

CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



Universidade Federal
de Campina Grande

LUAN DA SILVA BALBINO

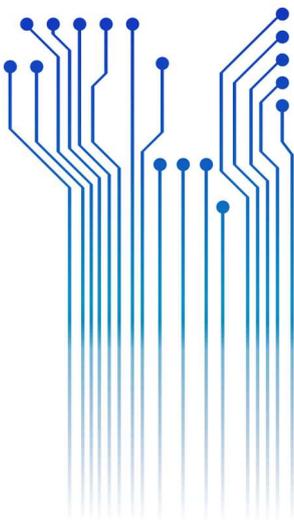


Centro de Engenharia
Elétrica e Informática

**Análise Comparativa de Métodos Para Religamento Monopolar
Adaptativo de Linhas de Transmissão**



Departamento de
Engenharia Elétrica



Campina Grande
2020

LUAN DA SILVA BALBINO

Análise Comparativa de Métodos Para Religamento Monopolar Adaptativo de Linhas de Transmissão.

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Coordenação do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Bacharel em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Sistemas Elétricos de Potência

Professor Karcus Marcelus Colaço Dantas, D. Sc.
Orientador

Campina Grande
2020

LUAN DA SILVA BALBINO

Análise Comparativa de Métodos Para Religamento Monopolar Adaptativo de Linhas de Transmissão.

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Coordenação do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Bacharel em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Sistemas Elétricos de Potência

Aprovado em / /

Washington Luiz Araújo Neves, Ph.D.
Universidade Federal de Campina Grande
Avaliador

Professor Karcus Marcelus Colaço Dantas, D. Sc.
Universidade Federal de Campina Grande
Orientador, UFCG

AGRADECIMENTOS

Inicialmente agradeço à minha namorada Luana, companheira de tantos anos, que sempre esteve e está aqui para me apoiar e me ajudar em todas as situações.

Agradeço aos meus pais, Luiz Júlio Albino e Lucivânia da Silva Albino, por nunca medirem esforços para me proporcionar a melhor condição de estudo e a possibilidade de concluir esta graduação.

Agradeço aos meus colegas de curso, em especial Antônio, Breno, Dimitri, Egydio, Johayne, Pedro e Rômulo, com os quais tive mais contato e eventualmente ajudaram meu desenvolvimento de alguma forma neste curso.

Agradeço também ao professor Karcus Marcelus Colaço Dantas por aceitar orientar este trabalho, bem como pela disposição em sempre sanar todas as dúvidas geradas.

*“There is no dark side of the moon, really.
Matter of fact it’s all dark.”.*

RESUMO

A predominância da ocorrência de falhas monopulares em linhas de transmissão, evidencia que a utilização de métodos que consigam identificar a natureza da falta, mitigar o problema de forma mais rápida e ocasionar menor impacto no sistema de potência são necessários. Para cumprir tais premissas, a manobra de Religamento Monopolar Adaptativo é uma alternativa face à proteção tripolar e monopolar com *dead time* fixo. Este trabalho apresenta inicialmente uma breve revisão acerca das soluções existentes para o problema exposto e uma discussão comparativa de resultados obtidos de diferentes métodos para Religamento Monopolar Adaptativo. Este estudo se mostra importante pois permite averiguar diferentes técnicas que são abordadas para possibilitar a proteção dos sistemas. Para tanto, são explicitados os métodos escolhidos como base, as alterações necessárias e os procedimentos utilizados para o conjunto dos dados reais. A metodologia adotada inclui a implementação de rotinas baseadas na teoria da Transformada Discreta de Fourier Janelada para avaliação harmônica, filtros, variação de taxas de amostragem e aplicação de algoritmos de estimação fasorial em sinais de linhas de transmissão com compensação reativa. Após a exposição e discussão dos resultados obtidos, definem-se parâmetros de comparação entre os métodos, demonstrando qual obteve maior êxito nas aplicações testadas. Para a avaliação dos métodos, utilizou-se sinais reais provenientes de ocorrências de faltas monofásicas em linhas de transmissão.

Palavras-chave: Tempo Morto, Estimação Fasorial, Transformada de Fourier, Religamento Monopolar Adaptativo.

ABSTRACT

The predominance of monopolar fault occurrences in transmission lines highlights that the utilization of methods that can identify the fault nature, mitigate the problem as fast as possible and cause less impact in the power system are necessary. To fulfill such premises, the Adaptive Single-Pole Auto Reclosing maneuver is an alternative to tripolar and monopolar protection with fixed dead time. This work initially presents a brief discussion about the existing solutions to the exposed problem and a comparative discussion of obtained results for different Adaptive Single-pole Auto Reclosing methods. This study proves to be important because it allows ascertaining different techniques that are addressed to enable systems protection. For this purpose, the chosen base methods, necessary alterations and used procedures are made explicit. The adopted methodology includes the implementation of Windowed Discrete Fourier Transform based routines to harmonic evaluation, filters, sampling rate variation and phasor estimation algorithms applied in transmission line signals with reactive compensation. After the exposure and discussion of the obtained results, comparison parameters between methods are defined, demonstrating which one was most successful in the tested applications. To evaluate the methods, real signals from monophasic faults occurrences in transmission lines were used.

Keywords: Dead time, Phasor Estimation, Fourier Transform, Adaptive Single-pole Auto Reclosing

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Acoplamentos presentes em uma linha de transmissão	17
Figura 2 – Medição de tensão durante ocorrência de abertura monopolar (Compensação 80%)	18
Figura 3 – Manobra de Religamento Tripolar	19
Figura 4 – Manobra de Religamento Monopolar.....	20
Figura 5 – Harmônicas durante arco secundário	29
Figura 6 – Fator harmônico medido em 1 terminal	29
Figura 7 – Amplitude das harmônicas (a) durante arco secundário (b) após arco secundário.....	31
Figura 8 – Resultado método REO com linha 70% compensada	31
Figura 9 – Tensões trifásicas antes da falta e durante arco primário	32
Figura 10 – Tensões trifásicas durante e após extinção de arco secundário	33
Figura 11 – Janela angular e $V_{threshold}$	34
Figura 12 – Exemplo de resultado do algoritmo.....	34
Figura 13 – Tensão de restabelecimento (a) sem compensação (b) com compensação (80%).....	36
Figura 14 – Sinais de tensão para fases sob falta utilizados nas análises	39
Figura 15 – Sinal reamostrado a 960 Hz.....	40
Figura 16 – Filtro aplicado aos sinais	41
Figura 17 – Resultado Fator Harmônico (Sinal 2).....	44
Figura 18 – Resultado Fator Harmônico (Sinal 3).....	44
Figura 19 – Resultado Fator Harmônico (Sinal 1).....	45
Figura 20 – Resultado Estimação Fasorial (Sinal 1 – 2002)	47
Figura 21 – Gráfico Polar (sinal 1 – 2002).....	48
Figura 22 – Resultado Estimação Fasorial (Sinal 2 – 2002).....	49
Figura 23 – Gráfico polar (Sinal 2 – 2002).....	49
Figura 24 – Resultado Estimação Fasorial (Sinal 4 – 2015).....	51
Figura 25 – Gráfico Polar (Sinal 4 – 2015)	52
Figura 26 - Resultado Estimação Fasorial (Sinal 6 - 2015).....	52
Figura 27 - Gráfico Polar (sinal 6 - 2015)	53
Figura 28 – Resultados REO (a) sinal 1 – 16 amostras (b) sinal 4 – 66 amostras	55
Figura 29 – Resultado REO (Sinal 5 – 2015).....	56
Figura 30 – Resultado REO (Sinal 3 – 2015).....	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resumo dos Métodos.....	27
Tabela 2 – Características das implementações.....	37
Tabela 3 – Características dos Sinais	38
Tabela 4 – Características Filtro.....	40
Tabela 5 – Resultados Fator Harmônico	43
Tabela 6 – Resultados Estimação fasorial (2002).....	46
Tabela 7 – Resultados incorretos.....	49
Tabela 8 – Resultados Estimação Fasorial (2015).....	50
Tabela 9 – Resultados REO.....	54
Tabela 10 – Média das detecções	58
Tabela 11 – Desvio padrão das detecções	58
Tabela 12 – Taxa de acerto Métodos.....	59

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ASPAR	<i>Adaptative Single-Pole Auto Reclosing</i>
SAED	<i>Secondary Arc Extinction Detection</i>
SPAR	<i>Single-Pole Auto Reclosure</i>
SPT	<i>Single-Pole Trip</i>
SPTR	<i>Single-Pole Trip and Reclose</i>

SUMÁRIO

1	Introdução.....	13
1.1	Objetivo	14
1.2	Organização do trabalho	15
2	Fundamentação teórica.....	16
2.1	Arco secundário	16
2.2	Abertura e Religamento Monopolar.....	18
2.2.1	Religamento Monopolar	20
2.2.2	Religamento Monopolar Adaptativo	21
3	Revisão Bibliográfica	21
3.1	Métodos adaptativos de religamento monopolar	22
3.2	Métodos ASPAR Analisados	27
3.2.1	Análise Harmônica – FH	27
3.2.2	Análise Harmônica – REO	30
3.2.3	Estimação Fasorial.....	32
4	Metodologia e dados.....	38
4.1	Dados sob estudo	38
4.2	Reamostragem dos sinais	40
4.3	Filtragem dos sinais	40
4.4	Cosseno Modificado	41
5	Resultados Obtidos.....	42
5.1	Método 1 – Fator Harmônico.....	42
5.2	Método 2 – Estimação Fasorial.....	45
5.2.1	Guzmán <i>et al.</i> (2002).....	45
5.2.2	Nagpal <i>et al.</i> (2015).....	50
5.3	Método 3 – REO	53
5.4	Análise Comparativa.....	57
5.4.1	Tempo de Resposta.....	57
5.4.2	Taxa de acerto.....	59
6	Conclusão	61
7	Referências	63

1 INTRODUÇÃO

Os sistemas de transmissão e distribuição de energia elétrica estão sujeitos a interrupções de fornecimento, sejam elas programadas ou não-programadas, nas quais os mecanismos de proteção realizam um papel fundamental durante estas ocasiões, isolando parte dos equipamentos e sistemas. Conforme apresentado no documento *Bibliography on Single-Pole Switching (IEEE System Stability Working Group, 1975)*, os estudos relacionados ao uso de proteções monopolares nos sistemas de potência são desenvolvidos desde meados da década de 40, com diversos artigos científicos publicados discutindo e difundindo a técnica, abordando conceitos relacionados a melhoria da estabilidade do sistema, conforme apresentado em trabalhos da época como (GOLDSBOROUGH; HILL, 1942, DERR, 1944, TRAINOR; PARKS, 1947), ou com foco nos problemas referentes aos fenômenos extinção de arco primário e arco secundário de corrente, como (HARRINGTON; STARR, 1949, KNUDSEN, 1962). Desta forma, com o decorrer das décadas subsequentes até os dias atuais, os estudos abordando religamento monopolar foram sendo aprimorados ao passo em que novas técnicas passaram a ser estudadas e utilizadas, de modo a tentar otimizar o método, como por exemplo pode ser visto em autores como (YAOZHONG; FONGHAI; YUAN, 1989, AGGARWAL *et al.*, 1994, JAMALI; BAAYEH, 2015, NIKOOFEKR; SADEH, 2018).

De acordo com a literatura, a maior parte das faltas ocorridas em linhas de transmissão possui como característica serem monofásicas e de caráter transitório (*IEEE COMMITTEE REPORT, 1992*), ou seja, majoritariamente os surtos envolvem uma das fases do sistema durante um intervalo de tempo, podendo ser causados por diversas fontes distintas, tais como sobretensões atmosféricas, problemas mecânicos, queimadas e surtos de manobra. Tal fato pode ser reforçado ao avaliar o Relatório de Análise de Desligamentos Forçados do Sistema de Transmissão (ANEEL, 2018), onde no período de 1º de julho de 2016 a 30 de junho de 2017, são apresentados dados referentes as falhas ocorridas em 81 instalações (linhas de transmissão/subestações), evidenciando a predominância de faltas monofásicas.

A principal vantagem na utilização de um sistema de proteção com chaveamento monopolar se dá pelo fato da possibilidade de isolar somente uma das fases, mantendo

parte do fornecimento de energia por meio das duas fases sãs do sistema, reduzindo a chance de perda de estabilidade e sincronismo (GODOY *et al.*, 2012).

Os sistemas de proteção inicialmente adotados para sanar este tipo de problema, isolando a fase sob falta, funcionam com tempo fixo de religamento (tempo morto) com duração entre 0,5 s e 1 s, sendo denominados SPAR (*Single-Pole Auto Reclosure*). Este método considera que após o intervalo definido, com base em estudos probabilísticos, o curto-circuito não se encontra mais presente no sistema, permitindo o religamento monofásico. Porém, caso a falta seja de natureza permanente, tal manobra de religamento pode causar danos aos equipamentos e à estabilidade (ZHALEFAR; ZADEH; SIDHU, 2015), visto que a fase, após ser isolada, será novamente interligada ao sistema com um curto-circuito ainda presente.

Com o passar dos anos, muitos estudos foram desenvolvidos para criar um método de detecção que consiga identificar o tipo de falta (permanente ou transitória), para posteriormente se definir a melhor ação de proteção a ser aplicada na linha de transmissão, que seja capaz de verificar o momento da extinção do arco secundário, possibilitando o religamento no menor tempo possível, evitando manter o sistema desconectado sem a real necessidade. Estes métodos são denominados ASPAR (*Adaptative Single-Pole Auto Reclosing*) e apresentam vantagens em relação ao método tradicional, podendo-se listar: aumento das chances de sucesso do religamento, redução de sobretensões no chaveamento, melhora na estabilidade e disponibilidade do sistema (IEEE COMMITTEE REPORT, 1992).

1.1 OBJETIVO

O objetivo deste Trabalho de Conclusão de Curso é realizar uma análise comparativa acerca de alguns dos principais métodos (ASPAR) apresentados na comunidade científica para identificação de extinção do arco secundário e possibilidade de religamento devido a ocorrência de faltas monopolares. A partir da implementação dos métodos, mediante as condições propostas nos artigos, filtragem dos sinais e diferentes taxas de amostragem, o trabalho propõe verificar se os mesmos apresentam resultados satisfatórios quando aplicados a sinais reais de linhas de transmissão.

Dentre diversas abordagens existentes na literatura, para a realização deste trabalho optou-se pela utilização de artigos contendo os seguintes assuntos: Estimação

fasorial (GUZMÁN *et al.*, 2002, NAGPAL *et al.*, 2015) e índices baseados em análise harmônica (LUO; HUANG; JIANG, 2016, MONTANARI; TAVARES; PORTELA, 2009).

1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

- O capítulo 2 aborda a fundamentação teórica acerca do tema proposto.
- No capítulo 3 é apresentada a Revisão Bibliográfica sobre os métodos de Religamento Monopolar Adaptativos, bem como explicitados quais métodos serão base para realização deste trabalho.
- No capítulo 4 são introduzidos a metodologia e os dados utilizados.
- No capítulo 5 são apresentados os resultados e é realizada a análise comparativa entre os métodos.
- No capítulo 6 é apresentada a conclusão do trabalho.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

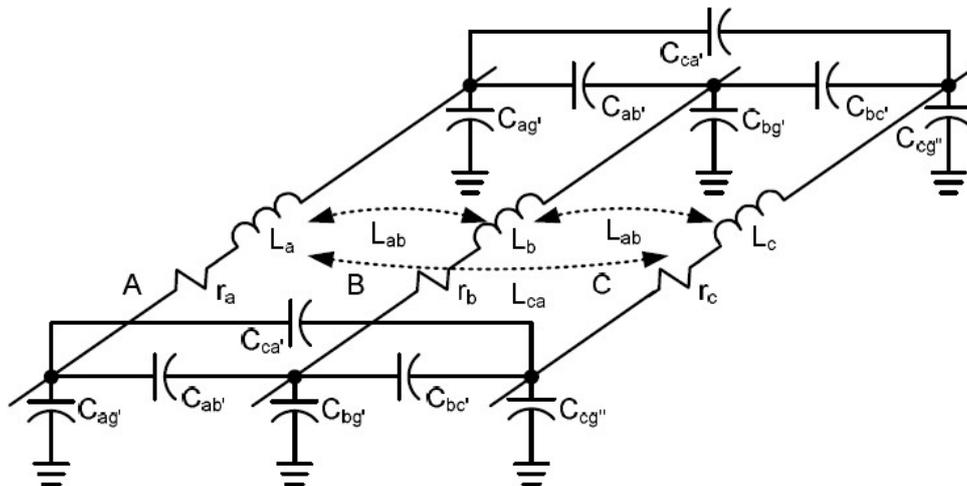
2.1 ARCO SECUNDÁRIO

Durante a ocorrência de uma falta monofásica em linhas de transmissão, a corrente inicialmente estabelecida é denominada arco primário, apresentando valores elevados (podendo ser da ordem de kA). Após a atuação dos disjuntores de proteção em ambas as extremidades da linha (SPT, do inglês *Single-Pole Trip*), a corrente do curto-circuito existente até o momento sofre uma redução, sendo a partir deste momento denominada corrente de arco secundário. Esta corrente mantém-se sustentada a partir dos acoplamentos capacitivos e indutivos existentes entre a fase aberta e as duas fases do sistema, que induzem uma tensão na fase sob falta (KIMBARK, 1975, ALTUVE; FISCHER; GUZMÁN, 2012, IEEE COMMITTEE, 1992). Neste momento, o ar presente encontra-se ionizado, sendo este efeito provocado a partir do rompimento do dielétrico pelo arco primário, desta forma, o arco secundário se estabelece e será mantido durante um tempo com a tensão induzida pelas outras fases.

