistema 3

O sistema 3 possui maior consumo de energia do que geração. Portanto, o fluxo de potência através da linha de interligação 1-3 supre a demanda excedente. Quando há o ilhamento do sistema 3, a unidade geradora 3 de 90 MVA não consegue suprir a demanda de 250 MVA, fazendo com que o torque mecânico fique menor do que o torque elétrico, o que acarreta na queda da frequência, como mostram os gráficos.

As respostas dos algoritmos são satisfatórias para este caso também. Porém, caso a queda da frequência fosse ainda maior, o algoritmo que utiliza a TDF iria começar a ficar impreciso, pois estaria operando em uma frequência muito distante da frequência fundamental, conforme mostrado no teste do degrau de frequência de 5 Hz sugerido pela norma.

6.2.5. Retirada da Unidade de Geração 2

Para realizar a retirada da unidade de geração 2, foram abertas as chaves que ligam os transformadores da linha de transmissão 2 com a própria linha.

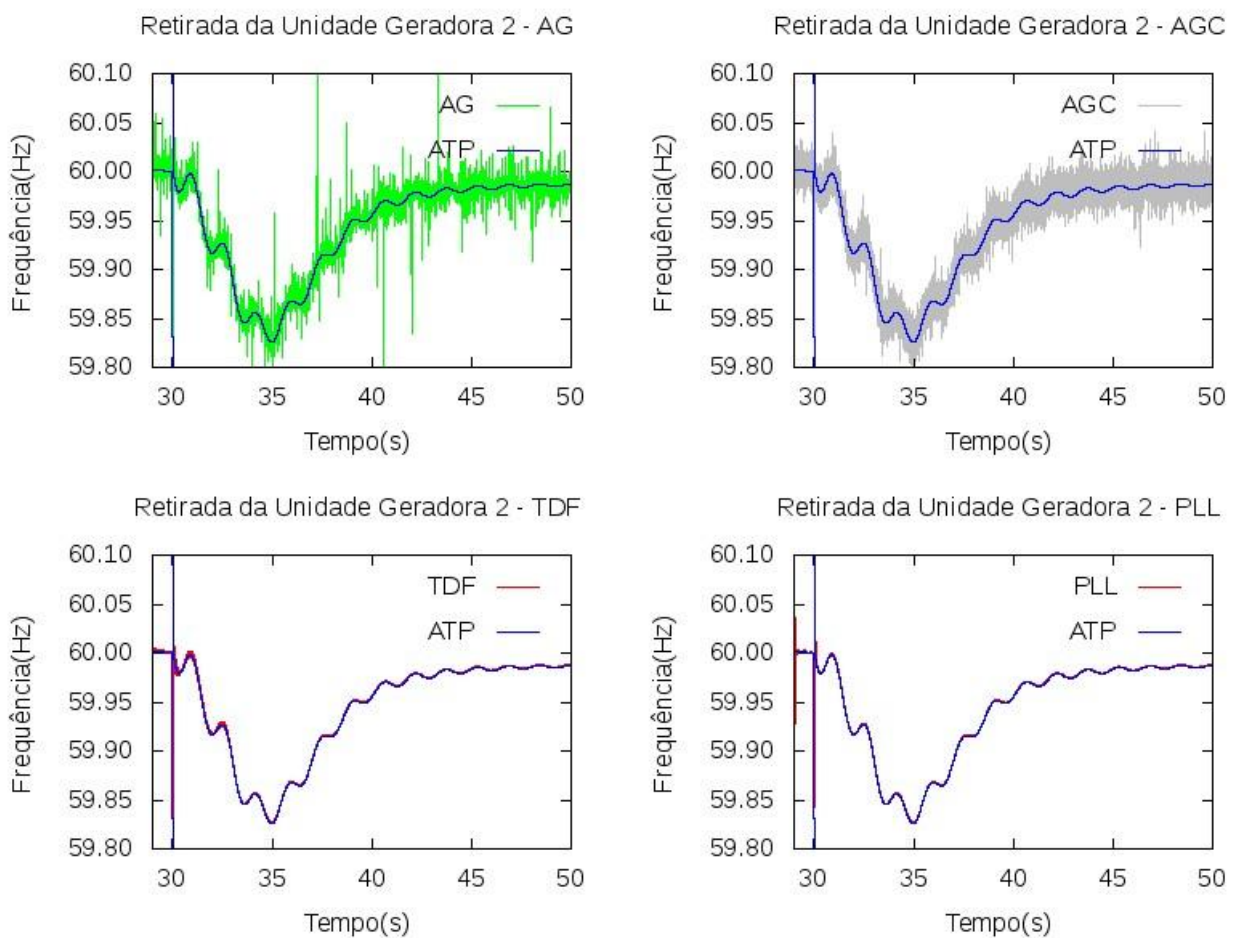


Figura 21: Resposta dos algoritmos para Retirada da UG 2

É possível novamente visualizar a melhor resposta do PLL e do TDF, mas todos os algoritmos conseguiram rastrear corretamente a frequência do barramento.

Neste caso, a retirada de uma unidade geradora implica na diminuição do torque mecânico total do sistema, como o torque elétrico continua constante, ocorre a queda da frequência. Os reguladores de frequência atuam abrindo mais as turbinas dos geradores

hidráulicos e térmicos fazendo com aumente o torque mecânico, para que a frequência do sistema volte a se estabilizar. A frequência novamente não volta exatamente para a frequência nominal pois não estão agindo os reguladores secundários.

6.2.6. Retirada da Unidade de Geração 3

Para simular a retirada da unidade geradora 3, utilizou-se o mesmo procedimento do teste anterior, porém agora na linha de transmissão 3.

