

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

FÁBIO KASPARY SCHONS

**ANÁLISE DO DESEMPENHO DE NOVOS MÉTODOS DE PREDIÇÃO
DAS COMPONENTES DE CLARKE APLICADOS NA ESTIMAÇÃO
DIGITAL DE FREQUÊNCIA EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE
POTÊNCIA**

Alegrete

2022

FÁBIO KASPARY SCHONS

**ANÁLISE DO DESEMPENHO DE NOVOS MÉTODOS DE PREDIÇÃO
DAS COMPONENTES DE CLARKE APLICADOS NA ESTIMAÇÃO
DIGITAL DE FREQUÊNCIA EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE
POTÊNCIA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Machado dos Santos.

Alegrete

2022

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais) .

S371a Schons, Fábio Kaspary

Análise do desempenho de novos métodos de predição das
componentes de Clarke aplicados na estimação digital de
frequência em sistemas elétricos de potência / Fábio Kaspary
Schons.

69 p.

Trabalho de Conclusão de Curso(Graduação)-- Universidade
Federal do Pampa, ENGENHARIA ELÉTRICA, 2022.

"Orientação: Eduardo Machado dos Santos".

1. Estimação Digital de Frequência. 2. Proteção de Sistemas
Elétricos de Potência. 3. Transformada de Clarke. 4.
Interpolação Polinomial com Base de Newton. 5. Predição
Linear. I. Título.

FÁBIO KASPARY SCHONS

**ANÁLISE DO DESEMPENHO DE NOVOS MÉTODOS DE PREDIÇÃO DAS COMPONENTES DE CLARKE
APLICADOS NA ESTIMAÇÃO DIGITAL DE FREQUÊNCIA EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 28 de julho de 2022.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Eduardo Machado dos Santos

Orientador

UNIPAMPA

Prof. Dr. Chrystian Dalla Lana da Silva

UNIPAMPA

Eng.^a Luana Barcelos Severo

UNIPAMPA

Assinado eletronicamente por **CHRYSYTIAN DALLA LANA DA SILVA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 17/08/2022, às 08:37, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as



normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **EDUARDO MACHADO DOS SANTOS, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 17/08/2022, às 16:07, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **LUANA BARCELOS SEVERO, Usuário Externo**, em 17/08/2022, às 16:16, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0877867** e o código CRC **F1FDBBA3**.

Universidade Federal do Pampa, Campus Alegrete
Av. Tiarajú, 810 – Bairro: Ibirapuitã – Alegrete – RS CEP: 97.546-550

Telefone: (55) 3422-8400

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela saúde e força para enfrentar todas dificuldades.

Aos meus pais Celso José Schons e Lisônia Kaspary Schons que, sem dúvidas, são as pessoas mais importantes para mim. E, também, às minhas irmãs Fabíola Kaspary Schons e Franciéli Kaspary Schons.

Ao Prof. Dr. Eduardo Machado dos Santos pelos conhecimentos compartilhados durante a pesquisa no Grupo de Energia e Sistemas Elétricos de Potência (GESEP), também pelo profissionalismo durante toda a graduação. Aos demais professores da Universidade Federal do Pampa pelos ensinamentos prestados.

A todos os colegas do grupo de pesquisa GESEP pelas trocas de experiências. Aos meus colegas de graduação, pela parceria construída, em especial, Artur Rodrigues, Eduardo Kilian, Fabiano Aguiar, Humberto Hasselein, Igor da Rocha, Luccas Durlo, Mateus Camargo.

"Se você quer descobrir os segredos do universo, pense em termos de energia, frequência e vibração."

Nikola Tesla

"Pesquisar é ver aquilo que todos os demais viram e imaginar aquilo que ninguém havia pensado."

Albert Szent Györgyi

RESUMO

A frequência elétrica é um parâmetro de grande importância para o pleno funcionamento dos Sistemas Elétricos de Potência (SEPs), influenciando no funcionamento e operação dos equipamentos e na qualidade da energia fornecida. Este trabalho apresenta métodos inovadores para estimação digital de frequência no SEP. As técnicas são baseadas na análise das formas de onda de tensão da rede, que são decompostas nas componentes α e β usando a Transformada de Clarke. Os valores futuros das componentes α e β são previstos através de três metodologias: Funções Derivadas, Interpolação Polinomial com Base de Newton e Predição Linear. A partir desses valores, a frequência da rede é então estimada em função do ângulo resultante do produto entre o sinal complexo de Clarke e aquele dado pela predição das componentes α e β . Os métodos propostos foram testados para sinais de frequência com variações em rampa, exponenciais e amortecidas. As metodologias foram avaliadas em termos do tempo de convergência e dos erros mínimos e máximos antes e depois da convergência, mostrando que as técnicas propostas possuem grande precisão e robustez frente às situações simuladas.

Palavras-chave: Estimação Digital de Frequência. Proteção de Sistemas Elétricos de Potência. Transformada de Clarke. Interpolação Polinomial com Base de Newton. Predição Linear. Índices de Desempenho.

ABSTRACT

The electrical frequency is a parameter of great importance for the full functioning of the Electric Power Systems (EPS), influencing the functioning and operation of the equipment and the quality of the energy supplied. This work presents innovative methods for digital frequency estimation in EPS. The estimation techniques are based on the analysis of the network voltage waveforms, which are decomposed into their α and β components using the Clarke Transform. The future values of the α and β components are predicted through three methodologies: Derivative Functions, Polynomial Interpolation Based with Newtonian Basis and Linear Prediction. From these values, the frequency of the network is then estimated as a function of the angle resulting from the product between the Clarke complex signal and that given by the prediction of the α and β components. The proposed methods were tested for frequency signals with ramp, exponential and damped sinusoidal variations. The methodologies were evaluated in terms of convergence time and minimum and maximum errors before and after convergence, showing that the proposed techniques have great precision and robustness in the face of simulated situations.

Key-words: Digital Frequency Estimation. Protection of Electrical Power Systems. Clarke's Transform. Derivative Functions. Polynomial Interpolation with Newtonian Basis. Linear Prediction. Performance Indices.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – “Nose curve” de estabilidade de tensão.	31
Figura 2 – Decaimento da frequência no sistema de potência devido à escassez de geração: constante da carga e frequência dependente da carga.	35
Figura 3 – Fluxograma do método de Estimação de Frequência via Funções Derivadas das Componentes de Clarke (EDCC).	41
Figura 4 – Interpolação polinomial de 1 ^o grau aplicada sobre os sinais V_α e V_β . (a) Interpolação em V_α . (b) Interpolação em V_β	44
Figura 5 – Fluxograma do método de Estimação de Frequência via Interpolação Polinomial das Componentes de Clarke (EIPCC).	45
Figura 6 – Fluxograma do método de Estimação de Frequência via Predição Linear das Componentes de Clarke (EPLCC).	47
Figura 7 – (a) Estimação de frequência via função derivada de 4 ^a ordem para variação em rampa de frequência. (b) Erro da estimação.	53
Figura 8 – (a) Estimação de frequência via interpolação polinomial de 2 ^o grau para variação de frequência em rampa. (b) Erro da estimação.	54
Figura 9 – (a) Estimação de frequência via predição linear de 2 ^a ordem para variação de frequência em rampa. (b) Erro da estimação.	55
Figura 10 – (a) Estimação de frequência via função derivada de 4 ^a ordem para variação exponencial de frequência. (b) Erro da estimação.	56
Figura 11 – (a) Estimação de frequência via interpolação polinomial de 2 ^o grau para variação exponencial de frequência. (b) Erro da estimação.	57
Figura 12 – (a) Estimação de frequência via predição linear de 2 ^a ordem para variação exponencial de frequência. (b) Erro da estimação.	58
Figura 13 – (a) Estimação de frequência via função derivada de 4 ^a ordem para variação senoidal amortecida de frequência. (b) Erro da estimação.	59
Figura 14 – (a) Estimação de frequência via interpolação polinomial de 2 ^o grau para variação senoidal amortecida de frequência. (b) Erro da estimação.	60
Figura 15 – (a) Estimação de frequência via predição linear de 2 ^a ordem para variação senoidal amortecida de frequência. (b) Erro da estimação.	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Coeficientes das Funções Derivadas de 3 ^a a 10 ^a ordens.	40
Tabela 2 – Índices de desempenho para variação de frequência em rampa (60 Hz para 65 Hz) utilizando diferentes ordens da função derivada.	52
Tabela 3 – Índices de desempenho para variação de frequência em rampa (60 Hz para 65 Hz) utilizando interpolação polinomial de 2 ^o grau.	53
Tabela 4 – Índices de desempenho para variação de frequência em rampa (60 Hz para 65 Hz) utilizando predição linear de 2 ^a ordem.	54
Tabela 5 – Índices de desempenho para variação exponencial de frequência (60 Hz para 55 Hz, $\Delta f = -5$ Hz e $\tau = 0,05$ s) utilizando diferentes ordens da função derivada.	55
Tabela 6 – Índices de desempenho para variação exponencial de frequência (60 Hz para 55 Hz, $\Delta f = -5$ Hz e $\tau = 0,05$ s) utilizando interpolação polinomial de 2 ^o grau.	56
Tabela 7 – Índices de desempenho para variação exponencial de frequência (60 Hz para 55 Hz, $\Delta f = -5$ Hz e $\tau = 0,05$ s) utilizando predição linear de 2 ^a ordem.	58
Tabela 8 – Índices de desempenho para variação senoidal amortecida ($\Delta f = 1$ Hz, $\omega_f = 10\pi$ e $\tau = 0,15$ s) utilizando diferentes ordens da função derivada.	59
Tabela 9 – Índices de desempenho para variação senoidal amortecida ($\Delta f = 1$ Hz, $\omega_f = 10\pi$ e $\tau = 0,15$ s) utilizando interpolação polinomial de 2 ^o grau.	60
Tabela 10 – Índices de desempenho para variação senoidal amortecida ($\Delta f = 1$ Hz, $\omega_f = 10\pi$ e $\tau = 0,15$ s) utilizando predição linear de 2 ^a ordem.	61
Tabela 11 – Comparação dos métodos avaliados em 96 amostras/ciclo no caso 1 para variação de frequência em rampa.	62
Tabela 12 – Comparação dos métodos avaliados em 96 amostras/ciclo no caso 2 para variação exponencial de frequência.	63
Tabela 13 – Comparação dos métodos avaliados em 96 amostras/ciclo no caso 3 para variação senoidal amortecida de frequência.	63

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CAG	Controle Automático de Geração
DPLL	<i>Digital Phase Locked Loop</i>
EAAC _{máx}	Erro Absoluto Máximo Antes da Convergência
EAAC _{mín}	Erro Absoluto Mínimo Antes da Convergência
EADC _{máx}	Erro Absoluto Máximo Depois da Convergência
EADC _{mín}	Erro Absoluto Mínimo Depois da Convergência
ECE	Esquemas de Controle de Emergência
ECS	Esquemas de Controle de Segurança
EDCC	Estimação de Frequência via Funções Derivadas das Componentes de Clarke
EIPCC	Estimação de Frequência via Interpolação Polinomial das Componentes de Clarke
ELPCC	Estimação de Frequência via Predição Linear das Componentes de Clarke
ERAC	Esquema Regional de Alívio de Carga
ERRC	Esquema Regional de Restauração de Carga
IC	Intervalo de Convergência
<i>IEEE</i>	<i>Institute of Electrical and Electronic Engineers</i>
SAGE	Sistema de Alívio de Geração
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SIN	Sistema Interligado Nacional
TC	Tempo de Convergência
TDF	Transformada Discreta de Fourier
VARs	Volt-Ampères Reativos

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	23
1.1	Considerações Gerais	23
1.2	Justificativa	23
1.3	Objetivos	24
1.4	Revisão Bibliográfica	24
1.5	Estrutura do Trabalho	27
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	29
2.1	Considerações Gerais	29
2.2	Frequência Elétrica	29
2.3	Dinâmica da Frequência Elétrica	29
2.4	Frequência e Proteção	35
2.4.1	Relé de Frequência	36
2.4.2	Relé V/Hz (Sobre-excitação)	36
2.4.3	Esquemas Especiais	36
2.5	Considerações Finais	38
3	MÉTODOS PARA ESTIMAÇÃO DE FREQUÊNCIA	39
3.1	Considerações Gerais	39
3.2	Métodos Propostos	39
3.2.1	Estimação de Frequência via Funções Derivadas das Componentes de Clarke (EDCC)	39
3.2.2	Estimação de Frequência via Interpolação Polinomial das Componentes de Clarke (EIPCC)	41
3.2.3	Estimação de Frequência via Predição Linear das Componentes de Clarke (EPLCC)	43
3.3	Modelagem Matemática dos Casos de Variação de Frequência	47
3.3.1	Variação de Frequência em Rampa	48
3.3.2	Variação Exponencial de Frequência	48
3.3.3	Variação Senoidal Amortecida de Frequência	48
3.4	Índices de Desempenho	49
3.4.1	Tempo de Convergência (TC)	49
3.4.2	Intervalo de Convergência (IC)	49
3.4.3	Erro Absoluto	49
3.5	Considerações Finais	50

4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	51
4.1	Considerações Gerais	51
4.2	Resultados	51
4.2.1	Caso 1: Variação de Frequência em Rampa	52
4.2.1.1	Estimador de Frequência via Funções Derivadas das Componentes de Clarke (EDCC)	52
4.2.1.2	Estimador de Frequência via Interpolação Polinomial com base de Newton das Componentes de Clarke (EIPCC)	52
4.2.1.3	Estimador de Frequência via Predição Linear das Componentes de Clarke (EPLCC)	53
4.2.2	Caso 2: Variação Exponencial de Frequência	55
4.2.2.1	Estimador de Frequência via Funções Derivadas das Componentes de Clarke (EDCC)	55
4.2.2.2	Estimador de Frequência via Interpolação Polinomial com base de Newton das Componentes de Clarke (EIPCC)	56
4.2.2.3	Estimador de Frequência via Predição Linear das Componentes de Clarke (EPLCC)	57
4.2.3	Caso 3: Variação Senoidal Amortecida de Frequência	58
4.2.3.1	Estimador de Frequência via Funções Derivadas das Componentes de Clarke (EDCC)	58
4.2.3.2	Estimador de Frequência via Interpolação Polinomial com base de Newton das Componentes de Clarke (EIPCC)	59
4.2.3.3	Estimador de Frequência via Predição Linear das Componentes de Clarke (EPLCC)	60
4.3	Comentários acerca do Desempenho dos Métodos	62
4.4	Considerações Finais	63
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS E PERSPECTIVAS FUTURAS	65
5.1	Considerações Finais	65
5.2	Sugestões para Trabalhos Futuros	66
	REFERÊNCIAS	67

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Gerais

A estimação da frequência elétrica é de grande importância para o Sistema Elétrico de Potência (SEP). Na proteção, controle e operação do sistema, distúrbios nos sinais de tensão e variações na frequência fundamental podem causar danos aos equipamentos e à qualidade da energia elétrica fornecida, bem como causar restrições operacionais do SEP e sistemas industriais.

A frequência fundamental está relacionada com a qualidade de energia elétrica, onde, idealmente, esta tem valores constantes. Em regime permanente, a frequência pode oscilar entre $\pm 0,5\text{Hz}$ (BARBOSA *et al.*, 2008a).

Frequências fora desses limites podem indicar a ocorrência de falhas ou sobrecargas no sistema, conforme mencionado em Thomas e Woolfson (2001). Além disso, variações de frequência podem causar danos aos equipamentos conectados à rede elétrica, como geradores, transformadores, motores, bancos de capacitores e linhas de transmissão, prejudicando a estabilidade do SEP (BARBOSA *et al.*, 2008b).

Nesse contexto, para manter a qualidade da energia elétrica e mitigar danos no SEP, é necessário estimar a frequência elétrica através de técnicas computacionais. Recentemente, várias metodologias para este fim foram apresentadas na literatura especializada. No entanto, deve-se ressaltar que nenhum método proposto até então é capaz de ser preciso em todas as condições operacionais do SEP.

Assim, o presente trabalho apresenta novos métodos para estimação de frequência, os quais são fundamentados na predição das componentes α e β dos sinais de tensão da rede, usando Funções Derivadas, Interpolação Polinomial com Base de Newton e Predição Linear. As técnicas propostas foram testadas para sinais de frequência com variações em rampa, exponenciais e amortecidas. Nos testes, foi verificado que as metodologias possuem grande precisão e robustez para estimação de frequência, alcançando o critério de convergência em todos os casos analisados.

1.2 Justificativa

O aumento da demanda energética somado ao crescimento descontrolado da geração distribuída, contribuem para a instabilidade de parâmetros de grande importância no SEP.

Em vista disso, são necessários novos métodos capazes de fornecer energia elétrica e aprimorar elementos do SEP de forma confiável e robusta. Técnicas e propostas com

a finalidade de proporcionar controle e monitoramento com eficiência dos sistemas de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica vêm sendo apresentadas.

A demanda por energia resulta numa maior complexidade do SEP, ocasionando problemas de estabilidade, colocando em risco a continuidade de operação do sistema.

Desse modo, a importância de equipamentos ligados ao SEP acarreta na necessidade de sistemas de proteção capazes de atuarem de forma confiável, seletiva e veloz, sem que, numa possível ocorrência de falhas de equipamentos, danos irreparáveis no sistema aconteçam.