O arco secundário [...] é mantido por dois tipos de acoplamento, sendo eles: (1) acoplamento de derivação devido à capacitância distribuída, [...] este proporcional ao comprimento da linha e independente do carregamento e (2) acoplamento em série devido à resistência mútua e reatância indutiva, [...] proporcional à carga e ao quadrado do comprimento da linha (KIMBARK, 1976).

Normalmente o acoplamento indutivo possui menor contribuição, sendo o acoplamento capacitivo mais importante e, conseqüentemente, mais abordado nas análises (KIMBARK, 1964). A Figura 1 ilustra os acoplamentos existentes em um modelo de linha de transmissão.

Figura 1 – Acoplamentos presentes em uma linha de transmissão



Fonte: Godoy *et al.* (2012).

Para que uma religamento monopolar ocorra com sucesso, deve-se garantir que o arco secundário tenha se extinguido antes do momento da manobra (período denominado *dead time*), caso contrário, ao realizar a conexão do sistema novamente, o curto-circuito primário se restabelecerá causando um novo disparo da proteção, podendo acarretar perda de estabilidade e danos aos equipamentos conectados.

O fenômeno do arco secundário é objeto de estudo por muitos anos na área de proteção de sistemas e sua extinção é influenciada por diversos fatores, podendo-se citar: magnitude da tensão de restabelecimento transitória, magnitude da corrente do arco secundário, compensação da linha, comprimento e nível de tensão do sistema. Além disso, condições climáticas como umidade, temperatura e velocidade do vento também afetam o processo de extinção do fenômeno (KIMBARK, 1975; MONTANARI; TAVARES; CÂMARA, 2009).

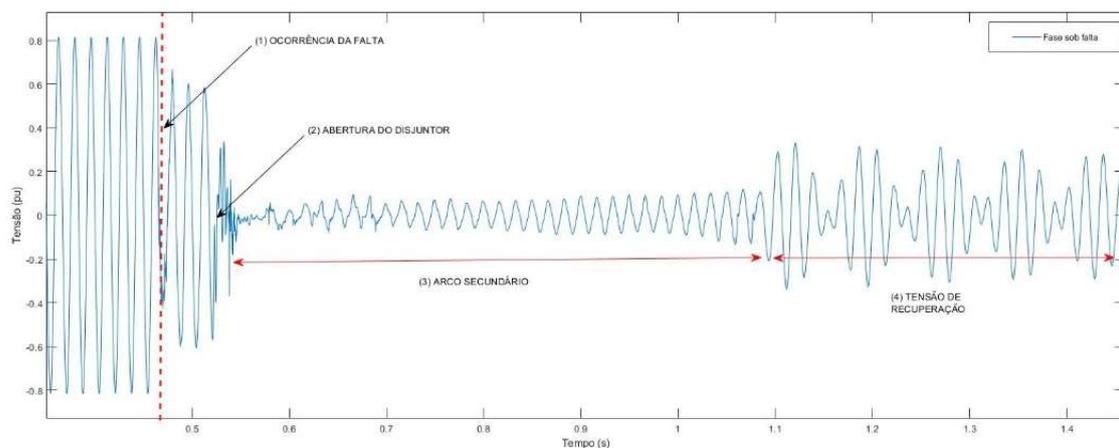
De acordo com Kimbark (1976), define-se como tensão de restabelecimento a tensão que aparece no caminho da falha após a extinção do arco secundário e antes do religamento dos disjuntores. Caso esta tensão possua magnitude suficientemente grande durante o religamento da linha, pode ocasionar a reignição do arco primário, visto que o ar ionizado presente estará submetido à uma tensão superior ao seu limite de isolamento.

Importante salientar que a tensão de restabelecimento para linhas sem compensação permanece na frequência de 60Hz, ao passo que, para linhas compensadas, a tensão de restabelecimento encontra-se com frequência abaixo deste valor.

Na Figura 2, encontram-se exemplificados 4 instantes ocorridos durante a realização de uma manobra de abertura monopolar, sendo eles:

- i. Ocorrência de falta fase-terra, seguida pela queda de tensão nos terminais de medição.
- ii. Abertura monopolar dos disjuntores de proteção, isolando a fase sob falta.
- iii. Arco secundário estabelecido pelo acoplamento entre as fases.
- iv. Tensão de restabelecimento do sistema pós extinção do arco.

Figura 2 – Medição de tensão durante ocorrência de abertura monopolar (Compensação 80%)



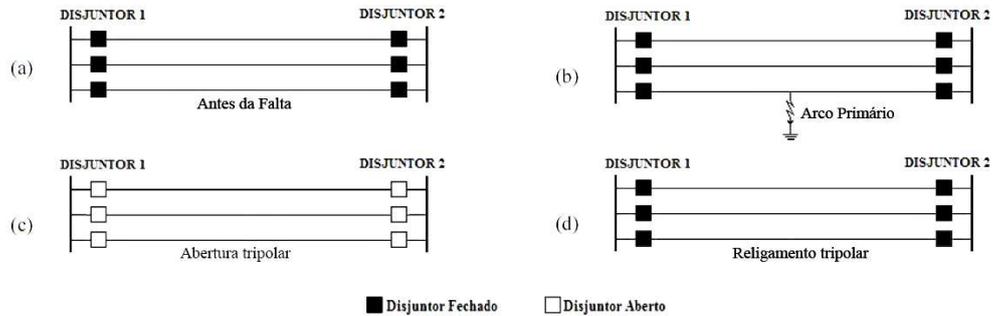
Fonte: Autoria Própria

2.2 ABERTURA E RELIGAMENTO MONOPOLAR

Os esquemas de proteção e religamento aplicados atualmente nos sistemas elétricos de potência podem ser classificados em dois grupos: manobra tripolar e manobra monopolar. Na manobra tripolar, mostrada na Figura 3, os disjuntores de proteção da linha atuam e isolam as três fases do sistema, realizando um posterior religamento. No entanto, este método tem suas limitações, visto que o fornecimento de energia é interrompido mesmo mediante o acontecimento de faltas que só envolvam

uma das fases, além do fato de que a manobra trifásica pode ocasionar perda de estabilidade e sincronismo em muitos casos (ALTUVE; FISCHER; GUZMÁN, 2012). O presente documento visa analisar os sistemas propostos mediante o uso de manobra monopolar.

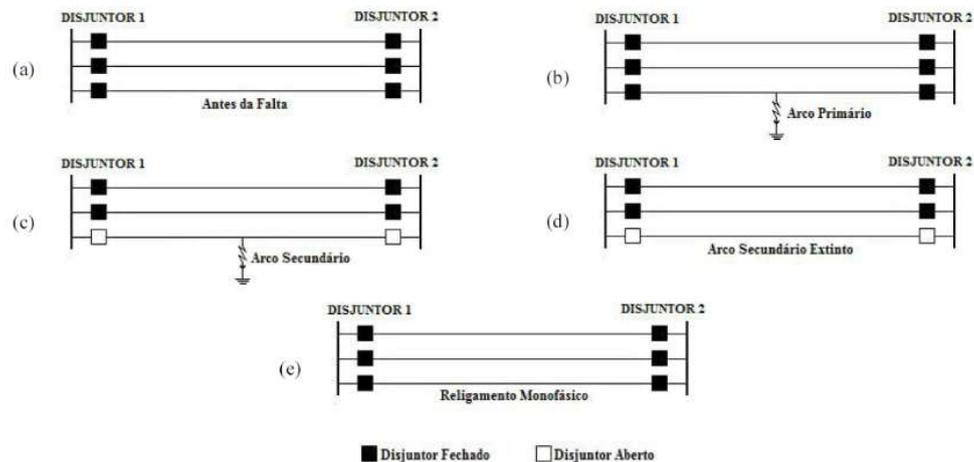
Figura 3 – Manobra de Religamento Tripolar



Fonte: Adaptado de Montanari, Tavares e Portela (2009)

Como já citado, a grande maioria das faltas que ocorrem nos sistemas de potência possuem características monofásicas e transitórias, sendo assim, a manobra monopolar (SPTR, do inglês *Single Pole Trip and Reclose*) torna-se mais indicada para utilização em relação a tripolar, visto que é possível interromper a falta e permanecer com o fornecimento de energia por meio das duas fases sãs, melhorando o desempenho do sistema de transmissão diante desta situação. Esta manobra, apresentada na Figura 4, consiste em isolar somente a fase na qual a falta ocorre com posterior religamento, sendo este tempo de religamento denominado tempo morto (*dead time*), correspondente ao tempo definido para possibilitar que aconteça a desionização do meio onde a falta ocorre.

Figura 4 – Manobra de Religamento Monopolar



Fonte: Adaptado de Montanari, Tavares e Portela (2009)

Pode-se ainda separar a manobra monopolar em dois outros grupos, compreendendo o método tradicional de religamento e o método de religamento adaptativo. Nos próximos tópicos, são comentadas as características, bem como o funcionamento de ambos.

2.2.1 RELIGAMENTO MONOPOLAR

Os esquemas tradicionais de religamento monopolar trabalham com um tempo fixo para operação, normalmente compreendido no intervalo entre 0,5 s e 1 s, onde após a identificação da presença de uma falta e a abertura dos terminais da fase, a proteção aguarda o tempo especificado e realiza o procedimento de religamento, estes esquemas são denominados como Religamento Monopolar Automático, ou do inglês SPAR (*Single-Pole Auto Reclosure*). No entanto, apesar deste tempo ser obtido a partir de estudos acerca da estabilidade do sistema, o tempo de permanência do arco secundário depende de inúmeros fatores, não sendo possível garantir que o *dead time* do sistema de proteção seja suficiente para que a manobra de religamento ocorra com sucesso.

Do mesmo modo que o arco secundário pode permanecer no sistema por mais tempo do que o esperado, podem ocorrer casos nos quais a extinção do arco acontece com um intervalo de tempo inferior ao *dead time*, caracterizando uma situação na qual a proteção poderia religar a fase, porém, a tentativa de religamento ocorre somente após o tempo fixado, mantendo o sistema com uma das fases desconectada por um tempo excessivo (MONTANARI; TAVARES; PORTELA, 2009, DIAS *et al.*, 2017).

Logo, estes esquemas são passíveis de falhas nos casos em que o arco secundário se alongue por mais tempo do que o *dead time* especificado, ocorrendo assim uma tentativa de religamento sem sucesso e detecções subsequentes da falta, ou quando a falta seja permanente, podendo prejudicar o sistema elétrico ao realizar a manobra com a presença do curto-circuito.

2.2.2 RELIGAMENTO MONOPOLAR ADAPTATIVO

O religamento monopolar adaptativo (ASPAR, do inglês *Adaptative Single-pole Auto Reclosure*) surge a partir da necessidade de diferenciar se a falta é transitória ou permanente, visto que este detalhe é de suma importância para a estabilidade do sistema, já que não se deve religar a fase nestes casos, onde danos podem ser causados aos equipamentos. Assim, têm sido objeto de estudo durante muitos anos e consiste na identificação da natureza da falta, bem como na determinação do momento de extinção do arco secundário, possibilitando o religamento com sucesso no menor tempo possível, além de evitar os problemas já expostos para o método SPAR. Em outras palavras, ASPAR objetiva otimizar o tempo entre a abertura e o religamento da fase.

Desta forma, este método apresenta vantagens em relação ao tradicional, como aumento da taxa de religamento bem-sucedidos, aumento da estabilidade e redução do impacto durante a ocorrência de faltas permanentes (FITTON *et al.*, 1996).

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo possui como objetivo proporcionar uma visão geral de alguns dos trabalhos científicos desenvolvidos acerca do tema proposto, demonstrando que ao longo dos anos muitas abordagens diferentes foram utilizadas para buscar otimizar o processo de religamento monofásico, abordagens estas que englobam análises no domínio da frequência, algoritmos de estimação fasorial, utilização de transformada *Wavelet*, distorção harmônica total (THD), utilização de sistemas em tempo real, componentes simétricas, uso de conceitos e aplicações voltadas à Inteligência Artificial (AI), dentre outros. Posteriormente, são detalhados os métodos utilizados como base para o desenvolvimento do presente trabalho.

3.1 MÉTODOS ADAPTATIVOS DE RELIGAMENTO MONOPOLAR

Vahidi *et al.* (2008) apresentaram um algoritmo de religamento monopolar adaptativo baseado na função de erro de uma rede neural ADALINE (*ADaptive LINear Element*). Os dados de tensão coletados durante faltas do sistema são utilizados para o treinamento online de uma rede neural, para posteriormente a função de erro ser empregada de forma a identificar falhas permanentes e transitórias. Devido ao comportamento dos sinais dificultarem o treinamento da rede após a abertura dos disjuntores de proteção, os autores propõem um índice LEI (*Learning Error Index*) que utiliza o valor RMS do sinal de erro inicialmente proposto e permite uma visualização mais clara para identificação do tipo de falta ocorrida, permitindo corretamente a manobra de religamento, nos casos nos quais foi avaliado.

Com a utilização da tensão de sequência zero do sistema, obtida por meio da matriz de *fortescue*, o trabalho proposto em Jamali e Parham (2009) sugere o cálculo de um sinal de controle $M(k)$, correspondente ao valor médio por ciclo, para identificar a natureza da falta ocorrida a partir do deslocamento da tensão de restabelecimento transitória, para linhas não compensadas. Posteriormente, com a aplicação da DFT, obtém-se a 3ª harmônica (V_3^0) da tensão de sequência zero para o cálculo do índice cumulativo $W(k)$. O algoritmo propõe a identificação do fim do arco a partir da comparação entre $W(k)$ e V_3^0 , sendo utilizado o ponto de intercessão dos gráficos para detecção. Nesta implementação, não se faz necessária a definição de *thresholds* fixos, já que a comparação entre os dois sinais é o indicativo para o religamento. A proposta foi submetida a testes com diferentes ângulos de carga e locais de aplicação da falta, com resultados positivos de detecção.

Montanari, Tavares e Câmara (2009) realizaram um estudo acerca do conteúdo harmônico da tensão de arco secundário presente em dados obtidos em campo (Laboratório de alta potência - CEPEL) a partir da utilização de transformada de Fourier Discreta de curto tempo (STDFT), calculando-se os coeficientes da transformada com uma janela de deslocamento (16.67 ms) aplicada aos sinais, com o objetivo de determinar uma assinatura harmônica para o arco, que permita a distinção de cenários nos quais o religamento monofásico pode ser realizado. A infraestrutura utilizada para os ensaios consiste em uma linha de 500kV formada por três torres, onde as condições de falta foram aplicadas e as medições realizadas. O sistema de processamento dos

dados inclui a aferição da qualidade das medições, filtragem e separação das informações desejadas pelos autores. O estudo levou em consideração o intervalo de (1^a – 15^a harmônicas) para realização dos cálculos, indicando resultados que mostram a predominância de harmônicas de ordem ímpar em relação às de ordem par, quando normalizadas com a fundamental. Posteriormente, é apresentado um índice para avaliação da proteção adaptativa, denominado Fator Harmônico (FH), que utiliza harmônicas específicas do sinal para detectar a presença ou extinção do arco secundário. Por fim, os autores discutem os resultados obtidos e adicionam uma análise com o desvio padrão dos dados processados sob diversas condições de operação, demonstrando que a utilização da proposta como método de religamento monofásico adaptativo obteve sucesso nos cenários simulados.

Em Godoy *et al.* (2012), os autores apresentam, com base em trabalhos já consolidados em Guzmán *et al.* (2002) e Guzmán *et al.* (2010), uma revisão acerca do histórico de uso de esquemas de religamento monofásico e também a influência da utilização de manobras (monofásicas e trifásicas) nos sistemas de proteção, no que diz respeito à estabilidade e robustez. O artigo se propõe a discutir os benefícios encontrados nos esquemas de chaveamento monofásico, bem como apresenta, entre outros métodos discutidos, dois relacionados a identificação de extinção de arco secundário baseados no estudo da magnitude e fase das tensões e na análise harmônica do sinal sob falta, respectivamente. O documento conclui que a manobra monofásica apresenta melhorias na estabilidade e confiabilidade do sistema, pelo fato de que as fases sãs permanecem transmitindo, causando uma diminuição na perda por potência reativa e mantendo o suprimento de energia. Em relação aos métodos de detecção de extinção do arco secundário (SAED, do inglês *Secondary Arc Extinction Detection*) apresentados, os resultados foram positivos para todos os casos estudados durante o desenvolvimento do artigo.