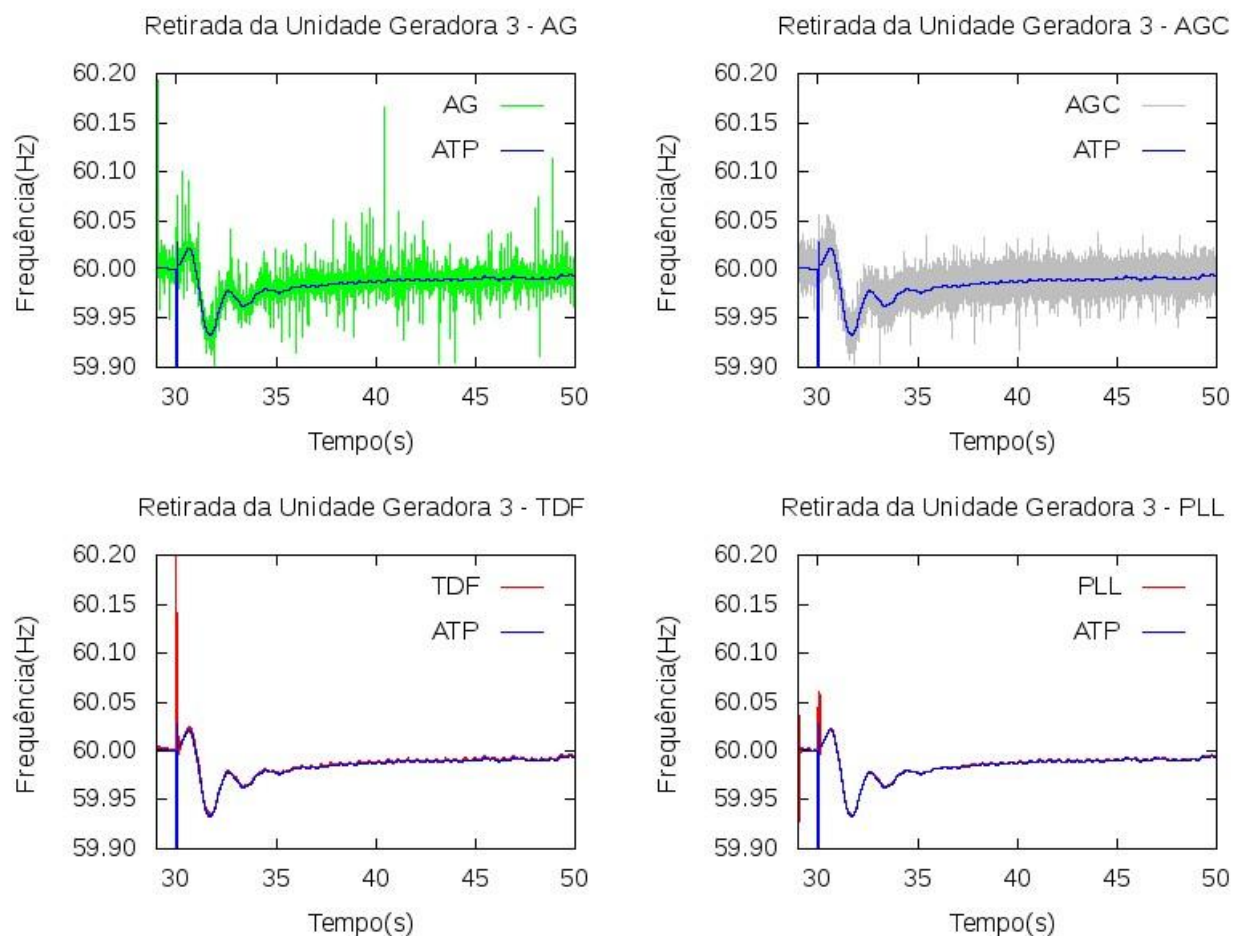


Figura 22: Resposta dos algoritmos para Retirada da UG 3

Neste caso, há também a queda de frequência pelo mesmo motivo explicado no caso anterior. Porém esta queda é menor. Isto ocorre pois o tamanho da unidade geradora retirada agora é menor do que a unidade geradora retirada anteriormente, ou seja, a máxima diferença do torque mecânico e elétrico é muito menor agora, fazendo com que a derivada da frequência do sistema seja menor, ocasionando uma queda inferior ao caso anterior.

7. Implementação do AGc em *Hardware*

Para usufruir do paralelismo intrínseco aos algoritmos genéticos, implementou-se o AGc em *hardware*, diminuindo bruscamente o tempo de processamento para fornecer as estimativas fasoriais, possibilitando uma aplicação em tempo real do AG. Neste capítulo, serão apresentados o circuito integrado utilizado, as considerações necessárias para realizar a implementação, a arquitetura proposta e os resultados obtidos em suas aplicações em casos simulados no ATP.

Deve ser enfatizado que esta aplicação foi desenvolvida em conjunto aos trabalhos associados à uma dissertação de mestrado [24] realizada no Laboratório de Sistemas de Energia Elétrica – EESC/USP.

7.1. *Field-Programmable Gate Array*

Um FPGA (*Field Programmable Gate Array*) é um circuito integrado projetado para ser programado após a sua fabricação. A programação de um FPGA é usualmente feita utilizando-se VHDL (*VHSIC Hardware Description Language*) ou Verilog, que são linguagens de descrição de *hardware*. Qualquer função lógica que poderia ser implementada por um circuito integrado de aplicação específica, pode ser implementado nas FPGAs. A possibilidade de reconfigurar um FPGA em contraste com os custos de alteração de um circuito *Application Specific Integrated Circuit* (ASIC) oferece mais vantagens para muitas aplicações, especialmente onde existe uma baixa demanda por unidades de circuitos lógicos, não justificando assim a utilização de um ASIC.

FPGAs são compostos por componentes de lógica programável chamados “blocos lógicos”, e uma hierarquia de interconexões reconfiguráveis que permitem os blocos se ligarem uns aos outros. Os blocos lógicos podem ser configurados para implementar funções combinacionais complexas ou até funções lógicas simples, como “E” e “OU” lógicos. Em muitos FPGAs também são incluídos elementos de memórias que podem ser simples *Flip-Flops* ou blocos de memórias mais complexas.

7.2. Considerações para a Implementação em FPGA

Para realizar a implementação dos AGs em FPGA, é necessário utilizar linguagens de alto nível em conjunto com uma abordagem que utiliza lógica combinacional e máquinas de estado, possibilitando que estes sejam executados de maneira mais eficiente do que em computadores com arquitetura de processadores

convencionais, pois são realizados de forma paralela, e não sequenciais. Como os cálculos realizados para realizar uma estimação no Algoritmo Genético são paralelos entre os indivíduos, isto é de grande valia para diminuir o tempo de processamento. No entanto, apesar de fornecer uma maior velocidade de processamento, há certas limitações impostas pelas funcionalidades dos blocos lógicos presentes nos FPGAs, bem como em sua quantidade limitada, algumas considerações devem ser feitas para que ocorra a implementação de AGs em FPGA de forma bem sucedida e serão apresentadas a seguir.

Para a implementação do AGc, este algoritmo foi modelado através de uma máquina de estados finitos. Além disso, foram feitas outras importantes considerações para a utilização do AGc para o problema de estimação fasorial tais como a geração de sequências pseudo aleatórias, implementação da função trigonométrica seno e simplificações para avaliação da função objetivo. Os procedimentos adotados para a implementação do AGc estão descritos a seguir.

7.2.1. Geração de Sequências Pseudoaleatórias

A utilização de números aleatórios é de fundamental importância para o funcionamento dos AGs. É a aleatoriedade do processo que torna os Algoritmos Evolutivos uma ferramenta tão robusta em problemas de otimização de função. Neste caso do AGc, a aleatoriedade é crucial no processo de criação de novos indivíduos pelo modelo de probabilidade de distribuição. As implementações computacionais de AGs realizadas anteriormente na linguagem C++, utilizam uma função disponibilizada pela biblioteca padrão de programação, que gera uma sequência pseudoaleatória através de métodos numéricos. Porém, isto não é possível de ser realizado em uma implementação em FPGA devido às limitações supracitadas.

Uma alternativa possível é a utilização de uma tabela com uma sequência pseudoaleatória grande o suficiente para permitir o funcionamento dos Algoritmos Genéticos. Neste caso, basta coletar um termo da tabela e utilizá-lo no processo. No entanto, esta estratégia demanda a utilização de grande número de blocos lógicos. A solução utilizada para suprir este problema é a utilização de uma estrutura combinacional conhecida como *Linear Feedback Shift Register* (LFSR) que gera de forma *on-line* uma sequência de números pseudoaleatória. O benefício de utilizar tal solução é a simplicidade de implementação e a não dependência de uma sequência de números muito grande armazenada. A estrutura do LFSR é ilustrada na Figura 23:

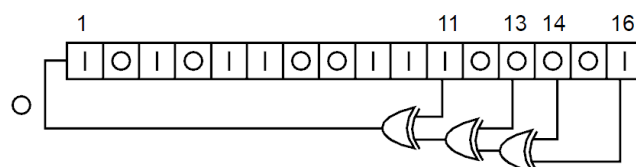


Figura 23: LFSR

A cada utilização do LFSR ocorre um deslocamento dos bits para a esquerda e o bit que será posicionado na posição 1 será o resultante da lógica combinacional composta por portas XOR (“ou exclusivo”). Esta estratégia composta de deslocamento de bits e a realimentação pela lógica combinacional permite a criação de uma sequência pseudoaleatória de tamanho 2^N em que N é o tamanho da estrutura de bits do LFSR. Para a implementação deste trabalho foram utilizados LFSR de tamanho 16.