Nesse cenário, surge a importância da evolução tecnológica e o aprimoramento de novas técnicas de proteção, com o intuito de auxiliar com maior segurança, eficiência, confiabilidade e disponibilidade do SEP.

1.3 Objetivos

Este trabalho tem por objetivo geral propor novas metodologias para a estimação de frequência.

Como objetivos específicos citam-se:

- Criar um banco de dados com sinais gerados computacionalmente simulando diferentes casos de variações de frequência e amplitude;
- Estudar técnicas matemáticas e computacionais aplicáveis na predição de frequência;
- Implementar metodologias apresentadas na literatura especializada;
- Propor novas metodologias de estimação de frequência que sejam precisas frente às diferentes condições operacionais do sistema elétrico de potência; e
- Avaliar qualitativamente e quantitativamente os métodos implementados a partir de índices de desempenho.

1.4 Revisão Bibliográfica

A frequência elétrica é muito importante para a operação do SEP. A mesma pode sofrer variações. Assim, manter a sua estabilidade é essencial para a plena operação do sistema.

Como destacado anteriormente, a estimação de frequência é de extrema importância para diferentes aplicações, como na proteção e no controle do SEP, bem como para a qualidade de energia. Além disso, na medição fasorial, uma estimação de frequência garantirá o seu bom desempenho.

Desse modo, diversos estudos de estimação de frequência já foram realizados, sendo estes para a proposição de novas técnicas e para apresentar o efeito das respostas dos estimadores sobre os relés de proteção.

A maioria dos relés utilizam técnicas defasadas no SEP. Uma delas é o método baseado na detecção da passagem do sinal por zero. Nesse contexto, Widrevitz e Armington (1977) utilizam uma técnica baseada na detecção da passagem do sinal por zero. Essa técnica apresenta respostas imprecisas quando os sinais processados possuem muito ruído ou conteúdo harmônico.

Desde os anos 1990, a necessidade de novas técnicas para estimação de frequência vem crescendo. Begovic *et al.* (1993) e Akke (1997) apresentam estimadores baseados na obtenção da frequência a partir da função diferença de fase entre um sinal complexo estimado e o valor real desse sinal. Begovic *et al.* (1993) utiliza a decomposição em quadratura dos sinais processados para obter o sinal complexo. Já Akke (1997) obtém o sinal complexo através da Transformada de Clarke, através dos sinais de tensão amostrados em um sistema trifásico. As duas metodologias demonstram ótimo desempenho na estimação de frequência de sinais em regime permanente e sem distorção harmônica ou ruídos.

Terzija, Djuric e Kovacevic (1994) propuseram uma metodologia fundamentada em algoritmos recursivos de Newton. Além disso, Friedman (1994) desenvolveu uma metodologia capaz de estimar frequência apenas utilizando uma forma de onda senoidal, utilizando um filtro passa-baixas para eliminar os ruídos do sinal.

Lobos e Rezmer (1997) representam a frequência como um parâmetro muito importante para o SEP. A necessidade de estimar a frequência de forma rápida e precisa é resultado do desequilíbrio entre geração e carga que causam instabilidade na frequência. Os autores apresentam uma técnica com base no método de Prony, através de um filtro fundamentado na Transformada Discreta de Fourier (TDF), melhorando as características do filtro. Esse método possui uma janela de suavização do sinal, melhorando a precisão na determinação da frequência.

Dash, Pradhan e Panda (1999), Routray, Pradhan e Rao (2002) e Zadeh *et al.* (2009) desenvolveram estimadores de frequência baseados em filtros de Kalman. Tais técnicas apresentam boa precisão na estimação diante de sinais com harmônicas e ruídos, porém, demonstram tempos de convergência elevados após o evento de um transitório de amplitude ou de frequência.

As metodologias propostas por Wang e Sun (2004) e Ren e Kezunovic (2012), assim como a técnica de Lobos e Rezmer (1997), estimam a frequência a partir da TDF.

Pradhan, Routray e Basak (2005) e Barbosa *et al.* (2008b) apresentam técnicas fundamentadas em Mínimos Quadrados, as quais possuem pouca precisão para eventos transitórios e diante de situações com ruídos e harmônicas. Também, apresentam erros

elevados na estimação em sinais de frequência fora da nominal, envolvendo o emprego de filtragem adicional nas respostas.

Canteli *et al.* (2006), assim como Akke (1997), utilizam a Transformada de Clarke para obtenção do sinal complexo, através dos sinais de tensão amostrados em um sistema de três fases.

Sithamparanathan (2008) apresenta um estimador com laço fechado de fase digital (DPLL, do inglês *Digital Phase Locked Loop*). A metodologia proposta é precisa para situações com diferentes variações de frequência, amplitude e fase, não sendo afetada por distorções harmônicas ou ruídos. Porém, a técnica de Sithamparanathan (2008) possui elevados tempos de convergência em comparação com outras técnicas.

Também, Sorrentino e Carvalho (2010) compararam três métodos de estimação de frequência, avaliando seus desempenhos transitórios através de simulações numéricas, demonstraram os efeitos da utilização de filtros adicionais para eliminação de ruídos. Porém, com a utilização de filtros, a resposta de estimação foi prejudicada, provocando atrasos na estimação da frequência.

Santos *et al.* (2015) propõe um algoritmo capaz de ser aplicado como estimador de frequência em relés numéricos para fins de proteção ou aplicável na medição de frequência da rede. O mesmo utiliza operadores de dilatação e erosão da Morfologia Matemática para estimação de valores futuros dos sinais das componentes Modais, obtidas a partir da Transformada de Clarke sobre os sinais de corrente ou sinais de tensão trifásicos da rede. As componentes α e β formam o sinal complexo a ser estimado com o auxílio dos operadores morfológicos. Tal metodologia apresenta elevado grau de precisão e robustez na estimação de frequência.

Zhan *et al.* (2015) estima a fase sincronizada e a frequência no nível de distribuição sob condições de variações. O método é baseado na transformada discreta de Fourier, que utiliza baixa carga computacional. Porém, este método apresenta erros quando o sistema de potência opera fora da frequência nominal, em condições dinâmicas, como na modulação de fase.

Li *et al.* (2019) propõe um algoritmo para estimação de frequência que utiliza filtragem de deslocamento de frequência. Também apresenta um filtro de média de convolução no sinal deslocado, eliminando a interferência espectral. A frequência do sistema pode ser estimada usando a diferença de fase entre dois pontos do sinal filtrado. O método abordado tem grandes vantagens, como baixa carga computacional e bom desempenho anti-ruído, porém, o trabalho não aborda mais casos envolvendo variações de frequência.

1.5 Estrutura do Trabalho

No Capítulo 2, são descritas as características da frequência elétrica, incluindo sua estabilidade e dinâmica. Além disso, a proteção de frequência no sistema elétrico de potência é descrita em diferentes aplicações.

No Capítulo 3, são apresentados os novos métodos para estimação de frequência, os quais tiveram seus desempenhos analisados sob diferentes variações do parâmetro.

No Capítulo 4, são apresentados os resultados das simulações, assim como as discussões a cerca dos mesmos.

Por fim, o Capítulo 5 apresenta as considerações finais e sugestões para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Considerações Gerais

O entendimento da frequência elétrica é essencial para o desenvolvimento de metodologias capazes de estimá-la em diversas condições operacionais do Sistema Elétrico de Potência (SEP). O foco desse Capítulo é apresentar os conceitos fundamentais da frequência elétrica, incluindo a dinâmica, a estimação e a proteção (relés de frequência e sobre-excitação) no SEP.

2.2 Frequência Elétrica

A estimação da frequência elétrica é de grande importância para o Sistema Elétrico de Potência. Na proteção, controle e operação do sistema, distúrbios nos sinais de tensão e variações na frequência fundamental podem causar danos aos equipamentos e à qualidade da energia elétrica fornecida, bem como causar restrições operacionais do SEP e sistemas industriais.

No SEP, a frequência fundamental está relacionada à qualidade da energia elétrica, onde, idealmente, esta tem valores constantes de frequência e tensão efetiva. Em estado estacionário, uma oscilação de frequência de $\pm 0,5\text{Hz}$ é permitida para operação do sistema. Frequências fora desses limites podem indicar a ocorrência de falhas ou sobrecargas no sistema (THOMAS; WOOLFSON, 2001).

2.3 Dinâmica da Frequência Elétrica

Segundo Horowitz e Phadke (2006), tradicionalmente, os relés têm sido utilizados para proteger equipamentos específicos: motores, geradores, linhas de transmissão, entre outros. Com isso, o sistema se beneficia ao remover os dispositivos quando estes apresentarem falhas, eliminando o estresse do sistema, evitando possíveis danos aos equipamentos e, conseqüentemente, quaisquer reparos demorados e de elevado custo. É importante que os esquemas de proteção sejam robustos o suficiente para sustentar a remoção de qualquer elemento, de maneira que haja um limite para o quanto as configurações de proteção possam antecipar a extensão do problema.

Os sistemas podem ser expostos em situações não programadas e de falta, trabalhando além dos limites previstos, como para cargas mais pesadas do que as nominais, clima fora do comum, desligamentos programados ou não programados de equipamentos

ou, ainda, erro humano. Esses efeitos podem causar apagões em áreas extensas com graves impactos técnicos, econômicos e sociais (HOROWITZ; PHADKE, 2006).

Como citado anteriormente, a estabilidade - ou a falta dela - é a principal preocupação na operação do SEP. O sistema opera sempre próximo de sua frequência nominal e todas as máquinas rotativas conectadas no sistema operam em sintonia umas com as outras, mantendo a mesma velocidade média. Os reguladores de velocidade dos geradores mantêm a velocidade média das máquinas próximas do seu valor nominal ao mesmo tempo que ocorrem alterações aleatórias na carga e falhas na rede nas principais linhas de transmissão ou transformadores. As perturbações sequentes não são mais pequenas, promovendo fortes oscilações nos ângulos do rotor da máquina, podendo acarretar fluxos de potência indesejáveis (HOROWITZ; PHADKE, 2006).

O desempenho das máquinas no regime dinâmico é muito complexo, de modo que um único conceito de estabilidade do sistema elétrico não é suficiente para todas as configurações presentes no sistema elétrico. Logo, a estabilidade pode ser separada em três classes no SEP: estabilidade em estado estacionário, estabilidade dinâmica e estabilidade transitória (HOROWITZ; PHADKE, 2006).

A estabilidade em estado estacionário é a propriedade na qual o SEP continua a operar em seu estado atual onde, pequenas alterações lentas na carga do sistema podem gerar pequenas mudanças no ponto de operação. Um sistema instável em estado estacionário passará para operação não sincronizada a partir de seu ponto de operação, quando submetido a um pequeno aumento lento na carga (HOROWITZ; PHADKE, 2006).

A estabilidade dinâmica está relacionada com pequenas perturbações no sistema de potência que produzem oscilações que decaem com o tempo, fazendo com que o sistema retorne o seu estado de operação anterior à perturbação. Um sistema dinamicamente instável produz oscilações que aumentam no tempo, de forma indefinida, ou que levam a uma oscilação controlada e limitada (HOROWITZ; PHADKE, 2006).

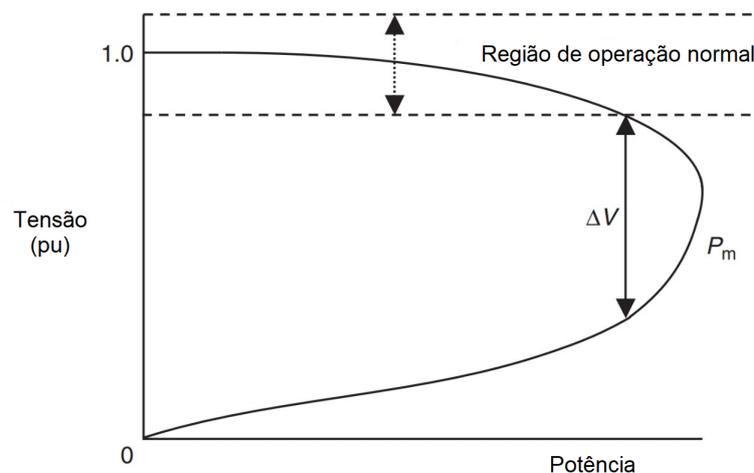
A estabilidade transitória no SEP retorna à operação síncrona após uma grande perturbação, como a que ocorre através de uma falta controlada. Um sistema instável transitório perderá o sincronismo como resultado da falha e grupos de máquinas perderão o controle de velocidade, estando acima da velocidade síncrona (HOROWITZ; PHADKE, 2006).

Dos três conceitos de estabilidade, a estabilidade em regime permanente e a estabilidade transitória são de interesse direto em pesquisas voltadas à proteção de SEP. A estabilidade dinâmica é amplamente determinada pelos ajustes de ganho e constante de tempo dos vários dispositivos controláveis no SEP (HOROWITZ; PHADKE, 2006).

Além disso, suporte reativo inadequado, fluxos de potência reativa pesados e linhas de transmissão sobrecarregadas são as principais causas de instabilidade de tensão. A

instabilidade de tensão pode ser representada pela curva chamada de "nose curve" (Figura 1). Nessa figura, a tensão na extremidade receptora é plotada em relação à potência real na extremidade receptora. A parte superior da curva representa a faixa de operação normal calculada para a condição estática do sistema. A partir de análises dinâmicas, estudos utilizam duas tensões diferentes para a mesma potência fornecida. A parte inferior da curva apresenta o desempenho para tensão instável, mas que possui uma solução. Com ΔV tendendo a zero, a margem de potência entre o ponto de operação e o ponto de máxima potência se aproxima de zero (HOROWITZ; PHADKE; NIEMIRA, 2013).

Figura 1 – "Nose curve" de estabilidade de tensão.



Fonte: Ilustração adaptada de Horowitz e Phadke (2006).

É importante ressaltar que a potência reativa (VARs, *volt-ampere-reactive*), diferentemente da potência ativa (W), não pode ser transmitida por longas distâncias. Isso se deve ao fato de que fluxos de potência reativa são causados pela diferença de tensão em um sistema de transmissão, na ordem de apenas $\pm 5\%$ do valor nominal. Essa pouca diferença não faz com que a potência reativa flua por extensos percursos. Já a potência ativa pode ser transmitida para longas distâncias a partir da operação coordenada do sistema interconectado, enquanto que a potência reativa precisa ser gerada no centro de carga ou próximo dele (HOROWITZ; PHADKE; NIEMIRA, 2013).

Ainda, como a potência reativa não pode ser transmitida por extensas distâncias, a perda repentina de linhas de transmissão exige potência reativa local. Caso isso não ocorra, a tensão diminuirá. Logo, por essas razões, a tensão, em vez da frequência torna-se o principal indicativo de estresse no sistema de potência (HOROWITZ; PHADKE; NIEMIRA, 2013).

Outro fenômeno associado a frequência elétrica diz respeito à velocidade de rotação dos geradores síncronos. Quando há perda de geração, perda de carga ou ações do relé fora do sincronismo, conforme descrito, ocorrem incompatibilidades entre a carga e a geração em um sistema de potência ou em uma parte dele. Com isso, os geradores irão acelerar, quando a geração está em excesso, ou desacelerar, quando a carga está em excesso.

Enquanto os geradores desaceleram, uma proteção controla a diminuição da velocidade de operação. Caso atinjam velocidades baixas, poderão ocorrer falhas nas pás das turbinas de geradores termoelétricos. As frequências de ressonância mecânica dessas pás estão próximas da frequência fundamental do sistema. Por exemplo, para um sistema turbina-gerador termoelétrico de 60 Hz, uma ressonância pode ocorrer em torno de 57 Hz e, se a frequência do gerador se aproximar desse valor, podem acontecer sérios danos às pás da turbina. Os motores do sistema auxiliar da estação também poderão ser prejudicados pela operação permanente na frequência reduzida (HOROWITZ; PHADKE; NIEMIRA, 2013).

Em vista disso, é imprescindível que o decaimento de frequência de um sistema isolado seja interrompido antes que os dispositivos de proteção do gerador isolem a rede e agravem ainda mais a situação. É a função dos relés de rejeição de carga de sub-frequência detectarem o início da diminuição nos níveis da frequência, reduzindo quantidades adequadas de carga no sistema, de modo que haja um equilíbrio entre geração e carga, retornando à frequência normal de operação sem desconectar nenhum gerador do sistema. Os esquemas de rejeição de carga tornaram-se muito importantes no SEP, onde há falta de reservas rotativas adequadas e escassez da capacidade de linha de ligação para suportar a geração perdida, importando grandes quantias de energia da interconexão (HOROWITZ; PHADKE; NIEMIRA, 2013).

Tendo em vista os conceitos citados anteriormente, a seguir, apresenta-se a modelagem matemática da dinâmica da frequência num determinado sistema elétrico, conforme exposto em Horowitz, Phadke e Niemira (2013).

