



**AVALIAÇÃO DA APLICABILIDADE DA REPRESENTAÇÃO TENSORIAL NA
ANÁLISE DE DESEQUILÍBRIOS DE TENSÃO**

MOISES DE MORAIS HENRIQUES

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO
EM ENGENHARIA ELÉTRICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

**Universidade de Brasília
Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia Elétrica**

**AVALIAÇÃO DA APLICABILIDADE DA
REPRESENTAÇÃO TENSORIAL NA ANÁLISE
DE DESEQUILÍBRIOS DE TENSÃO**

Moises de Moraes Henriques

ORIENTADOR: JORGE ANDRÉS CORMANE ANGARITA

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA**

PUBLICAÇÃO: PPGENE.DM 712/2018

Brasília/DF: Novembro - 2018.

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

AVALIAÇÃO DA APLICABILIDADE DA REPRESENTAÇÃO
TENSORIAL NA ANÁLISE DE DESEQUILÍBRIOS DE TENSÃO

MOISÉS DE MORAIS HENRIQUES

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE.

APROVADA POR:



JORGE ANDRES CORMANE ANGARITA, Dr., ENE/UNB
(ORIENTADOR)



ANÉSIO DE LELES FERREIRA FILHO, Dr., ENE/UNB
(EXAMINADOR INTERNO)



ELDER GERLDO DOMINGUES, Dr., IFG
(EXAMINADOR EXTERNO)

Brasília, 30 de novembro de 2018.

FICHA CATALOGRÁFICA

HENRIQUES, MOISES DE MORAIS

AVALIAÇÃO DA APLICABILIDADE DA REPRESENTAÇÃO TENSORIAL NA ANÁLISE DE DESEQUILÍBRIOS DE TENSÃO [Distrito Federal] 2018.

xvi, 99p., 210 x 297 mm (ENE/FT/UnB, Mestre, Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia.)

Departamento de Engenharia Elétrica

1. Teoria Tensorial

3. Desequilíbrios de Tensão

I. ENE/FT/UnB

2. Qualidade da Energia Elétrica

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

HENRIQUES, M. M. (2018). *Avaliação da Aplicabilidade da Representação Tensorial na Análise de Desequilíbrios de Tensão*, Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, Publicação PP-GEE.DM - 712/2018, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 99p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Moises de Moraes Henriques

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: *Avaliação da Aplicabilidade da Representação Tensorial na Análise de Desequilíbrios de Tensão*.

GRAU: Mestre

ANO: 2018

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de Mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Moises de Moraes Henriques

Av. das Castanheiras, Lt. 350, Qd 101,

Ed. Atol das Rocas, Bl. C, Apt. 502

71.900-100 - Brasília - DF - Brasil

*"A ciência consiste em substituir o saber consolidado
que parecia seguro por uma nova teoria, ou seja,
por algo potencialmente problemático."*

José Ortega y Gasset

Agradecimentos

Primeiramente agradeço ao Professor Jorge Cormane pela orientação e pelos ensinamentos que propiciaram e fundamentaram o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço aos Professores do PPGEE que de alguma forma participaram e apoiaram a minha busca por conhecimentos, desde o ingresso no programa até a obtenção deste título.

Agradeço aos meus pais, e irmãs pelo carinho e atenção sempre que necessário, auxiliando de todas as formas possíveis para o alcance deste objetivo.

Agradeço a minha namorada Simone Gonzaga, por toda força e apoio durante os momentos de adversidade, sendo ela uma das principais responsáveis por tornar as dificuldades enfrentadas mais fáceis de serem superadas e a obtenção deste título uma realidade.

Por fim, agradeço a todos os integrantes do REILab que direta ou indiretamente contribuíram para a finalização desta dissertação.

Resumo

O estudo da conformidade da tensão em regime permanente, bem como as perturbações na sua forma de onda são áreas de interesse que compõem o que é conhecido como qualidade do produto da energia elétrica. Esta se aprofunda no estudo dos fenômenos de distorções harmônicas, desequilíbrios de tensão, flutuação de tensão, variação de frequência e variação de tensão de curta duração. Para quantificação destes, nota-se majoritariamente na literatura a presença de indicadores de qualidade baseados no domínio da frequência. Dessa forma, sempre que necessária a quantificação de desequilíbrios utilizando-se dados temporais, o pré-processamento destes se mostra presente. Este é realizado por meio da Transformada de Fourier, que ao ser aplicada aos sinais temporais retorna a resposta em frequência destes, sendo esta utilizada na quantificação dos desequilíbrios.

Frente ao exposto, e sabendo que a teoria tensorial trouxe avanços na manipulação de sinais de potência, este estudo se propôs a analisar a aplicabilidade desta teoria na quantificação dos desequilíbrios de tensão. Para tanto, uma analogia entre o estudo das deformações em mecânica dos sólidos e o comportamento dinâmico dos fenômenos eletromagnéticos será adotada, permitindo assim, a análise de deformações em elementos de volume com influência direta sobre os desequilíbrios de tensão que a deram origem.

Dito isto, esta dissertação apresentará dois indicadores desenvolvidos adotando-se manipulações propostas a teoria tensorial. A resposta destes a desequilíbrios de tensão será avaliada comparativamente aos resultados obtidos pelo indicador VUF no domínio da frequência. As particularidades de cada um dos indicadores será explicitadas de forma a se avaliar a aplicabilidade da teoria tensorial na quantificação dos desequilíbrios de tensão.

Palavras-chave: Teoria Tensorial, Qualidade da Energia Elétrica, Desequilíbrios de Tensão.

Abstract

The voltage conformity assesment in steady state and the assesment of voltage waveforms distortion adds to what is know as product quality in electric energy. This study area has focus on harmonic distorions, voltage unbalance, voltage fluctuation, frequency variations and short-term duration voltage variations. To quantify all of those, it is noteworthy that most part of the quality indexes present on our current literature are based on the frequency domain. So, in order to quantify those, a preprocessing is always needed due to the need to transform raw time domain signals to the frequency domain. This transformation it's mostly achieved applying the Fourier Transform to the signals, this results in phasos that represent the system state and that are used in the computations.

That been said, and knowing that the tensor theory brought big advances in the manipulation of power signals, this study proposes an analisis of the tensor theory regarding voltage disturbs quantification. To achieve the mentioned, this work makes use of an analogy between the study of deformations in solid mechanics and the dinamic behaviour of the eletromagnetic phenomena. That allows us to perform a deformation analysis on volume elements which has strict relation with voltage unbalances.

This work will present two indexes developed with basis on the tensor theory. The results of those will be compared to VUF, computed in the frequÃªncy domain. The main points of interest regarding those indexes will be presented and explored in order to determine the viability of using the tensor theory to analyse voltage unbalances.

Keywords: Tensor Theory, Power Quality, Voltage Unbalance

Sumário

Sumário	i
Lista de Figuras	iii
Lista de Tabelas	vi
Lista de Símbolos	vii
Glossário	ix
Capítulo 1 – Introdução	1
1.1 Considerações Iniciais	1
1.2 Estado da Arte	3
1.3 Objetivos e Contribuições desta Dissertação	5
1.4 Organização do Texto	6
Capítulo 2 – Fundamentação Teórica	8
2.1 Desequilíbrios de Tensão	8
2.1.1 Definição	8
2.1.2 Origem dos Desequilíbrios	9
2.1.3 Efeitos dos Desequilíbrios	9
2.1.4 Quantificação de Desequilíbrios de Tensão	10
2.1.4.1 <i>VUF - Voltage Unbalance Factor</i>	11
2.1.4.2 <i>LVUR - Line Voltage Unbalance Rate</i>	12
2.1.4.3 <i>PVUR - Phase Voltage Unbalance Rate</i>	13
2.1.4.4 <i>Unbalance Factor</i>	14
2.2 Teoria de Representação Tensorial	15
2.2.1 Tensores	15
2.2.2 Obtenção do Tensor Potência Instantânea	16
2.2.3 Obtenção do Tensor Tensão de Segunda Ordem	17
2.2.4 Decomposição dos Tensores de Segunda Ordem	18
2.2.4.1 Tensor Simétrico	18
2.2.4.2 Tensor Antisimétrico	19
2.2.4.3 Tensor Isotrópico	19
2.2.4.4 Tensor Desvio	20
2.2.5 Componentes Ativas e Reativas dos Tensores	20
2.2.6 Aplicação da Teoria Tensorial na Visualização de Distúrbios de Elétricos.	21
2.2.6.1 Representação por Elemento de Volume Cúbico.	22
2.3 Síntese do Capítulo	24
Capítulo 3 – Materiais e Métodos	25

3.1	Quantificação de Distúrbios	26
3.1.1	Tensor de Distorções	27
3.1.2	Dilatação Volumétrica	28
3.1.3	Rotação	29
3.2	Indicadores de Desequilíbrio de Tensão Baseados na Teoria Tensorial	31
3.2.1	Indicador de Desequilíbrio de Tensão Baseado na Dilatação Volumétrica	32
3.2.2	Indicador de Desequilíbrio de Tensão Baseado na rotação	33
3.3	Métodos de Análise de desempenho	34
3.3.1	Tempo de Processamento	34
3.3.2	Nível de Correlação	36
3.4	Síntese	37
Capítulo 4 – Apresentação e Análise dos Resultados		38
4.1	Considerações Iniciais	38
4.2	Quantificação de Desequilíbrios de tensão	38
4.2.1	Caso 01: Sistema Trifásico Acometido de Desequilíbrios de Magnitude em uma de suas Fases.	39
4.2.2	Caso 02: Sistema Trifásico Acometido de Desequilíbrios de Ângulos de Fase em uma de suas Fases.	40
4.2.3	Caso 03: Sistema Trifásico Acometido de Desequilíbrios de Magnitude em duas de suas Fases	41
4.2.4	Caso 04: Sistema Trifásico Acometido de Desequilíbrios de Ângulos de Fase em duas de suas Fases	44
4.3	Avaliação de desempenho	46
4.3.1	Tempo de Processamento	46
4.3.2	Nível de Correlação	49
Capítulo 5 – Conclusões e Propostas para Trabalhos Futuros		52
Referências Bibliográficas		56
Apêndice		59
Apêndice A – Publicações		60
Apêndice B – Interface Gráfica para a Análise de Distúrbios Elétricos		61
B.1	Análise de Distúrbios e Deformações	62
B.1.1	Interface Gráfica com Utilização do Tensor Potência Instantânea	63
B.1.2	Interface Gráfica com Utilização do Tensor Tensão de Segunda Ordem	68
B.1.3	Interface Gráfica com Utilização do Tensor Tensão Potência Instantânea Manipulado	71
Apêndice C – Aplicação: Segmentação para Variações de Tensão de Curta Duração		74
C.1	Sinais Sintéticos	75
C.2	Sinais Reais	77
C.3	Análise de desempenho	79

Lista de Figuras

2.1	Círculo de estados de equilíbrio de um sistema trifásico.	8
2.2	Representação geométrica de tensores instantâneos de primeira ordem da tensão e da corrente em relação a origem (0,0,0).	16
2.3	Elemento cúbico utilizado na visualização de distúrbios trifásicos.	22
2.4	Análise da rotação de um elemento cúbico para um sistema em condições nominais (Elemento Cúbico Azul) e com distúrbios (Elemento Cúbico Vermelho).	23
2.5	Análise da dilatação volumétrica de um elemento cúbico para um sistema em condições nominais (Elemento Cúbico Azul) e com distúrbios (Elemento Cúbico Vermelho).	23
2.6	Análise da deformação angular interna de um elemento cúbico para um sistema em condições nominais (Elemento Cúbico Azul) e com distúrbios (Elemento Cúbico Vermelho).	24
3.1	Representação geométrica dos cubos referência e instantâneo (retirada de: (FARFÁN <i>et al.</i> , 2011).	26
3.2	Representação dos resultados da quantificação da deformação volumétrica amostra a amostra.	29
3.3	Representação geométrica da rotação dos ângulos principais do cubo em relação a sua referência.	30
3.4	Gráficos de componentes reativas e rotação absoluta para sistemas desequilibrados.	31
4.1	Simulação dos indicadores no caso 01: Variação de 0.95 a 1.05 pu na fase A com fases B e C em condições nominais.	39
4.2	Simulação do caso 02: Variação de -5° a 5° na fase A com fases B e C em condições nominais.	40
4.3	VUL	42
4.4	VUC	42
4.5	VUF	42

4.6	VUF	43
4.7	VUL Espelhado	43
4.8	Simulação dos indicadores no caso 03: Variação de 0.95 a 1.05 pu nas fase A e B simultâneamente, com fases C em condições nominais.	43
4.9	VUL	45
4.10	VUC	45
4.11	VUF	45
4.12	Simulação dos indicadores no caso 04: Variação de -5° a 5° nas fases A e B, com a fase C em condições nominais.	46
4.13	Tempo de processamento para os indicadores VUF (Linha azul), VUL (Linha vermelha) e VUC (Linha amarela).	48
B.1	Interface Gráfica Para Visualização de Distúrbios.	62
B.2	Circuito simulado.	63
B.3	Interface Gráfica Para Sistema Balanceado sem Presença de Componentes Reativos.	64
B.4	Interface Gráfica Para Sistema Balanceado com Presença de Componentes Reativos.	65
B.5	Interface Gráfica Para Sistema Desbalanceado com Carga Resistiva.	66
B.6	Simulação em interface gráfica para sistema balanceado, analisado sob a ótica do tensor tensão de segunda ordem.	69
B.7	Sistema com desequilíbrios de tensão e oscilações em sua componente ativa.	70
B.8	Simulação em interface gráfica para sistema balanceado, analisado sob a ótica do tensor tensão de segunda ordem.	72
B.9	Sistema com desequilíbrios de tensão e oscilações em sua componente ativa.	73
C.1	Segmentação por VUL em sistema com Afundamento Momentâneo de Tensão sem compensação.	76
C.2	Segmentação por VUL em sistema com Afundamento Momentâneo de Tensão sem compensação.	76
C.3	Segmentação por VUL em sinal real.	77

C.4	Segmentação utilizando os dados do indicador VUC como critério de segmentação do algoritmo em um sinal real. Indicador VUC (Linha preta sólida), Início e fim da segmentação (Linha preta tracejada) e início e fim do distúrbio (Linha vermelha pontilhada).	78
C.5	Segmentação por VUL em sistema com Afundamento Momentâneo de Tensão com compensação.	79
C.6	Segmentação por VUC em sistema com Afundamento Momentâneo de Tensão com compensação.	80
C.7	Segmentação por VUL em um sinal real com calibração para extração de evento. . .	81
C.8	Segmentação por VUC em um sinal real com calibração para extração de evento. . .	82

Lista de Tabelas

3.1	Quadro de operações para cálculo do algoritmo VUL.	36
4.1	Casos simulados com referência às suas magnitudes e fases.	38
4.2	Tempo Médio de Processamento dos Indicadores.	47
4.3	Tempo Médio de Processamento dos Indicadores ao se Calcular um Nova Amostra).	47
4.4	Coeficiente de Correlação para sistema trifásico acometido de desequilíbrios em magnitude em duas de suas fases.	49
4.5	Coeficiente de Correlação para sistema trifásico acometido de desequilíbrios em magnitude em duas de suas fases, com rotação do VUL entorno da condição desequilíbrio monofásico.	50
4.6	Coeficientes de Correlação para sistema trifásico acometido de desequilíbrios sobre os ângulos de fase em duas de suas fases	51
B.1	Sistemas simulados na interface gráfica desenvolvida.	63
C.1	Parâmetros para Variações Momentâneas de Tensão.	75

Lista de Símbolos

a	Operador complexo $1\angle 120^\circ$.
$\vec{a}, \vec{b}, \vec{c},$	Vértices do elemento de volume cúbico de referência.
$\vec{A}, \vec{B}, \vec{C},$	Vértices do elemento de volume cúbico instatâneo.
A	Matriz de transformação de Fortscue.
$CC_{(x,y)}$	Matriz de coeficientes de correlação.
f	Frequência fundamental.
\vec{i}_j	Tensores de corrente trifásico de primeira ordem.
max	Função que retorna o máximo valor de uma série.
N	Número de amostras por ciclo.
p	Traço do tensor de segunda ordem.
$p.u$	Volor por unidade.
ROT	Índice de rotação absoluta.
t	Símbolo de transposto.
T	Tensor de segunda ordem genérico.
$Sym T$	Tensor simétrico decomposto do tensor de segunda ordem genérico.
$ant T$	Tensor antissimétrico decomposto do tensor de segunda ordem genérico.
$iso T$	Tensor isotrópico decomposto do tensor de segunda ordem genérico.
$des T$	Tensor desvio decomposto do tensor de segunda ordem genérico.
\vec{u}_i	Tensores de tensão trifásico de primeira ordem.
V^+	Tensão de sequência positiva.
V^-	Tensão de sequência negativa.

V^0	Tensão de sequência zero.
V_x	Tensão de fase.
V_{xy}	Tensão de linha entre as linhas x e y.
V_{Lxy}	Tensão média de linha entre as linhas x e y.
V_{Pxy}	Tensão média de fase.
V_{max}	Máximo valor de tensão de fase entre as fases A, B e C.
V_{min}	Mínimo valor de tensão de fase entre as fases A, B e C.
V_{ins}	Volume do elemento de volume cúbico instantâneo.
V_{ref}	Volume do elemento de volume cúbico de referência.
$\alpha_A, \alpha_B, \alpha_C$	Ângulos de fase das fase A, B e C.
α, β, γ	índices de rotação para as fase A, B e C.
ψ	Coefficiente de cálculo do indicador <i>Unbalance Factor</i> .
\otimes	Simobolo do produto diádico.
\wp	Tensor Potência Instantânea.
Γ	Tensor Tensão de Segunda Ordem.
δ	Delta de Kronecker.
∂	Tensor de Distorções.
$^{Ant}\partial$	Tensor antissimétrico de Distorções.
$^{iso}\partial$	Tensor isotrópico de Distorções.
ΔV	Percentual de deformação volumétrica.
$\rho_{x,y}$	Coefficiente de correlação entra as séries numéricas x e y.

Glossário

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANSI	<i>American National Standards Institute</i>
AT	Análise Transitória
CC	Corrente Contínua
CIGRE	<i>International Council on Large Electric Systems</i>
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
LVUR	Indicador <i>Line Voltage Unbalance Rate</i> .
NEMA	<i>National Electrical Manufacturers Association</i> .
PVUR	Indicador <i>Phase Voltage Unbalance Rate</i> .
VUC	Indicador <i>Voltage Unbalance Coefficient</i> .
VUF	Indicador <i>Voltage Unbalance Factor</i> .
VUL	Indicador <i>Voltage Unbalance Level</i> .

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O termo qualidade da energia elétrica é encontrado como uma das subáreas de estudo em engenharia elétrica vinculada à área de sistemas de potência. O escopo desta subárea consiste no estudo e análise de fatores que perturbem a forma sinusoidal de onda dos sinais de corrente e tensão em barramentos, e ainda aqueles que venham afetar a magnitude e frequência destes. A natureza destes tipos de fenômenos geralmente está associada aos tipos de cargas conectadas a rede e às características físicas dos sistemas de transmissão e distribuição. (CHATTOPADHYAY MADHUCHHANDA MITRA, 2011)

No Brasil, a Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL - explicitou os temas de qualidade de energia abordados pela área de qualidade do produto (ANEEL, 2007). Dentro dos vários fenômenos abordados no estudo de qualidade da energia, existem aqueles ligados diretamente a qualidade do produto da energia elétrica, sendo estes os seguintes:

- Distorções Harmônicas
- Desequilíbrios de Tensão
- Flutuação de Tensão
- Variação de Frequência
- Variação de Tensão de Curta Duração

Em meio aos distúrbios apresentados, um dos mais notórios é o desequilíbrio de tensão. Este afeta diretamente transformadores e motores elétricos trifásicos, nos quais os problemas podem ir desde superaquecimentos a perdas excessivas e redução da vida útil destes (FILHO *et al.*, 2010).

Atualmente, os eixos principais de estudo se voltam a análise das áreas supracitadas. Estas possuem focos que vão desde o desenvolvimento de novos indicadores de qualidade, até o projeto de compensadores que atuem na presença de distúrbios. Contudo, há de se pontuar que, em

sua maioria, os trabalhos que abordam a análise de distúrbios elétricos tomam como base a representação no domínio da frequência de sinais no domínio do tempo. De tal forma, para sua correta adoção, um pré-processamento dos dados temporais sempre se faz necessário.

O domínio da frequência se apresenta como uma ótima ferramenta de simplificação para as análises feitas no domínio do tempo. Este propiciou um grande avanço nos estudos de sinais, mesmo durante épocas com forte limitação na capacidade de processamento das unidades de processamento. Hoje, o desenvolvimento computacional permite a realização de cálculos mais complexos de forma cada vez mais eficiente e rápida. Tal avanço vem possibilitando a análise em tempo real de dados e sinais no domínio do tempo.

Diante do apresentado e tendo em vista a capacidade da representação tensorial em expor as variações temporais da potência instantânea pela aplicação direta dos dados de corrente e tensão no domínio do tempo, este trabalho optou por se aprofundar na aplicabilidade da adoção da teoria tensorial na análise de desequilíbrios de tensão em sistemas trifásicos. Dito isto, este estudo buscará fundamentação em estudos semelhantes, de forma a propor novas manipulações tensoriais capazes de atender ao objetivo supracitado.

Assim, um aprofundamento na literatura atual revela a teoria tensorial vem sendo adotada prioritariamente em áreas específicas de estudo no âmbito dos sistemas de potência, sendo algumas destas expressas a seguir:

- Visualização de desequilíbrios de tensão;
- Avaliação da qualidade dos sinais de potência;
- Desenvolvimento de índice de referência para algoritmos de segmentação;
- Desenvolvimento de índice de referência para aplicação no controle de filtros de potência ativa;
- Caracterização de cargas;

Cada uma dessas áreas será brevemente elucidada na seção seguinte. Para tanto, serão apresentados os principais desenvolvimentos da área, bem como os principais estudos realizados.

1.2 ESTADO DA ARTE

Visualização de desequilíbrios de tensão: Os estudos pioneiros a adotarem a teoria tensorial no âmbito dos sistemas elétricos de potência foram conduzidos em 2009 (USTARIZ E. A. CANO, 2009). Neste trabalho, uma analogia entre o estudo de deformações em mecânica dos sólidos e o comportamento dinâmico dos fenômenos eletromagnéticos foi traçada. Por meio desta foi possível a visualização dos desequilíbrios em sistema de potência com base nas deformações causadas pela projeção do tensor potência instantânea em um cubo unitário. Basicamente, a projeção de tal tensor causava neste elemento de volume deformações volumétricas, rotacionais e internas que podiam ser visualizadas por uma simples plotagem bidimensional.

Posteriormente, outro trabalho explorou o uso do tensor potência instantânea na definição de um indicador instantâneo da qualidade de energia e de um fator de desvio (USTARIZ-FARFAN *et al.*, 2012b). Tais elementos foram então utilizados para dar intensidade a cada um dos pontos de um mapa bidimensional e tridimensional representante das perdas de qualidade da energia elétrica em uma dada região, contemplando distúrbios tanto estacionários quanto não estacionários.

Avaliação da qualidade dos sinais de potência: Nos estudos realizados nesta área, um indicador de qualidade foi desenvolvido correlacionando o tensor instantâneo da potência com um tensor ideal de potência. O primeiro foi formado pelo produto diádico entre corrente e tensão instantâneas, enquanto o segundo é formado pelo produto diádico entre corrente e tensão de sequência positiva. Com o uso destes, foi desenvolvido um indicador responsável pela avaliação da qualidade dos sinais de potência. Este trabalha avaliando a ordem de grandeza da diferença existente entre os tensores instantâneos e ideais (USTARIZ *et al.*, 2010a).

Desenvolvimento de índice de referência para algoritmos de segmentação: Existem na literatura contemporânea cinco trabalhos principais a abordar este tema. Todos possuem em comum a característica de elaborarem indicadores de deformação tomando como base os tensores instantâneos que representam o sistema. Tais indicadores são por vez adotados como base para os desenvolvimentos futuros dos algoritmos de segmentação propostos.

Tendo em vista a relação direta existente entre a parte antissimétrica do tensor potência instantânea e as rotações provocadas ao se projetar esta sobre as coordenadas de um elemento de volume, houveram abordagens que utilizaram tal decomposição na elaboração dos indicadores.

As rotações provocadas por esta projeção foram quantificadas e utilizadas na elaboração do índice de segmentação proposto (JAGUA *et al.*, 2010; BARRERA *et al.*, 2012).

Além dos citados, existem estudos que utilizaram como abordagem um tensor alheio ao potência instantânea. Neste caso, o tensor adotado foi o tensor tensão de segunda ordem, ao qual foi aplicado a norma de Frobenius para realizar a determinação de um índice de deformação. Este foi adotado na pesquisa como forma de segmentação de sinais com afundamentos de tensão (ARIAS-GUZMAN *et al.*, 2014; ARIAS *et al.*, 2015).

Por fim, a proposta mais recente neste campo sugere a aplicação da norma de Frobenius ao tensor potência instantânea. O resultado deste processo é passado por um filtro de kalman de forma a proceder a decomposição dos componentes de frequência que serão utilizados na determinação do índice de detecção do seu algoritmo de segmentação (ARIAS-GUZMAN *et al.*, 2017).

Desenvolvimento de índice de referência para aplicação no controle de filtros de potência ativa: Nesta área, observam-se estudos que possuem como objetivo a definição de correntes ou tensões de referência para o controle de filtros de potência. Nas pesquisas realizadas, a teoria da representação tensorial foi adotada em três diferentes estudos. Os dois primeiros tiveram como foco a determinação de correntes de referência para as estratégias de controle aplicadas. O último realizou a decomposição do tensor tensão de primeira ordem em diferentes tensores com representações distintas de componentes do tensor potência instantânea.

Sob esta temática e realizando a abordagem com base em correntes de referência, o primeiro estudo a adotar a teoria da representação tensorial foi feito em 2010. Neste, os autores apresentaram manipulações ao tensor potência instantânea que os permitiram realizar a definição de uma corrente de referência. Tal corrente era adotada no controle de filtros de potência ativa e na determinação de indicadores de desvio de qualidade. Ao fim do trabalho, os resultados obtidos foram validados por meio da implementação e simulação de um filtro ideal (USTARIZ *et al.*, 2010b).