7.2.2. Máquina de Estados do Algoritmo Genético Compacto

O AGc foi implementado em FPGA por meio da modelagem de uma máquina de estados finitos, de acordo com a Figura 24. Em cada um dos estados, um procedimento do AGc é efetuado. No estado de início, o vetor de probabilidades é iniciado e em seguida, no estado de geração, dois indivíduos são gerados com base no vetor de probabilidades. Logo após, os dois indivíduos são avaliados com base na função de avaliação. Em seguida, os *fitness* dos indivíduos são comparados no estado de comparação, similar ao método de seleção Torneio de 2. Por fim, o vetor de probabilidades é atualizado. Este processo é iterativo e o estado de resultados, onde os resultados são publicados em um barramento de dados só é alcançado quando é atingido o critério de parada. Neste trabalho, o critério utilizado é o número de gerações, ou seja, quando número de gerações for maior ou igual ao número máximo de gerações pré-determinado, o processo iterativo termina. O estado final da máquina de estados é ele mesmo, ou seja, a máquina de estados fica parada permanentemente até ser reiniciada.

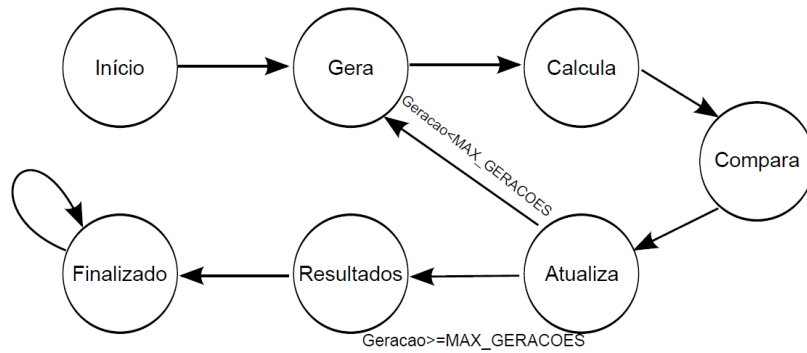


Figura 24: Máquina de Estados utilizada para Modelar o AGC

É importante ressaltar que o processo de geração dos indivíduos e a avaliação da função objetivo são executados em paralelo para os dois indivíduos, principal fator que levou o AGC a ser implementado em FPGA, para que estes cálculos sejam realizados de forma paralela.

7.2.3. Implementação da Função Trigonométrica Seno

A função trigonométrica seno é essencial para a avaliação da função objetivo do problema de estimação fasorial. Funções trigonométricas são implementadas por bibliotecas computacionais, pela expansão destas em séries de Taylor. Entretanto, novamente, devido as limitações do FPGA não é possível utilizar tal abordagem. Outra abordagem conhecida no meio digital, onde se têm restrições de uso de lógica e poder de processamento é a utilização de um algoritmo conhecido como *Coordinate Rotation Digital Computer* (CORDIC) [24]. No entanto, a utilização deste método é inviável devido ao excessivo número de avaliações da função objetivo pelo fato de cada avaliação do método demandar alguns ciclos de *clock*. A solução empregada foi a utilização de uma *Lookup table*, ou vetor de associação, que contém os valores da função seno discretizados. Esta abordagem permite a avaliação da função objetivo sem restrições de tempo.

7.2.4. Forma de Avaliação da Função Objetivo

A avaliação da função objetivo envolve uma série de operações matemáticas que são custosas computacionalmente. Para que a avaliação da função objetivo em *hardware* fosse possível foi necessário realizar algumas simplificações e considerações. Considerando-se a equação da função objetivo, o termo que está dentro da função seno pode ser representado por

$$2\pi f k T + \theta = W + \theta \quad (29)$$

Para a implementação em *hardware*, foi considerado o cromossomo responsável por calcular a frequência como W , ao invés de simplesmente f , como na implementação computacional. Desta forma é possível mapear o intervalo $[0:2\pi]$ dentro do intervalo inteiro $[0:2^{16} - 1]$. Outra simplificação foi considerar o cromossomo com $k = 8$. Tal estratégia facilita o cálculo dos vários termos da função objetivo, como observado a seguir:

$$W = 2\pi f 8T$$

$$\frac{W}{2} = 2\pi f 4T$$

$$\frac{W}{4} = 2\pi f 2T$$

$$\frac{W}{8} = 2\pi f T$$

$$\frac{W}{8} + \frac{W}{4} = 2\pi f 3T$$

$$\frac{W}{8} + \frac{W}{2} = 2\pi f 5T$$

$$\frac{W}{4} + \frac{W}{2} = 2\pi f 6T$$

$$\frac{W}{8} + \frac{W}{4} + \frac{W}{2} = 2\pi f 7T$$

...

As operações descritas anteriormente podem ser realizadas por simples rotacionamentos de bits e somas, facilitando assim a avaliação da função objetivo pois os termos para todos os valores de k poderão ser calculados.

7.3. Arquitetura proposta

A implementação prática da arquitetura aqui descrita se utilizou de uma FPGA Stratix III da fabricante Altera. Foi utilizado o kit de desenvolvimento “*Stratix III FPGA Development Kit*”. A Stratix III possui as seguintes características:

- 142.500 equivalentes de elementos lógicos
- 744 pinos de I/O configuráveis
- 384 multiplexadores de 18x18

A foto do kit utilizado pode ser observada na Figura 25. O kit dispõe de diversas

interfaces de entrada e saída, dentre as quais ressaltamos a porta *ethernet*, que permite que o kit seja conectado a uma rede de computadores.



Figura 25: Kit de Desenvolvimento Stratix III utilizado

A codificação do AGc em VHDL, quando compilada pelo *software* Quartus II da Altera, gera a descrição de um *hardware* que pode ser gravada no *chip* de FPGA. Entretanto, é necessário uma arquitetura de apoio para que os dados de entrada possam ser enviados para a lógica sintetizada relativa ao AGc, e os resultados de sua análise obtidos. Para suprir essa necessidade, foi utilizada a solução da Altera de *System on a Programmable Chip*, ou Sistema em um *Chip* Programável. Tal solução dispõe de um processador, o *softcore* NIOS II, em um barramento de dados que pode ser compartilhado com diversos outros dispositivos. O processador da NIOS II é chamado *softcore* pois é descrito em linguagem de descrição de *hardware* e logo após gravado. Dentre os dispositivos que podem ser alocados no barramento de dados estão: controladores de rede, controladores de LCD, controladores de memória e lógicas customizadas.

Desta forma, foi criado um sistema onde o AGc implementado em VHDL foi alocado no barramento de dados do processador NIOS II, como descrito na Figura 26. Além do CPU e do AGc também foram alocados controladores de rede, controladores de memória, dentre outros elementos. Tal arquitetura possibilita o *hardware* executar um sistema operacional para inicializar e operar programas, flexibilizando a comunicação com o *hardware* desenvolvido.

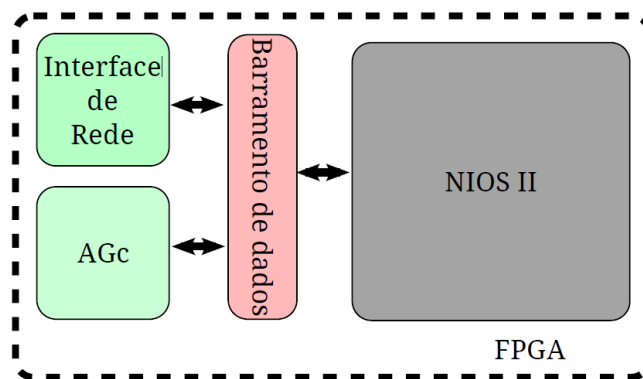


Figura 26: Arquitetura implementada

O sistema operacional uC/COS-II foi utilizado no sistema de *hardware* desenvolvido. Neste passo, é utilizada uma arquitetura cliente servidor, em que o cliente é o kit de desenvolvimento, e o servidor é um computador pessoal.