Nagpal *et al.* (2015) realizaram a publicação de um esquema híbrido de detecção de extinção da corrente de arco secundário. A ideia principal baseia-se em Guzmán *et al.* (2002), com o monitoramento das tensões de fase do sistema, com o uso de um algoritmo de estimação fasorial, possibilitando detectar a partir da característica do fasor de 60Hz, se o arco secundário foi extinto e se a manobra de religamento monofásico pode ser realizada com sucesso. O estudo foi realizado considerando inicialmente a linha de transmissão em dois cenários (carregamento leve e carregamento pesado), onde os autores determinaram uma região no plano complexo na qual o comportamento do

fasor estimado tende a se localizar após a extinção do arco (tensão de restabelecimento). Foram assim definidos valores limites de magnitude e ângulo, de modo a utilizá-los no método apresentado.

Desta forma, o esquema proposto monitora a fase sob falta a partir do momento em que os disjuntores da linha são acionados, verificando se as condições de magnitude e ângulo do sinal pré-determinadas foram atingidas. A partir da confirmação de ambos os requisitos, têm-se o disparo de um temporizador de 18 ciclos, que representa o tempo para que ocorra a desionização do ar presente, de forma que não ocorra reignição do arco. Por fim, o esquema de detecção considera que o arco foi extinto se ao menos 2 ciclos ainda estiverem disponíveis dentro da janela de 1 s do sinal analisado, permitindo a tentativa do religamento monofásico. Caso contrário, dentro do tempo destinado à desionização, caso o sistema identifique a reignição do arco ou o tempo de 58 ciclos seja excedido, ocorre uma manobra de religamento trifásica. O esquema foi simulado e posteriormente implementado com sucesso em linhas transpostas e sem compensação da *Columbia Hydro and Power Authority (BC Hydro)*.

A partir da obtenção da magnitude do sinal sob falta com estimação fasorial e com o posterior uso do método dos mínimos quadrados para derivar a magnitude, Zhalefar, Zadeh e Sidhu (2015) apresentam uma possível solução para identificação e otimização do tempo de religamento para faltas permanentes e transitórias, utilizando valores locais de tensão. Inicialmente, após a abordagem matemática relacionada aos parâmetros da linha de transmissão, os autores explicam como o uso da derivada da magnitude do sinal pode ser utilizada para identificar a natureza da falta, para posteriormente, acrescentarem uma análise envolvendo o ângulo da fase sob falta, de modo a aumentar a confiabilidade do método proposto na identificação da extinção do arco secundário, analisando de forma conjunta os dois parâmetros. Por meio do índice VDR (*Voltage Derivative Ratio*), obtido com a relação entre o valor da derivada e o pico negativo do sinal, o algoritmo realiza a avaliação sobre a condição do sistema, identificando o momento de extinção do arco. O método foi submetido a 550 casos simulados, englobando diversas configurações distintas, como transposição da linha (não transposta/parcialmente transposta/transposta), presença e ausência de compensação *shunt* e alteração do local de aplicação da falta, obtendo sucesso em todas as aplicações.

Com o objetivo de aumentar a confiabilidade da verificação de extinção da falta antes de uma manobra de religamento monofásico, Mattos *et al.* (2015) propuseram um

método de detecção aplicado em tempo real. A solução apresentada consiste em realizar a comparação do fasor de frequência fundamental de tensão da fase aberta, previsto para o sistema sob condições normais, com a medição do fasor durante o acontecimento da falta monofásica. A partir disto, os autores obtiveram a diferença entre os dois fasores, considerando uma margem de segurança para os dados, visto que erros na estimação dos sinais e parâmetros da linha podem ocorrer. Com uma área de restrição definida entre os dois fasores, torna-se possível avaliar quando ocorre a extinção do arco secundário. A proposta possui algumas considerações em relação à linha de transmissão, como a necessidade da utilização de capacitores em série, compensação *shunt* e correção de parâmetros da linha dependendo do comprimento da mesma. O método foi aplicado em um grande número de testes em estado estacionário, com variações de condições de operação, obtendo resultados coerentes com a teoria apresentada. Posteriormente, os autores realizaram uma análise no domínio do tempo utilizando o caso mais crítico disponível, onde verificou-se a eficácia na identificação da extinção da falta em menos de 1 ciclo.

No método apresentado por Luo, Huang e Jiang (2016), um esquema adaptativo voltado para funcionamento em EHV com derivação *shunt* é proposto. O estudo demonstra as componentes harmônicas ímpares e pares se comportam de forma distinta durante a presença do arco secundário. Portanto, a partir de simulações via EMTP, é utilizado um coeficiente denominado REO, obtido a partir do cálculo da razão entre o fator de distorção harmônica par (EHD) e a distorção harmônica ímpar (OHD) da tensão de fase com falha, além disso, utiliza-se um critério de comparação da amplitude das harmônicas com 1% da tensão nominal, para evitar identificações equivocadas de faltas permanentes. São realizadas comparações entre o coeficiente REO, a THD apresentada em (RADOJEVIC; SHIN, 2007) e o fator harmônico presente em (MONTANARI; TAVARES; PORTELA, 2009), onde os autores enfatizam a influência sofrida pelos 2 métodos em relação ao valor de compensação *shunt* da linha. Os testes executados incluem um sinal real de uma linha de transmissão de 500 kV compensada localizada na China, obtendo resultados positivos de detecção. Por fim, os dados mostram que o método proposto conseguiu identificar a extinção do arco secundário com média de 20 ms de atraso, para todos os sinais analisados.

Já em Jamali e Baayeh (2017), os autores apresentam um método adaptativo de detecção de extinção do arco secundário baseado em medições locais, com uma função de previsão da magnitude do sinal de tensão da fase submetida ao surto, utilizando para

obtenção dos fasores o algoritmo de estimação fasorial de ciclo completo de Fourier. O valor previsto é calculado com um algoritmo de mínimos quadrados antes da obtenção do valor real da linha, onde posteriormente é verificada a diferença entre ambos, servindo como critério para detectar se o arco ainda permanece presente ou se foi extinto. Com o uso de simulações computacionais, o documento indica que o método obteve sucesso e pode ser utilizado para linhas com ou sem transposição, com níveis diferentes de compensação reativa, independente do carregamento ou localização da falta, para os 465 casos processados.

No trabalho de Dias e Tavares (2017), baseados no sistema brasileiro de linhas de 500 kV, realizaram um estudo acerca de um método de religamento monofásico adaptativo a partir da medição harmônica da tensão com o uso de um filtro digital. Para a modelagem do sistema, da falta e do filtro, utilizou-se um RTDS (*Real Time Digital Simulator*), além de um relé de distância, para simular a operação em campo da proteção. Além disso, foram escolhidos níveis distintos para a corrente de arco secundário, ajustados a partir do dimensionamento do reator de neutro. O método leva em consideração 1^a, 3^a, 5^a e 7^a harmônicas, respectivamente, para a realização do cálculo da taxa de distorção do sinal sob falta, conseguindo assim verificar se o distúrbio têm características de falta permanente ou temporária, realizando o comando de manobra adequada para a linha. Para as simulações utilizaram-se dois casos como base (falta permanente e falta temporária), onde foram variados os valores de compensação, resistência e local da falta. Os casos estudados obtiveram resultados positivos para todas as configurações utilizadas, gerando o sinal de controle para manobras trifásicas e monofásicas em casos de faltas permanentes e temporárias, respectivamente.

Em Khan *et al.* (2019), é utilizado um índice para determinação da natureza da falta monofásica (permanente ou transitória), bem como o instante de extinção do arco, sendo este valor calculado com base nos coeficientes da transformada *Wavelet* contínua e um algoritmo da transformada rápida de *Fourier* (CWTFT), utilizando dados locais das tensões da fase sob falta. A escolha por utilizar a FFT se dá pelo fato do tempo de computação da transformada *Wavelet* clássica ser consideravelmente maior. O índice proposto apresenta valor alto de energia enquanto o arco secundário mantém-se presente no sistema, decaindo para zero após a extinção, desta forma, possibilitando a identificação do tipo de falta ocorrida e o momento no qual o arco deixa de existir, para o religamento. O algoritmo foi submetido a simulações com MATLAB/Simulink,

considerando diversas condições para o sistema adotado, com alterações do local da falta, resistência de falta, ângulo de carga, linha compensada e não compensada, conseguindo identificar com sucesso o tipo e o momento de extinção do arco, este último para o caso de surtos transitórios.

A Tabela 1 a seguir apresenta de forma sucinta as principais técnicas utilizadas pelos autores citados nesta revisão.

TABELA 1 – RESUMO DOS MÉTODOS

Método	Principal técnica utilizada
(VAHIDI <i>et al.</i> , 2008)	Redes neurais/ADALINE
(JAMALI; PARHAM, 2009)	Componentes simétricas/DFT
(MONTANARI; TAVARES; CÂMARA, 2009)	STDFT/Análise Harmônica
(GODOY <i>et al.</i> , 2012)	Estimação Fasorial
(GUZMÁN <i>et al.</i> , 2002, 2010)	Estimação Fasorial
(NAGPAL <i>et al.</i> , 2015)	Estimação Fasorial/Média Móvel
(ZHALEFAR; ZADEH; SIDHU, 2015)	Estimação Fasorial/Mínimos Quadrados
(MATTOS <i>et al.</i> , 2015)	DFT
(JAMALI; BAAYEH, 2015)	Estimação Fasorial/ciclo completo Fourier
(LUO; HUANG; JIANG, 2016)	DFT/Análise Harmônica
(DIAS; TAVARES, 2017)	Filtro digital/RTDS
(KHAN <i>et al.</i> , 2019)	Transformada <i>Wavelet</i>

Fonte: Autoria Própria

3.2 MÉTODOS ASPAR ANALISADOS

Durante esta seção, serão apresentados os métodos escolhidos para realização das análises deste trabalho, com as explicações acerca dos procedimentos definidos pelos autores e detalhamento sobre modificações eventualmente necessárias para implementação.

3.2.1 ANÁLISE HARMÔNICA – FH

Para implementação deste método adaptativo, é definido em (MONTANARI; TAVARES; CÂMARA, 2009) um parâmetro para avaliar o conteúdo harmônico existente no sinal de tensão obtido nos dois terminais da linha durante uma falta monopolar, sendo este parâmetro batizado como FH (fator harmônico). O cálculo do FH consiste na utilização das amplitudes das harmônicas obtidas via transformada de Fourier e é apresentado na Equação (1) a seguir.

$$FH = \frac{\sqrt{V_3^2 + V_5^2 + V_h^2}}{V_1} \quad (1)$$

Onde:

V_h : Amplitude da harmônica h (V).

Para possibilitar a obtenção dos fasores correspondentes as harmônicas necessárias para o cálculo de FH, utiliza-se a transformada Discreta de Fourier de tempo curto presente na Equação (2), permitindo a definição de uma janela que se desloca nos sinais analisados estimando as harmônicas de interesse.

$$\hat{V}_h = \sum_{k=0}^{N-1} \frac{V_k (\cos(j\omega hk) - j * \text{sen}(j\omega hk))}{N} \quad (2)$$

Onde:

\hat{V}_h : Harmônica h de tensão (V).

V_k : Tensão obtida das medições (V)

ω : Frequência angular (rad/s)

N : Quantidade de amostras por período

A magnitude é obtida a partir do valor absoluto de \hat{V}_h conforme a Equação (3).

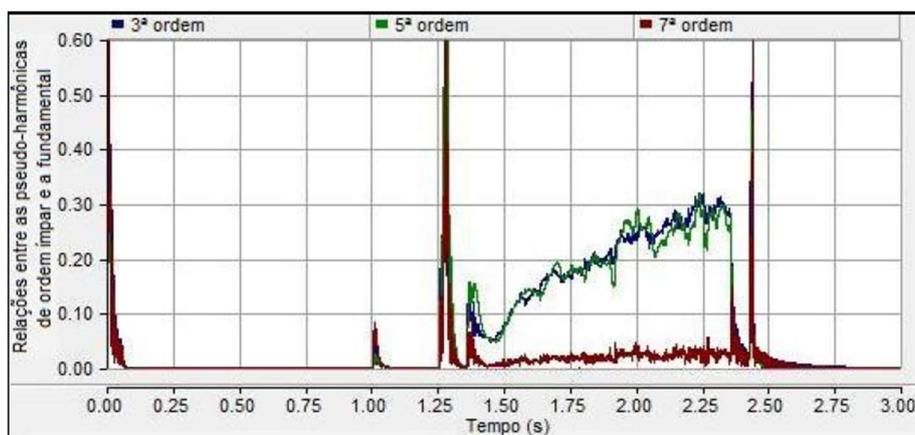
$$V_h = |\hat{V}_h| = \sqrt{\text{Re}^2\{\hat{V}_h\} + \text{Im}^2\{\hat{V}_h\}} \quad (3)$$

Onde:

V_h : Amplitude da harmônica h (V).

Devido a característica não linear do arco elétrico, diversas harmônicas encontram-se presentes no sinal enquanto o arco persiste, ao contrário da situação de operação considerada normal. Assim, o fator harmônico apresenta um comportamento distinto neste intervalo de tempo, que pode ser utilizado para determinar o instante de extinção do arco secundário, conforme exemplificado na Figura 5.

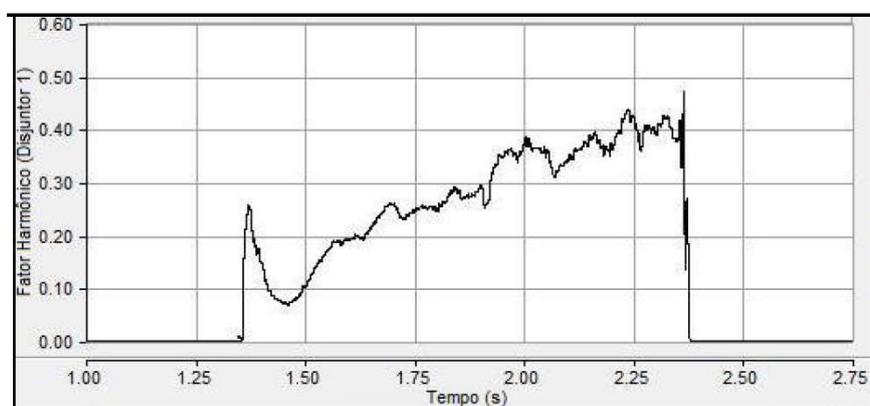
Figura 5 – Harmônicas durante arco secundário



Fonte: Montanari, Tavares e Câmara (2009)

Segundo Montanari, Tavares e Câmara (2009, p. 5): “É possível concluir que o momento de extinção do arco secundário corresponde ao instante de redução do Fator Harmônico”. A Figura 6 a seguir representa o resultado obtido para o fator harmônico durante a existência de uma falta monopolar, evidenciando o comportamento diferente das harmônicas durante a presença do arco secundário.

Figura 6 – Fator harmônico medido em 1 terminal



Fonte: Montanari, Tavares e Câmara (2009)

Como critério de avaliação, os autores definem que a cada iteração, compara-se os valores obtidos do Fator Harmônico nos dois terminais com um *threshold*, sendo este definido no intervalo entre 0,1 e 0,2. Caso ambos os terminais permaneçam abaixo do limite por um período de tempo, o sinal para religamento é disparado para os disjuntores. Neste trabalho, utilizou-se como intervalo de aceitação para o método N pontos, correspondentes a um ciclo completo do sinal, que devem permanecer abaixo do valor limite especificado para possibilitar a detecção.

O índice proposto pelos autores pressupõe a utilização de medições em ambos os terminais da linha de transmissão, como fator para detecção do fim do arco secundário. Contudo, pela indisponibilidade de tais pares de medição, no presente trabalho, este método será analisado com medições obtidas em um único terminal. Sendo assim, possíveis falhas nos resultados não significam a não funcionalidade do método, visto que adaptações foram inseridas durante a implementação.

3.2.2 ANÁLISE HARMÔNICA – REO

Durante as etapas de uma falta monopolar, as harmônicas presentes no sinal se comportam de maneira distinta. A partir desta premissa, neste método ASPAR para linhas compensadas, é utilizada uma razão entre o cálculo da distorção harmônica par (EHD) e a distorção harmônica ímpar (OHD), sendo estas estimadas com o mesmo princípio mostrado nas Equações (2) e (3), formando o índice REO, conforme mostrado na Equação (4).