Anos depois, outra pesquisa a realizar uso das correntes de referência obtidas por meio da teoria da representação tensorial foi desenvolvida. Nesta, o foco foi a definição de rotinas de simulações híbridas para se testar estratégias de controle em filtros de potência ativa de sistemas polifásicos. Tais simulações consistiam na combinação de simulações computacionais aliadas a testes laboratoriais, tendo como necessidade a definição de uma corrente de referência que alimentaria as estratégias de controle instantâneas dos filtros (USTARIZ-FARFAN *et al.*, 2012a).

O último artigo a explorar esta temática teve fundamentação alheia aos demais. Este aplicou decomposições ao tensor tensão de primeira ordem, de modo a se definir as componentes ativas e reativas deste. Assim, em vez de adotar correntes de referência nas estratégias de controle desenvolvidas, os autores neste apresentaram a proposta da utilização da componente reativa do sinal de tensão na definição do sinal de referência. Os resultados obtidos foram então testados por meio de simulações com foco na eliminação de harmônicas (MULLA *et al.*, 2013).

Caracterização de cargas: Por fim, a última área a ser aqui elencada, realizou o estudo da caracterização de cargas por meio dos sinais de potência aplicados à teoria tensorial (TRUJILLO-OROZCO *et al.*, 2015). Neste estudo, os autores descrevem a metodologia para a representação gráfica de diferentes tipos de cargas. Este teve como foco a trajetória descrita pelos vértices de um cubo quando um tensor era projetado sobre ele. Assim, na presença de harmônicos, cargas lineares capacitivas e indutivas, dentre outros casos simulados, era possível observar que para os diferentes tipos de cargas eram obtidos diferentes tipos de trajetórias.

A ponderação dos métodos desenvolvidos e análises realizadas nos trabalhos supracitados vem demonstrando a aplicabilidade da teoria da representação tensorial na contextualização e visualização de distúrbios elétricos. Contudo, até o momento não foi vislumbrada a possibilidade da aplicação da análise tensorial no estudo e quantificação destes distúrbios, mais especificamente a quantificação de desequilíbrios de tensão. Assim, tomando por base que nos trabalhos apresentados a quantificação das deformações sofridas em elementos de volume é o principal foco ao se proceder a apreciação de distúrbios elétricos, este trabalho se propõe a realizar a análise de desempenho da aplicação da teoria tensorial na quantificação de desequilíbrios de tensão.

1.3 OBJETIVOS E CONTRIBUIÇÕES DESTA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação tem por objetivo principal analisar a aplicabilidade do uso da teoria tensorial na análise de desequilíbrios de tensão em sistemas elétricos trifásicos. Para tanto, indicadores aplicando a teoria tensorial deverão ser desenvolvidos e seus resultados comparados a uma referência preestabelecida e consolidada na literatura.

Para alcançar o almejado objetivo, os a atenção e elucidação dos seguintes pontos de interesse se mostrou crucial:

- Determinar meios de quantificação tensorial que possuam contribuições isoladas à tensão elétrica;
- Identificar padrões entre as deformações notadas nos elementos de volume e as oscilações de potência do sistema;
- Propor indicadores obtidos pela aplicação da teoria tensorial, passíveis de realizar a quantificação de desequilíbrios de tensão.
- Analisar o desempenho dos indicadores frente a aqueles consolidados na literatura.

No que tange às contribuições desta dissertação, deseja-se avaliar a aplicabilidade da teoria tensorial na quantificação de desequilíbrios de tensão. Esta avaliação será feita pelo estudo do desempenho dos indicadores propostos ao longo do trabalho. Tal área ainda não foi explorada na literatura e possui grande potencial de avanços ao permitir a realização de cálculos no domínio do tempo, possibilitando assim o desenvolvimento de métodos de quantificação com processamentos cada vez mais eficientes.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

Essa dissertação está organizada da seguinte forma:

- O Capítulo 2, será apresentada a fundamentação teórica por trás da teoria tensorial e desequilíbrios de tensão. Inicialmente, serão abordados temas como definição, causa, consequência e métodos de quantificação de desequilíbrios de tensão. Posteriormente, os temas ligados à teoria tensorial serão introduzidos. Para tanto, será realizada a explanação a respeito do processo para obtenção de tensores de segunda ordem, a decomposição destes em isotrópico, desvio e antissimétrico, sua aplicabilidade na visualização de distúrbios elétricos, e por fim, a relação dos tensores decompostos com as deformações estudadas em mecânica dos sólidos.
- O Capítulo 3, apresentada os materiais e métodos utilizados para obtenção dos indicadores propostos. Toda a manipulação matemática realizada nos tensores e casos de simulação propostos serão apresentados neste capítulo;
- O Capítulo 4, apresentada os resultados obtidos para cada um dos indicadores propostos.

Durante todo o capítulo, para fins de análise comportamental, os resultados obtidos pelos novos indicadores serão confrontados com aqueles obtidos pelo indicador no domínio da frequência VUF, *Voltage Unbalance Factor*.

- O Capítulo 5, apresentada a conclusão geral da dissertação. Neste capítulo, serão expostas vantagens e desvantagens encontradas na empenho dos indicadores propostos na quantificação de desequilíbrios de tensão. Neste serão elencadas ainda as possíveis melhorias a serem estudadas em trabalhos futuros.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta as fundamentações que servirão como base para o desenvolvimento do trabalho proposto. Inicialmente serão abordados temas voltados aos desequilíbrios de tensão em sistemas trifásicos e suas características. O capítulo encerrará apresentando a base teórica utilizada na manipulação dos tensores e a representação gráfica inerente a cada um destes.

2.1 DESEQUILÍBRIOS DE TENSÃO

2.1.1 Definição

Desequilíbrios de tensão são caracterizados pela diferença de amplitude entre as fases de tensão de um sistema elétrico polifásico e/ou em sua defasagem elétrica (diferença superior ou inferior a 120° entre fases para sistemas trifásicos) (ANEEL, 2007). Dessa forma, a presença destes desequilíbrios na rede elétrica contribui para a introdução de retivos no sistema. Tal situação é ilustrada na Figura 2.1 onde se ilustra que os desequilíbrios de tensão constituem-se do máximo desvio entre os índices nominais das tensões de fase e aqueles mensurados no sistema (CHATTO-PADHYAY MADHUCHHANDA MITRA, 2011).

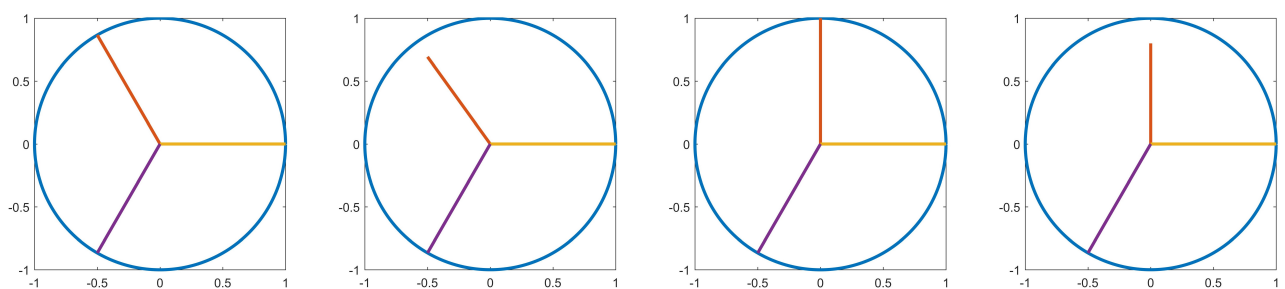


Figura 2.1. Círculo de estados de equilíbrio de um sistema trifásico.

Por meio da figura 2.1, observa-se quatro situações distintas a saber:

- **Sistema equilibrado:** Nota-se que este possui defasagem constante de 120° entre as fases A, B e C, e que estas possuem igual módulo de magnitude;
- **Sistema com desequilíbrios de magnitude:** Neste caso, observa-se que apesar da defasagem entre suas fases ser 120° , uma das fases do sistema possui magnitude inferior ou superior às demais, causando assim desequilíbrio no sistema;
- **Sistema com desequilíbrios de ângulo de fase:** para o último caso observa-se que apesar de todas as fases do sistema possuírem igual magnitude os ângulos de fase são diferentes, o que ocasiona o desequilíbrio do sistema.
- **Sistema com desequilíbrios de magnitude e ângulo de fase:** Neste último caso são observados desequilíbrios que atingem de forma simultânea os ângulos de fase de um sistema trifásico e suas magnitudes.

2.1.2 Origem dos Desequilíbrios

A origem dos desequilíbrios de tensão é diversa. Em grande parte das vezes o nível de desequilíbrio está intimamente ligado à condição que o causou. Dessa forma, observa-se que para níveis de desequilíbrio com magnitude de até 2%, as principais causas são apresentadas a seguir:

- Presença de cargas monofásicas de grande porte em sistemas de distribuição;
- Queima de fusíveis em uma das fases de bancos de capacitores trifásicos;
- Linhas de transmissão aéreas não transpostas.

Quando tais desequilíbrios atingem níveis mais severos, (com ordem superior à 5%), nota-se que suas principais causas tem origem no mal condicionamento de cargas monofásicas em sistemas trifásicos, o que resulta em demandas por fase desequilibradas no sistema de distribuição (DUGAN *et al.*, 1996).

2.1.3 Efeitos dos Desequilíbrios

Os desequilíbrios de tensão causam efeitos danosos em vários dispositivos ligados à rede elétrica. Em geral, os mais atingidos são os motores de indução e transformadores trifásicos. Atualmente, há uma vasta gama de estudos que atestam os efeitos nocivos destes distúrbios elétricos

nos equipamentos citados. Grande parte destes estudos tem como foco a definição de metodologias e medidas capazes de mitigar os efeitos e causas dos desequilíbrios de tensão, possuindo também aplicações que se estendem ao desenvolvimento de métodos de proteção para sistemas elétricos e compensação dos desequilíbrios de tensão.

Em motores de indução, os primeiros estudos a contemplarem os efeitos de desequilíbrios de tensão ocorreram por volta do ano 1954. Neste ano, ficou provada a redução da eficiência de um motor de indução quando submetidos a desequilíbrios de tensão trifásicos (WILLIAMS, 1954). Em 1959, outro estudo atribuiu aos desequilíbrios de tensão o aquecimento demasiado dos motores de indução, fato que por vez ocasiona a diminuição de sua vida útil (GAFFORD *et al.*, 1959). Seguindo a mesma linha de pesquisa, vários outros estudos começaram a ser desenvolvidos tentando reduzir os danos causados por tais distúrbios, sendo aqueles mais recentes os que trazem contribuições nas áreas:

- Análise dos efeitos no torque, potência e vibrações de motores de indução sob desequilíbrios de tensão, sendo até o presente momento uma área de grande relevância na literatura (DONOLO *et al.*, 2016).
- Desenvolvimento de metodologias para identificação de superaquecimento em motores submetidos a desequilíbrios de tensão (GONZALEZ-CORDOBA *et al.*, 2016).
- Desenvolvimento de métodos de análise de desequilíbrios de tensão em redes com geração distribuída monofásica (LIAO; MILANOVIĆ, 2017).
- Desenvolvimento de métodos que melhorem os níveis de desequilíbrios de tensão em redes de distribuição de baixa tensão (FARAHANI, 2017).

Assim, os efeitos nocivos causados por este tipo de distúrbio em equipamentos elétricos impulsionou a pesquisa de métodos de compensação e análise de desequilíbrios de tensão. Tais estudos continuam a proporcionar grandes avanços nas formas de se observar, trabalhar e analisar este fenômeno.

2.1.4 Quantificação de Desequilíbrios de Tensão

A quantificação de desequilíbrios de tensão tem por finalidade graduar o nível de desequilíbrio entre as fases de um sistema elétrico. Para tanto, cinco vertentes já consolidadas são as mais

adotadas na literatura para a realização do processo de quantificação (SINGH *et al.*, 2007), sendo elas:

- **VUF - Voltage Unbalance Factor:** Conhecido como definição verdadeira do desequilíbrio de tensão e proposto pela *IEC - International Electromechanical Commission*, este método utiliza as componentes de sequência na quantificação dos desequilíbrios de tensão (SEIPHETLHO; RENS, 2010);
- **LVUR - Line Voltage Unbalance Rate:** Proposta pela *National Equipment Manufacturer's association - NEMA*, realiza seus cálculos por meio das tensões de linha do sistema (NEMA, 2016);
- **PVUR - Phase Voltage Unbalance Rate:** Compõem dois meios distintos de cálculo, ambos chamados de *PVUR* e elaborados pelo *Institute of Electrical and Electronics Engineers - IEEE* (IEEE, 1991; IEEE, 1987);
- **Unbalance Factor:** Aplicável tanto a tensões de linha quanto a tensões de fase, este método ficou conhecido como método de Cigré (EUGENE, 1986).

Os indicadores supracitados serão explorados em maiores detalhes ao decorrer do capítulo. Tendo em vista o VUF ser o mais difundido na quantificação de desequilíbrios de tensão, adotado inclusive no Brasil por meio do PRODIST 8 da ANEEL sob o nome de Fator de Desequilíbrio da Tensão, o aprofundamento no estudo deste será realizado em maiores detalhes. Tal motivo fomenta ainda a utilização deste indicador como ferramenta de validação dos resultados obtidos ao longo deste estudo.

2.1.4.1 VUF - Voltage Unbalance Factor

O primeiro indicador trabalhado é o VUF - *Voltage Unbalance Factor* proposto pela *IEC - International Electromechanical Commission* e adotado no Brasil sob o nome de Fator de Desequilíbrio da Tensão (ANEEL, 2007). O cálculo deste é realizado no domínio da frequência, o que demanda por pré-processamento em casos de análise temporal. Uma vez obtida a resposta em frequência, a transformada de Fortescue é aplicada de forma a converter os dados fasoriais em componentes de sequência. Este cálculo é definido em (2.1), onde fasores de tensões de linha são convertidos em componentes de sequência positiva, negativa e zero (SEIPHETLHO; RENS, 2010):

$$\begin{bmatrix} V^+ \\ V^- \\ V^0 \end{bmatrix} = [A]^{-1} \begin{bmatrix} V_{ab} \\ V_{bc} \\ V_{ca} \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Nesta, (V_{ab} , V_{bc} e V_{ca}) são os fasores das tensões de linha e (V^+ , V^- e V^0) são os módulos da tensão de sequência positiva, negativa e zero respectivamente. Por fim, a matriz A é chamada de matriz de transformação de Forstescue e é apresentada em (2.2):

$$[A] = \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Na matriz acima, o operador complexo a é utilizado como fasor de rotação, sendo o seu valor dado por:

$$a = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} = 1/\underline{120^\circ} \quad (2.3)$$

Uma vez calculadas as componentes de sequência, a quantificação do grau do fato de desequilíbrio de tensão pode ser realizada pela aplicação dos módulos de tensão de sequência positiva e negativa na equação (2.4). O valor resultante, obtido por meio dos cálculos propostos, não possui unidade de medida, sendo apresentado na forma percentual e representado pela razão entre a tensão de sequência negativa e a tensão de sequência positiva.

$$\%VUF = \frac{V^-}{V^+} \cdot 100\% \quad (2.4)$$

Este indicador é o mais difundido para a quantificação dos desequilíbrios de tensão e adotado a níveis nacionais. As demais definições que serão apresentadas, NEMA, IEEE e CIGRE, são aproximações ao indicador VUF (SEIPHETLHO; RENS, 2010). Por tal motivo a adoção deste indicador será feita como critério de validação dos resultados obtidos nesta dissertação.

2.1.4.2 LVUR - Line Voltage Unbalance Rate

A definição proposta pela norma NEMA MG 1 (NEMA, 2016) ficou conhecida como *Line Voltage Unbalance Rate* (LVUR). Esta utiliza os valores das tensões de linha para realizar o cálculo do

desequilíbrio conforme observado na equação (2.5), onde são relacionados os máximo desvio da tensão média com a tensão média de linha:

$$\%LVUR = \frac{\max(|V_{AB} - V_{L_{av}}|, |V_{BC} - V_{L_{av}}|, |V_{CA} - V_{L_{av}}|)}{V_{L_{av}}} \quad (2.5)$$

Onde, V_{AB} , V_{BC} e V_{CA} são tensões de linha e $V_{L_{av}}$ a tensão média de linha obtida por meio da equação (2.6).

$$V_{L_{av}} = \frac{V_{AB} + V_{BC} + V_{CA}}{3} \quad (2.6)$$

Essa definição parte da prerrogativa de que a tensão média é sempre igual a tensão nominal para situações de equilíbrio. Assim, na presença de desequilíbrios, a subtração proposta na equação (2.5) será diferente de zero e o equilíbrio será quantificado. Contudo, deve ser pontuado que, como tal indicador trabalha tão somente com os módulos da amplitude do sinal de tensão, a quantificação de desequilíbrios sobre a defasagem dos ângulos de fase não é passível de realização pela utilização deste indicador (DEKHANDJI *et al.*, 2017).

2.1.4.3 PVUR - Phase Voltage Unbalance Rate

Existem duas definições elaboradas pelo IEEE, ambas chamadas de *Phase Voltage Unbalance Rate*. Contudo, estas diferem-se entre si na sua forma de obtenção. Para realizar-se o cálculo da primeira, a seguinte equação deve ser adotada:

$$\%PVUR = \frac{\max(|V_A - V_{P_{av}}|, |V_B - V_{P_{av}}|, |V_C - V_{P_{av}}|)}{V_{P_{av}}} \quad (2.7)$$

Nesta, V_A , V_B e V_C são tensões de fase e a tensão $V_{P_{av}}$ é a tensão média das fases. A obtenção desta última pode ser observada na equação (2.8).

$$V_{P_{av}} = \frac{V_A + V_B + V_C}{3} \quad (2.8)$$

Como pode ser visto, esta definição segue as mesmas tendências e manipulações matemáticas apresentadas no desenvolvimento do indicador LVUR, proposto pela NEMA, contudo utilizando

tensões de fase no lugar das tensões de linha. Assim como aquele, este indicador também apresenta limitações em sua aplicabilidade, se restringindo apenas a desequilíbrios em magnitude (SUDASINGHE *et al.*, 2018).

A segunda definição de igual nome pode ser obtida por meio da seguinte equação:

$$\%PVUR = \frac{V_{max} - V_{min}}{V_{P_{av}}} \quad (2.9)$$

Onde, V_{max} representa o máximo valor de tensão de fase entre as fases A,B e C, V_{min} o mínimo valor de tensão de fase entre as mesmas e $V_{P_{av}}$ a tensão média de fase conforme apresentado em (2.8).

Neste caso, em situações de equilíbrio, as tensões de fase são iguais, de forma que a subtração proposta resultará em valor nulo. Contudo, com a presença de desequilíbrios, haverá discrepâncias entre as tensões de fase, estas serão passíveis de quantificação pela equação apresentada.

2.1.4.4 *Unbalance Factor*

Por fim, o último método de quantificação de desequilíbrios de tensão a ser apresentado é o *Unbalance Factor*, conhecido como método de Cigre (EUGENE, 1986). Seu cálculo é realizado por meio das equações (2.10) e (2.11).

$$\%UnbalanceFactor = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\psi}}{1 + \sqrt{3 - 6\psi}}} \quad (2.10)$$

O valor de Beta (ψ) nessa equação pode ser obtido por:

$$\psi = \frac{|V_{AB}^4| + |V_{BC}^4| + |V_{CA}^4|}{(|V_{AB}^2| + |V_{BC}^2| + |V_{CA}^2|)^2} \quad (2.11)$$

É válido ressaltar que, apesar da equação (2.11) ser apresentada por meio de tensões de linha, esta também é válida para tensões de fase. Ainda, dentre os métodos apresentados, este é o que apresenta resultados mais próximos aos obtidos pelo indicador *Voltage Unbalance Factor* apresentado na seção 2.1.4.1.

2.2 TEORIA DE REPRESENTAÇÃO TENSORIAL

Nesta seção serão abordados temas relativos a teoria da representação tensorial. Sua exposição se dará pela apresentação de tensores de ordem zero e de primeira e segunda ordem. Por fim, será realizada a introdução dos tensores potência instantânea e tensão de segunda ordem. Estes últimos serão alvo dos estudos aqui apresentados.

Após a introdução sobre os tensores supracitados, as explicações sobre a decomposição destes em suas partes simétricas, antissimétricas e de desvio serão realizadas. Por fim, esta seção se encerrará com a demonstração dos métodos para visualização de desvios entre um tensor referencial e um dado tensor real sob a análise das deformações de suas representações gráficas. A teoria a ser exposta possibilitará a aplicação da representação tensorial na análise tensões trifásicas conforme será visto no capítulo seguinte.

2.2.1 Tensores

Sendo T uma matriz de transformação capaz de transformar qualquer vetor a em c e b em d , sua representação pode ser escrita sob a forma da equação (2.12).

$$\begin{aligned} Ta &= c \\ Tb &= d \end{aligned} \tag{2.12}$$

A matriz de transformação T é chamada de transformação linear caso obedeça aos princípios de linearidade expressos por (2.13).

$$\begin{aligned} T(a + b) &= Ta + Tb \\ T(\alpha a) &= \alpha Ta \end{aligned} \tag{2.13}$$

Onde, a e b são dois vetores arbitrários e α um valor escalar arbitrário. De forma que, para os vetores arbitrários apresentados e os valores escalares arbitrários α e β , a equação acima pode ser reescrita em sua forma simplificada como:

$$T(\alpha a + \beta b) = \alpha Ta + \beta Tb \tag{2.14}$$

Caso a matriz de transformação obedeça a todos estes princípios de linearidade, esta poderá ser chamada de tensor de segunda ordem ou simplesmente tensor. Nestes casos, os vetores envol-

vidos nas relações lineares expostas são normalmente chamados de tensores de primeira ordem, enquanto os valores escalares apresentados são encarados como tensores de ordem zero (LAI *et al.*, 2009).

2.2.2 Obtenção do Tensor Potência Instantânea

Na área de sistemas de potência, a teoria tensorial adota os vetores espaciais de corrente e tensão instantâneas como tensores de primeira ordem (USTARIZ-FARFAN *et al.*, 2012a; DAI *et al.*, 2004). A apresentação destes pode ser vista abaixo:

$$\vec{u}_i = [u_a \ u_b \ u_c]^T \quad \vec{i}_j = [i_a \ i_b \ i_c]^T \quad (2.15)$$

Nesta, \vec{u}_i e \vec{i}_j representam, respectivamente, os tensores de tensão e corrente instantâneas trifásicos de primeira ordem. Tais tensores possuem a capacidade de representarem suas grandezas de forma espacial conforme visto na figura 2.2.

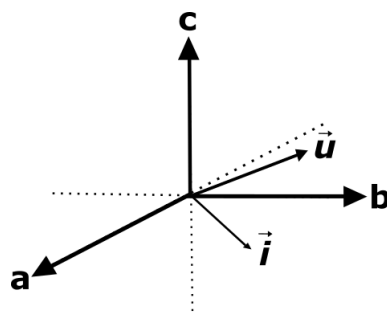


Figura 2.2. Representação geométrica de tensores instantâneos de primeira ordem da tensão e da corrente em relação a origem (0,0,0).

Para a obtenção do tensor de segunda ordem que relacione os tensores de primeira ordem apresentados, o produto diádico entre estes é realizado, conforme exposto na equação (2.16).

$$T_{ij} = a_i \otimes c_j = a_i c_j^t \quad (2.16)$$

Onde, T_{ij} corresponde ao tensor de segunda ordem que relaciona \vec{a}_i e \vec{b}_j , enquanto t representa o sinal de transposto, de forma que, o produto diádico entre dois tensores pode ser obtido pela como o produto entre um dos tensores de primeira ordem pelo transposto do segundo tensor.

No caso do tensor de segunda ordem da potência instantânea, este produto será realizado entre os tensores de primeira ordem apresentados na equação (2.15). Esta operação e seu resultado podem ser vistos abaixo:

$$\varphi_{ij} = \vec{u}_i \otimes \vec{i}_j = \begin{bmatrix} u_a i_a & u_a i_b & u_a i_c \\ u_b i_a & u_b i_b & u_b i_c \\ u_c i_a & u_c i_b & u_c i_c \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

Neste caso, o tensor de segunda ordem φ_{ij} pode ser visto como a transformação linear capaz de correlacionar os tensores de primeira ordem da tensão e da corrente transposto.

2.2.3 Obtenção do Tensor Tensão de Segunda Ordem

Como observado na subseção anterior, a utilização do tensor potência instantânea da forma como apresentado não se aplicaria para as análises ao qual esta dissertação se submete. Tal afirmativa toma como base o fato de que na obtenção do tensor potência instantânea haverá contribuições oriundas tanto da tensão como da corrente, assim as análises dos distúrbios presentes nas tensões trifásicas se tornam inviáveis.

Uma abordagem objetivando a eliminação das contribuições alheias ao sinal de tensão foi adotada na elaboração de um novo tensor. Neste, sua obtenção foi realizada por meio do produto diádico entre dois tensores tensão de primeira ordem. O tensor resultante foi chamado de tensor tensão de segunda ordem, e garante que as contribuições mensuradas terão como origem tão somente os distúrbios presentes no sinal de tensão.

A obtenção do tensor supracitado pode ser alcançada pela aplicação da equação (2.18) abaixo:

$$\Gamma_{ij} = \vec{u}_i \otimes \vec{u}_j = \begin{bmatrix} u_a u_a & u_a u_b & u_a u_c \\ u_b u_a & u_b u_b & u_b u_c \\ u_c u_a & u_c u_b & u_c u_c \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

Onde Γ_{ij} é o tensor tensão de segunda ordem que relaciona os tensores de tensão de primeira ordem.

2.2.4 Decomposição dos Tensores de Segunda Ordem

Uma das características dos tensores é a sua capacidade de decomposição em subtensores específicos. Estes permitem a identificação isolada de certos comportamentos de fenômenos físicos, associados à representação matemática utilizada. No estudo proposto, tais decomposições tomam importância ainda maior, vez que por meio da adoção da representação tensorial é possível realizar a análise de deformações em elementos de volume que possuem relação direta com os distúrbios elétricos do sistema. Relativo aos tensores de segunda ordem, estes podem ser decompostos em três (LAI *et al.*, 2009; USTARIZ E. A. CANO, 2009), sendo eles:

- Tensor antissimétrico
- Tensor simétrico
- Tensor de desvio

A manipulação tensorial para obtenção de cada um dos tensores supracitados será apresentada ao longo deste capítulo, sendo procedida pela introdução das relações existentes entre tais tensores e as deformações notadas em um elemento de volume cúbico na visualização de distúrbios elétricos.