No lado do servidor, foi desenvolvido um programa escrito na linguagem C que acessa o barramento de dados e se comunica com o *hardware* relativo ao AGc. Quando este programa é executado, os dados a serem processados pelo *hardware* do AGc chegam por rede advindas do cliente, através de uma conexão TCP/IP via *sockets*. Os dados são processados e logo após os resultados são enviados ao cliente.

Do lado do cliente, os dados são enviados continuamente e os resultados são gravados em arquivos para posterior análise.

7.4. Resultados obtidos

A seguir são apresentados os resultados da implementação do AGc em FPGA considerando os dados fornecidos pela simulação no *software* ATP do SEP descrito no Capítulo 4. Os resultados são apresentados em forma de gráficos representando a frequência e a amplitude estimada pelo AGc implementado em FPGA e a referência fornecida pelo próprio ATP em 3 diferentes situações: ilhamento de subsistema, entrada de carga e falta sustentada.

7.4.1. Ilhamento de subsistema

Nas Figuras 27, 28, 29 e 30 é possível observar as estimativas de frequência e de amplitude do AGc para o caso de ilhamento de subsistema. O ilhamento se caracterizou pela abertura da linha de transmissão LT13, através dos disjuntores representados, formando dois subsistemas isolados, sendo o subsistema 1 alimentado pelos geradores GER11, GER12, GER 13 e GER21, e o subsistema 3 alimentado pelo

gerador GER31. Foram utilizados como ponto de medida os barramentos BINT1 e BINT3, visíveis na Figura 4.

Este ilhamento poderia ocorrer em um sistema elétrico se houvesse alguma falta na linha de transmissão LT13 e a proteção associada ao sistema, que encontram-se nas subestações, operasse e isolasse a falta do resto do sistema.

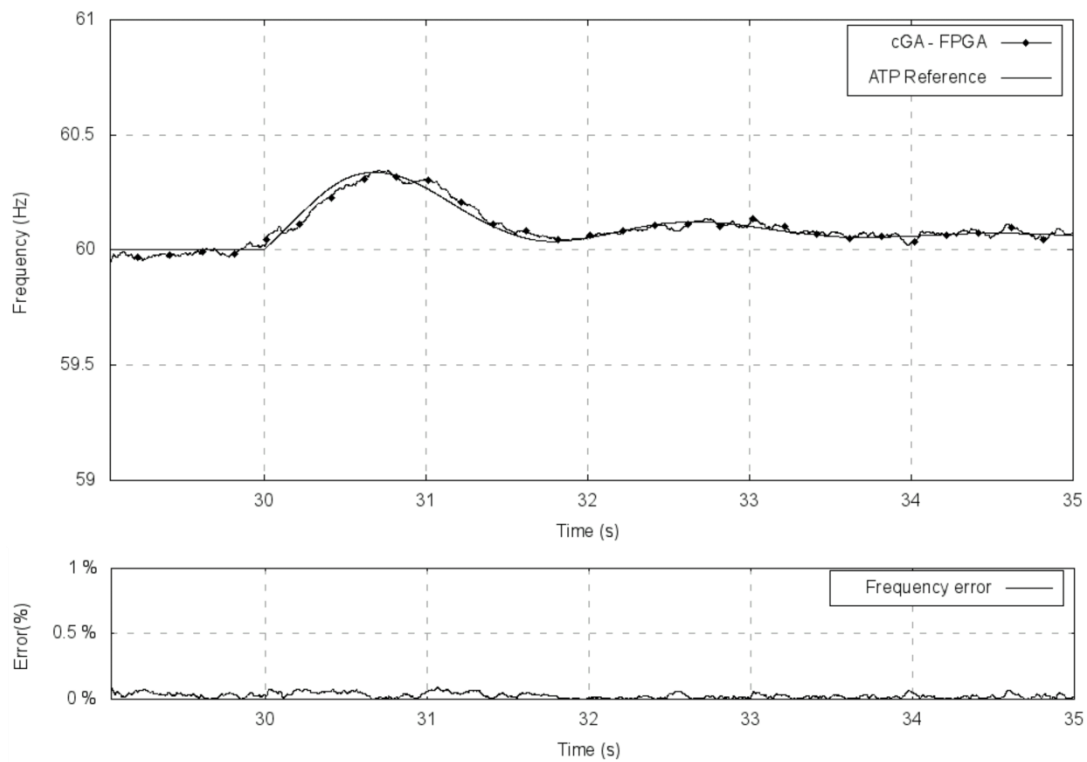


Figura 27: Frequência estimada no subsistema 1 pelo AGc implementado em FPGA

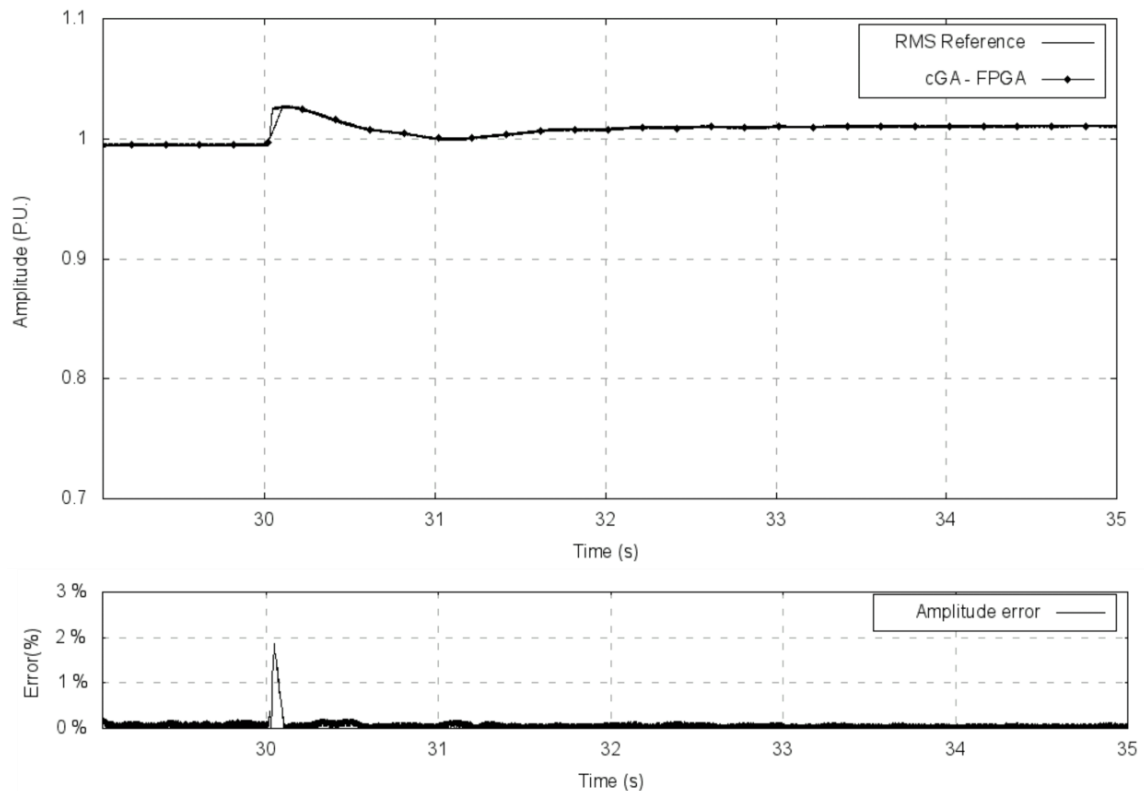


Figura 28: Amplitude da tensão estimada no subsistema 1 pelo AGc implementado em FPGA

No subsistema 1, houve um aumento da frequência e da tensão após o evento de ilhamento, em função do excesso de geração em relação a carga. Porém, os reguladores de tensão e de velocidade agiram para retornar os valores para seus padrões nominais.