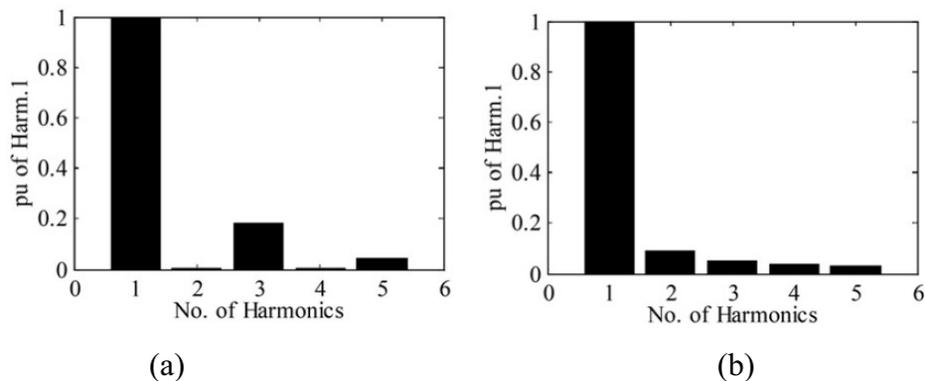
$$\text{REO} = \sqrt{\frac{V_2^2 + V_4^2}{V_3^2 + V_5^2}} \quad (4)$$

Onde:

V_h : Amplitude da harmônica h.

Segundo descrito em Luo, Huang e Jiang (2016), no momento em que o arco secundário se estabelece, têm-se uma predominância de componentes harmônicas ímpares, ao passo que as harmônicas pares apresentam baixa contribuição. Posteriormente, ao atingir a tensão de restabelecimento, as harmônicas pares apresentam um aumento significativo, possibilitando assim que o índice estime o final do arco secundário. A Figura 7 abaixo exemplifica a contribuição das harmônicas durante e após a extinção da falta para um dos sinais analisados no artigo.

Figura 7 – Amplitude das harmônicas (a) durante arco secundário (b) após arco secundário

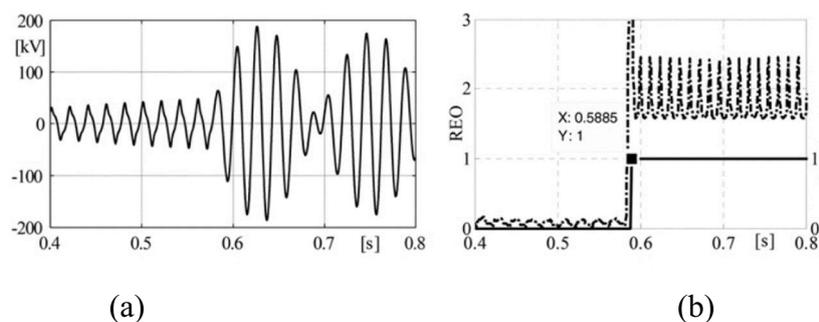


Fonte: Luo, Huang, Jiang (2016)

Desta forma, REO mantêm-se em um valor menor do que 1 durante a permanência do arco secundário e assume valores acima de 1 a partir da extinção da falta, conforme a Figura 8a e Figura 8b, que apresentam o sinal de tensão na fase e o comportamento do índice, respectivamente. Além disso, para acrescentar robustez ao método, evitando que detecções equivocadas ocorram em falhas permanentes ou em situações nas quais o arco não se propague por muito tempo, apresentando pouca amplitude harmônica, é proposto avaliar a amplitude RMS dos harmônicos de tensão comparando-as com 1% da tensão nominal do sistema, para posterior implementação do método REO.

Como critério de aceitação, os autores definem uma janela de 10 amostras consecutivas, onde REO deve ser manter acima do valor 1. Esta janela corresponde a 25% da quantidade de pontos presentes no sinal proposto no artigo ($F_s = 2000 \text{ Hz}$, $f = 50 \text{ Hz}$ e $janela = 50 \text{ ms}$), portanto, esta proporção será adotada para os valores de amostragem utilizados.

Figura 8 – Resultado método REO com linha 70% compensada

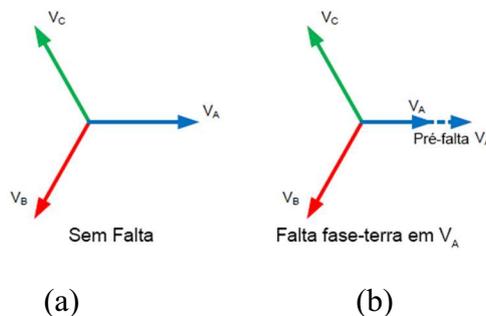


Fonte: Luo, Huang, Jiang (2016)

3.2.3 ESTIMAÇÃO FASORIAL

Antes da existência de uma falta monopolar, considerando-se um sistema trifásico equilibrado, as tensões nas fases encontram-se com mesma magnitude, defasadas entre si em 120° , como apresentado na Figura 9a. Logo após a ocorrência do surto, estabelece-se o chamado arco primário, no qual ocorre uma diminuição da magnitude de tensão na fase sob falta, mantendo-se o ângulo, ao passo em que a corrente do curto-circuito aumenta abruptamente, fatores estes que dependem da impedância presente no local da falta. Desta forma, o sistema apresenta comportamento conforme Figura 9b.

Figura 9 – Tensões trifásicas antes da falta e durante arco primário



Fonte: Adaptado de NAGPAL *et al.* (2015)

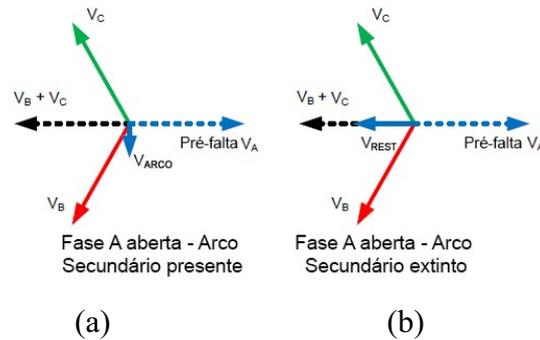
Em seguida, a proteção monopolar realiza a abertura dos disjuntores em ambas as extremidades da linha, isolando-a. A partir deste instante, as outras duas fases em operação são responsáveis por manter o arco secundário, sendo a tensão de acionamento da corrente do arco a soma vetorial das fases sãs, conforme Nagpal *et al.* (2015).

Como duas das três fases ainda estão com tensão aproximadamente nominal e a fase com falha é acoplada capacitivamente e indutivamente às fases íntegras, um arco secundário é mantido. O ar já está ionizado da falha primária, portanto as duas fases sãs precisam de pouca corrente para manter esse arco secundário (GUZMÁN *et. al.*, 2002, p. 15)

Durante a permanência do arco secundário, a tensão da fase sob falta sofre um atraso de aproximadamente 90° em relação a sua posição de referência (V_{arco}), como ilustrado na Figura 10a. Por fim, após o arco se extinguir, o ângulo da fase se desloca e tende a se alinhar com o ângulo da soma vetorial das fases sãs ($V_b + V_c$), sendo esta

denominada de tensão de restabelecimento transitória (V_{rest}), exemplificado na Figura 10b.

FIGURA 10 – TENSÕES TRIFÁSICAS DURANTE E APÓS EXTINÇÃO DE ARCO SECUNDÁRIO



Fonte: Adaptado de Nagpal *et al.* (2015)

Partindo desses pressupostos, com o uso de um algoritmo de estimação fasorial, é possível verificar as etapas durante a ocorrência de uma falta monofásica e utilizar estes conceitos de forma a definir um momento para o religamento do sistema. Para tanto, definem-se valores limites que sinalizam o instante no qual o sistema apresenta o comportamento da Figura 10b, indicando que a tensão de restabelecimento transitória está presente e conseqüentemente, o arco secundário já fora extinto, sendo este um momento propício para o fechamento dos disjuntores.

A partir de testes realizados pelos autores, notou-se que a alteração do carregamento presente nas linhas de transmissão implica em uma variação do ângulo apresentado pela tensão de restabelecimento transitória, ou seja, o alinhamento com o ângulo da soma fasorial das duas fases não ocorre completamente. Desta forma, para que seja possível abranger casos com carregamentos distintos, define-se um limiar, denominado (β), que corresponde a uma janela angular de tolerância no plano complexo.

Sabendo-se que ao se extinguir o arco, a tensão apresenta um aumento de magnitude, define-se (V_{thre}), que será utilizado como indicador entre o final do arco secundário e o início da tensão de restabelecimento. Assim, tem-se as seguintes condições abaixo para o algoritmo, nas Equações (5) e (6) e sua representação no plano complexo na Figura 11.

$$-\beta \leq \phi \leq \beta \quad (5)$$

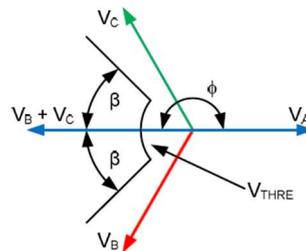
$$|V_a| > V_{thre} \quad (6)$$

ϕ : Ângulo da tensão de fase sob falta ($^\circ$)

β : limiar da janela de tolerância ($^\circ$)

V_a : tensão da fase (V)

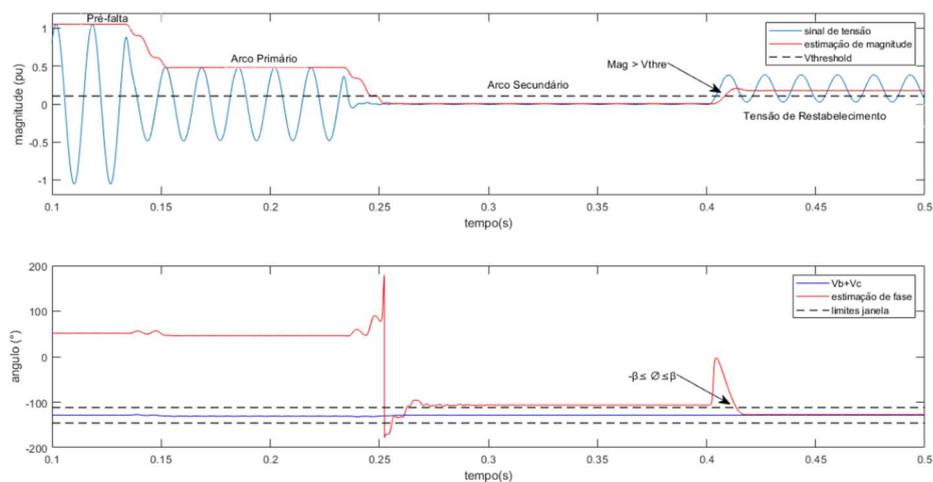
Figura 11 – Janela angular e $V_{threshold}$



Fonte: Adaptado de Godoy *et al.* (2012)

Desta forma, com ambas as condições satisfeitas, o algoritmo permite o processo de religamento monofásico. Para ilustrar os conceitos apresentados até o momento, a Figura 12 abaixo apresenta uma simulação de uma falha monofásica realizada no *software ATPDraw (Alternative Transient Program)* para um circuito sem compensação, onde foram modeladas a linha de transmissão (400 km), as impedâncias e fontes do sistema.

Figura 12 – Exemplo de resultado do algoritmo



Fonte: Autoria própria

É possível notar que as condições apresentadas nas Figuras 9 e 10 são satisfeitas, com exceção da defasagem da tensão (V_{arco}), presente em Figura 10a, que não se desloca aproximadamente 90° como citado. Neste exemplo, é importante deixar claro que o sinal apresentado na Figura 12 não possui o arco de corrente modelado matematicamente via *software*, apresentando valor de tensão aproximadamente nulo durante a permanência do arco secundário. Entretanto, para os sinais reais que serão objetos de comparação deste trabalho, é possível notar a diferença durante a permanência do arco e o cumprimento dos 4 cenários apresentados nas figuras citadas.

Nos tópicos abaixo, encontram-se informações acerca de duas implementações do método, citando as considerações adotadas pelos autores, bem como as limitações existentes para replicação neste trabalho.

3.2.3.1 GUZMÁN ET AL. (2002)

Neste estudo, os autores apresentam os conceitos de estimação fasorial citados anteriormente para linhas com compensação *shunt*, utilizando-se como valores limites uma janela angular de 50° e $V_{thre} = 0.3 * V_{nom}$. Importante salientar que tais valores foram obtidos avaliando-se os pontos dos gráficos apresentados no artigo, visto que não se encontram explícitos no documento e, além disso, os autores definem que o limite de tensão de restabelecimento transitória utilizado depende de parâmetros da linha de transmissão, logo, são passíveis de variação de acordo com o cenário analisado. Por fim, neste método não é considerado o tempo para desionização do ar.

3.2.3.2 NAGPAL ET AL. (2015)

De forma a aprimorar a precisão dos resultados, este método acrescenta um cálculo de média móvel de 10 ciclos aos sinais de magnitude e fase obtidos, sendo estes utilizados para detecção, além de considerar $\beta = 45^\circ$ e $V_{thre} = 0.6 * V_{rest}$.

A partir do instante no qual as condições citadas no tópico anterior são satisfeitas, o algoritmo proposto em Nagpal *et al.* (2015) inicia uma contagem de 18 ciclos à 60 Hz , com o objetivo de permitir a desionização do ar presente, de modo a buscar garantir que o arco tenha de fato sido extinto antes do religamento da fase. Como os sinais analisados encontram-se no intervalo de 1 s , caso a soma dos tempos de operação

$$(t_{desionização} + t_{aberturaDisjuntor} + t_{respostaMédiaMóvel} +$$

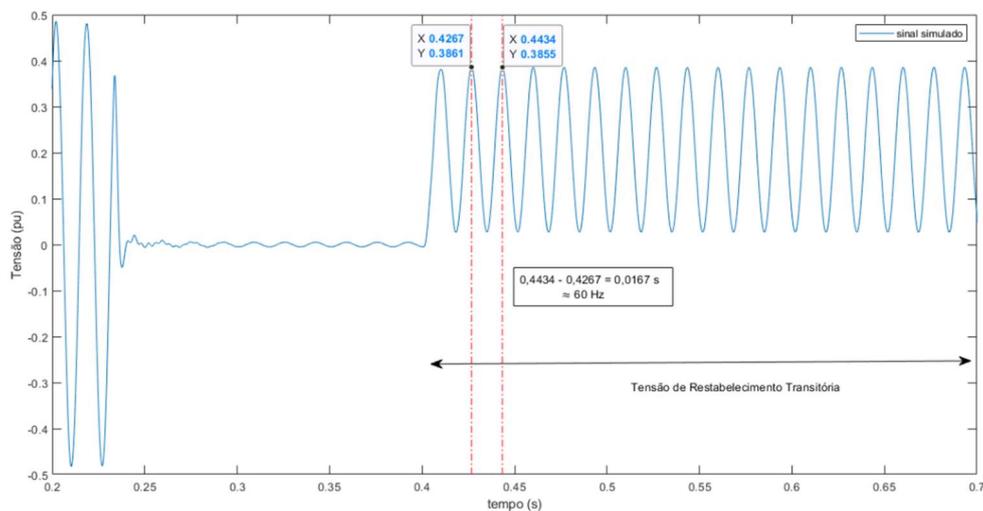
$t_{\text{fechamentoDisjuntor}}$) seja superior a 58 ciclos, a lógica de abertura monopolar é convertida em uma abertura trifásica da linha.

Se o temporizador de desionização expirar com pelo menos 2 ciclos ainda disponíveis no intervalo de um segundo de fase aberta, a lógica do arco secundário considera que o arco secundário está completamente extinto e permite a tentativa de religamento monopolar [...]. (NAGPAL *et al.*, 2015, p. 5).

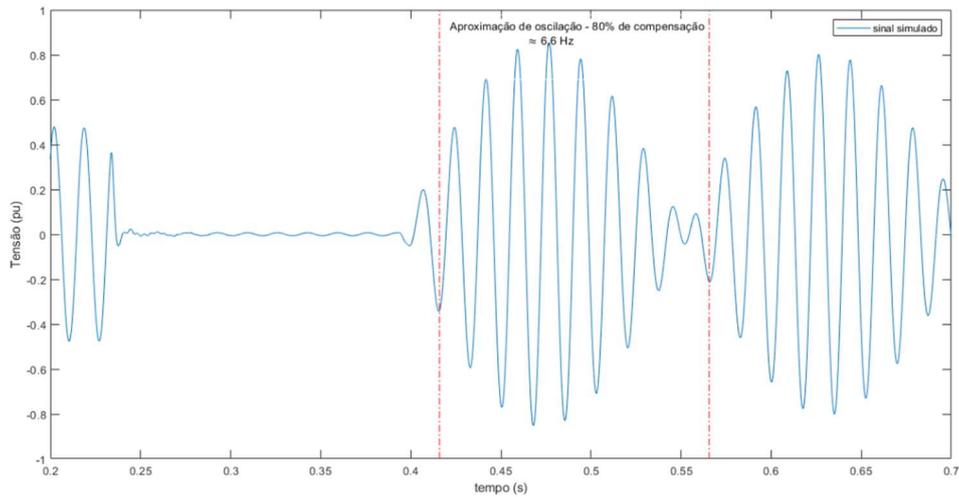
No entanto, visto que, ao contrário dos sinais reais utilizados neste trabalho, os sinais abordados em Nagpal *et al.* (2015) são majoritariamente sem compensação, o que inviabiliza a implementação de um contador de 18 ciclos, pelo fato da compensação ocasionar uma mudança na frequência da tensão de restabelecimento transitória, ou seja, após a extinção do arco secundário, a tensão apresentará uma oscilação diferente de 60 Hz, situações que podem ser vistas na Figura 13, para um sinal sem o arco modelado.

