

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"  
FACULDADE DE ENGENHARIA  
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA

**LUIS FELIPE BIANCO MONTEIRO DE CARVALHO**

**MÉTODO BASEADO NA SIMILARIDADE DE COSSENO PARA  
ATRIBUIÇÃO DA DIRECIONALIDADE DAS QUEDAS DE TENSÃO  
EM INSTALAÇÕES ELÉTRICAS INDUSTRIAIS**

Ilha Solteira  
2023

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**LUIS FELIPE BIANCO MONTEIRO DE CARVALHO**

**MÉTODO BASEADO NA SIMILARIDADE DE COSSENO PARA  
ATRIBUIÇÃO DA DIRECIONALIDADE DAS QUEDAS DE TENSÃO  
EM INSTALAÇÕES ELÉTRICAS INDUSTRIAIS**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – Unesp como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica

Prof. Dr. Fábio Bertequini Leão  
**Orientador**

Ilha Solteira  
2023

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

C331m Carvalho, Luis Felipe Bianco Monteiro de.  
Método baseado na similaridade de cosseno para atribuição da direcionalidade das quedas de tensão em instalações elétricas industriais / Luis Felipe Bianco Monteiro de Carvalho. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2023  
85 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Automação, 2023

Orientador: Fábio Bertequini Leão

Inclui bibliografia

1. VTCDs. 2. Qualidade da energia. 3. Queda de tensão. 4. Faltas.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Ilha Solteira

**CERTIFICADO DE APROVAÇÃO**

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Método baseado na similaridade de cosseno para atribuição da direcionalidade das quedas de tensão em instalações elétricas industriais

**AUTOR: LUÍS FELIPE BIANCO MONTEIRO DE CARVALHO**

**ORIENTADOR: FABIO BERTEQUINI LEÃO**

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em , área: Automação pela Comissão Examinadora:

*Fábio Bertequini Leão*

Prof. Dr. FABIO BERTEQUINI LEÃO (Participação Presencial)  
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP

*Dionizio Paschoarelli Junior*  
Prof. Dr. DIONIZIO PASCHOARELLI JUNIOR (Participação Presencial)  
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP

*Ricardo Fonseca Bezó*  
Dr. RICARDO FONSECA BEZO (Participação Virtual)  
Diretoria de Engenharia/ Gerência de Normas e Padrões / CPFL Energia - Campinas

Ilha Solteira, 29 de setembro de 2023

### **Impacto potencial desta pesquisa**

Essa pesquisa ressalta a importância de enfrentar as Variações de Tensão de Curta Duração (VTCDs). Ao identificar a direcionalidade das causas das variações momentâneas a dissertação contribui com impactos positivos no campo da qualidade da energia. Além disso, a proposta baseada na similaridade de cossenos promove a pesquisa contínua e o desenvolvimento de novas soluções no campo da qualidade de energia.

### **Potential impact of this research**

This research highlights the importance of addressing Short-Term Voltage Variations (VTCDs). By identifying the directionality of the causes of these momentary variations, the dissertation contributes to positive impacts in the power quality. Furthermore, the proposal based on cosine similarity promotes continuous research and development of new solutions for the power quality field of study.

## DEDICATÓRIA

Em homenagem ao meu querido irmão João Victor (*In Memoriam*) que sempre me acompanhou.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a minha família pelo amor, apoio e paciência incondicional.

A minha namorada pelo suporte durante toda a caminhada e por sempre acreditar em mim, mesmo quando eu não acreditava.

Agradeço ao professor Fábio pela orientação, ensinamentos, conselhos e paciência durante a confecção dessa dissertação.

Aos meus amigos, novos e velhos, por quem tenho grande estima e sempre me incentivaram a evoluir.

Agradeço a todas as pessoas que me acompanharam até aqui e estiveram sempre ao meu lado, me fazendo amadurecer como pessoa e como profissional.

“O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001”

“Without pain, without sacrifice, we would have nothing.” – Tyler Durden.

## RESUMO

As Variações de Tensão de Curta Duração (VTCDs) são variações momentâneas no fornecimento de energia elétrica que podem ter duração de um ciclo a três minutos e serem causadas por diversos fatores, tais como descargas atmosféricas, faltas no sistema elétrico, manobras de grandes cargas e operações de manutenção. Essas variações momentâneas de tensão elétrica podem causar danos em equipamentos eletrônicos sensíveis, como computadores, inversores e sistemas de telecomunicações, além de comprometer processos industriais e resultar em falhas ou danos permanentes. O método proposto nesta dissertação para lidar com as quedas de tensão (*sags*) utiliza a similaridade de cossenos para localizar a causa do distúrbio responsável por ela, seja ele uma falta ou um distúrbio decorrente de variações de grandes cargas. O cosseno do ângulo entre tensão e corrente é calculado na fase em que ocorre a queda de tensão, e o resultado desse cálculo indica o sentido do distúrbio no sistema, com o objetivo de atribuir responsabilidade à concessionária, a outros parques industriais adjacentes ou à indústria em questão. As simulações do método proposto são realizadas em uma instalação elétrica industrial trifásica, tendo sido simulados diversos tipos de faltas (monofásicas, bifásicas e trifásicas), além de partidas de motores e desconexões de grandes cargas. Os resultados obtidos demonstram a efetividade do método no apontamento da direcionalidade dos distúrbios, sendo útil para minimizar o impacto das VTCDs em sistemas elétricos e prevenir possíveis danos em equipamentos e processos industriais.

**Palavras-Chave:** VTCDs; qualidade da energia; queda de tensão; faltas.

## ABSTRACT

Short Duration Voltage Variations (SDVVs) are momentary variations in the supply of electricity that can last from one cycle to three minutes and are caused by several factors, such as atmospheric discharges, faults in the electrical system, large loads maneuvers and maintenance operations. These momentary variations in the electrical voltage can cause damage to sensitive electronic equipment such as computers, inverters and telecommunications systems, in addition to compromising industrial processes and resulting in failures or permanent damage. The proposed method to deal with voltage sags uses cosine similarity to locate the disturbance responsible for it, be it a fault or a disturbance occurred due to the variation of large loads. The cosine of the angle between voltage and current is calculated in the phase which the voltage drop occurs, and the result of this calculation indicates the direction of the disturbance in the system, with the aim of assigning responsibility to the concessionaire, to other adjacent industrial parks or to the company itself. The simulations of the proposed method were carried out in a three-phase electrical installation, simulating different types of faults (single-phase, two-phase and three-phase), as well as motor starts and large load disconnection. The results obtained demonstrate the effectiveness of the method in pinpointing the locating of the disturbances, being useful to minimize the impact of VTCDs on electrical systems and prevent possible damage to industrial equipment and processes.

**Keywords:** SDVVs; power quality; voltage sag; faults.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b>	– Sistema de monitoração única.....	19
<b>Figura 2</b>	– Curvas de deflexão de energia (DE) e potência (DP).....	20
<b>Figura 3</b>	– Circuito equivalente do método.....	22
<b>Figura 4</b>	– Sistema para análise de afundamento de tensão.....	23
<b>Figura 5</b>	– Sistema elétrico simplificado com duas fontes.....	26
<b>Figura 6</b>	– Diagrama elétrico com transformador.....	28
<b>Figura 7</b>	– Fasores das Componentes Simétricas.....	32
<b>Figura 8</b>	– Circuito equivalente do curto-circuito trifásico.....	33
<b>Figura 9</b>	– Circuito Equivalente de Falta Monofásica.....	34
<b>Figura 10</b>	– Circuito Equivalente de Falta Bifásica.....	35
<b>Figura 11</b>	– Circuito Equivalente de Falta Dupla Fase-Terra.....	37
<b>Figura 12</b>	– Sinais no tempo (a) e diagrama fasorial (b) de tensão e corrente..	40
<b>Figura 13</b>	– Sistema industrial ligado à rede elétrica.....	40
<b>Figura 14</b>	– Diagrama Fasorial em Condições Normais de Operação.....	42
<b>Figura 15</b>	– Diferença angular entre de $I_{a1}^{\cdot}$ e $V_{bc1}$ falta monofásica.....	43
<b>Figura 16</b>	- Diferença angular entre de $I_{b1}^{\cdot}$ e $V_{ca1}$ falta bifásica.....	44
<b>Figura 17</b>	- Diferença angular entre de $I_{b1}^{\cdot}$ e $V_{ca1}$ falta bifásica-terra.....	44
<b>Figura 18</b>	– Cenários de similaridade entre dois fasores.....	46
<b>Figura 19</b>	– Algoritmo do método proposto.....	49
<b>Figura 20</b>	– Instalação elétrica industrial conectada à rede.....	53
<b>Figura 21</b>	– Defasagem Angular $I_{a1}^{\cdot}$ e $V_{bc1}^{\cdot}$ faltas dentro da indústria.....	54
<b>Figura 22</b>	– Defasagem Angular $I_{a1}^{\cdot}$ e $V_{bc1}^{\cdot}$ faltas fora da indústria.....	55
<b>Figura 23</b>	– Sinal de Tensão Fase A amostrado antes e depois da filtragem..	56
<b>Figura 24</b>	– Sinal de Corrente Fase A amostrado antes e depois da filtragem.	56
<b>Figura 25</b>	- Sinal de Espectro harmônico antes e depois da filtragem.....	57
<b>Figura 26</b>	– Atenuação do filtro IIR Butterworth Passa Baixas.....	58
<b>Figura 27</b>	– Valores Eficazes de Tensão e Corrente de Fase A.....	59
<b>Figura 28</b>	– Valores Eficazes de Tensão e Corrente após janela móvel.....	59
<b>Figura 29</b>	– Falta Monofásica no barramento de motores da indústria.....	62
<b>Figura 30</b>	– Falta Bifásica no barramento de motores da indústria.....	63
<b>Figura 31</b>	– Falta Bifásica Terra no barramento de motores da indústria.....	64
<b>Figura 32</b>	– Falta Trifásica no barramento de motores da indústria.....	65

<b>Figura 33</b> – Falta monofásica no barramento de 13,8 kV.....	66
<b>Figure 34</b> – Falta Bifásica no barramento de 13,8 kV.....	67
<b>Figura 35</b> – Falta Bifásica-Terra barramento de 13,8 kV.....	68
<b>Figura 36</b> – Falta Trifásica barramento 13,8 kV.....	69
<b>Figura 37</b> – Falta Monofásica no barramento da subestação de 138 kV.....	70
<b>Figura 38</b> – Falta Bifásica no barramento da subestação de 138 kV.....	71
<b>Figura 39</b> – Falta Bifásica-Terra no barramento da subestação 138 kV.....	72
<b>Figura 40</b> – Falta Trifásica barramento da subestação 138 kV.....	73
<b>Figura 41</b> – Partida de motores internos.....	74
<b>Figura 42</b> – Partida de parque industrial externo.....	75
<b>Figura 43</b> – Afundamento Momentâneo de Tensão.....	76
<b>Figura 44</b> – Afundamento Momentâneo de Tensão menor que um ciclo.....	77
<b>Figura 45</b> – Falta monofásica no barramento de motores com geração eólica.	78
<b>Figura 46</b> – Variação de CS para diferentes resistências de falta a 10 Km.....	79
<b>Figura 47</b> – Variação do CS para diferentes resistências de falta a 20 Km.....	80
<b>Figura 48</b> – Curva CS versus Resistência de Falta.....	81

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> – Resultados para exemplo de falta aplicada na figura 5.....	26
<b>Tabela 2</b> – Cargas da instalação simulada.....	51
<b>Tabela 3</b> – Cabeamento do Sistema.....	51
<b>Tabela 4</b> – Equipamentos de Distribuição.....	52
<b>Tabela 5</b> – Configuração da Geração Distribuída Fotovoltaica (GDF).....	52
<b>Tabela 6</b> – Configuração da Geração Distribuída Eólica (GDE).....	52
<b>Tabela 7</b> – Tabela de resultados para distúrbios simulados.....	60
<b>Tabela 8</b> – Variação de Resistência de Falta e Sensibilidade a 10 Km.....	80
<b>Tabela 9</b> – Variação de Resistência de Falta e Sensibilidade a 20 Km.....	81

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	15
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	18
2.1	Método baseado na perturbação de potência e energia.....	19
2.2	Método baseado em sinal de resistência.....	21
2.3	Método baseado na Componente Real da Corrente (RCC) .....	23
2.4	Método baseado em relé de distância.....	25
2.5	Método baseado em magnitudes e fase de tensão.....	27
2.6	Motivação e justificativa da dissertação.....	28
<b>3</b>	<b>COMPONENTES SIMÉTRICAS DE FORTESCUE</b> .....	31
3.1	Falta Trifásica.....	32
3.2	Falta Monofásica Fase-Terra.....	33
3.3	Falta Bifásica Fase-Fase.....	35
3.4	Falta Bifásica Dupla-Fase-Terra.....	36
<b>4</b>	<b>INTRODUÇÃO DA SIMILARIDADE DE COSSENO</b> .....	38
4.1	Tensão e corrente em regime permanente.....	39
4.2	Conceito de similaridade fasorial.....	40
4.3	Investigação do CS durante quedas de tensão.....	42
4.4	Similaridade de cosseno.....	45
4.5	Aquisição, filtragem e tratamento de dados.....	47
4.6	Fluxograma do Método.....	48
<b>5</b>	<b>TESTES E RESULTADOS</b> .....	50
5.1	Dados do sistema em teste.....	51
5.2	Validação da Similaridade de Cosseno (CS).....	54
5.3	Resultados obtidos para casos simulados.....	56
5.4	Discussão dos resultados.....	82
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	84
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	86

## 1 INTRODUÇÃO

Certificar-se de que a qualidade da energia elétrica está dentro dos parâmetros normativos é essencial para garantir a eficiência e operação adequada dos equipamentos elétricos em ambientes industriais. As variações de tensão, por exemplo, podem causar irregularidades na operação desses equipamentos, causando problemas como a interrupção de processos produtivos, danos ao maquinário, manutenção indevida e recorrente e falhas em sistemas críticos.

Para garantir a entrega de energia elétrica de qualidade, são necessárias medidas de inspeção que permitam a verificação constante do sistema elétrico. Além disso, a implementação de tecnologias avançadas para proteção contra distúrbios que podem afetar o produto é uma solução eficaz para garantir a proteção e a interrupção do suprimento de energia elétrica.

No âmbito da qualidade da energia elétrica, as variações de tensão de curta duração (VTCDs) são problemas críticos e recorrentes. As VTCDs podem ser divididas em três categorias: quedas de tensão (sags), interrupção de tensão e aumentos de tensão (swells) (ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. PRODIST, Módulo 8 – Revisão 8. 2017). O objeto de estudo consiste nas quedas de tensão, comumente referidas como 'sags' na literatura.

As quedas de tensão são perturbações no sistema elétrico que duram entre meio ciclo e um minuto, segundo a norma 1564 do IEEE, com uma redução de valor eficaz na faixa de 10% e 90% (IEEE Std 1564. 2014), e são causadas por uma variação na impedância do sistema elétrico. Essas variações podem ocorrer em todos os níveis do sistema elétrico, incluindo geração, transmissão e distribuição de energia elétrica.

As quedas de tensão ocorrem principalmente devido a faltas no sistema elétrico, especialmente aquelas assimétricas, ou variações de grandes cargas (Leão, Ruth Pastôra Saraiva et al. 2014). Essa perturbação elétrica pode afetar significativamente cargas sensíveis e críticas, além de causar problemas nos sistemas de controle, inversores de frequência e dispositivos eletrônicos (Oliveira, T.C.D., et al. 2009).

As disputas judiciais relacionadas a danos a equipamentos, perdas econômicas e multas financeiras têm motivado a busca por métodos eficazes de detecção e identificação dos distúrbios, com o objetivo de responsabilizar os agentes envolvidos e, conseqüentemente, mitigar os eventos associados à baixa qualidade da energia elétrica.

Essa crescente preocupação é justificável, uma vez que seu fornecimento inadequado pode deteriorar o desempenho satisfatório de equipamentos e afetar negativamente variados processos industriais. Por conseguinte, é fundamental desenvolver novas tecnologias que permitam a detecção imediata de distúrbios, permitindo a correção diligente e precisa das perturbações.

A monitoração do sistema elétrico é uma abordagem fundamental para coordenar e avaliar a qualidade da energia elétrica. O monitoramento constante em pontos importantes da rede elétrica permite visualizar eventuais perturbações e interrupções no abastecimento de energia, possibilitando uma resposta rápida e eficaz para mitigar os problemas decorrentes. Além disso, o monitoramento ordenado possibilita a detecção de possíveis defeitos no sistema, permitindo a utilização de medidas de precaução para garantir a prudência e a credibilidade do fornecimento de energia elétrica.

O método de monitoração única da qualidade de energia é uma metodologia que está baseada na aquisição de dados em um único ponto do sistema elétrico, com o objetivo de avaliar a qualidade do produto a ser entregue naquele ponto. Esta aproximação é útil para detectar problemas específicos no ponto a ser medido, como a existência de distorções harmônicas, variações no nível nominal de tensão ou corrente e desequilíbrio de fases e criticalidade da variação de tensão. Para isso, são utilizados equipamentos de medição, como analisadores de qualidade de energia, osciloscópios e multímetros.

Já a monitoração múltipla de qualidade da energia envolve a instalação de componentes de medição em vários pontos do sistema elétrico, permitindo aferir a qualidade do produto em diferentes localizações e entender melhor a dinâmica do sistema. Esta análise é utilizada para identificar condições mais específicas em cada medidor e avaliar a influência em relação a outros pontos. Com a monitoração múltipla, é possível fazer a aquisição de dados em tempo real ou ao longo de um período. Além disso, é importante utilizar gerenciadores de dados para reunir, processar e visualizar as informações coletadas em vários pontos medidos durante a monitoração.

Propõe-se, no presente trabalho, a utilização da ferramenta de similaridade de cosseno aplicada a uma metodologia de monitoração única da qualidade da energia a partir da análise de tensões e correntes, com o objetivo de identificar o sentido do distúrbio responsável pela ocorrência da queda de tensão em sistemas elétricos industriais (Saadat, Amin, et al. 2022). Trata-se de uma abordagem com menor complexidade e eficiente para solucionar este problema recorrente em sistemas elétricos, que tem impacto direto na operação de equipamentos e processos industriais, bem como na qualidade da energia elétrica fornecida aos consumidores.

O cálculo de similaridade de cosseno é constantemente utilizado como grandeza de similaridade entre dois vetores em variados campos de estudo, tais como processamento neural, análise de dados e recomendação de conteúdo. Essa técnica é baseada em calcular o cosseno do ângulo entre dois vetores, comparando os elementos que esses vetores carregam. A utilização da similaridade de cosseno é útil na determinação do grau de semelhança entre os vetores, em que o resultado 1 indica completa identidade e o resultado 0 indica completa diferença (Saadat, Amin, et al. 2022).

O objetivo dessa dissertação compreende apresentar os importantes métodos existentes na literatura para detecção de quedas de tensão e, em seguida, descrever a metodologia e os resultados de simulações do método de similaridade de cosseno para esse tipo de problema em parques industriais conectados ao sistema elétrico, levando em consideração a presença de geração distribuída na instalação.

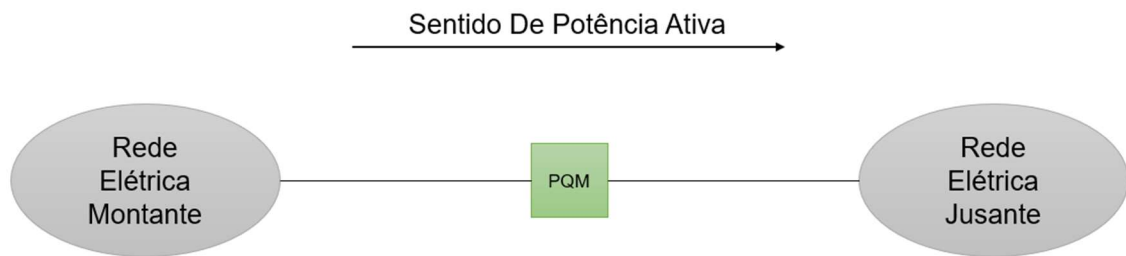
## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O propósito desta seção consiste em revisar, de maneira sucinta, os métodos de indicação de direcionalidade das fontes causadoras de quedas de tensão disponíveis na literatura, no âmbito da monitoração única de qualidade de energia. Esta abordagem se revela de suma importância para garantir a integridade e confiabilidade do sistema elétrico. Assim, a revisão sistemática da literatura torna-se um procedimento substancial para exibir os métodos mais adequados ao apontamento da direcionalidade da origem das quedas de tensão em cada circunstância e, conseqüentemente, para melhorar a qualidade de energia do sistema elétrico.

A monitoração única tem como propósito identificar se a fonte da queda de tensão está localizada a montante ou a jusante do medidor de qualidade de energia, também denominado como Power Quality Monitor (PQM) (Kazemi, Asadollah, et al. 2013). Essa abordagem é bastante interessante para aplicação em parques industriais que necessitam monitorar a qualidade de energia no ponto de acoplamento comum com o sistema de distribuição e identificar se o distúrbio é interno ou externo ao parque fabril. Por sua vez, os métodos de monitoramento múltiplo utilizam informações coletadas por meio de diversos medidores distribuídos estrategicamente na rede elétrica, possibilitando a localização precisa da origem da queda de tensão sendo mais indicados para o monitoramento da rede de distribuição (Kazemi, Asadollah, Azah Mohamed, and Hussain Shareef. 2011). Nesse sentido, a aplicação dessas metodologias viabiliza a identificação precisa das causas das quedas de tensão, possibilitando a adoção de medidas corretivas que visem minimizar as implicações adversas sobre o fornecimento de energia elétrica.

No âmbito dos sistemas de monitoração única, o medidor assume o papel de referência para indicar se a fonte da queda de tensão está localizada a montante ou a jusante do ponto de medição conforme indicado na Figura 1. De acordo com a literatura, a rede elétrica a montante pode ser entendida como o sistema que fornece potência em condições normais de operação, ao passo que a rede elétrica a jusante é o sistema consumidor que consome potência (Tayjasant, T et al. 2005).

Figura 1 – Sistema de monitoração única



Fonte: Adaptado de Kazemi, Asadollah, et al. 2013

## 2.1 Métodos baseados na perturbação de potência e energia

Parsons et al (2000). propõem um método para determinar a direção da origem de perturbações de qualidade de energia em sistemas elétricos de potência. A técnica proposta utiliza medições de energia e potência em diferentes pontos do sistema elétrico para calcular a quantidade de energia e potência das perturbações em cada ponto.

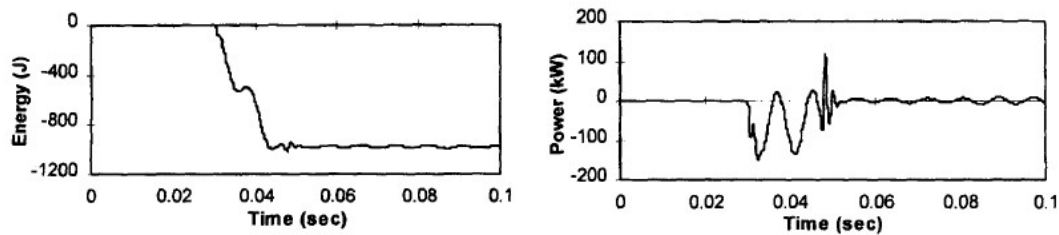
Os autores utilizam algoritmos de processamento de sinais, que permitem analisar as diferenças nas medições de energia e potência em diferentes pontos do sistema elétrico. Essas diferenças podem ser usadas para determinar a direção da perturbação.

O método visa realizar uma análise da variação de potência e energia do sistema antes e durante o período em que ocorre queda de tensão. Durante o regime permanente, a potência instantânea apresenta um valor estável. No entanto, quando há um evento de perturbação, o sistema deixa o regime permanente, causando uma flutuação no fluxo de potência instantânea (Parsons et al. 2000).

A diferença entre a potência instantânea em regime permanente e em regime transitório é definida como "Potência de Distúrbio" (PD). A integral da potência de distúrbio é denominada "Energia de Distúrbio" (ED).

Devido ao fato de que a energia tende a fluir para a fonte do distúrbio, há uma direção que parte do PQM (Parsons et al. 2000) e essa movimentação fica registrada nos medidores como mostra a Figura 2.

Figura 2 – Curvas de deflexão de energia (DE) e potência (DP)



Fonte: Adaptado de Parsons *et al.* 2000.

O método de perturbação de potência e energia é uma técnica utilizada para identificar a direção da fonte causadora da queda de tensão durante um distúrbio elétrico. Essa identificação é realizada através da análise do primeiro pico de deflexão da Energia e da Potência (DE e DP), mostrados na Figura 2, no instante aproximado de 0,03 segundos.

A confiabilidade do resultado pode ser avaliada com base na consistência das deflexões gráficas observadas. Além disso, a avaliação da confiabilidade do resultado obtido é um aspecto relevante do método, uma vez que permite verificar a consistência das deflexões gráficas e, conseqüentemente, a robustez da identificação da fonte causadora do distúrbio.

Caso o valor final da Energia de Distúrbio (DE) seja igual ou superior a 80% do valor nominal máximo, o teste de energia é considerado conclusivo, indicando que a direção da perturbação é a mesma que a polaridade do valor final da curva de deflexão de energia (Parsons *et al.* 2000). Caso a polaridade da deflexão de potência (DP) coincida com a polaridade da deflexão de energia, durante o início do distúrbio, há alto grau de confiança na indicação da direção da perturbação. Entretanto, se as polaridades não coincidirem, ou seja, uma negativa e outra positiva, a direção indicada pela deflexão de energia é considerada, mas com menor grau de confiança (Parsons *et al.* 2000).

Se o valor final da curva de deflexão de energia (DE) for inferior a 80%, o teste de energia é tido como inconclusivo, e a direção da perturbação é determinada pela análise da polaridade do pico inicial de deflexão de potência (DP) (Parsons *et al.* 2000).

Apesar dos autores indicarem que o método também funciona para variações de grandes cargas como partidas de motores e para outros tipos de distúrbios não há evidência presente nesse método apresentado por eles.

## 2.2 Métodos baseados em sinal de resistência

O método apresentado baseia-se na análise da impedância durante um distúrbio elétrico e seu comportamento durante esse distúrbio. Em eventos de falta que originam quedas de tensão, a corrente elétrica tende a aumentar próximo a falta, devido a mudança repentina na impedância do sistema. Entretanto, em locais mais distantes da fonte, a corrente elétrica não sofre variação significativa, mantendo a impedância inalterada (Tayjasanant, T et al. 2005).