Isto ocorreu pois a potência gerada pelo subsistema 1 e 2 que ainda estão interligados conseguem suprir a carga do sistema. Desta forma, os reguladores conseguem atuar com eficácia, o que não ocorreu para o subsistema 3, que ficou isolado, como mostram as Figura 29 e 30.

Na implementação do AGc em FPGA, também foi aplicado um filtro de média móvel na saída do algoritmo, para que filtrasse aquele aspecto ruidoso característico dos algoritmos genéticos. O pequeno ruído existente na referência é reflexo do próprio ATP e dos cálculos numéricos desenvolvidos para fornecer a simulação.

Os erros mostrados nas figuras não são o erro obtido através do TVE fornecido pela norma C37-118. Estes erros são erros proporcionais comuns, apenas para evidenciar a estimação de cada um dos parâmetros, e não do fasor como um todo. Com estes erros, é possível observar que a estimação realizada pelo AGc implementado em FPGA fornece bons resultados.

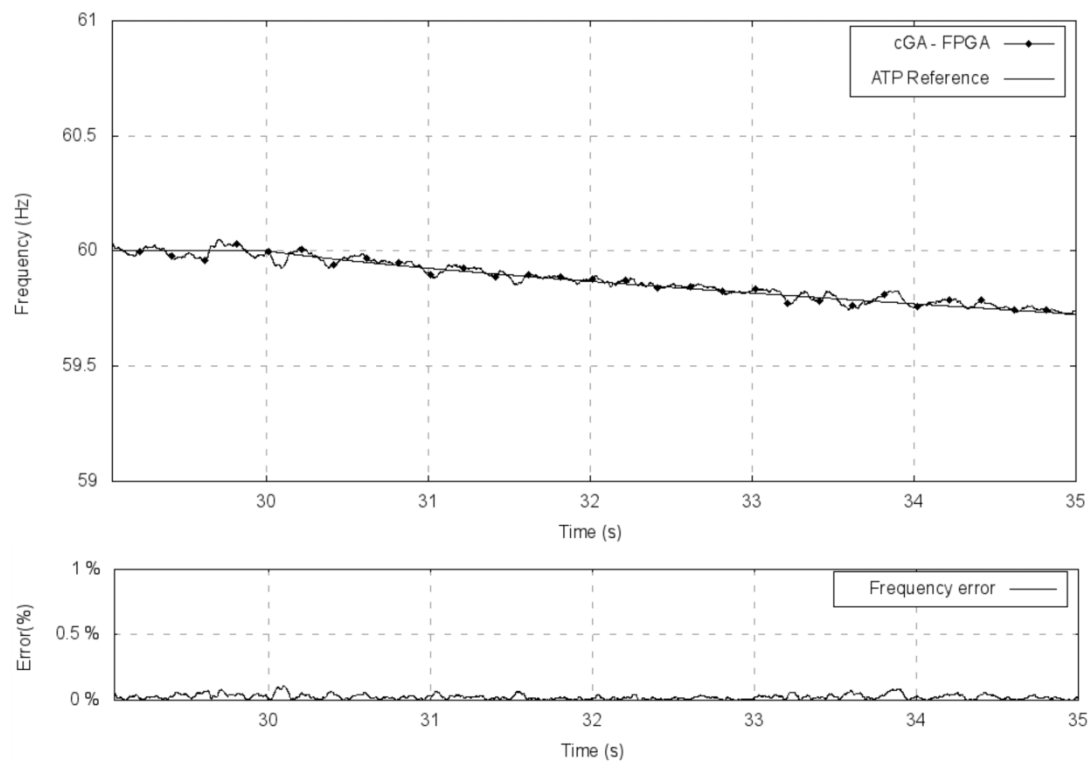


Figura 29: Frequência estimada no subsistema 3 pelo AGc implementado em FPGA

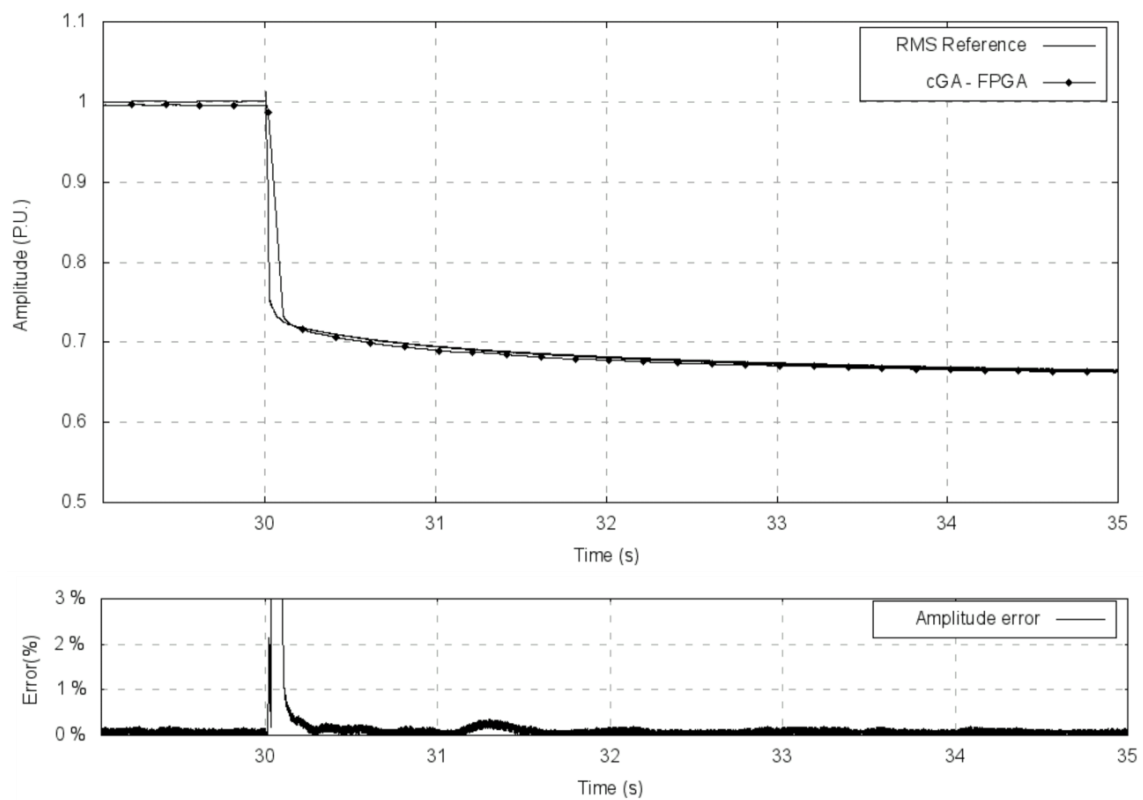


Figura 30: Amplitude da tensão estimada no subsistema 3 pelo AGc implementado em FPGA

No subsistema 3, há o déficit de potência gerada, pois o fluxo de potência na linha de transmissão LT13 alimentava o excesso de demanda no subsistema 3. Como a Unidade Geradora 3 não consegue suprir toda a carga, e os gráficos evidenciam a queda da frequência e da tensão, pois a energia gerada é limitada, por exemplo, pelo engolimento máximo da turbina e a própria potência dos geradores, fazendo com que os reguladores não consigam atuar com eficiência. Em uma situação real, o gerador GER31 seria isolado do sistema para evitar maiores danos a máquina.