2.2.4.1 Tensor Simétrico

A primeira decomposição dos tensores de segunda ordem se faz em tensores simétricos e antissimétricos. O primeiro é obtido por meio da manipulação matemática proposta em (2.19):

$${}^{sim}T_{ij} = \frac{1}{2} [T_{ij} + T_{ij}^t] \quad (2.19)$$

Nesta, T_{ij}^t representa a transposta do tensor instantâneo. A representação matricial resultante da equação (2.19) pode ser vista na equação (2.20).

$${}^{sim}T_{ij} = \begin{bmatrix} T_{11} & \frac{1}{2}(T_{12} + T_{21}) & \frac{1}{2}(T_{13} + T_{31}) \\ \frac{1}{2}(T_{21} + T_{12}) & T_{22} & \frac{1}{2}(T_{23} + T_{32}) \\ \frac{1}{2}(T_{31} + T_{13}) & \frac{1}{2}(T_{32} + T_{23}) & T_{33} \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

Onde, ${}^{sim}T_{ij}$ representa a parte simétrica ou tensor simétrico do tensor de segunda ordem.

2.2.4.2 Tensor Antissimétrico

A obtenção do tensor antissimétrico pode ser feita por meio da seguinte equação:

$${}^{ant}T_{ij} = \frac{1}{2} [T_{ij} - T_{ij}^t] \quad (2.21)$$

Na sua forma matricial, esta resultará na expressão (2.22):

$${}^{ant}T_{ij} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{2}(T_{12} - T_{21}) & \frac{1}{2}(T_{13} - T_{31}) \\ \frac{1}{2}(T_{21} - T_{12}) & 0 & \frac{1}{2}(T_{23} - T_{32}) \\ \frac{1}{2}(T_{31} - T_{13}) & \frac{1}{2}(T_{32} - T_{23}) & 0 \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

Sendo ${}^{ant}T_{ij}$ a parte antissimétrica ou tensor antissimétrico do tensor de segunda ordem.

2.2.4.3 Tensor Isotrópico

Feitas as decomposições iniciais, existem ainda subdecomposições que podem ser aplicadas ao tensor simétrico obtido na subseção 2.2.4.1. Ao serem aplicadas ao tensor simétrico, as subdecomposições propostas darão origem aos tensores isotrópicos e de desvio. Sendo o primeiro obtido por meio da equação (2.23).

$${}^{iso}T_{ij} = \frac{1}{3} p \delta_{ij} \quad (2.23)$$

Em (2.23), p representa o traço do tensor de segunda ordem T , enquanto δ_{ij} representa o delta de Kronecker. Tal equação pode ser reescrita na seguinte forma matricial, conforme visto na equação (2.24).

$${}^{iso}T_{ij} = \begin{bmatrix} \frac{1}{3}p & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{3}p & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{3}p \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

Sendo ${}^{iso}T_{ij}$ a parte isotrópica ou tensor isotrópico do tensor de segunda ordem.

2.2.4.4 Tensor Desvio

O segundo tensor oriundo da decomposição do tensor simétrico é o tensor de desvio. Sua obtenção pode ser realizada por meio da aplicação da equação (2.25).

$${}^{des}T_{ij} = {}^{sim}T_{ij} - \frac{1}{3}p\delta_{ij} \quad (2.25)$$

Assim, na forma matricial esse tensor dará origem ao exposto na equação (2.26).

$${}^{des}T_{ij} = \begin{bmatrix} T_{11} - \frac{1}{3}p & \frac{1}{2}(T_{12} + T_{21}) & \frac{1}{2}(T_{13} + T_{31}) \\ \frac{1}{2}(T_{21} + T_{12}) & T_{22} - \frac{1}{3}p & \frac{1}{2}(T_{23} + T_{32}) \\ \frac{1}{2}(T_{31} + T_{13}) & \frac{1}{2}(T_{32} + T_{23}) & T_{33} - \frac{1}{3}p \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

Sendo ${}^{des}T_{ij}$ o tensor desvio de um tensor de segunda ordem.

2.2.5 Componentes Ativas e Reativas dos Tensores

A potência ativa de um sistema trifásico pode ser obtida por meio da equação (2.27).

$$P_a = \vec{u}_i \cdot \vec{i}_j = u_a i_a + u_b i_b + u_c i_c \quad (2.27)$$

A potência ativa apresentada na equação (2.27) corresponde ao traço do tensor potência instantânea apresentado na equação (2.17), como observado na equação (2.28).

$$tr\{\varphi_{ij}\} = u_a i_a + u_b i_b + u_c i_c \quad (2.28)$$

Dessa forma, as componentes ativas do sistema podem ser calculadas por meio da teoria tensorial aplicando-se a relação descrita na equação 2.28, onde tr corresponde ao traço do tensor (MULLA *et al.*, 2013).

Com relação a potência reativa do sistema, esta pode ser obtida por meio da equação 2.29.

$$P_q = \vec{u}_i \times \vec{u}_j = \begin{bmatrix} 0 & q_{ab} & -q_{ca} \\ -q_{ab} & 0 & q_{bc} \\ q_{ca} & -q_{bc} & 0 \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

Nesta, as componentes q_{ab} , q_{bc} e q_{ca} são expressas por:

$$\begin{aligned}
q_{ab} &= u_a i_b - u_b i_a \\
q_{bc} &= u_b i_c - u_c i_b \\
q_{ca} &= u_c i_a - u_a i_c
\end{aligned} \tag{2.30}$$

Por fim, a potência reativa de um sistema pode ser definida por meio da equação (2.31) (DAI *et al.*, 2004).

$$|q| = \sqrt{q_{ab}^2 + q_{bc}^2 + q_{ca}^2} \tag{2.31}$$

Frente ao exposto, é possível notar que o tensor antissimétrico, dado pela equação (2.22), corresponde a metade da potência reativa do sistema, dada pela equação (2.29). Assim, os tensores antissimétricos podem ser utilizados para obtenção das componentes reativas no sistema conforme exposto na equação (2.32).

$$|q| = 2\sqrt{(\text{ant } T_{ab})^2 + (\text{ant } T_{bc})^2 + (\text{ant } T_{ca})^2} \tag{2.32}$$

2.2.6 Aplicação da Teoria Tensorial na Visualização de Distúrbios de Elétricos.

Como apresentado na seção 2.2, os tensores permitem a representação espacial das tensões instantâneas do sistema. Com base nessa prerrogativa, houveram dois trabalhos na literatura contemporânea que introduziram formas de visualização de distúrbios elétricos utilizando tensores. O primeiro adotou um elemento de volume cúbico que sofre deformações quando o sistema se encontra fora das condições nominais (USTARIZ E. A. CANO, 2009). O segundo aborda a criação de uma trajetória espacial capaz de representar o estado do sistema e as características das cargas a este ligadas (TRUJILLO-OROZCO *et al.*, 2015). Nesta subseção, tendo em vista que optou-se pela quantificação de desequilíbrios de tensão e não pela identificação de tipos de distúrbios elétricos, apenas se apresentará o modelo de representação por elemento de volume cúbico adotado na visualização de desequilíbrios dos sinais de potência.

2.2.6.1 Representação por Elemento de Volume Cúbico.

A representação física por elemento de volume cúbico dos tensores de segunda ordem pode ser realizada por meio de uma analogia entre o estudo de deformações em mecânica dos sólidos e o comportamento dinâmico dos fenômenos eletromagnéticos (USTARIZ *et al.*, 2010b). O elemento cúbico, conforme apresentado na figura 2.3, sofre deformações de acordo com a projeção dos elementos do tensor T_{ij} sobre as coordenadas dos seus vértices.

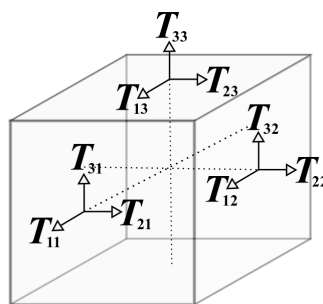


Figura 2.3. Elemento cúbico utilizado na visualização de distúrbios trifásicos.

Normalmente, a projeção de um tensor sobre as coordenadas do cubo geraria deformações independentemente da presença ou não de distúrbios no sistema. Contudo, conforme será apresentado no capítulo 3, existem manipulações matemáticas que ao serem aplicadas ao tensor farão com que o elemento cúbico sofra deformações apenas em situações de distúrbios. Esta subseção adotará tal prerrogativa na apresentação de suas simulações. Assim serão vistas deformações apenas em tais situações. Relativo às deformações, a projeção de um tensor de segunda ordem sob as coordenadas dos vértices de um cubo possui a capacidade de gerar:

- Rotação entorno dos eixos principais;
- Dilatação Volumétrica;
- Deformação Angular Interna.

Estas deformações estão diretamente correlacionadas aos tensores decompostos nas subseções 2.2.4.2, 2.2.4.3 e 2.2.4.4.

Rotação entorno dos eixos principais: O tensor antissimétrico obtido pela equação 2.21 provoca rotação entorno dos vértices principais do cubo. Na Figura 2.4 são apresentados os estados do cubo unitário para uma situação nominal, cubo em azul estático, e com distúrbios, cubo vermelho rotacionado.

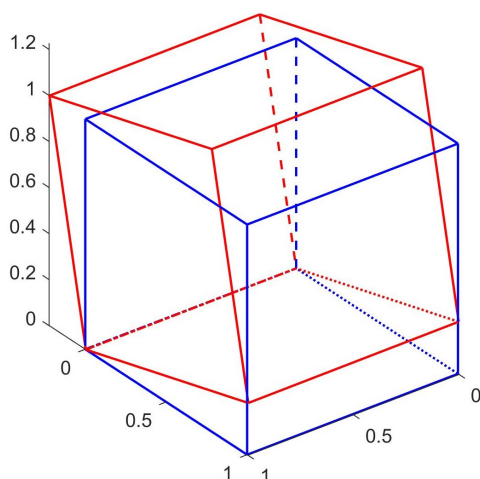


Figura 2.4. Análise da rotação de um elemento cúbico para um sistema em condições nominais (Elemento Cúbico Azul) e com distúrbios (Elemento Cúbico Vermelho).

Como pode ser observado na figura 2.4, em situações de equilíbrio, não existem rotações no cubo de referência. Contudo, na presença de desequilíbrios no sistema, o cubo resultante sofre tais deformações entorno dos seus eixos principais. A comparação direta entre estes dois cubos possibilita então a visualização de distúrbios presentes no sistema.

Dilatação Volumétrica: A dilatação volumétrica de um elemento de volume ocorre quando a parte isotrópica do tensor de segunda ordem T_{ij} , visto em (2.23), é projetada sobre as coordenadas espaciais dos vertices deste elemento. Essa poderá causar tanto a dilatação do elemento, quanto a sua contração volumétrica. A figura 2.5 abaixo traz a representação gráfica este fenômeno.

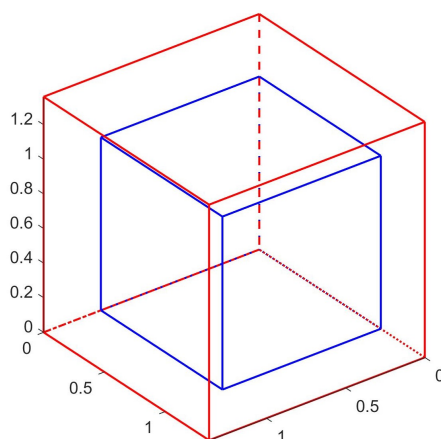


Figura 2.5. Análise da dilatação volumétrica de um elemento cúbico para um sistema em condições nominais (Elemento Cúbico Azul) e com distúrbios (Elemento Cúbico Vermelho).

Nesta, conforme pode ser inferido, o elemento de volume referencial (em azul) possui volume inferior ao obtido com dados instantâneos (em vermelho). Assim, a quantificação da deformação volumétrica entre tais elementos, se mostra como mais uma das ferramentas passíveis de serem

adotadas para a definição do desvio entre o estado referencial e o real de um tensor.

Deformação Angular Interna: Por fim, o último tipo de deformação a ser apresentado é a deformação angular interna, que possui relação direta com o tensor desvio. Este foi obtido na decomposição da parte simétrica dos tensores de segunda ordem, conforme apresentado na equação (2.25).

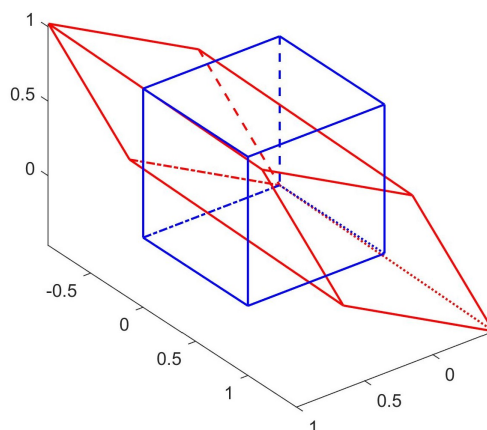


Figura 2.6. Análise da deformação angular interna de um elemento cúbico para um sistema em condições nominais (Elemento Cúbico Azul) e com distúrbios (Elemento Cúbico Vermelho).

Na figura 2.6 é possível observar que o elemento de volume referencial (em azul) se mantém imutável durante o exemplo exposto. No que tange a aquele que simula os tensores alheios a referência (em vermelho) nota-se que os ângulos internos deste sofrem deformação. Estas resultam em um elemento de volume com formas distintas daquele de referência. Esta distinção, é mais uma forma de visualização da presença de distúrbios entre tensores de segunda ordem.

2.3 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Neste capítulo foram apresentadas as fundamentações nas quais os desenvolvimentos propostos neste trabalho se baseará. Inicialmente, foram apresentados tópicos relevantes ao tema de desequilíbrio de tensão, mostrando desde suas principais causas até os principais métodos utilizados na sua quantificação. Por fim, foi realizada uma introdução à teoria tensorial. Nesta foram vistos tópicos que vão desde a obtenção de tensores de segunda ordem à aplicação destes nos estudos de sistemas de potência.

MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentados os materiais e métodos utilizados na concepção das contribuições apresentadas nesta dissertação. A base para os desenvolvimentos propostos se fundamentou na teoria apresentada no capítulo anterior, bem como nas referências até aqui apresentadas. Assim, os indicadores que serão apresentados exploram as deformações volumétricas do tensor tensão de segunda ordem e as rotações de manipulações propostas ao tensor potência instantânea.

Para o desenvolvimento do método de operação de cada indicador, inicialmente, foi preciso analisar de forma sistemática as deformações sofridas pelo cubo e sua relação com os sinais ora em análise. Para tanto, uma ferramenta computacional foi desenvolvida com o auxílio do MATLAB de forma a proporcionar um ambiente de simulação capaz de apresentar informações detalhadas e de forma simplificada e otimizada. O funcionamento desta é apresentado em maiores detalhes no Apêndice B.

A interface gráfica desenvolvida propiciou a análise comportamental dos distúrbios sofridos pelo elemento de volume quando submetido a tensores de sistemas com diferentes tipos e condições de equilíbrio e desequilíbrio. Tal ferramenta possibilitou a definição da relação existente entre as variações de potência ativa e reativa e deformações específicas sofridas pelo elemento.

Uma vez definida a relação entre os distúrbios elétricos e as deformações presentes no elemento de volume, foi iniciado o estudo de possíveis formas de realizar a quantificação destes, por meio da criação de dois diferentes indicadores. O primeiro, chamado de VUL, *Voltage Unbalance Level*, trabalha com a quantificação das deformações volumétricas em tensores tensão de segunda ordem. O segundo, toma como base a quantificação das rotações entorno dos eixos do elemento de volume. Esta tem por base uma manipulação ao tensor potência instantânea que possibilita a análise dos desequilíbrios sem a introdução de erros no sistema, e é representada pelo indicador VUC, *Voltage Unbalance Coefficient*.

3.1 QUANTIFICAÇÃO DE DISTÚRBIOS

Sabendo da relação existente entre as componentes ativas e reativas do sistema com as deformações notadas no elemento de volume, uma forma de quantificação destas deformações se fez interessante e necessária para o desenvolvimento dos indicadores propostos. Para tanto, foram estudadas duas abordagens, uma contemplando a quantificação da dilatação volumétrica e outra a rotação absoluta do elemento entorno dos seus eixos. O desenvolvimento destas se baseou na tese de doutorado do pesquisador Ustariz (FARFÁN *et al.*, 2011).

O processo inicial para quantificação das deformações passa pela delimitação das coordenadas dos vértices do elemento de volume instantâneo e de referência. Assim, sabendo que o elemento de volume adotado como referencial foi um cubo unitário, sabe-se que seus vértices são delimitados pelos vetores \vec{a} , \vec{b} e \vec{c} , onde $(a,b,c) = (1,1,1)$. Para o cubo instantâneo temos que seus vértices serão delimitados pelos vetores \vec{A} , \vec{B} e \vec{C} . A Figura 3.1 traz uma representação gráfica dos vetores elementos de volume citados.

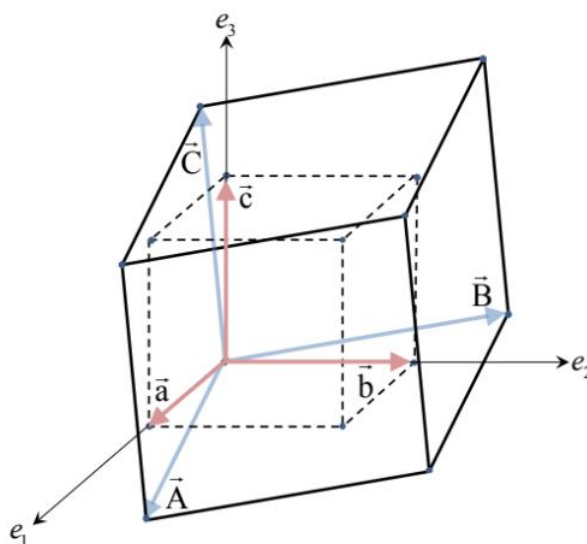


Figura 3.1. Representação geométrica dos cubos referência e instantâneo (retirada de: (FARFÁN *et al.*, 2011).

De posse das coordenadas dos vértices principais do cubo, a quantificação das grandezas de rotação e dilatação volumétrica se tornam triviais. Seus resultados podem ser obtidos por meio de manipulações geométricas espaciais obtidas com a utilização de cálculos vetoriais.

3.1.1 Tensor de Distorções

A análise das deformações é precedida da projeção do tensor de segunda ordem sobre os vértices de um elemento de volume. Existem manipulações tensoriais que possibilitam que tais projeções apenas modifiquem as coordenadas do elemento caso sejam notados distúrbios no sistema. Esta subseção se aterá a delimitar tais manipulações.

Dito isto, o desenvolvimento de um tensor que contenha tão somente as variações entre um estado referencial do sistema e o estado instantâneo amostrado foi realizado. Este é conhecido por tensor Distorção, e para a sua correta compreensão, se faz necessária a definição dos três seguintes tensores:

- **O Tensor Instantâneo:** Tensor obtido por meio dos valores instantâneos de tensores de primeira ordem de corrente e/ou tensão reais, mensurados ou amostrados diretamente de sinais temporais da rede elétrica;
- **O Tensor Referência:** Tensor obtido por meio de tensores de corrente e/ou tensão ideais ¹, ou seja, obtidos por meio das condições nominais do sistema;
- **O Tensor Distorção:** Tensor contendo tão somente as variações entre um estado referencial do sistema e o estado instantâneo amostrado

O tensor distorções representa o desvio do sistema quando comparado a uma situação ideal (TRUJILLO-OROZCO *et al.*, 2015) e é obtido por:

$$\partial_{ij} = T_{ij} - {}^{ref}T_{ij} \quad (3.1)$$

Em que, em (3.1), ∂_{ij} representa o tensor de distorções, ${}^{ref}T_{ij}$ o tensor referência e T_{ij} o tensor instantâneo. Ressaltamos que, para o exemplo acima foi utilizado de forma ilustrativa o tensor tensão de segunda ordem. Contudo tal equação é extensível a todos os tensores de segunda ordem que serão manipulados nesta dissertação.

A utilização do tensor de distorções garantirá uma análise mais prática e intuitiva dos desequilíbrios. Seu funcionamento se baseia no fato de que, em situações onde o tensor instantâneo for semelhante ao ideal, a subtração proposta em (3.1) resultará em um tensor nulo. Este por sua vez não gerará distorções sobre os vértices dos elementos de volume.

¹Entende-se por ideal tensão de sequência positiva. Assim, um sistema trifásico ideal pode ser visto como aquele formado por uma fonte de tensão senoidal equilibrada alimentando uma carga resistiva, balanceada e linear.

3.1.2 Dilatação Volumétrica

A quantificação da dilatação volumétrica foi realizada por intermédio do tensor tensão de segunda ordem. Por meio deste foi possível trabalhar-se tão somente com as componentes de tensão de um sistema, eliminando-se assim qualquer tipo de erro relacionado às oscilações nas correntes ou na carga.

Sabendo que os tensores podem ser decompostos em isotrópicos, antissimétricos e desvio, e que cada um destes é responsável por um tipo específico de deformação, é possível delimitar a parte do tensor que possui contribuições específicas às deformações volumétricas. Assim, por meio da definição do tensor de distorções apresentada, o expresso na equação (2.23) foi aplicado à (3.1), de forma que foi possível obter-se o tensor isotrópico de distorções ($^{iso}\partial_{ij}$), contendo apenas as variações infinitesimais da diferença entre o tensor referência e instantâneo da tensão de segunda ordem.

A quantificação da dilatação volumétrica foi realizada pela projeção do tensor isotrópico de distorções sobre os vértices de um elemento de volume cúbico. Durante as projeções, caso os sistemas em análise sejam equilibrados, não serão notadas deformações neste elemento. Contudo, para situações com presença de distúrbios, onde o tensor distorções deixa de ser nulo, será possível perceber expansões ou contrações no volume deste quando comparado ao referencial.

Assim, a fim de se realizar a quantificação das deformações volumétricas em um sinal, procedeu-se uma comparação direta entre o volume inicial do elemento cúbico adotado e o volume final deste para todas as amostras de um sinal de tensão. Dessa forma, foi possível aferir de forma percentual o valor da dilatação volumétrica como sendo obtido por:

$$\Delta V[\%] = \frac{V_{ref} - V_{ins}}{V_{ref}} \times 100 \quad (3.2)$$

Em que, em (3.2), V_{ins} e V_{ref} representam o volume do cubo instantâneo e de referência respectivamente. O cálculo destas grandezas pode ser realizado pelas expressões (3.3) e (3.4).

$$V_{ins} = \|(\vec{A} \times \vec{B}) \cdot \vec{C}\| \quad (3.3)$$

$$V_{ref} = \|(\vec{a} \times \vec{b}) \cdot \vec{c}\| \quad (3.4)$$

Onde os vetores espaciais \vec{A} , \vec{B} e \vec{C} estão relacionados às coordenadas dos vértices do cubo instantâneo, enquanto os vetores \vec{a} , \vec{b} e \vec{c} são relativos ao cubo referencial, ambos vistos na figura 3.1.

A relação observada entre as componentes ativas e as deformações volumétricas ilustrada na figura 3.2, foi a base para o desenvolvimento do primeiro indicador a ser apresentado nesta dissertação. Este foi chamado de VUL, e será introduzido na próxima seção.

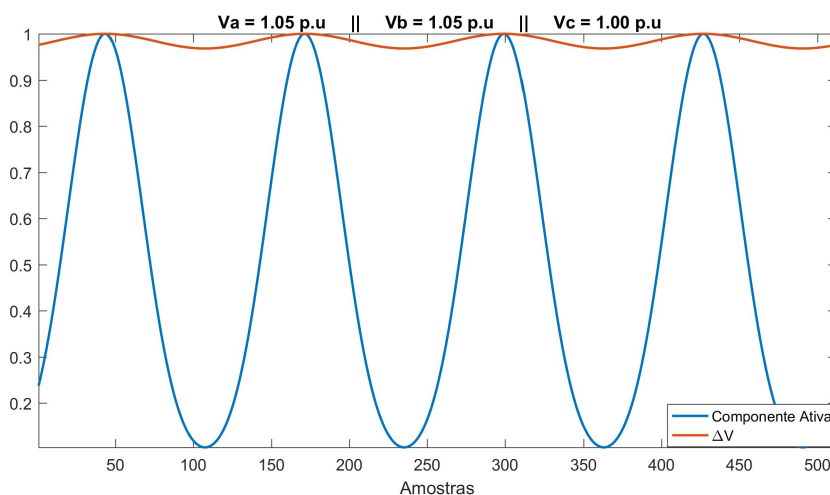


Figura 3.2. Representação dos resultados da quantificação da deformação volumétrica amostra a amostra.

A análise dos dados volumétricos quantificados foi realizada por meio da comparação destes às oscilações das componentes ativas, presente em sistemas desequilibrados. Durante tal análise, foi possível observar que o resultado obtido para a deformação volumétrica estava perfeitamente em fase com aquele obtido para as oscilações das componentes ativas do sistema. Observou-se ainda que estes descreviam o mesmo comportamento, apresentando diferenças tão somente na magnitude de suas amplitudes.

3.1.3 Rotação

Para as análises de rotação, nota-se que a porção antissimétrica do tensor possui relação direta com este tipo de deformação. Assim, para seu cálculo, o tensor de distorções foi decomposto em sua parte antissimétrica ($^{Ant}\partial_{ij}$). A quantificação dos resultados obtidos por esse tensor, foi realizada por análise geométrica semelhante à abordagem utilizada na deformação volumétrica. Dessa forma, tendo as coordenadas que descrevem a posição dos vetores espaciais \vec{A} , \vec{B} e \vec{C} , relati-

vas ao cubo instantâneo, e \vec{a} , \vec{b} e \vec{c} , relativas ao cubo referencial, é possível aplicar-se os conceitos de geometria analítica para se determinar o ângulo de rotação formado entre dois vetores especiais. No caso em tela, o conjunto de vetores analisados foram (\vec{A}, \vec{a}) , (\vec{B}, \vec{b}) e (\vec{C}, \vec{c}) , todos tendo como origem o ponto $(0,0,0)$. A representação gráfica desta abordagem pode ser observada no gráfico 3.3.

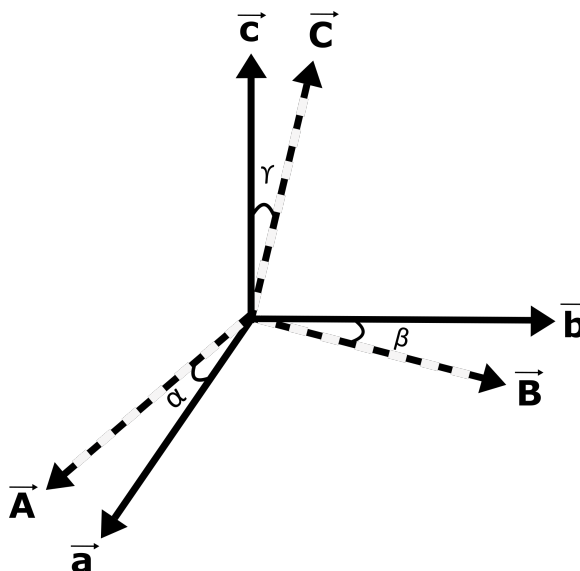


Figura 3.3. Representação geométrica da rotação dos ângulos principais do cubo em relação a sua referência.