Além disso, os intervalos de tempo dos sinais reais analisados não possuem a mesma duração dos propostos no artigo, prejudicando a aplicação do contador. Por fim, como os parâmetros capacitivos das linhas não se encontram disponíveis para realização dos cálculos da tensão de restabelecimento transitória para posterior obtenção de V_{thre} , neste trabalho, será utilizada uma aproximação onde $V_{thre} = 0.1 * V_{mag}$, obtida graficamente.

Figura 13 – Tensão de restabelecimento (a) sem compensação (b) com compensação (80%)



(a)



(b)

Fonte: Autoria Própria

Na Tabela 2 abaixo, encontram-se resumidas as informações acerca das duas implementações que serão avaliadas considerando estimação fasorial.

Tabela 2 – Características das implementações

Artigo	Características			
	Linha compensada	V_{thre}	β	Média Móvel
Guzmán <i>et al.</i> (2002)	Sim	$0,3 * V_{nom}$	± 50	Não
Nagpal <i>et al.</i> (2015)	Não	$0,6 * V_{rest} / 0,1 * V_{nom}$	± 45	Sim

Fonte: Autoria Própria.

4 METODOLOGIA E DADOS

Neste capítulo serão explicitados os sinais abordados nas análises, bem como os processos decorridos para obtenção dos resultados.

4.1 DADOS SOB ESTUDO

Para a avaliação dos métodos explicitados, foram obtidos 8 sinais reais capturados durante a ocorrência de surtos de natureza monofásica, sinais estes que podem ser visualizados na Figura 14. Os dados consistem em leituras de tensão correspondentes as três fases do sistema, bem como o tempo registrado para cada amostra. De posse destes dados, inicialmente realizou-se uma avaliação para verificar parâmetros importantes a serem levados em consideração, como taxas de amostragem, início do arco secundário, duração do surto e a necessidade de aplicação de filtros para algum dos métodos.

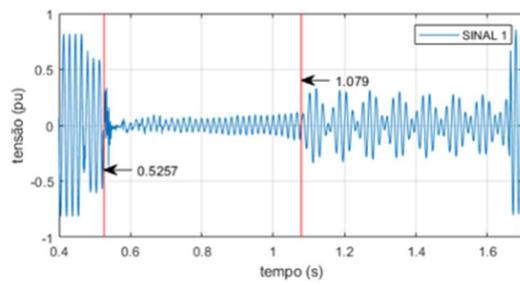
Pelo fato da informação acerca do tempo exato do início do arco secundário não estar disponível, foram analisados individualmente cada um dos casos e definiu-se um instante considerado adequado para o início da avaliação. A seguir, na Tabela 3, são explicitados os valores das taxas de amostragens originais dos sinais em questão, bem como os tempos para início e fim do arco secundário.

Tabela 3 – Características dos Sinais

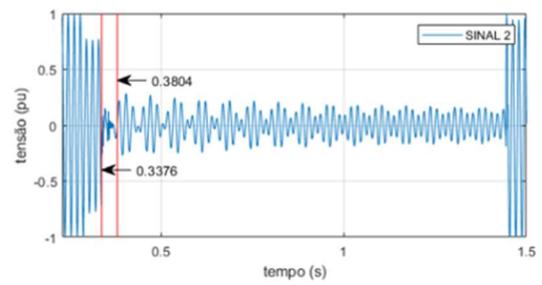
Sinal	Características		
	Taxa de Amostragem (Hz)	Início do arco (s)	Fim do Arco (s)
1	15360	0,5257	1,0790
2	15360	0,3376	0,3804
3	4000	0,5452	1,6800
4	4000	0,5583	1,1050
5	15360	0,3451	0,3613
6	15360	0,1082	1,2910
7	15360	1,0630	1,1190
8	15360	1,0720	1,1200

Fonte: Autoria Própria

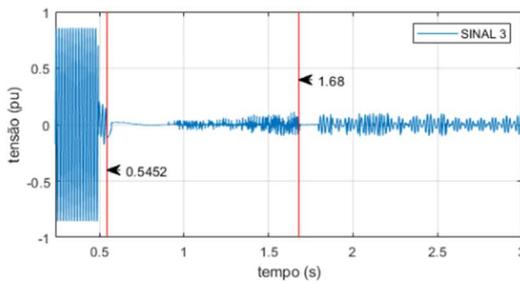
Figura 14 – Sinais de tensão para fases sob falta utilizados nas análises



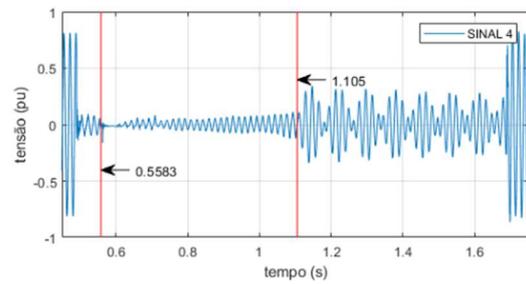
(a)



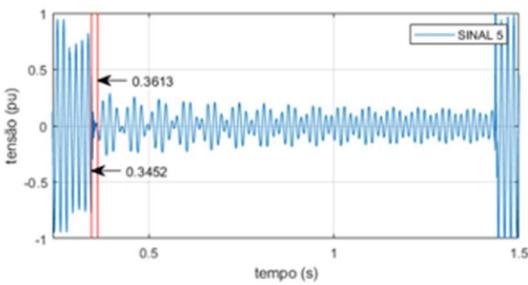
(b)



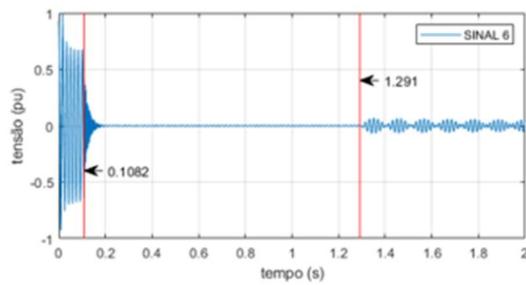
(c)



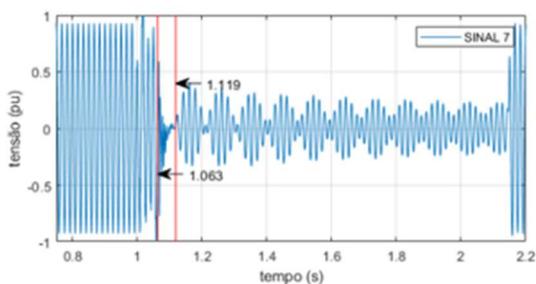
(d)



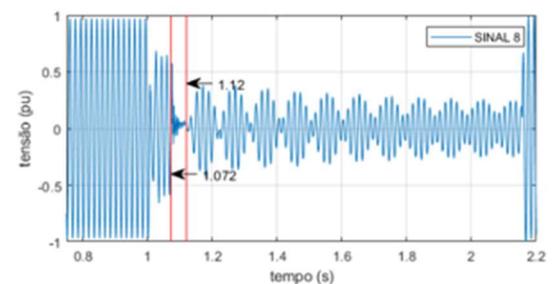
(e)



(f)



(g)



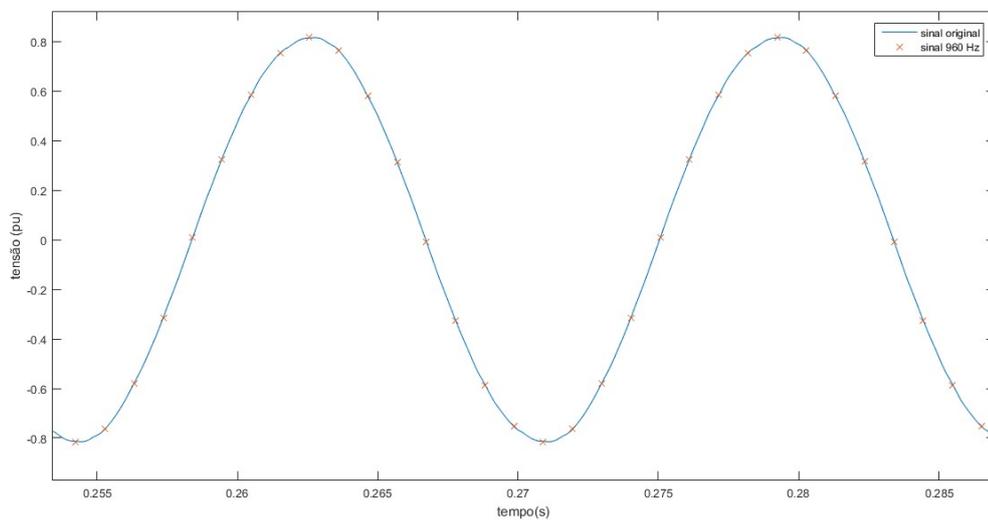
(h)

Fonte: Autoria Própria

4.2 REAMOSTRAGEM DOS SINAIS

Os sinais utilizados foram reamostrados com o uso de uma rotina desenvolvida no *software* MATLAB®, conforme exemplo da Figura 15, onde o sinal original em 15360 Hz têm sua taxa de amostragem diminuída para 960 Hz. Desta forma, permitindo que os testes fossem realizados com a amostragem original, 16 amostras/ciclo e 32 amostras/ciclo. Tais taxas foram escolhidas pelo fato de serem valores comuns de uso para avaliação dos sinais, correspondendo a 960 Hz e 1920 Hz, respectivamente.

Figura 15 – Sinal reamostrado a 960 Hz



Fonte: Autoria Própria.

4.3 FILTRAGEM DOS SINAIS

Antes da implementação do método de Guzmán *et al.* (2002) e Nagpal *et al.* (2015), utilizou-se um filtro passa-baixas com as características presentes na Tabela 4 abaixo:

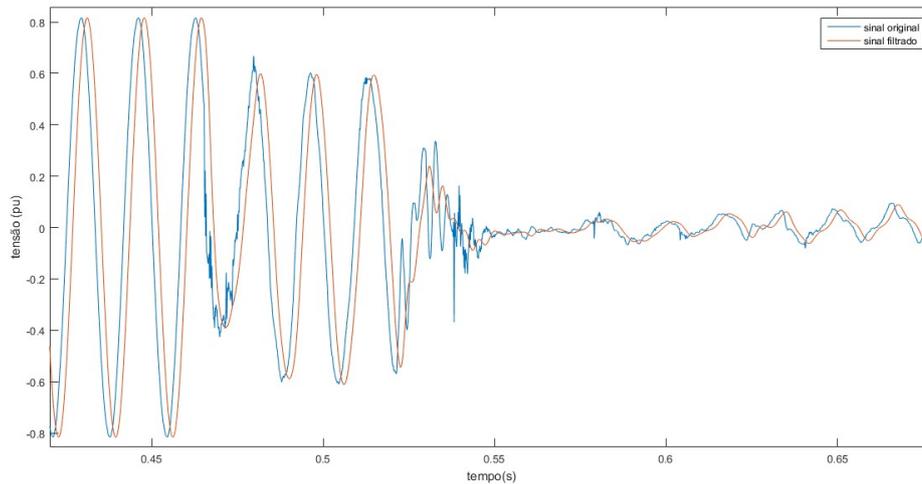
Tabela 4 – Características Filtro

Filtro	Características		
	Tipo	Frequência de corte (Hz)	Ordem
<i>Butterworth</i>	Passa-Baixas	180	3

Fonte: Autoria Própria

Pode-se observar na Figura 16 que a aplicação do filtro acaba introduzindo um deslocamento no sinal, no entanto, pelo fato de todos os sinais utilizados serem submetidos ao mesmo deslocamento, tal mudança não afeta o resultado final.

Figura 16 – Filtro aplicado aos sinais



Fonte: Autoria Própria

4.4 COSSENO MODIFICADO

Para realizar a estimação dos sinais, optou-se pela utilização do algoritmo denominado cosseno modificado, cujo valores das partes reais e imaginárias são obtidos a partir das Equações (7) e (8), respectivamente.

$$X_r(k) = \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(k - N + n) * \cos\left(\frac{2\pi}{N} n\right) \quad (7)$$

$$X_i(k) = \frac{X_r(k - 1) - X_r(k) * \cos\left(\frac{2\pi}{N}\right)}{\text{sen}\left(\frac{2\pi}{N}\right)} \quad (8)$$

Onde:

$X_r(k)$: Parte real correspondente a amostra k .

$X_i(k)$: Parte imaginária correspondente a amostra k .

5 RESULTADOS OBTIDOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos durante a implementação dos métodos, bem como discutidas os tópicos pertinentes para os casos encontrados. Posteriormente, uma análise comparativa dos métodos de religamento adaptativos é realizada.

Visto que os dados estarão dispostos em tabelas, define-se os seguintes campos, de forma a facilitar a compreensão.

- Detecção correta: Método apresenta instante de detecção após a extinção do arco secundário.
- Detecção incorreta: Método apresenta instante de detecção inferior ao tempo de extinção do arco secundário.
- Falha na detecção: Método não apresenta resposta ao sinal analisado.
- Atraso: Diferença entre o fim do arco e o instante de detecção.

5.1 MÉTODO 1 – FATOR HARMÔNICO

Para a aplicação do método, utilizou-se como critério de avaliação intervalos nos quais o fator harmônico, dentro de uma janela deslizante de N amostras, apresenta valor inferior ao limite 0,1. Os resultados foram compilados e encontram-se na Tabela 5.

Tabela 5 – Resultados Fator Harmônico

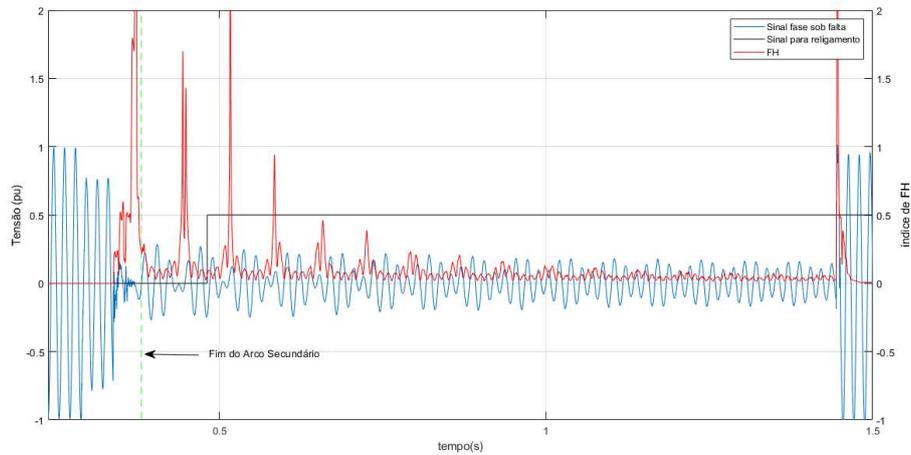
Sinal	Amostras/ciclo	Deteção correta	Deteção incorreta	Falha na deteção	Instante de Deteção (s)	Fim do Arco (s)	Atraso (ms)
1	256		✓		0,8431		-
	32		✓		0,8428	1,0790	-
	16		✓		0,8433		-
2	256	✓			0,4811		100,7
	32	✓			0,4912	0,3804	110,8
	16	✓			0,6344		254,0
3	66		✓		2,3763		-
	32		✓		2,3765	1,6800	-
	16			✓	-		-
4	66		✓		0,7850		-
	32		✓		0,7862	1,1050	-
	16		✓		0,7853		-
5	256	✓			0,4799		118,6
	32	✓			0,5464	0,3613	185,1
	16	✓			0,6146		253,3
6	256		✓		0,2584		-
	32		✓		0,2588	1,2910	-
	16		✓		0,2594		-
7	256	✓			1,1615		42,5
	32	✓			1,1620	1,1190	43,0
	16	✓			1,1625		43,5
8	256	✓			1,2706		150,6
	32	✓			1,2714	1,1200	151,4
	16	✓			1,2719		151,9

Fonte: Autoria Própria

Os dados mostram que o método aplicado obteve sucesso em 4 dos 8 sinais ao qual foi submetido (2, 5, 7 e 8), onde é possível notar que, dentre os acertos, a diminuição da taxa de amostragem do sinal, apesar de acrescentar um atraso a deteção, não comprometeu o resultado final do algoritmo.

A Figura 17 abaixo, correspondente ao sinal 2 avaliado, exemplifica um dos cenários no qual o método foi capaz de identificar e acionar um sinal de controle, permitindo o religamento dos disjuntores de proteção após 100,7 ms do fim do arco secundário.