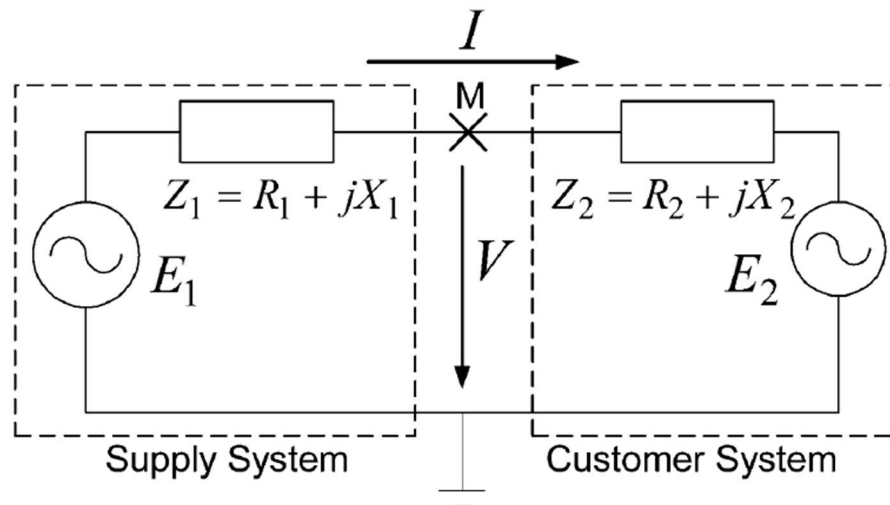
O sinal da parte real da impedância é utilizado (conhecido como "resistance sign") para indicar o sentido do distúrbio responsável pelo afundamento de tensão. Esse sinal é calculado a partir da diferença entre os valores de tensão antes e durante o evento de perturbação, que são adquiridos pelos sensores operantes. Uma vez que o resistance sign é calculado, o método utiliza um algoritmo de localização para determinar a posição da fonte do afundamento de tensão (Tayjasanant, T et al. 2005).

Durante o regime permanente, o sistema elétrico apresenta valores constantes de tensão e corrente elétrica, indicando um estado de regime, onde  $E_1$  e  $Z_1$  representam a tensão do sistema de distribuição a jusante e a impedância do sistema, respectivamente (1). No entanto, durante uma falta (curto-circuito), há uma variação nos valores dessas grandezas elétricas, uma vez que a corrente de curto-circuito flui para o sentido da falta e pode causar distúrbios nas grandezas elétricas do sistema (2).

$$\dot{V} = \dot{E}_1 - \dot{I}Z_1 \quad (1)$$

$$\dot{V} + \Delta\dot{V} = \dot{E}_1 - (\dot{I} + \Delta\dot{I})Z_1 \quad (2)$$

Figura 3 – Circuito equivalente do método



Fonte: Adaptado de Tayjasanant, *et al.* (2005).

Supondo uma falta do lado jusante (Consumidor) e subtraindo a equação 1 e 2, tem-se a impedância vista do lado montante (Fornecedor):

$$Z_1 = -\frac{\Delta \dot{V}}{\Delta \dot{I}} \quad (3)$$

De forma análoga, supondo uma falta do lado montante (*Supply*), tem-se a impedância do lado jusante (*Customer*) e podemos descrevê-la por:

$$Z_2 = \frac{\Delta \dot{V}}{\Delta \dot{I}} \quad (4)$$

A variável  $Z$  possui um significado físico importante em sistemas elétricos de potência. Ela representa a impedância equivalente do lado não perturbado. Se ocorrer uma perturbação no lado da fonte de alimentação,  $Z$  representa a impedância do lado jusante (*Customer*). Por outro lado, se a perturbação ocorrer no lado jusante,  $Z$  será a impedância da fonte de alimentação (*Supply*) sendo um valor negativo. É importante ressaltar que a resistência sempre deve ser positiva. Dessa forma, é possível determinar a direção da fonte da queda de tensão ao verificar o sinal da parte real da impedância  $Z$  (Tayjasanant, T et al. 2005).

Para a verificação do sentido do distúrbio, são apresentadas as inequações abaixo que sintetizam a ideia apresentada acima.

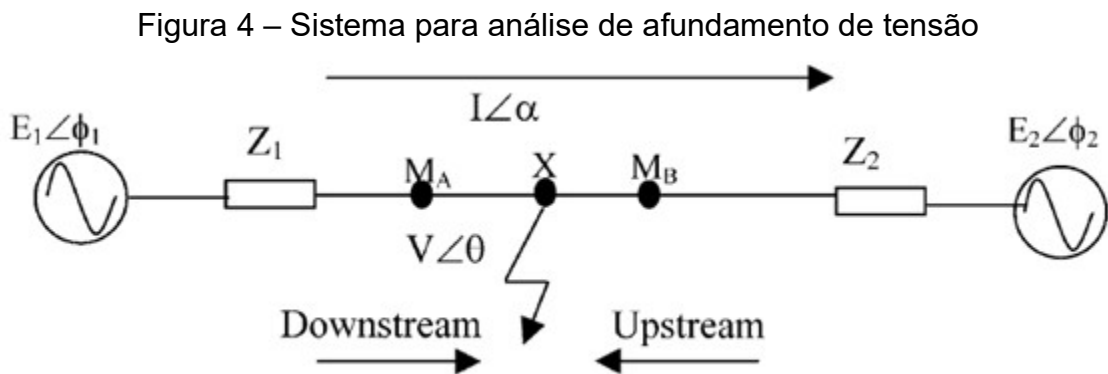
Se  $Real(Z) > 0$ , a fonte causadora está à montante do PQM.

Se  $Real(Z) < 0$ , a fonte causadora está à jusante do PQM.

Embora o método mencionado apresente um fundamento teórico coerente e resultados concretos, é importante destacar que ele pode se mostrar inconsistente quando o ciclo escolhido para aquisição dos dados durante o distúrbio estiver muito distante ou muito próximo do ciclo de pré-distúrbio, fazendo-se necessário um ajuste fino e custoso na seleção desses ciclos (Tayjasanant, T et al. 2005).

### 2.3 Métodos baseados na Componente Real da Corrente (RCC)

O método da componente real da corrente baseia-se na análise das componentes elétricas antes e durante as condições de perturbação do sistema elétrico. Para isso, o método utiliza sensores de corrente ao longo da rede elétrica para medir as magnitudes de corrente e os ângulos de fase. A partir desses dados, é possível realizar um cálculo matemático e uma análise gráfica para determinar o sentido da perturbação que está causando a queda de tensão no sistema.



Fonte: Adaptado de Hamzah, N. et al. 2004.

O cálculo matemático é representado pelas equações a seguir, e o modelo de decisão é utilizado para indicar o sentido da perturbação de acordo com a metodologia descrita acima (Hamzah, N. et al. 2004).

Considerando uma falta em  $X$  no circuito da Figura 4, a partir da segunda lei de Kirchoff, a tensão no ponto  $M_a$  será:

$$\dot{V} = \dot{E}_1 - \dot{I}Z_1 \quad (5)$$

Multiplicando ambos os lados por  $I^*$ , temos:

$$\dot{V}I^* = \dot{E}_1I^* - I^2Z_1 \quad (6)$$

Extraindo a parte real da equação (6):

$$VI \cos (\theta - \alpha) = E_1I \cos (\theta - \alpha) - I^2R \quad (7)$$

Onde  $\theta$  e  $\alpha$  são os ângulos de fase da tensão e da corrente, respectivamente e  $(\theta - \alpha)$  o ângulo do fator de potência no ponto de monitoramento.

A partir de (7), para o caso de um monitoramento antes da falta,  $M_a$ , a corrente que flui de  $E_1$  para X é dada por:

$$I \cos (\theta - \alpha) > 0 \quad (8)$$

A falta é apontada a jusante do ponto de medição e a corrente de falta está no mesmo sentido da corrente de pré-falta.

Caso o ponto de monitoramento seja  $M_b$ , a corrente que flui é dada por:

$$I \cos (\theta - \alpha) < 0 \quad (9)$$

A falta é apontada a montante do ponto de medição porque a corrente alimenta a falta e é vista circulando no sentido reverso.

O processo para o método de Hamzah, N. et al (2004) é feito da seguinte maneira: após a simulação das condições de distúrbio, são obtidas as magnitudes de tensão e corrente, bem como seus ângulos de fase, tanto antes quanto durante o evento. A partir desses dados, é realizado o cálculo das equações (5), (6) e (7), que representa a componente real da corrente, para alguns ciclos consecutivos, considerando uma janela de aquisição que engloba tanto o período anterior ao distúrbio quanto o retorno subsequente ao regime permanente. Tal procedimento permite a obtenção de um gráfico que evidencia a variação temporal da curva  $I \cos (\theta - \alpha)$  a partir da análise das equações (8) e (9).

De acordo com o método proposto, se o resultado do produto da corrente pelo cosseno da diferença entre as fases, ou seja, da componente real da corrente for medido no início do evento, for positivo, é possível inferir que a fonte do distúrbio está localizada a jusante do sensor de qualidade. Por outro lado, se o resultado for negativo, é indicativo de que a fonte do distúrbio está a montante (Hamzah, N. et al. 2004).

Embora o método tenha demonstrado consistentes resultados em diferentes cenários e simplicidade de implementação, o autor não apresentou resultados para o caso de partida de grandes máquinas indutivas, que podem ser responsáveis por quedas de tensão caso não seja utilizado um método de partida adequado (GED 10099, 2020). Além disso, não foram apresentados resultados para casos em que há variação de impedâncias de falta, o que torna impossível avaliar a robustez do método para diferentes impedâncias de falta e a confiabilidade e precisão do método em outros cenários que diferem do apresentado.

## 2.4 Métodos baseados em relé de distância

Nos sistemas de transmissão elétrica, as linhas de transmissão são protegidas por meio de relés de distância, os quais são responsáveis por ativar as proteções necessárias. Esses dispositivos monitoram a tensão e a corrente elétrica presentes na linha, e calculam a impedância equivalente no ponto de instalação do relé. Cabe ressaltar que a impedância medida pelo relé pode variar em função de diversos fatores, como o tipo de sistema de transmissão elétrica, a resistência elétrica da falta, a frequência do sistema elétrico, os diferentes tipos de carga, dentre outros (A. K. Pradhan and A. Routray. 2005).

A impedância que sensibiliza o relé pode ser definida como:

$$Z = \frac{\dot{V}_f}{\dot{I}_f} = Z_{f1} + \Delta_z \quad (10)$$

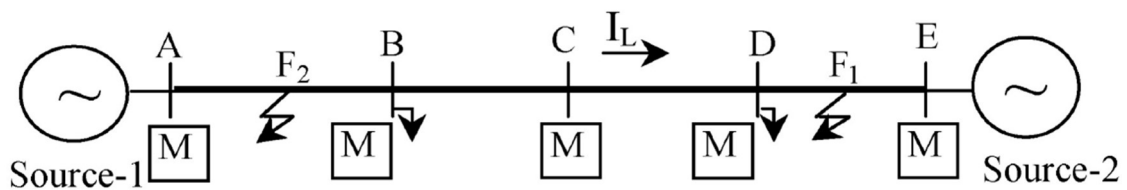
Onde  $\dot{V}_f$  e  $\dot{I}_f$  são os fasores tensão e corrente de fase, respectivamente, e  $Z_{f1}$  a impedância de sequência positiva equivalente vista pelo relé, e  $\Delta_z$  uma função que representa a resistência de falta e ângulo de carga.

O método descrito por A. K. Pradhan and A. Routray (2005) baseia-se na aquisição de dados, tais como a impedância de falta e de pré-falta, bem como os ângulos de fase dessas impedâncias. Para isso, é necessário definir uma janela de aquisição que compreenda tanto o regime normal de operação quanto o retorno do transitório causado por um distúrbio.

Quando uma perturbação é imposta ao sistema, o autor verifica as grandezas mencionadas acima e, com base na condição descrita em (11), determina o sentido do distúrbio que causa a queda de tensão.

A primeira condição requer que a impedância de falta seja menor que a impedância de pré-falta, o que é esperado em um sistema operando em regime. A segunda condição necessária para atender aos requisitos é que o ângulo de fase da impedância que sensibiliza o relé seja menor do que o ângulo de fase da impedância em regime. Se ambas as condições forem satisfeitas, é possível determinar o sentido da perturbação que causa a queda de tensão.

Figura 5 – Sistema elétrico simplificado com duas fontes



Fonte: Adaptado de Pradhan; Routray (2005).

Tomando como exemplo o circuito ilustrado na Figura 5 e sendo o sentido de fluxo da corrente  $I_L$  da Source 1 para a Source 2, pode-se observar que, em caso de ocorrência de uma falta antes do medidor C ( $F_2$ ), o sentido da corrente que passa por ele seria alterado, bem como a magnitude e a fase da impedância definida pela equação (10).

Nesse contexto, caso as condições descritas na equação (11) sejam atendidas, pode-se afirmar que a falta está localizada a montante do monitor C; do contrário, ela estaria situada a jusante (A. K. Pradhan and A. Routray. 2005).

$$\text{Se } |Z_{falta}| < |Z_{prefalta}| \text{ e } Z_{\alpha} > 0 \quad (11)$$

Na Tabela 1 são apresentados exemplos para uma visualização mais fácil das condições de decisão apresentadas em (11).

Tabela 1 – Resultados para exemplo de falta aplicada na Figura 5

Posição da Falta	Magnitude da Impedância ( $\Omega$ )	Ângulo da Impedância ( $^\circ$ )
Pré-Falta	1200	0,31
Jusante	26	1,2
Montante	51	-2,4

Fonte: Adaptado de A. K. Pradhan and A. Routray. 2005.

O método em questão apresenta resultados satisfatórios para diversos tipos de faltas e configurações de sistemas elétricos, incluindo sistemas com dois terminais, sistemas radiais, sistemas com múltiplos barramentos e Controladores de Fluxo de Energia (Unified Power Flow Controller - UPFC) conectados. No entanto, vale destacar que, apesar dos excelentes resultados obtidos, esse método ainda não foi submetido a avaliações específicas no contexto de partida de grandes máquinas indutivas, que são amplamente conhecidas por serem responsáveis por quedas de tensão significativas em sistemas elétricos. Dessa forma, a aplicabilidade desse método em situações que envolvam a partida de grandes máquinas indutivas deve ser avaliada com cautela, tendo em vista a ausência de dados que indiquem o comportamento do método nesse tipo de cenário.

## 2.5 Métodos baseados em magnitude de tensão

A seguir, apresenta-se um método que se baseia na aquisição e análise das magnitudes das tensões pré-distúrbio e das magnitudes das quedas de tensão para identificar a localização de uma perturbação em um sistema elétrico. Esse método envolve o registro das tensões em uma janela de dados que compreende tanto o estágio de regime permanente quanto o regime transitório durante a perturbação e tem como objetivo localizar a fonte de queda de tensão no ponto de conexão das indústrias (Leborgne, R.C. and D. Karlsson. 2008). Leborgne, R.C. and D. Karlsson (2008) definem as tensões  $V_1$  e  $V_2$  em ambos os lados do transformador como:

$$V_1 = \frac{V_{1-sag}}{V_{1-prefault}} \quad (12)$$

$$V_2 = \frac{V_{2-sag}}{V_{2-prefault}} \quad (13)$$

Onde o índice **sag** representa a magnitude das quedas de tensão e o índice **prefault** representa a magnitude da tensão em regime.

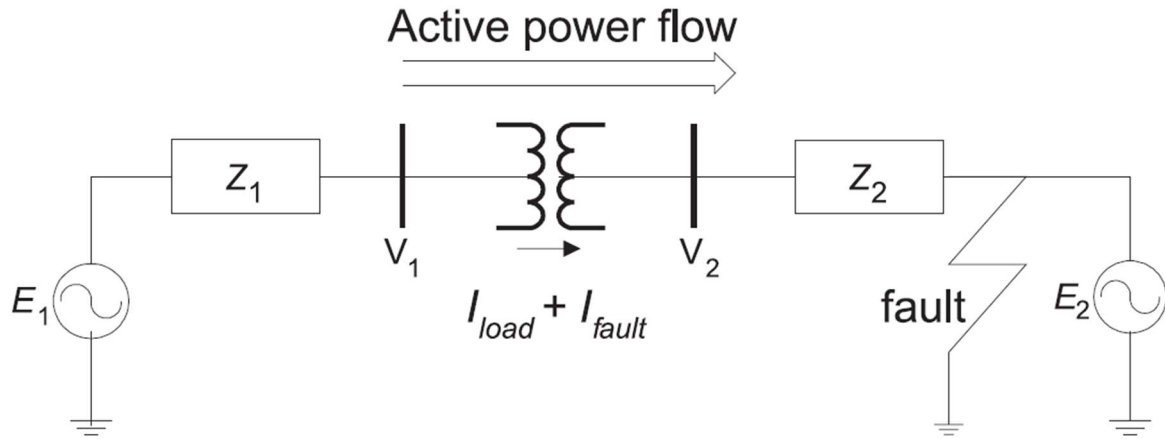
Para verificar o sentido do distúrbio o autor utiliza da magnitude da queda de tensão de cada lado do transformador, que são dadas por:

$$\Delta V_1 = Z_1 I_{Fault} \quad (14)$$

$$\Delta V_2 = (Z_1 + Z_t) I_{Fault} \quad (15)$$

Onde  $Z_t$  representa a impedância do transformador e  $I_{Fault}$  a corrente de curto-circuito que circula no equipamento.

Figura 6 – Diagrama elétrico com transformador



Fonte: Adaptado de Leborgne, R.C. and D. Karlsson. 2008.

Por fim, o autor propõe uma abordagem para a identificação do sentido do distúrbio elétrico baseada exclusivamente na análise da queda de tensão nos terminais do transformador. Nesse sentido, a magnitude da queda de tensão é comparada entre os terminais primário e secundário, e aquele que apresentar a maior magnitude indica o sentido do distúrbio. Em outras palavras, se a queda de tensão  $\Delta V_1$  no terminal primário for maior do que a queda de tensão  $\Delta V_2$  no terminal secundário, o sentido do distúrbio será determinado como sendo para o lado do terminal primário (Leborgne, R.C. and D. Karlsson. 2008).

## 2.6 Motivação e justificativa da dissertação

A análise crítica dos métodos abordados para a localização de queda de tensão considerando VTCDs revelou algumas deficiências relacionadas à natureza da falta, tipo de sistema simulado, características da impedância de falta, simetria, entre outros fatores. Nesse contexto, tornou-se evidente a necessidade de desenvolver um método capaz de superar tais limitações, oferecendo alta confiabilidade e facilidade de implementação.

A presente dissertação propõe um método baseado na análise e detecção precisa da queda de tensão (jusante ou montante) em relação ao ponto de conexão da indústria na rede elétrica (ponto de investigação). O método utiliza a técnica de

aprendizado de máquina conhecida como similaridade de cosseno, que avalia a similaridade entre a corrente e tensão de sequência positivas, a fim de determinar o sentido da fonte responsável pela queda de tensão e atribuir responsabilidade por possíveis danos causados.

De modo geral, na literatura, a técnica de similaridade de cosseno é utilizada para avaliar a similaridade entre dois documentos, levando em consideração suas características individuais (Korenius, Tuomo, et al. 2005). No contexto deste estudo, pode-se fazer uma analogia em que os documentos a serem avaliados correspondem aos fasores de tensão e corrente, sendo que as propriedades analisadas correspondem à magnitude e ao ângulo de fase de cada fasor.

Esse método é caracterizado por sua elevada precisão, simplicidade e confiabilidade, o que o torna uma alternativa factível para a detecção de distúrbios (principalmente de tensão) em sistemas elétricos industriais. Ademais, ele representa um importante avanço no campo da detecção de quedas de tensão no âmbito das VTCDs, que é fundamental para garantir a operação segura e confiável dos sistemas elétricos.

A abordagem das componentes simétricas de Fortescue representa um marco conceitual essencial na análise de sistemas elétricos trifásicos. Suas vantagens preponderantes decorrem da habilidade inerente de simplificar de maneira significativa a modelagem e análise de sistemas de potência, conferindo informações de relevância substancial tanto em condições de operação normais quanto durante ocorrências de desequilíbrio. Além disso, as componentes simétricas revelam-se pertinente para abordar problemas relacionados a desequilíbrios transitórios ou persistentes nas fases, incluindo, mas não se limitando a, eventos de curto-circuito e falhas em fases individuais. A pesquisa acadêmica frequentemente dedica atenção substancial a esses cenários, uma vez que proporcionam insights críticos sobre as respostas dos sistemas elétricos frente a situações não-ideais.

Em especial, para o método a seguir apresentado, é de extrema valia a utilização e a análise das componentes simétricas, notadamente as de sequência positiva, visto que os distúrbios elétricos preponderantes são classificados como causadores de desequilíbrio no sistema trifásico, como por exemplo, uma falta monofásica terra.

Por fim, mas não menos importante, a simplificação de cálculos que as componentes simétricas trazem são notáveis. Isso se dá pela transformação de

fases desequilibrados em fases simétricos e equilibrados, trazendo facilidade e previsibilidade nos cálculos e análises.

Na seção subsequente, serão examinados conceitos relacionados às componentes simétricas de Fortescue em relação aos tipos de faltas que possam ocorrer no sistema elétrico (principal causa dos distúrbios de tensão) e que foram simuladas nesse trabalho para validação do método proposto.

### 3 COMPONENTES SIMÉTRICAS DE FORTESCUE

A análise em componentes simétricas permite transformar um sistema trifásico desequilibrado em um sistema trifásico equilibrado em termos de componentes sequenciais, facilitando a análise de problemas de desequilíbrio e faltas. Essas componentes são obtidas através de uma matriz de transformação, apresentada em (17), onde as grandezas elétricas (como tensão ou corrente) são decompostas em três componentes, conhecidas como componentes de sequência positiva, negativa e zero (C. L. Fortescue. 1918).

A matriz de transformação para os fasores da fase A de sequência é apresentada na equação (17):

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_{a0} \\ \dot{V}_{a1} \\ \dot{V}_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_a \\ \dot{V}_b \\ \dot{V}_c \end{bmatrix} \quad (17)$$

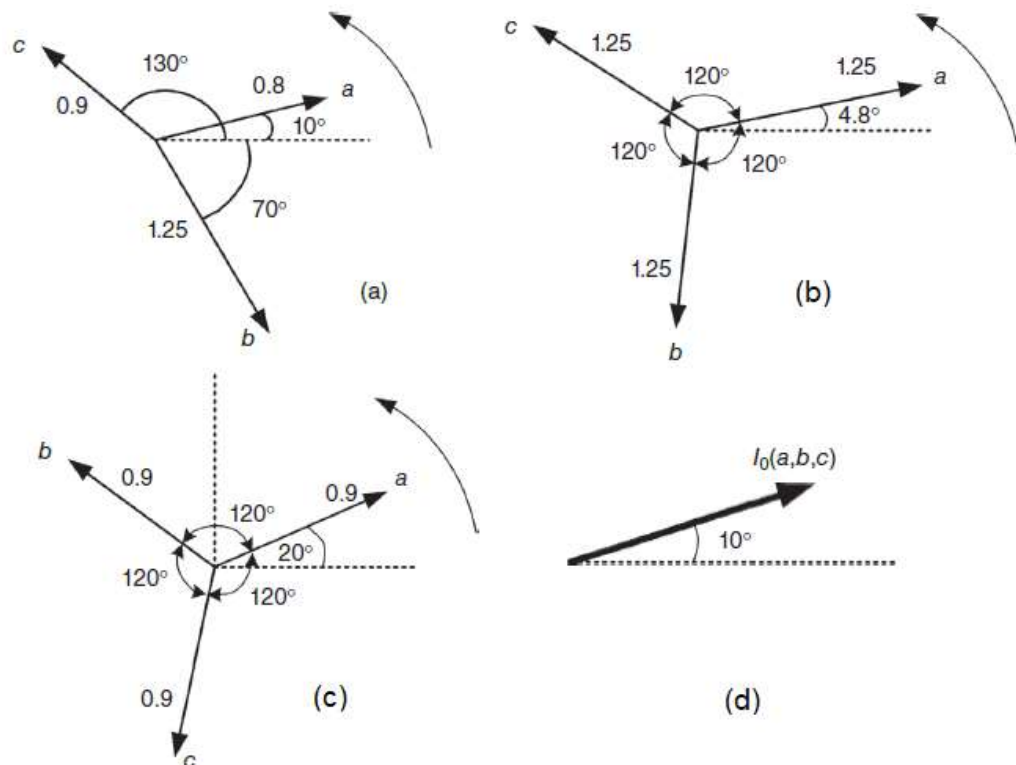
Sendo que os índices 0, 1 e 2 representam as sequências Positiva, Negativa e Zero e os índices a, b e c representam as fases do sistema elétrico.

Em situações de faltas assimétricas, a simetria e o equilíbrio dos fasores elétricos são comprometidos, tornando-se mais complexa qualquer análise. Para mitigar esse problema, o método das componentes simétricas de Fortescue permite a análise do sistema elétrico utilizando novos fasores denominados de componentes positiva, negativa e zero.

As componentes de Fortescue representam o comportamento do sistema elétrico em relação às sequências de fase diretamente conectada, inversamente conectada e a sequência zero, que representa o comportamento em relação ao ponto de equilíbrio das fases (C. L. Fortescue. 1918).

A decomposição em componentes simétricas possibilita a análise do sistema elétrico em sistemas equivalentes simétricos e equilibrados, simplificando a análise de problemas de desequilíbrio e falhas em sistemas elétricos trifásicos. Dessa forma, a técnica das componentes simétricas de Fortescue é uma ferramenta essencial para o entendimento e solução de problemas em sistemas elétricos trifásicos.

Figura 7 – Fasores das Componentes Simétricas



Fonte: Adaptado de Das, J. C. 2016.

Na figura 7 (a) tem-se os fasores desequilibrados e assimétricos, (b) Fasores de sequência positiva, (c) Fasores de sequência negativa e (d) Fasores de sequência zero.

### 3.1 Falta Trifásica

As faltas trifásicas são consideradas simétricas e com mesma impedância de falta por fase, onde a soma fasorial das correntes é zero e não há caminho para a terra.