A quantificação dos ângulos apresentados pode ser realizado por meio do produto vetorial entre dois vetores, conforme visto nas equações (3.5), (3.6) e (3.7). No caso concreto, e adotando o elemento de volume cúbico, estes vetores terão origens coincidentes e representarão o mesmo vértice tanto no cubo referencial quanto no instantâneo.

$$\alpha = \frac{\vec{a}}{\|\vec{a}\|} \times \frac{\vec{A}}{\|\vec{A}\|} \quad (3.5)$$

$$\beta = \frac{\vec{b}}{\|\vec{b}\|} \times \frac{\vec{B}}{\|\vec{B}\|} \quad (3.6)$$

$$\gamma = \frac{\vec{c}}{\|\vec{c}\|} \times \frac{\vec{C}}{\|\vec{C}\|} \quad (3.7)$$

Por meio das equações acima, o índice de rotação absoluta pode ser calculado como sendo:

$$ROT = \sqrt{\frac{\alpha^2 + \beta^2 + \gamma^2}{3}} \quad (3.8)$$

Os dados rotacionais absolutos obtidos por meio da equação (3.8) foram normalizados e confrontados com os valores das componentes reativas do sistema. As figuras abaixo ilustram algumas das situações observadas:

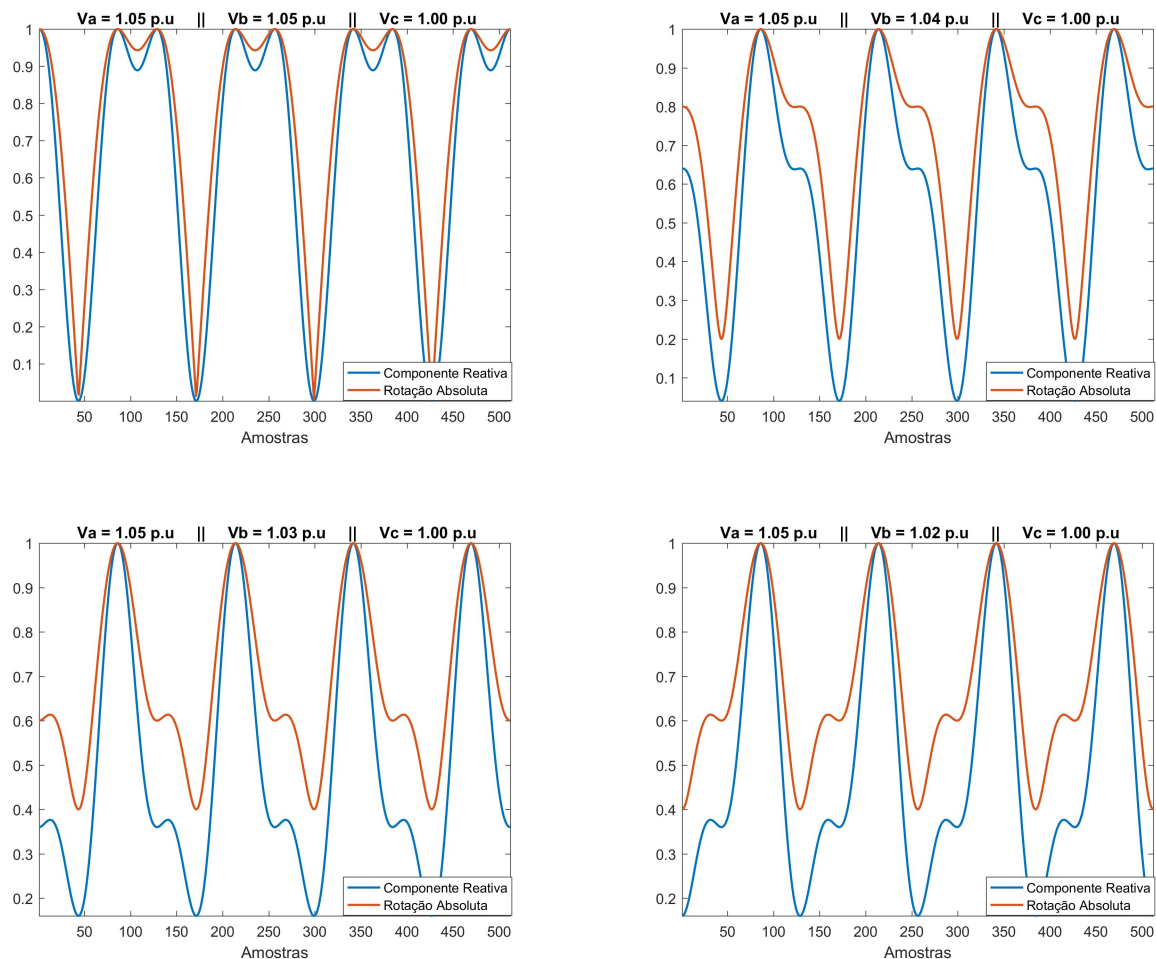


Figura 3.4. Gráficos de componentes reativas e rotação absoluta para sistemas desequilibrados.

Como observado, há uma relação de simetria entre as curvas obtidas para a rotação absoluta e as componentes reativas do sistema. Tal relação será explorada adiante no desenvolvimento do indicador VUC que parte do pressuposto da existência de reativos em sistemas desequilibrados.

3.2 INDICADORES DE DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO BASEADOS NA TEORIA TENSORIAL

Como apresentado na seção anterior, notou-se a existência de uma relação direta entre as componentes ativas em tensores de segunda ordem e a dilatação volumétrica. Relação semelhante foi

observada entre a rotação do elemento de volume e as componente reativas do sistema. Assim, a quantificação destas deformações são a chave para a determinação do nível de desequilíbrio que afetam as componentes reativas e ativas do sistema.

Os indicadores desenvolvidos partiram de dois pressupostos básicos. O primeiro definiu como sistema referencial as condições nominais de tensão. Nesta situação, não há presença de reativos no sistema e o valor das componentes ativas é constante para todas as amostras simuladas. O segundo pressuposto definiu a existência de desequilíbrios de tensão quando há presença de reativos no sistema e/ou quando os valores das componêntes ativas são oscilantes no tempo. Tais afirmações tomaram como base as simulações realizadas durante os estudos iniciais por meio da interface gráfica mencionado no início deste capítulo. Estas podem ser vistas no Apêndice B desta dissertação.

Assim, inicialmente o trabalho foi dividido em duas vertentes. A primeira aprofundaria em uma forma de aplicação dos tensores para quantificação das variações de componentes ativa, enquanto a segunda se ateriam a aquelas referentes as componentes reativas. Ao final os valores encontrados em cada caso seriam confrontados com os valores encontrados pelo indicador VUE, de forma a se proceder a validação dos dados obtidos. Com estes será possível determinar a existência de correlação entre os indicadores propostos e o indicador VUE.

3.2.1 Indicador de Desequilíbrio de Tensão Baseado na Dilatação Volumétrica

O primeiro indicador determinado teve como base as oscilações de componentes ativas. Assim, sabendo que um elemento de volume sofre deformações volumétricas quando em situações de desequilíbrio e que estas são causadas pela projeção da parte isotrópica do tensor sobre suas coordenadas, foi realizada a quantificação da deformação volumétrica ao longo de dois ciclos de 256 amostras cada.

Ao se realizar a análise dos resultados obtidos pela quantificação da deformação volumétrica, notou-se que este podia ser descrito por um sinal senoidal periódico conforme ilustrado na figura 3.2. Com este resultado, definiu-se o primeiro indicador como sendo o valor RMS da senoide obtida. Este indicador foi chamado de VUL, *Voltage Unbalance Level*, e seu cálculo pode ser visto na equação (3.9).

$$VUL = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Delta V_i^2} \quad (3.9)$$

Em que, em (3.9), VUL representa a estimativa do desequilíbrio de tensão para o intervalo de tempo avaliado, ΔV_i é o valor do índice de deformação volumétrica calculado para cada amostra, podendo ser obtido por meio da equação (3.2), e N o número de amostras.

É interessante ressaltar que, o indicador citado consegue identificar o desequilíbrio a partir de meio ciclo de senoide. Ademais, pontua-se também a capacidade de se aplicar os princípios de janela deslizante no cálculo deste. Dessa forma, a partir do valor obtido para meio ciclo, é possível realizar o cálculo para novas amostras tão somente eliminando as contribuições da primeira amostra e adicionando-se aquelas da nova ao valor de VUL .

3.2.2 Indicador de Desequilíbrio de Tensão Baseado na rotação

O próximo indicador, chamado de Voltage Unbalance Coefficient - VUC, tomou como base o tensor antissimétrico responsável pela rotação do cubo entorno de seus eixos principais. Tal tensor possui relação direta com as oscilações de potência reativa no sistema.

Como já mostrado, a quantificação da rotação absoluta do elemento de volume e alcançada por meio da equação (3.8). Esta apresenta comportamento não senoidal e periódico ao longo da simulação, conforme ilustrado na figura 3.1.3.

Com este resultado, realizou-se a definição do segundo indicador proposto. Este consiste no valor RMS do sinal obtido na análise das deformações volumétricas do sistema. Tal indicador foi chamado de VUC - Voltage Unbalance Coefficient e seu cálculo pode ser visto na equação (3.10).

$$VUC = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N ROT_i^2} \quad (3.10)$$

Em que, em (3.10), VUC representa uma estimativa do desequilíbrio de tensão para o intervalo de tempo avaliado, ROT_i é o valor do índice global de rotação calculado para cada amostra, obtido por meio de 3.8, e N o número de amostras.

Por fim, a este indicador também é válido o princípio da janela deslizante apresentado para o indicador VUL . Há de se pontuar ainda a possibilidade de realização de seus cálculos em meio

ciclo, de forma que para as amostras seguintes o cálculo a ser realizado se torna bem mais simples e trivial.

3.3 MÉTODOS DE ANÁLISE DE DESEMPENHO

Ao fim das simulações, os dados obtidos foram levados a análise. Tal análise foi dividida dentro das seguintes temáticas:

- Tempo de processamento:
 - Tempo necessário para o processamento do indicador, contabilizado desde a manipulação dos dados brutos até a obtenção de seu resultado final.
- Nível de Correlação:
 - Correlação entre o cálculo dos indicadores com a referência, sendo esta o valor de VUF utilizando-se dados ideais no domínio da frequência.

Os áreas de análise elencadas possuíram por objetivo a determinação da correlação e desempenho dos indicadores. Os métodos utilizados em tais análises serão expostos durante esta seção.

3.3.1 Tempo de Processamento

O custo computacional envolvido desde a manipulação dos dados brutos à apresentação dos resultados finais está intimamente ligado ao tempo de processamento dos algoritmos de cálculo dos indicadores. Assim, a análise do tempo de processamento teve, dentre outros, os seguintes fatores levados em conta:

- Tempo médio gasto pelos indicadores para realização dos cálculos;
- Cálculos realizados a partir de dados brutos de tensão até a obtenção do resultado final;
- Tempo de processamento sensível às capacidades de processamento e número de processos rodados em simultâneo durante as simulações.

As simulações foram realizadas em um computador com as seguintes configurações de hardware:

- Processador: Core i7 - 4700MQ;
- Memória Ram: 8Gb;

- Frequência de Processamento: 2.4Ghz à 3.4Ghz;
- Cache: 6 MB;
- Velocidade de barramento: 5 GT/s

A simulação foi realizada em um sistema operacional windows 10. Tendo em vista a volatilidade da quantidade de processos sendo rodados em segundo plano e em concomitância com a simulação, optou-se por realizar a medição do tempo médio de processamento com base no tempo médio de 10.000 simulações feitas para as mesmas condições de desequilíbrio. As simulações foram realizadas para VUL, VUC e VUF em análise a um sinal de 1 período com 256 amostras.

Para os cálculos do indicador VUF, inicialmente aplicou-se a Transformada Rápida de Fourier ao sinal a ser processado de forma a obter-se a resposta na frequência daquele sinal. De posse deste dado, aplicou-se a transformada de Fourtscue para obtenção das componentes simétricas que representem os estados do sistema, aplicando-se por fim a razão entre a tensão de sequência negativa e positiva para obter-se o valor de VUF. Ressalta-se que, para a realização dos procedimentos citados, necessita-se de no mínimo 1 ciclo para se obter os fasores no domínio da frequência.

Para os indicadores obtidos por meio da aplicação da teoria tensorial, inicialmente, os procedimentos de quantificação apresentados foram reduzidos a um conjunto analítico de cálculos que os representassem. Assim, por meio deste algoritmo simplificado, foi possível garantir que os resultados fossem obtidos de forma direta e sem a necessidade de cálculos desnecessários realizados em algumas das manipulações matriciais apresentadas.

A tabela 3.1 traz o conjunto analítico de operações obtido para o cálculo do indicador VUL. Nesta o valor n corresponde ao número de amostras da simulação.

Tabela 3.1. Quadro de operações para cálculo do algoritmo VUL.

Parâmetro	Quantidade de Operações
Tensor Instantâneo	n x 3 Multiplicações
Tensor Referência	n x 3 Multiplicações
Tensor Distorção	n x 3 Subtrações
Tensor isotrópico	n x (2 Somas e 1 Divisão)
Referência Cúbica	n x 3 Somas
Volume instantâneo	n x 2 Multiplicações
Soma de ΔV^2	n x (1 Subtração + 1 Soma + 2 Multiplicação)
VUL	1 Divisão + 1 Raiz
TOTAL	n x (10 Multiplicações + 4 Subtrações + 4 Soma) + 1 Divisão + 1 Raiz

O tempo de processamento aqui calculado terá como base o tempo necessário para quantificação do desequilíbrio. Assim como mencionado, o VUF necessita de pelo menos um ciclo para sua quantificação, dessa forma, os cálculos realizados para este tomarão como base 1 ciclo de 256 amostras. Já no que tange aos indicadores que utilizaram a abordagem tensorial, como mencionado no capítulo anterior, estes necessitam apenas de meio ciclo para chegar a quantificação final do desequilíbrio. Assim, as manipulações destes indicadores se darão com meio ciclo e 128 amostras.

3.3.2 Nível de Correlação

O nível de correlação entre dois conjuntos de dados, x e y , pode ser visto como a medida de similaridade entre estes. Há várias formas de se obter tal medida, aquela adotada nesta análise foi o Coeficiente de Correlação Linear de Pearson que é apresentado na equação (3.11).

$$CC_{(x,y)} = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \mu_x)}{\sigma_x} \frac{(y_i - \mu_y)}{\sigma_y} \quad (3.11)$$

Nesta N representa o número de elementos dos vetores sendo comparados, μ o desvio médio, σ representa o desvio padrão, e por fim $CC_{(x,y)}$ a matriz contendo os coeficientes de correlação entre os dois conjuntos de dados, tal que

$$CC_{(x,y)} = \begin{bmatrix} \rho(x,x) & \rho(x,y) \\ \rho(y,x) & \rho(y,y) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \rho(x,y) \\ \rho(y,x) & 1 \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

Na equação 3.12, a diagonal principal corresponde ao coeficiente de correlação entre um conjunto e ele mesmo (sempre igual a 1). Os elementos fora da diagonal principal trazem a correspondência entre conjuntos distintos, sendo que a relação entre x e y é igual a relação entre y e x .

Para a quantificação do nível de correlação existente entre os resultados dos indicadores, o indicador VUF foi utilizado como referência. O cálculo dos coeficientes de correlação obedeceu o disposto na tabela 4.1. Para garantir-se a objetividade na apresentação dos resultados, foram apresentados apenas aqueles oriundos de desequilíbrios que atuem em mais de uma fase. Estes são mais genéricos e já integram em suas simulação os casos de desequilíbrio isolado em uma das fases.

3.4 SÍNTESE

Neste capítulo foi apresentada toda metodologia adotada no cálculo dos indicadores propostos nesta dissertação. Para tanto foi realizada a decomposição dos tensores de segunda ordem em suas componentes isotrópicas e simétricas. A primeira se mostrou útil na quantificação de distúrbios relacionados à oscilações de componentes ativas do sistema, enquanto a última apresentou contribuições na análise das oscilações de componentes reativas.

Por meio da quantificação das deformações volumétricas e rotacionais foi possível delinear um índice global de deformação para cada um destes. Tais índices foram adotados na elaboração dos indicadores propostos na dissertação. O primeiro relacionava as oscilações das componentes ativas às deformações volumétricas sofridas pelo elemento de volume. Já o segundo, relacionava a rotação absoluta do cubo às variações de componentes reativas do sistema.

O método de cálculo dos indicadores foi procedido de forma semelhante, sendo inicialmente quantificadas as deformações para cada amostra. Ao se realizar a análise de meio ciclo de amostras, obteve-se um sinal periódico ao qual foi aplicado o cálculo do valor RMS para determinação dos indicadores propostos.

APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Este capítulo optou pela padronização do VUF como ferramenta de validação dos resultados obtidos, visto ser este o mais difundido e aceito indicador de desequilíbrios de tensão na literatura (NEMA, 2016; ANSI, 1995; ANEEL, 2007), e ainda tendo em vista que os demais constituem-se de aproximações aos resultados deste (SEIPHETLHO; RENS, 2010). Assim, os resultados e a análise dos indicadores desenvolvidos com a utilização da teoria tensorial serão comparados com aqueles do indicador VUF.

4.2 QUANTIFICAÇÃO DE DESEQUILÍBRIOS DE TENSÃO

A tabela 4.1 traz os casos de interesse simulados nesta dissertação. Estes compreendem desequilíbrios de magnitude e fase aplicados aos sinais de tensão e simulados de acordo com os fatores de desequilíbrios presentes na tabela 4.1.

Tabela 4.1. Casos simulados com referência às suas magnitudes e fases.

Caso	$V_a [p.u]$	$V_b [p.u]$	$V_c [p.u]$	$\alpha_A [^\circ]$	$\alpha_B [^\circ]$	$\alpha_C [^\circ]$
1	1 ± 0.05	1	1	0	0	0
2	1	1	1	± 5	0	0
3	1 ± 0.05	1 ± 0.05	1	0	0	0
4	1	1	1	± 5	± 5	0

Os valores utilizados na tabela 4.1 obedeceram ao exposto nos padrões IEEE 1159 (IEEE, 2009), ANSI C84.1 (ANSI, 1995), e PRODIST 8 (ANEEL, 2007) que abordam o tema de desequilíbrios de tensão em regime permanente de sistemas de baixa tensão.

Para fins de organização esta seção seguirá a mesma distribuição da tabela 4.1. Dessa forma, esta se subdividirá em 4 subseções, sendo cada uma responsável por um dos casos supracitados. Na próxima seção, será dado início a análise dos indicadores, se apoiando principalmente no nível de correlação entre estes e o VUF, e em seu tempo de processamento.

4.2.1 Caso 01: Sistema Trifásico Acometido de Desequilíbrios de Magnitude em uma de suas Fases.

Na simulação apresentada no caso 1, foram analisados desequilíbrios de tensão aplicados à magnitude de uma das fases do sistema, deixando os ângulos de fase em condições nominais. Os resultados obtidos, possuem variações na magnitude de suas respostas, dessa forma, para uma melhor comparação visual, estes foram normalizados entorno do seu maior valor, de forma que suas variações se encontrem dentro do intervalo de zero a um. O resultado deste é apresentado na figura 4.1.

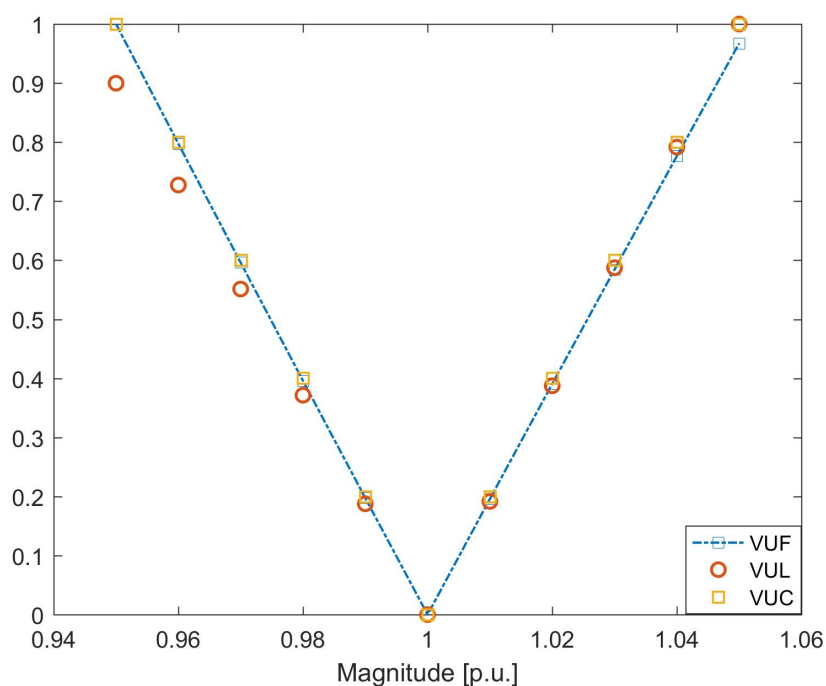


Figura 4.1. Simulação dos indicadores no caso 01: Variação de 0.95 a 1.05 pu na fase A com fases B e C em condições nominais.

Na figura 4.1 observa-se uma dispersão entorno dos pontos de cálculo do VUF, seguida por todos os indicadores calculados. Tendo em vista o comportamento apresentado, há de se afirmar que existe correlação entre os resultados apresentados para as condições de simulação expostas no caso 01.

4.2.2 Caso 02: Sistema Trifásico Acometido de Desequilíbrios de Ângulos de Fase em uma de suas Fases.

Para o caso 02, os desequilíbrios que atuam especificamente sobre uma das fases dos ângulos de fase de um sistema trifásico foram estudados. Neste, as magnitudes de tensão foram deixadas perfeitamente balanceadas, ocorrendo variações tão somente nos ângulos de fase de uma das fases do sistema. A figura 4.2 apresentamos os resultados obtidos para este caso.

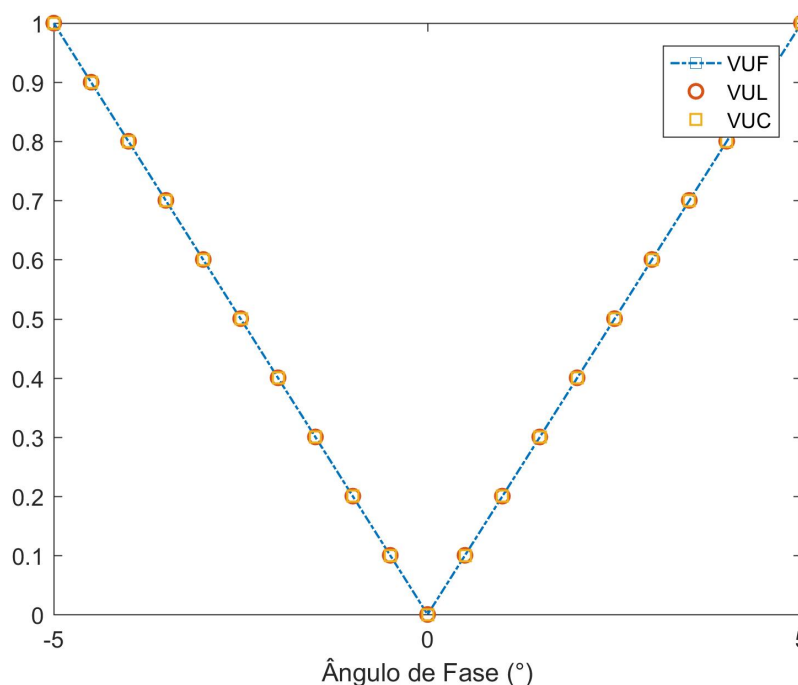


Figura 4.2. Simulação do caso 02: Variação de -5° a 5° na fase A com fases B e C em condições nominais.

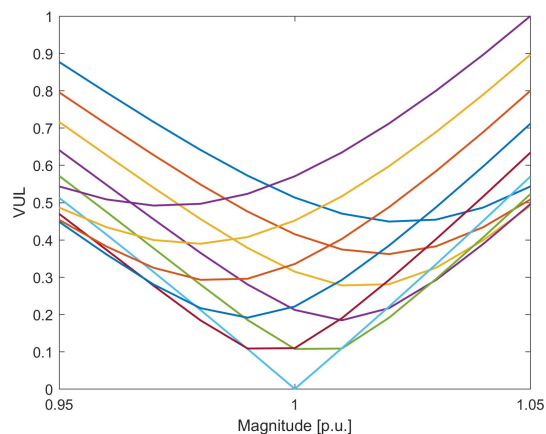
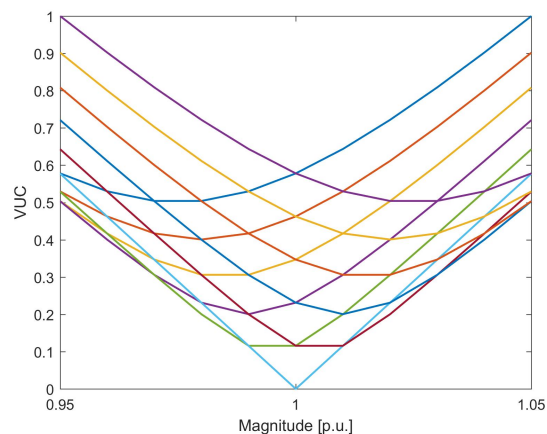
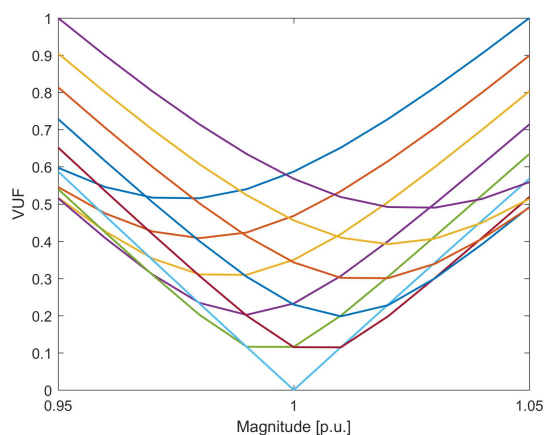
Neste caso, é possível notar uma concentração dos resultados nos pontos exatos de cálculo do VUF. Assim como no caso anterior, é possível depreender desta situação que haverá também possibilidade de se encontrar uma relação direta, de forma que seja possível descrever o comportamento de um indicador a partir de outro, isso desde que observadas os limites de simulação apresentados (Desequilíbrios aplicados aos ângulos de fase da tensão para sistemas de baixa tensão em regime permanente.).