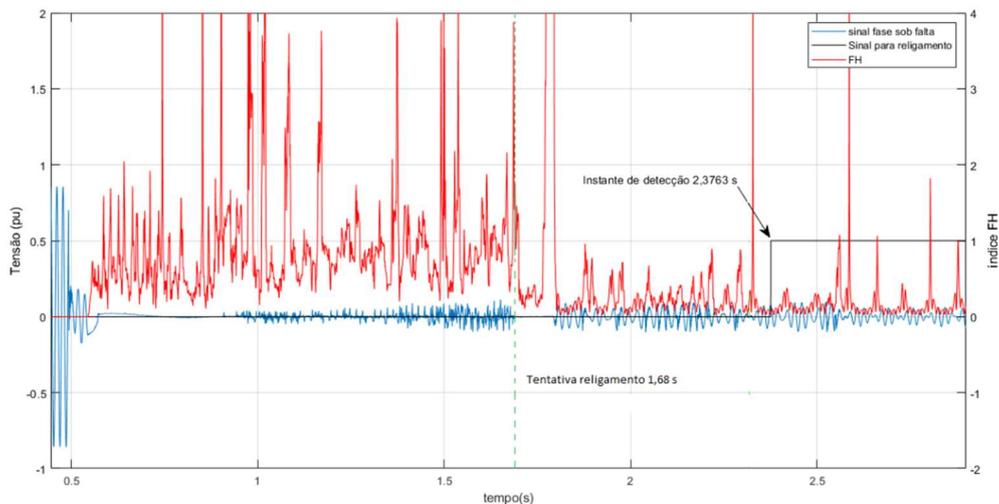
Figura 17 – Resultado Fator Harmônico (Sinal 2)



Fonte: Autoria Própria

Um caso importante a ser notado corresponde à detecção ocorrida no sinal 3, na Figura 18, onde o algoritmo apresenta um resultado de detecção positivo após a ocorrência de uma manobra tripolar (aproximadamente 1,8 s), logo, neste caso, esta indicação somente seria válida se ocorresse antes do momento da tentativa de abertura monopolar, pelo fato de que o sistema já se encontra com as três fases abertas no instante indicado pelo índice. Neste sinal específico, ocorre uma tentativa de religamento malsucedida com o arco ainda presente (1,68 s), onde posteriormente o sistema realiza uma manobra trifásica. Por este motivo, a detecção é listada como incorreta na tabela correspondente.

Figura 18 – Resultado Fator Harmônico (Sinal 3)

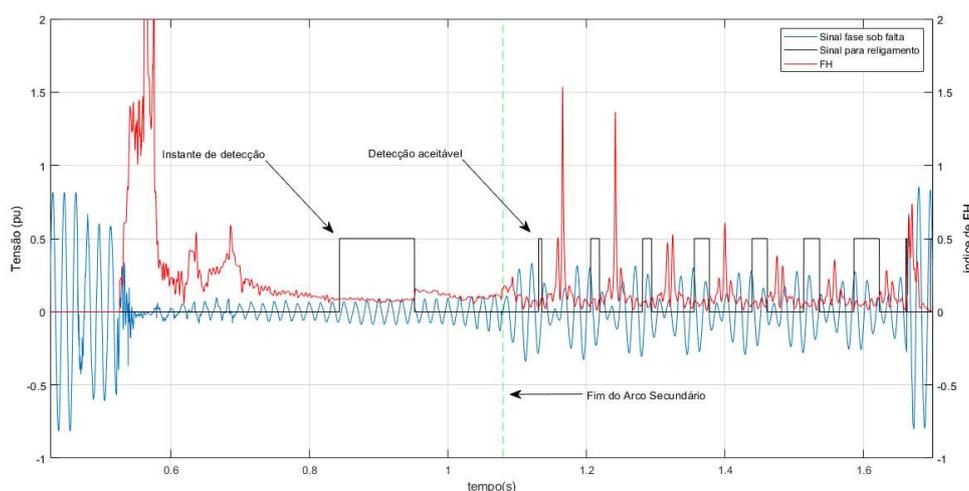


Fonte: Autoria Própria

Nos demais casos foram obtidos resultados incorretos, indicando comandos de religamento com a presença do arco secundário, o que na prática acarretaria novos disparos da proteção, além de estresse no sistema de potência.

Abaixo, na Figura 19, é apresentado um exemplo no qual o índice FH não demonstrou funcionamento adequado, pois, com todas as amostragens utilizadas, o sinal indica um acionamento precoce do comando de religamento.

Figura 19 – Resultado Fator Harmônico (Sinal 1)



Fonte: Autoria Própria

5.2 MÉTODO 2 – ESTIMAÇÃO FASORIAL

Esta seção descreve os resultados obtidos para o método de estimação fasorial, com base em duas implementações citadas em 3.2.3.

5.2.1 GUZMÁN *ET AL.* (2002)

Os resultados obtidos para este método são apresentados na Tabela 6 a seguir.

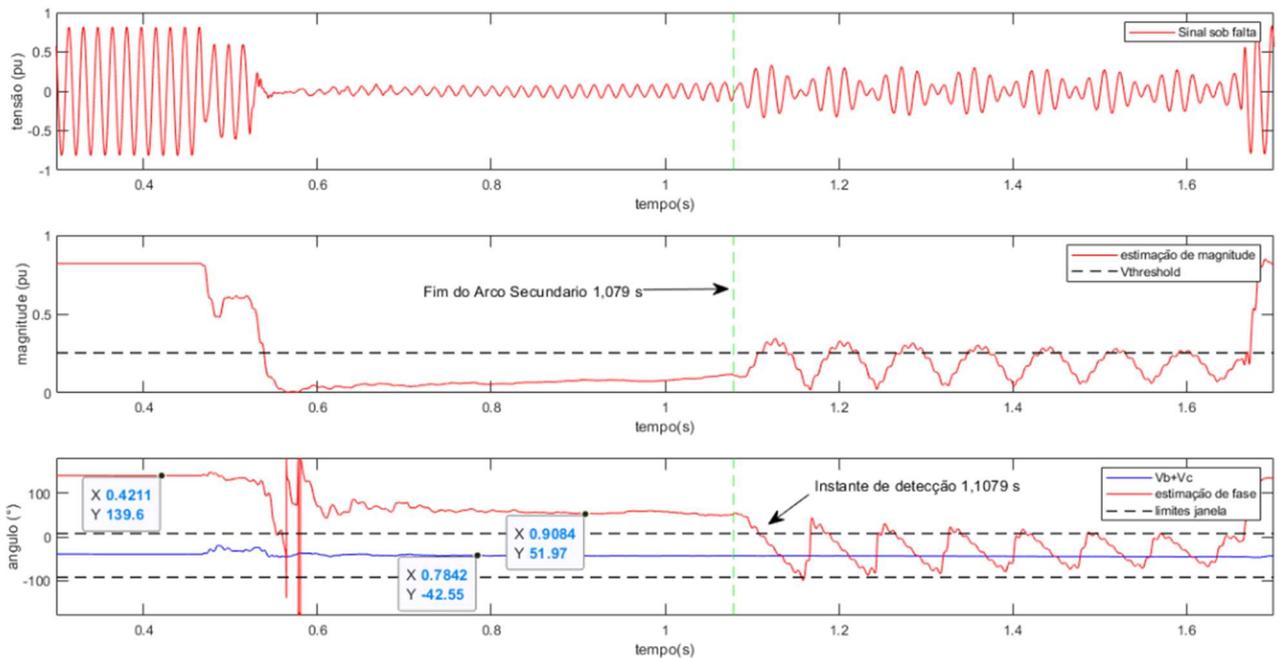
Tabela 6 – Resultados Estimação fasorial (2002)

Sinal	Amostras/ciclo	Detecção correta	Detecção incorreta	Falha na detecção	Instante de Detecção (s)	Fim do Arco (s)	Atraso (ms)
1	256	✓			1,1079		28,9
	32	✓			1,1094	1,0790	30,4
	16	✓			1,1104		31,4
2	256			✓	-		-
	32			✓	-	0,3804	-
	16			✓	-		-
3	66			✓	-		-
	32			✓	-	1,6800	-
	16			✓	-		-
4	66	✓			1,1370		32,0
	32	✓			1,1818	1,1050	76,8
	16	✓			1,1833		78,3
5	256			✓	-		-
	32			✓	-	0,3613	-
	16			✓	-		-
6	256			✓	-		-
	32			✓	-	1,2910	-
	16			✓	-		-
7	256	✓			1,1625		43,5
	32	✓			1,1641	1,1190	45,1
	16	✓			1,1656		46,6
8	256	✓			1,1626		42,6
	32	✓			1,1641	1,1200	44,1
	16	✓			1,1656		45,6

Fonte: Autoria Própria

Nos casos em que o método apresenta resultados positivos, faz-se importante ressaltar um detalhe referente ao nível de compensação presente na linha de transmissão, onde a estimação fasorial aplicada possui magnitude superior ao V_{thre} utilizado durante pequenos instantes de tempo, diferentemente do ocorrido para uma linha sem compensação reativa (Figura 12), conforme resultado mostrado na Figura 20. Este cenário, juntamente com o deslocamento da fase para a janela angular ($\emptyset \pm \beta$) permite o sinal de religamento no instante no qual ambas as condições estejam satisfeitas. No entanto, pelo fato de não se utilizar uma média dos sinais para verificar o comportamento durante uma faixa de valores, eventuais variações bruscas podem indicar uma extinção incorreta nos instantes onde os limiares utilizados sejam atingidos.

Figura 20 – Resultado Estimação Fasorial (Sinal 1 – 2002)



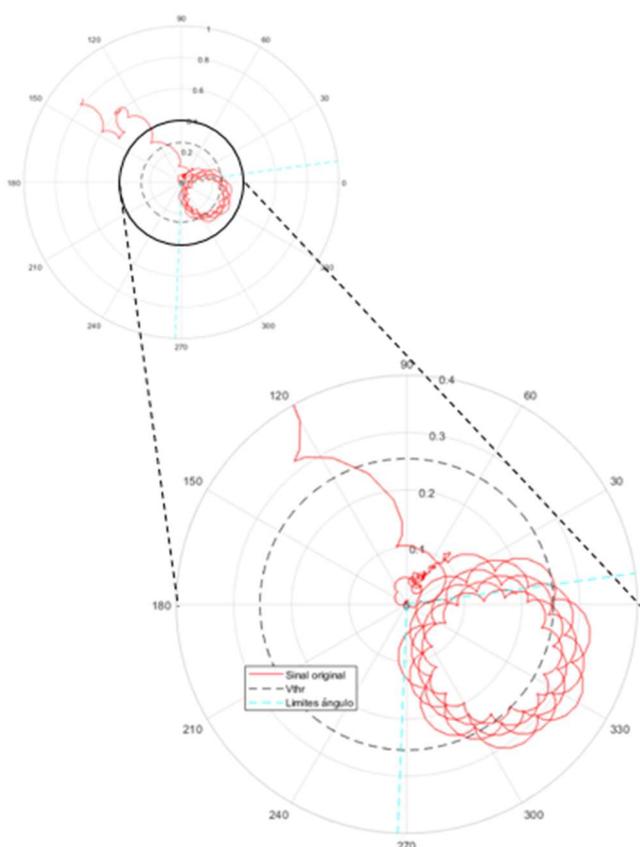
Fonte: Autoria Própria

Conforme citado em 3.2.3, inicialmente percebe-se que a fase do sinal nos instantes anteriores à ocorrência da falta (0.5257 s) encontra-se em 139.6° e sua magnitude corresponde ao valor de tensão da fase (Figura 9a). No momento em que a falta ocorre, existe uma pequena variação de fase no sinal, ao passo que sua magnitude tende a diminuir, sendo este o arco primário (Figura 9b).

Em um terceiro momento, após a abertura monopolar dos disjuntores de proteção, a fase do sinal se desloca para o valor de 51.97° ($139.6 - 51.97 = 87.63^\circ$), enquanto sua magnitude passa a corresponder ao alongamento do arco secundário (Figura 10a). Por fim, com a extinção do arco, a tensão de restabelecimento transitória aparece no sistema, oscilando de acordo com os parâmetros capacitivos e indutivos da linha, no momento em que a tensão de fase tende a oscilar em torno do ângulo do somatório das fases sãs (Figura 10b), indicando que o sistema pode realizar a manobra de religamento de forma segura.

Na Figura 21, é mostrada uma representação polar do gráfico descrito anteriormente, onde a janela angular e V_{thre} podem ser analisados simultaneamente. O instante no qual o sinal da fase excede o valor de V_{thre} estando dentro da janela especificada por β é o momento no qual o sinal de controle do algoritmo é ativado.

Figura 21 – Gráfico Polar (sinal 1 – 2002)



Fonte: Autoria Própria

O algoritmo não apresentou nenhum caso com detecção em instantes com a presença de arco secundário, no entanto, os casos onde os resultados não foram detectados corresponderam a metade da quantidade de sinais avaliados. Isso ocorre pois uma das duas condições não foram atingidas durante o processo, conforme mostrado na Tabela 7 e exemplificado na Figura 22 e Figura 23. Nestes casos, o ajuste dos *thresholds* do método poderia ser utilizado para resolver os erros de detecção obtidos, visto que, em pelo menos metade dos casos com falha, a condição não atendida corresponde ao limiar de magnitude não atingido pelo sinal de tensão da fase.

Tabela 7 – Resultados incorretos

Sinal	Detecção	
	Magnitude > V_{thre}	$-\beta \leq \phi \leq \beta$
2	-	✓
3	-	-
5	-	✓
6	-	-

Fonte: Autoria Própria

Figura 22 – Resultado Estimação Fasorial (Sinal 2 – 2002)

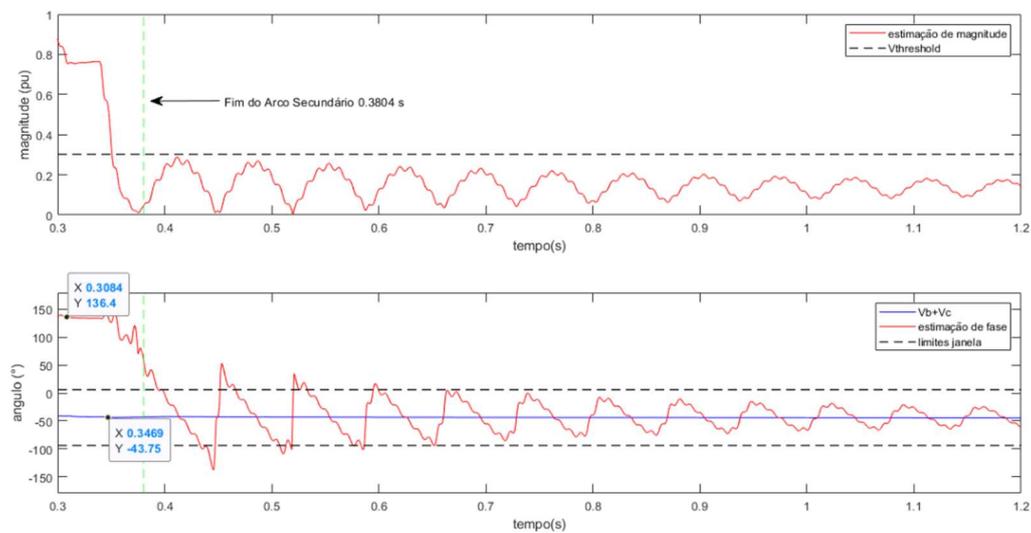
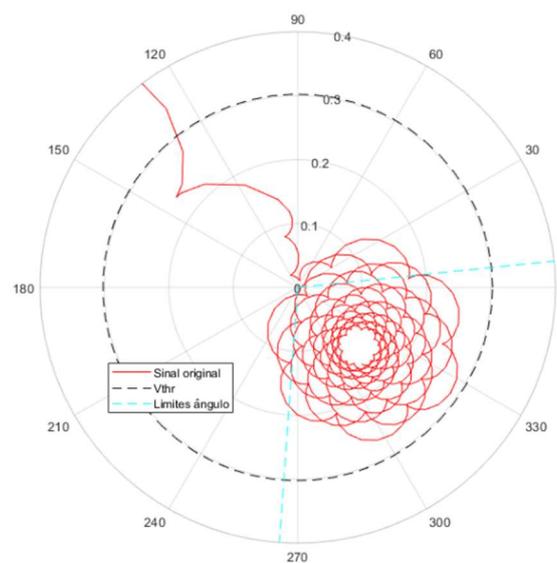


Figura 23 – Gráfico polar (Sinal 2 – 2002)



Fonte: Autoria Própria

5.2.2 NAGPAL *ET AL.* (2015)

Nesta aplicação do método, vale ressaltar que as diferenças em relação à Guzmán *et al.* (2002) se encontram nos fatores que limitam a resposta do algoritmo, bem como na aplicação de média móvel nos sinais analisados. Abaixo, os dados são apresentados na Tabela 8.