Combinam-se todas as inércias da máquina em uma inércia total do sistema (J_0) através da Equação 2.1.

$$J_0 = \frac{\sum J_i S_i}{\sum S_i} \quad (2.1)$$

Onde, J_i são as inércias individuais das máquinas em $\text{kg}\cdot\text{m}^2$ e S_i são as potências das máquinas correspondentes. Um ângulo de rotor agregado δ é definido como o centro do ângulo:

$$\delta = \frac{\sum \delta_i S_i}{\sum S_i} \quad (2.2)$$

Ainda, a equação de movimento para o rotor agregado é dada por:

$$J_0 \frac{d^2 \delta}{dt^2} = T_a = T_m - T_e \quad (2.3)$$

Onde, T_a representa o torque de aceleração, T_m é o torque mecânico de entrada para o sistema e T_e , o torque de carga elétrica combinado. Além disso, P_m é a potência

mecânica e P_e é a potência elétrica. G representa a potência ativa total gerada e L respectiva demandada pela carga.

Multiplicando ambos os lados pela velocidade do rotor agregado ω resulta em:

$$\omega J_0 \frac{d^2\delta}{dt^2} = \omega T_a = \omega T_m - \omega T_e = P_m - P_e = \sum G_i - \sum L_i \quad (2.4)$$

A constante de inércia H está relacionada a J . H é a energia cinética armazenada em uma máquina em velocidade síncrona, dada por ω_s , dividida por sua potência aparente nominal (S_0). Então, tem-se (2.5).

$$H_0 = \frac{(1/2)J_0\omega_s^2}{S_0} \quad (2.5)$$

Substituindo J_0 na Equação 2.4 resulta em:

$$\omega \frac{2H_0 S_0}{\omega_s^2} \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_m - P_e = \sum G_i - \sum L_i \quad (2.6)$$

Aproximar ω por ω_s é um recurso utilizado em estudos de estabilidade transitória, onde não há variações significativas na frequência. Logo, essa aproximação não é aceitável no caso analisado, visto que é de interesse determinar a mudança na frequência do sistema. Identificando a frequência do sistema como a taxa de mudança do ângulo do rotor agregado, tem-se:

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{d\omega}{dt} = 2\pi \frac{df}{dt} \quad (2.7)$$

Assim, a Equação 2.6 se torna:

$$f \left(\frac{2H_0}{f_s^2} \right) S_0 \frac{df}{dt} = \sum G_i - \sum L_i \quad (2.8)$$

Se os geradores tiverem um fator de potência médio de p , então:

$$\sum G_i = pS_0 \quad (2.9)$$

Definindo um excesso de carga relativa por um fator L :

$$L \equiv \frac{\sum L_i - \sum G_i}{\sum G_i} \quad (2.10)$$

A Equação 2.8 se torna:

$$f \frac{df}{dt} = \frac{pL}{2H_0} f_s^2 \quad (2.11)$$

A equação acima pode ser integrada diretamente, e usando a condição de contorno $t = 0, f = f_0$, obtém-se:

$$f = f_0 \sqrt{1 - \frac{pL f_s^2}{2H_0 f_0^2} t} \quad (2.12)$$

À medida que t vai para o infinito, a frequência diminuirá a uma taxa cada vez maior. Na realidade, a carga não é independente da frequência e diminui com a redução da frequência. Desta forma, à medida que a frequência diminui, em alguma frequência reduzida ela equilibra a geração, e a frequência estabiliza nesse ponto. Considerando uma carga que depende da frequência, com um fator de decremento constante d , este será a porcentagem de carga dividida pela porcentagem de redução de frequência, dado pelo *Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) Committee Report*.

A carga total do sistema depende da frequência. Então, se L_i é igual a P_{10} na frequência inicial f_0 , em alguma outra frequência será dado por P_1 , onde:

$$d = \frac{(1 - P_1)/P_{10}}{(1 - f)/f_0} \quad (2.13)$$

Em termos do fator d , o fator de excesso de carga L em alguma frequência f está relacionado ao fator L_0 na frequência f_0 por:

$$L = L_0 - (1 + L_0)d \left(\frac{1 - f}{f_0} \right) \quad (2.14)$$

Substituindo este valor de L na Equação 2.11, a equação diferencial para o decaimento da frequência neste caso é dado por:

$$f \frac{df}{dt} = -\frac{p}{2H_0} \left[L_0 - (1 + L_0)d \left(1 - \frac{f}{f_0} \right) \right] f_s^2 \quad (2.15)$$

A solução desta equação, com a condição de contorno de $t = 0, f = f_0$, é dada por:

$$(f_0 - f) - f_0 \left[\frac{L_0}{(1 + L_0)d} - 1 \right] \ln \left[\frac{1}{1 - (f_0 - f)(1 + L_0)d/L_0 f_0} \right] = \frac{p}{2H_0} (1 + L_0)d \frac{f_s^2}{f_0} t \quad (2.16)$$

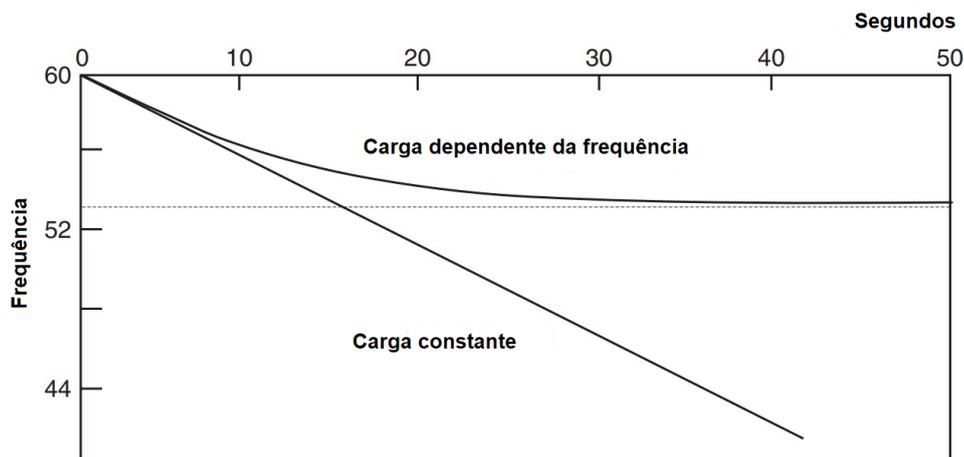
Esta equação fornece um limite f_∞ com $t \rightarrow \infty$, conforme (2.17).

$$f_\infty = f_0 \left[1 - \frac{L_0}{(1 + L_0)d} \right] \quad (2.17)$$

Que é precisamente o valor da frequência na qual o L_i dependente da frequência equilibra G_i . As Equações 2.12 e 2.16 são plotadas na Figura 2 para valores assumidos de $p = 0,85$, $H_0 = 10,0$, $L_0 = 0,3$ e $d = 2,0$. Com uma carga constante, e um fator de excesso de

carga de 0,3, a frequência continua a decair com uma taxa cada vez mais rápida, enquanto que com um fator de decréscimo de carga de 2,0 o declínio de frequência é interrompido em 53,1 Hz (HOROWITZ; PHADKE; NIEMIRA, 2013).

Figura 2 – Decaimento da frequência no sistema de potência devido à escassez de geração: constante da carga e frequência dependente da carga.



Fonte: Ilustração adaptada de Horowitz e Phadke (2006).

2.4 Frequência e Proteção

Os SEPs possuem componentes com funções específicas de operação e estes estão sujeitos permanentemente a eventos que devem ser controlados, monitorados ou eliminados. Dessa forma, para que se possa operar um sistema de potência com o maior grau de confiabilidade, é necessário a utilização de um conjunto de proteções, cada uma para determinados eventos (FILHO; MAMEDE, 2011).

A proteção de frequência é empregada nos SEPs quando ocorrem eventos de sobrefrequência ou subfrequência, como, por exemplo, na ocorrência de alteração na velocidade das máquinas elétricas girantes, que provocam aquecimento e vibrações (FILHO; MAMEDE, 2011).

Os SEPs normalmente operam com uma faixa de frequência baixa. Para sistemas de 60 Hz, é aceitável variações de frequência de até 2 Hz em tempos de resposta de proteção em cerca de 2 segundos. Além disso, podem operar por pequenos intervalos de tempo com valores de frequências não inferiores a 58 Hz, em alguns casos, podendo chegar a valores de 56 Hz. Para frequências inferiores deve ocorrer atuação do sistema de proteção (FILHO; MAMEDE, 2011).

Ainda, é importante ressaltar que as sobrefrequências não afetam em geral os componentes elétricos. Porém, suas consequências são notáveis na qualidade da energia fornecida.

Nesse contexto, destaca-se que a função de proteção de frequência opera em uma faixa entre 25 e 70 Hz, de modo que funciona tanto para sobrefrequência quanto para subfrequência. Nas próximas subseções, são apresentados alguns dispositivos utilizados na proteção de SEPs, os quais utilizam a frequência como grandeza de operação.

2.4.1 Relé de Frequência

Os relés de frequência são utilizados para fazer a medição da frequência e atuam para o valor estipulado. Podem ter uma resposta operacional instantânea, em tempo definido e em tempo independente. Além disso, podem ser utilizados em situações de subfrequência e de sobrefrequência. É importante ressaltar que geradores fornecendo potência inferior à demandada pela carga, operam em frequências fora do valor nominal do sistema.

O fenômeno de sobrefrequência ocorre, na maioria das vezes, quando determinados blocos de carga são desligados do sistema de forma indevida, provocando aumento de velocidade nos geradores da usina. Para esses casos, são empregados esquemas de inserção de cargas ou de corte de geração, de forma que o sistema opere em condições normais (FILHO; MAMEDE, 2011).

2.4.2 Relé V/Hz (Sobre-excitação)

Nesse tipo de proteção, os dispositivos detectam níveis de indução muito elevados, decorrentes de elevação de tensão e eventos de subfrequência. Níveis de indução muito altos causam saturação dos núcleos de ferro, gerando perdas excessivamente elevadas por correntes parasitas e altas temperaturas da máquina. A proteção de sobre-excitação opera nessas circunstâncias, caracterizada por sistemas ilhados ou sistemas com pouco nível de curto-circuito. A proteção por sobre-excitação é determinada a partir do quociente entre a tensão máxima e da frequência do sistema protegido (FILHO; MAMEDE, 2011).

2.4.3 Esquemas Especiais

Os sistemas especiais de proteção são sistemas automatizados de controle, implantados na geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. Na presença de uma ocorrência ou uma ação forçada, esses esquemas agem com os objetivos de: restaurar condições operacionais da geração do SEP, restaurar os limites operacionais de equipamentos do SEP e evitar blecaute parcial ou total do sistema elétrico (KINDERMANN, 2014).

Segundo Kindermann (2014), as aplicações dos esquemas são baseados em Esquemas de Controle de Emergência (ECEs) e Esquemas de Controle de Segurança (ECSs).

Os esquemas especiais intervêm no SEP por meio do comando de: abertura/fechamento (ligamento) de linhas de transmissão, geradores, transformadores, reatores, capacitores e

outros, redução/elevação de potência de geradores, permuta de compensadores e geradores síncronos, alívio/restauração de cargas (KINDERMANN, 2014).

A utilização dos esquemas especiais de proteção recebem no SEP, outras vantagens como: permitir maior utilização dos sistemas de geração, transmissão e distribuição, aumentar a confiabilidade da operação do SEP interligado, melhorar a segurança e qualidade de operação no SEP (KINDERMANN, 2014).

Para uma operação no SEP de equilíbrio entre geração e demanda, há necessidade de ações de controle, mantendo a frequência nominal. Durante a operação normal do sistema elétrico, podem ocorrer perdas de pequenos ou grandes blocos de geração. Se ocorrer a perda de uma pequena geração, nesse caso, atuam reguladores automáticos de velocidade das unidades geradoras e do Controle Automático de Geração (CAG). Este tipo de ação, com reguladores de velocidade é lenta, podendo haver a necessidade de cortes temporários de cargas para controlar a variação de frequência (KINDERMANN, 2014).

Outra maneira de manter o controle entre geração e demanda é o caso de perda de grande bloco de geração. Nesse caso, haverá uma diminuição da frequência do SEP. Para restaurar a frequência nominal, é necessário diminuir a carga conectada ao sistema elétrico. Diante disso, é efetuado o *load shedding* (do inglês, corte de carga), sendo este o menor possível. As cargas a serem desconectadas são decididas pelas empresas pertencentes ao Sistema Interligado Nacional (SIN), classificando as cargas que possuam riscos devido às contingências de perdas de geração e do déficit de geração na região. Para atender esses objetivos, utiliza-se o Esquema Regional de Alívio de Carga (ERAC), fundamentado na lógica sequencial de corte de carga, para assegurar a estabilidade e recuperar o equilíbrio de potência de geração e carga na frequência do sistema (KINDERMANN, 2014).

Outro sistema especial para controle de geração e demanda é o Sistema de Alívio de Geração (SAGE), o qual é utilizado na ocorrência de perturbações de perdas de grande blocos de carga e excesso de geração, que provocam aumento de frequência e elevação da tensão no sistema (KINDERMANN, 2014).

O Esquema de Controle de Emergência (ECE) é outro esquema especial utilizado em casos de contingência ou perturbação, o qual é acionado para recuperação das condições operacionais de um equipamento ou do sistema elétrico. O ERAC é aplicado exclusivamente em casos de perda de geração, enquanto o ECE é um esquema aplicado a qualquer tipo de perturbação (KINDERMANN, 2014).

Após a normalização do sistema elétrico e supondo que o mesmo voltou a operar em uma frequência perto da frequência nominal, podem-se restabelecer as cargas através do Esquema Regional de Restauração de Cargas (ERRC). Todos esses esquemas especiais utilizam relés de frequência ajustados em determinados valores para os quais uma porcentagem da geração/carga é rejeitada ou restaurada (KINDERMANN, 2014).

2.5 Considerações Finais

Nesse Capítulo, foi apresentada a importância da proteção para o sistema elétrico, bem como a influência da frequência nas condições normais de operação do SEP. Foram discutidos o comportamento da frequência, sobretudo o comportamento da sua dinâmica, além de destacados os dispositivos e esquemas de proteção que usam a frequência como grandeza de atuação.

O Capítulo seguinte apresenta três métodos inovadores para estimação de frequência, demonstrando a fundamentação e as respectivas lógicas, as quais foram implementadas em *software* MATLAB®.

3 MÉTODOS PARA ESTIMAÇÃO DE FREQUÊNCIA

3.1 Considerações Gerais

Neste Capítulo são apresentados os métodos propostos para estimação de frequência, os quais são fundamentados na predição de valores futuros das componentes α e β , tomadas a partir da aplicação da Transformada de Clarke nos sinais de tensão das três fases da rede. Cada método, utiliza uma determinada ferramenta matemática para realização da predição das referidas componentes, sendo estas: Funções Derivadas, Interpolação Polinomial com Base Newtoniana e Predição Linear. As subseções seguintes descrevem detalhadamente cada um dos métodos propostos.

3.2 Métodos Propostos

3.2.1 Estimação de Frequência via Funções Derivadas das Componentes de Clarke (EDCC)

Este método é baseado em Schons *et al.* (2022). O EDCC baseia-se na obtenção das componentes de Clarke de sinais de tensão das três fases da rede, através da Transformada $\alpha\beta$, conforme (3.1), onde n representa a amostra atual.

$$\begin{bmatrix} V_\alpha(n) \\ V_\beta(n) \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{2}}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

O sinal complexo resultante é dado por (3.2).

$$u(n) = V_\alpha(n) + jV_\beta(n) \quad (3.2)$$

A metodologia proposta em Santos *et al.* (2015) apresenta uma técnica de estimação de frequência baseada na predição morfológica das componentes de Clarke. Com base na ideia de prever essas componentes, o método aqui proposto utiliza as funções derivadas dos sinais V_α e V_β para calcular seus respectivos valores futuros.

Assim, segundo Wiszniewski, Rebizant e Schiel (2008), a função derivada de ordem k para estimar os pontos futuros de um sinal s é dada por (3.3). Ressalta-se que as derivadas de primeira e segunda ordem não foram utilizadas neste estudo, pois apresentam alto erro na estimativa de pontos futuros, conforme explicado em Wiszniewski, Rebizant e Schiel (2008).

$$s_{est}^k(n+1) = [c_1 \ \dots \ c_k] \times \begin{bmatrix} s(n) \\ \dots \\ s(n-k+1) \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

Manipulando as funções-diferença de ordem k , obtém-se os estimadores das respectivas ordens. Tal processo é exposto em Wiszniewski, Rebizant e Schiel (2008) e foi utilizado para determinar as equações dos estimadores de ordem 3 a 10. A Tabela 1 mostra os coeficientes aplicados em (3.3) que correspondem às funções derivadas de 3^a a 10^a ordens.

Tabela 1 – Coeficientes das Funções Derivadas de 3^a a 10^a ordens.

Ordem da Derivada	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6	c_7	c_8	c_9	c_{10}
3^a	3	-3	1	0	0	0	0	0	0	0
4^a	4	-6	4	-1	0	0	0	0	0	0
5^a	5	-10	10	-5	1	0	0	0	0	0
6^a	6	-15	20	-15	6	-1	0	0	0	0
7^a	7	-21	35	-35	21	-7	1	0	0	0
8^a	8	-28	56	-70	56	-28	8	-1	0	0
9^a	9	-36	84	-126	126	-84	36	-9	1	0
10^a	10	-45	120	-210	252	-210	120	-45	10	-1

Fonte: Autoria própria.