4.2.3 Caso 03: Sistema Trifásico Acometido de Desequilíbrios de Magnitude em duas de suas Fases

No caso 03, deu-se início ao estudo dos desequilíbrios de tensão presentes em mais de uma fase do sistema trifásico analisado. Inicialmente os fatores de desequilíbrio foram aplicados sobre a magnitude de duas de suas fases, conforme apresentado na tabela 4.1. De forma que, para a correta simulação do caso em tela, o seguinte algoritmo foi adotado:

- 1° Passo: Definir o fator de desequilíbrio aplicado a Fase A;
- 2° Passo: Definir a fase C em condições nominais (1 pu);
- 3° Passo: Realizar os cálculos dos resultados dos indicadores por meio da variação dos fatores de desequilíbrio aplicados a fase B (1 ± 0.05).
- 4° Passo: Salvar os resultados, incrementar o fator de desequilíbrio da fase A, e, caso este ultrapasse os limites de simulação encerrar a simulação, caso contrário retornar ao 1° passo;

Tal algoritmo gerou 11 situações de análise que compreendem no total a 121 pontos de simulação. Estas situações foram consolidadas em um único gráfico por indicador. Os dados destes foram normalizados e os resultados obtidos podem ser vistos nas figuras 4.3, 4.4 e 4.5.

**Figura 4.3. VUL****Figura 4.4. VUC****Figura 4.5. VUF**

Vale esclarecer que, cada uma das cores utilizadas na plotagem dos gráficos correspondem a uma das 11 situações de desequilíbrio supracitadas. Dessa forma, para se realizar uma comparação gráfica entre os indicadores, basta comparar duas linhas de igual cor nos respectivos gráficos.

Evidenciou-se que, os indicadores VUC e VUF apresentam comportamento simétrico, enquanto VUL não demonstra possuir relação direta com o indicador VUF. Para o último indicador, VUL, nota-se que o comportamento descrito por este é espelhado a VUF entorno da condição de maior equilíbrio, fase B em 1 p.u. Dessa forma, apenas para fins de comprovação foi realizada a rotação do gráfico entorno do ponto citado, e assim realizou-se nova análise gráfica deste indicador. Os resultados são apresentados figura 4.7.

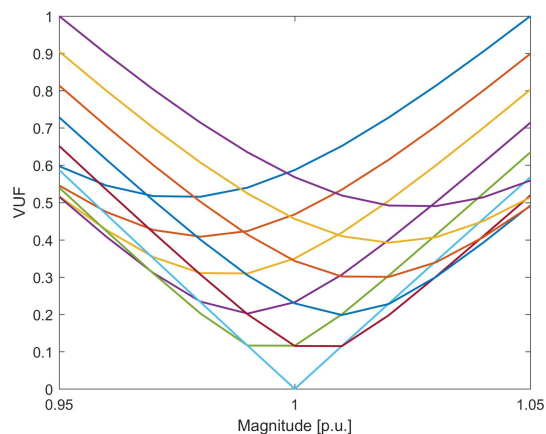


Figura 4.6. VUF

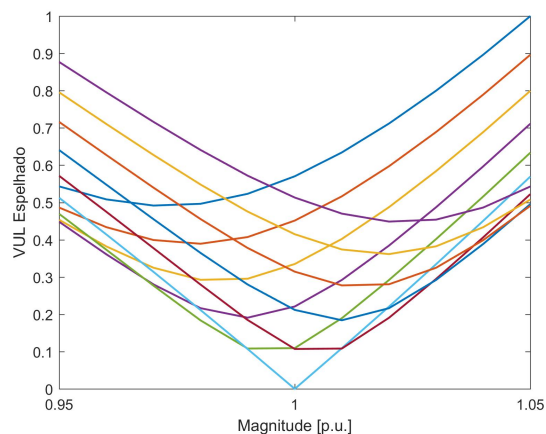


Figura 4.7. VUL Espelhado

Ao se observar os resultados obtidos nas figuras 4.6 e 4.7, nota-se semelhança entre os indicadores. Contudo, vale ressaltar que ainda são notadas diferenças entre ambos os gráficos. As causas de tal comportamento não foram encontradas durante o decorrer desta pesquisa, sendo necessários investigações mais aprofundadas que possam elucidar as razões deste acontecimento.

Por fim, na figura 4.8, a população de dados dos gráficos apresentados foi reduzida a 3 das 11 situações de desequilíbrio simuladas. Foram contempladas nesta análise as situações de maior desequilíbrio na sobretensão e subtensão e o desequilíbrio monofásico.

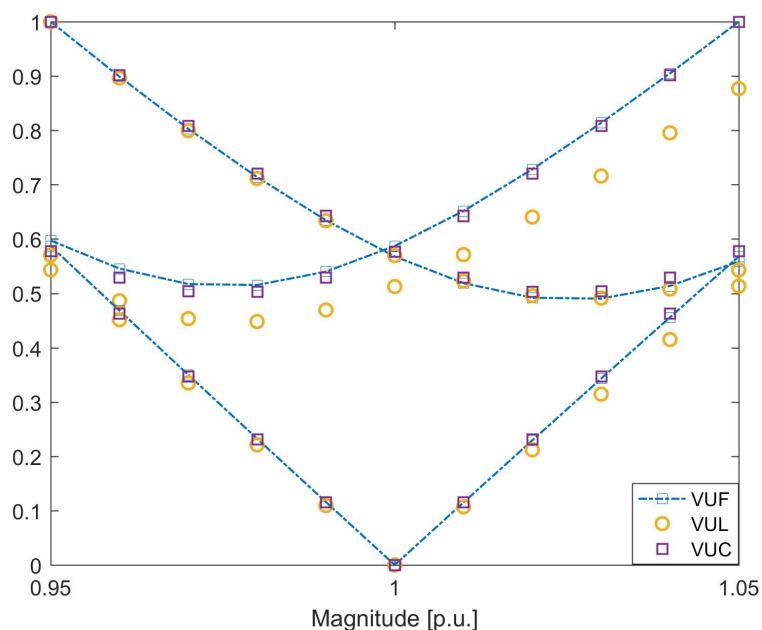
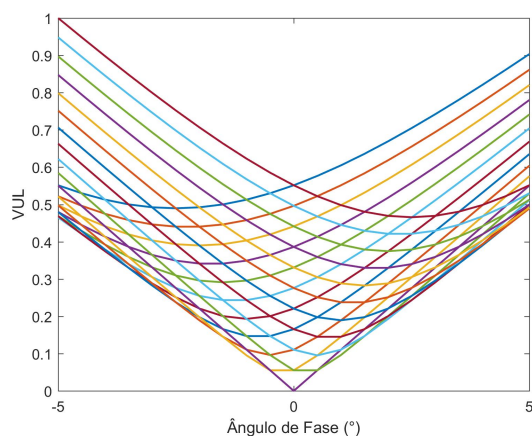
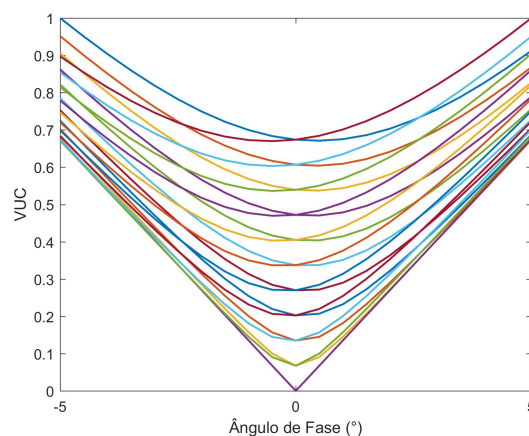
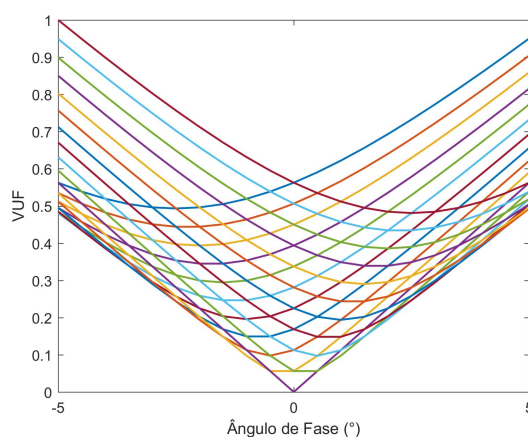


Figura 4.8. Simulação dos indicadores no caso 03: Variação de 0.95 a 1.05 pu nas fase A e B simultâneamente, com fases C em condições nominais.

É possível depreender da figura 4.8 que, em situações de desequilíbrio monofásico, todos os indicadores simulados possuem um alto nível de representatividade comportamental entre si. Observa-se que VUC é capaz de manter tal representatividade em relação a VUF em todas as simulações apresentadas. Contudo, o indicador VUL, mesmo após espelhado, ainda apresenta nível de desempenho insatisfatório, apresentando maior erro em relação ao indicador VUF quando comparada a VUC.

4.2.4 Caso 04: Sistema Trifásico Acometido de Desequilíbrios de Ângulos de Fase em duas de suas Fases

Por fim, no caso 04, foi realizada uma abordagem semelhante a anterior, porém com foco na realização de simulações referentes ao desequilíbrio de duas fases do sistema, aplicados sobre os ângulos de fase da tensão. Nesta análise, as variações dos ângulos de fase na simulação ocorreram na ordem de 0.25° , com escopo de variação de $(-5^\circ$ a $5^\circ)$ na fase A e $(115^\circ$ a $125^\circ)$ para a fase B, enquanto a fase C era mantida a condições nominais. A simulação resultou em um total de 242 pontos de desequilíbrio analisados, divididos em 22 diferentes situações. Os gráficos consolidados destas situações para ambos os indicadores são apresentados nas figuras 4.9, 4.10 e 4.11.

**Figura 4.9.** VUL**Figura 4.10.** VUC**Figura 4.11.** VUF

Assim como no caso anterior, para estas representações gráficas também é adotada a premissa de que cada uma das cores utilizadas na plotagem dos gráficos correspondem às mesmas condições de desequilíbrio, devendo duas linhas de mesma cor serem comparadas entre os gráficos para se delimitar o nível coesão entre o comportamento gráfico de dois indicadores.

Conforme notado, neste caso, ao analisar-se visualmente os gráficos, não é possível delimitar-se qualquer forma de relação entre o comportamento descrito por VUC e os demais indicadores. Uma explicação para tal fato não foi obtida durante as pesquisas realizadas, sendo esta mais uma das lacunas a serem pesseguidas em trabalhos futuros.

No que tange ao VUL, observa-se que este apresenta exatamente o mesmo resultado obtido pelo VUF. Assim, para facilitar as análises seguintes, optou-se por eliminar o gráfico de VUC das

próximas plotagens e proceder os estudos deste caso utilizando-se os dados obtidos para VUL e VUF. Assim, garante-se que a figura resultante apresentará uma visualização mais clara e coesa da correlação entre tais indicadores.

Por fim, a figura 4.12 apresenta o confronto entre os indicadores VUF e VUL:

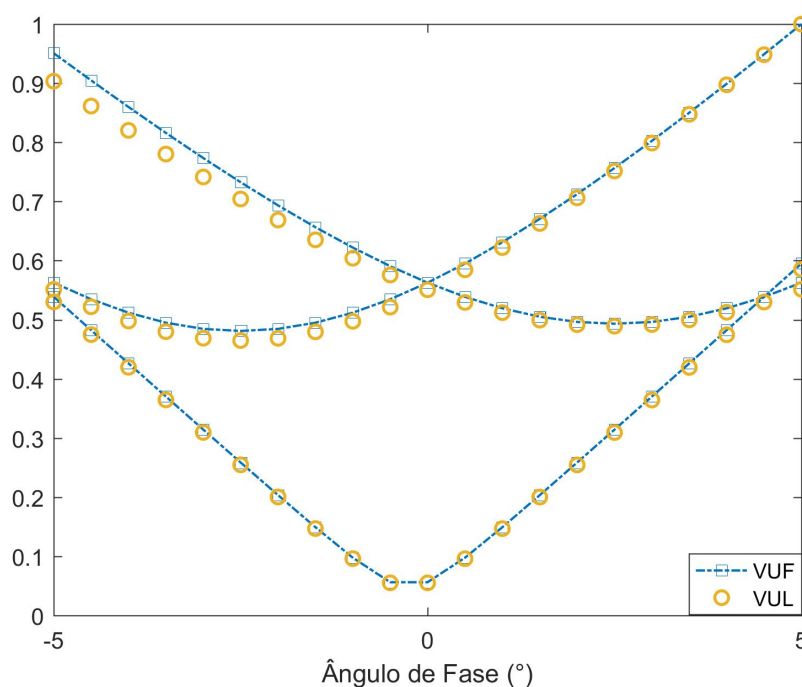


Figura 4.12. Simulação dos indicadores no caso 04: Variação de -5° a 5° nas fases A e B, com a fase C em condições nominais.

Na figura 4.12 observa-se que, para as condições simuladas no caso 04, sejam elas os desequilíbrios de tensão em duas fases de um sistema trifásico aplicado aos ângulos de fase de sistemas de baixa tensão, os indicadores VUF e VUL apresentam resultados praticamente idênticos. Assim, é possível afirmar que, sob as situações de simulação, há uma correlação direta entre os indicadores citados pode vir a ser obtida.

4.3 AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO

4.3.1 Tempo de Processamento

Na análise do tempo de processamento, o cálculo dos tensores de segunda ordem marcou o início da contagem, tendo como fim o resultado final do indicador. Dito isto, os resultados obtidos

foram:

Tabela 4.2. Tempo Médio de Processamento dos Indicadores.

	Tempo (μs)
VUF	114.30
VUL	123.58
VUC	2987.60

Como pode ser visto, o indicador VUF possui desempenho superior nas simulações realizadas. Tal desempenho era esperado uma vez que, os indicadores no domínio do tempo realizam os cálculos propostos para cada amostra do sinal, enquanto no domínio da frequência, a transformada rápida de fourier reduz o sinal de 256 amostras a 1 resposta em frequência, sendo esta a utilizada nos cálculos.

Há de se pontuar que, para análises em tempo real, onde há necessidade de processamento a cada nova amostra gerada, os indicadores no domínio do tempo se mostraram mais eficientes ao aplicarem os princípios de janela deslizante. Em tais caso, após o cálculo inicial, o processamento de novas amostras é realizado pela adição das contribuições daquela amostra ao valor obtido do indicador, e a remoção das contribuições da primeira amostra presente na janela de cálculo.

Por outro lado, no domínio da frequência, caso seja necessário aplicar o princípio da janela deslizante, uma nova transformada de fourier deverá ser aplicada a todas as amostras da janela. Dessa forma, sempre que uma nova amostra fosse introduzida ao sinal, todo o processo citado para o cálculo de VUF deveria ser refeito.

Tendo isto em mente, uma nova simulação foi realizada de forma a avaliar o desempenho dos algoritmos para aplicações que requeiram processamento em tempo real. Nesta, partiu-se dos valores já apresentados para o primeiro ciclo e calculou-se os valores para o indicador para 5 amostras futuras. Os resultados foram então apresentados na tabela 4.3.

Tabela 4.3. Tempo Médio de Processamento dos Indicadores ao se Calcular um Nova Amostra).

	Processamento 1° Ciclo (μs)	Processamento das Novas Amostras (μs)					Tempo total de processamento (μs)
		1	2	3	4	5	
VUF	114.30	114.21	102.93	108.45	110.30	108.45	658.64
VUL	123.58	3.40	3.56	3.24	3.42	3.30	140.50
VUC	2987.60	29.53	29.11	29.35	30.98	28.51	3135.08

Nota-se na tabela 4.3 que o indicador VUF tem um incremento de cerca de 110 (μ s) para cada uma das amostras subsequentes. Por outro lado, os indicadores que utilizam tensores, por serem capazes de utilizar o algoritmo de janela deslizante em cada amostra, necessitam de tempo consideravelmente inferior para a realização de tais cálculos. Para o caso apresentado, observa-se que após o processamento de 5 novas amostras, o tempo gasto para cálculo de VUL é 78.6% inferior ao de VUF.

A figura 4.13 traz uma comparação entre o tempo de processamento necessário para, após o primeiro ciclo, quantificar-se os indicadores amostra a amostra por mais meio ciclo.

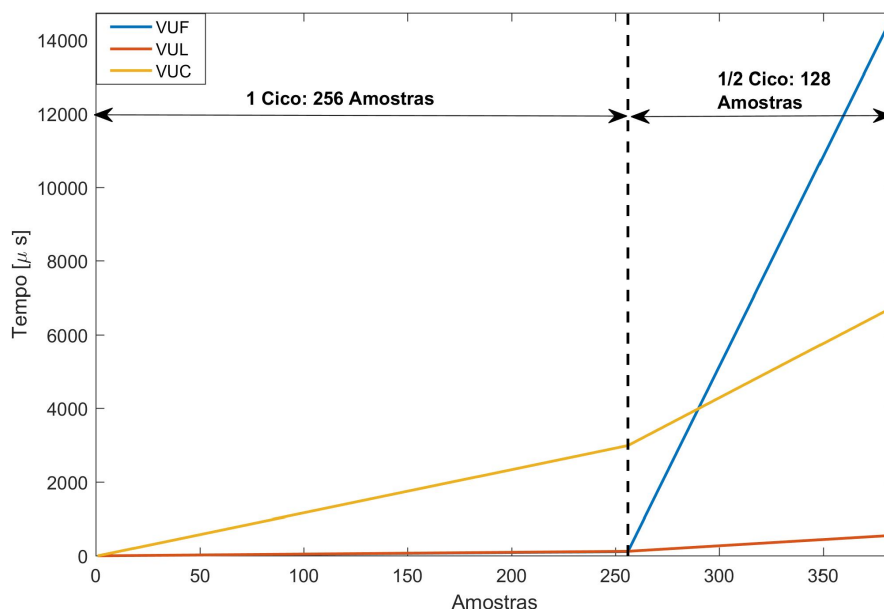


Figura 4.13. Tempo de processamento para os indicadores VUF (Linha azul), VUL (Linha vermelha) e VUC (Linha amarela).

Observa-se na figura 4.13 que há desempenho superior dos algoritmos utilizando tensores quando trabalhando-se em aplicações que requeiram processamento amostra a amostra. Mesmo o VUC que necessita de manipulações matriciais e possui um tempo de processamento inicial consideravelmente superior aos demais, eventualmente se torna mais vantajoso que o VUF para tais quantificações.

4.3.2 Nível de Correlação

Para o cálculo do nível de correlação entre os indicadores foi utilizado o Coeficiente de Correlação Linear de Pearson como meio de quantificação. Os resultados obtidos no caso 03 ¹ são apresentados na tabela 4.4.

Tabela 4.4. Coeficiente de Correlação para sistema trifásico acometido de desequilíbrios em magnitude em duas de suas fases.

$V_a[p.u]$	$V_b[p.u]$	$V_c[p.u]$	VUL	VUC
0.95	1±0.05	1	-0.530	1.000
0.96	1±0.05	1	-0.299	1.000
0.97	1±0.05	1	0.050	1.000
0.98	1±0.05	1	0.494	1.000
0.99	1±0.05	1	0.875	1.000
1.00	1±0.05	1	0.993	1.000
1.01	1±0.05	1	0.762	1.000
1.02	1±0.05	1	0.310	1.000
1.03	1±0.05	1	-0.128	1.000
1.04	1±0.05	1	-0.434	1.000
1.05	1±0.05	1	-0.624	1.000

Conforme observado, o coeficiente de correlação é máximo para todas as situações simuladas para VUC. Contudo para o indicador VUL, os resultados são insatisfatórios, possuindo inclusive valores negativos de coeficiente de correlação. Tal fato era esperado, visto que nas comparações feitas entre as figuras 4.3 e 4.5, observou-se que os gráficos descreviam um comportamento inverso entorno do ponto de maior equilíbrio. Assim, conforme apresentado na comparação entre as figuras 4.6 e 4.7, os coeficientes de correlação foram novamente calculados a rotação dos valores obtidos entorno da condição de desequilíbrio monofásico, os resultados obtidos são apresentados na tabela 4.5.

¹sistema trifásico acometido de desequilíbrios em magnitude em duas de suas fases

Tabela 4.5. Coeficiente de Correlação para sistema trifásico acometido de desequilíbrios em magnitude em duas de suas fases, com rotação do VUL entorno da condição de desequilíbrio monofásico.

$V_a[p.u]$	$V_b[p.u]$	$V_c[p.u]$	VUL	VUC
0.95	1±0.05	1	0.999	1.000
0.96	1±0.05	1	0.999	1.000
0.97	1±0.05	1	0.998	1.000
0.98	1±0.05	1	0.998	1.000
0.99	1±0.05	1	0.998	1.000
1.00	1±0.05	1	0.998	1.000
1.01	1±0.05	1	0.998	1.000
1.02	1±0.05	1	0.998	1.000
1.03	1±0.05	1	0.999	1.000
1.04	1±0.05	1	0.999	1.000
1.05	1±0.05	1	1.000	1.000

A análise da tabela 4.5 revela que com a inversão apresentada, os valores obtidos para VUL começam a apresentar relação entre si. Tal resultado reforça o pensamento de que o indicador VUL possui mais sensibilidade aos desequilíbrios de sobretensão, apresentando seus maiores valores absolutos durante esta situação dos desequilíbrios. Por outro lado, o VUF apresenta comportamento inverso, sendo mais sensível aos desequilíbrios de subtensão.

Assim, para o caso simulado, não foi possível estabelecer uma relação direta entre ambos os indicadores, visto que estes se comportam de maneira distinta para os mesmos estímulos. Contudo, conforme apresentado, parece existir uma dependência cruzada entre os dados obtidos, desenvolvida entorno da condição de maior equilíbrio. Não foi possível determinar ao longo do curso deste trabalho a razão para a existência de tal dependência.

A última análise tomou como objeto a correlação entre os indicadores para o caso 04². Nesta, a consolidação dos resultados obtidos foi feita e apresentada sob a forma da tabela 4.6.

²Sistema trifásico acometido de desequilíbrios sobre os ângulos de fase em duas de suas fases.

Tabela 4.6. Coeficientes de Correlação para sistema trifásico acometido de desequilíbrios sobre os ângulos de fase em duas de suas fases

V_a [°]	V_b [°]	V_c [°]	VUL	VUC
-5.0°	-120° ± 5°	120°	1.000	0.085
-4.5°	-120° ± 5°	120°	1.000	0.177
-4.0°	-120° ± 5°	120°	1.000	0.278
-3.5°	-120° ± 5°	120°	1.000	0.387
-3.0°	-120° ± 5°	120°	1.000	0.504
-2.5°	-120° ± 5°	120°	1.000	0.624
-2.0°	-120° ± 5°	120°	1.000	0.741
-1.5°	-120° ± 5°	120°	1.000	0.846
-1.0°	-120° ± 5°	120°	1.000	0.929
-0.5°	-120° ± 5°	120°	1.000	0.982
0.0°	-120° ± 5°	120°	1.000	1.000
0.5°	-120° ± 5°	120°	1.000	0.982
1.0°	-120° ± 5°	120°	1.000	0.930
1.5°	-120° ± 5°	120°	1.000	0.849
2.0°	-120° ± 5°	120°	1.000	0.747
2.5°	-120° ± 5°	120°	1.000	0.635
3.0°	-120° ± 5°	120°	1.000	0.522
3.5°	-120° ± 5°	120°	1.000	0.414
4.0°	-120° ± 5°	120°	1.000	0.315
4.5°	-120° ± 5°	120°	1.000	0.226
5.0°	-120° ± 5°	120°	1.000	0.147

Nota-se de pronto que o indicador VUL apresenta valores máximos de correlação para todos os casos simulados. No que tange ao desempenho do indicador VUC, este não possui valores satisfatórios nesta simulação, possuindo correlação máxima apenas na situação de maior equilíbrio, porém com decaimento acentuado a medida que o desequilíbrio toma maiores proporções.

É importante mencionar ainda que, sob situações de desequilíbrios que acometam tão somente uma das fases. Ambos os indicadores apresentam altos níveis de coeficiente de correlação quando comparados ao VUF. Nestes casos, o máximo desvio obtido nas medições do nível de coeficiente de correlação foi de 0.7% para VUL, enquanto VUC apresentou níveis máximos em todos os casos simulados.

CONCLUSÕES E PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Esta dissertação teve por objetivo analisar a aplicabilidade da teoria tensorial na análise de distúrbios elétricos de tensão em sistemas trifásicos. Inicialmente, a principal vantagem observada na adoção de tal abordagem foi a possibilidade dos cálculos serem realizados no domínio do tempo. Os resultados no entanto trouxeram outros pontos relevantes que serão sumarizados neste capítulo em adição a apresentação de propostas de trabalhos futuros que poderão tomar como base os resultados até aqui apresentados.

A princípio, durante o decorrer do capítulo 1, o tema desta dissertação foi apresentado de forma sucinta. Neste, foi realizada uma breve introdução aos conceitos de qualidade do produto segundo as normas vigentes da ANEEL, com foco nos desequilíbrios de tensão. Após a introdução do tema objeto desta dissertação, um breve estudo do estado da arte envolvendo a teoria tensorial aplicada a sistemas de potência foi apresentado, precedido pela apresentação dos objetivos e contribuições desta dissertação e sua organização interna.

O segundo capítulo foi responsável por introduzir a fundamentação teórica, na qual todos os desenvolvimentos apresentados no capítulo 3 se basearam. No decorrer do capítulo 2 foram abordados de forma mais aprofundada temas relacionados aos desequilíbrios de tensão e a teoria tensorial. Assim, apresentou-se temas que foram desde a definição deste tipo de distúrbio, até os principais métodos para quantificação, propostos por agências e institutos internacionais como: NEMA, IEEE e CIGRE.

Ao fim do capítulo 2, foi introduzida a teoria tensorial. Esta teve como ponto de partida a introdução dos tópicos relativos a obtenção de tensores de segunda ordem, exemplificado por meio do tensor potência instantânea. O capítulo foi finalizado com a apresentação da analogia existente na literatura entre o estudo das deformações mecânicas de um elemento de volume e o comportamento dinâmico dos fenômenos eletromagnéticos. Tal analogia fundamentou o desenvolvimento

dos indicadores VUL e VUC apresentados nos capítulos posteriores.

