



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO TRIÂNGULO MINEIRO  
INSTITUTO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS E EXATAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**OTÁVIO MARTINS SANCHES**

**AVALIAÇÃO DA TEORIA DA POTÊNCIA CONSERVATIVA PARA  
ATRIBUIÇÃO DE RESPONSABILIDADES DEVIDO AO DESEQUILÍBRIO DE  
TENSÃO**

**UBERABA – MG**

**2020**

**OTÁVIO MARTINS SANCHES**

**AVALIAÇÃO DA TEORIA DA POTÊNCIA CONSERVATIVA PARA  
ATRIBUIÇÃO DE RESPONSABILIDADES DEVIDO AO DESEQUILÍBRIO DE  
TENSÃO**

Trabalho de conclusão de curso submetido ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Triângulo Mineiro como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Banca Examinadora:

Prof. Marcus Vinícius Borges Mendonça, Dr. (Orientador)

Prof. Arnaldo José Pereira Rosentino Junior, Dr.

Prof. Fabrício Augusto Matheus Moura, Dr.

Profa. Madeleine Rocio Medrano Castillo Albertini, Dra. (Suplente)

**UBERABA – MG**

**2020**

**Catálogo na fonte: Biblioteca da Universidade Federal do  
Triângulo Mineiro**

S191a Sanches, Otávio Martins  
Avaliação da Teoria da Potência Conservativa para atribuição de  
reponsabilidades devido ao desequilíbrio de tensão / Otávio Martins  
Sanches. -- 2020.  
21 f. : il., tab.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica)  
-- Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Uberaba, MG, 2020  
Orientador: Prof. Dr. Marcus Vinicius Borges Mendonça

1. Energia elétrica-Control de qualidade. 2. Teoria da potência  
conservativa. 3. Desequilíbrio de tensão. 4. Responsabilidade-Atribuição.  
I. Mendonça, Marcus Vinicius Borges. II. Universidade Federal do  
Triângulo Mineiro. III. Título.

CDU 621.31:658.562

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria primeiramente de agradecer meus familiares, por todo o apoio e dedicação, por acreditarem em meu sonho, mas principalmente aos meus pais Décio e Milena, que sempre foram minha fonte inspiração e força nos momentos difíceis.

Agradecer meus amigos pelo apoio ao longo do curso, trazendo sempre alegria em nosso dia a dia e compartilhando aprendizados.

Agradecer a Deus pela oportunidade e por vencer mais uma etapa em minha vida com muita garra, força e fé.

Por fim, mas não menos importante agradecer todos os funcionários e o corpo docente da Universidade Federal do Triângulo Mineiro que tornaram possível minha formação como Engenheiro Eletricista. Em especial ao professor Dr. Marcus Vinícius Borges Mendonça, responsável pela orientação deste trabalho, por sua paciência, dedicação, compartilhamento de conhecimentos que foram imprescindíveis para sua realização.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 1 – Circuito balanceado [1]
- Figura 2 – Circuito desbalanceado [1]
- Figura 3 – Cálculo potência instantânea
- Figura 4 – Cálculo energia reativa instantânea
- Figura 5 – Cálculo energia reativa e potência ativa.
- Figura 6 – Cálculo energia reativa coletiva e potência coletiva
- Figura 7 – Cálculo corrente ativa e corrente reativa
- Figura 8 – Cálculo corrente residual
- Figura 9 – Cálculo de valores eficazes coletivos
- Figura 10 – Cálculo corrente ativa balanceada e corrente reativa balanceada
- Figura 11 – Cálculo corrente ativa desbalanceada e corrente reativa desbalanceada
- Figura 12 – Cálculo da potência reativa e residual
- Figura 13 – Cálculo da potência de desbalanço
- Figura 14 – Cálculo da potência aparente
- Figura 15 – Fluxograma em relação as correntes
- Figura 16 – Sistema de estudo

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tensões de suprimento.

Tabela 2 – Dados fornecidos pela publicação [1].

Tabela 3 – Resultados obtidos pela simulação.

Tabela 4 – Dados condição I.

Tabela 5 – Dados condição II.

Tabela 6 – Dados condição III.

Tabela 7 – Cargas 2 e 3 para condição III.

Tabela 8 – Dados condição V.

Tabela 9 – Cargas 6 e 7 para condição V.

Tabela 10 – Resultados gerais de potências para condição I.