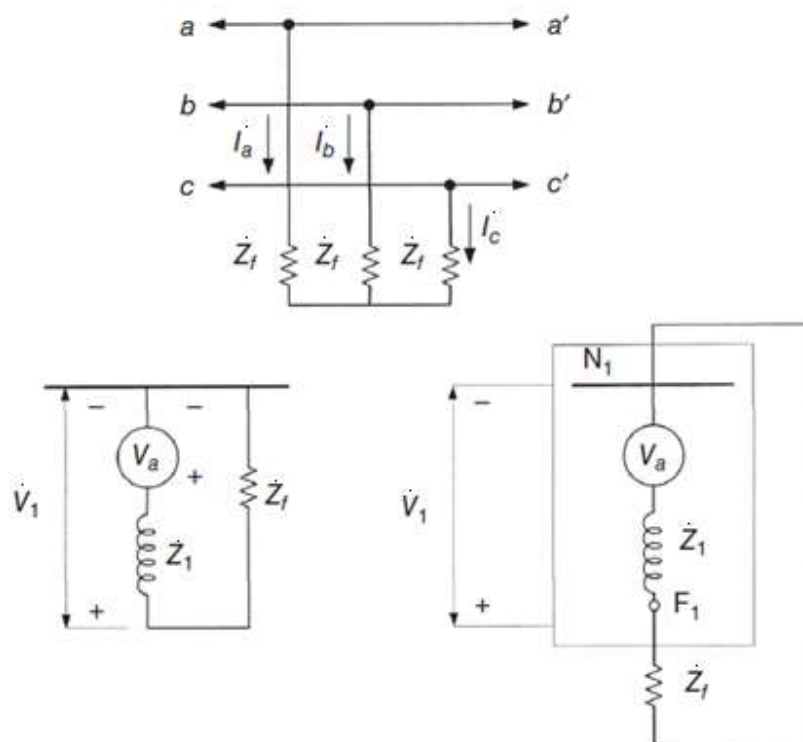
$$\begin{vmatrix} \dot{V}_a \\ \dot{V}_b \\ \dot{V}_c \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} Z_f & 0 & 0 \\ 0 & Z_f & 0 \\ 0 & 0 & Z_f \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \dot{I}_a \\ \dot{I}_b \\ \dot{I}_c \end{vmatrix} \quad (18)$$

Logo, as componentes simétricas, por fase, para esse tipo de falta serão:

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_{a0} \\ \dot{V}_{a1} \\ \dot{V}_{a2} \end{bmatrix} = T^{-1} \begin{bmatrix} Z_f & 0 & 0 \\ 0 & Z_f & 0 \\ 0 & 0 & Z_f \end{bmatrix} T \begin{bmatrix} \dot{I}_{a0} \\ \dot{I}_{a1} \\ \dot{I}_{a2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_f & 0 & 0 \\ 0 & Z_f & 0 \\ 0 & 0 & Z_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_{a0} \\ \dot{I}_{a1} \\ \dot{I}_{a2} \end{bmatrix} \quad (19)$$

Sendo  $Z_f$  a impedância de falta.

Figura 8 – Circuito equivalente do curto-circuito trifásico



Fonte: Adaptado de Das (2016).

### 3.2 Falta Monofásica Fase-Terra

Faltas monofásicas são uma ocorrência frequente em sistemas elétricos de potência e são, portanto, responsáveis pela maior quantidade de interrupções de energia. Em um sistema trifásico, considerando uma falta na fase A e que as correntes nas fases B e C são nulas, a tensão no ponto de falta pode ser expressa como:

$$\dot{V}_a = \dot{I}_a Z_f \quad (20)$$

Onde  $Z_f$  é a impedância de falta.

As componentes de sequência das correntes para esse tipo de falta, por fase, são dadas a seguir:

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{a0} \\ \dot{I}_{a1} \\ \dot{I}_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_a \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} \dot{I}_a \\ \dot{I}_a \\ \dot{I}_a \end{bmatrix} \quad (21)$$

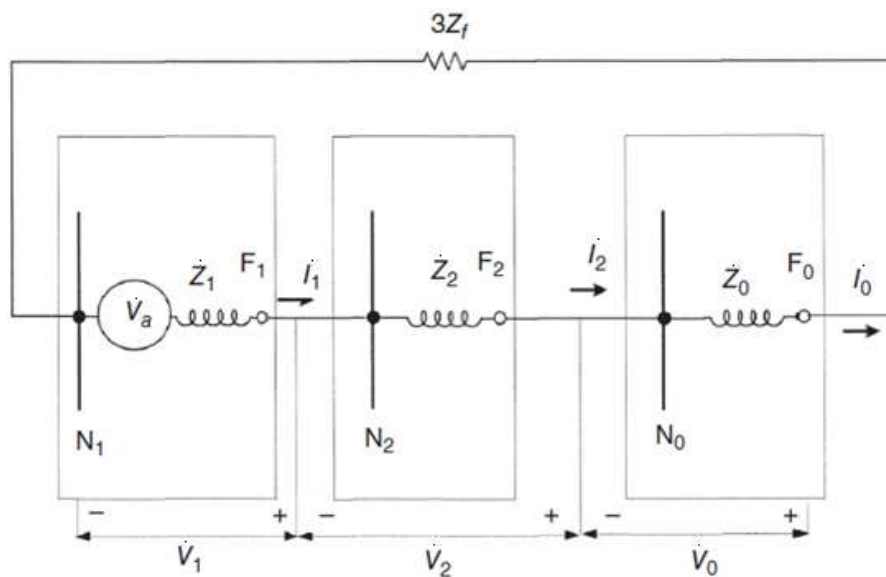
De acordo com a matriz de transformação pode-se extrair:

$$\dot{I}_{a0} = \dot{I}_{a1} = \dot{I}_{a2} = \frac{1}{3} \dot{I}_a \quad (22)$$

De acordo com (20) e (22), a corrente de falta  $I_a$  é dada por:

$$\dot{I}_a = 3\dot{I}_{a0} = \frac{3\dot{V}_a}{(Z_1 + Z_2 + Z_0) + 3Z_f} \quad (23)$$

Figura 9 – Circuito Equivalente de Falta Monofásica



Fonte: Adaptado de Das, J. C. 2016.

### 3.3 Falta Bifásica Fase-Fase

Em uma falta bifásica fase-fase entre as fases B e C, considerando que a corrente flui pela fase B e retorna pela fase C, através da impedância de falta  $Z_f$ , as componentes de sequência das correntes são apresentadas como:

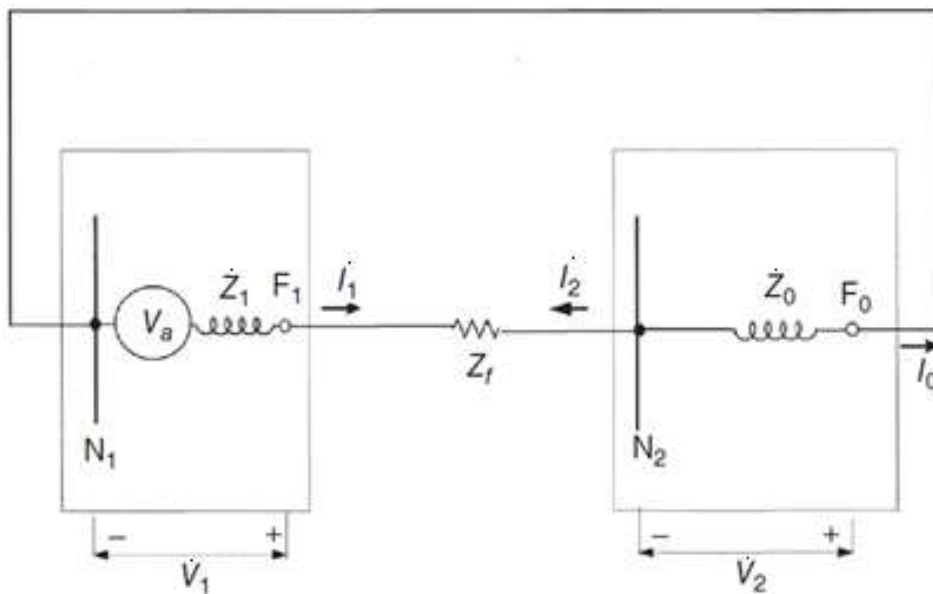
$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{a0} \\ \dot{I}_{a1} \\ \dot{I}_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ -\dot{I}_c \\ \dot{I}_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 0 \\ -\alpha + \alpha^2 \\ -\alpha^2 + \alpha \end{bmatrix} \quad (24)$$

Baseado em (24), pode-se definir as correntes  $I_b$  e  $I_c$  como:

$$\dot{I}_b = (\alpha^2 - \alpha)\dot{I}_{a1} = -j\sqrt{3}\dot{I}_{a1} \quad \text{e} \quad \dot{I}_c = -\dot{I}_b \quad (25)$$

O circuito equivalente de falta bifásica é mostrado na Figura 10.

Figura 10 – Circuito Equivalente de Falta Bifásica



Fonte: Adaptado de Das (2016).

### 3.4 - Falta Bifásica Fase-Fase-Terra

Considerando uma falta assimétrica fase-fase-terra, com as fases B e C em falta através de uma impedância de falta  $Z_f$ , pode-se escrever:

$$\dot{I}_a = 0 \text{ e } \dot{I}_{a0} + \dot{I}_{a1} + \dot{I}_{a2} = 0 \quad (26)$$

$$\dot{V}_b = \dot{V}_c = (\dot{I}_b + \dot{I}_c)Z_f \quad (27)$$

As componentes de sequência de tensão são:

$$\begin{vmatrix} \dot{V}_{a0} \\ \dot{V}_{a1} \\ \dot{V}_{a2} \end{vmatrix} = \frac{1}{3} \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \dot{V}_a \\ \dot{V}_b \\ \dot{V}_c \end{vmatrix} = \frac{1}{3} \begin{vmatrix} \dot{V}_a + 2\dot{V}_b \\ \dot{V}_a + (\alpha + \alpha^2)\dot{V}_b \\ \dot{V}_a + (\alpha + \alpha^2)\dot{V}_b \end{vmatrix} \quad (28)$$

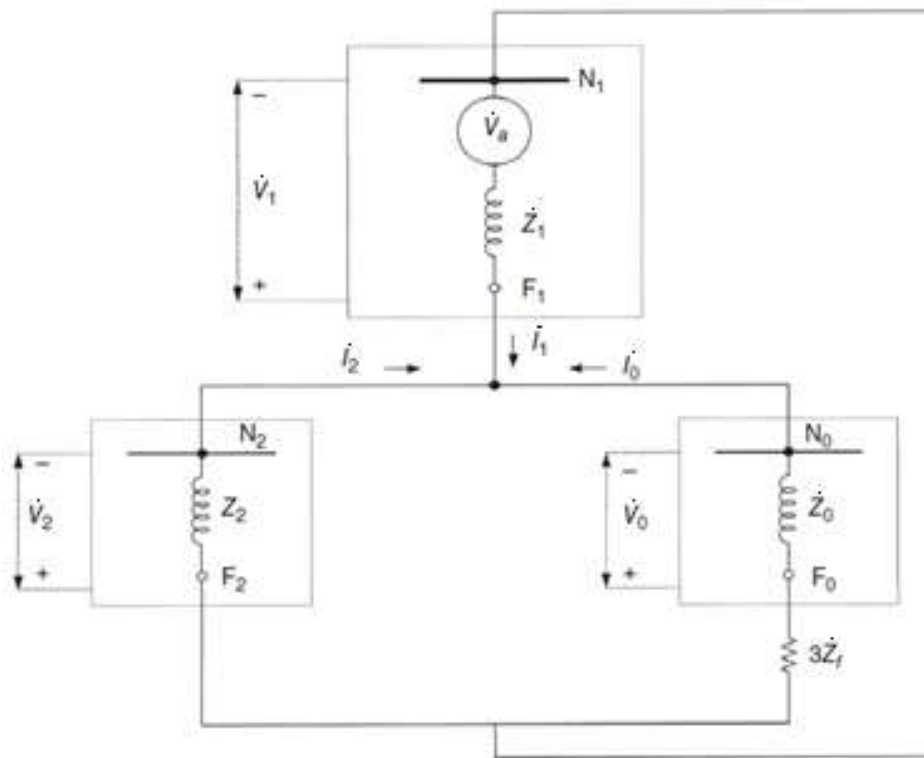
Equação (28) mostra que  $\dot{V}_{a1} = \dot{V}_{a2}$ , logo:

$$\dot{V}_{a0} = \dot{V}_{a1} + 3Z_f \dot{I}_0 \quad (29)$$

E, a corrente de falta é dada por:

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{V}_a}{Z_1 + \frac{Z_2(Z_0 + 3Z_f)}{Z_2 + Z_0 + 3Z_f}} \quad (30)$$

Figura 11 – Circuito Equivalente de Falta Dupla Fase-Terra



Fonte: Adaptado de Das (2016).

## 4 INTRODUÇÃO DA SIMILARIDADE DE COSSENO

O método proposto nesta dissertação é implementado, testado e validado por simulações nos softwares MATLAB e DigSilent, tanto para verificar os cálculos quanto para simular a rede elétrica industrial, rede de transmissão, aquisição e filtragem dos sinais e a análise dos resultados. As seções subsequentes têm como proposta introduzir o leitor aos conceitos de diagramas fasoriais, similaridade entre vetores e o conceito de similaridade de cosseno.

Com o objetivo de introduzir o comportamento dos fasores em um sistema elétrico operando em regime permanente serão apresentados, de maneira didática, os conceitos de sinais variantes no tempo e de diagrama fasorial.

Será apontado também como o autor representou o sistema elétrico simplificado, utilizando o software DigSilent, para o entendimento do conceito de similaridade de cosseno, assim como as equações de tensão de fase em regime permanente e um diagrama exibindo as relações angulares e entre tensões e correntes e para quais fasores o método de similaridade é atuante.

A relação angular entre as tensões de linha e as correntes de fase, serão discutidas e evidenciadas, a fim de identificar uma relação de similaridade na diferença angular entre essas grandezas. Para tal, foram apresentados exemplos gráficos, baseados em Saadat, Amin, et al. (2022), a fim de sustentar o conceito de similaridade entre tensão de linha e corrente de fase durante distúrbios elétricos e verificar sua veracidade em diferentes cenários.

Em um primeiro caso é apresentado o comportamento da defasagem angular para faltas dentro do parque industrial ou pontos a jusante ao ponto de investigação. Em um segundo momento, é apresentado o comportamento da defasagem angular para faltas fora do parque industrial ou pontos a montante ao ponto de investigação do sistema elétrico empregado nessa dissertação. O objetivo é obter, através das relações gráficas das grandezas elétricas, uma relação de similaridade, que pode ser amplamente aplicada em diferentes tipos de distúrbios.

Abordando a aplicação da ferramenta matemática de similaridade de cosseno para vetores em um espaço vetorial, será discutida a interpretação dos resultados obtidos e sua relação com a similaridade entre os elementos analisados. Além disso, será apresentado um exemplo prático de como a operação de similaridade de

cossenos ocorre matematicamente para o cálculo da relação entre dois vetores quaisquer.

O tratamento dos sinais obtidos a partir das simulações realizadas é de fundamental importância. Logo, serão discutidos os métodos utilizados para processamento dos dados, amparados pela literatura, os filtros adotados para o tratamento do sinal, o nível de conteúdo harmônico que foi considerado e a janela móvel empregada para a aquisição dos valores eficazes das grandezas de tensão e corrente.

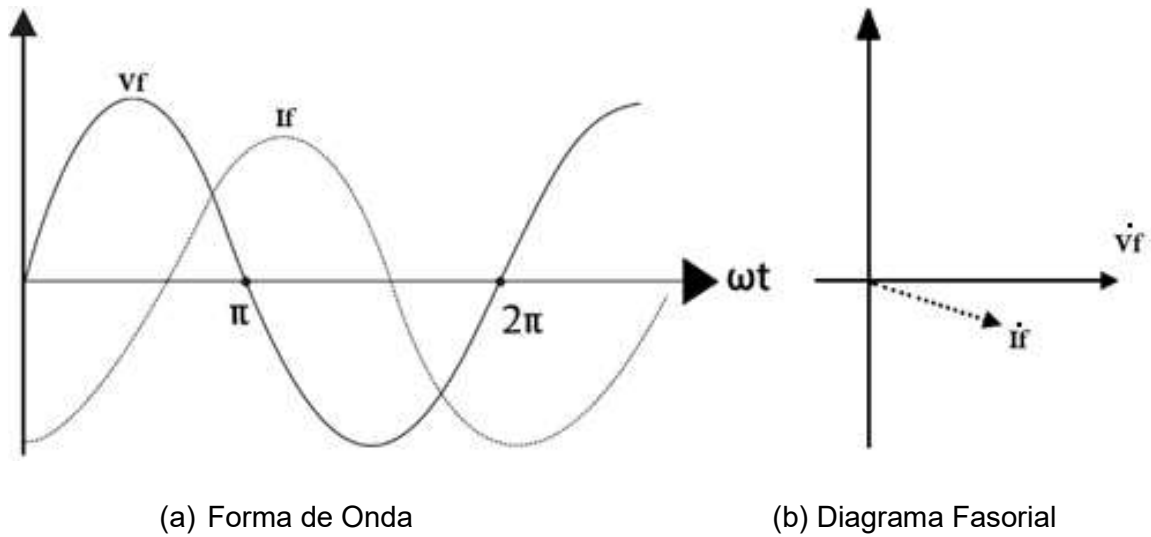
Por fim, o fluxograma do método será exposto, destacando seu funcionamento e a lógica de decisão utilizada para identificar o local do distúrbio em questão.

Após a apresentação dos conceitos fundamentais, serão introduzidos os elementos utilizados nas simulações, tais como o sistema elétrico, o diagrama industrial, a tabela de equipamentos e cablagens, e as grandezas elétricas utilizadas. Após a familiarização com os modelos a serem simulados, serão discutidos os resultados obtidos, incluindo as curvas dos valores de similaridade de cosseno (CS) ao longo do tempo.

#### **4.1 Tensão e corrente em regime permanente**

Em um sistema elétrico de potência, é comum que a corrente apresente um comportamento indutivo, estando em defasagem em relação à tensão da mesma fase, conforme pode ser ilustrado na Figura 12. O comportamento indutivo da corrente em relação à tensão em um sistema elétrico pode ser definido por diversos fatores, tais como as características dos componentes elétricos, as condições de operação do sistema e a característica da carga conectada ao sistema.

Figura 12 – Sinais no tempo (a) e diagrama fasorial (b) de tensão e corrente



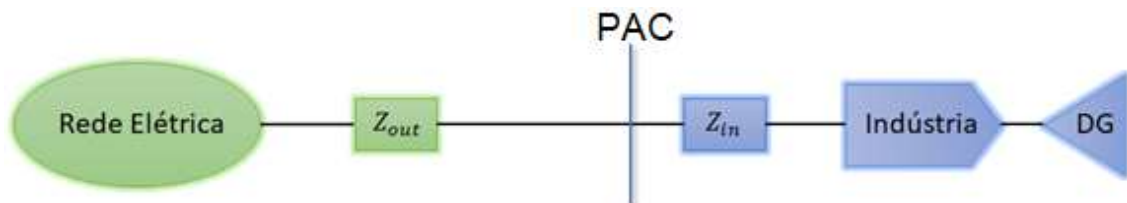
Fonte: O Autor

Levando em consideração os sistemas elétricos trifásicos equilibrados, é possível perceber que o comportamento dos fasores segue um padrão em relação ao fator de deslocamento entre tensão e corrente. Nesse contexto, é comum observar que a tensão está adiantada em relação à corrente em sistemas elétricos equilibrados. É importante ressaltar que o entendimento desse diagrama fasorial é crucial para a compreensão do método de Similaridade de Cossenos, uma vez que ele se utiliza das componentes dos fasores para o seu cálculo.

#### 4.2 Conceito de similaridade fasorial

A representação esquemática fornecida na Figura 13 ilustra de maneira paradigmática a configuração fundamental de um sistema de distribuição industrial interconectado à rede elétrica, que incorpora a integração de uma Geração Distribuída (GD).

Figura 13 – Sistema industrial conectado à rede elétrica



Fonte: O Autor

Nesse contexto, o ponto de interesse, denotado como PAC, é identificado como o Ponto de Acoplamento Comum. As grandezas  $Z_{out}$  e  $Z_{in}$  são empregadas para caracterizar as impedâncias existentes entre a rede elétrica e o PAC, bem como  $Z_{in}$  representa a impedância interna da unidade industrial.

É imperativo ressaltar que, sob operação normal da rede elétrica, o direcionamento predominante do fluxo de corrente no PAC se estabelece a partir da fonte de energia em direção à unidade industrial, considerando que não haja exportação de energia. Essa dinâmica é uma característica distintiva da operação habitual deste sistema de distribuição industrial com Geração Distribuída, onde o PAC desempenha o papel de interface entre a rede elétrica e a instalação industrial.

Considerando um sistema trifásico, simétrico e equilibrado, na sequência positiva, com a tensão da fase A na referência, pode-se expressar as tensões das fases A, B e C em função do tempo como:

$$V_{af} = \sqrt{2} V_{rms} \cos(2\pi ft) \quad (31)$$

Essa formulação possibilita o cálculo das tensões nas fases B e C como:

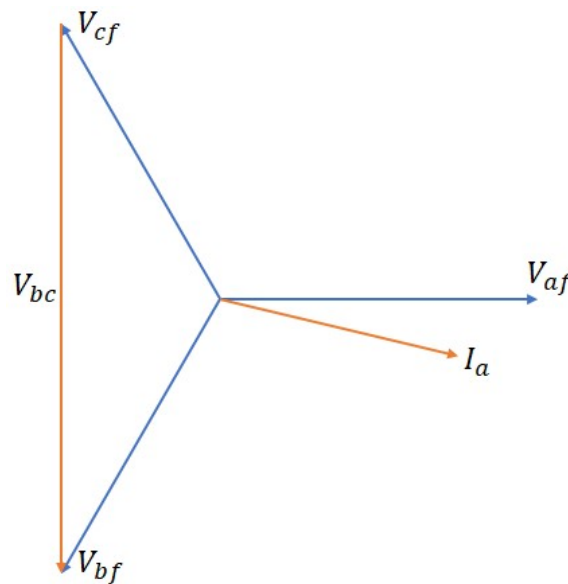
$$V_{bf} = \sqrt{2} V_{rms} \cos(2\pi ft - 120) \quad (32)$$

$$V_{cf} = \sqrt{2} V_{rms} \cos(2\pi ft + 120) \quad (33)$$

Sendo,  $f$  a frequência de operação do sistema elétrico e  $t$  o tempo em análise.

Durante a operação do sistema elétrico, é observada uma defasagem entre a corrente e a tensão de fase, geralmente associada a uma localização no quarto quadrante do plano complexo quando o fator de potência é indutivo, em particular no que se refere à corrente da fase a. Como ilustrado no diagrama fasorial apresentado na Figura 14, é possível identificar de maneira consistente um componente correlato entre as grandezas  $\dot{V}_{bc}$ ,  $\dot{I}_a$ . Essa propriedade é extensível de maneira análoga aos pares  $\dot{V}_{ca}$ ,  $\dot{I}_b$  e  $\dot{V}_{ab}$ ,  $\dot{I}_c$  (Saadat, Amin, et al. 2022).

Figura 14 – Diagrama Fasorial em Condições Normais de Operação



Fonte: Adaptado de Saadat, Amin, et al, 2022

A aplicabilidade da regra previamente citada é rigorosamente validada para os componentes de sequência positiva das grandezas de tensão e corrente durante um cenário de desequilíbrio no sistema elétrico.

Para o método proposto, utilizam-se as componentes de sequência positiva, previamente discutidas no capítulo 3 e que serão utilizadas a seguir para a validação do conceito discutido no subcapítulo 4.2. É importante notar que, mesmo quando os fasores originais são assimétricos e desequilibrados, os fasores da sequência positiva permanecem simétricos e equilibrados, e são representados em todos os tipos de faltas que podem ocorrer conforme apresentado no capítulo 3. Essa característica favorece a utilização das componentes simétricas visto que os principais distúrbios simulados são faltas assimétricas.

### 4.3 Investigação do CS durante quedas de tensão

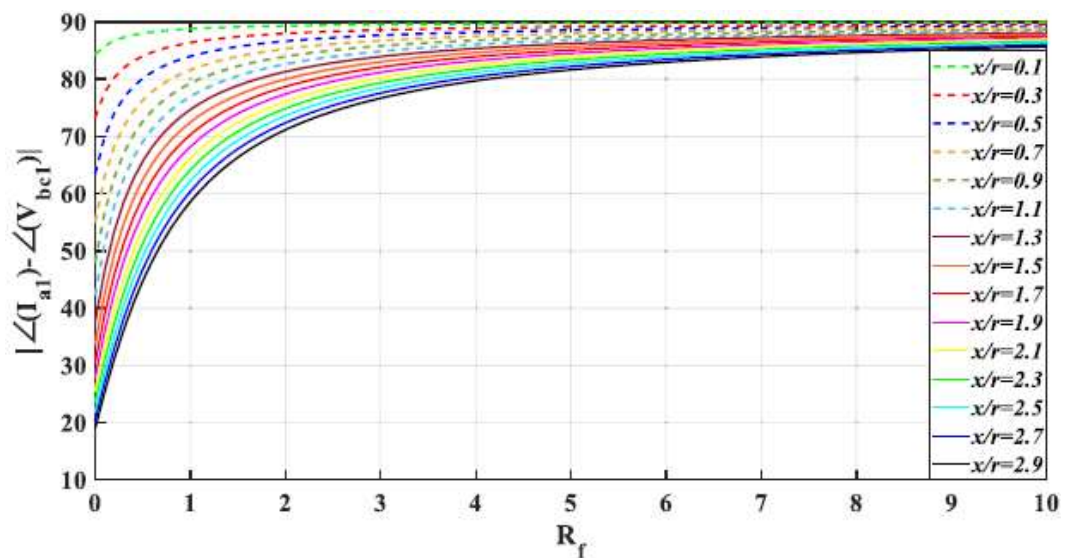
O objetivo deste subcapítulo é introduzir ao leitor os conceitos e as provas que sustentam a similaridade entre os fasores.

Considerando o circuito equivalente para faltas monofásicas apresentado na Figura 9 e a matriz de transformação de Fortescue para componentes simétricas, são obtidas as tensões e correntes de sequência positiva apresentadas na equação (34):

$$I_{a1} \dot{=} \frac{\dot{V}_a}{(Z_1 + Z_2 + Z_o) + 3Z_f} e V_{bc1} \dot{=} \frac{-j\sqrt{3}\dot{V}_a(Z_2 + Z_o + Z_f)}{(Z_1 + Z_2 + Z_o) + 3Z_f} \quad (34)$$

Na Figura 15 é apresentado o comportamento da diferença angular de  $I_{a1}$  e  $V_{bc1}$  sob uma falta monofásica que ocorreu dentro da indústria (ou a direita do PAC do sistema da Figura 13) considerando variações de resistência de falta ( $R_f$ ), indicado pelo eixo X, e da razão entre a reatância e a resistência do sistema elétrico ( $x/r$ ), indicado pela variação de cores nas curvas. É possível notar que durante a falta, a diferença angular se mantém entre zero e noventa graus, indicando que ambos fasores se mantêm no quarto quadrante, conforme apresentado no subcapítulo 4.2.