Prosseguindo ao terceiro capítulo, este apresentou os materiais e os métodos utilizados durante a pesquisa no desenvolvimento dos indicadores supracitados. Os estudos presentes neste capítulo se apoiaram no resultados apresentadas no apêndice B, no qual foi introduzida a interface gráfica desenvolvida para a análise de distúrbios. Por meio desta, foi possível delimitar que as variações volumétricas e de rotação do elemento de volume possuem relação direta com as variações das componentes ativa e reativas do sistema. Por fim, foram apresentados os métodos utilizados na quantificação e análise de desempenho dos indicadores propostos, VUL (*Voltage Unbalance Level*) e VUC (*Voltage Unbalance Coefficient*).

No Capítulo 4 apresentou os resultados obtidos e suas análises. Foram simulados 4 casos de desequilíbrio de tensão, o primeiro trouxe para o estudo os desequilíbrios monofásicos de tensão aplicados à magnitude da tensão. O segundo caso também versava sobre desequilíbrios monofásicos, porém desta vez aplicados aos ângulos de fase do sinal de tensão. Por fim, os dois últimos, ambos abordaram os desequilíbrios polifásicos, sendo o terceiro caso responsável pela simulação daqueles com impactos na magnitude, enquanto o quarto simulava impactos nos ângulos de fase do sinal de tensão.

As análises foram procedidas adotando-se o indicador VUF como referência para as comparações dos resultados obtidos, visto este ser um indicador já sagrado em toda a literatura, além de ser um dos mais adotados na quantificação dos desequilíbrios ora estudados.

A primeira análise realizada foi a análise gráfica. Nesta, observou-se que, para os casos monofásicos, todos os indicadores apresentam uma alta adesão ao comportamento referencial adotado. Contudo, ao se simular casos polifásicos, observou-se que, para os casos de desequilíbrio de magnitude, o indicador VUL apresentou um comportamento espelhado a aquele obtido pelo VUF, enquanto seguia fielmente as tendências deste para desequilíbrios nos ângulos de fase. Já o indicador VUC, apresentou comportamento praticamente idêntico a aquele descrito pelo VUF para os desequilíbrios de magnitude, enquanto mostrou fraca adesão aos valores obtidos em desequilíbrios de fase.

Ainda no capítulo 4 foi realizada a análise de desempenho dos indicadores sob as temáticas de tempo de processamento e nível de correlação. No que tange ao tempo de processamento, foi observado que o indicador VUF possui o menor tempo de processamento dentre todos para o ci-

clo inicial (114 μ s). Este é seguido pelo VUL (123 μ s) e VUC (2987 μ s). Contudo, apresentou-se também o processamento amostra a amostra após o ciclo inicial, visto que tanto VUL quanto VUC são capazes de utilizar o princípio da janela deslizante para cálculos das amostras subsequentes. Assim, observou-se que, eventualmente, tanto VUL como VUC apresentavam desempenho superior a VUF para o cálculo amostra a amostra. Nestes casos observou-se que o tempo de processamento de VUF se tornava superior as demais após o cálculo de poucas amostras.

A seguir deu-se a análise correlativa entre os resultados obtidos pelos indicadores. Tal análise adotou o coeficiente de correlação linear de Pearson, para realizar os cálculos de correlação entre os dados obtidos pelos indicadores. Em defesa da objetividade dessa dissertação, optou-se por apresentar os coeficientes de correlação apenas para os dados polifásicos, apresentam maior volatibilidade, além de também englobarem as condições de desequilíbrio monofásico.

Durante a análise dos coeficientes de correlação, notou-se que nos casos de desequilíbrio polifásico de tensão com implicações exclusivas na magnitude, o indicador VUC possui nível de correlação máximo com o indicador de referência (VUF). Neste caso, observou-se também que ao espelhar-se os resultados do indicador VUL, este também obteve nível de correlação aceitável com a referência. Para os desequilíbrios polifásicos de tensão que afetam exclusivamente os ângulos de fase do sistema, notou-se que VUL apresenta nível de correlação máximo com o indicador, enquanto VUC apresenta desempenho insatisfatório a medida que se distancia da condição de maior equilíbrio simulada.

Assim, no que tange a aplicabilidade da teoria tensorial na quantificação de desequilíbrios de tensão, a análise dos dados apresentada leva a crer que:

- **Para desequilíbrios monofásicos:** Todos os indicadores apresentaram desempenho satisfatório. Assim, existe a real possibilidade de aplicação da teoria tensorial na quantificação dos desequilíbrios de tensão monofásicos, desde que seguidos os limites adotados nas simulações realizadas (Desequilíbrios monofásicos aplicados a sistemas de baixa tensão em regime permanente.);
- **Para o desequilíbrio polifásico de tensão aplicados sobre a sua magnitude:** Foi notada a possibilidade de quantificação dos desequilíbrios utilizando-se os princípios da teoria tensorial. Neste caso foi observado que o desempenho de VUC foi satisfatório para todas as análises realizadas, enquanto VUL necessitou de uma manipulação aos seus resultados para

que apresentasse um nível de correlação aceitável. Assim, recomenda-se que, para o caso em tela, o indicador VUC seja utilizado em detrimento ao VUL, vista a relação direta apresentada entre aquele e o VUF ideal.

- **Para desequilíbrios polifásicos de tensão aplicados sobre os seus ângulos de fase:** Há de se dizer que para este caso os princípios da teoria tensorial também foram capazes de avaliar os desequilíbrios de tensão por meio do indicador VUL. Contudo, o indicador VUC não apresentou resultados satisfatórios, de forma que o seu uso nesta situação é desaconselhado.
- **Aplicação em todos os casos monofásicos e polifásicos:** Nenhum dos indicadores obtidos apresentou desempenho aceitável na quantificação de todos os casos apresentados. No entanto, há de se dizer que, para futuros trabalhos, o VUL é aquele que apresenta maior potencial em se desenvolver este tipo de quantificação, uma vez que sua resposta espelhada nos desequilíbrios de magnitude já apresenta comportamento semelhante a aquele observado em VUF.

Por fim, a grande contribuição desta dissertação se encontra na possibilidade de desenvolvimento de uma única ferramenta capaz de quantificar desequilíbrios de tensão e identificar distúrbios elétricos, conforme presente no Apêndice C. Vale ressaltar que, há necessidade de melhorias e aprofundamento nos estudos dos indicadores propostos, de forma a se garantir a correlação com VUF em todos os sistemas com desequilíbrios de tensão.

Esta dissertação, então, chega ao seu fim com as seguintes propostas de trabalhos futuros:

- Determinar os conjuntos de equações que descrevam a relação direta entre os indicadores para os casos em que esta se mostrou possível;
- Avaliar novas metodologias de aplicação ao indicador VUL, de forma que seja possível corrigir o comportamento espelhado deste em casos de desequilíbrio de magnitude;
- Avaliar a existências de novas manipulações ao tensor potência instantânea ou tensão de segunda ordem que contemplem resultados semelhantes ou superiores aos apresentados.
- Avaliar o comportamento e desempenho do algoritmo de segmentação desenvolvido em confronto outros algoritmos presentes na literatura.

Referências Bibliográficas

- ANEEL, P. d. D. d. E. Elétrica no sistema elétrico nacional–prodíst: Módulo 8-qualidade de energia elétrica. *Revisão*, v. 5, p. 76, 2007. Citado 5 vezes nas páginas 1, 8, 11, 38 e 74.
- ANSI, S. *C84. 1*. [S.l.], 1995. Citado na página 38.
- ARIAS-GUZMAN, S.; USTARIZ-FARFAN, A.; CANO-PLATA, E. Waveform characteristics assessment by the operation of protective devices. In: IEEE. *Power Electronics and Power Quality Applications (PEPQA), 2017 IEEE Workshop on*. [S.l.], 2017. p. 1–6. Citado na página 4.
- ARIAS-GUZMAN, S.; USTARIZ-FARFAN, A.; PLATA, E. C. Voltage sag segmentation under deformation tensor parameters. In: IEEE. *Harmonics and Quality of Power (ICHQP), 2014 IEEE 16th International Conference on*. [S.l.], 2014. p. 541–545. Citado na página 4.
- ARIAS, S.; USTARIZ, A. J.; CANO, E. A. Detection of power quality disturbances using deformation tensor parameters. *IEEE Latin America Transactions*, IEEE, v. 13, n. 7, p. 2106–2113, 2015. Citado na página 4.
- BARRERA, V.; MELÉNDEZ, J.; HERRAIZ, S. Waveform segmentation for intelligent monitoring of power events. *Electric Power Systems Research*, Elsevier, v. 93, p. 67–75, 2012. Citado na página 4.
- CHATTOPADHYAY MADHUCHHANDA MITRA, S. S. a. S. *Electric Power Quality*. 1. ed. [S.l.]: Springer Netherlands, 2011. (Power Systems). ISBN 9400706340,9789400706347. Citado 2 vezes nas páginas 1 e 8.
- DAI, X.; LIU, G.; GRETSCH, R. Generalized theory of instantaneous reactive quantity for multiphase power system. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, v. 19, n. 3, p. 965–972, 2004. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 21.
- DEKHANDJI, F. Z.; REFOUFI, L.; BENTARZI, H. Quantitative assessment of three phase supply voltage unbalance effects on induction motors. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, Springer, v. 8, n. 1, p. 393–406, 2017. Citado na página 13.
- DONOLO, P.; BOSSIO, G.; ANGELO, C. D.; GARCÍA, G.; DONOLO, M. Voltage unbalance and harmonic distortion effects on induction motor power, torque and vibrations. *Electric Power Systems Research*, Elsevier, v. 140, p. 866–873, 2016. Citado na página 10.
- DUGAN, R. C.; MCGRANAGHAN, M. F.; BEATY, H. W. *Electrical power systems quality*. 1. ed. [S.l.]: New York, NY: McGraw-Hill, |c1996, 1996. Citado na página 9.
- EUGENE, C. A new simple and effective approximate formulation for determination of three-phase unbalance by the voltmeter method. In: *CIGRE 1986*. [S.l.: s.n.], 1986. Citado 2 vezes nas páginas 11 e 14.

- FARAHANI, H. F. Improving voltage unbalance of low-voltage distribution networks using plug-in electric vehicles. *Journal of cleaner production*, Elsevier, v. 148, p. 336–346, 2017. Citado na página 10.
- FARFÁN, A. J. U. *et al.* *Formulación de una teoría tensorial de la potencia eléctrica: aplicaciones al estudio de la calidad de la energía*. Tese (Doutorado) — Universidad Nacional de Colombia-Sede Manizales, 2011. Citado 2 vezes nas páginas iii e 26.
- FILHO, A. F.; CORMANE, J.; GARCIA, D.; COSTA, M.; OLIVEIRA, M.; NASCIMENTO, F. do. Analysis of the complex voltage unbalance factor behavior resulting from the variation of voltage magnitudes and angles. In: IEEE. *Harmonics and Quality of Power (ICHQP), 2010 14th International Conference on*. [S.l.], 2010. p. 1–7. Citado na página 1.
- GAFFORD, B.; DUESTERHOEFT, W.; MOSHER, C. Heating of induction motors on unbalanced voltages. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Part III: Power Apparatus and Systems*, IEEE, v. 78, n. 3, p. 282–286, 1959. Citado na página 10.
- GONZALEZ-CORDOBA, J.; GRANADOS-LIEBERMAN, D.; OSORNIO-RIOS, R.; ROMERO-TRONCOSO, R.; SANTIAGO-PEREZ, J. D.; VALTIERRA-RODRIGUEZ, M. Methodology for overheating identification on induction motors under voltage unbalance conditions in industrial processes. NISCAIR-CSIR, India, 2016. Citado na página 10.
- IEEE, I. of E. . E. E. *IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators*. [S.l.], 1987. Citado na página 11.
- IEEE, I. of E. . E. E. *IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators*. [S.l.], 1991. Citado na página 11.
- IEEE, I. of E. . E. E. *IEEE Standard Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality*. [S.l.], 2009. Citado na página 38.
- IEEE, S. *IEEE Standard C37.111: Standard Common Format for Transient Data Exchange (COMTRADE) for Power Systems*. [S.l.], 1999. Citado na página 77.
- JAGUA, J.; BARRERA, V.; CARRILLO, G.; MELÉNDEZ, J. Waveform segmentation based on tensor analysis. In: IEEE. *ANDESCON, 2010 IEEE*. [S.l.], 2010. p. 1–7. Citado na página 4.
- LAI, W. M.; RUBIN, D. H.; KREMPL, E.; RUBIN, D. *Introduction to continuum mechanics*. [S.l.]: Butterworth-Heinemann, 2009. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 18.
- LIAO, H.; MILANOVIĆ, J. V. Methodology for the analysis of voltage unbalance in networks with single-phase distributed generation. *IET Generation, Transmission & Distribution*, IET, v. 11, n. 2, p. 550–559, 2017. Citado na página 10.
- MULLA, M. A.; RAJAGOPALAN, C.; CHOWDHURY, A. Hardware implementation of series hybrid active power filter using a novel control strategy based on generalised instantaneous power theory. *IET Power Electronics*, IET, v. 6, n. 3, p. 592–600, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 5 e 20.
- NEMA, N. E. M. association. *Motors And Generators*. [S.l.], 2016. Citado 3 vezes nas páginas 11, 12 e 38.

- SEIPHETLHO, T.; RENS, A. On the assessment of voltage unbalance. In: IEEE. *Harmonics and Quality of Power (ICHQP), 2010 14th International Conference on*. [S.l.], 2010. p. 1–6. Citado 3 vezes nas páginas 11, 12 e 38.
- SINGH, A. K.; SINGH, G.; MITRA, R. Some observations on definitions of voltage unbalance. In: IEEE. *Power Symposium, 2007. NAPS'07. 39th North American*. [S.l.], 2007. p. 473–479. Citado na página 11.
- SUDASINGHE, P.; JAYATUNGA, U.; WADDUWAGE, D. P.; PERERA, S. Analysis of the performance of three phase induction motor under supply source unbalance. 2018. Citado na página 14.
- TRUJILLO-OROZCO, O. A.; GARCÉS-GÓMEZ, Y. A.; USTARIZ-FARFÁN, A. J.; CANO-PLATA, E. A. Loads characterization using the instantaneous power tensor theory. *Dyna*, 2006, Revista DYNA, v. 82, n. 192, p. 19–25, 2015. Citado 3 vezes nas páginas 5, 21 e 27.
- USTARIZ, A.; CANO, E.; TACCA, H. Tensor analysis of the instantaneous power in electrical networks. *Electric Power Systems Research*, Elsevier, v. 80, n. 7, p. 788–798, 2010. Citado na página 3.
- USTARIZ, A. J.; PLATA, E. C.; TACCA, H. E. Instantaneous power tensor theory: improvement and assessment of the electric power quality. In: IEEE. *Harmonics and Quality of Power (ICHQP), 2010 14th International Conference on*. [S.l.], 2010. p. 1–6. Citado 2 vezes nas páginas 4 e 22.
- USTARIZ E. A. CANO, H. E. T. A. J. Evaluación, interpretación y visualización de la potencia instantánea en sistemas eléctricos. In: SICEL. *V Simposio Internacional sobre Calidad de la Energía Eléctrica*. [S.l.], 2009. p. 1–7. Citado 3 vezes nas páginas 3, 18 e 21.
- USTARIZ-FARFAN, A.; CANO-PLATA, E.; TACCA, H.; GARCES-GOMEZ, Y. Hybrid simulation to test control strategies in active power filters using generalized power tensor theory. In: IEEE. *Harmonics and Quality of Power (ICHQP), 2012 IEEE 15th International Conference on*. [S.l.], 2012. p. 598–604. Citado 2 vezes nas páginas 4 e 16.
- USTARIZ-FARFAN, A.; CANO-PLATA, E.; TACCA, H.; ARANGO-LEMOINE, C. Visualizing two-and three-dimensional maps for power quality loss assessment. In: IEEE. *Harmonics and Quality of Power (ICHQP), 2012 IEEE 15th International Conference on*. [S.l.], 2012. p. 909–914. Citado na página 3.
- WILLIAMS, J. Operation of 3-phase induction motors on unbalanced voltages. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Part III: Power Apparatus and Systems*, IEEE, v. 73, n. 1, p. 125–133, 1954. Citado na página 10.

Apêndice

PUBLICAÇÕES

Os estudos desenvolvidos durante o mestrado possibilitaram a publicação e aceite dos seguintes artigos em conferências nacionais e internacionais:

- **Publicação:** Henriques, Moises; Cormane, Jorge. Time domain voltage unbalance index based on second order voltage tensor theory. In: *6th International Conference On Smart Grid Engineering (SEGE)*. Oshawa, Canada: Agosto, 2018.
- **Aceite:** Henriques, Moises; Cormane, Jorge. Time domain voltage unbalance index based on second order voltage tensor theory. In: *18th International Conference On Harmonics and Quality of Power (ICHQP)*. Ljubljana, Slovênia: Agosto, 2018.
- **Aceite:** Henriques, Moises; Cormane, Jorge. Power tensor theory applied to the time domain voltage unbalance quantification. In: *Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE)*. Niterói, Brasil: Maio, 2018.

APÊNDICE B

INTERFACE GRÁFICA PARA A ANÁLISE DE DISTÚRBIOS ELÉTRICOS

Os primeiros passos adotados nesta pesquisa foram a simulação exaustiva de dados de forma a se analisar padrões seguidos pelas deformações e sinais de potência. Assim, se tornava inviável a realização manual de simulações, uma vez que estas tomariam tempo demasiadamente elevado. Caso optássemos por utilizar tais simulações, a eficiência desta pesquisa seria comprometida, tendo em vista que os resultados a serem analisados deveriam ser obtidos a cada amostra do sistema e em diversas situações de equilíbrio e desequilíbrio.

Com isso em mente, delimitou-se as principais informações necessárias para subsidiar as análises seguintes. Tais informações foram utilizadas na construção de uma interface gráfica de simulação que tomou o módulo GUIDE no MATLAB como ambiente de programação. Ao fim, a interface gráfica desenvolvida contemplou as seguintes funcionalidades:

- Gráficos temporais de:
 - Corrente;
 - Tensão;
 - Potência Instantânea Trifásica;
 - Potência Instantânea;
 - Potência Ativa;
 - Potência Reativa.
- Seleção dos dados de simulação;
- Plotagem do estado instantâneo do cubo para cada amostra simulada, realizada para:
 - Deformação Total;
 - Rotação;
 - Deformação Volumétrica;
 - Deformação Angular Interna;

- Seleção do tipo de tensor utilizado na plotagem (Ideal, Instantâneo ou distorção);
- Seleção da amostra, por meio de slider ou número da amostra, com atualização instantânea das plotagens dos gráficos relativos à distorção dos cubos.

A dita interface pode ser vista na figura abaixo trazendo os resultados da simulação de um sistema desequilibrado com carga resistiva. As funcionalidades citadas a cima também podem ser vistas na referida figura.

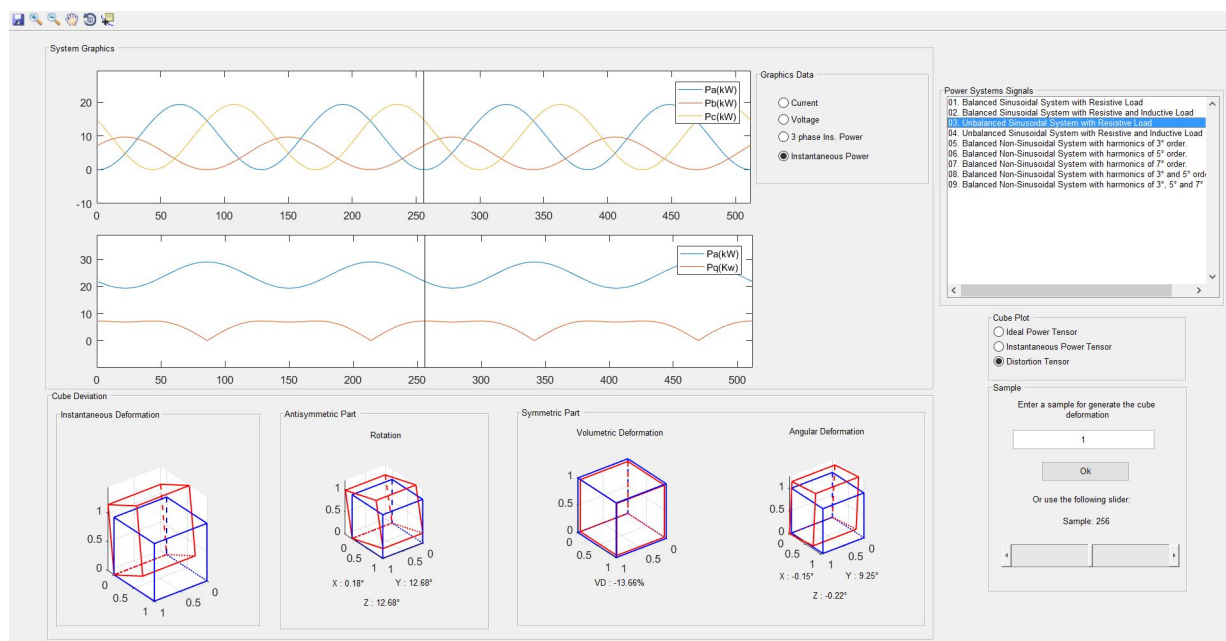


Figura B.1. Interface Gráfica Para Visualização de Distúrbios.

Ressaltamos que, este estudo teve início com a simulações de sinais temporais de potência. A análise destes possibilitou a caracterização e delimitação de analogias aplicáveis aos tensores tensão de segunda ordem, além das manipulações ao tensor potência instantânea que serão aqui apresentadas. Assim, este capítulo introduzira as análises aplicadas a sistemas de potência com cargas equilibradas e desequilibradas, e posteriormente, as relações existentes naqueles sistemas serão convalidadas para os desequilíbrios de tensão por meio da utilização de tensores tensão de segunda ordem e potência instantânea manipulado.

B.1 ANÁLISE DE DISTÚRBIOS E DEFORMAÇÕES

A definição do tensor distorção possibilitou a análise de distúrbios por meio da interface gráfica desenvolvida. Esta, contemplou os estudos de desequilíbrios de potência devido a cargas des-

balanceadas, em sistema com fonte de alimentação trifásica, senoidal, equilibrada e de sequência positiva, sendo os seguintes esquemas elétricos representativos dos circuitos simulados:

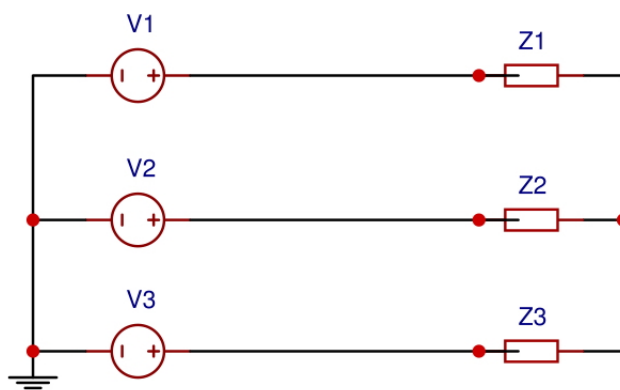


Figura B.2. Circuito simulado.

Tendo em vista que este estudo objetivava a análise comportamental das deformações do cubo frente as variações das componentes ativas e reativas do sistema, houveram inúmeras variações de carga aplicadas ao circuito apresentado. Estas tiveram por objetivo garantir a repetibilidade dos resultados obtidos, de forma que fosse possível delimitar uma relação concreta entre os elementos analisados. Assim, os seguintes casos com variações de carga foram simulados:

Tabela B.1. Sistemas simulados na interface gráfica desenvolvida.

Caso	Descrição
1	Sistema Balanceado, Senoidal, com Carga Resistiva
2	Sistema Balanceado, Senoidal, com Carga Resistiva e Indutiva
3	Sistema Desbalanceado, Senoidal, com Carga Resistiva

Vale ressaltar que as análises feitas neste momento tiveram por objetivo delimitar a dependência entre as deformações e as componentes ativas e reativas do sistema. Dessa forma, os seus cálculos foram realizados adotando-se o tensor potência instantânea apresentado no capítulo anterior. Contudo, como será visto a frente, as relações aqui abordadas são extensíveis aos tensores tensão de segunda ordem.

B.1.1 Interface Gráfica com Utilização do Tensor Potência Instantânea

Sistema Balanceado com Carga Resistiva

Inicialmente, a análise foi feita sobre um sistema balanceado, senoidal e com carga resistiva. O primeiro caso analisado foi o comportamento dos cubos quando o tensor instantâneo fosse ideal (Igual ao tensor referência). Para esta situação, a interface gráfica desenvolvida apresentou os seguintes resultados:

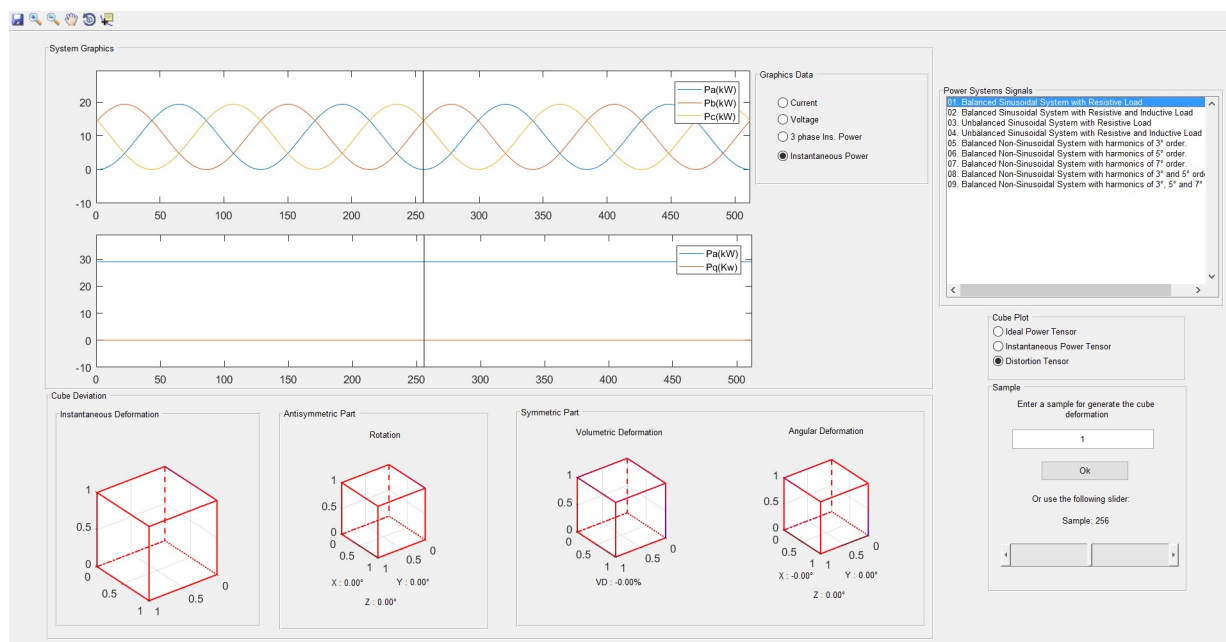


Figura B.3. Interface Gráfica Para Sistema Balanceado sem Presença de Componentes Reativos.