Tabela 11 – Valores das potências de desbalanço para condição I.

Tabela 12 – Valores percentuais das potências de desbalanço para condição I.

Tabela 13 – Resultados gerais de potências para condição II.

Tabela 14 – Valores das potências de desbalanço para condição II.

Tabela 15 – Valores percentuais das potências de desbalanço para condição II.

Tabela 16 – Resultados gerais de potências para condição III.

Tabela 17 – Valores das potências de desbalanço para condição III.

Tabela 18 – Valores percentuais das potências de desbalanço para condição III.

Tabela 19 – Resultados gerais de potências para condição IV.

Tabela 20 – Valores das potências de desbalanço para condição IV.

Tabela 21 – Valores percentuais das potências de desbalanço para condição IV.

Tabela 22 – Resultados gerais de potências para condição V.

Tabela 23 – Valores das potências de desbalanço para condição V.

Tabela 24 – Valores percentuais de potências de desbalanço para condição V.

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

TPC – Teoria da Potência Conservativa

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

ANSI – *American National Standards Institute*

CIGRÉ – *Conseil International des Grands Réseaux Electriques*

FD – Fator de Desequilíbrio de tensão

IEC – International Electrotechnical Commission

IEEE – *Institute of Electrical and Electronic Engineers*

NEMA – *National Electrical Manufacturers Association*

PAC – Ponto de Acoplamento Comum

PRODIST – Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional

QEE – Qualidade da Energia Elétrica

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\bar{V}_A$  – Fasor de tensão da fase A

$\bar{V}_B$  – Fasor de tensão da fase B

$\bar{V}_C$  – Fasor de tensão da fase C

$V_A$  – Módulo da tensão da fase A

$V_B$  – Módulo da tensão da fase B

$V_C$  – Módulo da tensão da fase C

$A$  – Potência Aparente

$\lambda$  – Fator de Potência

$v_\mu$  – Tensão por fase

$V$  – Tensão eficaz coletiva

$V_\mu$  – Tensão eficaz por fase

$I$  – Corrente eficaz coletiva

$I_\mu$  – Corrente eficaz por fase

$P$  – Potência Ativa coletiva

$P_\mu$  – Potência Ativa por fase

$W_r$  – Energia Reativa coletiva

$W_{r\mu}$  – Energia Reativa por fase

$\underline{i}_a$  – Vetor composto pela corrente ativa de cada fase

$i_{a\mu}$  – Corrente ativa por fase

$I_a$  – Corrente ativa eficaz coletiva

$I_{a\mu}$  – Corrente ativa eficaz por fase

$i_{an}$  – Corrente ativa de neutro

$i_{r\mu}$  – Corrente reativa por fase

$\underline{i}_r$  – Vetor composto pela corrente reativa de cada fase

$I_r$  – Corrente reativa eficaz coletiva

$I_{r\mu}$  – Corrente reativa eficaz por fase

$i_{rn}$  – Corrente reativa de neutro

$\underline{i}_v$  – Vetor composto pela corrente residual de cada fase

$i_{v\mu}$  – Corrente residual por fase

$i_{vn}$  – Corrente residual de neutro

$\underline{i}$  – Vetor composto de somatório de vetores de corrente ativa, reativa e residual

$\underline{i}_a^s$  – Vetor composto pela corrente residual ativa dispersa de cada fase

$\underline{i}_{ah}$  – Vetor composto pela corrente residual ativa dispersa de cada fase gerada pelas harmônicas

$\underline{i}_r^s$  – Vetor composto pela corrente residual reativa dispersa de cada fase

$\underline{i}_{rh}$  – Vetor composto pela corrente residual reativa dispersa de cada fase gerada pelas harmônicas

$\underline{i}_g$  – Vetor composto pela corrente harmônica gerada pela carga

$I_a^s$  – Corrente residual eficaz ativa coletiva dispersa

$I_r^s$  – Corrente residual eficaz reativa coletiva dispersa

$i_{an}^s$  – Corrente residual ativa dispersa de neutro

$i_{an\mu}^s$  – Corrente residual ativa dispersa de neutro por fase

$i_{rn}^s$  – Corrente residual reativa dispersa de neutro

$i_{rn\mu}^s$  – Corrente residual reativa dispersa de neutro por fase

$i_{gn}$  – Corrente harmônica gerada pela carga no neutro

$i_{gn\mu}$  – Corrente harmônica gerada pela carga no neutro por fase

$\underline{i}_a^b$  – Vetor composto pela corrente ativa balanceada de cada fase