A estimação de frequência foi avaliada para essas funções derivadas a fim de determinar qual delas apresenta melhor desempenho para a técnica proposta. Assim, as equações para estimar as diferentes ordens consideradas foram aplicadas aos sinais α e β obtidos de (3.1). Por exemplo, a predição dos valores futuros de V_α utilizando a função derivada de 3^a ordem é dada por (3.4).

$$V_{\alpha_{est}}(n+1) = 3 \cdot V_\alpha(n) - 3 \cdot V_\alpha(n-1) + V_\alpha(n-2) \quad (3.4)$$

O processo é análogo para estimação dos valores futuros de V_β , bastando substituir os termos de V_α por V_β em (3.4).

Após obter os valores futuros de V_α e V_β através de uma das derivadas, estes são atribuídos ao valor do sinal complexo estimado (u_{est}), conforme (3.5).

$$u_{est}(n+1) = V_{\alpha_{est}}(n+1) + jV_{\beta_{est}}(n+1) \quad (3.5)$$

Com os valores $u(n)$ e $u_{est}(n+1)$, calcula-se $\gamma(n)$, conforme a Equação (3.6).

$$\gamma(n) = u_{est}(n+1) \cdot u(n)^* \quad (3.6)$$

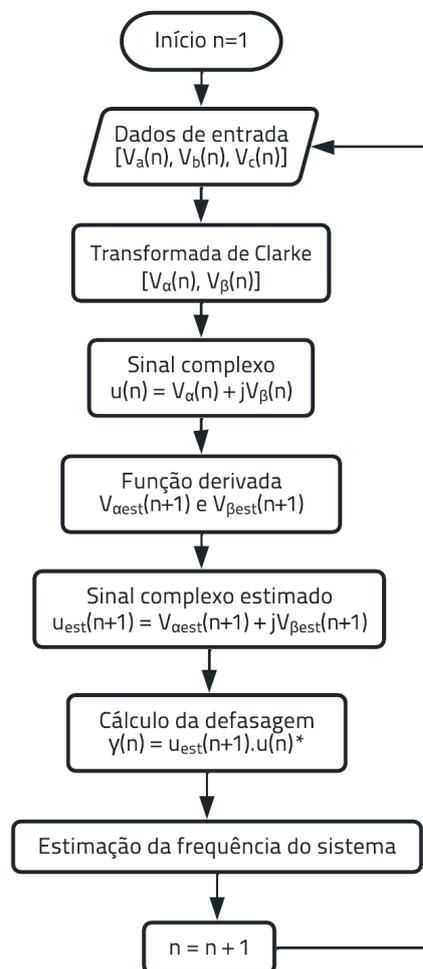
Em (3.6), $u(n)^*$ representa o conjugado complexo de $u(n)$.

Por fim, conforme explicado em Barbosa *et al.* (2008b), a estimação da frequência do sistema é dada pela Equação (3.7).

$$f_{est}(n) = \frac{f_s}{2\pi} \cdot \tan^{-1} \left\{ \frac{Im[\gamma(n)]}{Re[\gamma(n)]} \right\} \quad (3.7)$$

Em (3.7), *Re* e *Im* representam, respectivamente, as partes real e imaginária de $\gamma(n)$ e f_s é a frequência de amostragem. O fluxograma desta metodologia pode ser visto na Figura 3.

Figura 3 – Fluxograma do método de Estimação de Frequência via Funções Derivadas das Componentes de Clarke (EDCC).



Fonte: Autoria própria.

3.2.2 Estimação de Frequência via Interpolação Polinomial das Componentes de Clarke (EIPCC)

O EIPCC também se baseia na obtenção das Componentes de Clarke de sinais de tensão trifásicos, através da Transformada $\alpha\beta$, conforme (3.1). O sinal complexo resultante é dado por (3.2). O método aqui proposto utiliza a interpolação polinomial de 1^o a 3^o

grau com base de Newton para estimar os valores futuros dos sinais α e β . Assim, segundo Recktenwald (2000), a forma de Newton de um polinômio interpolador de grau n para estimar os pontos futuros de um sinal é dada em (3.8).

$$P_n(x) = c_1 + c_2 \cdot (x - x_1) + c_3 \cdot (x - x_1) \cdot (x - x_2) + \cdots + c_{n+1}(x - x_1) \cdots (x - x_n) \quad (3.8)$$

Onde a base de Newton é dada por (3.9).

$$1, (x - x_1), (x - x_1)(x - x_2), (x - x_1)(x - x_2)(x - x_3), \dots \quad (3.9)$$

Em (3.8), c_i são os coeficientes a serem encontrados exigindo que $P_n(x_i) = f(x_i)$ para $i = 1, \dots, n + 1$.

A partir da Equação 3.8, são obtidos os polinômios interpoladores de 1º a 3º graus, dados conforme (3.10) a (3.12), respectivamente.

$$P_1(x) = c_1 + c_2 \cdot (x - x_1) \quad (3.10)$$

$$P_2(x) = c_1 + c_2 \cdot (x - x_1) + c_3 \cdot (x - x_1) \cdot (x - x_2) \quad (3.11)$$

$$P_3(x) = c_1 + c_2(x - x_1) + c_3(x - x_1)(x - x_2) + c_4(x - x_1)(x - x_2)(x - x_3) \quad (3.12)$$

A forma de Newton é mais eficiente computacionalmente do que a interpolação de polinômios escritos em bases monomiais ou de Lagrange. Também, tem boas propriedades numéricas e é muito útil para análise teórica de esquemas de interpolação e métodos de integração numérica (RECKTENWALD, 2000).

Considerando o polinômio de 1º grau expresso em (3.10), passando por (x_i, y_i) , $i = 1, 2$, tem-se a relação (3.13) em sua forma matricial, para $x = x_1$.

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & x_1 - x_2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

Em (3.13), $y_1 = P_1(x_1)$ e $y_2 = P_1(x_2)$.

Aplicando a Equação 3.13, respectivamente, sobre os sinais V_α e V_β em função do tempo e fazendo a devida manipulação algébrica, obtém-se os sistemas de equações expostos em (3.14) e (3.15), os quais interpolam pontos consecutivos dos respectivos sinais por uma reta.

$$\begin{bmatrix} V_\alpha(n) \\ V_\alpha(n-1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & dt \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} c_{1\alpha} \\ c_{2\alpha} \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

$$\begin{bmatrix} V_\beta(n) \\ V_\beta(n-1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & dt \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} c_{1\beta} \\ c_{2\beta} \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

Em (3.14) e (3.15), dt representa o intervalo de amostragem, dado em função da frequência fundamental do sistema de potência (f_{fund}) e da taxa de amostragem N , em amostras por ciclo, conforme (3.16).

$$dt = \frac{1}{f_{fund} \cdot N} \quad (3.16)$$

A resolução dos sistemas de equações expostos em (3.14) e (3.15) retorna os valores dos coeficientes $c_{1\alpha}$, $c_{2\alpha}$ e $c_{1\beta}$ e $c_{2\beta}$, respectivamente. De posse desses valores, pode-se estimar valores futuros para os sinais α e β , segundo (3.17) e (3.18). A Figura 4 ilustra esse processo.

$$V_{\alpha est}(n+1) = c_{1\alpha} + c_{2\alpha} \cdot dt \quad (3.17)$$

$$V_{\beta est}(n+1) = c_{1\beta} + c_{2\beta} \cdot dt \quad (3.18)$$

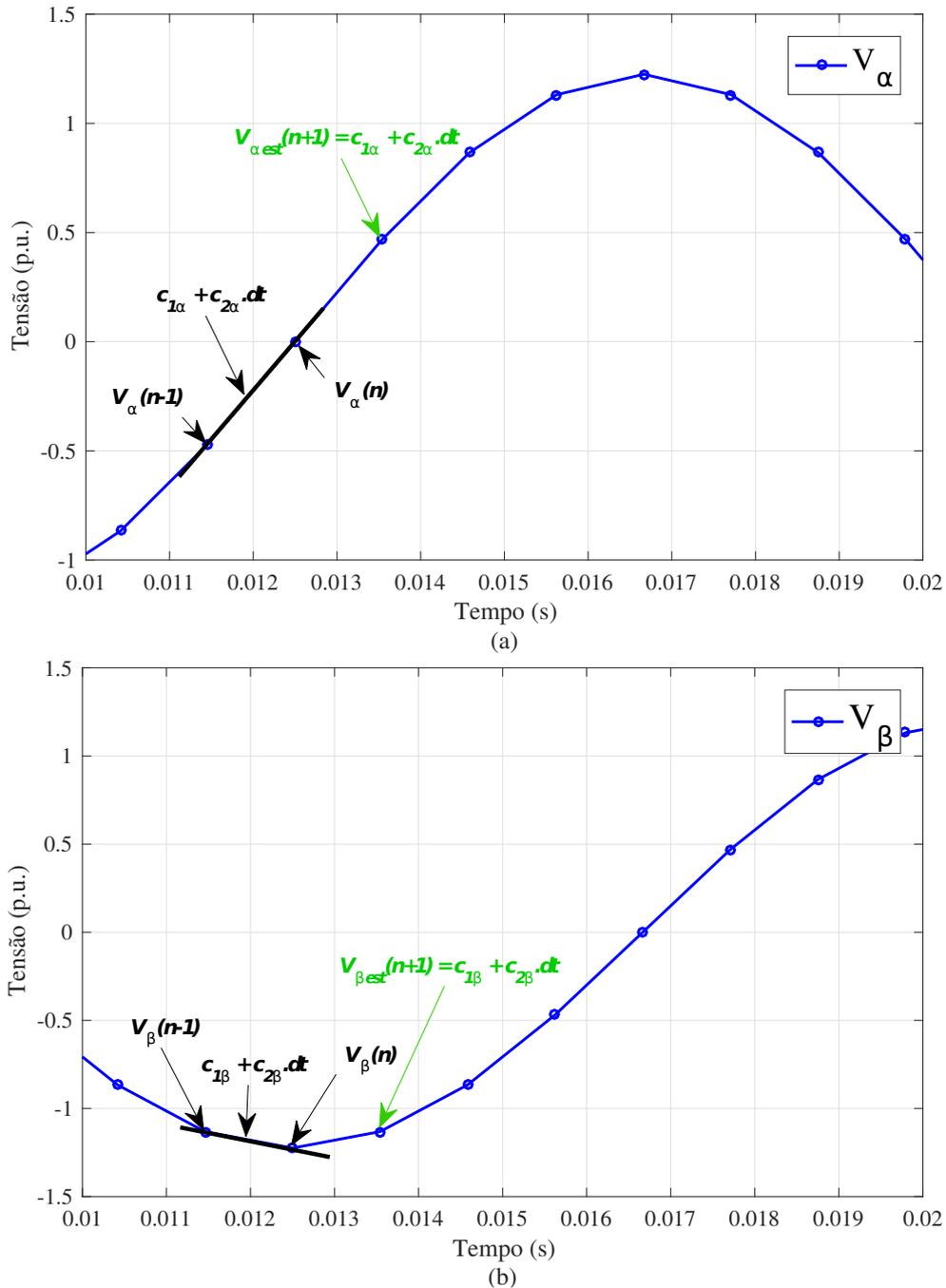
Após a obtenção dos valores futuros de V_α e V_β através do polinômio interpolador, estes são atribuídos ao valor do sinal complexo estimado (u_{est}), conforme (3.5). Com os valores $u(n)$ e $u_{est}(n+1)$, calcula-se $\gamma(n)$, conforme a Equação (3.6).

Por fim, a estimação de frequência do sistema é dada conforme (3.7). O fluxograma desta metodologia pode ser visto na Figura 5.

3.2.3 Estimação de Frequência via Predição Linear das Componentes de Clarke (EPLCC)

Como as demais propostas deste trabalho, o EPLCC se baseia na obtenção das Componentes de Clarke de sinais de tensão trifásicos, através da Transformada $\alpha\beta$, conforme (3.1). Da mesma forma que para as demais propostas, o sinal complexo resultante é dado por (3.2), sendo que este método utiliza a predição linear para estimar os valores futuros dos sinais α e β .

Figura 4 – Interpolação polinomial de 1º grau aplicada sobre os sinais V_α e V_β . (a) Interpolação em V_α . (b) Interpolação em V_β .

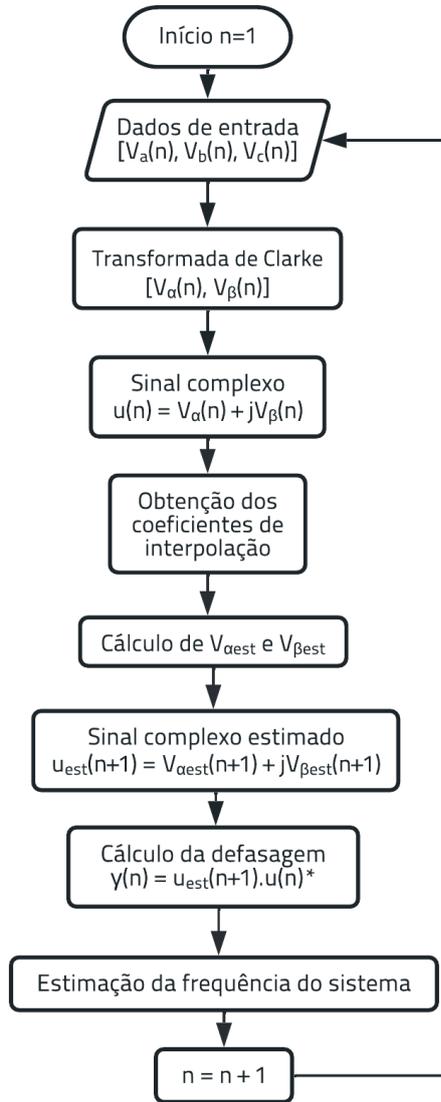


Fonte: Autoria própria.

Ressalta-se que, segundo Riahy e Abedi (2008), o modelo de predição linear representa recursivamente séries temporais de amostras de sinal ao longo de um intervalo de tempo, como segue na Equação (3.19).

$$s(n) = c_1 \cdot s(n-1) + \dots + c_i \cdot s(n-i) \quad (3.19)$$

Figura 5 – Fluxograma do método de Estimação de Frequência via Interpolação Polinomial das Componentes de Clarke (EIPCC).



Fonte: Autoria própria.

Onde n é valor atual amostrado para o sinal s , $n - 1, \dots, n - i$, indicam amostras passadas do sinal s . c_1, \dots, c_i são coeficientes de predição linear, i é a ordem do modelo. Aplicando essa ideia à V_α , para a predição de 4^a ordem, tem-se (3.20) a (3.23).

$$V_\alpha(n) = c_1 \cdot V_\alpha(n - 1) + c_2 \cdot V_\alpha(n - 2) + c_3 \cdot V_\alpha(n - 3) + c_4 \cdot V_\alpha(n - 4) \quad (3.20)$$

$$V_\alpha(n - 1) = c_1 \cdot V_\alpha(n - 2) + c_2 \cdot V_\alpha(n - 3) + c_3 \cdot V_\alpha(n - 4) + c_4 \cdot V_\alpha(n - 5) \quad (3.21)$$

$$V_\alpha(n - 2) = c_1 \cdot V_\alpha(n - 3) + c_2 \cdot V_\alpha(n - 4) + c_3 \cdot V_\alpha(n - 5) + c_4 \cdot V_\alpha(n - 6) \quad (3.22)$$

$$V_\alpha(n-3) = c_1 \cdot V_\alpha(n-4) + c_2 \cdot V_\alpha(n-5) + c_3 \cdot V_\alpha(n-6) + c_4 \cdot V_\alpha(n-7) \quad (3.23)$$

Analogamente, em V_β , tem-se (3.24) a (3.27).

$$V_\beta(n) = c_1 \cdot V_\beta(n-1) + c_2 \cdot V_\beta(n-2) + c_3 \cdot V_\beta(n-3) + c_4 \cdot V_\beta(n-4) \quad (3.24)$$

$$V_\beta(n-1) = c_1 \cdot V_\beta(n-2) + c_2 \cdot V_\beta(n-3) + c_3 \cdot V_\beta(n-4) + c_4 \cdot V_\beta(n-5) \quad (3.25)$$

$$V_\beta(n-2) = c_1 \cdot V_\beta(n-3) + c_2 \cdot V_\beta(n-4) + c_3 \cdot V_\beta(n-5) + c_4 \cdot V_\beta(n-6) \quad (3.26)$$

$$V_\beta(n-3) = c_1 \cdot V_\beta(n-4) + c_2 \cdot V_\beta(n-5) + c_3 \cdot V_\beta(n-6) + c_4 \cdot V_\beta(n-7) \quad (3.27)$$

Na forma matricial, para V_α ou V_β , tem-se (3.28).