Pelo que foi apresentado na equação 3.1, nesta situação o tensor distorção seria nulo. Dessa forma, a projeção deste sobre os cubos não deveria causar nenhuma variação nestes. Ao observar-se a figura B.3 nota-se exatamente o comportamento supracitado quando analisada as plotagens dos cubos.

Sistema Balanceado com Carga Resistiva e Indutiva

O segundo caso tratou da análise comportamental dos cubos quando existe a presença de componentes reativas no sistema. Neste caso a simulação foi feita utilizando-se um sistema com fontes e cargas balanceadas, porém, as cargas deste sistema são compostas por componentes resistivos e indutivos. O seguinte resultado foi observado por meio da interface:

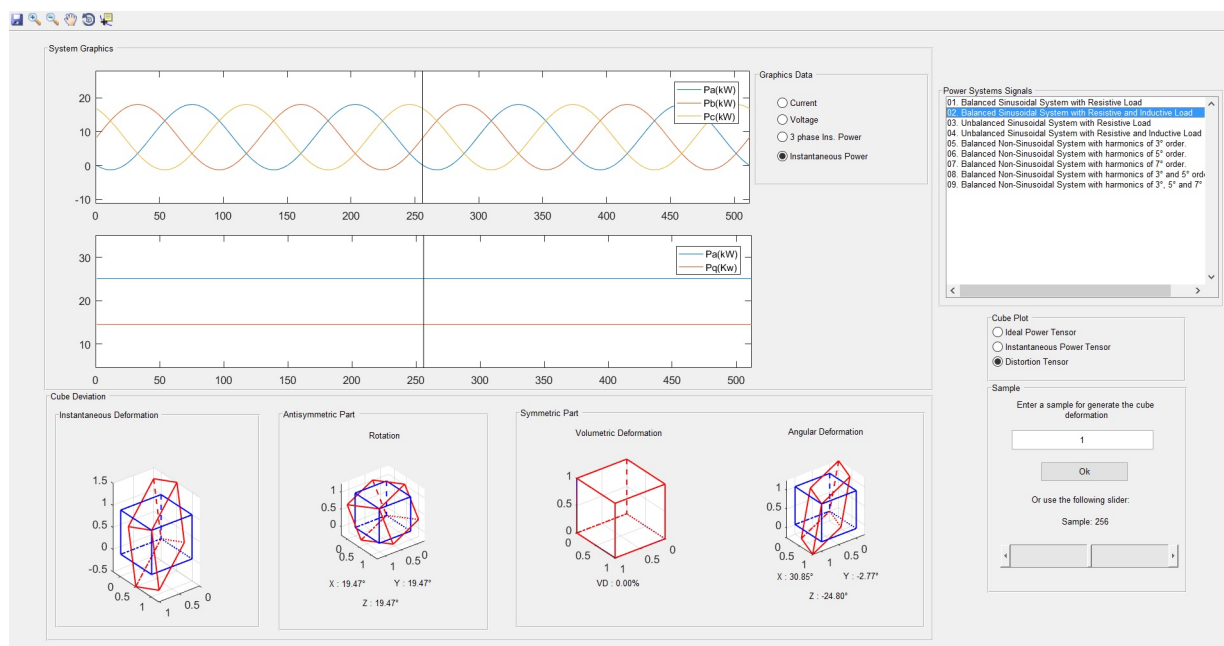


Figura B.4. Interface Gráfica Para Sistema Balanceado com Presença de Componentes Reativos.

Neste caso, nota-se que não existe distorção volumétrica, porém há rotação e deformação angular no cubo quando o tensor distorção é projetado sobre suas coordenadas. Vale ressaltar que, a rotação é estacionária para todas as amostras, não se alterando ao longo desta simulação.

Sistema Desbalanceado com Carga Resistiva

A seguir, iniciou-se a simulação de sistemas desbalanceados. O primeiro destes a ser simulado utilizou como exemplo uma fonte trifásica equilibrada ligada à cargas resistivas desequilibradas. Os resultados desta simulação são apresentado a baixo:

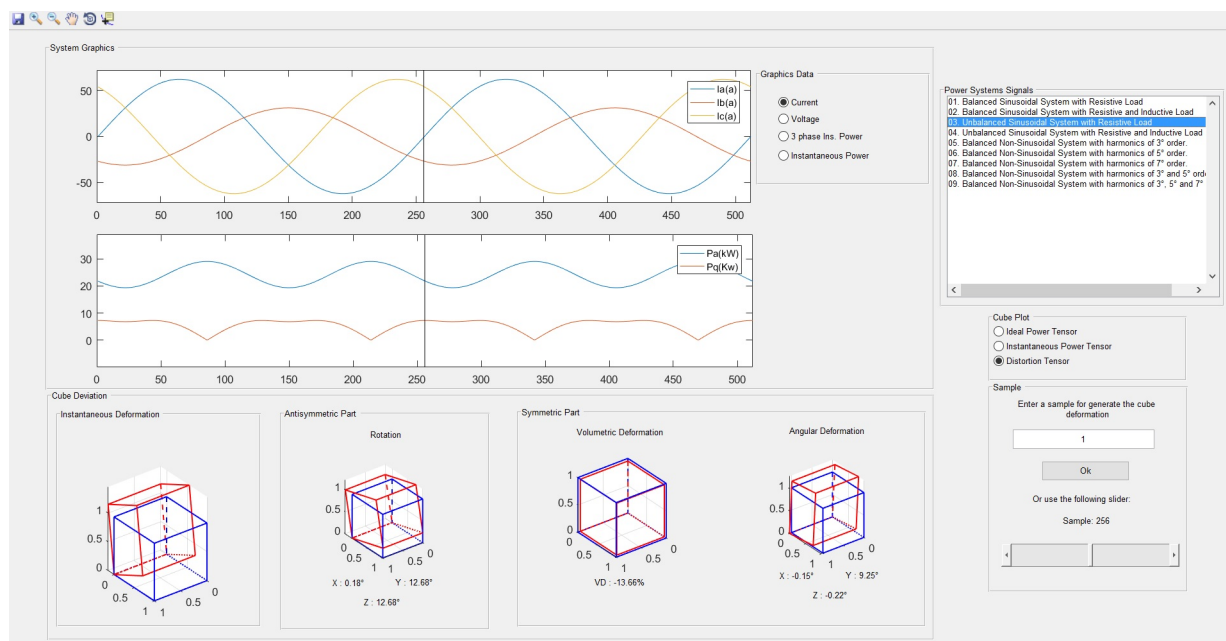


Figura B.5. Interface Gráfica Para Sistema Desbalanceado com Carga Resistiva.

Para um sistema desbalanceado a presença de reativos se dá independente da presença de cargas indutivas conforme pode ser visto na figura a cima. Nota-se que neste caso existem deformação em todos os cubos da interface. Ademais, é importante dizer que, neste caso, a variação do cubo é progressiva e periódica ao longo das amostras simuladas.

Conclusões

Com base nas simulações apresentadas, foi possível identificar algumas relações chaves entre o comportamento apresentado pelos cubos de rotação e dilatação volumétrica e as componentes ativa e reativa do sistema. Estas relações serão a base para todo o desenvolvimento futuro dos indicadores aqui propostos.

A primeira observação a ser feita se encontra na simulação para sistemas balanceados com carga resistiva. Nesta situação os reativos são nulos e a componente ativas do sistema são constantes e diferentes de zero. Ao se observar a figura B.3, é possível notar que não há variação em nenhum dos cubos ao longo das amostras, situação já esperada de um sistema balanceado e resistivo.

Ao se proceder a análise do sistema balanceado com carga resistiva e indutiva, figura B.4, percebe-se que, as componentes ativas e reativas se tornam constantes e não nulas. Para este sistema, a análise das deformações sofridas pelo elemento de volume cúbico retorna uma rotação

estacionária e constante ao longo de todas as amostras, bem como a presença de deformações angulares internas.

No último caso, sistema desbalanceado presente na figura B.5, um comportamento oscilatório das componentes ativa e reativa do sistema foi observado. Neste caso, é interessante pontuar o comportamento oscilatório das deformações do cubo, em especial a rotação. Esta apresenta simetria em seus movimentos condizente com o gráfico de potência reativa do sistema.

Por fim, inúmeras simulações com variações de carga foram realizadas. Estas objetivaram garantir a repetibilidade dos resultados acima citados. Foi observado que os comportamentos vistos nos casos aqui apresentados se manteve constante durante as novas simulações. Assim, uma das relações passíveis de serem inferidas pelos estudos realizados trata da existência de relação direta entre a rotação do elemento de volume e as variações das componentes reativas do sistema, sendo suportada pelos seguintes pontos:

- Quando a potência reativa é nula como na primeira simulação, a rotação do cubo unitário também é nula;
- Quando a potência reativa do sistema é constante e diferente de zero, o cubo unitário apresenta rotação estacionária não nula para todas as amostras;
- Quando a potência reativa é oscilante, o cubo unitário apresenta progressivas variações periódicas ao longo das amostras simuladas. Essas variações ocorrem seguindo exatamente a mesma tendência apresentada pelo sinal reativo. De forma que, quando este sofre incremento o cubo unitário é rotacionado em um determinado sentido, sendo este sentido invertido quando o sinal passa por um ponto de inflexão e começa a ser decrescido.

No que tange às componentes ativas, um comportamento pouco similar pode ser observado. Neste caso, nota-se que quando o sinal de potência ativa é constante, o elemento de volume não passa por deformações volumétricas. Contudo, nas situações onde ocorrem oscilações nesta componente, nota-se que a dilatação e contração volumétrica obedecem a periodicidade da concavidade do sinal de potência. Dessa forma, quando o sinal passa pelo seu valor médio ocorre a inversão de contração para dilatação ou vice e versa.

B.1.2 Interface Gráfica com Utilização do Tensor Tensão de Segunda Ordem

Tendo como base os resultados obtidos nas análises, um novo estudo que convalidasse a aplicabilidade das relações observadas para o tensor potência instantânea aos tensores tensão de segunda ordem e ao potência instantânea manipulado se fez necessário. Assim, essa subseção e a próxima tratará de apresentar a convalidação das análises por meio da apresentação dos resultados obtidos em simulações realizadas com tais tensores.

As simulações aqui presentes terão como foco único os desequilíbrios de tensão, de forma que suas análises contemplarão os seguintes sistemas:

- Sistema com tensões equilibradas;
- Sistema com desequilíbrios de tensão e oscilações em sua componente ativa;

A análise se fará por meio de nova interface gráfica dedicada exclusivamente à pesquisa dos desequilíbrios de tensão. Tendo em vista que este trabalho apresenta duas abordagens distintas de indicadores, o estudo realizado nesta subseção será elaborado com base nas oscilações de componentes ativas nos tensores tensão de segunda ordem, fundamento do indicador VUL. A próxima subseção tratará então da apresentação dos resultados obtidos na análise aplicada ao tensor potência instantânea manipulado, utilizado no indicador VUC, e tomará como foco as deformações de rotação observadas no elemento de volume.

Sistema com tensões equilibradas

Os primeiros estudos envolvendo os tensores tensão de segunda ordem tiveram como objeto da simulação sistemas equilibrados. Nesta situação a tensão real mensurada tem valor igual a tensão nominal do sistema, o que força as componentes reativas a serem nulas e as ativas a tomarem valor positivo e estacionário, conforme observado nos resultados obtidos:

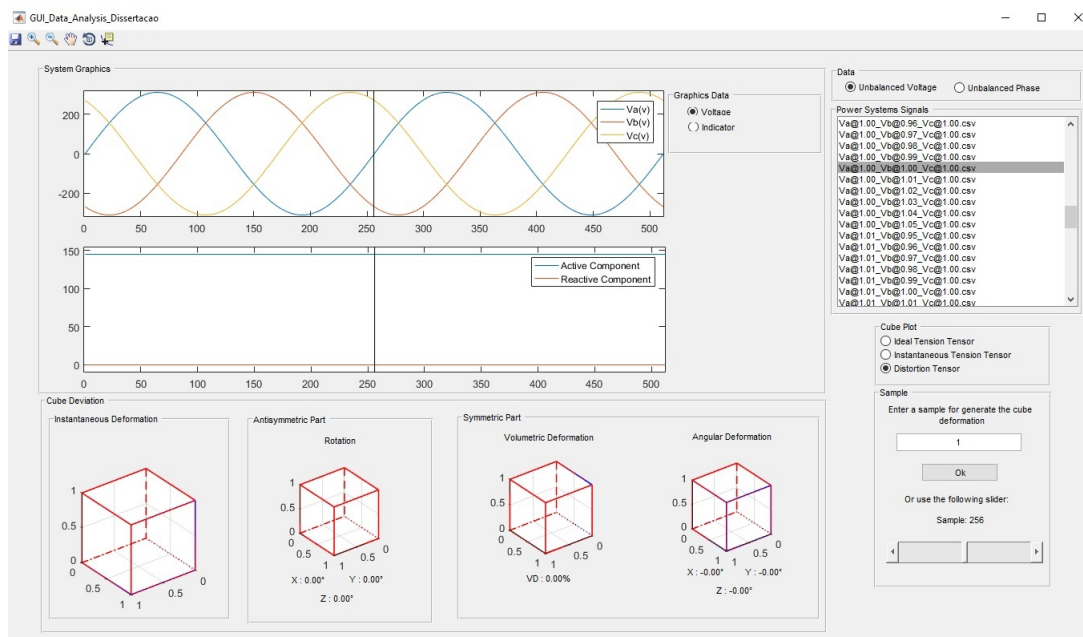


Figura B.6. Simulação em interface gráfica para sistema balanceado, analisado sob a ótica do tensor tensão de segunda ordem.

Como observado para situações de equilíbrio de tensão o comportamento observado é semelhante ao visto na simulação de sistemas balanceados com carga resistiva, apresentado no estudo relativo a potência. Nesta situação, não existem deformações sofridas pelo elemento de volume, tal fato se justifica pelo tensor nulo de distorções.

Sistema com desequilíbrios de tensão e oscilações em sua componente ativa

A seguir, procedeu-se a simulação de sistemas com desequilíbrios de tensão e oscilações em sua componente ativa. Este caso foi observado por meio do estudo de afundamentos de tensão afetando uma ou mais fases de um sistema, conforme apresenta na situação a baixo:

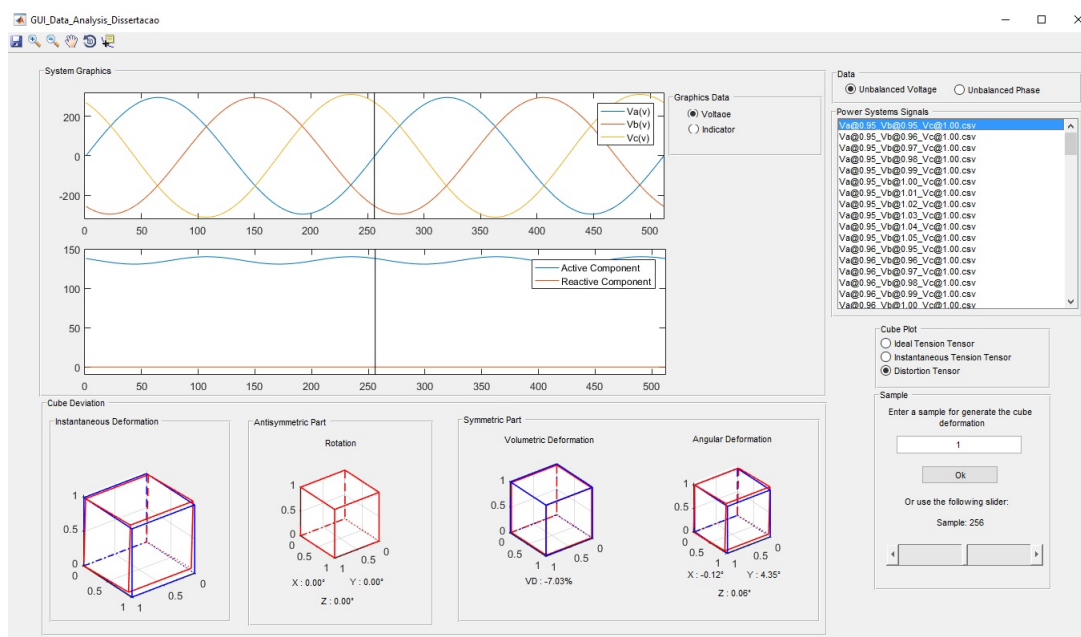


Figura B.7. Sistema com desequilíbrios de tensão e oscilações em sua componente ativa.

Nesta simulação observa-se que o elemento de volume sofre apenas deformações angulares internas e deformações volumétricas. Não estando presente índices de rotação ou componentes reativas não nulas para nenhuma das amostras aqui simuladas.

Convalidação dos resultados

Durante os estudos realizados com os tensores potência instantânea foram levantados dois pontos de análise referentes à Potência Ativa. O primeiro observou as deformações resultantes no elemento de volume quando não há oscilações na potência ativa. O segundo realizou suas análises quando estes era submetidos a situações com oscilações periódicas de potência ativa. Assim, por meio deste estudo notou-se que apenas eram notadas deformações volumétricas no elemento quando submetido à oscilações de potência ativa.

Na análise feita com os tensores tensão de segunda ordem foi possível observar-se exatamente o mesmo comportamento. Pontua-se ainda que as deformações volumétricas apresentam periodicidade coincidente com as oscilações das componentes ativas. Dessa forma, chegou-se a conclusão que o comportamento presente no estudo realizado para o tensor potência instantânea era expansível aos tensores tensão de segunda ordem, no que tange às oscilações de componentes ativas.

B.1.3 Interface Gráfica com Utilização do Tensor Tensão Potência Instantânea Manipulado

O segundo indicador que será introduzido nesta dissertação faz uso de um tensor potência instantânea manipulado. A manipulação proposta consiste na redefinição de dois tensores, sendo estes:

- **O Tensor Instantâneo:** Tensor obtido por meio do produto diadico entre os valores instantâneos reais de tensão e os valores de corrente de sequência positiva;
- **O Tensor Referência:** Tensor obtido por meio do produto diadico entre os valores nominais de tensão e os valores de corrente de sequência positiva.

Por meio da redefinição dos tensores a cima, é possível garantir que a única fonte de desequilíbrios no sistema seja os níveis de tensão. Dito isto, é possível proceder a análise dos desequilíbrios de tensão avaliando-se as rotações ocorridas no elemento de volume. Tal fato era inviável de análise com a utilização do tensor tensão de segunda ordem visto que este retornava um tensor antissimétrico nulo.

Frente ao exposto, os seguintes sistemas serão analisados e simulados:

- Sistema com tensões equilibradas;
- Sistema com desequilíbrios de tensão e oscilações em sua componente reativa;

Os resultados de tais simulações serão confrontados com os obtidos para o tensor potência instantânea. A seguir será realizado um estudo de forma a se avaliar a semelhança entre o comportamento observado nestes.

Sistema com tensões equilibradas

Um novo estudo para tensões equilibradas foi realizado com base no tensor potência instantânea manipulado. Assim uma nova análise das deformações observadas foi feita por meio dos resultados obtidos nas simulações abaixo exemplificadas:

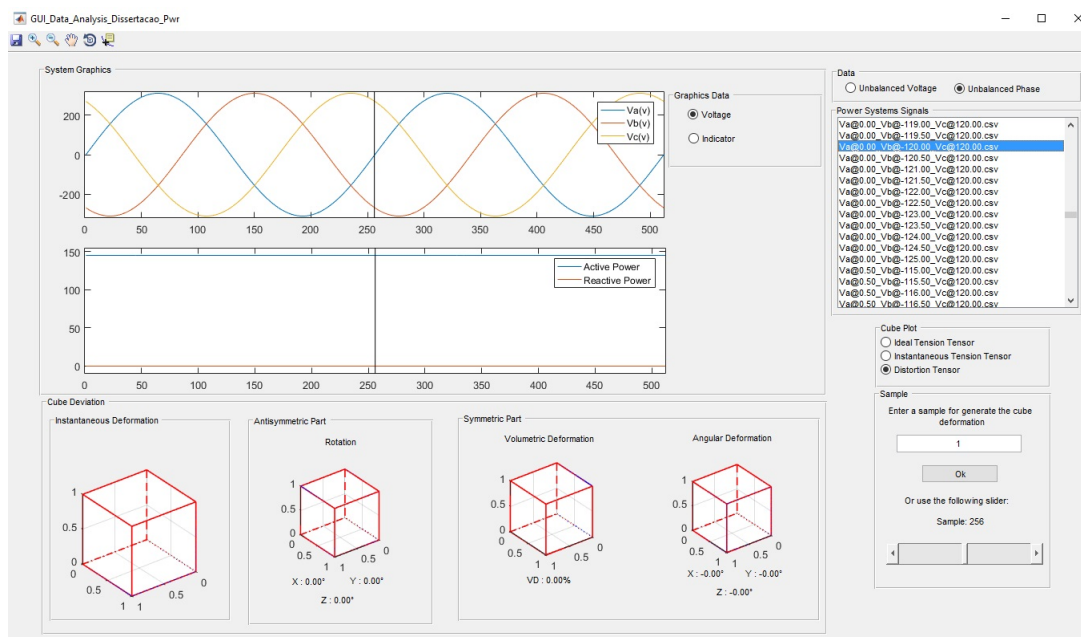


Figura B.8. Simulação em interface gráfica para sistema balanceado, analisado sob a ótica do tensor tensão de segunda ordem.

Novamente, o comportamento observado nas simulações com o tensor citado é semelhante ao visto na simulação de sistemas balanceados com carga resistiva. De forma que não são notadas deformações nos elementos de volume simulados para nenhuma das amostras dos sistemas.

Sistema com desequilíbrios de tensão e oscilações em sua componente reativa

Por fim, procedeu-se a análise dos sistemas com desequilíbrios de tensão que resultem em um componente reativa não nula e oscilante. A figura abaixo ilustra tais simulações e os resultados observados:

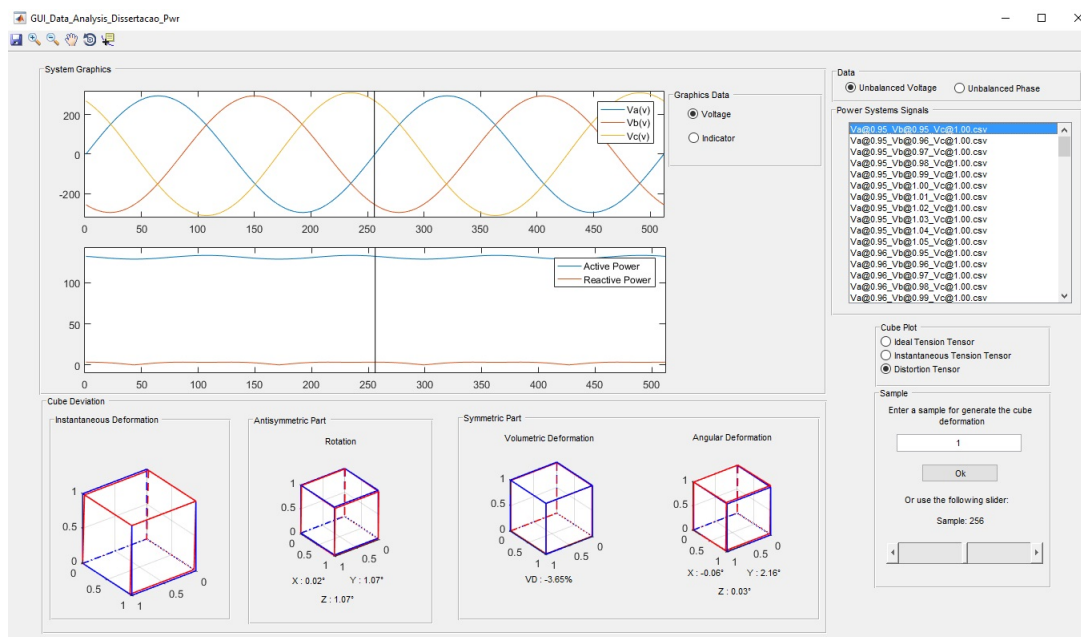


Figura B.9. Sistema com desequilíbrios de tensão e oscilações em sua componente ativa.

Para a simulação ilustrada na foto a cima observa-se a presença de todos os tipos de deformação ao elemento de volume. Contudo tal análise tem por foco as deformações ocorridas na rotação. Neste caso, foi possível ver a existência de oscilações periódicas nas rotações do elemento de volume acompanhadas por oscilações também periódicas nas componentes reativas do sistema.

Convalidação dos resultados

No que tange a convalidação dos resultados obtidos quando confrontados a aqueles resultantes do tensor potência instantânea, infere-se que a rotação é nula em casos de potência reativa nula. Para os casos onde esta é oscilante e periódica, observa-se igual comportamento nas rotações do elemento de volume, de forma que este sofre deformações progressivas e periódicas relacionadas aos reativos do sistema.

Os comportamentos supracitados são experimentados por ambos os tensores, potência instantânea e potência instantânea manipulado. Nestes nota-se a presença de reativos no sistema quando em situações de desequilíbrio, e ainda, que tais reativos são responsáveis por causar rotações entorno dos eixos principais no elemento de volume. Pontua-se que tais rotações ocorrem de forma periódica e condizente com as oscilações de potência reativa.

APÊNDICE C

APLICAÇÃO: SEGMENTAÇÃO PARA VARIAÇÕES DE TENSÃO DE CURTA DURAÇÃO

Este trabalho desenvolveu ainda a implementação de um algoritmo de segmentação para variações de tensão de curta duração - VTCD. O objetivo desta implementação era identificar como os indicadores se comportavam quando utilizados como critério de segmentação de distúrbios. Os algoritmos foram implementados tanto para VUL como VUC e seguiram os parâmetros de classificação encontrados no manual PRODIST da ANEEL (ANEEL, 2007).