$\underline{i}_a^u$  – Vetor composto pela corrente ativa desbalanceada de cada fase

$I_a^b$  – Corrente ativa eficaz balanceada

$I_a^u$  – Corrente ativa eficaz desbalanceada

$\underline{i}_{an}^b$  – Vetor composto pela corrente ativa balanceada de neutro de cada fase

$i_{a\mu}^b$  – Corrente ativa balanceada por fase

$\underline{i}_{an}^u$  – Vetor composto pela corrente ativa desbalanceada de neutro de cada fase

$i_{a\mu}^u$  – Corrente ativa desbalanceada por fase

$Q$  – Potência reativa

$U$  – Potência de desbalanço

$D$  – Potência residual

$\underline{i}_{ax}^{tb}$  – Corrente ativa balanceada total por fase

$\underline{i}_{rx}^{tb}$  – Corrente reativa balanceada total por fase

$\underline{i}_{ax}^{tu}$  – Corrente ativa desbalanceada total por fase

$\underline{i}_{rx}^{tu}$  – Corrente reativa desbalanceada total por fase

$\underline{i}_{ax}^{us}$  – Corrente ativa desbalanceada do restante do sistema por fase

$\underline{i}_{rx}^{us}$  – Corrente reativa desbalanceada do restante do sistema por fase

$I_a^{tb}$  – Corrente ativa total eficaz balanceada

$I_r^{tb}$  – Corrente reativa eficaz total balanceada

$I_a^{tu}$  – Corrente ativa eficaz total desbalanceada

$I_r^{tu}$  – Corrente reativa eficaz total desbalanceada

$I_a^{us}$  – Corrente ativa eficaz desbalanceada do restante do sistema

$I_r^{us}$  – Corrente reativa eficaz desbalanceada do restante do sistema

$U_t$  – Potência de desbalanço total

$U_{at}$  – Potência ativa de desbalanço total

$U_{rt}$  – Potência reativa de desbalanço total

$U_s$  – Potência de desbalanço do restante do sistema

$U_{as}$  – Potência ativa de desbalanço do restante do sistema

$U_{rs}$  – Potência reativa de desbalanço do restante do sistema

## Sumário

I. Introdução .....	1
II. Fundamentação teórica .....	2
<i>A-Principais Métodos para o Cálculo do Desequilíbrio de Tensão</i> .....	2
<i>B-Métodos para Atribuição de Responsabilidade pelo Desequilíbrio de Tensão</i> .....	2
<i>C-Teoria da Potência Conservativa aplicada a circuitos trifásicos desequilibrados</i> .....	3
III. Implementação e validação de cálculos para sistemas trifásicos desequilibrados.....	5
<i>A- Implementação de cálculos</i> .....	5
<i>B- Validação de dados</i> .....	7
IV. Descrição dos sistemas e casos estudados.....	7
V. Proposta complementar de quantificação para atribuição de responsabilidades.....	8
VI. Avaliação Computacional dos casos estudados.....	9
VII. Conclusão.....	11
VIII. Referências.....	11

# Avaliação da Teoria da Potência Conservativa para atribuição de responsabilidades devido ao desequilíbrio de tensão

Otávio M. Sanches, Marcus V. B. Mendonça

Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Departamento de Engenharia Elétrica, Uberaba - Minas Gerais  
otavio352@gmail.com, marcus.mendonca@uftm.edu.br

## I. INTRODUÇÃO

**Resumo** — Atualmente, existem várias vertentes em relação ao estudo da Qualidade da Energia Elétrica, sendo uma destas o desequilíbrio de tensão. Este fenômeno é caracterizado pela diferença de amplitude entre as três fases de um determinado sistema trifásico, e/ou de defasagem elétrica de  $120^\circ$  entre as tensões. Os Procedimentos de Distribuição estabelecidos pela ANEEL definem valores limites, como referência a ser seguida, para o desequilíbrio de tensão. Contudo, caso tais limites sejam superados, até o momento, não se adota uma metodologia para atribuir responsabilidades e, conseqüentemente, promover a correção no sistema pelos agentes envolvidos. Assim, neste trabalho, propõe-se um estudo de atribuição de responsabilidades, em relação a este distúrbio, não somente para as distribuidoras de energia, mas também aos consumidores, utilizando-se como base o método da Teoria da Potência Conservativa com o intuito de avaliar a eficácia do método diante de um hipotético sistema elétrico industrial.