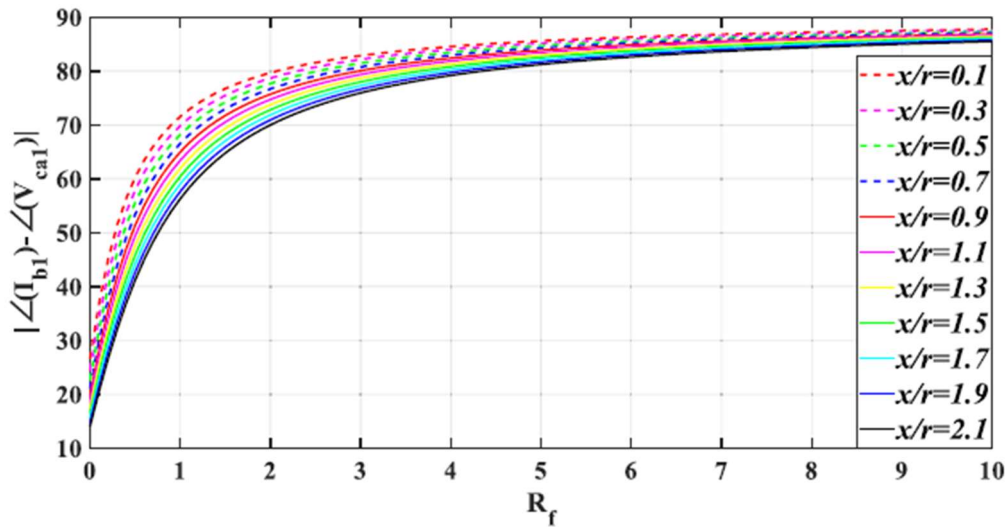
Figura 15 – Diferença angular entre de  $I_{a1}$  e  $V_{bc}$  falta monofásica



Fonte: Saadat, Amin, et al, 2022.

Para faltas bifásicas e bifásicas-terra, Saadat, Amin, et al. (2022) utilizaram a mesma conduta para validar o conceito e verificar se ele se sustenta para outro cenário comumente visto no sistema elétrico. Na Figura 16, é apresentada a mesma análise anterior para uma falta bifásica e na Figura 17 para uma falta bifásica-terra.

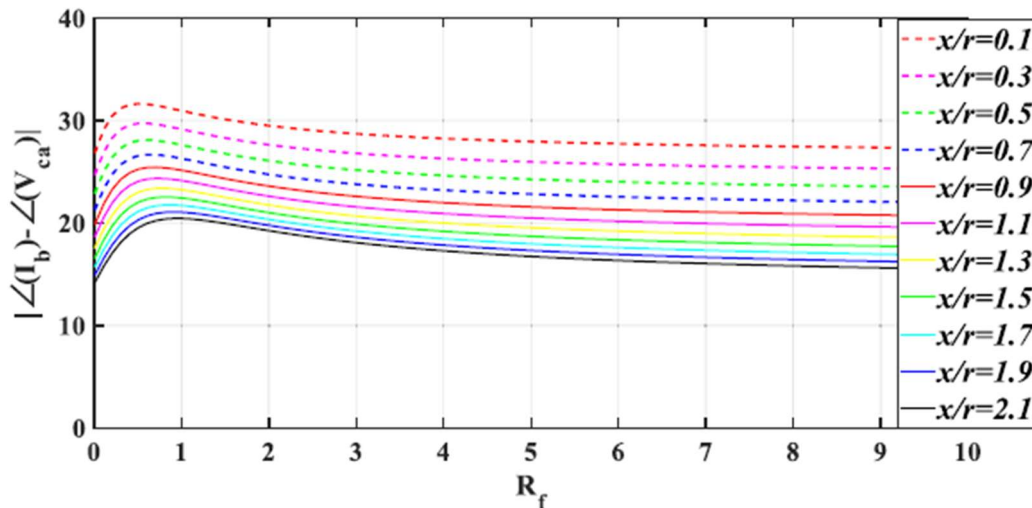
Figura 16 - Diferença angular entre de  $I_{b1}$  e  $V_{ca1}$  falta bifásica



Fonte: Saadat, Amin, et al, 2022.

A Figura 16 mostra como o conceito de correlação fasorial entre  $V_{bc}$ ,  $I_a$ ,  $V_{ca}$ ,  $I_b$  e  $V_{ab}$ ,  $I_c$  é verificado. Novamente, para uma falta bifásica dentro da instalação industrial, é possível ver que a variação angular entre tensão e corrente se mantém entre zero e noventa graus.

Figura 17 - Diferença angular entre de  $I_{b1}$  e  $V_{ca}$  falta bifásica-terra



Fonte: Saadat, Amin, et al, 2022.

Na Figura 17 é apresentada uma falta bifásica-terra, a direita do PAC (jusante) da Figura 13. As curvas apresentam a variação angular entre corrente de fase e tensão de linha, mantendo-se entre zero e 90 graus. Isso indica, mais uma vez, a correlação dos fasores no mesmo plano real – imaginário.

Nota-se que, durante as faltas dentro da instalação industrial, a relação angular entre a corrente de fase e a tensão de linha se manteve entre zero e noventa graus. Isso indica que a tensão e a corrente permanecem no mesmo quadrante real – imaginário e, portanto, indicando que a queda de tensão está sendo alimentada pelo sistema elétrico e a falta a jusante do ponto de conexão.

De maneira similar, a mesma análise pode ser feita para as faltas fora da instalação industrial. É esperado que haja uma defasagem angular reversa (entre cento e oitenta e duzentos e setenta graus) ao que foi apresentado no cenário anterior, visto que a geração distribuída alimentará a falta no barramento externo. Em Saadat, Amin, et al. (2022) os autores não apresentaram essa análise, sendo que ela será apresentada na seção de resultados desta dissertação.

#### 4.4 Similaridade de cosseno (*Cosine Similarity – CS*)

O método de Similaridade de Cosseno (*Cosine Similarity - CS*) é uma ferramenta matemática amplamente utilizada em diversas áreas, como *machine learning* e *data mining* (Korenien, Tuomo, et al. 2005). Essa técnica permite comparar a semelhança entre dois documentos a partir da análise dos elementos presentes em cada um deles. Utilizando essa abordagem, é possível calcular a similaridade entre dois vetores, considerando suas componentes de magnitude e ângulo. Com base nessa análise, é possível inferir a relação de similaridade entre esses vetores e, conseqüentemente, realizar uma avaliação mais precisa sobre os dados em questão.

Para o cálculo do coeficiente de similaridade de cosseno (CS), é necessário obter o cosseno do ângulo formado entre os vetores em questão. No entanto, nem sempre é trivial determinar esse ângulo, e uma alternativa é calcular o CS a partir da razão entre o produto escalar e o produto dos módulos dos vetores, elemento a elemento, conforme descrito na equação (26) (Saadat, Amin, et al. 2022).

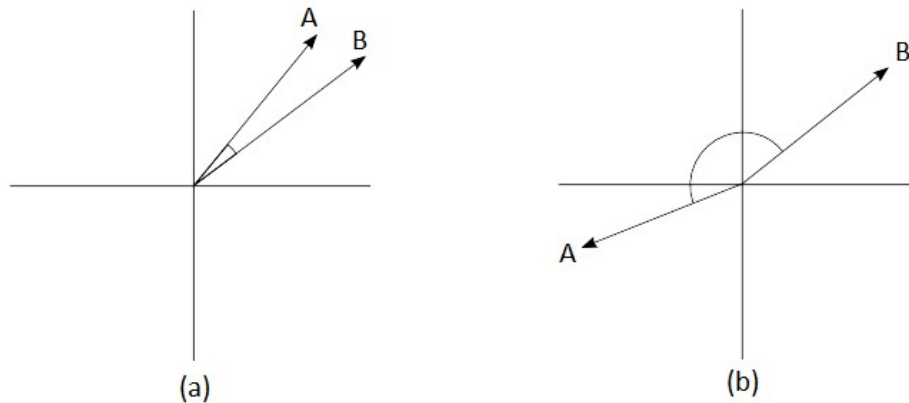
$$CS_{m,n} = \frac{\sum_{k=1}^n M_k N_k}{\sqrt{\sum_{k=1}^n M_k^2} \sqrt{\sum_{k=1}^n N_k^2}} \quad (26)$$

Sendo  $M_k$  e  $N_k$  o  $k$ -ésimo elemento dos vetores  $M$  e  $N$ .

Na Figura 18 são ilustradas duas situações distintas em relação a dois vetores, A e B. Na primeira situação (a), é possível notar um fator de similaridade perceptível entre os vetores A e B, uma vez que eles se encontram no mesmo quadrante,

indicando que as suas componentes possuem o mesmo sinal, o que aumenta a sua similaridade. Já na segunda situação (b), os vetores se encontram em quadrantes opostos, o que indica uma dissimilaridade entre eles. Isso ocorre devido às componentes dos vetores possuírem sinais opostos, o que diminui a sua similaridade.

Figura 18 – Cenários de similaridade entre dois fasores



Fonte: O Autor

Considerando os fasores apresentados na Figura 18 (a) como  $\hat{A}=20\angle 55$  ( $11.47+j16.38$ ) e  $\hat{B}=25\angle 40$  ( $19.15+j16.07$ ), é possível inferir que a similaridade entre eles é maior em relação aos vetores  $\hat{A}=20\angle -160$  ( $-18.79-j6.84$ ) e  $\hat{B}=25\angle 40$  ( $19.15+j16.07$ ) apresentados na Figura 18 (b). Isso ocorre devido à proximidade dos ângulos entre os vetores na Figura 18 (a), o que indica uma maior similaridade entre eles.

Aplicando a equação (26) para as duas situações descritas pela Figura 20 tem-se:

$$CS_a = \frac{20 * 25 + 55 * 40}{\sqrt{20^2 + 55^2} * \sqrt{25^2 + 40^2}} = \frac{500 + 2200}{58,52 * 47,17} = \mathbf{0,9781} \quad (27)$$

$$CS_b = \frac{20 * 25 - 160 * 40}{\sqrt{20^2 + (-160)^2} * \sqrt{25^2 + 40^2}} = \frac{500 - 6400}{252,9 * 47,17} = \mathbf{-0,4944} \quad (28)$$

A equação 26 apresenta a formulação matemática da ferramenta conhecida como similaridade de cosseno, que apresenta, em essência, a correspondência de identidade entre os vetores que estão sendo analisados. É importante destacar que,

quando os vetores em questão são idênticos, o ângulo entre eles é nulo, resultando em um valor de  $\cos(0^\circ) = 1$ . Por outro lado, quando os vetores são opostos e apresentam uma separação angular de 180 graus, o cosseno correspondente é igual a  $\cos(180^\circ) = -1$ . Dessa forma, pode-se inferir que valores de similaridade de cosseno próximos de 1 indicam uma grande similaridade entre os vetores, enquanto valores próximos de -1 correspondem a uma grande dissimilaridade. Essa relação se deve ao fato de que, quanto menor o ângulo entre dois vetores, maior será a projeção de um vetor no outro, resultando em uma maior similaridade entre eles, e vice-versa.

É importante destacar que a equação (26) é independente do tamanho ou dimensão dos vetores, pois avalia par a par os elementos identificados pelo índice  $k$ . Além disso, o resultado obtido a partir dessa equação varia sempre entre os limites de -1 e 1, refletindo a relação entre os ângulos dos vetores e a sua similaridade.

#### **4.5 Aquisição, Filtragem e Tratamento de Dados**

Ao lidar com faltas assimétricas e simétricas em sistemas elétricos de potência, torna-se crucial adotar procedimentos adequados para aquisição de sinais utilizados na análise de similaridade de cosseno.

Geralmente, os sinais coletados durante eventos perturbatórios apresentam componentes de ruído que não correspondem ao sinal original em regime permanente, comprometendo a precisão e acurácia do algoritmo de análise de similaridade de cosseno. Nesse sentido, é comum que ocorra um *Misleading*, ou seja, um equívoco decorrente da presença de sinais ruidosos, que pode levar a resultados incorretos e prejudicar o resultado. Portanto, é essencial que sejam adotadas técnicas de filtragem de sinal para minimizar o efeito do ruído na análise de similaridade de cosseno, a fim de obter resultados mais confiáveis e precisos.

Nesta dissertação, foram adotados diversos métodos para o tratamento dos sinais de tensão e corrente. Para identificar e analisar as componentes harmônicas presentes nos sinais, foi empregada a Transformada Rápida de Fourier (FFT). Além disso, um filtro IIR passa baixas foi utilizado para filtrar sinais ruidosos de alta frequência, permitindo a eliminação dessas componentes que causam distorção. Além disso, foram obtidos os sinais de sequência positiva através dos sinais trifásicos. Importante lembrar que em situação de assimetria, as componentes de Fortescue representam as componentes simétricas dos sinais observados.

Adicionalmente, foram adquiridos, através do software DIGSILENT, os sinais trifásicos de tensão e corrente, que foram analisados em diferentes situações de distúrbio. A combinação desses métodos permitiu uma análise mais precisa e fiel dos sinais elétricos simulados.

Tratando-se de faltas simétricas e assimétricas o sistema passa por momentos transitórios onde os sinais de tensão e corrente são perturbados e distorcidos. Além dos transitórios, as correntes harmônicas auxiliam nesse processo de deformação dos sinais.

A utilização do filtro Butterworth IIR de terceira ordem para esta dissertação foi baseada na ampla utilização na literatura onde apresenta excelente performance de filtragem, como a capacidade de atenuação seletiva das frequências indesejadas, bem como a preservação da qualidade dos sinais de interesse. Butterworth (1930) mostra que um filtro ideal não deve só rejeitar completamente faixas de frequências indesejadas, mas também ter uma sensibilidade uniforme para frequências desejadas. Além disso, Butterworth (1930) mostra que a atenuação do filtro é mais acentuada quando aumentado a quantidade de elementos filtrantes, ou seja, a ordem do filtro.

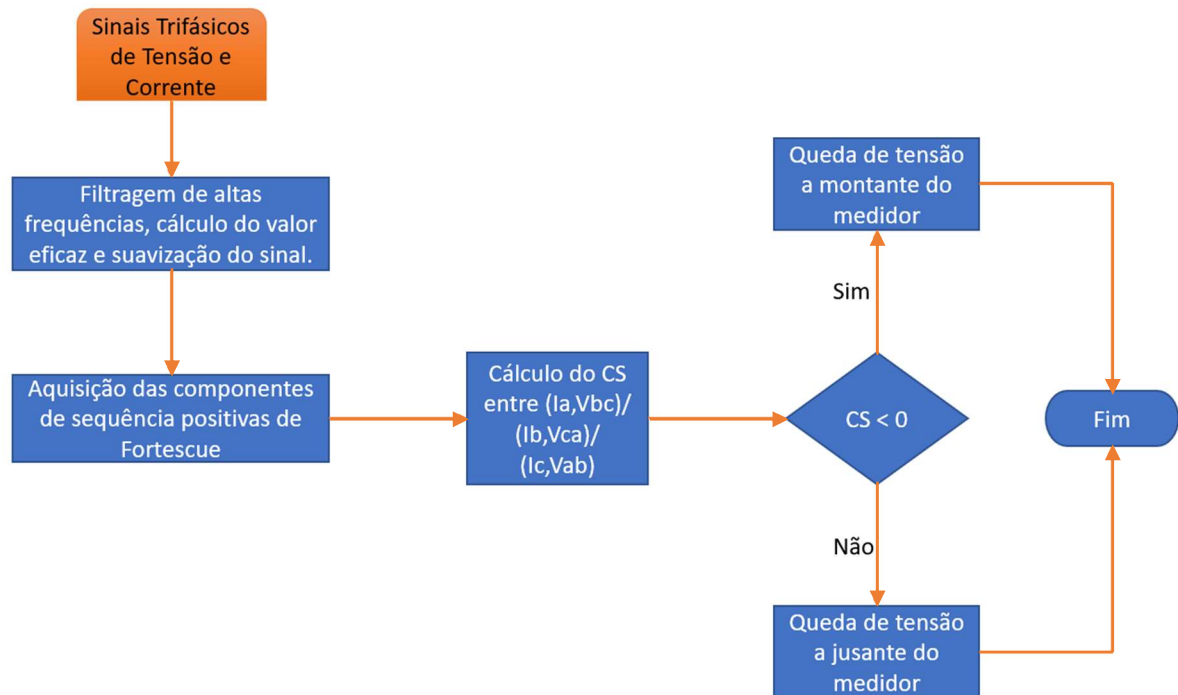
Com a aquisição dos sinais fundamentais e de sequência positiva de corrente e tensão, utilizou-se uma janela móvel para obter os valores eficazes com base em um ciclo de frequência de 60 Hz, cujo período é de 0,0165 segundos, permitindo a obtenção dos valores eficazes dos sinais. Para tratar-se ainda mais os sinais foi utilizado um filtro de média móvel de mil amostras para suavizar as oscilações sem a perda de dados.

Observa-se que não é desejável que o algoritmo receba sinais de alimentação que contenham componentes harmônicas geradas na rede elétrica tampouco deformações oriundas de atuação de softwares como arredondamento e reconstrução de sinais, uma vez que isso pode comprometer o desempenho e induzir a resultados equivocados (Misleading). Nesse sentido, a verificação e a filtragem dessas componentes tornam-se imprescindíveis para garantir a confiabilidade e a acurácia do método.

#### **4.6 Fluxograma do Algoritmo**

Na Figura 19 é apresentado o fluxograma do algoritmo proposto para detectar a direcionalidade da origem da queda de tensão em relação ao PAC (montante ou jusante) e o processo de tomada de decisão correspondente.

Figura 19 – Algoritmo do método proposto



Fonte: O Autor

O algoritmo ilustrado na Figura 19 consiste em diversas etapas, sendo que a primeira delas é a aquisição dos sinais trifásicos instantâneos, seguida de uma fase de filtragem, obtenção dos valores eficazes das tensões e correntes e suavização do sinal. Posteriormente, realiza-se o cálculo da similaridade de cosseno (CS) para a fase na qual a queda de tensão se manifesta, podendo ser A, B ou C.

A última etapa do algoritmo consiste em verificar o valor do CS e, com base nessa informação, determinar se o ponto de origem da queda de tensão está a montante ou a jusante do ponto de investigação, o qual, neste caso, corresponde ao ponto de acoplamento da indústria (PAC).

## 5 TESTES E RESULTADOS

Nesta seção, são apresentados os resultados obtidos por meio da implementação do algoritmo em cenários que simulam diferentes distúrbios elétricos, tais como diferentes tipos de faltas, partida de motores da indústria e partida de parques industriais externos. Serão ainda empregadas distintas tecnologias de geração distribuída, verificação da robustez perante duração de faltas e uma análise de sensibilidade em função de distância e impedância de falta.

O diagrama elétrico a ser simulado e os equipamentos empregados tanto na instalação elétrica quanto no sistema externo foram adotados visando similaridade com uma indústria real. Serão expostos detalhes acerca dos tipos de equipamentos utilizados, bem como informações sobre grandezas físicas, tais como quantidade, comprimento dos cabos, tipo de alimentação (aérea ou subterrânea). Ademais, serão fornecidas informações sobre grandezas elétricas, como nível de tensão, potência aparente e fator de potência.

Será apresentada a validação do método de Similaridade de Cosseno, feita pelo autor, a fim de comparar as análises feitas por Saadat, Amin, et al, (2022) e complementar o que os autores não abordaram na referência.

A tabela 7 contendo os resultados resumidos das simulações realizadas no sistema elétrico da Figura 20, indica de maneira sucinta como o método respondeu aos distúrbios simulados. A análise dos resultados irá relacionar as informações das colunas "CS" e "Sentido" com a coluna "Local do Distúrbio".

Além disso, os resultados apresentados por meio de gráficos, que demonstram a variação do índice de similaridade de cosseno (CS) ao longo do tempo, foram utilizados para validar os dados apresentados na tabela anterior e verificar se estão de acordo com as teorias expostas no capítulo 4. Além disso, serão discutidos os níveis de tensão alcançados, as porcentagens de variação de tensão e corrente para cada distúrbio e sua relação com o valor de CS obtido.

### 5.1 Dados do sistema teste

A instalação elétrica utilizada como base para este estudo consiste em um modelo industrial com cargas trifásicas. Visando atender às normas estabelecidas pela ANEEL (Resolução Normativa ANEEL N°1000, 2021) e evitar a aplicação de multas por excedentes reativos, o fator de potência final da instalação foi corrigido para 0,94 indutivo. Os dados da instalação estão apresentados nas Tabelas 2, 3, 4 e 5, e o diagrama do sistema elétrico pode ser visualizado na Figura 20.

Tabela 2 – Cargas da instalação simulada.

<b>Cargas</b>	<b>Tipo</b>	<b>Tensão (V)</b>	<b>Potência (kW)</b>	<b>FP</b>
Iluminação	Leve	220	15	0,98
Elevadores	Média	220	30	0,97
Ar-Condicionado	Média	220	15	0,95
Motor Externo	Pesada	380	55	0,91
Motor Interno	Pesada	380	90	0,87

Fonte: O Autor

Tabela 3 – Cabeamento do Sistema.

<b>Cabos</b>	<b>Tipo</b>	<b>Tensão (V)</b>	<b>Comprimento (Km)</b>
NHKBA 3x120sm 8.7/13.8kV	Aéreo	13.800	10/20
NKLY 3x120/70	Subterrâneo	380	0,03
NKY 1x500rm 0.6/1kV ir	Subterrâneo	380	0,05
NKY 1x500rm 0.6/1kV ir	Subterrâneo	380	0,04

Fonte: O Autor

Tabela 4 – Equipamentos de Distribuição.

<b>Equipamentos</b>	<b>Potência (MVA)</b>	<b>Tensão (V)</b>	<b>Enrolamento</b>
Transformador	5	138.000/13.800	D-YN
Transformador	0,5	13.800/380	D-YN
Transformador	0,3	13.800/380	D-YN
Transformador	0,03	13.800/220	D-YN

Fonte: O Autor

Tabela 5 – Configuração da Geração Distribuída Fotovoltaica (GDF).

<b>DG</b>	<b>Inversores</b>	<b>Painéis</b>	<b>Potência (VA)</b>	<b>FP</b>
Painel Fotovoltaico	5	10	30.000	0,98

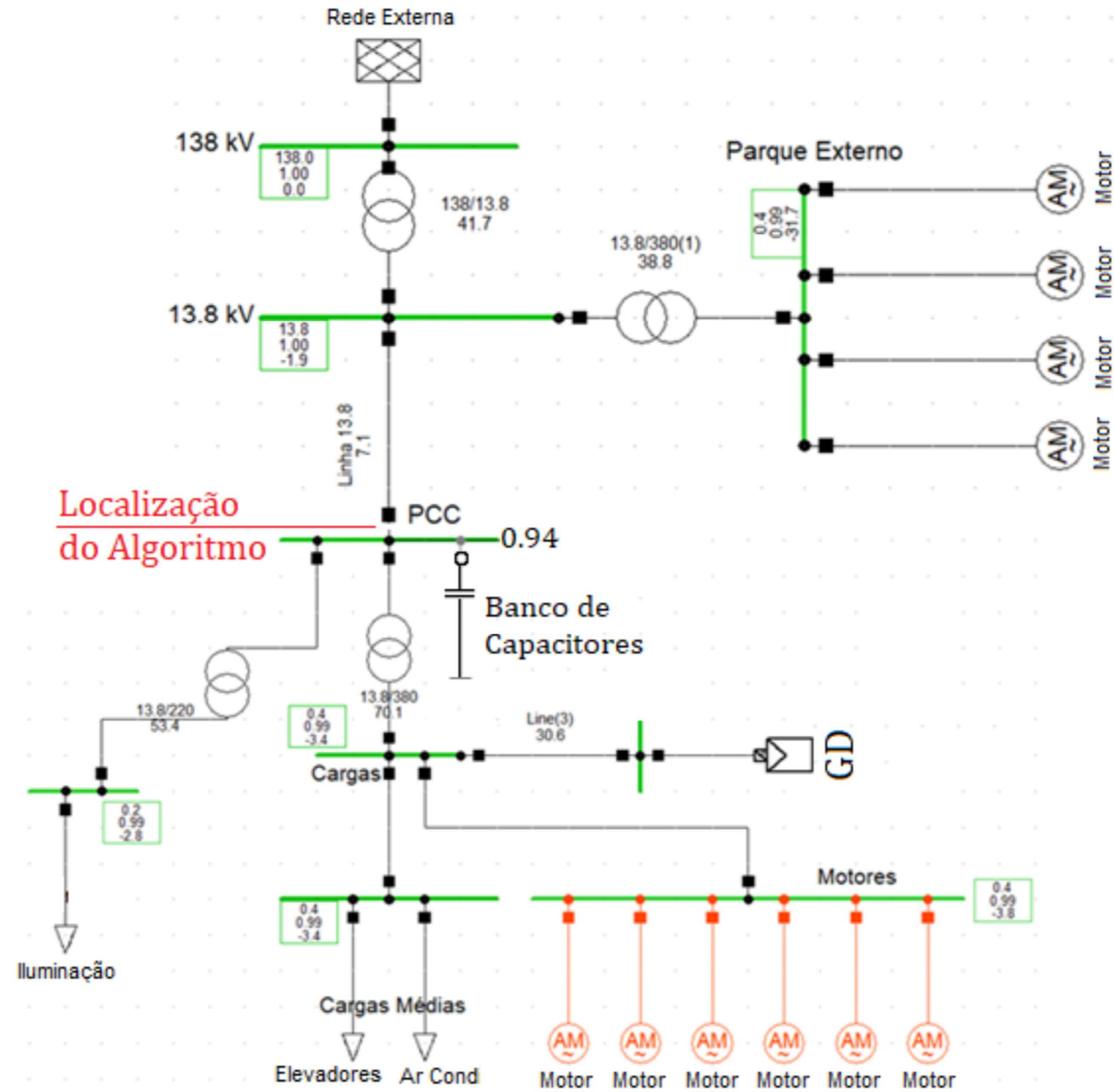
Fonte: O Autor

Tabela 6 – Configuração da Geração Distribuída Eólica (GDE).