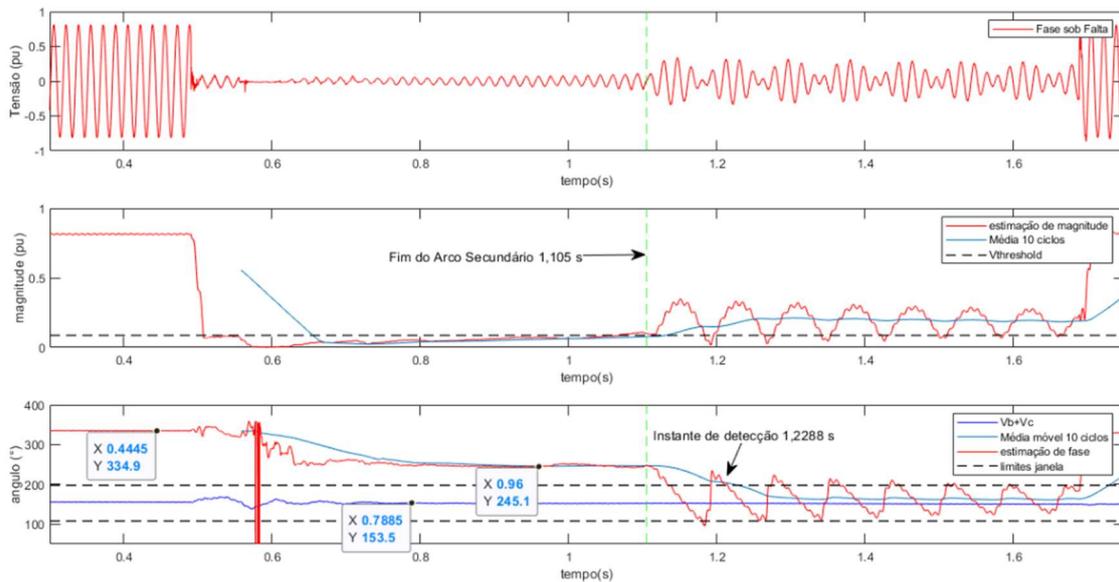
Tabela 8 – Resultados Estimação Fasorial (2015)

Sinal	Amostras/ciclo	Detecção correta	Detecção incorreta	Falha na detecção	Instante de Detecção (s)	Fim do Arco (s)	Atraso (ms)
1	256	✓			1,2072		128,2
	32	✓			1,2083	1,0790	129,3
	16	✓			1,2104		131,4
2	256	✓			0,5051		124,7
	32	✓			0,5063	0,3804	125,9
	16	✓			0,5083		127,9
3	66			✓	-		-
	32			✓	-	1,6800	-
	16			✓	-		-
4	66	✓			1,2288		123,8
	32	✓			1,2786	1,1050	173,6
	16	✓			1,2792		175,2
5	256	✓			0,4823		121,0
	32	✓			0,4838	0,3613	122,5
	16	✓			0,4854		124,1
6	256			✓	-		-
	32			✓	-	1,2910	-
	16			✓	-		-
7	256	✓			1,2320		113,0
	32	✓			1,2339	1,1190	114,9
	16	✓			1,2354		116,4
8	256	✓			1,2206		100,6
	32	✓			1,2219	1,1200	101,9
	16	✓			1,2219		101,9

Fonte: Autoria Própria

Para as condições adotadas, notou-se que o método apresentou resultado de 75% de acerto para a detecção do sinal de religamento. O tempo de detecção foi acrescido, devido à utilização da média móvel nos cálculos, conforme pode ser visto graficamente na Figura 24 abaixo, correspondente a uma das detecções corretas do algoritmo.

Figura 24 – Resultado Estimação Fasorial (Sinal 4 – 2015)

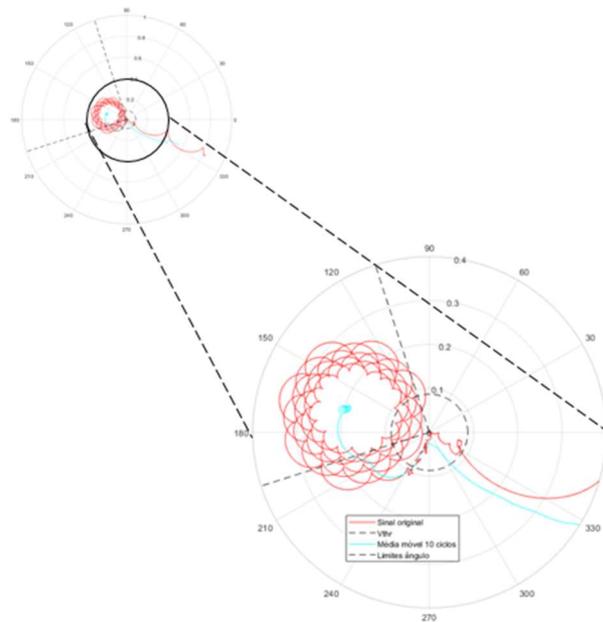


Fonte: Autoria Própria

Com a inserção do cálculo da média móvel de 10 ciclos no algoritmo, percebe-se um atraso durante o momento de detecção em relação ao indicador do fim do arco secundário. Tal atraso é justificável, visto que cada ponto é calculado com $(10 * N_{pon} - 1)$ anteriores à ele. Logo, alterações bruscas na fase do sinal podem causar posteriores distorções na média móvel, comprometendo a rapidez do instante de detecção. Também é possível notar que a fase do sinal se comporta de forma a sair da janela angular $(-\beta \leq \phi \leq \beta)$, porém, a média móvel se mantém dentro dos limites.

Abaixo, na Figura 25, mostra-se o resultado obtido em coordenadas polares. Importante salientar que resultados parecidos foram encontrados nos sinais 1, 2, 5, 7 e 8, respectivamente.

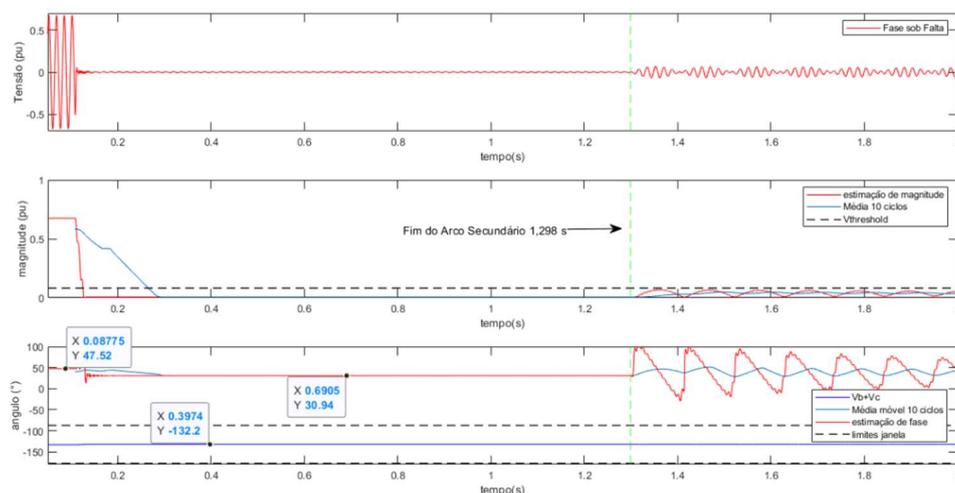
FIGURA 25 – GRÁFICO POLAR (SINAL 4 – 2015)



Fonte: Autoria Própria

Os sinais nos quais não foram encontrados resultados positivos, se deram pelo não cumprimento de alguma das condições de magnitude ou ângulo, conforme já mencionado na seção anterior. Como exemplo, pode-se observar o resultado apresentado na Figura 26 abaixo, correspondente ao sinal 6 analisado. Neste caso, nenhuma das condições foi atingida, visto que a magnitude estimada ficou abaixo do limite mínimo definido, bem como o ângulo do sinal de tensão não apresentou comportamento já listado em seções anteriores, de modo que não atingiu a janela angular do plano complexo.

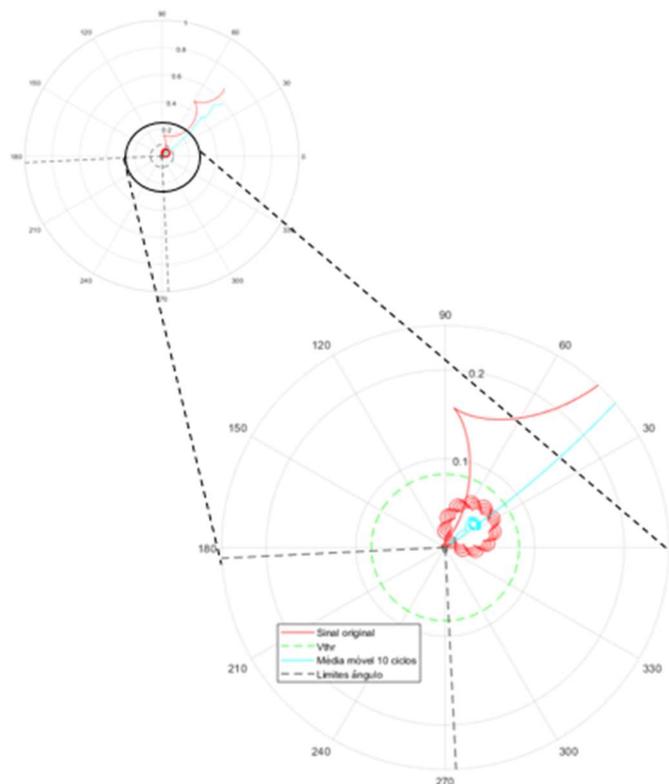
FIGURA 26 - RESULTADO ESTIMAÇÃO FASORIAL (SINAL 6 - 2015)



Fonte: Autoria Própria

Abaixo, na Figura 27, mostra-se o gráfico polar correspondente ao sinal de tensão mencionado, evidenciando que ambas as condições mínimas não foram atingidas durante a execução. Neste caso, uma manobra monopolar com tempo morto fixo (ex: 1 s) também apresentaria falha, visto que a duração do surto na fase analisada é maior do que o intervalo de tempo, ocasionando assim uma tentativa de religamento com a presença do arco secundário.

FIGURA 27 - GRÁFICO POLAR (SINAL 6 - 2015)



Fonte: Autoria Própria

5.3 MÉTODO 3 – REO

Para este método, de acordo com a taxa de amostragem do sinal analisado, realizou-se um ajuste no *script* de forma a adequar o critério de aceitação. Logo, os valores correspondentes ao intervalo do sinal são evidenciados a seguir.

- 15360 Hz → 64 pontos consecutivos
- 4000 Hz → ≈ 16 pontos consecutivos
- 1920 Hz → 8 pontos consecutivos
- 960 Hz → 4 pontos consecutivos

Tal observação é importante, pois visa manter a proporcionalidade do que é exposto pelos autores, que aplicam um critério com 10 pontos consecutivos, para um período de 40 amostras.

Desta forma, os resultados encontram-se listados na Tabela 9 a seguir.

TABELA 9 – RESULTADOS REO

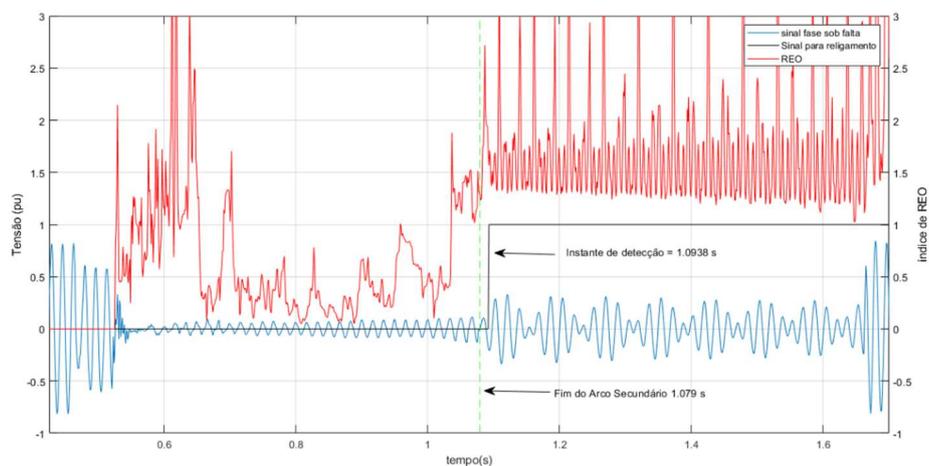
Sinal	Amostras/ciclo	Detecção correta	Detecção incorreta	Falha na detecção	Instante de Detecção (s)	Fim do Arco (s)	Atraso (ms)
1	256	✓			1,0953		16,3
	32	✓			1,0953	1,0790	16,3
	16	✓			1,0938		14,8
2	256		✓		0,3418		-
	32		✓		0,3422	0,3804	-
	16		✓		0,3427		-
3	66		✓		0,5520		-
	32		✓		0,5520	1,6800	-
	16		✓		0,5510		-
4	66	✓			1,1300		25,0
	32	✓			1,1300	1,1050	25,0
	16	✓			1,1210		15,0
5	256		✓		0,3493		-
	32		✓		0,3500	0,3613	-
	16		✓		0,3500		-
6	256		✓		0,1125		-
	32		✓		0,1130	1,2910	-
	16		✓		0,1135		-
7	256		✓		1,0719		-
	32		✓		1,0724	1,1190	-
	16		✓		1,0729		-
8	256		✓		1,0803		-
	32		✓		1,0807	1,1200	-
	16		✓		1,0813		-

Fonte: Autoria Própria.

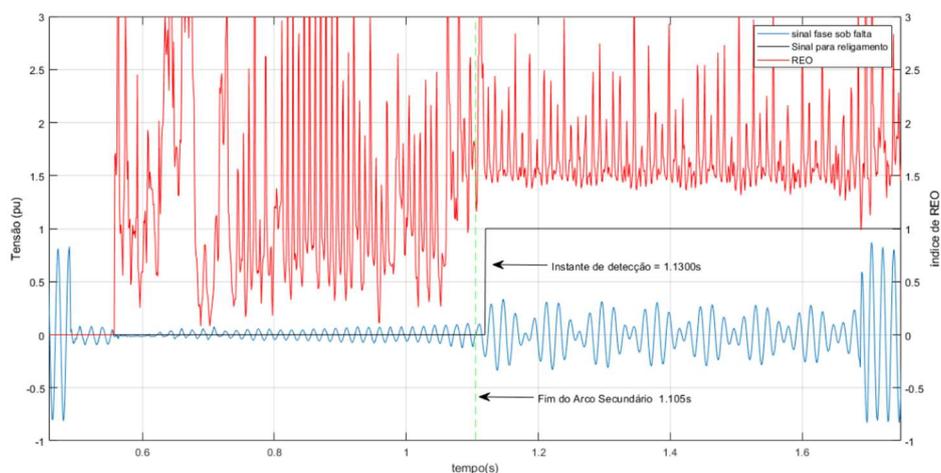
Nota-se que o método apresentou resultado positivo somente para 2 sinais, com valor de atraso consideravelmente pequeno (máximo de 25 ms, valor abaixo de 2 ciclos à 60Hz). Nestes casos, mostrados nas Figura 28a e Figura 28b, é possível verificar uma similaridade entre o comportamento dos sinais, onde o arco secundário é estabelecido e

mantido durante um intervalo de tempo (0.553 e 0.546s, respectivamente), permitindo ao índice distinguir de forma mais clara o momento correto da detecção.

Figura 28 – Resultados REO (a) sinal 1 – 16 amostras (b) sinal 4 – 66 amostras



(a)



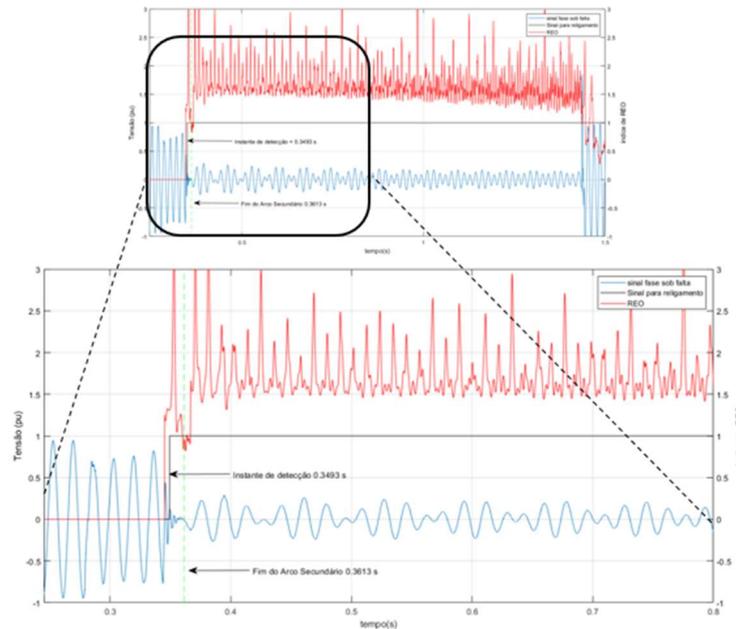
(b)

Fonte: Autoria própria

Em alguns dos casos, o comportamento gráfico do índice foi condizente com o esperado, porém, o critério de aceitação adotado, definindo-se uma quantidade de pontos para cada valor de amostragem, não se mostrou eficaz. Isso acarreta algumas das detecções incorretas apresentadas na tabela anterior, visto que, momentos antes do surgimento da tensão de estabelecimento transitória, a quantidade limite de pontos consecutivos do algoritmo é alcançada, provocando resultados de tempo inferiores ao

mínimo aceitável (fim do arco secundário). A Figura 29 a seguir exemplifica um dos casos onde este fato ocorre.