**Palavras-chaves** — Qualidade da Energia, Teoria da Potência Conservativa, Desequilíbrio de Tensão, Atribuição de Responsabilidades.

**Abstract** — Actually, there are several aspects in relation to the study of Power Quality, that one of these is the voltage unbalance. This phenomenon is characterized by the difference in amplitude among the three phases of a system, and/or the electrical angle of  $120^\circ$  among voltages. The distribution procedures established by ANEEL define limit values, as a reference to be followed, for the voltage unbalance. Although, if these limits are exceeded, a methodology is not yet adopted to assign responsibilities and, consequently, promote the correction in the system by the agents involved. Thus, in this work, a study of the attribution of responsibilities in relation to this disturbance is proposed, not only for utilities, but also for consumers, using the Conservative Power Theory in order to evaluate the efficiency of the method before a hypothetical industrial electrical system.

**Keywords** — Power Quality, Conservative Power Theory, Voltage Unbalance, Assignment of Responsibilities.

O termo Qualidade da Energia Elétrica (QEE) está vinculado a um conjunto de fatores capazes de afetar ou comprometer o suprimento elétrico oferecido aos consumidores [1]. De forma geral, os trabalhos realizados no âmbito da QEE estão vinculados a continuidade de fornecimento, qualidade do produto e agilidade operacional. Como a QEE não depende apenas dos processos citados acima, mas também das cargas utilizadas pelos consumidores, ao decorrer do tempo, têm surgido novas linhas de pesquisa na área [2], como por exemplo, análise de sensibilidade de cargas diante de distúrbios e identificação das unidades consumidoras que contribuem para a deterioração da QEE.

Um dos fatores que pode comprometer a qualidade de energia é o desequilíbrio de tensão. Este fenômeno é caracterizado por qualquer diferença verificada nas amplitudes entre as três tensões de fase de um determinado sistema trifásico, e/ou na defasagem elétrica de  $120^\circ$  entre as tensões de fase do mesmo sistema [3].

Sabe-se que a presença de altos níveis de desequilíbrio provoca, dentre outros problemas, perdas excessivas, sobreaquecimento, solicitação do isolamento e redução da vida útil de motores e transformadores, e o acionamento indevido dos seus sistemas de proteção, levando a parada dos processos de produção. Através destes impactos, percebe-se que para um determinado consumidor pode-se gerar um volumoso déficit econômico. Com isto, hoje destaca-se o quão é importante o assunto em questão, não apenas para as instituições de pesquisa e distribuidoras de energia, mas também para os consumidores finais [1].

Segundo o módulo 8 do PRODIST (Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional), são considerados os limites de fator de desequilíbrio de tensão (FD) de 3,0% para uma tensão nominal  $V_n$  inferior ou igual a 1 kV, e de 2,0% para uma  $V_n$  superior a 1 kV e inferior a 230 kV, onde é recomendado o método das Componentes Simétricas para o cálculo do FD ou, alternativamente, o método CIGRÉ [3]. Já seguindo as normas internacionais, segundo o IEEE, o FD deve ter um valor menor que 1,0%, sendo também aceito um valor até 2,0% [4]. A norma IEC 61000-3-13 propõe um FD de 2,0% para baixa e média tensão, e considera o método das componentes simétricas para a quantificação do desequilíbrio [5].

A partir do contexto mostrado acima, este trabalho tem por intuito efetuar a aplicação da Teoria da Potência Conservativa a sistemas trifásicos desequilibrados, de forma a analisar a atribuição de responsabilidades tanto em relação aos

consumidores envolvidos quanto à concessionária que promove o suprimento da energia.

## II. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O desequilíbrio de tensão se origina basicamente por dois tipos, um relacionado a estrutura da rede elétrica e outro relacionado a carga. O primeiro tipo de desequilíbrio é causado pela assimetria da rede elétrica na transmissão e distribuição, devido a pequena diferença dos seus parâmetros entre as fases. Já o outro perfil de desequilíbrio relaciona-se com a natureza da carga, portanto dependente das características operacionais do próprio consumidor, podendo este ter maior comprometimento da rede elétrica em função do desequilíbrio de tensão devido à distribuição desigual das cargas entre as fases [1]. Além disto, nos dias atuais, a presença de recursos energéticos distribuídos, como por exemplo, o uso de sistemas fotovoltaicos, pode originar desequilíbrios de corrente e tensão.