<b>GD</b>	<b>Máquinas Paralelas</b>	<b>Potência (VA)</b>	<b>FP</b>
Gerador Eólico	5	30.000	0,88

Fonte: O Autor

Figura 20 – Instalação elétrica industrial conectada à rede

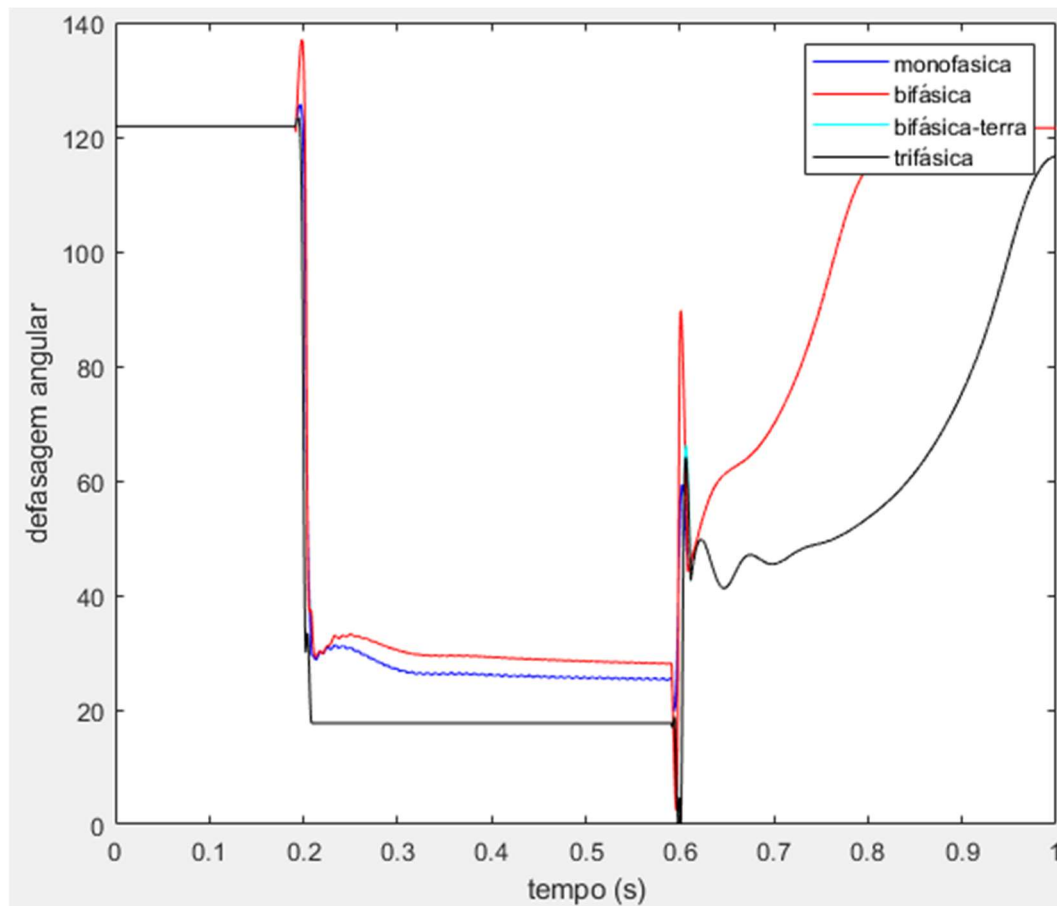


Fonte: O Autor

## 5.2 Validação da Similaridade de Cosseno (CS)

A título de validar as diferenças angulares obtidas por Saadat, Amin, et al, (2022), julgou-se necessário a verificação do conceito de similaridade de cosseno para a indústria simulada nessa dissertação. Para os parâmetros iniciais será verificado a variação da diferença angular no tempo, visto que há, nessa dissertação, um cenário específico para variações de resistência e distâncias de falta.

Figura 21 – Defasagem Angular  $I_{a1}$  e  $V_{bc1}$  faltas dentro da indústria.



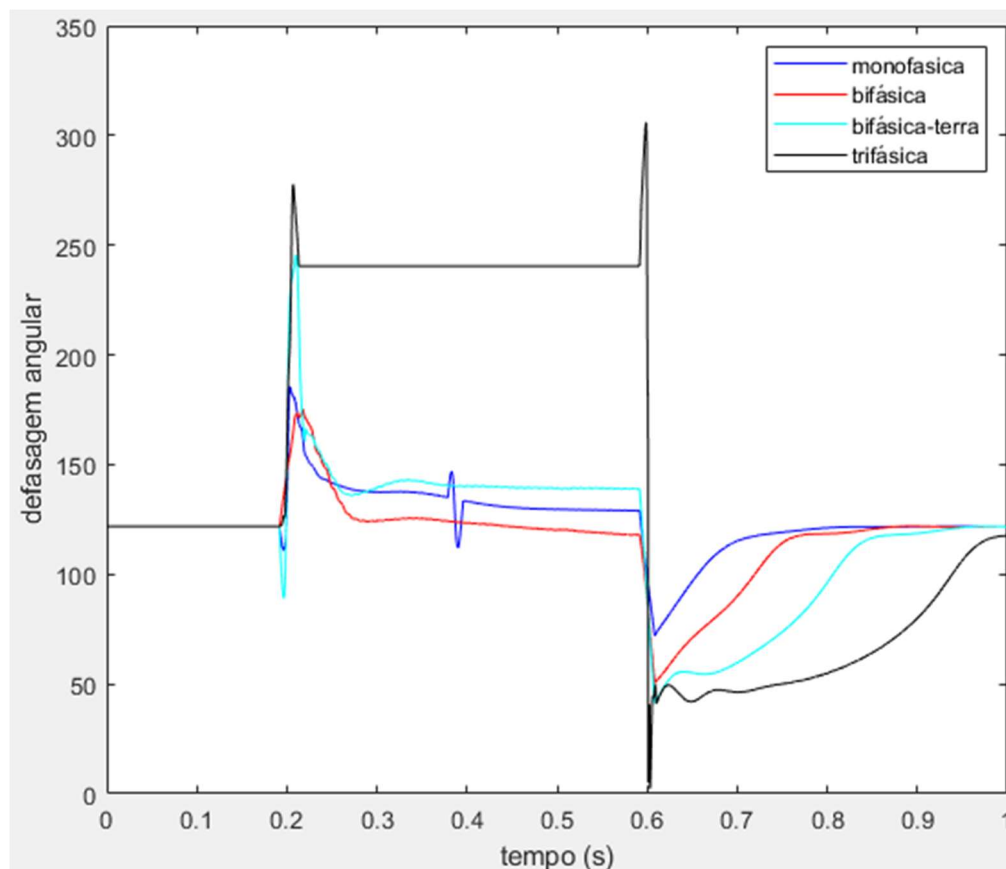
Fonte: O Autor

A Figura 21 descreve o comportamento da defasagem angular entre  $I_{a1}$  e  $V_{bc1}$  durante o período de simulação (1s). No instante 0,2 segundos ocorrem as faltas monofásicas, bifásicas, bifásicas-terra e trifásicas e as faltas são eliminadas em 0,6s. Observa-se que no período de falta a defasagem angular permanece entre zero e noventa graus, corroborando com as provas de Saadat, Amin, et al, (2022) apresentadas anteriormente. No instante 0,6 segundos, momento em que a falta é limpa e o sistema retorna para operação normal, é possível ver a defasagem angular

retornando para o valor de pré-falta. Isso é esperado, visto que o sistema, em condições normais de operação, é simétrico e equilibrado.

No âmbito das faltas ocorridas fora da instalação industrial é importante também fazer a verificação de defasagem angular para garantir a aplicabilidade do conceito em ambos os casos. Saadat, Amin, et al, (2022) apenas citaram que o comportamento seria o mesmo em seu artigo, sem prover os gráficos de defasagens angulares para faltas fora da instalação.

Figura 22 – Defasagem Angular  $I_{a1}'$  e  $V_{bc1}'$  faltas fora da indústria



Fonte: O Autor

A Figura 22 aponta a defasagem angular entre  $I_{a1}'$  e  $V_{bc1}'$  para faltas localizadas fora da instalação industrial.

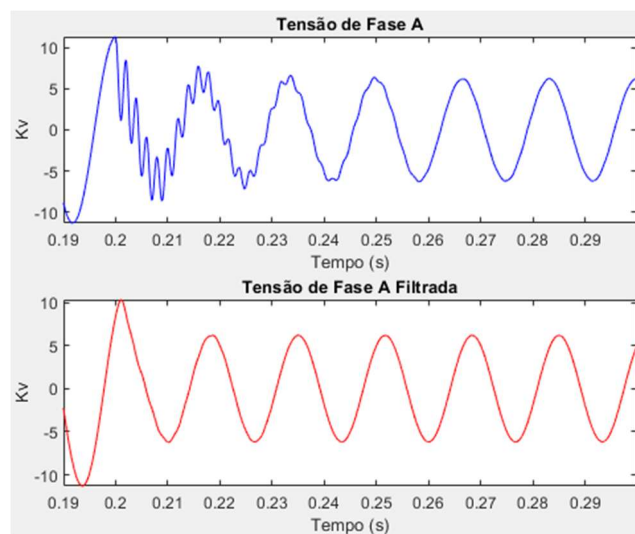
No instante 0,2 segundos ocorrem as faltas monofásicas, bifásicas, bifásicas-terra e trifásicas. Analogamente a Figura 20, é possível identificar um comportamento contrário da defasagem angular entre tensão e corrente, indicando que os fasores não permanecem mais no mesmo quadrante real – imaginário. A Figura 21 valida a

investigação proposta por Saadat, Amin, et al, (2022) no contexto de faltas fora da instalação industrial.

### 5.3 Resultados obtidos para os casos simulados

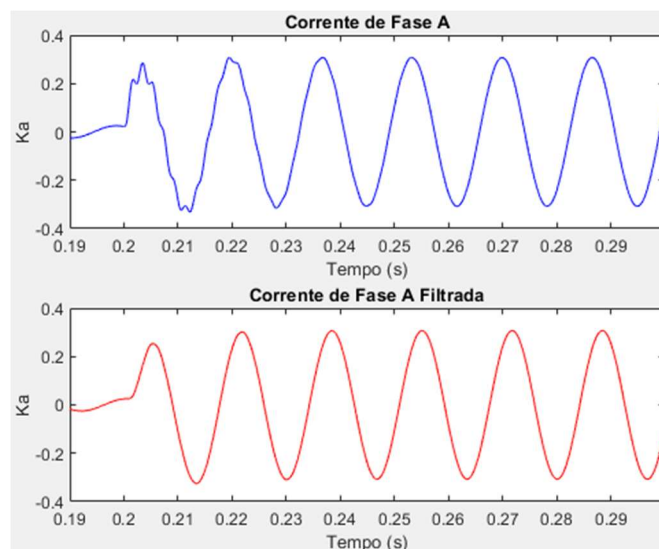
Serão apresentados, a priori, os resultados acerca da aquisição, filtragem e tratamento de dados. Para ilustrar o sinal trifásico adquirido e sua filtragem de harmônicas, apresentam-se as Figuras 23 e 24.

Figura 23 – Sinal de Tensão Fase A amostrado antes e depois da filtragem



Fonte: O Autor

Figura 24 – Sinal de Corrente Fase A amostrado antes e depois da filtragem

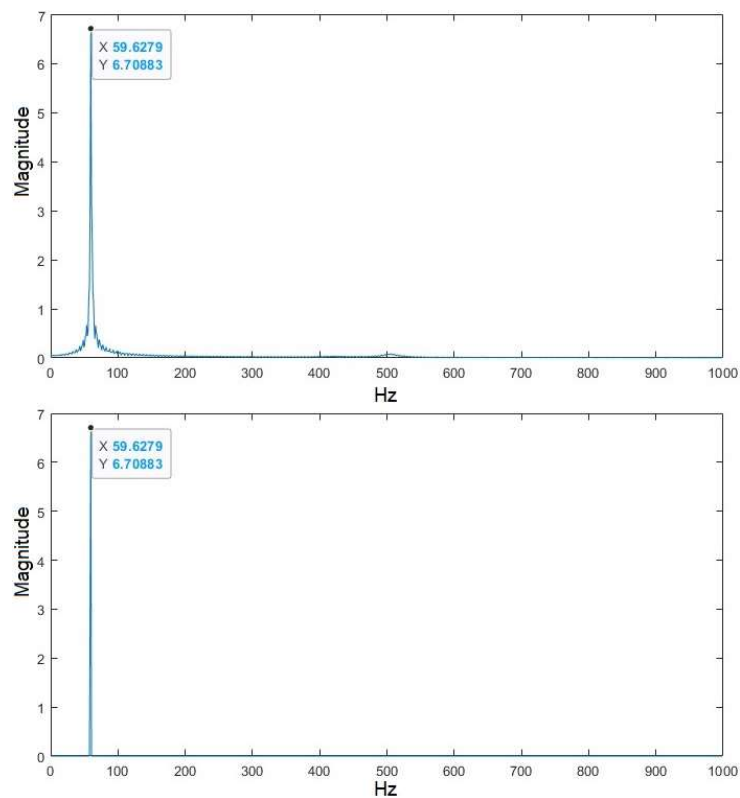


Fonte: O Autor

No instante de 0,2 segundos é possível visualizar nas Figuras 23 e 24 um alto nível de transitório e distorção de sinal. Nesse sentido, é fundamental adotar técnicas de processamento de sinais, como a Transformada Rápida de Fourier, para identificar e separar as componentes harmônicas de frequências indesejadas a fim de obter a componente fundamental que contém valores reais da tensão durante o processo de análise do distúrbio.

A Figura 25 apresenta o sinal de espectro de frequência para o sinal não filtrado e logo abaixo para o sinal já filtrado das componentes harmônicas de frequência maior.

Figura 25 - Sinal de Espectro harmônico antes e depois da filtragem



Fonte: O Autor

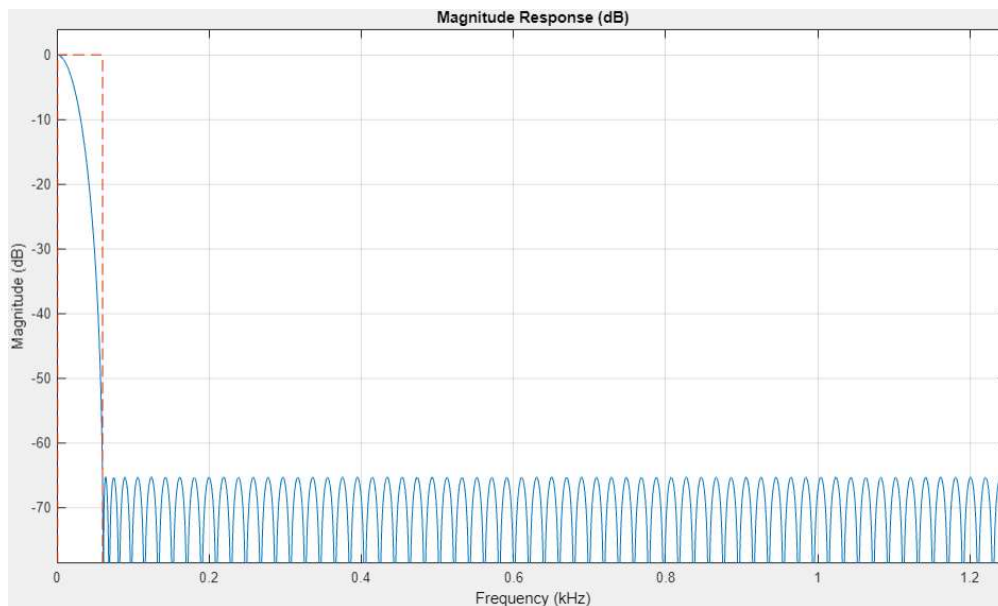
Notam-se distorções ao entorno da frequência de 60 Hz, frequência essa em que opera o sistema. Como dito anteriormente as distorções aparecem devido ao transitório que o sistema é submetido devido algum distúrbio elétrico. Nesse exemplo o distúrbio é uma falta assimétrica na linha de transmissão.

Com o objetivo de filtrar as componentes de alta frequência de um sinal, foi empregado um filtro que permite a atenuação de frequências superiores à frequência

de corte. Neste contexto, um filtro Butterworth de terceira ordem com resposta ao impulso infinita (IIR) foi selecionado, devido à sua característica de atenuação suave e de baixa distorção do sinal e é apresentado na Figura 26.

A banda de passagem do filtro foi ajustada em 60 Hz, e a frequência de corte em 80 Hz, resultando na supressão das frequências mais elevadas que são múltiplas da frequência fundamental do sinal.

Figura 26 – Atenuação do filtro IIR *Butterworth* Passa Baixas

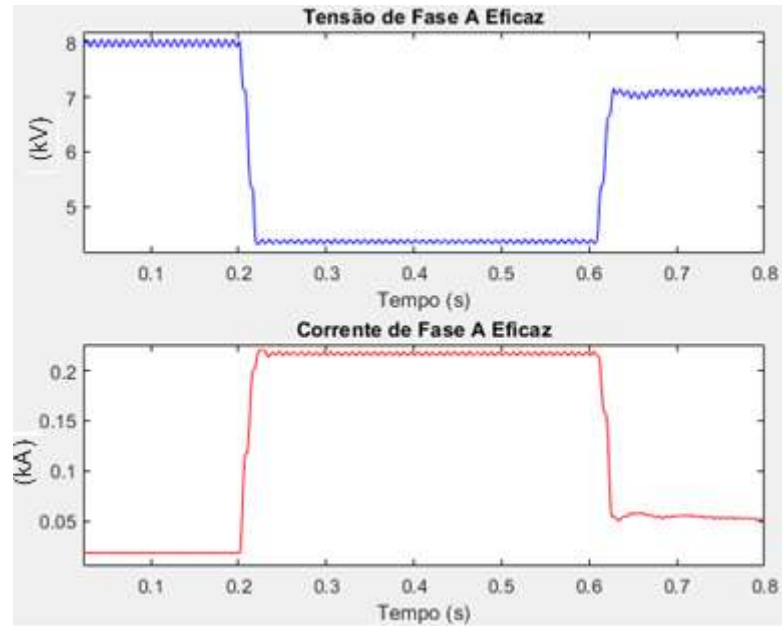


Fonte: O Autor

Após a filtragem das frequências harmônicas é necessário adquirir os sinais eficazes de tensão e corrente, através de uma janela móvel de ciclo de 60Hz.

Para a aquisição dos valores eficazes foi projetada uma janela móvel compatível com a frequência de 60 Hz e período de 0,00166 segundos do sistema para a transformação dos sinais. Essa janela é responsável por varrer o vetor de sinal amostrado transformando o sinal em eficaz como mostra o exemplo na Figura 27.

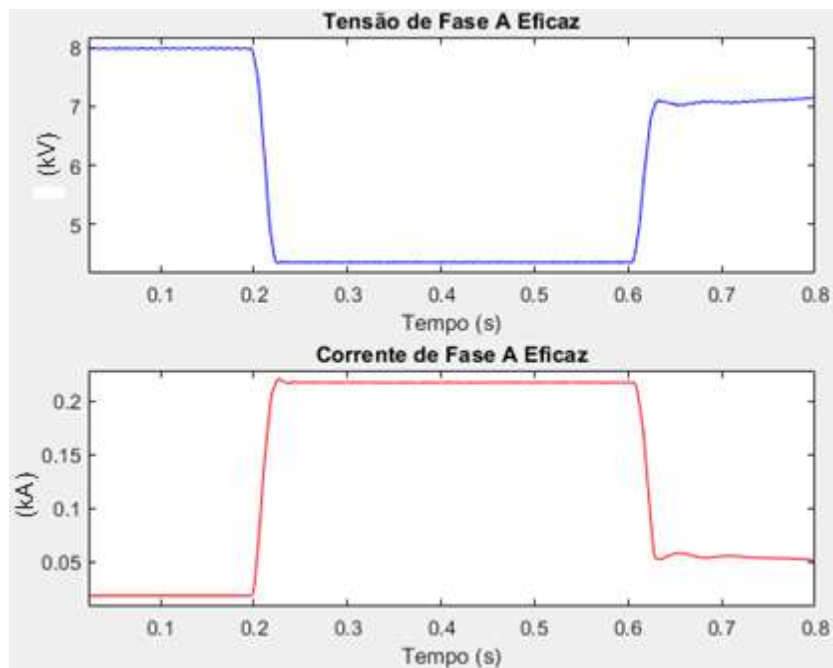
Figura 27 – Valores Eficazes de Tensão e Corrente de Fase A



Fonte: O Autor

Nota-se na Figura 27 pequenas oscilações de valores nas cristas e nos vales dos sinais. Isso deve-se ao fato de os sinais serem amostrados e reconstruídos a todo o tempo entre softwares (DigSilent para Matlab) e por fatores de arredondamento.

Figura 28 – Valores Eficazes de Tensão e Corrente após janela móvel



Fonte: O Autor

Na Figura 28 é apresentado o resultado da janela de média móvel empregada para essa dissertação. A janela de média móvel é responsável por tornar o sinal mais fluido, removendo as pequenas ondulações ditas anteriormente. A média é realizada a cada  $n = 1000$  amostras com overlap de  $n - 1$ .

Na Tabela 7, encontram-se apresentados os resultados das simulações considerando diferentes tipos de distúrbios, tais como faltas, partida de motores no barramento da indústria e partida em parques externos à instalação elétrica em estudo.

Tabela 7 – Resultados do cálculo da similaridade de cosseno (CS).

Distúrbio	Local do Distúrbio	Resistência ( $\Omega$ )	Distância (Km)	CS	Local
Falta Monofásica	Barramento de Motores da Indústria	0,10,50,100,150	0,05	Positivo	Jusante
Falta Monofásica	Barramento de Acoplamento (PAC) 13,8 KV		0	Negativo	Montante
Falta Monofásica	Barramento da Subestação 138 KV		10/20	Negativo	Montante
Falta Bifásica	Barramento de Motores da Indústria		0,05	Positivo	Jusante
Falta Bifásica	Barramento de Acoplamento (PAC) 13,8 KV		0	Negativo	Montante
Falta Bifásica	Barramento da Subestação 138 KV		10/20	Negativo	Montante
Falta Trifásica	Barramento de Motores da Indústria		0,05	Positivo	Jusante
Falta Trifásica	Barramento de Acoplamento (PAC) 13,8 KV		0	Negativo	Montante
Falta Trifásica	Barramento da Subestação 138 KV		10/20	Negativo	Montante
Partida	Barramento de Motores da Indústria	-	0	Positivo	Jusante
Partida	Parque Industrial Externo	-	10/20	Negativo	Montante

Fonte: O Autor

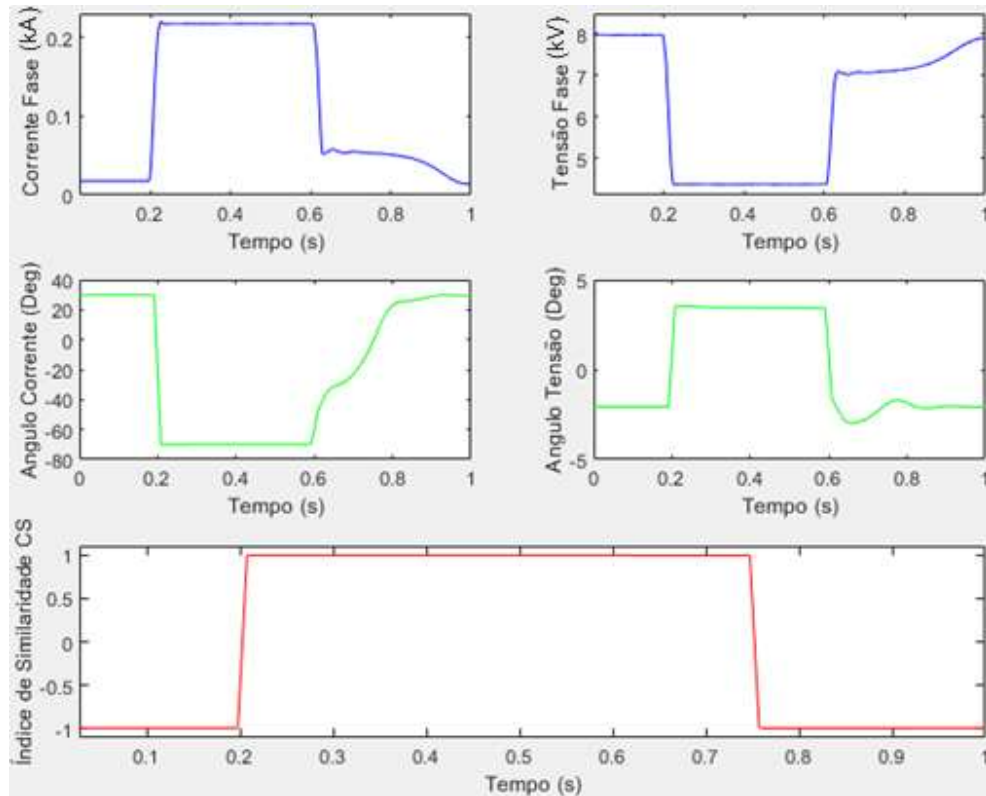
Observando as colunas “CS” e “Local” da tabela 7 é importante salientar que, para valores de CS entre 0 e 1, os fasores de tensão de linha e corrente de fase apresentam similaridade, indicando que a fonte causadora da queda de tensão encontra-se a jusante do medidor, ou seja, dentro da instalação industrial em relação ao ponto de investigação (PAC). Por outro lado, para valores de CS entre 0 e -1, os fasores de tensão de linha e corrente de fase apresentam dissimilaridade, evidenciando que a fonte causadora da queda de tensão se encontra a montante do medidor (no sistema elétrico externo a indústria em relação ao PAC). Cabe ressaltar que, para todos os casos simulados e apresentados na Tabela 7, o algoritmo proposto indicou corretamente o lado do PAC responsável pela queda de tensão.

Serão apresentados daqui em diante os resultados gráficos correspondentes à Tabela 7, com ênfase nas variações da curva do coeficiente de similaridade (CS) ao longo do tempo, desde o período de regime, para cada tipo de distúrbio simulado no sistema elétrico da Figura 20. Os valores de Tensão e Corrente (Magnitude e Ângulo de Fase) são referentes aos sinais medidos no Ponto de Conexão da indústria (PAC).

É de imensa importância que seja definido o instante de interesse, para o método e para essa dissertação, para os casos simulados. A restauração do sistema após um distúrbio e o tempo que isso é necessário são de responsabilidade única do fornecedor de energia. Sendo assim, o método, que é responsável por atribuir direcionalidade, não tem interesse no instante de restituição de regime (0,6 segundos). Apenas no instante de aplicação do distúrbio (0,2 segundos).

As curvas apresentadas na Figura 29 são resultados do coeficiente de similaridade (CS) para faltas monofásicas, bifásicas fase-fase e trifásicas no barramento de motores da indústria.

Figura 29 – Falta Monofásica no barramento de motores da indústria



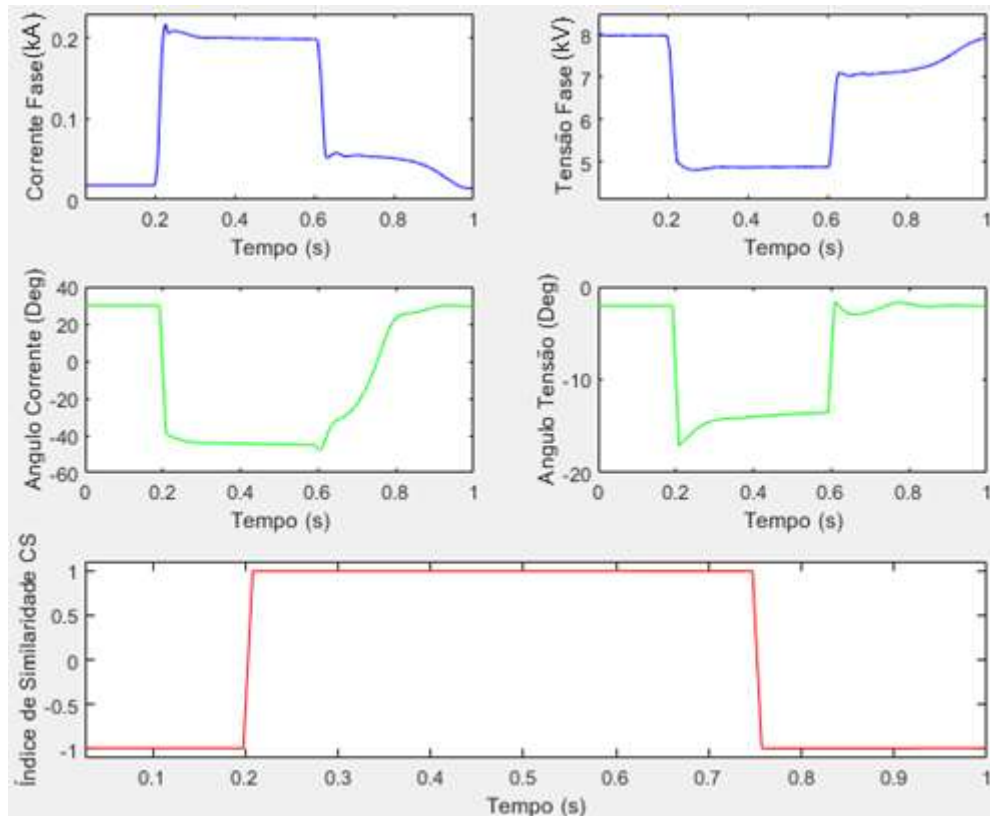
Fonte: O Autor

Observa-se que o algoritmo desempenhou com precisão a determinação da localização da falta, considerando que, de acordo com a Tabela 7, a perturbação ocorreu no Barramento de Motores da Indústria, ou seja, a jusante do ponto de medição (internamente a indústria).