7.4.2. Entrada de Carga

As Figuras 31 e 32 apresentam respectivamente as estimações de frequência e amplitude do AGc para a situação simulada de entrada de uma carga de 450 MVA no barramento de cargas BARCG1 da Figura 6.

A entrada abrupta de 450 MVA não é algo corriqueiro no SEP, pois normalmente há o incremento gradual da demanda, como por exemplo, perto do horário de pico. Esta entrada de carga simula, por exemplo, a entrada de uma cidade inteira após um blecaute, guardadas as devidas proporções, em que o sistema elétrico estaria operando normalmente, porém abaixo da demanda usual, e uma grande carga entraria no sistema.

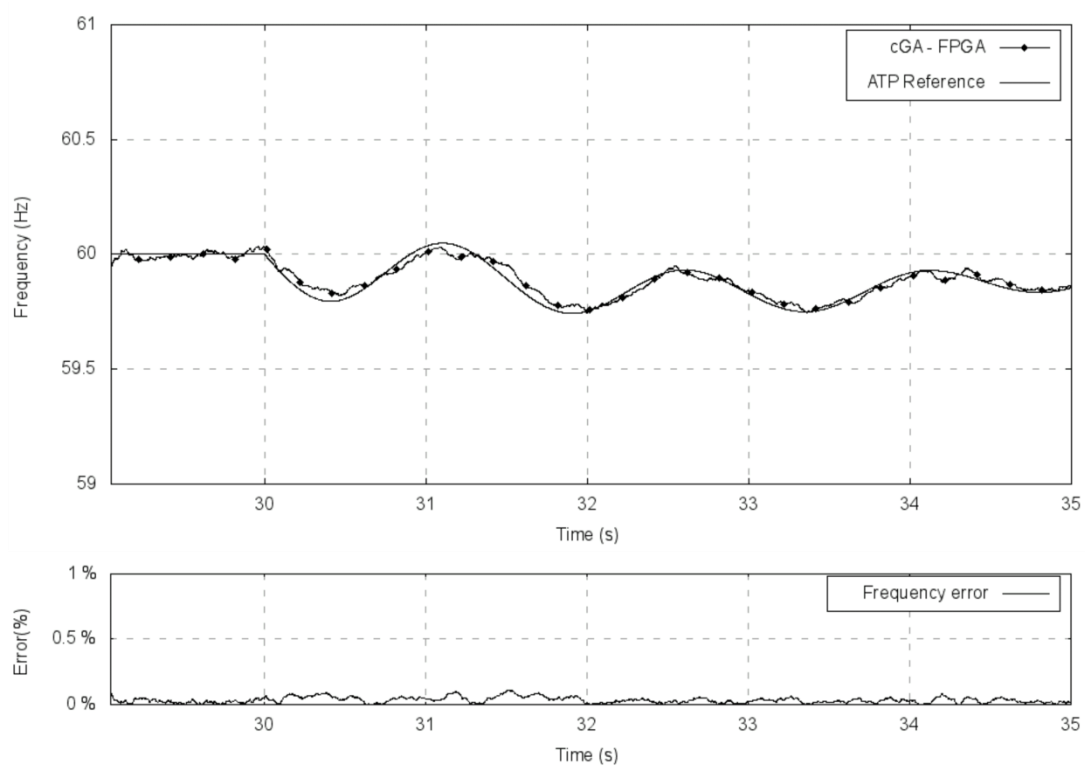


Figura 31: Frequência estimada durante a entrada de carga pelo AGc implementado em FPGA

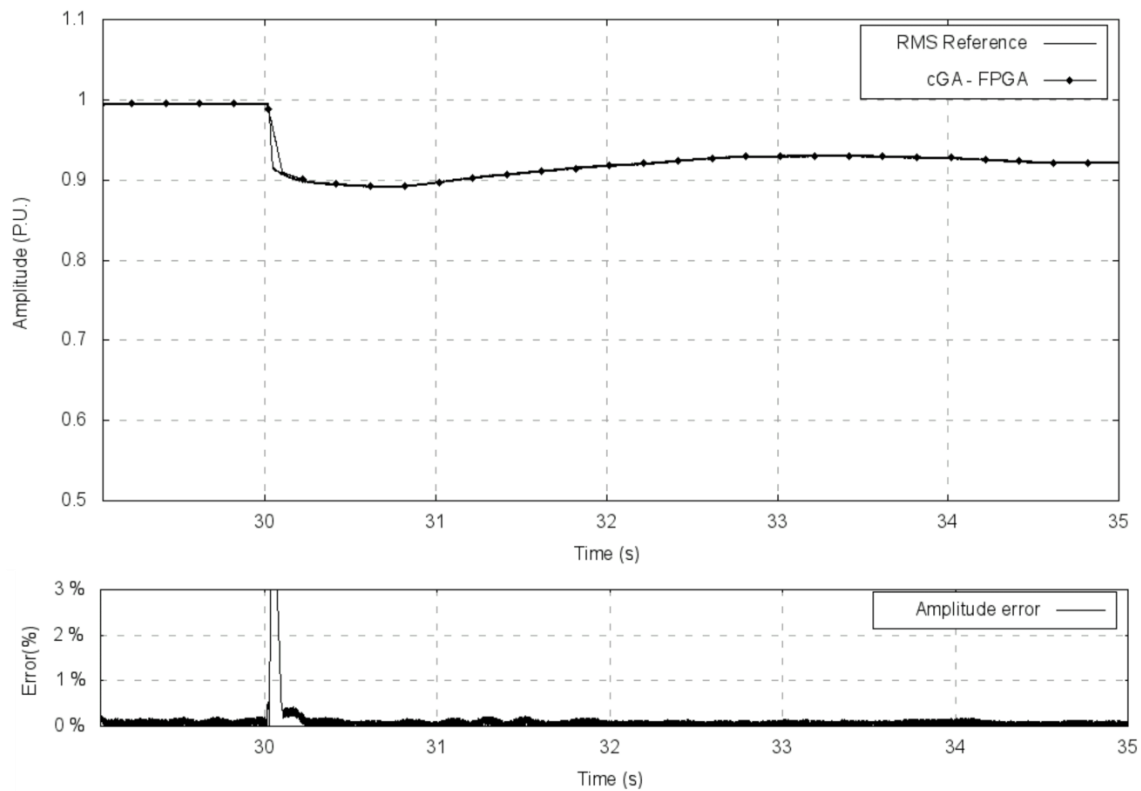


Figura 32: Amplitude da tensão estimada durante a entrada de carga pelo AGc implementado em FPGA

Com a entrada de carga, houve um desbalanço entre a relação geração-consumo, o que gerou a oscilação de frequência e de tensão. Quando a carga entra, o aumento da geração para supri-la não é imediato. Todo o sistema possui sua inércia natural, o que leva um certo tempo para aumentar a geração. Até a geração suprir toda a carga, a frequência do sistema fica abaixo da nominal.

Ao final do período apresentado, a Figura 31 mostra que o sistema ainda não se recuperou da entrada brusca de 450 MVA ao sistema. Porém, com a atuação dos reguladores de velocidade e de tensão presentes nas unidades geradoras, o sistema tende a retornar aos seu estado normal, com valores próximos aos nominais.

7.4.3. Situação de Falta Sustentada na Linha de Transmissão

As Figuras 33 e 34 apresentam respectivamente os resultados da aplicação de dados simulados de uma situação em que ocorreu uma falta franca trifásica sustentada a 50% da linha de transmissão LT1 da Figura 6.