Segundo a classificação adotada, as VTCD podem ser classificadas em variações momentâneas de tensão e variações temporárias de tensão. A primeira possui duração inferior a três segundos, enquanto na segunda são vistas as variações com duração de três segundos a três minutos.

As simulações presentes neste capítulo se basearam nas variações momentâneas de tensão. Assim, seguindo o exposto na norma citada, as VTCD momentâneas são divididas em:

- Interrupção momentânea de tensão;
- Afundamento momentâneo de tensão, e;
- Elevação momentânea de tensão.

Os parâmetros que as descrevem tais tipos de VTCD são apresentados na tabela C.1. Esta traz os valores adotados na geração de sinais aplicada aos algoritmos de segmentação e condiz com aqueles presentes na norma da ANEEL (ANEEL, 2007).

Tabela C.1. Parâmetros para Variações Momentâneas de Tensão.

Tipo	Duração	Amplitude de tensão em relação a referência
Interrupção Momentânea de Tensão	Inferior ou igual a três segundos	Inferior a 0,1 p.u
Afundamento Momentâneo de Tensão	Superior ou igual a um ciclo e Inferior ou igual a três segundos	Superior ou igual a 0,1 e inferior a 0,9 p.u
Elevação Momentânea de Tensão	Superior ou igual a um ciclo e Inferior ou igual a três segundos	Superior a 1,1 p.u

As simulações de segmentação tiveram como parâmetros a duração de aproximadamente 330 ms (20 ciclos de 60 Hz), com 3 VTDC de 4 ciclos cada e adotaram como *Threshold* o desequilíbrio máximo de 0.5%. No que tange às amplitudes das VTCD simuladas, estas seguiram os seguintes parâmetros:

- Interrupção Momentânea de Tensão: 0.05 p.u;
- Afundamento Momentâneo de Tensão: 0.5 p.u;
- Elevação Momentânea de Tensão: 1.5 p.u.

C.1 SINAIS SINTÉTICOS

Com as condições de simulação estabelecidas, e tendo em vista a similaridade dos resultados obtidos, optou-se por apresentar tão somente aqueles oriundos dos afundamentos de tensão. Tais resultados são apresentados nas figuras C.1 e C.2.

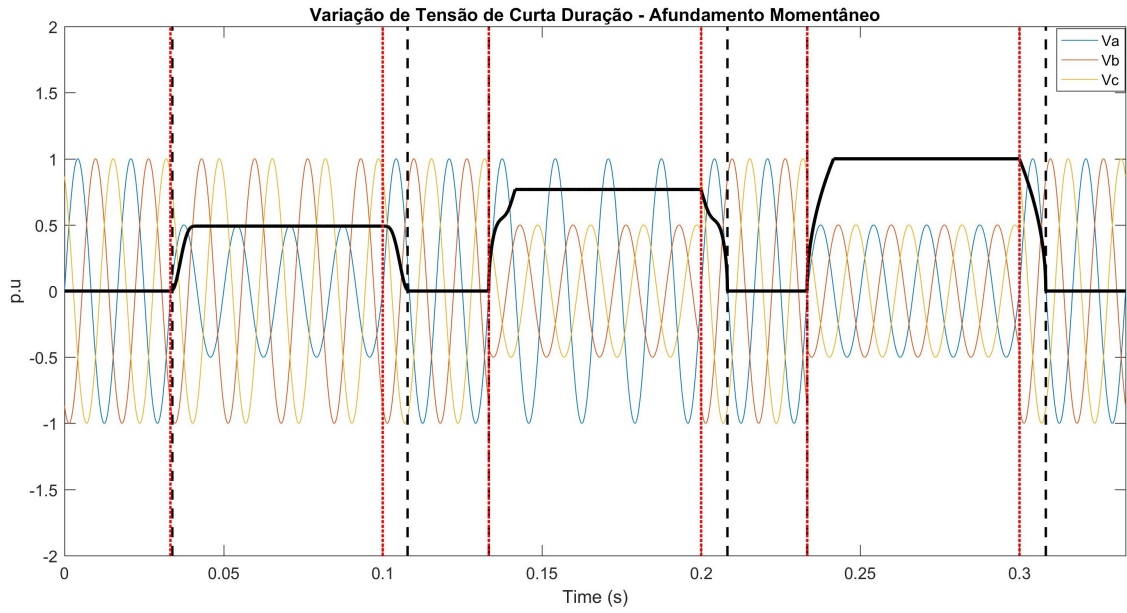


Figura C.1. Segmentação por VUL em sistema com Afundamento Momentâneo de Tensão sem compensação.

A figura C.1 apresenta a segmentação utilizando os dados do indicador VUL como critério de segmentação do algoritmo. O sinal segmentado apresenta um Afundamento Momentâneo de Tensão. Nesta figura, o indicador VUL é representado pela linha preta sólida, o início e fim da segmentação pela linha preta tracejada e o início e fim do distúrbio pela linha vermelha pontilhada.

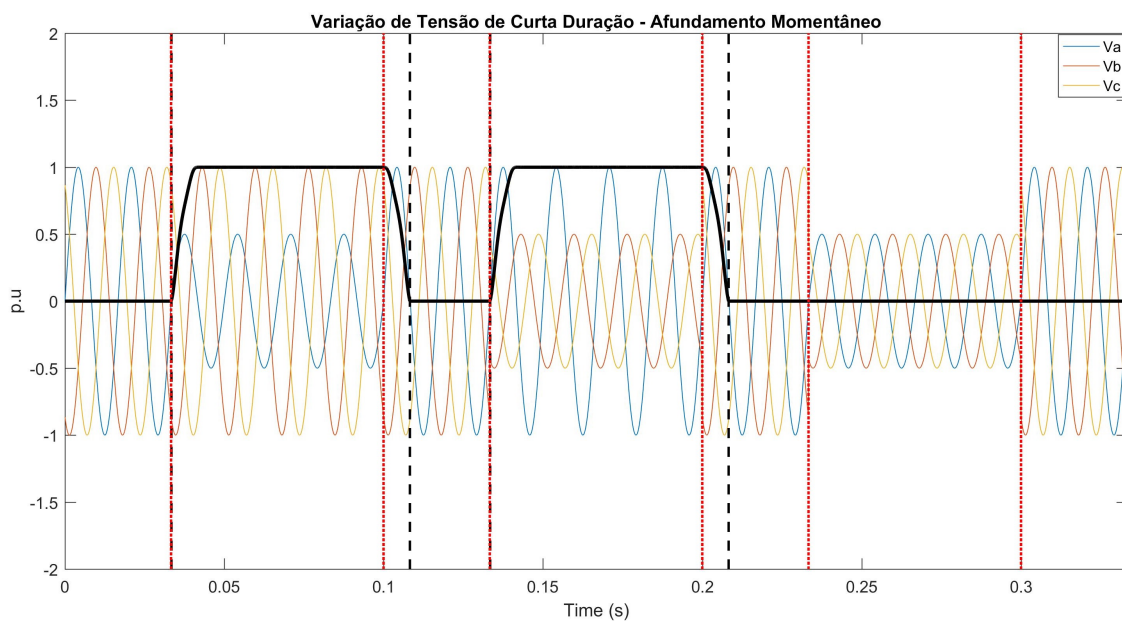


Figura C.2. Segmentação por VUL em sistema com Afundamento Momentâneo de Tensão sem compensação.

A figura C.2 apresenta a segmentação utilizando os dados do indicador VUC como critério de segmentação do algoritmo. Nesta figura, o indicador VUC é representado pela linha preta sólida, enquanto os demais dados são os mesmos apresentados na figura C.1.

C.2 SINAIS REAIS

Além da simulação realizada com os dados sintéticos, foram feitas ainda simulações com dados reais obtidos da base de dados EPRI (2011) que contem registros oscilográficos disponibilizados no formato IEEE COMTRADE (IEEE, 1999). A forma de onda selecionada para análise pertence ao registro chamado de 21839, com amostragens feitas antes, durante e após o distúrbio. O distúrbio em questão corresponde a um afundamento de tensão oriundo de uma falta bifásica acompanhada por um desligamento das fases do transformador. As simulações nestes dados resultaram no exposto nas figuras C.3 e C.4.

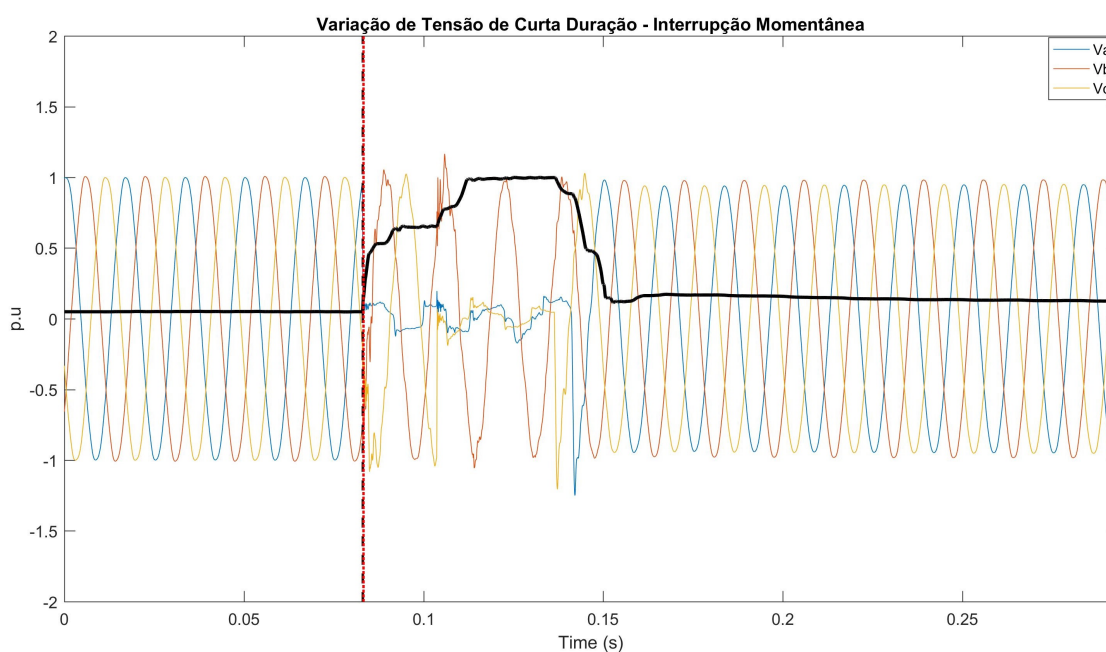


Figura C.3. Segmentação por VUL em sinal real.

A figura C.3 apresenta a segmentação de um sinal real. Nesta o indicador VUL foi adotado na definição do critério de segmentação do algoritmo. Por fim, a linha preta sólida representa o indicador VUL, enquanto as referências para as demais linhas são as mesmas apresentadas nas figura anteriores.

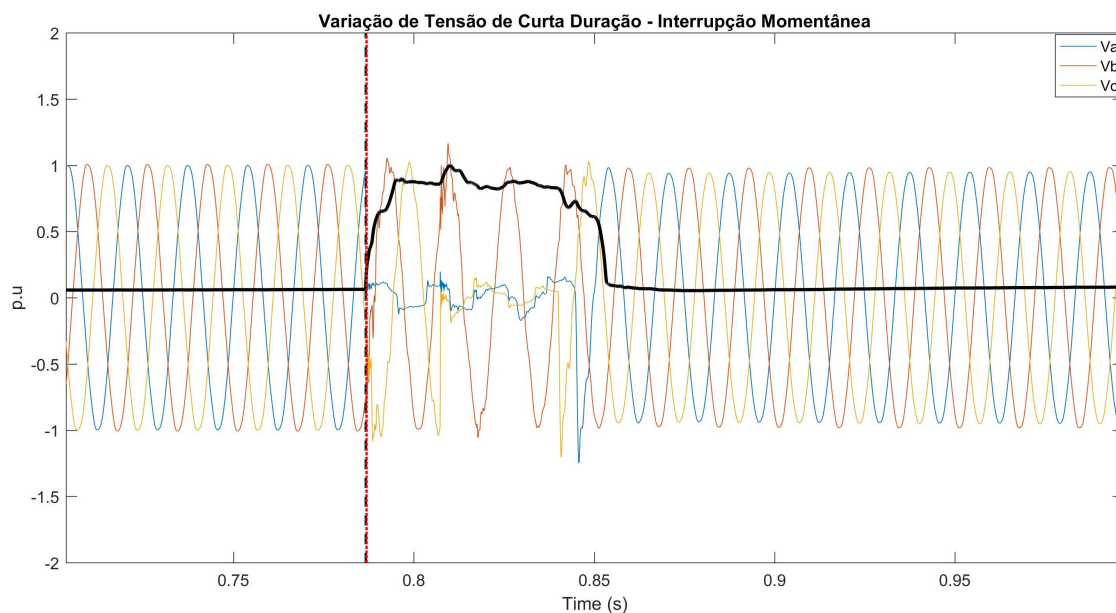


Figura C.4. Segmentação utilizando os dados do indicador VUC como critério de segmentação do algoritmo em um sinal real. Indicador VUC (Linha preta sólida), Início e fim da segmentação (Linha preta tracejada) e início e fim do distúrbio (Linha vermelha pontilhada).

A figura C.4 apresenta a mesma segmentação, porém processada por meio do indicador VUC, representado pela linha preta sólida.

Nas figuras C.1, C.2, C.3 e C.4, para se evitar problemas de escala, todos os valores foram normalizados, de forma que suas variações ocorram dentro do intervalo de 0 a 1. Ademais, tendo em vista que o sinal real possui um erro intrínseco em relação ao ideal, o *Threshold* deve ser calibrado de forma a contabilizar as máximas diferenças de fase e magnitude encontradas entre tais sinais em sua porção equilibrada.

C.3 ANÁLISE DE DESEMPENHO

Ao analisar-se as figuras C.1 e C.2, logo se evidencia que a detecção do desequilíbrio é praticamente imediata. Assim, tão logo a amostra que inicia a VTCD é simulada, o algoritmo é capaz de realizar a sua detecção e delimitar o início do desequilíbrio.

Com relação ao retorno das tensões às suas condições nominais, tendo em vista que os indicadores trabalham com uma janela de meio ciclo, estes necessitam de pelo menos igual período para detectar a normalização do sinal. Tal fato se justifica pela presença de amostras desequilibradas dentro da janela de cálculo do indicador. Assim, estas forçam um valor não nulo no índice de segmentação que é captado pelo *Threshold*. Dessa forma, a marcação do fim da segmentação está sempre atrasada de meio ciclo em relação ao fim real da VTCD.

Assim, caso seja necessária a quantificação exata do início e fim do distúrbio, esta poderá ser obtida pela subtração de meio ciclo do resultado que marca o fim do distúrbio. Dessa forma, subtrai-se o número de amostras que correspondem a meio ciclo, do valor obtido para o encerramento da segmentação. Tal implementação pode ser vista nas figuras C.5 e C.6.

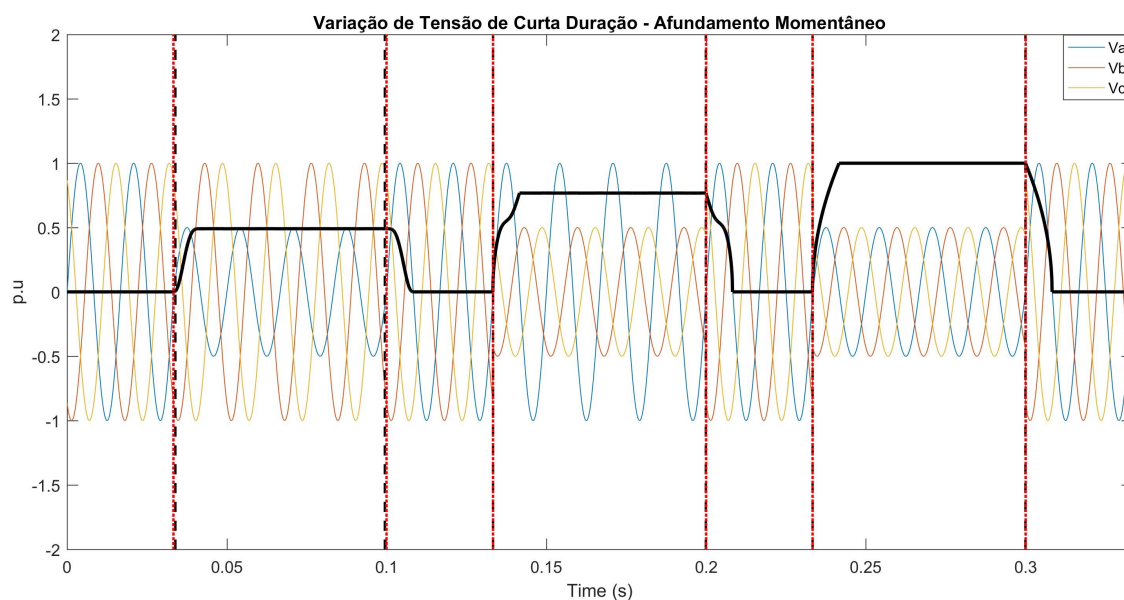


Figura C.5. Segmentação por VUL em sistema com Afundamento Momentâneo de Tensão com compensação.

A figura C.5 apresenta a segmentação utilizando os dados do indicador VUL como critério de segmentação do algoritmo em sistema com Afundamento Momentâneo de Tensão com compensação de atraso, na detecção do fim do evento. As características das linhas presentes no gráfico são as mesmas já apresentadas nas figuras anteriores.

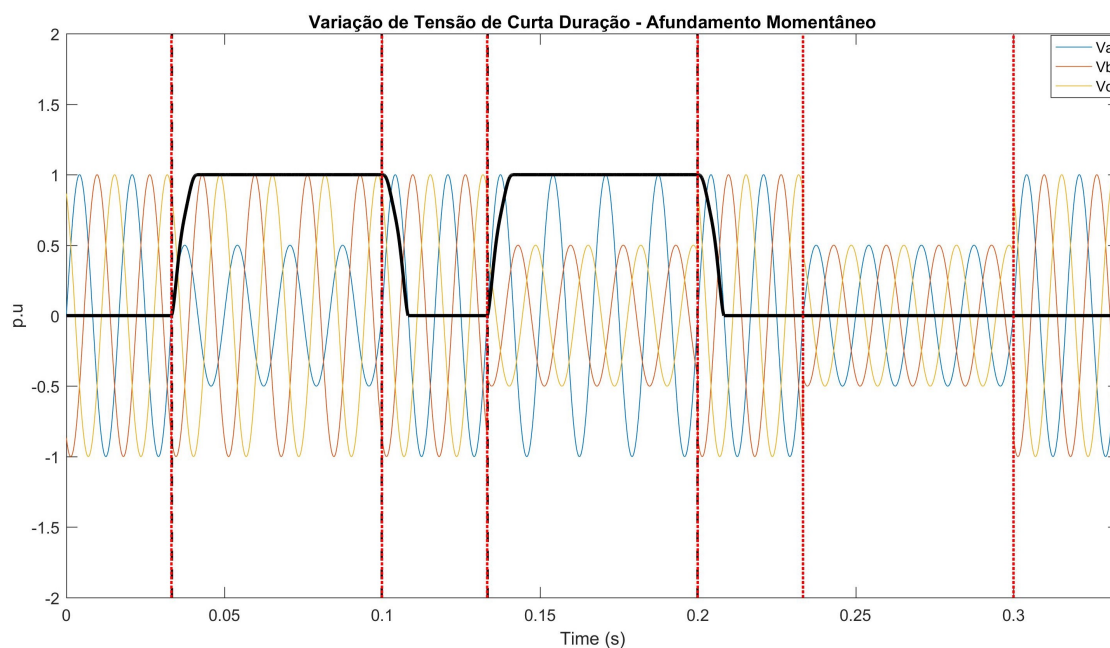


Figura C.6. Segmentação por VUC em sistema com Afundamento Momentâneo de Tensão com compensação.

Nas figuras C.5 e C.6 observa-se que tanto o início do evento quanto o fim do evento são perfeitamente delimitados pelo indicador. Assim, este apresentou um ótimo desempenho em suas simulações.

Vale ressaltar que, para VUC, nota-se que os afundamentos de tensão que afetam com igual amplitude e de forma simultânea às três fases do sistema, o indicador se comporta como em estado de equilíbrio. Tal fato já era esperado visto que, o desenvolvimento deste foi feito com base na decomposição antissimétrica do tensor potência instantânea, mostrada na equação (2.22). Nesta, observa-se que sempre que em situação de equilíbrio trifásico entre as tensões de uma amostra as subtrações propostas resultarão em um tensor nulo que não gera rotações a serem quantificadas.

Para o sinal real, tendo em vista a existência de erro intrínseco entre este e os dados ideais, uma calibração do *Threshold* se fez necessária para a correta detecção do distúrbio. Conforme apresentado nas figuras C.3 e C.4, para o indicador VUL o *Threshold* utilizado foi de 6%, enquanto para VUC este foi de 8%.

Observa-se que, na simulação com dados reais, tanto VUC quanto VUL apenas delimitam o início do distúrbio. Tal condição está em conformidade com o esperado tendo em vista que durante o período pós distúrbio, o sinal ainda se encontra desequilibrado e necessitará de de um tempo até voltar ao regime permanente. Contudo, caso deseje-se isolar o início e fim do evento, disconsiderando-se o tempo de reestabilização em regime permanente, o valor do *threshold* pode ser recalibrado, conforme expresso nas figuras C.7 e C.8.

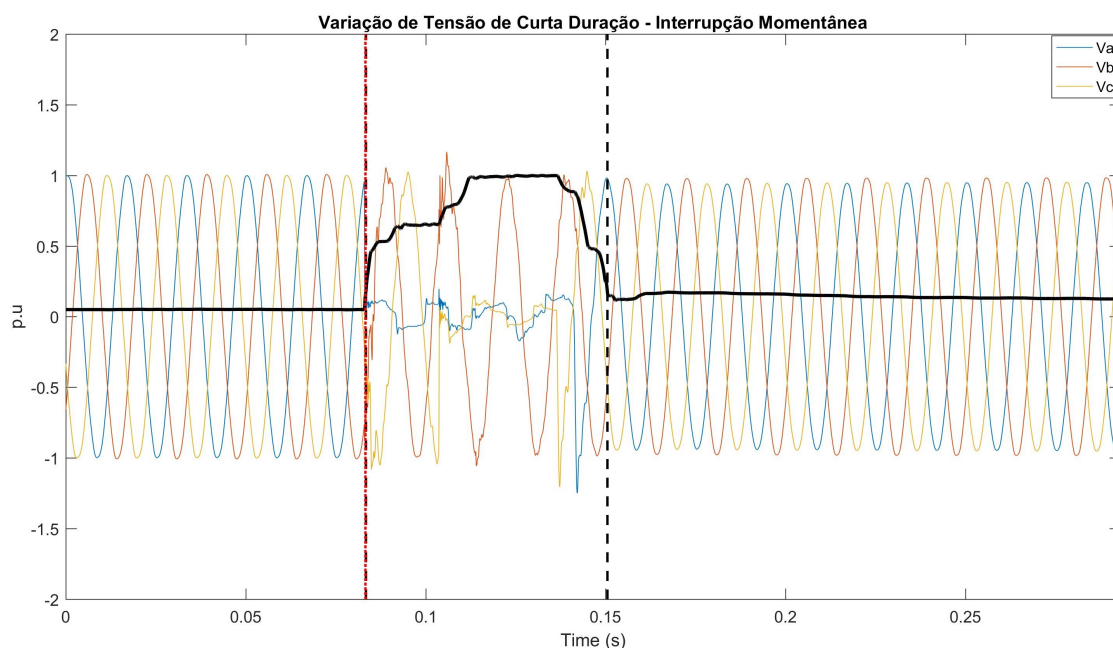


Figura C.7. Segmentação por VUL em um sinal real com calibração para extração de evento.

A figura C.7 apresenta a segmentação do sinal real após ser calibrado para identificação tão somente do evento contido dentro de margens de aceitabilidade predefinidas.

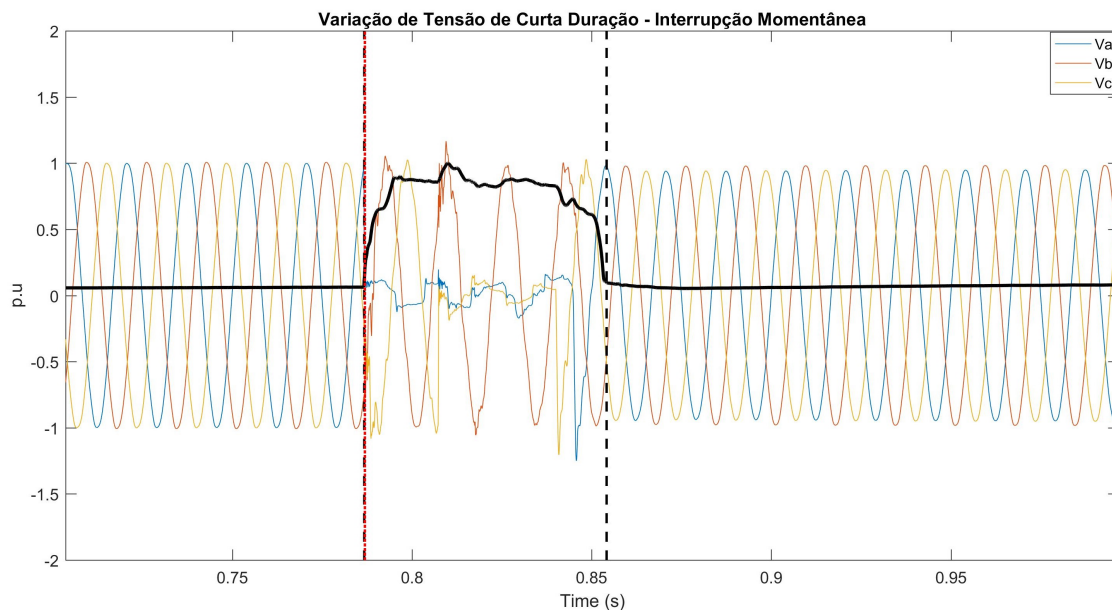


Figura C.8. Segmentação por VUC em um sinal real com calibração para extração de evento.

Frente ao exposto, foi possível concluir que os indicadores apresentam um grande potencial na segmentação de sinais temporais, possuindo inclusive a capacidade de realizar tal segmentação em tempo real ao adotar o uso de uma janela deslizante. Por fim, conforme visto na figura C.2 e C.6, o indicador VUL não é capaz de quantificar ou identificar desequilíbrios que atigem com igual magnitude e de forma simultânea todas as fase do sistema, comportamento este compartilhado por VUF.