Desse modo, foi possível identificar a variação do valor de CS de -0,988 para 0,994, permanecendo entre zero e um durante a ocorrência da falta, o que confirma a validade da teoria apresentada no Capítulo 4 e a eficácia do algoritmo para este tipo de perturbação. Ainda é válido ressaltar que durante a falta, a magnitude de tensão teve uma redução de aproximadamente 45,43% (4,36 kV), enquanto a magnitude da corrente teve um aumento de 1135,3% (0,21 kA).

As curvas apresentadas na Figura 30 são resultados do coeficiente de similaridade (CS) para falta bifásicas fase-fase no barramento de motores da indústria.

Figura 30 – Falta Bifásica no barramento de motores da indústria



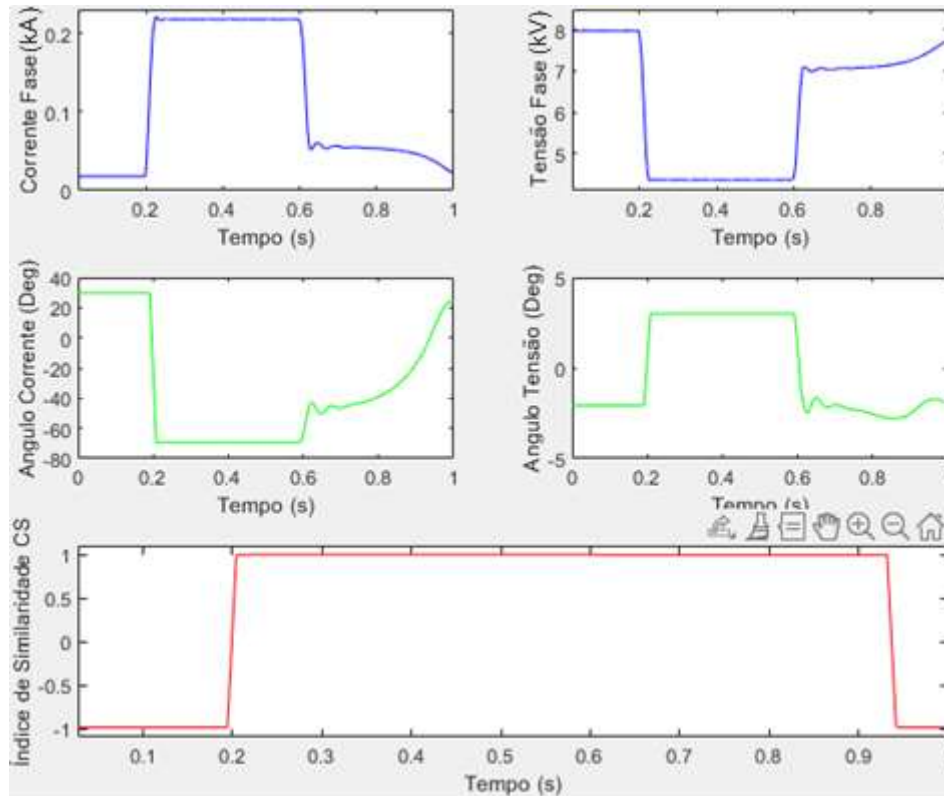
Fonte: O Autor

De forma análoga aos resultados obtidos para a falta monofásica no barramento de motores da indústria, o coeficiente de similaridade (CS) também confirma a teoria discutida no Capítulo 4 e reforça a eficácia do método também para faltas bifásicas.

O valor de CS foi de -0.988 para 0.992 e foi identificado na região entre zero e um positivo, indicando a localização da falta a jusante do ponto de medição (Internamente), validado na tabela 7 pela coluna "Local do Distúrbio". Durante a falta a magnitude de tensão foi reduzida em 39,93% (4,8 kV), enquanto a magnitude da corrente aumentou em 1135,2% (0,213 kA)

As curvas apresentadas na Figura 31 são resultados do coeficiente de similaridade (CS) para falta bifásica-terra no barramento de motores da indústria.

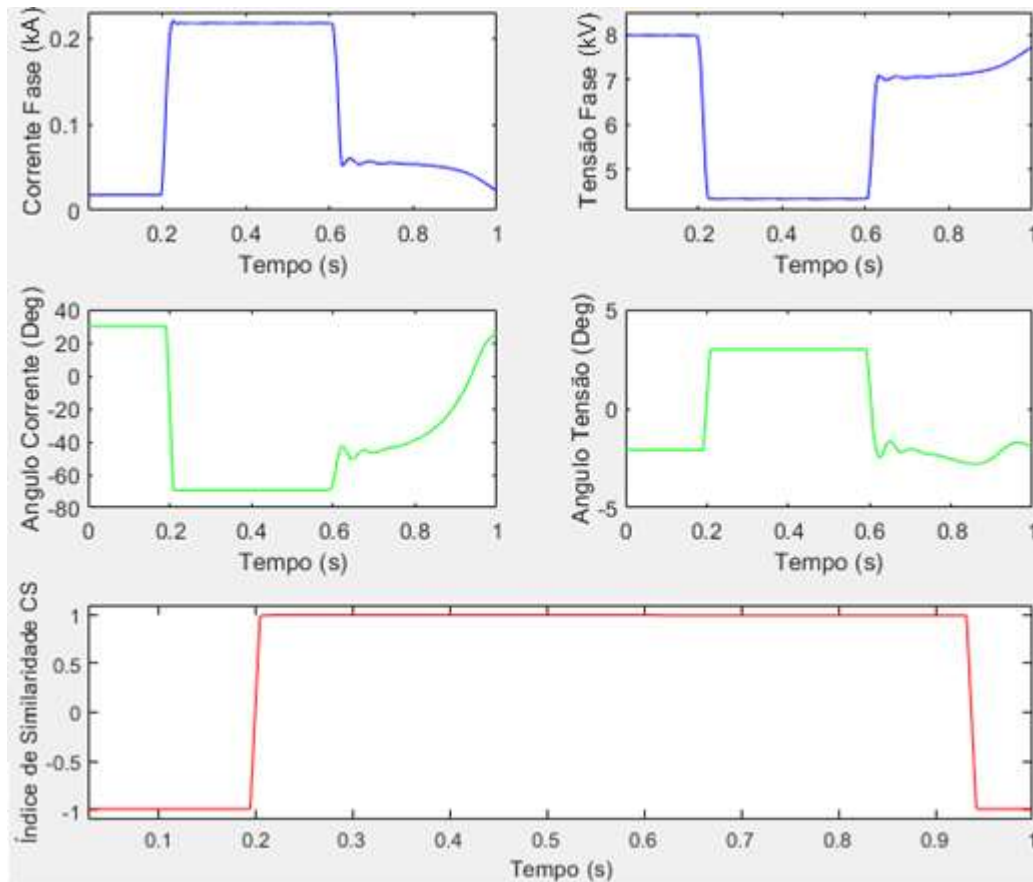
Figura 31 – Falta Bifásica Terra no barramento de motores da indústria



Fonte: O Autor

Os resultados obtidos para a falta bifásica-terra, como penúltima falta selecionada para o barramento de motores, estão em consonância com as conclusões apresentadas anteriormente, corroboradas pela Tabela 7 e respaldadas pela teoria discutida no Capítulo 4. Com efeito, para a falta simulada, o valor de tensão foi reduzido em 45,56% (4,35 kV), enquanto a corrente foi elevada em 1135,3% (0,213 kA). O coeficiente de similaridade CS variou de -0,988 para 0,996, sendo observado na faixa de valores entre zero e um positivo, o que indica, em conformidade com os achados até aqui apresentados, uma localização da falta a jusante do ponto de medição (sentido da indústria), de acordo com as expectativas teóricas já validadas.

Figura 32 – Falta Trifásica no barramento de motores da indústria

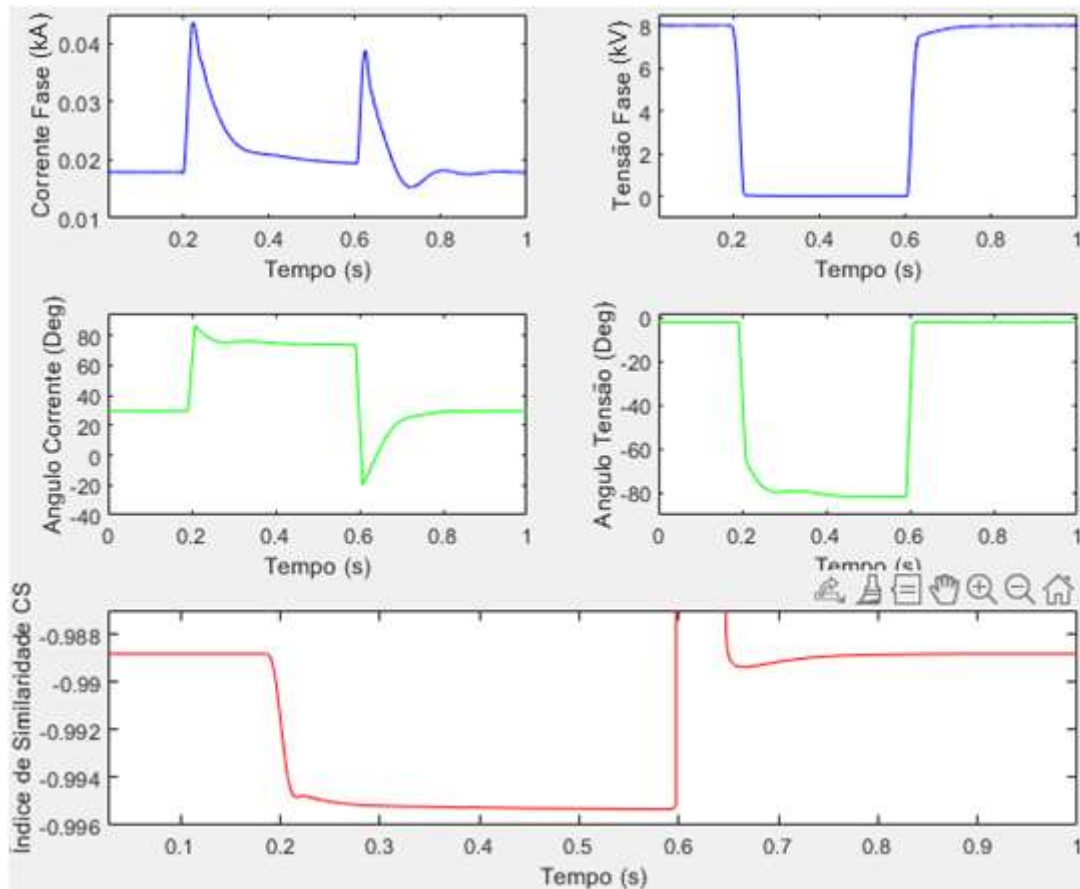


Fonte: O Autor

Os resultados obtidos para falta trifásica, como última falta a ser aplicada no barramento de motores da indústria mostram a robustez do método em avaliar precisamente tanto faltas assimétricas como faltas simétricas. Para essa situação simulada, os valores de tensão foram reduzidos em 45,56% (4,35 kV), enquanto os valores de corrente foram aumentados em 1135,7% (0,217 kA). O valor de CS foi alterado de -0,988 para 0,999, apresentando-se entre zero e um positivo durante a falta, o que reforça, até o momento, a eficácia do método para faltas a jusante do medidor.

Uma simulação de falta foi experimentada no barramento de 13,8 kV, apresentado na Figura 20, como sendo o primeiro barramento após o Ponto de acoplamento (PAC) e a linha de transmissão de 10 Km. Nas Figuras 33, 34, 35 e 36 são apresentados os resultados para o próximo grupo de faltas, seguindo o exemplo do barramento de motores. Faltas monofásicas, bifásicas, bifásicas-terra e trifásicas.

Figura 33 – Falta monofásica no barramento de 13,8 kV



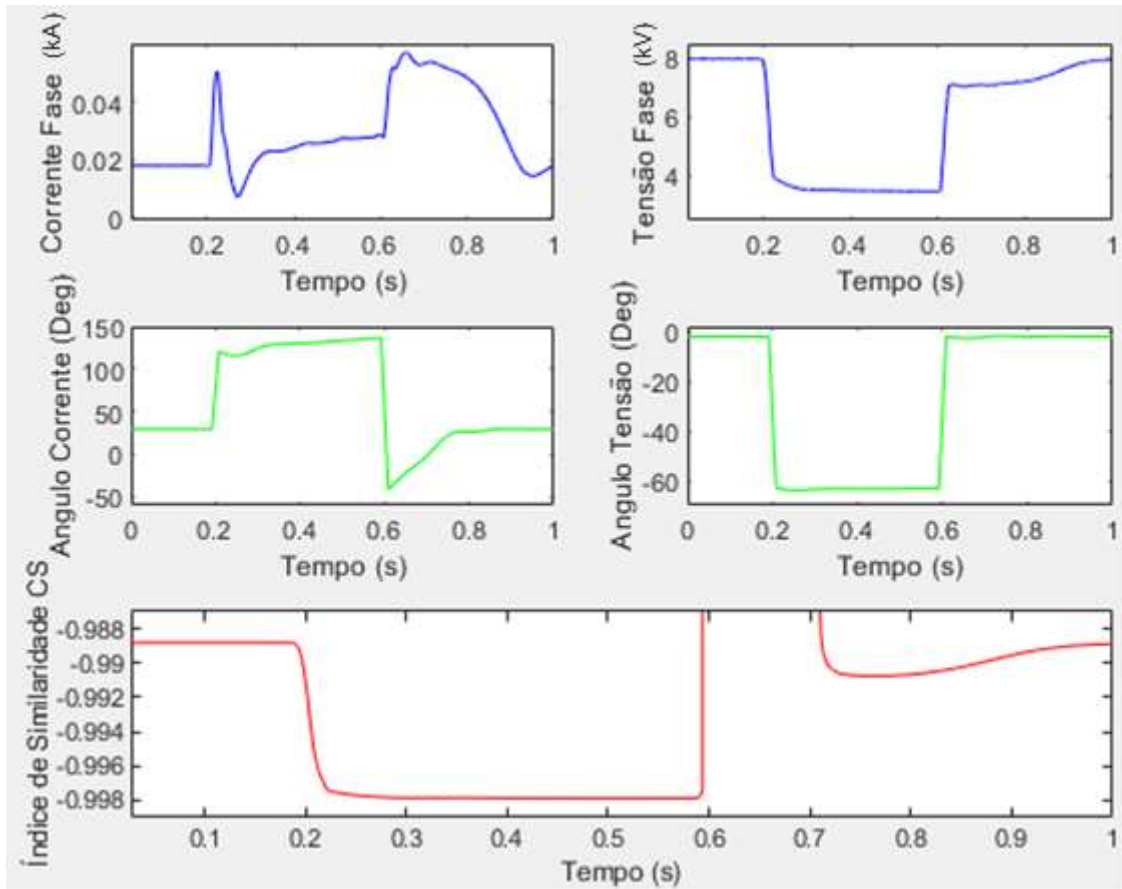
Fonte: O autor

Para esse novo experimento, o algoritmo, até então, apresentou-se de maneira esperada e indicou no momento da aplicação da falta (0,2 segundos) um valor de CS que confirma o local do distúrbio. O valor de CS variou de -0,988 para -0,995, apresentando uma sensibilidade na ordem de  $7,1 \cdot 10^{-4}$ .

É importante salientar nesse momento, como primeira falta a montante do ponto de investigação, que a sensibilidade do método é de uma ordem de grandeza satisfatória visto que, um sistema operando em regime não tem alteração do valor do CS, como mostra o gráfico para tempos menores que 0,2 segundos (CS = -0,988). Isso demonstra que: o que realmente importa para esse algoritmo é o instante da aplicação da falta (0,2 segundos) e não o período posterior como, por exemplo, de retorno do sistema as condições normais de operação após a extinção da falta pela proteção.

A tensão teve uma redução de 99,31% (0,0547 kV) enquanto a corrente teve um aumento de 156,47% (0,0436 kA).

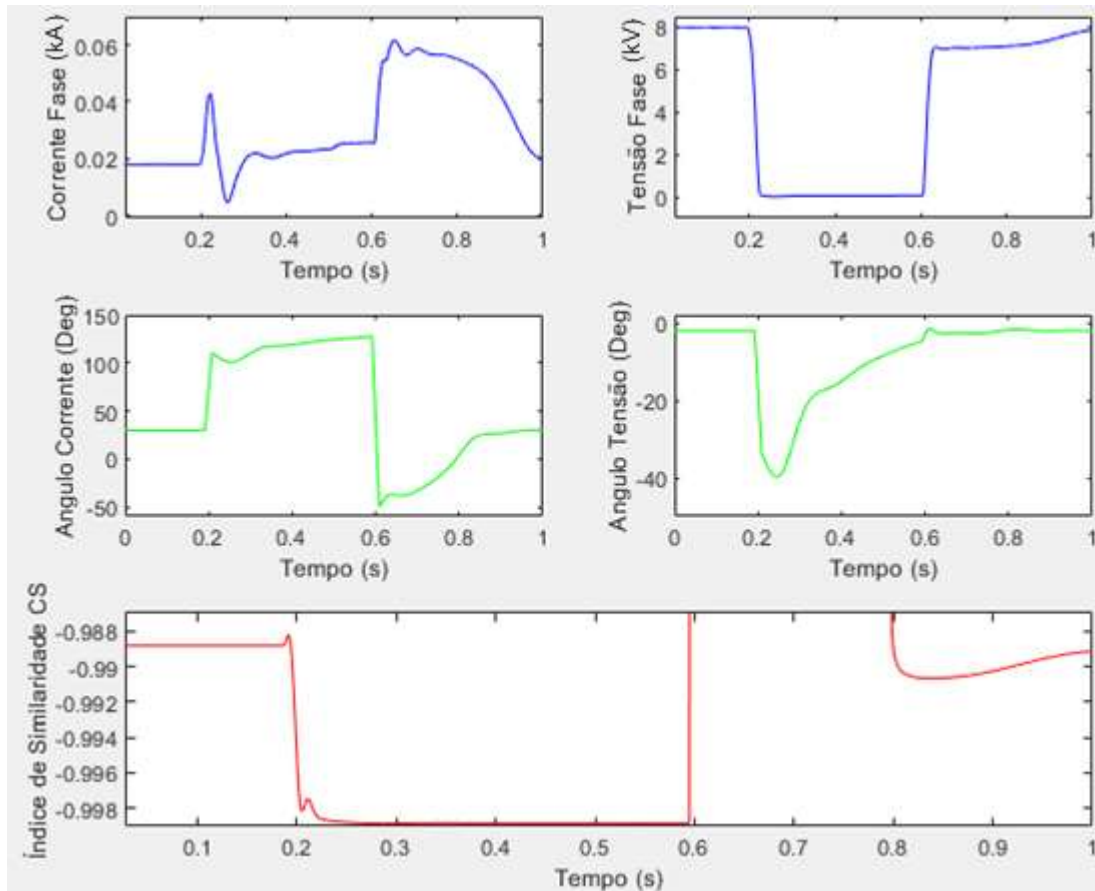
Figura 34 – Falta Bifásica no barramento de 13,8 kV



Fonte: O Autor

Mais uma vez o método aponta uma localização da falta bifásica de maneira coerente. O valor de CS variou de - 0,9888 para - 0,9978. Uma ordem de grandeza de  $9,0 \cdot 10^{-4}$ , ainda mostrando uma sensibilidade satisfatória. O valor de redução da tensão foi de 43,92% (3,51 kV) e o valor de aumento da corrente foi de 196,47% (0,05 kA).

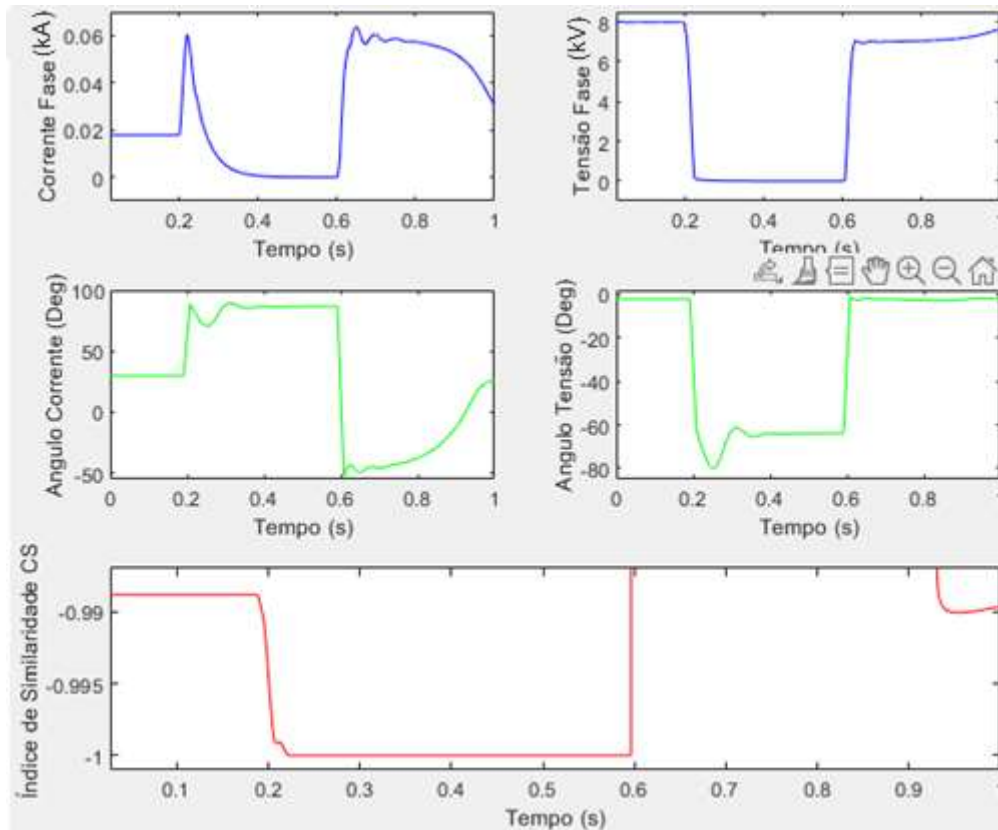
Figura 35 – Falta Bifásica-Terra barramento de 13,8 kV



Fonte: O Autor

Da mesma forma que no barramento de motores a falta bifásica e a falta bifásica-terra tiveram comportamentos semelhantes de valor de CS. A variação apresentada foi de -0,988 para -0,998, uma ordem de sensibilidade de  $10^{-3}$ . A tensão teve uma redução de 99,38% (0,05 kV) enquanto a corrente teve um aumento de 152,35% (0,0429 kA).

Figura 36 – Falta Trifásica barramento 13,8 kV

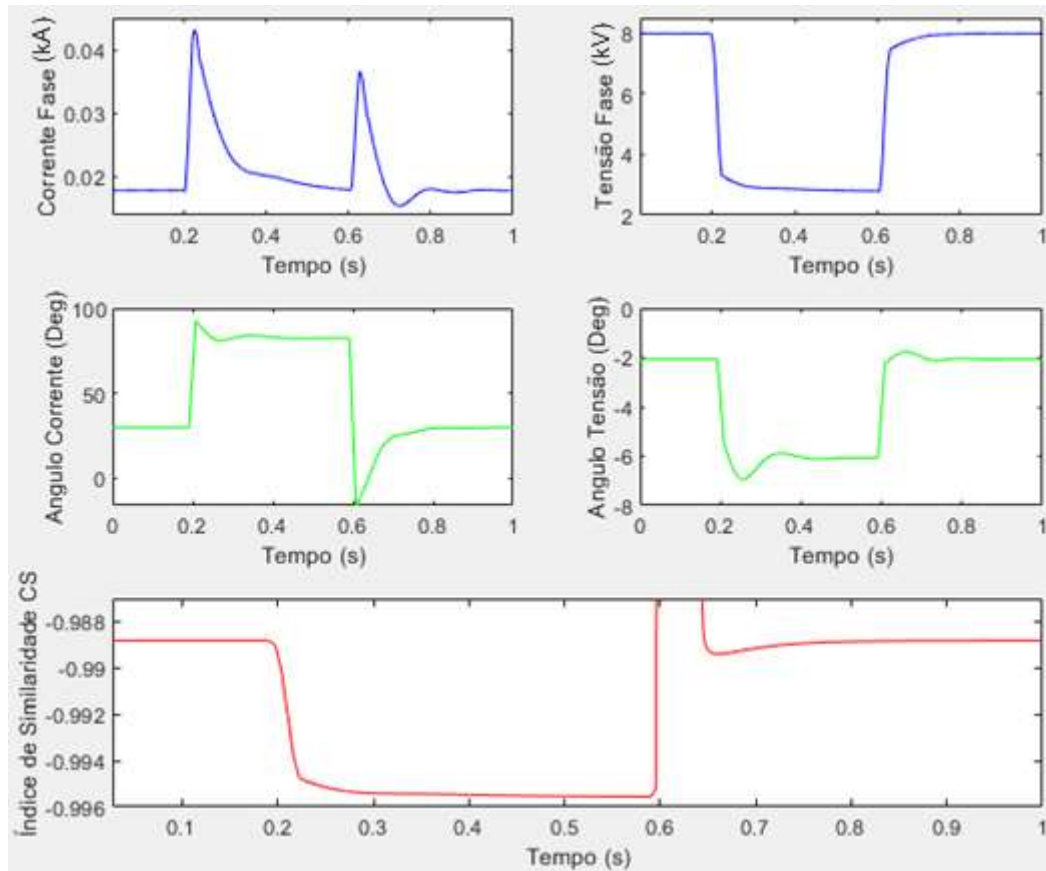


Fonte: O Autor

Para a falta trifásica a variação de CS é mais expressiva entre as anteriores do mesmo barramento. O valor variou de -0,9888 para -1, indicando uma ordem de grandeza de  $1,12 \cdot 10^{-3}$ . A tensão foi reduzida de 99,83% (0,013 kV) e a corrente foi aumentada de 252,94% (0,06 kA).