Este tipo de falta é uma das mais graves que podem ocorrer em um sistema de transmissão, e, quando a falta não é isolada, leva a grandes perturbações no sistema, como mostram as Figuras 33 e 34.

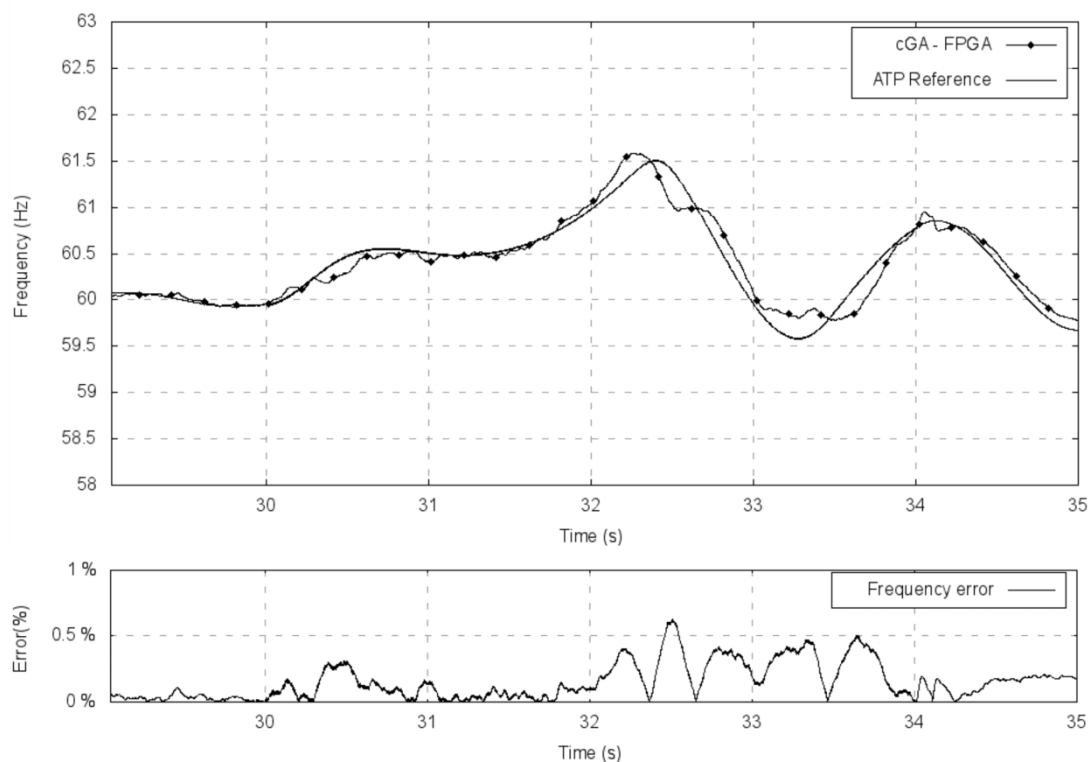


Figura 33: Frequência estimada durante a situação de falta pelo AGC implementado em FPGA

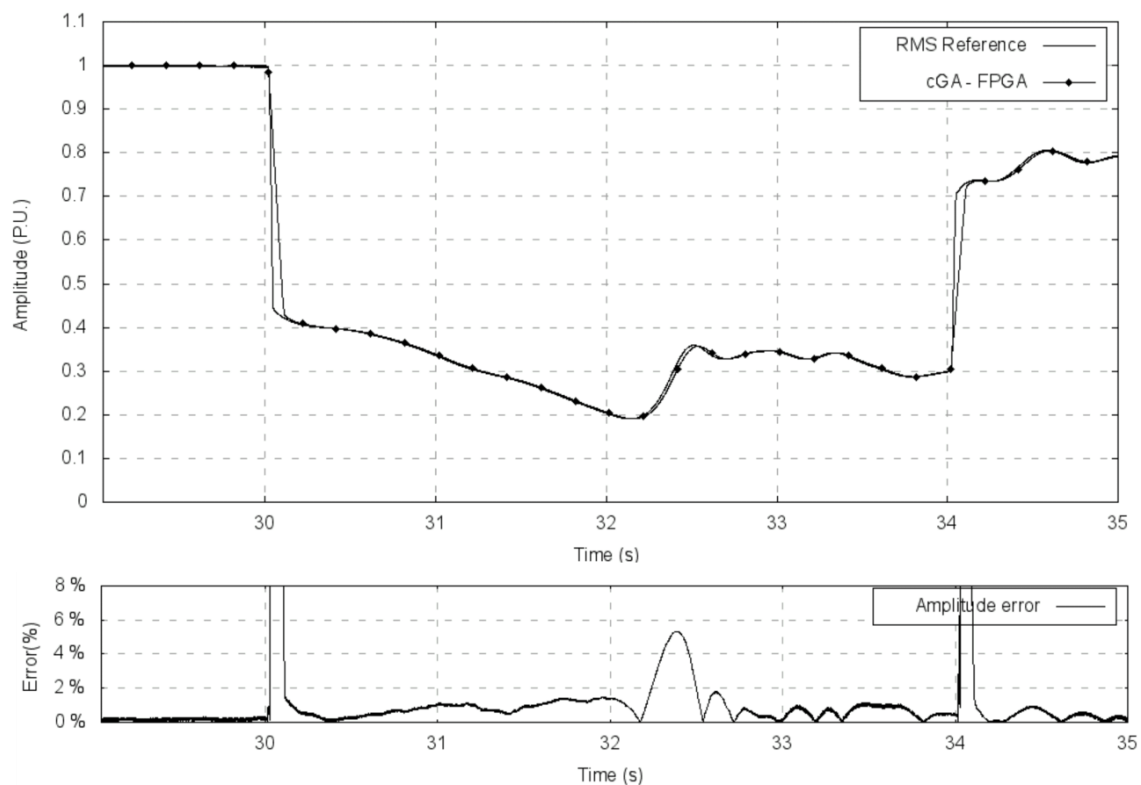


Figura 34: Amplitude da tensão estimada durante a situação de falta pelo AGc implementado em FPGA

Esta falta simulada é a situação mais severa aplicada sobre o SEP neste trabalho. A grande variação da frequência e da tensão são prejudiciais para o SEP. Por isso é vital a atuação imediata dos dispositivos de proteção presentes nas subestações, como a atuação do relé digital com o sinal de abertura para o disjuntor realizar a interrupção da corrente.

Devido a essa grande variação dos valores fasoriais, o AGc apresentou um erro superior aos demais casos, pois mesmo dentro de apenas um ciclo da frequência fundamental, há variação da frequência e da amplitude, o que dificulta a estimação fasorial. Mesmo assim, é possível notar que o AGc consegue rastrear a frequência.

8. Conclusões

Devido à importância da medição fasorial sincronizada, as pesquisas relacionadas a este tema sempre trazem contribuições para o avanço desta prática. Este trabalho visou utilizar o Algoritmo Genético como estimador fasorial em Sistemas Elétricos de Potência.

Os AGs foram estudados e modelados da forma apropriada para serem utilizados na Estimação Fasorial. Foram implementados duas formas destes algoritmos: o Algoritmo Genético Simples e o Algoritmo Genético Compacto e realizaram-se testes que apresentaram resultados satisfatórios e revelaram que estes algoritmos cumprem com as exigências impostas pela norma C37.118-2005, possuindo um erro menor do que o limite estipulado em regime permanente.

Para fins comparativos, também foram implementados estimadores fasoriais clássicos, algoritmos que utilizam a TDF e o PLL. Estes são métodos analíticos, ou seja, não há o erro randômico fornecido pelo AG e pelo AGc e fornecem sempre a mesma resposta para a mesma onda.