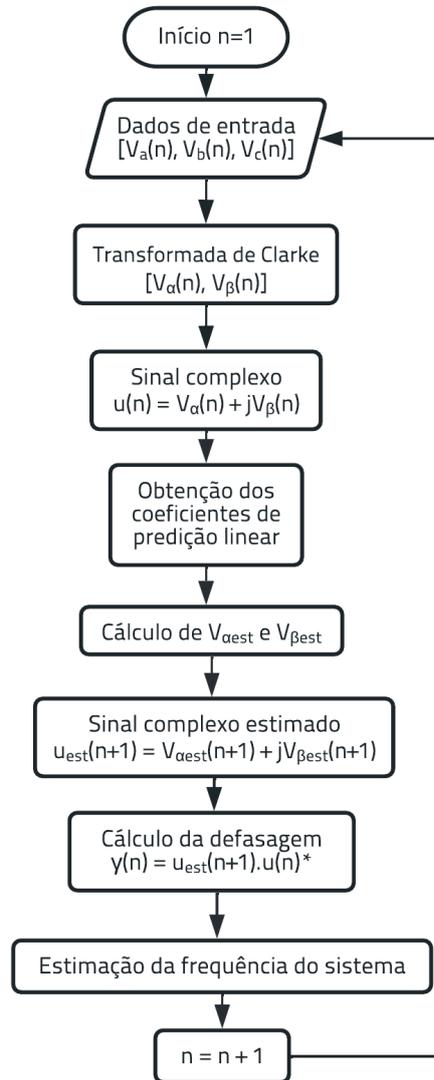
$$\begin{bmatrix} V(n) \\ \vdots \\ V(n-3) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V(n-1) & \dots & V(n-4) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ V(n-4) & \dots & V(n-7) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} c_1 \\ \vdots \\ c_4 \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

Uma vez estimados os respectivos coeficientes, valores futuros de V_α e V_β podem ser obtidos pela equação genérica dada por (3.29).

$$V(n+1) = c_1 \cdot V(n) + c_2 \cdot V(n-1) + c_3 \cdot V(n-2) + c_4 \cdot V(n-3) \quad (3.29)$$

Da mesma forma que para os demais métodos, após a obtenção dos valores futuros de V_α e V_β através do polinômio de predição, estes são atribuídos ao valor do sinal complexo estimado (u_{est}), conforme (3.5). Com os valores $u(n)$ e $u_{est}(n+1)$, calcula-se $\gamma(n)$, conforme a Equação (3.6). Por fim, a estimação de frequência do sistema é dada conforme (3.7), analogamente ao que é feito nas propostas apresentadas nas Seções anteriores. Por fim, o fluxograma desta proposta é apresentado na Figura 6.

Figura 6 – Fluxograma do método de Estimação de Frequência via Predição Linear das Componentes de Clarke (EPLCC).



Fonte: Autoria própria.

3.3 Modelagem Matemática dos Casos de Variação de Frequência

As metodologias propostas para estimação de frequência foram testadas para diferentes sinais de tensão gerados computacionalmente, que simulam diferentes tipos de variações de frequência. Em todos os casos, a frequência fundamental de 60 Hz foi assumida como a frequência inicial. Além disso, nos casos com variação de frequência em rampa e exponencial, o desvio de frequência inicia em 0,5 segundo, enquanto que para os casos com variação senoidal amortecida, o desvio ocorre a partir de 0,2 segundo.

Todos os sinais de tensão foram gerados conforme (3.30) a (3.32), onde $f(n)$ representa o sinal de frequência que possui uma equação particular para cada tipo de

desvio, de acordo com Marchesan *et al.* (2013).

$$V_A(n) = A \cdot \cos[2\pi \cdot f(n) \cdot t(n)] \quad (3.30)$$

$$V_B(n) = A \cdot \cos \left[2\pi \cdot f(n) \cdot t(n) - \left(\frac{2\pi}{3} \right) \right] \quad (3.31)$$

$$V_C(n) = A \cdot \cos \left[2\pi \cdot f(n) \cdot t(n) + \left(\frac{2\pi}{3} \right) \right] \quad (3.32)$$

Estas equações particulares serão apresentadas nas subseções a seguir.

3.3.1 Variação de Frequência em Rampa

Para este tipo de variação, o desvio do sinal de frequência é dado por (3.33). No caso apresentado, a variação foi de 60 para 65 Hz, com passo de 0,01 Hz por amostra.

$$f(n) = f_0 + \Delta f \cdot t(n) \quad (3.33)$$

Em (3.33), f_0 representa a frequência inicial, Δf é a variação da frequência e $t(n)$, o instante de tempo para a amostra n .

3.3.2 Variação Exponencial de Frequência

Neste caso, em (3.30) a (3.32) a frequência varia de acordo com (3.34) de 60 Hz para valores maiores ou menores, em forma exponencial, conforme o valor de Δf .

$$f(n) = f_0 + \Delta f \cdot \left(1 - e^{-\frac{t(n)}{\tau}} \right) \quad (3.34)$$

Em (3.34), τ é a constante de tempo da função exponencial.

3.3.3 Variação Senoidal Amortecida de Frequência

Esses sinais são gerados usando de (3.30) a (3.32), onde a variação da frequência é dada por (3.35).

$$f(n) = f_0 + \Delta f \cdot \left(\omega_f \cdot t(n) \cdot e^{-\frac{t(n)}{\tau}} \right) \quad (3.35)$$

Em (3.35), Δf é a amplitude da frequência, ω_f é a frequência angular e τ é a constante de tempo da senoide amortecida.

3.4 Índices de Desempenho

Para validar a qualidade da estimação de frequência das metodologias propostas, foram analisados os seguintes índices de desempenho: tempo de convergência, intervalo de convergência, erro máximo antes da convergência, erro mínimo antes da convergência, erro máximo após a convergência e erro mínimo após a convergência.

3.4.1 Tempo de Convergência (TC)

O Tempo de Convergência (TC) é dado pelo instante em que o valor absoluto do erro de estimação é menor que 0,05 Hz por 3 ciclos após a primeira estimação que atende a essa condição. Quando um erro de estimativa é menor que 0,05 Hz, o algoritmo salva o instante e conta o número de estimações com erros menores que 0,05 Hz, até o equivalente a três ciclos (48 cálculos de erro consecutivos para 16 amostras por ciclo, por exemplo). Então, o instante salvo é considerado o tempo de convergência. Se o erro absoluto da estimação for maior que 0,05 Hz antes que o contador atinja três ciclos, o valor salvo é descartado e um novo instante é salvo caso a condição inicial seja novamente satisfeita. Além disso, se o erro absoluto não atender ao critério de convergência estabelecido, a resposta do método é considerada não convergente.

3.4.2 Intervalo de Convergência (IC)

O Intervalo de Convergência (IC) é o intervalo entre o Tempo de Convergência e o Instante de Variação de frequência (IV), conforme indicado em (3.36).

$$IC = TC - IV \quad (3.36)$$

Para fins de proteção, é desejável que as respostas dos estimadores de frequência tenham o menor tempo de convergência possível. Assim, quanto menor o TC, melhor o desempenho do estimador de frequência, conforme Begovic *et al.* (1993).

3.4.3 Erro Absoluto

É dado pelo módulo da diferença entre a frequência estimada (f_{est}) para a amostra atual (n) e a frequência de referência para o mesmo instante (f_{ref}), de acordo com (3.37).

$$erro(n) = |f_{est}(n) - f_{ref}(n)| \quad (3.37)$$

A partir do erro absoluto, são determinados os valores máximos e mínimos dos erros absolutos das respostas dos métodos, antes e depois de sua respectiva convergência, determinando os demais índices de desempenho considerados neste estudo, que são, respectivamente: Erro Absoluto Máximo Antes da Convergência (EAACmáx), Erro Absoluto

Mínimo Antes da Convergência (EAACmín), Erro Absoluto Máximo Depois Convergência (EADCmáx) e Erro Absoluto Mínimo Depois Convergência (EADCmín). Para evitar que um relé de frequência opere incorretamente durante um estado transitório de frequência, é desejável que o EAAC seja o menor possível, de acordo com Santos *et al.* (2015). Além disso, é desejável que o erro de estimação da frequência seja o menor possível durante todo o processamento do sinal, pois este parâmetro indica a precisão da metodologia antes e depois da convergência. Quanto menores os valores desses erros, melhor o desempenho do método.

3.5 Considerações Finais

As técnicas apresentadas neste trabalho foram implementadas em MATLAB® e testadas para sinais de tensão gerados computacionalmente com diferentes tipos de variação de frequência, conforme aqui apresentado, tendo suas respostas avaliadas em termos dos índices de desempenho discutidos neste Capítulo.

O Capítulo seguinte apresenta os resultados deste estudo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Considerações Gerais

O presente Capítulo apresenta os resultados da análise do desempenho dos três estimadores de frequência propostos, os quais tiveram seus desempenhos avaliados para diferentes taxas de amostragens e para os índices de desempenho descritos no Capítulo anterior.

4.2 Resultados

Para estimação de frequência, foram utilizados sinais de tensão das três fases da rede de um banco de sinais gerados no *software ATPDraw*®.

Todos os casos foram simulados para 16, 32, 64, 96, 128 e 256 amostras por ciclo. Os melhores resultados foram observados em 96, 128 e 256 amostras por ciclo. No entanto, não foram verificadas diferenças significativas entre as respostas do estimador para essas amostragens. Sendo assim, são apresentados apenas os resultados obtidos para 96 amostras/ciclo.

Em cada caso, a resposta do estimador foi obtida e avaliada quantitativamente pelos índices de desempenho, cujos valores, para cada caso, são apresentados nas tabelas a seguir.

Com relação ao Estimador de Frequência via Funções Derivadas das Componentes de Clarke (EDCC), para derivadas de terceira ordem, não houve convergência em nenhum dos casos. Os melhores valores foram obtidos e validados pelos índices de desempenho. As tabelas com os melhores resultados dos índices de desempenho obtidos por cada ordem das derivadas da metodologia são destacadas, enquanto as figuras para este método apresentam a estimação de frequência para 96 amostras/ciclo. O estimador obteve ótimos resultados frente às variações de frequência simuladas.

A respeito do Estimador de Frequência via Interpolação Polinomial com base de Newton das Componentes de Clarke (EIPCC), em cada caso, as melhores respostas do estimador foram observadas no polinômio de 2^o grau, logo, as simulações de estimação de frequência são apresentadas para este estimador. As figuras apresentam as respostas para casos com 96 amostras/ciclo. As respostas dos índices de desempenho obtidas foram avaliadas, cujos valores, para cada amostragem, são apresentados nas tabelas. Os resultados foram satisfatórios para todos os casos.

Relativo ao Estimador de Frequência via Predição Linear das Componentes de

Clarke (EPLCC), foi possível observar melhores respostas para o estimador de 2^a ordem. Dessa forma, são apresentadas as simulações para essa estimação. As figuras apresentam as respostas para os casos com 96 amostras/ciclo, enquanto as tabelas apresentam os índices de desempenho para todas as taxas de amostragem verificadas nas simulações. Ressalta-se que para todas as taxas de amostragem os resultados foram satisfatórios.

4.2.1 Caso 1: Variação de Frequência em Rampa

4.2.1.1 Estimador de Frequência via Funções Derivadas das Componentes de Clarke (EDCC)

A Figura 7 apresenta os resultados para a frequência estimada utilizando a função derivada de 4^a ordem do EDCC, que apresentou bom desempenho, processando sinais de tensão com variação de frequência em rampa de 60 a 65 Hz, para uma taxa de amostragem de 96 amostras por ciclo. A Tabela 2 mostra os índices de desempenho obtidos com funções derivadas de 4^a a 10^a ordem, onde os melhores resultados são destacados. Para este caso, a função de 4^a ordem apresentou os melhores resultados para os índices de desempenho TC, IC, EAACmáx e EADCmáx. Enquanto os piores valores dos índices TC, IC, EAACmáx e EADCmáx foram obtidos pela função de 10^a ordem. Por outro lado, os melhores valores de EAACmín e EADCmín foram verificados para a função derivada de 10^a ordem, enquanto os piores resultados de EAACmín e EADCmín foram obtidos pela 4^a ordem. Resultados semelhantes foram encontrados para outros casos de variação de frequência em rampa.

Tabela 2 – Índices de desempenho para variação de frequência em rampa (60 Hz para 65 Hz) utilizando diferentes ordens da função derivada.

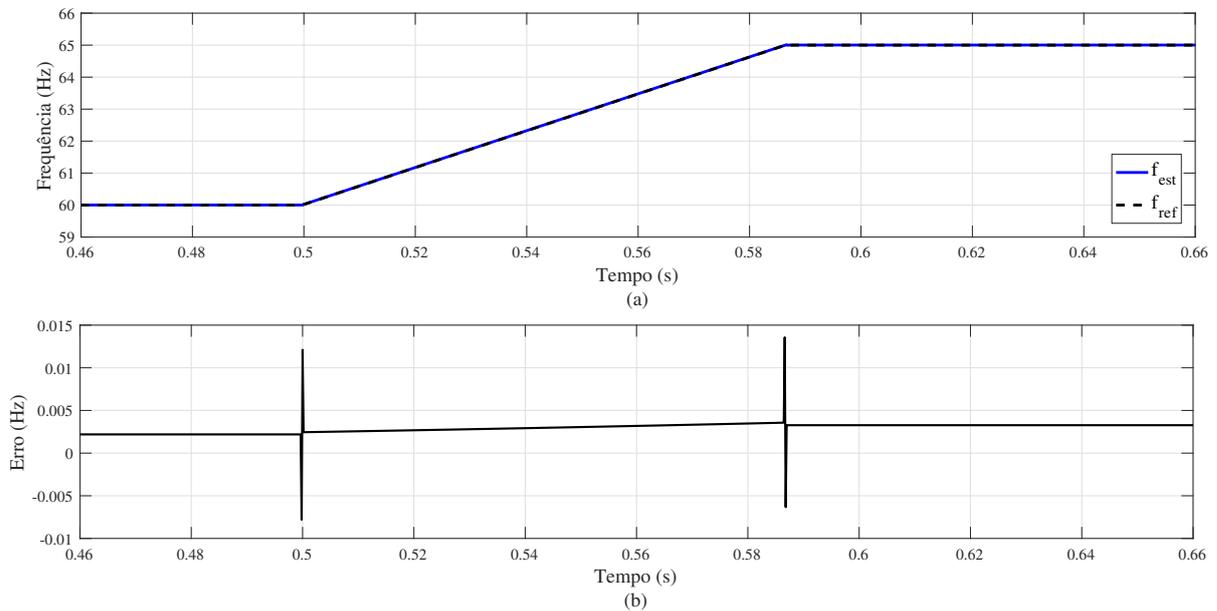
<i>Ordem da Derivada</i>	<i>TC</i>	<i>IC</i>	<i>EAACmáx</i>	<i>EAACmín</i>	<i>EADCmáx</i>	<i>EADCmín</i>
4^a	5,50174E-1	5,01736E-2	1,21092E-2	2,19418E-3	1,35692E-2	3,05578E-3
5^a	5,50174E-1	5,01736E-2	1,88075E-2	1,08245E-3	2,14835E-2	1,36556E-3
6^a	5,50347E-1	5,03472E-2	2,98573E-2	1,40429E-5	2,98776E-2	2,27624E-5
7^a	5,50521E-1	5,05208E-2	5,86484E-2	4,54306E-6	5,84266E-2	6,28665E-6
8^a	5,50695E-1	5,06945E-2	9,81192E-2	7,87460E-8	9,77901E-2	1,49666E-7
9^a	5,50868E-1	5,08681E-2	1,91924E-1	1,72977E-8	1,90565E-1	2,74704E-8
10^a	5,51042E-1	5,10417E-2	3,37161E-1	1,88294E-12	3,35036E-1	1,03739E-12

Fonte: Autoria própria.

4.2.1.2 Estimador de Frequência via Interpolação Polinomial com base de Newton das Componentes de Clarke (EIPCC)

A Figura 8 apresenta os resultados para a frequência estimada pelo método proposto EIPCC de 2^a grau, que apresentou bom desempenho ao processar os mesmos sinais de tensão com variação de frequência em rampa de 60 a 65 Hz. Vale ressaltar que o erro da estimação mostrado na Figura 8(b) mantém-se constante durante toda a rampa de variação de frequência.

Figura 7 – (a) Estimação de frequência via função derivada de 4^a ordem para variação em rampa de frequência. (b) Erro da estimação.



Fonte: Autoria própria.

A Tabela 3, mostra os índices de desempenho obtidos para taxas de amostragem de 16 a 256 amostras/ciclo, onde os melhores resultados estão destacados. Para este caso, os melhores resultados para os índices TC, IC e EAACmáx foram verificados em 256 amostras/ciclo. Os melhores valores de EAACmín foram encontrados para taxas de amostragem de 16 a 128 amostras/ciclo, enquanto os piores foram obtidos para 256 amostras/ciclo. Para EADCmáx e EADCmín, os melhores resultados foram encontrados para 64 e 96 amostras/ciclo, respectivamente, enquanto os piores resultados foram obtidos para 16 e 32 amostras/ciclo.

Tabela 3 – Índices de desempenho para variação de frequência em rampa (60 Hz para 65 Hz) utilizando interpolação polinomial de 2^o grau.