O próximo local a ser analisado será o barramento da subestação 138 kV, indicado na Figura 20 adjacente a External Grid, que representa uma subestação para esse sistema. Serão empregadas faltas monofásicas, bifásicas, bifásicas-terra e trifásicas, representadas nas Figuras 37, 38, 39 e 40. O desafio para esse tipo de localização é a proximidade com a barra de referência do sistema como um todo e a distância da geração distribuída da indústria.

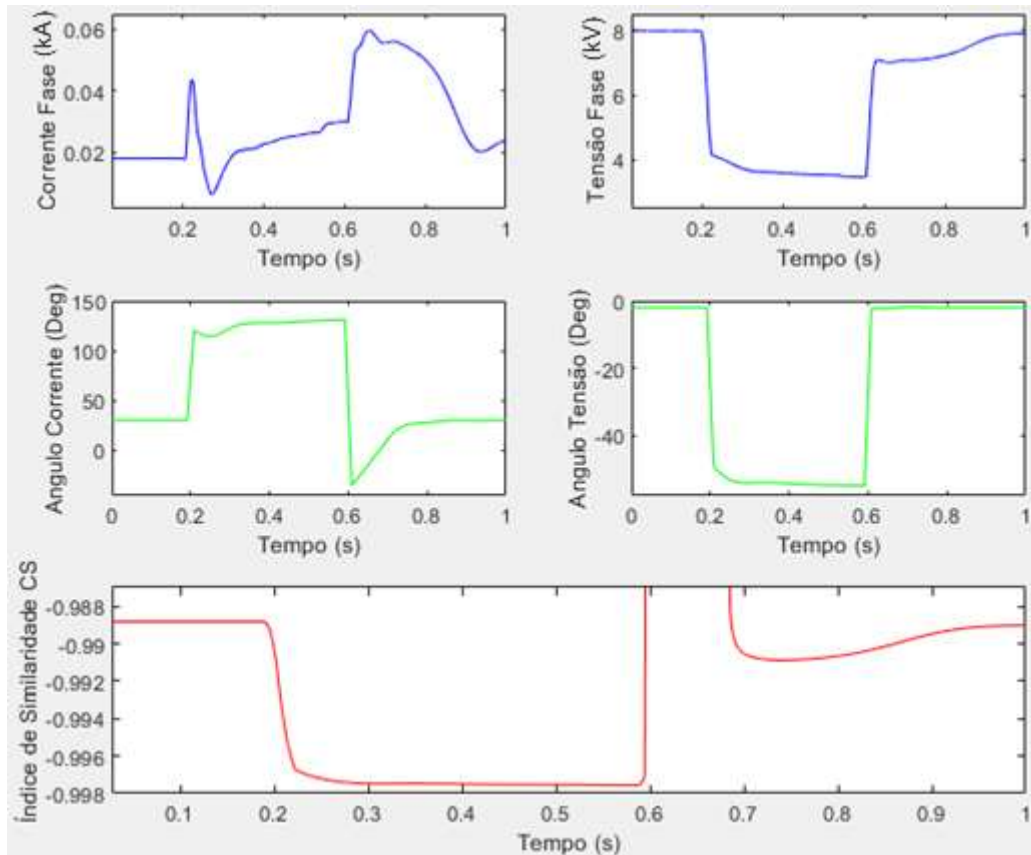
Figura 37 – Falta Monofásica no barramento da subestação de 138 kV



Fonte: O Autor

O método foi capaz de indicar de maneira robusta o sentido da falta apesar dos desafios apresentados no parágrafo anterior. O valor de CS variou de -0,9888 para -0,9954, uma ordem de sensibilidade de  $6,6 \cdot 10^{-4}$ . É importante salientar, para essa primeira análise de falta, que: para o método da similaridade de cosseno, a distância entre a falta em si e outra geração de energia (barra de referência do sistema), não apresenta impacto de performance. A tensão foi reduzida em 63,78% (2,894 kV) e a corrente foi aumentada em 156,47% (kA).

Figura 38 – Falta Bifásica no barramento da subestação de 138 kV

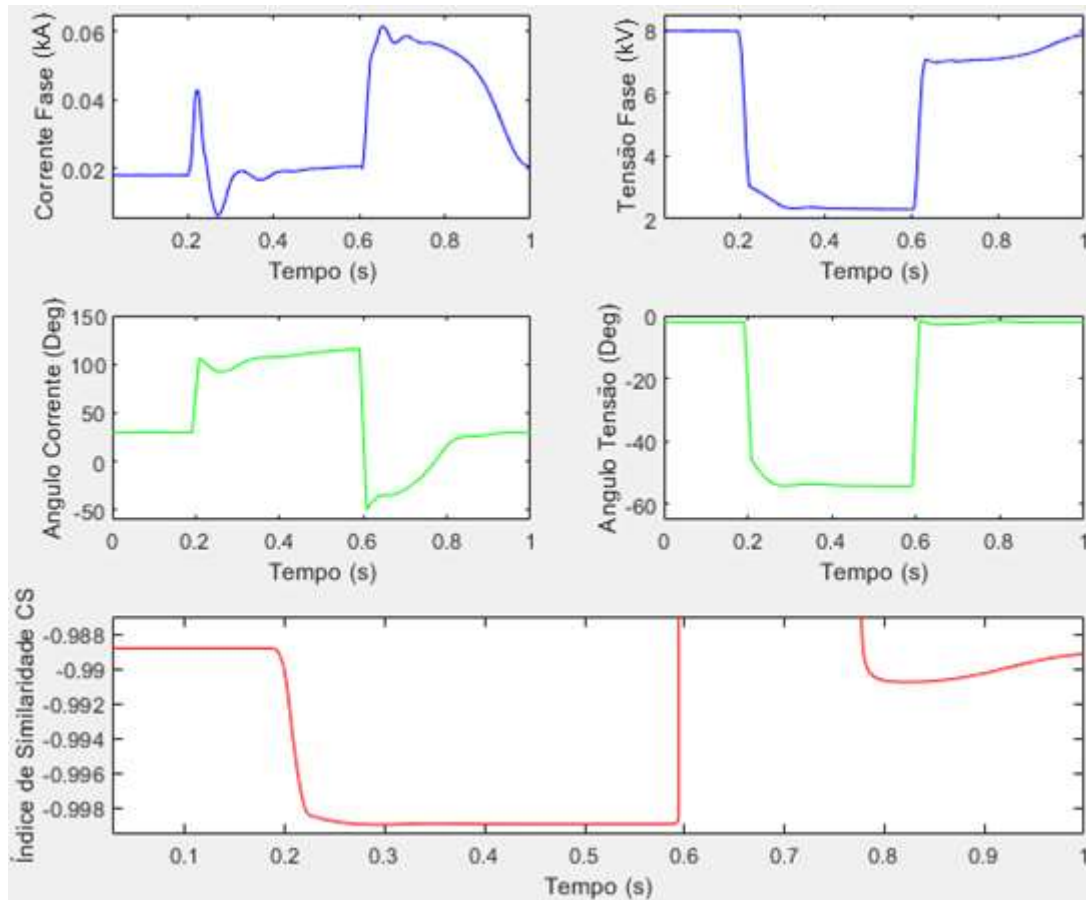


Fonte: O Autor

Os resultados apresentados na Figura 38 mostram a robustez do método perante diferentes faltas, como já apresentado anteriormente. O valor de CS variou de -0,988 para -0,997, uma ordem de grandeza de  $9 \cdot 10^{-4}$ , menor que a anterior, mas ainda assim na faixa de expressividade até agora vista.

A tensão foi reduzida de 54,94% (3,6 kV) e a corrente foi aumentada de 155,29% (0,0434 kA). Os valores de variação de tensão e corrente também se mantêm na faixa até agora já encontrada.

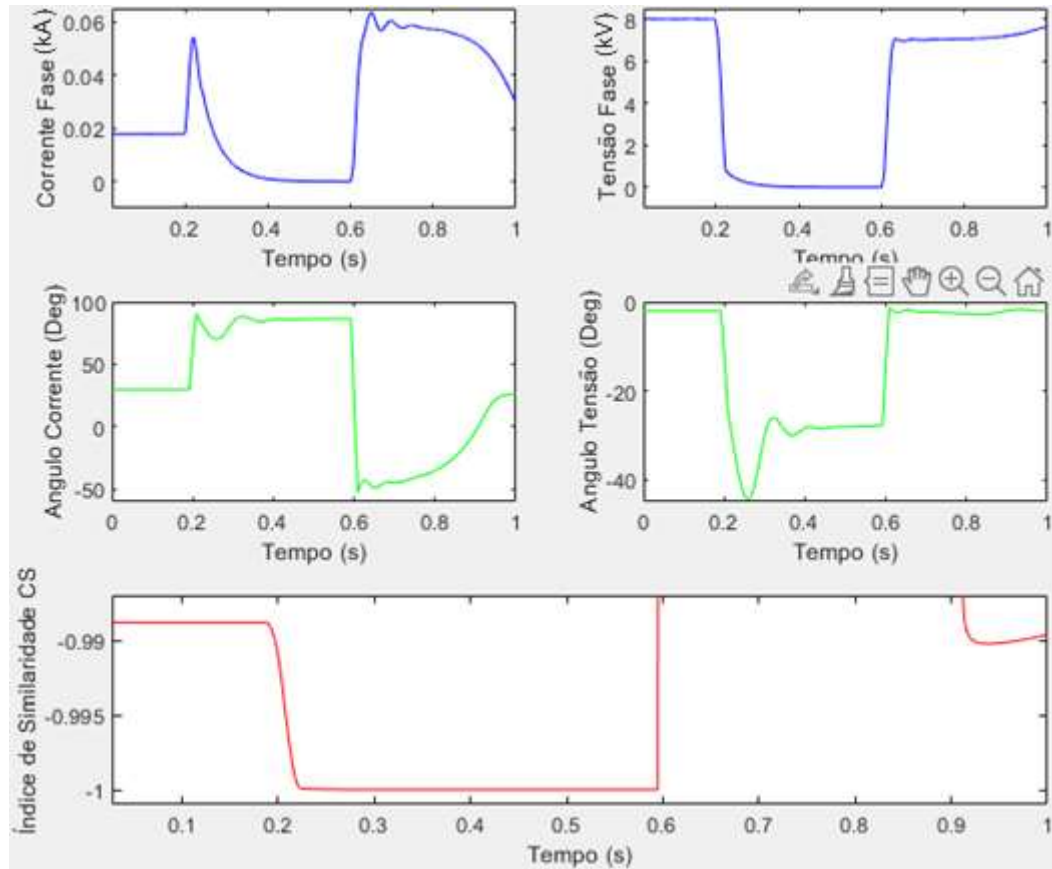
Figura 39 – Falta Bifásica-Terra no barramento da subestação 138 kV



Fonte: O Autor

Os resultados obtidos para a falta bifásica terra foram próximos dos valores anteriores. O CS variou de -0,988 para -0,998, uma ordem de grandeza de  $10^{-4}$ . A tensão foi reduzida de 70,71% (2,34 kV) enquanto a corrente foi elevada de 151,76% (0,0428 kA).

Figura 40 – Falta Trifásica barramento da subestação 138 kV



Fonte: O Autor

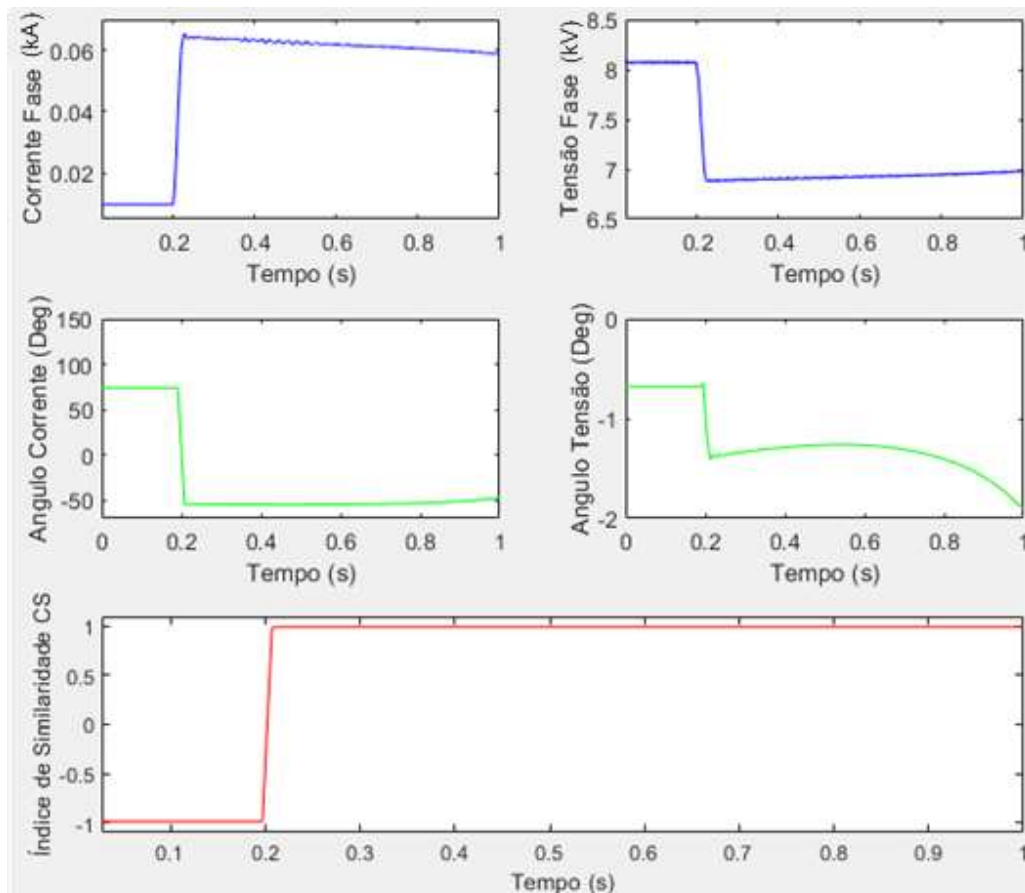
Para finalizar a simulações no barramento da subestação de 138 kV, foi simulada uma falta trifásica no barramento para testar a variabilidade do método. Como esperado o valor de CS foi indicado corretamente sendo que o distúrbio está localizado a montante do Ponto de Acoplamento, externamente a instalação industrial.

A variação de CS partiu de -0,988 para -1, apresentando uma ordem de grandeza de sensibilidade de  $1,12 \cdot 10^{-3}$ , dentro da faixa encontrada até agora, indicando uma alta acurácia e baixa variabilidade de precisão. O valor da tensão foi reduzido de 98,49% (0,12 kV) e um aumento de corrente de 217,64% (0,054 kA).

O próximo passo para validar o método e verificar sua estabilidade e confiabilidade são as simulações de partida de motores. Essa análise foi empregada para avaliar a capacidade do método em identificar corretamente a localização de quedas de tensão durante a manobra de grandes cargas no sistema elétrico. Este teste foi considerado de grande relevância, tendo em vista a necessidade de garantir a eficácia do algoritmo em situações de grande demanda energética.

Foram realizadas simulações de partida de motores em duas situações distintas. Na primeira, foi simulada a partida dos motores a partir do sistema interno da indústria, visando testar a sensibilidade do algoritmo em detectar a manobra dentro do próprio sistema. Já na segunda situação, foi simulada a partida de motores em um parque externo localizado a 10 quilômetros do sistema industrial em análise, a fim de avaliar a capacidade do método em identificar a manobra em um parque industrial externo.

Figura 41 – Partida de motores internos

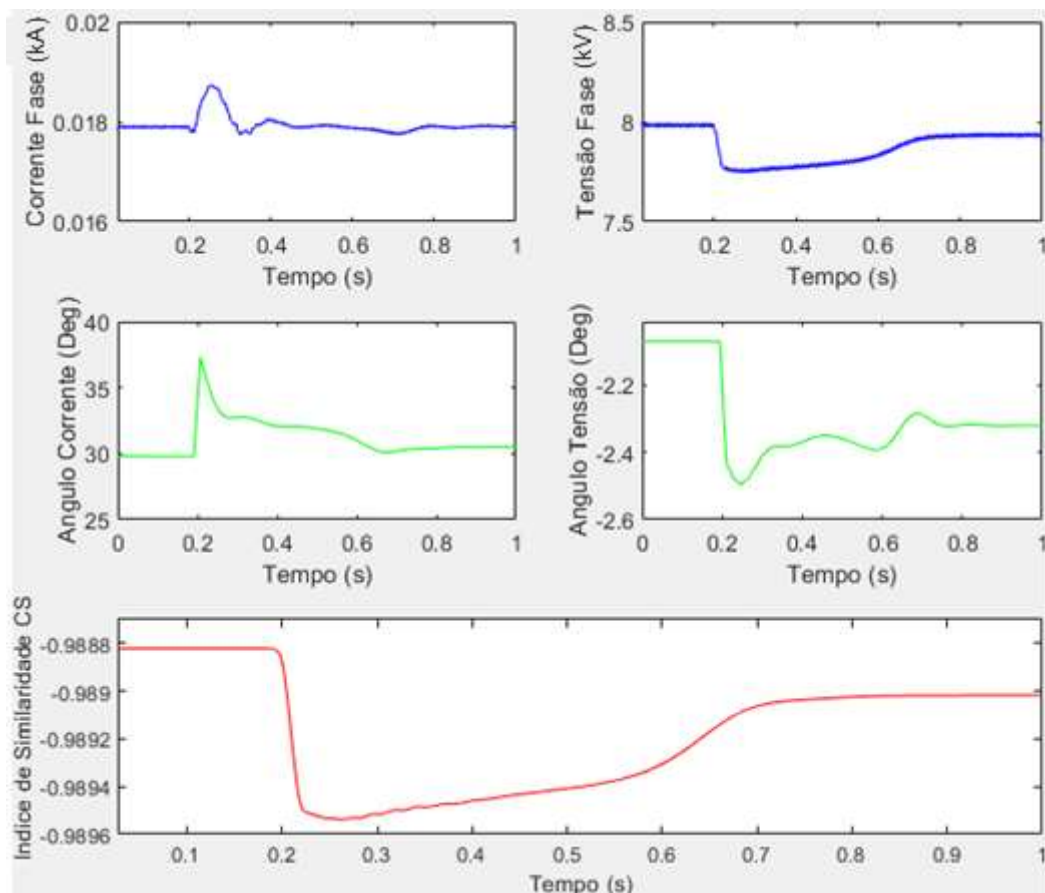


Fonte: O Autor

Para a partida interna o valor do coeficiente de similaridade variou entre -0,988 até 1, permanecendo na região entre zero e um positivo durante a partida e indicando o distúrbio a jusante do ponto de medição (interno a indústria).

Importante salientar a validade do algoritmo em analisar esse tipo de distúrbio visto que é extremamente comum em parques industriais. A partida de motores sem os devidos métodos de partida pode apresentar problemas no âmbito das VTCDs.

Figura 42 – Partida de parque industrial externo



Fonte: O Autor

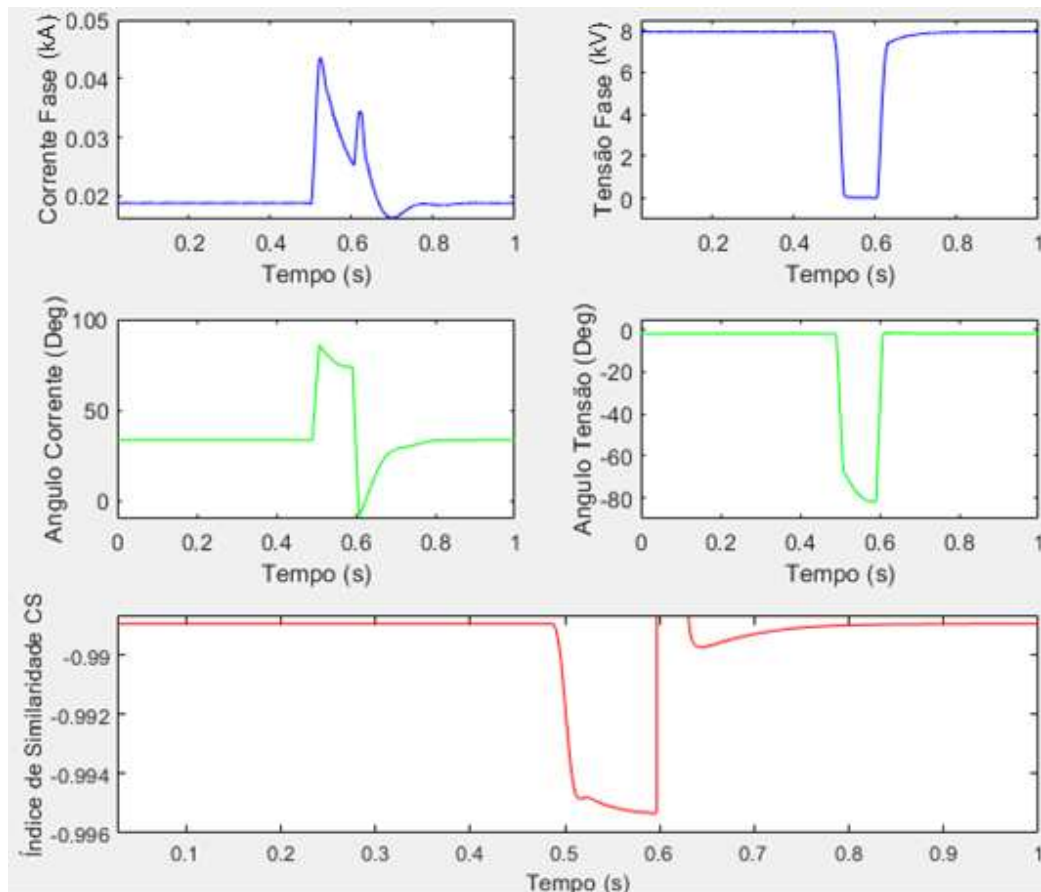
De acordo com as normas da CPFL GED-10099 (2023), motores de potência nominal de até 75 cv (55 kW) não caracterizam cargas potencialmente perturbadoras de modo individual. Portanto, para testar o método proposto foi adotado um único motor de potência de 55 kW, de modo a verificar distúrbios associados a partida direta do motor e estudar o nível de sensibilidade em relação a potência.

Para a partida do parque externo, o coeficiente de similaridade variou de -0,988 para -0,9895, uma ordem de grandeza de  $1,5 \cdot 10^{-4}$ , o que não difere dos níveis de

precisão já apresentados anteriormente. Isso indica uma robustez em relação ao nível de potência instalado em parques externos a fim de ser detectada a partida. O valor de CS permaneceu na região entre zero e um negativo, indicando o distúrbio a montante do ponto de medição (externo a instalação) como esperado. Tais resultados evidenciam a eficácia do método para análise de distúrbios em sistemas elétricos com presença de parques industriais externos.

Adicionalmente o método proposto foi testado considerando faltas transitórias. Em um primeiro teste (Figura 43), o algoritmo é submetido a uma falta em 0,5s com duração de 0,1s no barramento de 13,8 kV gerando uma VTDC com um afundamento momentâneo de tensão. Em um segundo momento (Figura 44), o método é submetido a uma falta com duração menor que um ciclo.

Figura 43 – Afundamento Momentâneo de Tensão



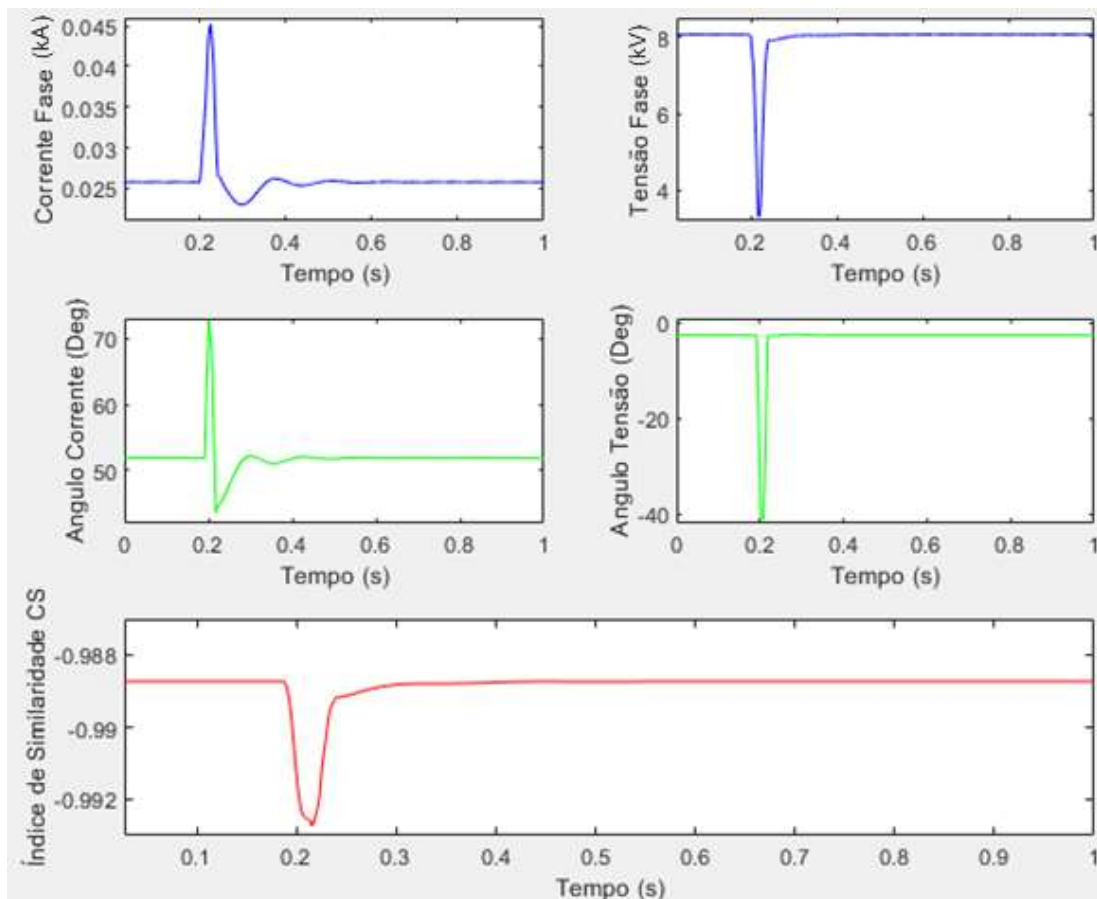
Fonte: O Autor

De acordo com os resultados apresentados na Figura 43 o método provou ser sensível para afundamentos momentâneos de tensão de duração superior ou igual a um ciclo e inferior ou igual a três segundos). Esse resultado tem um valor muito

expressivo para a validação do método visto que, com duração mínima, ele é capaz de identificar que o distúrbio foi gerado externamente à instalação, que, nesse caso, foi uma falta monofásica temporária no barramento de 13,8 kV. O valor de CS variou de -0,988 para 0,994 e a ordem de grandeza foi de  $6 \cdot 10^{-4}$  permanecendo na faixa de grandezas que já foram apresentadas.