Os algoritmos implementados foram aplicados a ondas sintéticas e as ondas obtidas através da simulação do SEP no *software Alternative Transient Program*, onde foi implementado de forma bem sucedida um sistema proposto com 5 unidades geradoras, visando fornecer dados para serem utilizados pelos AGs estudados. Para realizar a simulação da forma mais fiel possível, foram implementados reguladores primários de frequência e reguladores de tensão, para que mantenham os parâmetros do SEP em seus valores nominais. Neste SEP, foram simulados vários casos, que englobam desde a entrada e a saída de carga, até ilhamentos de sistemas e unidades geradoras. Todos os dados decorrentes destas situações foram coletados para que a estimação fasorial fosse realizada.

Cada algoritmo utilizado possui uma característica específica que ficou bem clara na análise dos resultados. O *Phase-locked loop* é o que possui a melhor resposta em regime permanente, porém é o mais lento dos algoritmos implementados, possuindo o maior tempo para voltar a fornecer valores com erros toleráveis. Os algoritmos genéticos são o que possuem a resposta mais rápida, porém, em regime permanente, possui erro maior do que os outros. Mesmo sendo um erro maior, este erro é inferior ao limite estabelecido pela Norma IEEE C37.118-2005. O algoritmo que utiliza a TDF possui boa velocidade de resposta e baixo erro em regime permanente, porém quanto mais distante da frequência nominal este trabalha, maior a imprecisão do mesmo.

O último capítulo referiu-se a implementação do algoritmo genético compacto em *hardware* e todas as considerações necessárias, visando aumentar a velocidade de processamento para que se torne possível a sua utilização em estimções em tempo real. Os resultados mostram que tal implementação ocorreu com sucesso e comprovam mais uma vez a boa estimção fasorial fornecida pelo AGc.

Quando implementados em FPGA, a sua melhor qualidade é a rápida resposta e robustez às situações de transitórios, permitindo apontar os AGs como alternativas viáveis aos medidores fasoriais clássicos.

Referências Bibliográficas

- [1] A.G. Phadke, “Synchronized phasor measurements-a historical overview,” Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002: Asia Pacific. IEEE/PES, p.476 – 479 vol 1.
- [2] A.G. Phadke, “Synchronized phasor measurements in power systems,” *IEEE Computer Applications in Power*, vol. 6, Apr. 1993, pp. 10-15.
- [3] D. Hart, D. Uy, V. Gharpure, D. Novosel, D. Karlsson, and M. Kaba, “PMUs - a new approach to power network monitoring,” 2001, ABB Review, p. 58–61.
- [4] K.E. Martin, D. Hamai, M.G. Adamiak, S. Anderson, M. Begovic, G. Benmouyal, G. Brunello, J. Burger, J.Y. Cai, B. Dickerson, V. Gharpure, B. Kennedy, D. Karlsson, a G. Phadke, J. Salj, V. Skendzic, J. Sperr, Y. Song, C. Huntley, B. Kasztenny, and E. Price, “Exploring the IEEE Standard C37.118–2005 Synchrophasors for Power Systems,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 23, Oct. 2008, pp. 1805-1811.
- [5] R.J. Burnett, M. Butts, P. Sterlina, G. Co, and G. Atlanta, “Power system applications for phasor measurement units,” *IEEE Computer Applications in Power*, vol. 7, 1994, pp. 8-13.
- [6] K.M. El-Naggar and H.K.M. Youssed, “A genetic based algorithm for frequency-relaying applications,” *Electric Power Systems Research*, vol. 55, 2000.
- [7] CARVALHO, J. R. ; COURY, D. V. ; JORGE, D. C. ; DELBEM, A. C. B. ; SIMÕES, E. V. “Algoritmos Genéticos Aplicados à Medição Fasorial e Projeto de PMUs.” - VIII Conferência Brasileira sobre Qualidade de Energia Elétrica, 2009, Blumenau. Anais VIII CBQEE, 2009. p. 1-6.
- [8] A. Delbem, E. Simoes, B. Souza, M. Oleskovicz, S. Souza, and D. Coury, “A Fast and Efficient Method for Frequency Deviation Measurement Based on Genetic Algorithms using a FPGA Approach,” *2006 IEEE/PES Transmission & Distribution Conference and Exposition: Latin America*, 2006, pp. 1-6.
- [9] D.V. Coury, M. Oleskovicz, A.C.B. Delbem, E.V. Simoes, T.V. Silva, J.R. de Carvalho, and D. Barbosa, “A genetic based algorithm for frequency relaying using FPGAs,” *2009 IEEE Power & Energy Society General Meeting*, Jul. 2009, pp. 1-8.
- [10] M. Wang and Y. Sun, “A Practical, Precise Method for Frequency Tracking and Phasor Estimation,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 19, Oct. 2004, pp. 1547-1552.

- [11] M. Wang and Y. Sun, "A Practical Method to Improve Phasor and Power Measurement Accuracy of DFT Algorithm," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 21, Jul. 2006, pp. 1054-1062.
- [12] M. Karimi-Ghartemani and M.R. Iravani, "Robust and Frequency-Adaptive Measurement of Peak Value," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 19, Apr. 2004, pp. 481-489.
- [13] S.R.A. Ramos, "*Sistemas de Medição Fasorial Sincronizada: Aplicações para melhoria da Operação de Sistemas Elétricos de Potência*," 2008. Dissertação de Mestrado, Belo Horizonte, UFMG.
- [14] D. Coury, M. Oleskovicz, and R. Giovanini, "Proteção Digital de Sistemas Elétricos de Potência: dos relés eletromecânicos aos microprocessados inteligentes," São Carlos, EESC-USP, 2007.
- [15] IEEE, "IEEE Standard for Synchrophasors for Power Systems – C37.118," *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2005.
- [16] S.N. Deepa, with S. N. Sivanandam, *Introduction to Genetic Algorithms*, Editora Springer 2008, 462 páginas.
- [17] D. Barbosa, "Sistema Híbrido Inteligente para o Monitoramento e Proteção de Transformadores de Potência", Tese de Doutorado, São Carlos, EESC-USP, 2010.
- [18] F. Aminifar, C. Lucas, A. Khodaei, and M. Fotuhi-Firuzabad, "Optimal Placement of Phasor Measurement Units Using Immunity Genetic Algorithm," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 24, Jul. 2009, pp. 1014-1020.
- [19] G.R. Harik, F.G. Lobo, and D.E. Goldberg, "The Compact Genetic Algorithm," *IEEE Transaction on Evolutionary Computation*, vol. 3, Oct. 1999.
- [20] C. Zhou, K. Meng, and Z. Qiu, "Compact genetic algorithm mutated by bit," *Proceedings of the 4th World Congress on Intelligent Control and Automation (Cat. No.02EX527)*, 2002, pp. 1836-1839.
- [21] J.A. Filho and M. Pereira, "Alternative Transient Program: Curso Básico Sobre Utilização Do ATP," *Comitê Latino Americano de Usuários do EMTP/ATP*, 1996.
- [22] S.A.D. SOUZA, "Algoritmos genéticos aplicados à proteção e estimação de harmônicos em sistemas elétricos de potência.," 2008. Tese de Doutorado – EESC-USP.
- [23] X.V. Filho, *Operação de Sistemas de Potência com Controle Automático de*

Geração, Rio de Janeiro: Editora Campus, 1986.

[24] R. P. M. da Silva, "*Algoritmos Genéticos Aplicados à Estimação Fasorial em Sistemas Elétricos de Potência*", Dissertação de Mestrado, São Carlos, EESC-USP, 2012.