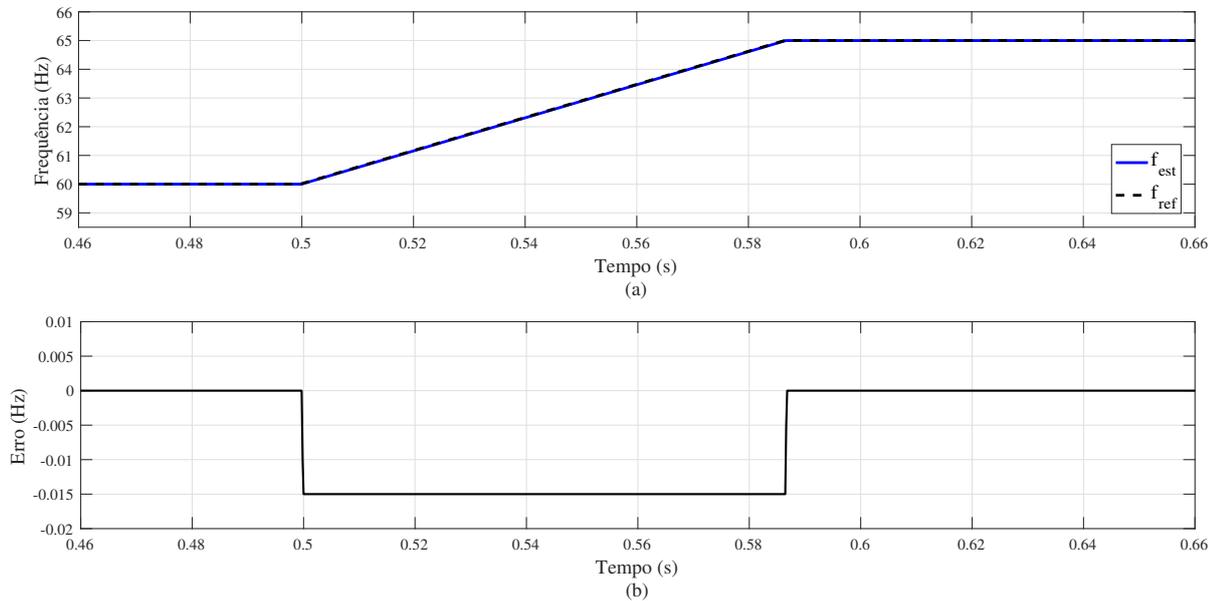
<i>Amostras por Ciclo</i>	<i>TC</i>	<i>IC</i>	<i>EAACmáx</i>	<i>EAACmín</i>	<i>EADCmáx</i>	<i>EADCmín</i>
16	6,67708E-1	1,67708E-1	1,50000E-2	0,00000E+0	1,50000E-2	1,50000E-2
32	6,67188E-1	1,67188E-1	1,50000E-2	7,00000E-15	1,50000E-2	6,75000E-12
64	6,66927E-1	1,66927E-1	1,50000E-2	0,00000E+0	1,06440E-11	2,38700E-12
96	6,66840E-1	1,66840E-1	1,50000E-2	7,00000E-15	2,59350E-11	9,52000E-13
128	6,66800E-1	1,66800E-1	1,50000E-2	0,00000E+0	1,06870E-11	4,50500E-12
256	6,66673E-1	1,66732E-1	1,50000E-2	3,93640E-11	8,27070E-11	7,57010E-11

Fonte: Autoria própria.

4.2.1.3 Estimador de Frequência via Predição Linear das Componentes de Clarke (EPLCC)

A Figura 9 apresenta os resultados para a frequência estimada pelo EPLCC de 2^a ordem, o qual apresentou bom desempenho para os mesmos sinais processados pelo

Figura 8 – (a) Estimação de frequência via interpolação polinomial de 2^o grau para variação de frequência em rampa. (b) Erro da estimação.



Fonte: Autoria própria.

EDCC e pelo EIPCC. A Tabela 4, mostra os índices de desempenho obtidos para taxas de amostragem de 16 a 256 amostras/ciclo, onde os melhores resultados estão destacados. Para este caso, a taxa de 256 amostras/ciclo apresentou os melhores resultados para os índices de desempenho TC e IC. Os melhores valores de EAACmáx e EAACmín foram encontrados para taxas de amostragem de 16 a 128 amostras/ciclo, enquanto que os piores foram obtidos para 256 amostras/ciclo. Para EADCmáx e EADCmín, os melhores resultados foram encontrados para 256 e 96 amostras/ciclo, respectivamente, enquanto os piores resultados foram obtidos para 32 e 16 amostras/ciclo.

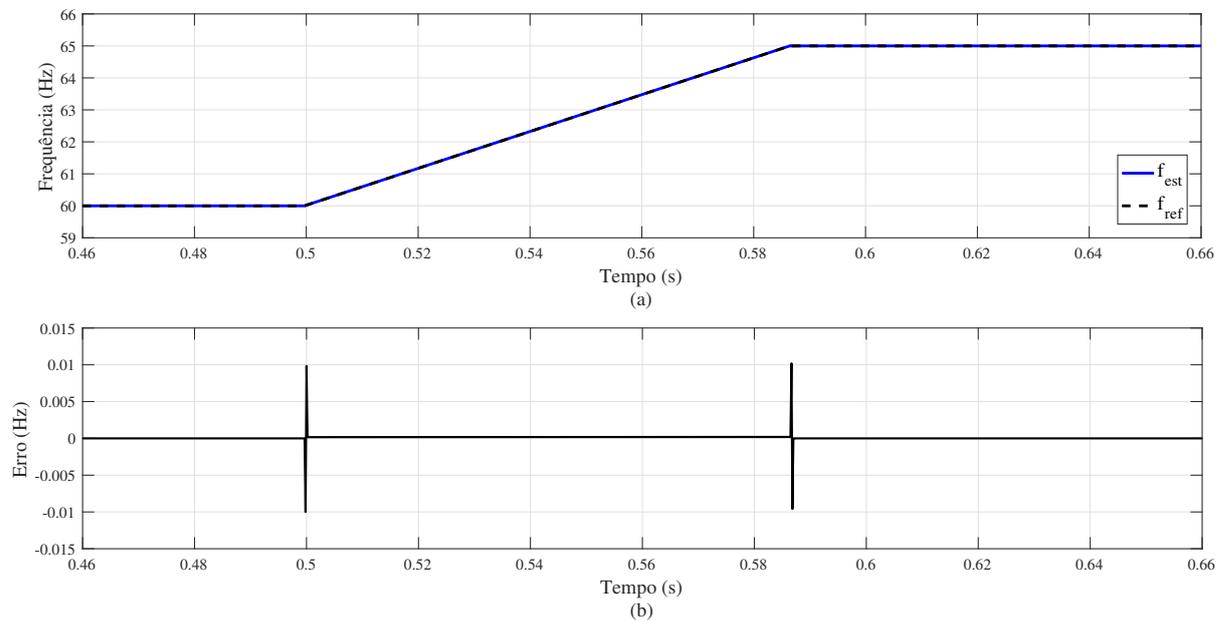
Tabela 4 – Índices de desempenho para variação de frequência em rampa (60 Hz para 65 Hz) utilizando predição linear de 2^a ordem.

<i>Amostras por Ciclo</i>	<i>TC</i>	<i>IC</i>	<i>EAACmáx</i>	<i>EAACmín</i>	<i>EADCmáx</i>	<i>EADCmín</i>
16	5,51042E-1	5,10417E-2	1,00000E-2	0,00000E+0	4,48250E-3	4,18264E-3
32	5,50521E-1	5,05208E-2	1,00000E-2	0,00000E+0	1,16243E-2	6,57963E-12
64	5,50260E-1	5,02604E-2	1,00000E-2	0,00000E+0	1,04409E-2	2,85638E-12
96	5,50174E-1	5,01736E-2	1,00000E-2	7,10543E-15	1,01988E-2	0,00000E+0
128	5,50130E-1	5,01302E-2	1,00000E-2	0,00000E+0	1,01125E-2	7,57439E-12
256	5,50065E-1	5,00651E-2	1,00283E-2	2,70717E-12	8,43272E-11	7,33280E-11

Fonte: Autoria própria.

Em relação ao erro da estimação apresentado na Figura 9(b), é notável que os erros mais significativos ocorrem no início e no fim da rampa de variação de frequência, sendo constante entre esses instantes.

Figura 9 – (a) Estimação de frequência via predição linear de 2ª ordem para variação de frequência em rampa. (b) Erro da estimacão.



Fonte: Autoria própria.

4.2.2 Caso 2: Variação Exponencial de Frequência

4.2.2.1 Estimador de Frequência via Funções Derivadas das Componentes de Clarke (EDCC)

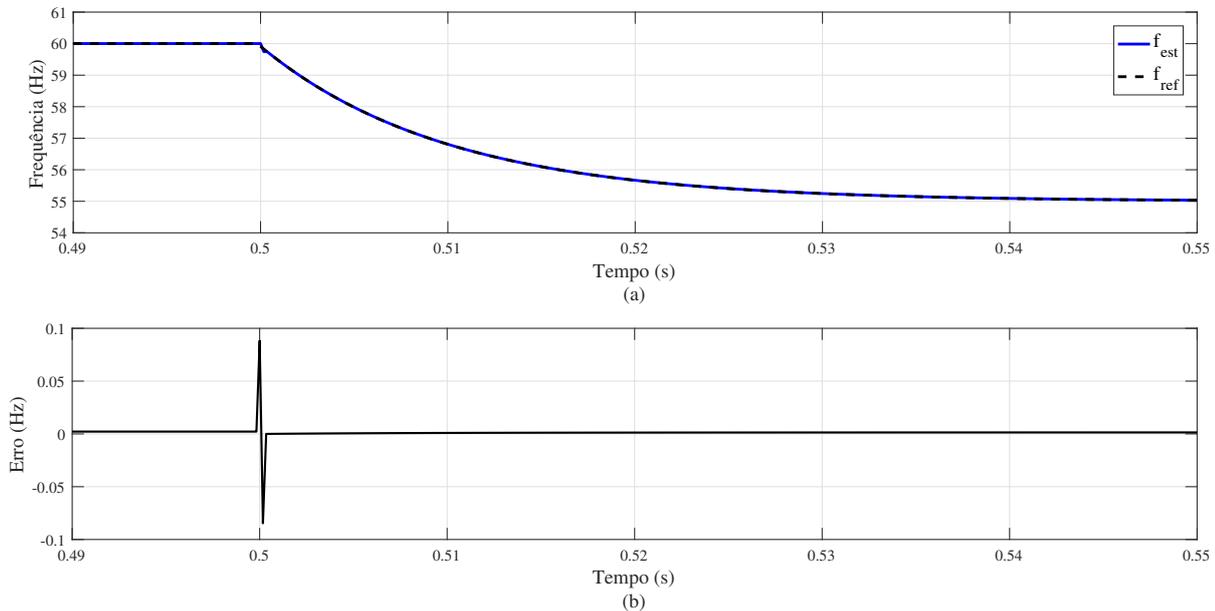
A Figura 10 apresenta a resposta da metodologia proposta EDCC de 4ª ordem para o processamento de sinais de tensão com variação exponencial de frequência, gerados para $\Delta f = -5$ Hz e $\tau = 0,05$ s. Este método obteve os melhores resultados para este caso. Os índices de desempenho obtidos a partir de cada função derivada analisada são apresentados na Tabela 5. Neste caso, a função derivada de 4ª ordem apresenta os melhores resultados para os índices TC, IC e EAACmáx, enquanto que, para os índices EAACmín, EADCmín e EADCmáx, os melhores resultados foram obtidos com a função derivada de 10ª ordem. Resultados semelhantes foram encontrados para diferentes casos com variação de exponencial de frequência.

Tabela 5 – Índices de desempenho para variação exponencial de frequência (60 Hz para 55 Hz, $\Delta f = -5$ Hz e $\tau = 0,05$ s) utilizando diferentes ordens da função derivada.

<i>Ordem da Derivada</i>	<i>TC</i>	<i>IC</i>	<i>EAACmáx</i>	<i>EAACmín</i>	<i>EADCmáx</i>	<i>EADCmín</i>
4ª	5,50347E-1	5,03472E-2	8,82506E-2	2,26370E-6	1,42094E-3	1,41284E-3
5ª	5,50521E-1	5,05208E-2	1,73770E-1	7,06004E-4	7,05971E-4	7,04067E-4
6ª	5,50695E-1	5,06945E-2	2,58576E-1	1,07172E-8	7,64699E-6	7,57245E-6
7ª	5,50868E-1	5,08681E-2	5,09204E-1	2,51354E-6	2,51402E-6	2,50514E-6
8ª	5,51042E-1	5,10417E-2	8,50234E-1	4,70202E-10	3,81337E-8	3,49210E-8
9ª	5,51215E-1	5,12153E-2	1,66776E+0	6,83117E-9	1,20980E-8	5,68215E-9
10ª	5,51389E-1	5,13889E-2	2,92725E+0	4,32721E-12	6,53868E-9	3,56693E-12

Fonte: Autoria própria.

Figura 10 – (a) Estimação de frequência via função derivada de 4ª ordem para variação exponencial de frequência. (b) Erro da estimacão.



Fonte: Autoria própria.

Vale ressaltar que, na Figura 10(b), é notável que os maiores valores para o erro da estimacão de frequência via EDCC de 4ª ordem ocorrem nos instantes iniciais da variação exponencial.

4.2.2.2 Estimador de Frequência via Interpolação Polinomial com base de Newton das Componentes de Clarke (EIPCC)

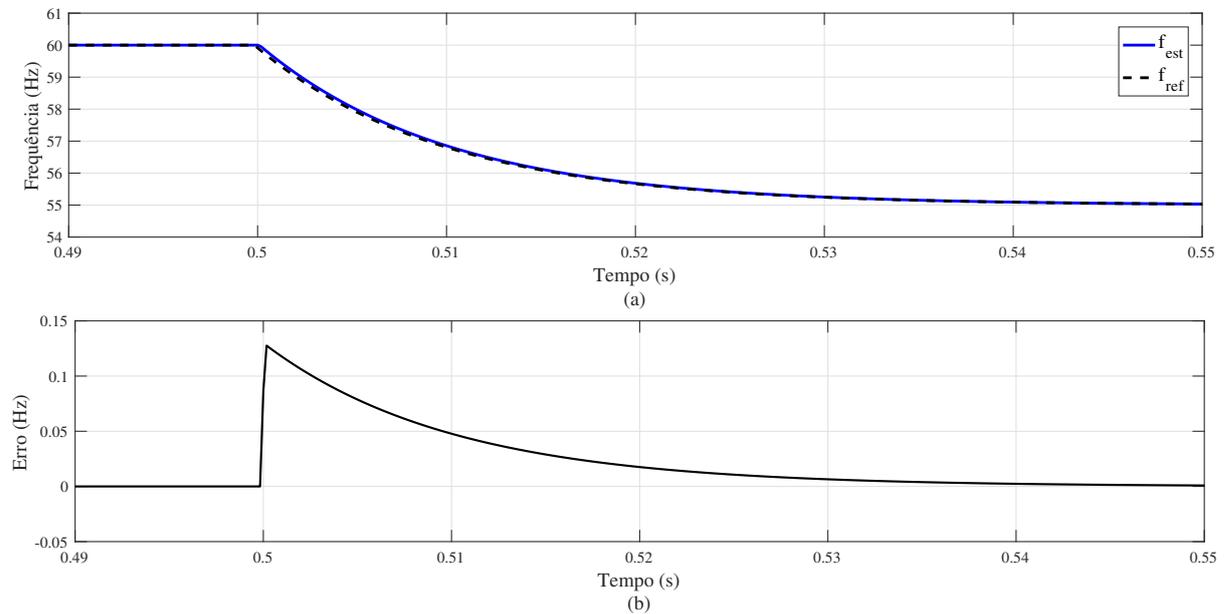
A Figura 11 apresenta a resposta da metodologia EIPCC de 2ª grau para o processamento dos sinais do caso anterior. Os índices de desempenho obtidos para cada taxa de amostragem analisada são apresentados na Tabela 6. Neste caso, a taxa de amostragem de 256 amostras/ciclo apresentou os melhores resultados para os índices TC, IC, EAACmáx e EADCmín, enquanto que para os índices EAACmín e EADCmáx, o melhor resultado foi apresentado para as amostragens de 16 a 128 amostras/ciclo.

Tabela 6 – Índices de desempenho para variação exponencial de frequência (60 Hz para 55 Hz, $\Delta f = -5$ Hz e $\tau = 0,05$ s) utilizando interpolação polinomial de 2º grau.

<i>Amostras por Ciclo</i>	<i>TC</i>	<i>IC</i>	<i>EAACmáx</i>	<i>EAACmín</i>	<i>EADCmáx</i>	<i>EADCmín</i>
16	6,94792E-1	1,94792E-1	6,93006E-1	0,00000E+0	2,67004E-9	5,00000E-14
32	6,87500E-1	1,87500E-1	3,67749E-1	7,00000E-15	2,78690E-9	2,80000E-14
64	6,80469E-1	1,80469E-1	1,89487E-1	0,00000E+0	2,82169E-9	7,00000E-15
96	6,76215E-1	1,76215E-1	1,27603E-1	7,00000E-15	2,88862E-9	1,40000E-14
128	6,73438E-1	1,73438E-1	9,61865E-2	0,00000E+0	2,85104E-9	1,40000E-14
256	6,66732E-1	1,66732E-1	4,84590E-2	3,92080E-11	2,82000E-9	0,00000E+0

Fonte: Autoria própria.

Figura 11 – (a) Estimação de frequência via interpolação polinomial de 2^o grau para variação exponencial de frequência. (b) Erro da estimação.



Fonte: Autoria própria.

Ainda, cabe destacar que, após o início da variação de frequência, o erro apresentado pelo EIPCC de segundo grau decai de um valor máximo de forma exponencial, assim como a variação de frequência. Isso pode ser visto na Figura 11(b), o que justifica a convergência mais lenta do método para este caso.

4.2.2.3 Estimador de Frequência via Predição Linear das Componentes de Clarke (EPLCC)

A Figura 12 apresenta a resposta para o EPLCC de 2^a ordem para os sinais com variação exponencial de frequência ($\Delta f = -5$ Hz e $\tau = 0,05$ s). Os índices de desempenho obtidos em cada taxa de amostragem analisada são apresentados na Tabela 7.