Na Figura 44 o método é testado para a mesma condição de falta da Figura 43 ocorrendo em 0,2s porém com uma duração dez vezes menor (0,01s), configurando um distúrbio de menor duração que um afundamento momentâneo de tensão.

Figura 44 – Afundamento Momentâneo de Tensão menor que um ciclo



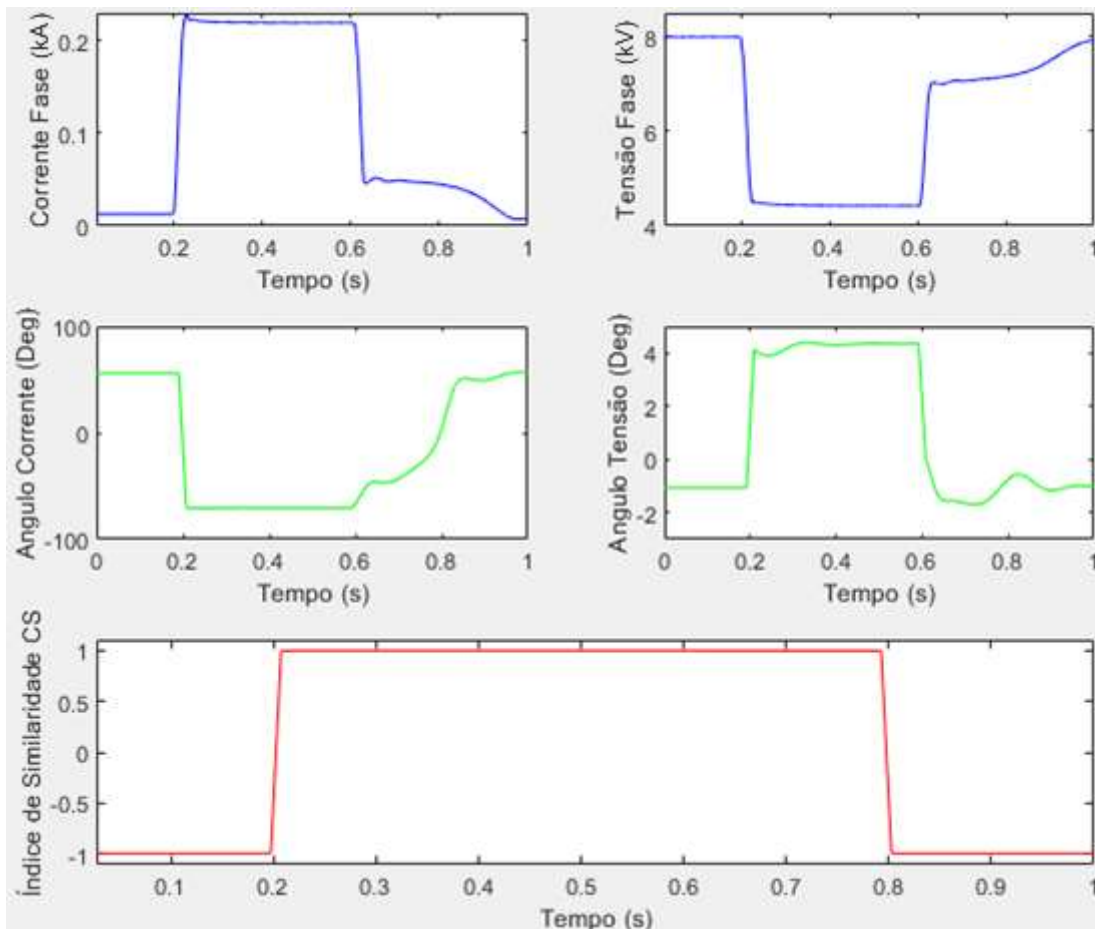
Fonte: O Autor

De acordo com os resultados apresentados na Figura 44 o método provou ser sensível para afundamentos momentâneos de tensão de duração menor a um ciclo. O valor de CS variou de -0.9887 para -0.9927, indicando uma ordem de grandeza de  $4 \cdot 10^{-4}$ . Isso mostra também que a sensibilidade do método independe da duração do distúrbio, outro fator importante a ser destacado.

O método proposto também foi testado considerando gerações distribuídas diferentes da fotovoltaica instaladas no parque industrial.

Na Figura 45 são apresentados os comportamentos da corrente, tensão, ângulos e do CS para uma falta monofásica no barramento de motores com uma geração distribuída eólica, com a mesma potência do parque fotovoltaico apresentado na Tabela 5.

Figura 45 – Falta monofásica no barramento de motores com geração eólica

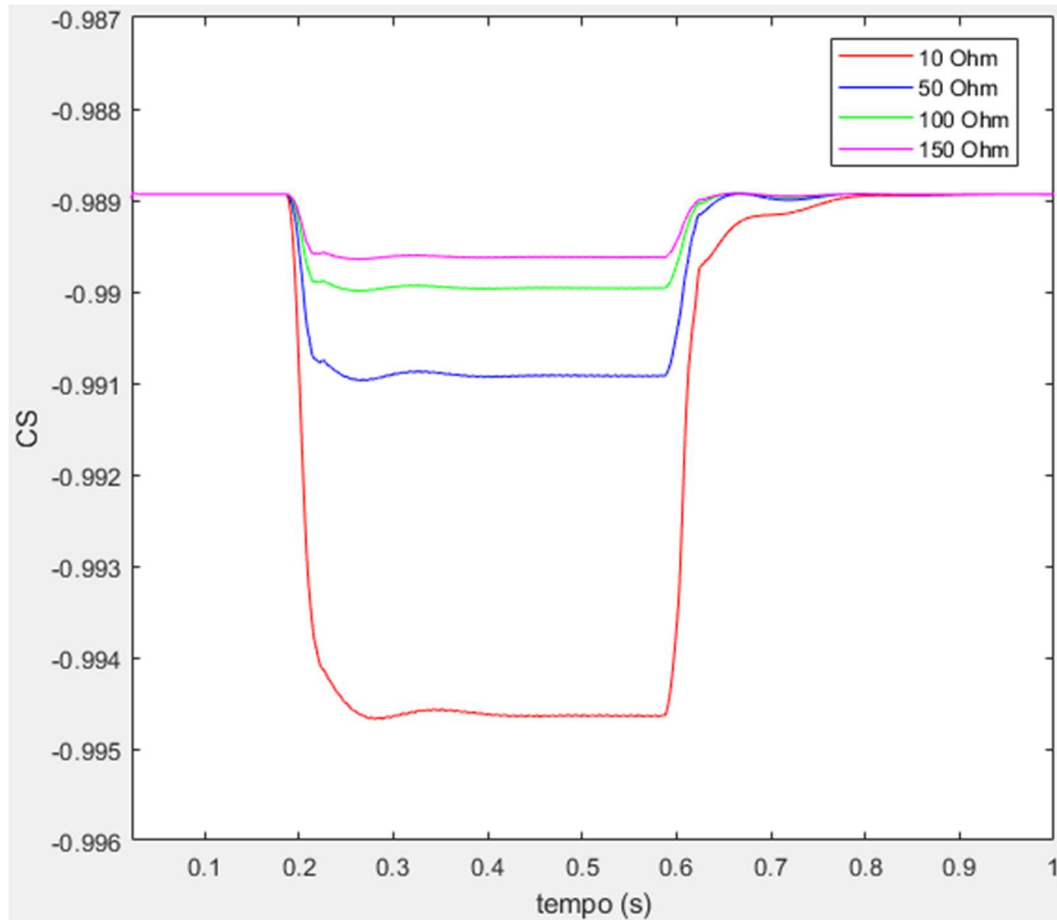


Fonte: O Autor

Baseado na Figura 45 observa-se que o valor do CS foi de -0,988 para 0,994, semelhante a falta com fonte fotovoltaica. Os valores de tensão e corrente são de 4,36 kV e 0,21 kA, valores semelhantes a falta com geração fotovoltaica.

A fim de levantar a sensibilidade do método em relação a resistência de falta e distância da falta, para consolidar a eficiência do método, foram simuladas faltas com variados parâmetros.

Figura 46 – Variação de CS para diferentes resistências de falta a 10 Km



Fonte: O Autor

Os resultados apresentados na Figura 46 mostram a curva de variabilidade do método com respeito a diferentes resistências de falta. Para esse teste foi utilizada uma falta monofásica no barramento de 13,8 kV da Figura 20.

Na Tabela 8 são apresentados os índices de CS bem como as ordens de grandeza dos saltos de valores apresentados na Figura 46.

Tabela 8 – Variação de Resistência de Falta e Sensibilidade a 10 Km

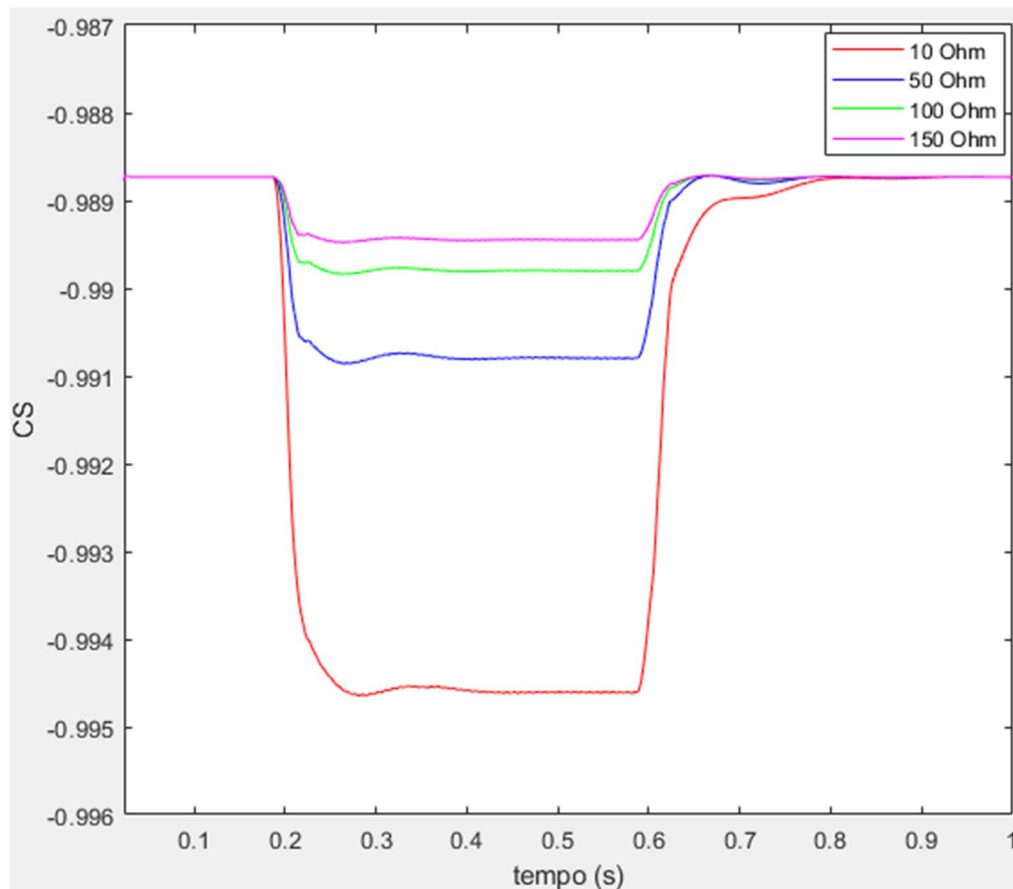
Distância (10Km)	R = 10 Ω	R = 50 Ω	R = 100 Ω	R = 150 Ω
$CS_0$	-0,9888	-0,9888	-0,9888	-0,9888
$CS_f$	-0,9946	-0,9909	-0,9899	-0,9896
$\Delta CS$	$5,8 \cdot 10^{-4}$	$2,1 \cdot 10^{-4}$	$1,1 \cdot 10^{-4}$	$8,0 \cdot 10^{-5}$

Fonte: O Autor

Nota-se a partir da Tabela 8 que os valores do  $\Delta CS$  decaem conforme a resistência de falta aumenta. Esse é um comportamento esperado visto que, conforme a resistência aumenta, menor são as variações de tensão e corrente.

Na Figura 47 são apresentados os valores de variação de CS para as mesmas resistências de falta considerando a falta simulada a uma distância de 20 Km.

Figura 47 – Variação do CS para diferentes resistências de falta a 20 Km



Fonte: O Autor

Na Tabela 9 são apresentados os valores do CS e as diferenças entre o valor inicial e o final pós falta.

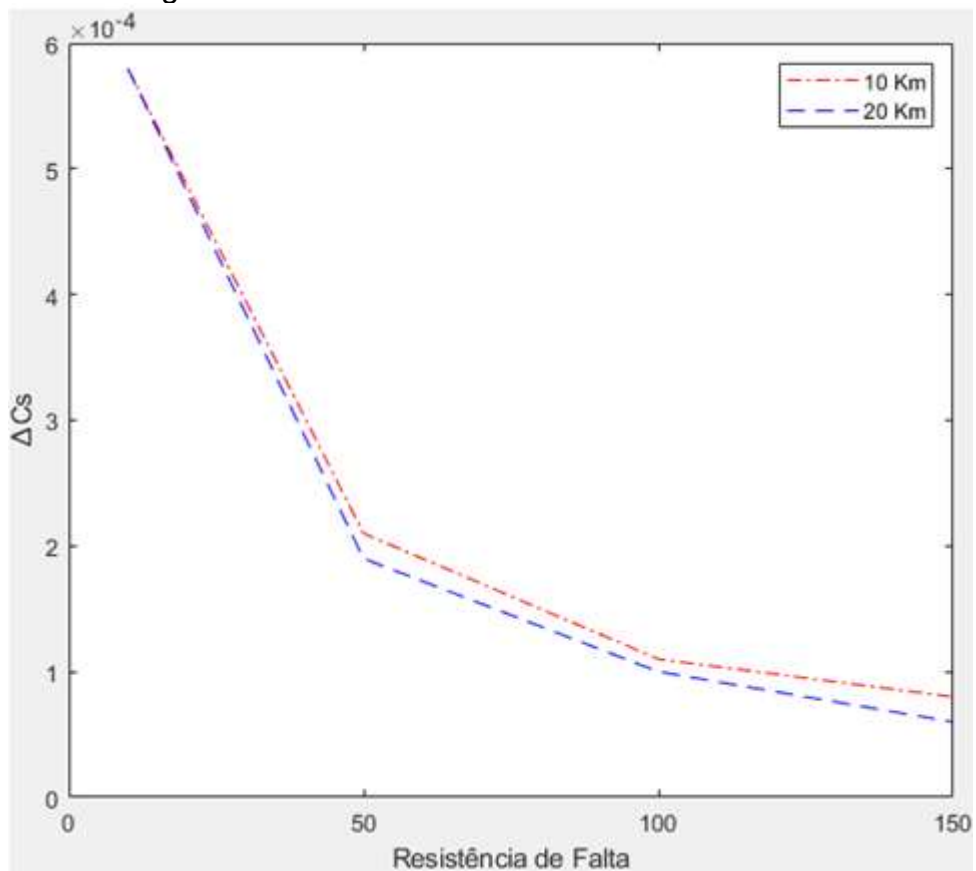
Tabela 9 Variabilidade de Resistência de Falta e Sensibilidade a 20 Km

Distância (20Km)	R = 10 $\Omega$	R = 50 $\Omega$	R = 100 $\Omega$	R = 150 $\Omega$
$CS_0$	-0,9888	-0,9888	-0,9888	-0,9888
$CS_f$	-0,9946	-0,9907	-0,9898	-0,9894
$\Delta CS$	$5,8 \cdot 10^{-4}$	$1,9 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-4}$	$6,0 \cdot 10^{-5}$

Fonte: O Autor

Com os resultados obtidos a partir da Tabela 9, pode-se identificar a variação do CS versus resistência de falta com um modelo gráfico aproximado e traçar um perfil crítico do parâmetro que mais sensibiliza o método.

Figura 48 – Curva CS versus Resistência de Falta



Fonte: O Autor

Observando o modelo acima fica evidente a sensibilidade do método em relação a resistência das faltas aplicadas e suas distâncias do algoritmo de detecção localizado no ponto de acoplamento da indústria (PAC).

#### **5.4 Discussão dos resultados**

No que tange às faltas localizadas no interior da instalação industrial, o algoritmo desenvolvido obteve êxito ao identificar, com precisão, todos os casos simulados. Nesse sentido, o coeficiente de similaridade em regime permanente revelou um valor de -0,988, o qual denota o fator de deslocamento angular entre tensão de linha e corrente de fase. Por ocasião da ocorrência das faltas, contudo, o valor desse coeficiente saltou para 0,994 em casos de faltas monofásicas, 0,992 para faltas bifásicas, 0,996 para faltas bifásicas terra e para 0,999 no caso de faltas trifásicas. Como anteriormente destacado, valores dentro da faixa de 0 a 1 sugerem um distúrbio a jusante (interno) do ponto de medição.

Na detecção de faltas localizadas no barramento de conexão com a rede elétrica, o algoritmo apresentou resultados satisfatórios. É importante destacar que em algumas literaturas, a indicação da fonte do distúrbio no barramento de medição não é realizada pelos algoritmos propostos.

Durante o regime permanente, o coeficiente de similaridade apresentou um valor de -0,9888, o que denota o fator de deslocamento angular entre tensão de linha e corrente de fase. Durante a ocorrência de faltas monofásicas, bifásicas, bifásicas-terra e trifásicas, o valor do coeficiente foi negativo, indicando a presença da falta. Para a falta monofásica, o valor foi de -0,995; para a bifásica, -0,997; para a bifásica-terra, -0,998; e para a trifásica, -1. Esses resultados corroboram com a proposta apresentada anteriormente, de que valores negativos do coeficiente de similaridade, que residem na faixa entre zero e um negativo, indicam que o distúrbio está localizado a montante do ponto de medição (externo a indústria).

Para as faltas localizadas no barramento da subestação, foi necessário avaliar a sensibilidade do método, dado o desafio da grande distância a ser percorrida pela falta até o ponto de medição e da falta estar localizada próxima a barra de referência do sistema elétrico. Inicialmente, o coeficiente de similaridade em regime permanente indicou um valor de -0,988. Entretanto, durante a ocorrência da falta, verificou-se uma mudança significativa no valor do coeficiente, que atingiu -0,9954 para a falta monofásica, -0,997 para a falta bifásica, -0,998 para a falta bifásica terra e -1 para a

falta trifásica. Esses resultados atestam a eficácia do algoritmo, demonstrando sua sensibilidade para identificar faltas em longas distâncias e perto de barras de referência. Esse resultado evidencia a robustez do método frente a mais um desafio distinto. Mais uma vez, ressalta-se que a presença de valores na faixa entre zero e um negativo indica a localização da falta a montante do ponto de medição.

Para as partidas de motores, foram realizadas duas simulações. Uma para validar se a inserção de motores de grandes potências era sensibilizada pelo método e qual o limite dessa potência. Testou-se o método para dois cenários: uma partida do barramento de motores internos a indústria e uma manobra de um parque externo com motores de 55 kW.

Como era de se esperar o método respondeu de maneira favorável a manobra de grandes cargas. Tanto para a partida interna quanto para a partida externa. O coeficiente do CS variou de -0,988 para 1 (caso interno) validando a teoria proposta e de -0,988 para -0,9895 para a partida externa do motor de 55 kW, novamente confirmando o que foi proposto até o presente momento.

Testou-se também a velocidade de resposta do método com relação a duração das faltas. Foi testada para a situação mais crítica: afundamento Momentâneo de Tensão, que dura entre um ciclo até três segundos. Para esse cenário o método respondeu dentro do previsto e indicou perfeitamente o sentido da falta com sensibilidade e precisão na mesma ordem de grandeza dos outros testes.

Outros métodos de geração foram validados com o intuito de garantir que qualquer parque industrial com qualquer geração distribuída possa utilizar do método. Simulou-se uma falta no barramento de motores internos com uma geração eólica e a resposta foi semelhante a resposta da geração fotovoltaica, garantindo a flexibilidade de implementação do algoritmo.

Por fim, a fim de validar o método, foram aumentadas as resistências de faltas até 150 Ohms e aumentada a distância da falta até 20 Km do ponto de acoplamento (PAC). As curvas que foram apresentadas como resultados evidenciaram a sensibilidade para todos os casos averiguados e foi traçado um perfil crítico em que o algoritmo demonstra ser mais sensibilizado pelo aumento da resistência de falta do que pelo aumento da distância.

## 6 CONCLUSÃO

Nessa dissertação, propõe-se um método para localizar as quedas de tensão considerando variações de tensão de curta duração (VTCDs) para sistemas industriais com geração distribuída.

A metodologia utilizada para validar a proposta consistiu em simulações por meio de software de uma rede industrial com geração distribuída, com o objetivo de investigar os principais distúrbios que podem causar quedas de tensão. A análise de variações de tensão de curta duração foi essencial, tendo em vista a sua frequente ocorrência nos sistemas elétricos de potência, com significativo impacto sobre os parques industriais. Nesse sentido, a atribuição de responsabilidade pela ocorrência dessas variações demanda a investigação da eficácia de um método que possa ser aplicado aos mais diversos tipos de distúrbios.

Para garantir a confiabilidade do método proposto, foram definidos perfis de distúrbios que deveriam ser analisados, tendo em vista que eles são responsáveis por causar quedas de tensão. Dentre os distúrbios julgados como necessários, destacam-se as faltas simétricas e assimétricas (monofásicas, bifásicas, bifásicas-terra e trifásicas) com impedâncias de falta variadas e manobra de grandes cargas no sistema elétrico. Além disso, foram verificadas durações distintas de falta, para justificar a aplicação no âmbito das VTCDs e diferentes tecnologias para a geração distribuída. Em todos os casos simulados, os resultados obtidos corroboram com a análise teórica previamente realizada, sendo importante ressaltar que, para as faltas bifásicas fase-fase e bifásicas fase-fase-terra, foram obtidas as mesmas representações gráficas.

Como parte dos objetivos propostos nesta dissertação, buscou-se avaliar a viabilidade computacional do algoritmo, bem como seu tempo de execução para a detecção de distúrbios que induzem quedas de tensão. Os resultados obtidos indicam que o algoritmo demanda baixo esforço computacional e tempo de processamento.

O tempo total necessário para a execução do algoritmo, desde a aquisição dos sinais até a indicação do distúrbio, apresentou uma média de 108 segundos. Vale ressaltar que o esforço computacional depende da máquina em questão, do número de amostras e da frequência de amostragem utilizada no método.

O método proposto provou-se bastante útil, robusto e sensível a ponto de garantir apontamentos corretos de distúrbios dos mais variados parâmetros. Fica

evidente seu valor perante o objetivo proposto dessa dissertação que é o de atribuir responsabilidade na ocorrência de um evento danoso à indústria estudada.

Como extensão das investigações é sugerido que trabalhos futuros se concentrem na avaliação da variabilidade de modelos de sistemas elétricos, bem como na validação de múltiplos pontos de pesquisa, utilizando a Similaridade de Cosseno (CS) como ferramenta de detecção. Também é recomendado a investigação de geradores síncronos, células de combustível e outros tipos de gerações similares. Por fim, é aconselhado uma abordagem para os valores de tensão, corrente e potência, fornecidos ou absorvidos pela geração distribuída da indústria, quando o distúrbio é aplicado. Essa abordagem busca aprimorar a compreensão e a eficácia das VTCDs, ampliando sua aplicação em contextos relacionados à Qualidade de Energia e a análise de sistemas elétricos e campos afins.

## REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. **Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional**: PRODIST módulo 8: qualidade da energia elétrica. Brasília, DF: ANEEL, 2017.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. **Resolução Normativa n. 1000**, de 7 de dezembro de 2021. Brasília, DF: ANEEL, 2021. 170 p.
- PRADHAN, A. K.; ROUTRAY, A. Applying distance relay for voltage sag source detection. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, v. 20, n. 1, p. 529-531, jan. 2005, doi: 10.1109/TPWRD.2004.839741.
- BUTTERWORTH, Stephen. On the theory of filter amplifiers. **Wireless Engineer**, Croydon, v. 7, n. 6, p. 536-541, 1930.
- COMPANHIA PAULISTA DE FORÇA E LUZ – CPFL. **GED 10099**: normas técnicas: engenharia de normas e padrões: requisitos para conexão de cargas potencialmente perturbadoras ao sistema elétrico da CPFL: versão 1.4. São Paulo: CPFL, 2020.
- DAS, JC *et al.* **Understanding Symmetrical Components for Power System Modeling**. Hoboken: John Wiley and Sons; IEEE Press, 2016. doi:10.1002/9781119226895.
- FORTESCUE, Charles L. Method of symmetrical co-ordinates applied to the solution of polyphase networks. **Transactions of the American Institute of Electrical Engineers**, v. 37, n. 2, 1918.
- HAMZAH, N. *et al.* A New Approach to Locate the Voltage Sag Source Using Real Current Component. **Elsevier Electric Power systems Research**, v. 72, n. 2, p.113-123, 2004.
- INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERS - IEEE. **IEEE Std 1564™**: IEEE guide for voltage sag indices. New York: IEEE, 2014.
- KAZEMI, A. *et al.* Review of voltage sag source identification methods for power quality diagnosis. **Przeгляд Elektrotechniczny**, v. 89, n. 8, p. 143-146, 2013.
- KAZEMI, A. *et al.* A new power quality monitor placement method using the multivariable regression model and statistical indices. **International Review of Electrical Engineering**, v. 6, n. 5, p. 2530-2536, 2011.
- KORENIUS, T. *et al.* On principal component analysis, cosine and Euclidean measures in information retrieval. **Information Sciences**, v. 177, n. 22, p. 4893-4905, 2007.
- LEÃO, R. P. S. *et al.* **Harmônicos em sistemas elétricos**. 1. Ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014.

LEBORGNE, R.C.; D, KARLSSON. Voltage sag source location based on voltage measurements only. **Journal of Electrical power quality and utilization**, v. XIV, n.1, p. 25-30, 2008.

OLIVEIRE, T.C.D. *et al.* Voltage Sags: validating short- term monitoring by using long- term stochastic simulation. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 24, n.3, p. 1344-1351, 2009.

PARSONS, A. *et al.* A Direction Finder for Power Quality Disturbances Based upon Disturbance Power and Energy. Power Delivery, **IEEE Transactions**, v. 15, n. 3, p.1081-1086, 1998. DOI: 10.1109/61.871378.

SAADAT, A. *et al.* Voltage Sag Source Location in Distribution Networks With DGs Using Cosine Similarity. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 71, p. 1-10, 2022.

TAYJASANANT, T. *et al.* A resistance sign-based method for voltage sag source detection. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 20, n. 4, p. 2544-2551, 2005.