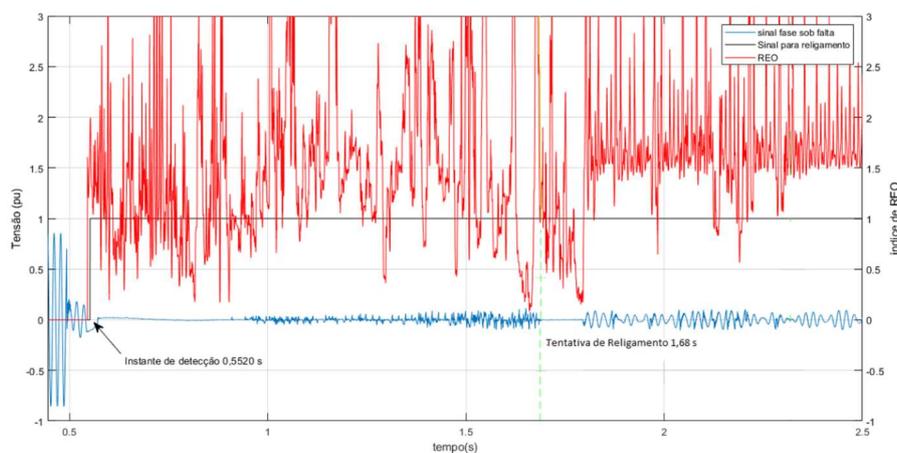
Figura 29 – Resultado REO (Sinal 5 – 2016)



Fonte: Autoria Própria

Por fim, em dois casos específicos (sinais 3 e 6, respectivamente), nos quais o tempo de permanência do arco secundário excede o *dead time*, o algoritmo identificou o momento de religamento muito antes do fim do arco estabelecido, comportamento que permitiria o religamento dos disjuntores de forma equivocada, conforme pode ser visto na Figura 30.

Figura 30 – Resultado REO (Sinal 3 – 2016)



Fonte: Autoria Própria

5.4 ANÁLISE COMPARATIVA

Dentre as 96 combinações avaliadas, os casos onde a identificação ocorreu de forma correta correspondem a 50% do total, as detecções consideradas incorretas 30.12% e as falhas dos algoritmos 19,88%.

Tendo em vista o objetivo comum de todos os métodos apresentados, que é a otimização do *dead time* para permitir a recuperação do sistema no menor intervalo de tempo possível, faz sentido definir os tópicos a seguir, de forma que eles possam ser comparáveis, com as taxas de amostragens sugeridas.

- Tempo de resposta
- Taxa de acerto

5.4.1 TEMPO DE RESPOSTA

Em relação ao tempo correspondente a diferença entre o sinal de controle gerado pelo algoritmo e o fim do arco secundário previamente definido para os dados, nota-se que na média das detecções o algoritmo representado pelo índice REO apresenta os menores valores de atraso, com cerca de 66% de suas medições corretas abaixo de 1 ciclo à 60 Hz. Além disso, entre as 6 medições corretas, o atraso identificado diminuiu ao passo que a amostragem foi menor, comportamento contrário aos demais métodos. Esta constatação não significa que o método tem um funcionamento melhor que os demais, visto que, apesar da detecção com um tempo considerado baixo, não foi possível detectar a maioria dos sinais ao qual foi submetido.

Logo em seguida, tem-se o algoritmo de Guzmán *et al.* (2002), com média de 45.44 ms, em seus 50% de aproveitamento. Nesta implementação, é possível verificar uma consistência nos tempos de resposta, não existindo, majoritariamente, valores muito discrepantes da média. A alteração da taxa de amostragem do sinal, na maioria dos casos, apresentou uma variação de 3 ms, tendo uma exceção no sinal 4, onde a diminuição da taxa de 4000 Hz para valores inferiores ocasionou aumento de 46.3 ms na resposta, ainda assim, não afetou a eficácia do método.

Posteriormente, verifica-se que o método de estimação fasorial (2015) obteve 125,35 ms como média. É importante perceber que, neste caso, os valores encontrados

para a maioria dos sinais onde ocorreram acertos apresentaram tempos próximos a média, não ocorrendo grandes discrepâncias. A mudança na taxa de amostragem correspondeu a inserção ao aumento do tempo de detecção, contudo, em nenhum dos casos comprometeu a eficácia do método.

Por fim, encontra-se o método do Fator Harmônico, com média de 133,78 ms, onde os valores encontrados possuem faixa de variação de 42,5 ms à 254,0 ms, apresentando o maior desvio padrão dentre os métodos avaliados.

A Tabela 10 a seguir apresenta os valores para cada um dos métodos, em relação à média dos atrasos, bem como os valores máximos e mínimos obtidos.

Tabela 10 – Média das detecções

Método	Dados		
	Média (ms)	Máximo (ms)	Mínimo(ms)
<i>REO</i>	18,73	25,00	14,80
<i>[2002]</i>	45,44	78,30	28,90
<i>[2015]</i>	125,35	175,2	100,60
<i>FH</i>	133,78	254,0	42,50

Fonte: Autoria Própria

Pelo fato da média não ser um dado suficiente para entender os valores encontrados, já que ela nem sempre corresponde fielmente ao vetor de dados, em casos com valores muito distantes, a Tabela 11 abaixo demonstra o desvio padrão obtido pela aplicação de cada um dos métodos, de forma a indicar a dispersão do conjunto de respostas.

Tabela 11 – Desvio padrão das detecções

Método	Desvio Padrão (ms)
<i>REO</i>	4,89
<i>[2002]</i>	16,39
<i>[2015]</i>	20,24
<i>FH</i>	73,16

Fonte: Autoria Própria

5.4.2 TAXA DE ACERTO

Ao avaliar a quantidade de casos corretos detectados, têm-se que o método de estimação fasorial apresentado em Nagpal *et al.* (2015) foi o mais efetivo, com 75% de acerto, indicando o religamento monofásico após a extinção do arco secundário.

Na sequência, encontra-se o algoritmo de estimação fasorial de Guzmán *et al.* (2002) com 50% dos casos de sucesso, sendo estes em situações de arcos com curta duração (a exemplo dos sinais 7 e 8) e arcos com maior tempo de permanência (sinais 1 e 4), mostrando versatilidade do algoritmo.

Posteriormente, têm-se o fator harmônico, também sinalizando o religamento correto em 50% dos dados ao qual foi submetido. Os dados nos quais o método apresentou melhor funcionamento correspondem aos sinais em que o arco secundário permaneceu existente por tempos reduzidos, conforme sinais 2, 5, 7 e 8.

Por fim, o método REO foi efetivo em 25% dos casos avaliados, tal número é decorrente do critério de aceitação adotado (número de amostras de REO > 1), no qual o índice, com algumas ressalvas, atingiu o instante de detecção pouco antes do esperado, apesar de graficamente apresentar comportamento condizente. Tal fato ocorreu em 12 testes distintos do algoritmo. Desta forma, uma das maneiras de obter resultados corretos consistiria no aumento do intervalo no qual o índice deva ser maior que o valor 1.

Importante salientar que, nenhum dos métodos conseguiu sinalizar, de forma satisfatória, o sinal correspondente à tentativa de religamento monopolar com posterior manobra tripolar, presente no caso 3 analisado.

A Tabela 12 a seguir sintetiza as informações apresentadas acima.

Tabela 12 – Taxa de acerto Métodos

Método	Taxa de Acerto (%)
<i>REO</i>	25,00
<i>[2002]</i>	50,00
<i>[2015]</i>	75,00
<i>FH</i>	50,00

Fonte: Autoria Própria

Portanto, considerando-se uma análise dos parâmetros, apesar de apresentarem um tempo de resposta maior que os demais, têm-se que os melhores resultados foram obtidos pelos métodos de estimação fasorial de Nagpal *et al.* (2015) e o método

apresentado em Guzmán *et al.* (2002), devido à maior taxa de acerto encontrada. Conforme já citado, o tempo decorrido para que os algoritmos apresentem resultado positivo para detecção é importante em termos de otimização e poderia ser utilizado como desempate caso os métodos apresentassem quantidade de acertos iguais, conforme ocorrido entre dois dos métodos. Desta forma, observando os demais parâmetros, como tempo levado para detecção e desvio padrão dos resultados obtidos, notou-se uma vantagem para o método de religamento apresentado em Guzmán *et al.* (2012), quando comparado ao método do Fator Harmônico. Por fim, define-se o método de Nagpal *et al.* (2015), como sendo o mais efetivo, dentre os cenários avaliados.

6 CONCLUSÃO

A aplicação de sistemas com proteção monopolar mostra-se, de forma geral, um método mais vantajoso em relação a manobra tripolar, visando assegurar a continuidade parcial de transferência de potência nos sistemas de transmissão durante surtos monofásicos, evitando o acréscimo de estresse proveniente de chaveamentos e perda de estabilidade. A necessidade de tornar o método adaptativo decorre do fato da busca pela otimização da aplicação, tornando os sistemas de proteção mais rápidos, robustos e capazes de realizar a diferenciação dos diversos cenários aos quais são submetidos, de forma a tomar a decisão adequada, ao contrário dos métodos monopulares tradicionais que possuem *dead time* fixo.

Inicialmente, neste trabalho foram realizadas simulações com o auxílio do *software ATPDraw*, de modo que os conceitos verificados na teoria fossem assimilados com o uso de um sistema parcialmente modelado. Tais simulações foram de suma importância para o entendimento acerca do funcionamento do esquema monopolar de religamento.

Desta forma, já com os métodos escolhidos, realizou-se a implementação, buscando manter as características apontadas pelos autores, entretanto, algumas alterações fizeram-se necessárias e foram explicitadas durante o texto. A necessidade da revisão dos diferentes tipos de técnicas utilizadas para implementação do conceito do religamento adaptativo trouxeram ao autor um diversificado e valioso conhecimento acerca do campo de estudo deste trabalho.

A análise do comportamento dos algoritmos demonstrou que certa dificuldade foi encontrada nas aplicações para sinais onde faltas de natureza permanente foram testadas, tal dificuldade pode ser proveniente dos limites de operação utilizados nas implementações que não foram atingidos. Este comportamento permitiria que o sistema estivesse com a presença de um surto permanente, até o momento em que a proteção tripolar fosse acionada.

Outro comportamento verificado, com consequências ainda mais graves, ocorreu nos casos em que o algoritmo detectou erroneamente a extinção do arco, sinalizando um religamento sob falta, o que acarreta novos disparos do sistema de proteção. Tal fato também é decorrente dos critérios de aceitação adotados e poderiam possivelmente, na

maioria dos casos onde a situação ocorreu, serem evitados com a aplicação de algum atraso ou média móvel.

Em contrapartida, muitos dos casos foram identificados corretamente pelos índices propostos, casos estes que permitiriam o restabelecimento da fase em um curto espaço de tempo após o término da falta, demonstrando a vantagem em relação a métodos de tempo fixo.

A escolha pelo uso de diversas taxas de amostragem se mostra plausível pelo fato de demonstrar que, quase na totalidade dos casos, o aumento dos intervalos de aquisição não afeta consideravelmente o algoritmo, entretanto, permitem a diminuição do custo computacional.

Para permitir a comparação acerca dos métodos, definiu-se os critérios tempo de resposta e taxa de acerto, encontrando-se dentre os analisados, o método de estimação fasorial [2015] como o mais eficiente.

Como melhorias em relação as implementações, pode-se citar a aplicação em sinais cujos parâmetros reativos da linha sejam conhecidos, o que permitiria a definição matemática da tensão de restabelecimento e a eliminação de algumas das aproximações realizadas no trabalho. Além disso, a modelagem computacional do arco secundário permitiria um entendimento prévio do fenômeno, antes da aplicação em dados reais.

Mediante todos os dados obtidos, notou-se que a aplicação do esquema de Religamento Monopolar Adaptativo é, de fato, uma abordagem adequada para tratar problemas relacionados a surtos monofásicos transitórios, permitindo a continuidade da transmissão, diminuindo o tempo de isolamento das fases e pode, em conjunto com esquemas fixos tradicionais, mapear as condições em que eventualmente não venha a funcionar.

7 REFERÊNCIAS

ANEEL. **Relatório de Análise de Desligamentos Forçados do Sistema de Transmissão**. Acesso em: 20 de fev. 2020. Disponível em: <www.aneel.gov.br>

BLUMSCHEIN, J. YELGIN, Y.; LUDWIG, A. Adaptive autoreclosure to increase system stability and reduce stress to circuit breakers, **70th Annual Conference for Protective Relay Engineers (CPRE)**, pp. 1-8, 2017.

DANTAS, K. M. C. **Chaveamento controlado aplicado ao religamento rápido de linhas de transmissão**. 2012. 177f. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Campina Grande – Paraíba Brasil, 2012.

DIAS, O.; TAVARES, M. C. Implementation and performance evaluation of a harmonic filter for use in adaptive single-phase reclosing, **IET Generation, Transmission & Distribution**, vol. 11, no. 9, pp. 2261-2268, jun, 2017.

GODOY, E. *et al.* Tutorial on Single-Pole Tripping and Reclosing. **39th Annual Western Protective Relay Conference**, oct, 2012.

GUZMÁN, A. *et al.* Transmission Line Protection System for Increasing Power System Requirements. **55th Annual Conference for Protective Relay Engineers**, apr, 2002.

JAMALI, S.; BAAYEH, A. G. Detection of secondary arc extinction for adaptive single phase auto-reclosing based on local voltage behaviour, **IET Generation, Transmission & Distribution**, vol. 11, no. 4, pp. 952-958, nov, 2017.

JAMALI, S.; PARHAM, A. New approach to adaptive single pole auto-reclosing of power transmission lines, **IET Generation, Transmission & Distribution**, vol. 4, no. 1, pp. 115-122, jan, 2010.

KHAN, W. A.; BI, T.; JIA, K. Fault Nature Identification Based on Local End Data for Single Phase Adaptive Autoreclosing Scheme, **2019 IEEE Sustainable Power and Energy Conference (iSPEC)**, pp. 641-646, 2019.

KIMBARK, EW. Charts of three quantities associated with single-pole switching, **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, vol. 94, no. 2, pp. 388-395, mar, 1975.

KIMBARK, EW. Bibliography on single-pole switching, **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, vol. 94, no. 3, pp. 1072-1076, May, 1975.

KIMBARK, EW. Selective-pole switching of long double-circuit EHV line, **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, vol. 95, no. 1, pp. 219-230, jan. 1976.

LUO, X; HUANG, C; JIANG, Y. Improved digital algorithm for adaptive reclosing for transmission lines with shunt reactors. **IET Generation, Transmission & Distribution**, vol. 10, no. 9, pp. 2066-2070, jun, 2016

MATTOS, L. M. N.; TAVARES, M. C.; MENDES, A. M. P. A New Fault Detection Method for Single-Phase Auto-Reclosing, **IEEE Transactions on Power Delivery**, vol. 14, no. 8, aug, 2015.

MONTANARI, A.A. *et al.* Secondary Arc Voltage and Current Harmonic Content for Field Tests Results. **IPST - International Conference on Power Systems Transients**, 2009.

MONTANARI, A. A. **Religamento Monopolar Adaptativo Rápido Baseado na Assinatura Harmônica da Tensão de Arco Secundário**. Dissertação de Mestrado - UNICAMP, Campinas, 2009.

NAGPAL, M. *et al.* Field Verification of Secondary Arc Extinction Logic. **IEEE Transactions on Power Delivery**, vol. 31, n. 4, pp. 1864-1872, aug, 2015.

RADOJEVIC, Z. M.; Shin, J. New Digital Algorithm for Adaptive Reclosing Based on the Calculation of the Faulted Phase Voltage Total Harmonic Distortion Factor, **IEEE Transactions on Power Delivery**, vol. 22, no. 1, pp. 37-41, jan. 2007.

Single phase tripping and auto reclosing of transmission lines - IEEE Committee Report, **IEEE Transactions on Power Delivery**, vol. 7, no. 1, pp. 182-192, jan. 1992.

TAVARES, M. C.; TALAISYS, J.; CAMARA, A. Voltage harmonic content of long artificially generated electrical arc in out-door experiment at 500 kV towers, **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, vol. 21, no. 3, pp. 1005-1014, june, 2014.

VAHIDI, B.; JANNATI, M.; HOSSEINIAN, S. H. A Novel Approach to Adaptive Single Phase Autoreclosure Scheme for EHV Power Transmission Lines Based on Learning Error Function of ADALINE. **Transactions of The Society for Modeling and Simulation International**, vol. 84, pp. 601-610, dec, 2008.

ZHALEFAR, F.; ZADEH, M.R.; SIDHU, T.S. A High-Speed Adaptive Single-Phase Reclosing Technique Based on Local Voltage Phasors. **IEEE Transactions on Power Delivery**, vol. 32, no. 3, pp. 1203-1211, jun, 2015.

ZEVALLOS, A. **Análise de sensibilidade da corrente de arco secundário para diferentes linhas de transmissão.** 154p. Dissertação de Mestrado – UNICAMP, Campinas, 2007.