Neste caso, a taxa de amostragem de 256 amostras/ciclo apresentou os melhores resultados para os índices TC, IC e EAACmáx, enquanto para os índices EAACmín, o melhor resultado foi apresentado para as amostragens de 16 a 128 amostras/ciclo. Para EADCmáx e EADCmín os melhores resultados foram obtidos com uma taxa de amostragem de 256 amostras/ciclo.

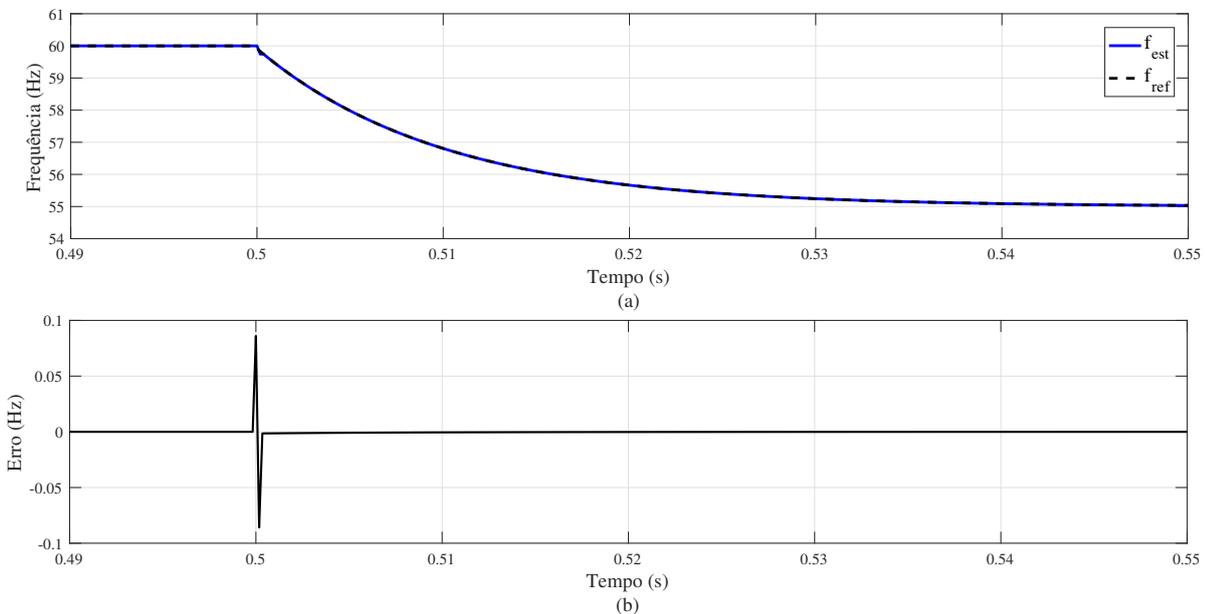
Além disso, nota-se que os valores mais significativos do erro para a estimação de frequência usando o EPLCC de 2^a ordem ocorrem no início da variação de frequência. Isso pode ser visto na Figura 12(b), denotando um comportamento semelhante ao observado para o EDCC de 4^a ordem ao processar este mesmo caso.

Tabela 7 – Índices de desempenho para variação exponencial de frequência (60 Hz para 55 Hz, $\Delta f = -5$ Hz e $\tau = 0,05$ s) utilizando predição linear de 2^a ordem.

<i>Amostras por Ciclo</i>	<i>TC</i>	<i>IC</i>	<i>EAA C_{máx}</i>	<i>EAA C_{mín}</i>	<i>EADC_{máx}</i>	<i>EADC_{mín}</i>
16	5,73958E-1	7,39583E-2	4,94625E-1	0,00000E+0	1,54240E-4	1,56319E-13
32	5,54688E-1	5,46875E-2	2,53751E-1	0,00000E+0	1,47219E-4	2,13163E-14
64	5,50521E-1	5,05208E-2	1,28528E-1	0,00000E+0	2,77049E-5	8,52651E-14
96	5,50347E-1	5,03472E-2	8,60564E-2	7,10543E-15	8,25993E-6	3,55271E-14
128	5,50260E-1	5,02604E-2	6,47596E-2	0,00000E+0	3,48985E-6	2,84217E-14
256	5,50130E-1	5,01302E-2	3,27072E-2	5,11591E-12	4,36519E-7	0,00000E+0

Fonte: Autoria própria.

Figura 12 – (a) Estimação de frequência via predição linear de 2^a ordem para variação exponencial de frequência. (b) Erro da estimação.



Fonte: Autoria própria.

4.2.3 Caso 3: Variação Senoidal Amortecida de Frequência

4.2.3.1 Estimador de Frequência via Funções Derivadas das Componentes de Clarke (EDCC)

A Figura 13 apresenta os resultados para a frequência estimada usando a função derivada de 4^a ordem, a qual obteve o melhor desempenho para os sinais gerados com 96 amostras/ciclo, $\Delta f = 1$ Hz, $\omega_f = 10\pi$ e $\tau = 0,15$ s.

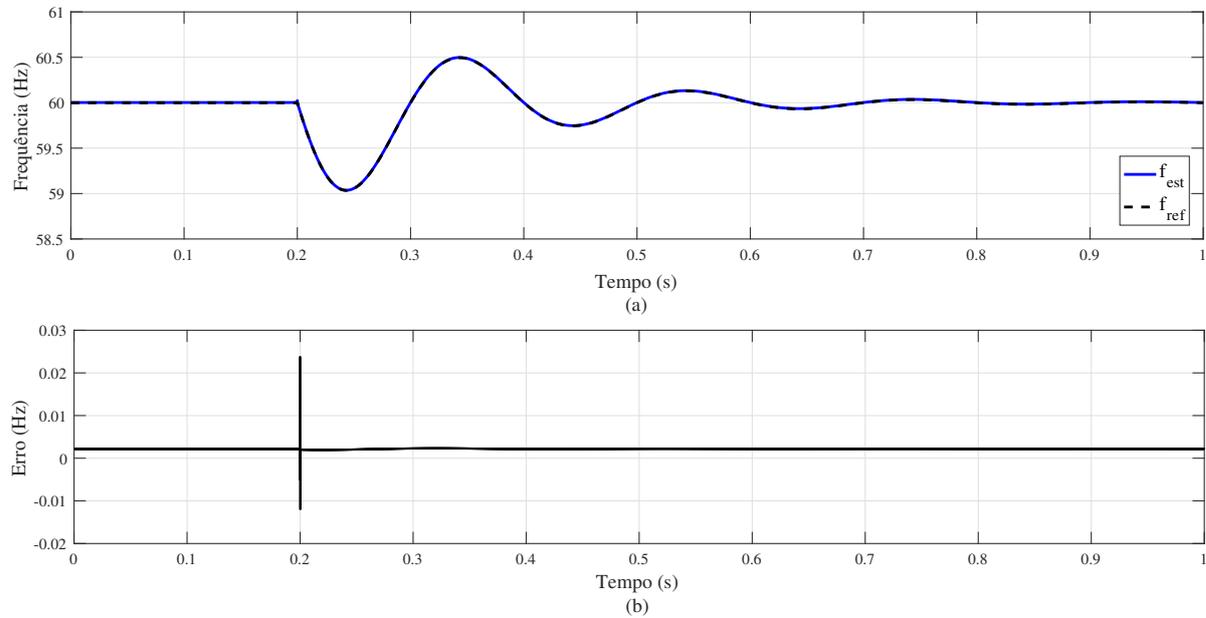
Para o caso senoidal amortecido, a Tabela 8 apresenta os resultados dos índices de desempenho. Os melhores valores dos índices TC, IC e EAA C_{máx} foram verificados usando a função derivada de 4^a ordem. Para os índices EAA C_{mín} e EADC_{mín}, a função derivada de 10^a ordem obteve melhores desempenhos, enquanto que, para o EADC_{máx} a função derivada de 9^a ordem obteve melhores resultados. Para outros casos com variação de frequência senoidal amortecida, resultados semelhantes foram encontrados.

Tabela 8 – Índices de desempenho para variação senoidal amortecida ($\Delta f = 1$ Hz, $\omega_f = 10\pi$ e $\tau = 0,15$ s) utilizando diferentes ordens da função derivada.

<i>Ordem da Derivada</i>	<i>TC</i>	<i>IC</i>	<i>EAACmáx</i>	<i>EAACmín</i>	<i>EADCmáx</i>	<i>EADCmín</i>
4 ^a	2,50174E-1	5,01736E-2	2,37234E-2	1,96473E-3	2,31602E-3	2,05284E-3
5 ^a	2,50347E-1	5,03472E-2	3,65476E-2	9,99956E-4	1,13132E-3	1,00144E-3
6 ^a	2,50521E-1	5,05208E-2	6,39715E-2	1,17983E-5	1,52582E-5	1,28290E-5
7 ^a	2,50695E-1	5,06945E-2	1,11653E-1	4,07744E-6	4,87091E-6	4,08667E-6
8 ^a	2,50868E-1	5,08681E-2	2,09939E-1	5,49654E-8	9,70542E-8	6,51177E-8
9 ^a	2,51042E-1	5,10417E-2	3,76482E-1	2,83004E-9	3,76448E-8	5,63595E-10
10 ^a	2,51215E-1	5,12153E-2	7,20888E-1	2,10179E-11	3,78376E-8	4,61853E-12

Fonte: Autoria própria.

Figura 13 – (a) Estimação de frequência via função derivada de 4^a ordem para variação senoidal amortecida de frequência. (b) Erro da estimacão.



Fonte: Autoria própria.

Neste caso, na Figura 13(b), verifica-se que os valores mais significativos para o erro da estimacão ocorrem no início da variação amortecida.

4.2.3.2 Estimador de Frequência via Interpolação Polinomial com base de Newton das Componentes de Clarke (EIPCC)

A Figura 14 apresenta os resultados para a frequência estimada usando interpolação polinomial de 2^o grau, onde o melhor desempenho para este método foi verificado para os sinais gerados com 96 amostras/ciclo, $\Delta f = 1$ Hz, $\omega_f = 10\pi$ e $\tau = 0,15$ s.

Para o caso senoidal amortecido, a Tabela 9 apresenta os resultados dos índices de desempenho. Os melhores valores dos índices TC, IC e EAACmáx foram verificados em 256 amostras/ciclo. Para o índice EAACmín, a melhor resposta obtida foi em 16 amostras/ciclo.

Já para os índices $EADC_{máx}$ e $EADC_{mín}$, a taxa de amostragem de 256 amostras/ciclo obteve os melhores desempenhos. Para outros casos com variação de frequência senoidal amortecida, resultados semelhantes foram encontrados.

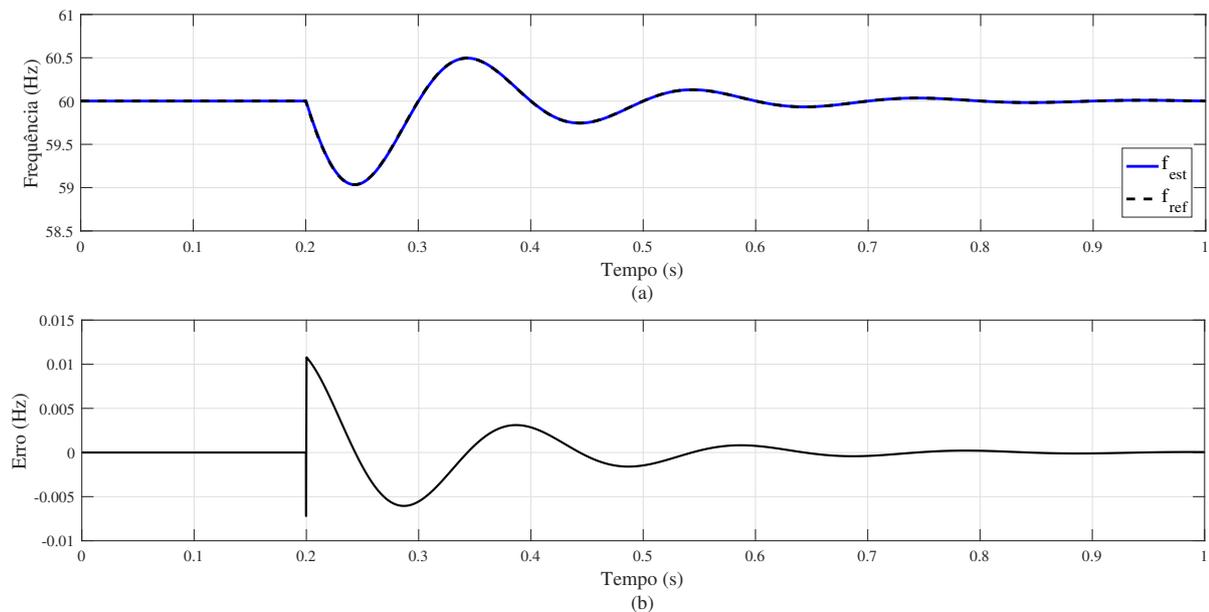
De forma análoga ao verificado para o caso de variação exponencial de frequência, este método apresenta os valores mais significativos para o erro da estimação logo após o início da variação do parâmetro. Também, é notável que o erro da estimação decai de um valor máximo de forma senoidal amortecida, assim como a variação da frequência. Isto pode ser visto na Figura 14(b).

Tabela 9 – Índices de desempenho para variação senoidal amortecida ($\Delta f = 1$ Hz, $\omega_f = 10\pi$ e $\tau = 0,15$ s) utilizando interpolação polinomial de 2º grau.

<i>Amostras por Ciclo</i>	<i>TC</i>	<i>IC</i>	<i>EAAC_{máx}</i>	<i>EAAC_{mín}</i>	<i>EADC_{máx}</i>	<i>EADC_{mín}</i>
16	3,80208E-1	1,80208E-1	6,45367E-2	0,00000E+0	1,86332E-2	6,81392E-6
32	3,67188E-1	1,67187E-1	3,23096E-2	5,50000E-12	9,31773E-3	2,09093E-7
64	3,66927E-1	1,66927E-1	1,61646E-2	2,53020E-11	4,65905E-3	2,61902E-7
96	3,66840E-1	1,66840E-1	1,07785E-2	3,62520E-11	3,10606E-3	2,09786E-7
128	3,66797E-1	1,66797E-1	8,08470E-3	9,31100E-11	2,32955E-3	6,77846E-8
256	3,66732E-1	1,66732E-1	4,04294E-3	9,30240E-11	1,16478E-3	2,40621E-8

Fonte: Autoria própria.

Figura 14 – (a) Estimação de frequência via interpolação polinomial de 2º grau para variação senoidal amortecida de frequência. (b) Erro da estimação.



Fonte: Autoria própria.

4.2.3.3 Estimador de Frequência via Predição Linear das Componentes de Clarke (EPLCC)

A Figura 15 apresenta os resultados para a frequência estimada usando predição linear de 2ª ordem, que obteve o melhor desempenho para os sinais, com variação amortecida

de frequência ($\Delta f = 1$ Hz, $\omega_f = 10\pi$ e $\tau = 0,15$ s).

Para o caso senoidal amortecido, a Tabela 10 apresenta os resultados dos índices de desempenho. Os melhores valores dos índices TC, IC e EAACmáx foram verificados com 256 amostras/ciclo, enquanto os piores, para 16 e 32 amostras/ciclo. Para o índice EAACmín, a melhor resposta foi verificada em 16 amostras/ciclo e a pior, em 128 amostras/ciclo. Para os índices EADCMáx e EADCMín, a amostragem de 256 amostras/ciclo teve a melhor resposta e, para 16 amostras/ciclo, a pior resposta. Os índices de desempenho obtidos de cada taxa de amostragem analisada são apresentados na Tabela 10.

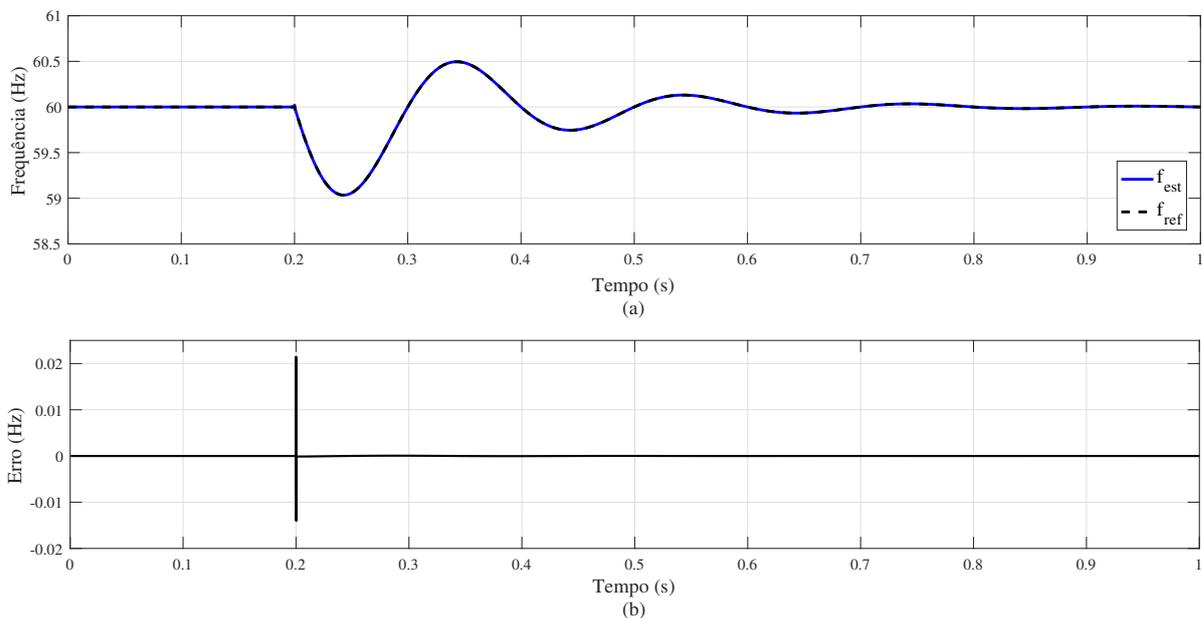
Na Figura 15(b), destaca-se o baixo erro verificado para a estimação de frequência, usando o EPLCC de 2ª ordem no caso de variação amortecida de frequência. Também, é possível notar que os valores significativos do erro da estimação ocorrem logo após o início do transitório de frequência.

Tabela 10 – Índices de desempenho para variação senoidal amortecida ($\Delta f = 1$ Hz, $\omega_f = 10\pi$ e $\tau = 0,15$ s) utilizando predição linear de 2ª ordem.

<i>Amostras por Ciclo</i>	<i>TC</i>	<i>IC</i>	<i>EAACmáx</i>	<i>EAACmín</i>	<i>EADCMáx</i>	<i>EADCMín</i>
16	2,51042E-1	5,10417E-2	1,04855E-1	0,00000E+0	1,00414E-2	1,95602E-6
32	2,51042E-1	5,10417E-2	6,16483E-2	5,31486E-12	1,69310E-3	9,21894E-8
64	2,50260E-1	5,02604E-2	3,19975E-2	2,50608E-11	2,26461E-4	3,54979E-9
96	2,50174E-1	5,01736E-2	2,14693E-2	3,60103E-11	6,79382E-5	1,22306E-10
128	2,50130E-1	5,01302E-2	1,61353E-2	9,24771E-11	2,87829E-5	2,09099E-10
256	2,50065E-1	5,00651E-2	8,08321E-3	9,12692E-11	3,61272E-6	8,41993E-12

Fonte: Autoria própria.

Figura 15 – (a) Estimação de frequência via predição linear de 2ª ordem para variação senoidal amortecida de frequência. (b) Erro da estimação.



Fonte: Autoria própria.

4.3 Comentários acerca do Desempenho dos Métodos

O desempenho dos métodos frente às simulações das variações de frequência foram muito satisfatórios. Os mesmos apresentaram resultados significativos para aplicação em relés digitais na proteção do sistema elétrico de potência.

Contudo, é possível comparar qual método melhor se adapta frente a cada tipo de variação testada. A Tabela 11 apresenta a comparação dos métodos avaliados em 96 amostras/ciclo, no primeiro caso, de variação de frequência em rampa. Neste caso, os métodos EDCC de 4^a ordem e EPLCC de 2^a ordem, apresentaram melhores desempenhos para TC e IC, o que garante um tempo de resposta muito eficaz após a variação de frequência. Para os índices EAAC_{máx} e EADC_{mín}, o método proposto EPLCC teve uma resposta superior às outras duas técnicas testadas. Já para os índices EAAC_{mín} e EADC_{máx}, a técnica EIPCC de 2^o grau obteve melhor desempenho. De forma geral, para o caso com variação de frequência em rampa, considerando todos os índices de desempenho, o método de predição linear de 2^a ordem possui a melhor resposta.

Tabela 11 – Comparação dos métodos avaliados em 96 amostras/ciclo no caso 1 para variação de frequência em rampa.

<i>Método Proposto</i>	<i>TC</i>	<i>IC</i>	<i>EAAC_{máx}</i>	<i>EAAC_{mín}</i>	<i>EADC_{máx}</i>	<i>EADC_{mín}</i>
EDCC	5,50174E-1	5,01736E-2	1,21092E-2	2,19418E-3	1,35692E-2	3,05578E-3
EIPCC	6,66840E-1	1,66840E-1	1,50000E-2	7,00000E-15	2,59350E-11	9,52000E-13
EPLCC	5,50174E-1	5,01736E-2	1,00000E-2	7,10543E-15	1,01988E-2	0,00000E+0

Fonte: Autoria própria.

Na Tabela 12, é apresentada a comparação dos métodos avaliados em 96 amostras/ciclo, no segundo caso, de variação exponencial de frequência. Neste caso, os métodos EDCC de 4^a ordem e EPLCC de 2^a ordem, apresentaram melhores desempenhos para TC e IC. Enquanto que, para o índice EAAC_{máx}, o método EPLCC teve uma resposta melhor em relação às outras duas técnicas testadas. Já para os índices EAAC_{mín}, EADC_{máx} e EADC_{mín}, a técnica EIPCC de 2^o grau obteve melhor desempenho. De forma geral, para o caso com variação exponencial de frequência, considerando todos os índices de desempenho, o método de predição linear de 2^a ordem e o método de interpolação polinomial possuem as melhores respostas, em relação aos erros da estimação. Assim, tendo em vista que o EPLCC apresentou melhor tempo de convergência e baixos erros de estimação, pode-se concluir que, neste caso, o desempenho da estimação de frequência via predição linear de 2^a ordem se sobressaiu em relação aos demais métodos propostos.

Tabela 12 – Comparação dos métodos avaliados em 96 amostras/ciclo no caso 2 para variação exponencial de frequência.

<i>Método Proposto</i>	<i>TC</i>	<i>IC</i>	<i>EAACmáx</i>	<i>EAACmín</i>	<i>EADCmáx</i>	<i>EADCmín</i>
<i>EDCC</i>	5,50347E-1	5,03472E-2	8,82506E-2	2,26370E-6	1,42094E-3	1,41284E-3
<i>EIPCC</i>	6,76215E-1	1,76215E-1	1,27603E-1	7,00000E-15	2,88862E-9	1,40000E-14
<i>EPLCC</i>	5,50347E-1	5,03472E-2	8,60564E-2	7,10543E-15	8,25993E-6	3,55271E-14

Fonte: Autoria própria.

Relativo ao último caso analisado, na Tabela 13, é apresentada a comparação dos métodos avaliados em 96 amostras/ciclo, no caso de variação senoidal amortecida de frequência. Neste caso, os métodos EDCC de 4^a ordem e EPLCC de 2^a ordem, apresentaram melhores desempenhos para TC e IC. Enquanto que para o índice EAACmáx, o método proposto EIPCC de 2^o grau, teve a melhor resposta. Já para os índices EAACmín, EADCmáx e EADCmín, a técnica proposta EPLCC de 2^a ordem obteve melhor desempenho. De forma geral, para o caso com variação senoidal amortecida de frequência, considerando todos os índices de desempenho, o método de predição linear de 2^a ordem possui as melhores respostas.

Tabela 13 – Comparação dos métodos avaliados em 96 amostras/ciclo no caso 3 para variação senoidal amortecida de frequência.

<i>Método Proposto</i>	<i>TC</i>	<i>IC</i>	<i>EAACmáx</i>	<i>EAACmín</i>	<i>EADCmáx</i>	<i>EADCmín</i>
<i>EDCC</i>	2,50174E-1	5,01736E-2	2,37234E-2	1,96473E-3	2,31602E-3	2,05284E-3
<i>EIPCC</i>	3,66840E-1	1,66840E-1	1,07785E-2	3,62520E-11	3,10606E-3	2,09786E-7
<i>EPLCC</i>	2,50174E-1	5,01736E-2	2,14693E-2	3,60103E-11	6,79382E-5	1,22306E-10

Fonte: Autoria própria.

4.4 Considerações Finais

Neste Capítulo foram feitas as considerações com relação aos resultados obtidos e apresentados pelos três novos métodos de estimação de frequência.

De forma geral, foi verificado que todos os métodos possuem ótimos desempenhos frente às simulações. O método de predição linear de 2^a ordem se destacou pelos melhores resultados nos índices de desempenho.

O Capítulo seguinte apresenta as considerações finais do trabalho e as sugestões para trabalhos futuros.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E PERSPECTIVAS FUTURAS

5.1 Considerações Finais

O presente trabalho apresentou novas metodologias aplicáveis em relés digitais, que visam estimar a frequência do sistema elétrico. Tais metodologias foram avaliadas computacionalmente, a fim de determinar seus índices de desempenho nas diversas situações em que o sistema elétrico de potência está suscetível. A avaliação das metodologias sob diferentes tipos de variação de frequência traz um melhor conhecimento das características dos algoritmos testados, permitindo determinar qual método melhor se aplica à função. Com relação à predição das componentes por funções derivadas, foi possível determinar que a derivada de 4ª ordem proporciona melhor desempenho ao método. Já com relação aos métodos de estimação via interpolação polinomial e via predição linear, foram observados melhores desempenhos para 2º grau e para 2ª ordem, respectivamente, sendo estas avaliadas em diferentes taxas de amostragens, possibilitando definir em quais variações de frequência cada método tem o melhor desempenho. Estas conclusões foram feitas a partir da análise dos índices de desempenho mencionados anteriormente, que auxiliaram na escolha do estimador mais adequado, atendendo às diferentes condições a que estão sujeitos os sistemas elétricos de potência.

As metodologias propostas foram testadas para mais de 1400 casos, simulando diferentes condições operacionais do sistema que provocam diferentes tipos de variação de frequência. Em todos os casos foram obtidos resultados satisfatórios frente aos diversos tipos de variação de frequência testados.

Por fim, concluiu-se que os novos métodos possuem grande precisão e robustez, apresentando valores aceitáveis de índices de desempenho. Além disso, todas as funções derivadas do método EDCC possuem características próprias, assim como o método de interpolação polinomial (EIPCC) e predição linear também possuem suas próprias características, podendo ter usos adaptáveis diante de diferentes tipos de variações operacionais do SEP. Vale ressaltar que o método de predição linear apresentou vantagens sobre as demais técnicas sob determinadas condições. Portanto, os estimadores de frequência devem ser escolhidos de forma a garantir o melhor desempenho do sistema para as situações mais recorrentes no trecho onde se pretende instalar dispositivos capazes de realizar esta tarefa. Além disso, as novas técnicas propostas podem ser utilizadas como novas opções de aplicações, dada a necessidade de mais alternativas em relação aos estimadores de frequência.

5.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

Com relação aos métodos de estimação de frequência apresentados nesse trabalho, sugere-se:

- Implementar casos com mais variações de frequência e amplitude;
- Implementar casos com oscilações de potência;
- Implementar casos com sinais na presença de Ruído Gaussiano Branco; e,
- Comparar as novas técnicas com metodologias da literatura especializada.

REFERÊNCIAS

- AKKE, M. Frequency estimation by demodulation of two complex signals. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 12, n. 1, p. 157–163, 1997. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 26.
- BARBOSA, D. *et al.* Filtragem adaptativa para a estimação da frequência em sistemas elétricos de potência. *Sba: Controle Automação Sociedade Brasileira de Automática*, scielo, v. 19, p. 226 – 234, 06 2008. ISSN 0103-1759. Disponível em: <http://old.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-17592008000200010&nrm=iso>. Citado na página 23.
- BARBOSA, D. *et al.* A modified least mean square algorithm for adaptive frequency estimation in power systems. In: *2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century*. [S.l.: s.n.], 2008. p. 1–6. Citado 3 vezes nas páginas 23, 25 e 41.
- BEGOVIC, M. *et al.* Frequency tracking in power networks in the presence of harmonics. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 8, n. 2, p. 480–486, 1993. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 49.
- CANTELI, M. *et al.* Three-phase adaptive frequency measurement based on clarke’s transformation. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 21, n. 3, p. 1101–1105, 2006. Citado na página 26.
- DASH, P.; PRADHAN, A.; PANDA, G. Frequency estimation of distorted power system signals using extended complex kalman filter. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 14, n. 3, p. 761–766, 1999. Citado na página 25.
- FILHO, J.; MAMEDE, D. *Proteção de sistemas elétricos de potência*. Grupo Gen - LTC, 2011. ISBN 9788521618843. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=8w3SygAACAAJ>>. Citado 2 vezes nas páginas 35 e 36.
- FRIEDMAN, V. A zero crossing algorithm for the estimation of the frequency of a single sinusoid in white noise. *IEEE Transactions on Signal Processing*, v. 42, n. 6, p. 1565–1569, 1994. Citado na página 25.
- HOROWITZ, S.; PHADKE, A. Blackouts and relaying considerations - relaying philosophies and the future of relay systems. *IEEE Power and Energy Magazine*, v. 4, n. 5, p. 60–67, 2006. Citado 4 vezes nas páginas 29, 30, 31 e 35.
- HOROWITZ, S.; PHADKE, A.; NIEMIRA, J. *Power System Relaying*. Wiley, 2013. ISBN 9781118701515. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=odHDAQAAQBAJ>>. Citado 3 vezes nas páginas 31, 32 e 35.
- KINDERMANN, G. *Proteção de sistemas elétricos de potência*, vol. 2. *Florianópolis: UFSC, 2014. 326p*, 2014. Citado 2 vezes nas páginas 36 e 37.
- LI, J. *et al.* A fast power grid frequency estimation approach using frequency-shift filtering. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 34, n. 3, p. 2461–2464, 2019. Citado na página 26.

- LOBOS, T.; REZMER, J. Real-time determination of power system frequency. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, v. 46, n. 4, p. 877–881, 1997. Citado na página 25.
- MARCHESAN, G. *et al.* Frequency tracking algorithms: A contribution considering phase unbalance, step variations, noise, harmonics, and different sampling rates. *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, v. 24, n. 4, p. 493–503, 2013. Citado na página 48.
- PRADHAN, A.; ROUTRAY, A.; BASAK, A. Power system frequency estimation using least mean square technique. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 20, n. 3, p. 1812–1816, 2005. Citado na página 25.
- RECKTENWALD, G. *Numerical Methods with MATLAB: Implementations and Applications*. Prentice Hall, 2000. (Featured Titles for Numerical Analysis Series). ISBN 9780201308600. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=H_QeAQAAIAAJ>. Citado na página 42.
- REN, J.; KEZUNOVIC, M. A hybrid method for power system frequency estimation. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 27, n. 3, p. 1252–1259, 2012. Citado na página 25.
- RIAHY, G.; ABEDI, M. Short term wind speed forecasting for wind turbine applications using linear prediction method. *Renewable Energy*, v. 33, n. 1, p. 35–41, 2008. ISSN 0960-1481. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148107000237>>. Citado na página 44.
- ROUTRAY, A.; PRADHAN, A.; RAO, K. A novel kalman filter for frequency estimation of distorted signals in power systems. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, v. 51, n. 3, p. 469–479, 2002. Citado na página 25.
- SANTOS, E. d. *et al.* Power system frequency estimation using morphological prediction of clarke components. *Electric Power System Research*, v. 122, p. 208–217, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 26 e 50.
- SCHONS, F. K. *et al.* Performance analysis of clarke components prediction via derivative-functions of different orders applied in digital frequency estimation in electric power systems. In: *2022 6th International Conference on Green Energy and Applications (ICGEA)*. [S.l.: s.n.], 2022. p. 204–209. Citado na página 39.
- SITHAMPARANATHAN, K. Digital-pll assisted frequency estimation with improved error variance. In: *IEEE GLOBECOM 2008 - 2008 IEEE Global Telecommunications Conference*. [S.l.: s.n.], 2008. p. 1–5. Citado na página 26.
- SORRENTINO, E.; CARVALHO, R. Performance of three algorithms for frequency measurement under transient conditions. *Electric Power Systems Research*, v. 80, n. 10, p. 1191–1196, 2010. ISSN 0378-7796. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378779610000672>>. Citado na página 26.
- TERZIJA, V.; DJURIC, M.; KOVACEVIC, B. Voltage phasor and local system frequency estimation using newton type algorithm. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 9, n. 3, p. 1368–1374, 1994. Citado na página 25.

- THOMAS, D.; WOOLFSON, M. Evaluation of frequency tracking methods. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 16, n. 3, p. 367–371, 2001. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 29.
- WANG, M.; SUN, Y. A practical, precise method for frequency tracking and phasor estimation. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 19, n. 4, p. 1547–1552, 2004. Citado na página 25.
- WIDREVITZ, B.; ARMINGTON, R. A digital rate-of-change underfrequency protective relay for power systems. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v. 96, n. 5, p. 1707–1714, 1977. Citado na página 25.
- WISZNIEWSKI, A.; REBIZANT, W.; SCHIEL, L. Correction of current transformer transient performance. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 23, n. 2, p. 624–632, 2008. Citado 2 vezes nas páginas 39 e 40.
- ZADEH, R. A. *et al.* Online estimation of signal parameters in the presence of harmonic and noise distortion. In: *2009 13th European Conference on Power Electronics and Applications*. [S.l.: s.n.], 2009. p. 1–10. Citado na página 25.
- ZHAN, L. *et al.* Dynamic single-phase synchronized phase and frequency estimation at the distribution level. *IEEE Transactions on Smart Grid*, v. 6, n. 4, p. 2013–2022, 2015. Citado na página 26.