Dentro deste contexto, tensões desequilibradas provocam um mau funcionamento em alguns equipamentos elétricos trifásicos, comprometendo seu desempenho e a vida útil dos mesmos, pois até um pequeno desequilíbrio nas tensões de alimentação origina um elevado nível de desequilíbrio nas correntes absorvidas por motores de indução, por exemplo [6].

### A. Principais Métodos para o Cálculo do Desequilíbrio de Tensão

Um sistema elétrico trifásico ideal, ou seja, equilibrado, é constituído por tensões com módulos iguais e defasadas entre si  $120^\circ$ , conforme as Equações (1), (2) e (3) para uma sequência de fases direta [6].

$$\begin{aligned}\bar{V}_a &= V \angle 0^\circ & (1) \\ \bar{V}_b &= V \angle -120^\circ & (2) \\ \bar{V}_c &= V \angle 120^\circ & (3)\end{aligned}$$

A partir deste, existem diversas metodologias para obtenção do fator de desequilíbrio. Os indicadores definidos por essas metodologias objetivam traduzir o desequilíbrio de tensão ao qual uma rede elétrica é submetida, de forma a permitir a análise do fenômeno [1]. Os principais métodos utilizados para o cálculo do desequilíbrio de tensão são: método das Componentes Simétricas, método CIGRÉ e o método NEMA e ANSI.

Na sequência, cada método utilizado atualmente e suas etapas de cálculo são descritos sucintamente.

- **Método de CIGRÉ:** método proposto pelo *Conseil International des Grands Réseaux Electriques* (CIGRÉ) que é utilizado nos casos em que os instrumentos de medição realizam apenas leituras dos módulos das tensões (tensões eficazes) [1]. Este método determina o fator de desequilíbrio de tensão em porcentagem (FD%) a partir das tensões de linha [3];

- **Método da Componentes Simétricas:** decomposição do sistema trifásico desequilibrado, na forma matricial, em três outros sistemas simétricos e equilibrados nas sequências positiva, negativa e zero. O nível de desequilíbrio é medido através do FD dado pela razão entre o módulo de tensão de sequência negativa e o módulo da tensão de sequência positiva, podendo aplicar tensões de fase ou de linha. Os

módulos e os ângulos das tensões são utilizados para quantificação do FD deste método [7]. Atualmente, o IEEE adota como recomendação o uso do método das componentes simétricas para cálculo do FD [6];

- **Método NEMA e ANSI:** método que define o fator de desequilíbrio de tensão (FD) como sendo a relação entre o máximo desvio das tensões medidas em relação à média e a tensão de linha média [6], [7].

### B. Métodos para Atribuição de Responsabilidade pelo Desequilíbrio de Tensão

Em relação à atribuição de responsabilidade devido ao desequilíbrio de tensão, os principais métodos descritos na literatura são: método da IEC, método do fluxo de potência trifásico, método da corrente conforme e não-conforme, método Unbalance Current Ratio (UCR) e método proposto por Aquila et al.

- **Método da IEC:** identifica o nível de emissão de desequilíbrio de uma determinada instalação, sendo apenas utilizado quando é possível medir este nível antes e depois da conexão [6], [8];

- **Método do fluxo de potência trifásico:** através do fluxo de potência de sequência zero, positiva e negativa, conforme as componentes simétricas do sistema, associa-se o sentido do fluxo de potência ativa de sequência negativa à origem do desequilíbrio de tensão [6];

- **Método da corrente conforme e não-conforme:** corrente total demandada pela carga é a soma de duas correntes teóricas, uma conforme e outra não-conforme ao desequilíbrio apresentado na tensão de fornecimento [1], [6];

- **Método Unbalance Current Ratio (UCR):** decomposição da corrente real de entrada em três componentes, onde a primeira corrente é requerida por uma carga linear desequilibrada, a segunda corrente por uma carga não-linear e a terceira corrente por uma carga linear balanceada [6].

- **Método proposto por Aquila et Al:** considera-se a representação de elementos RL em série idênticos para modelar a carga, como linear e balanceada ideal trifásica, sendo neste caso, o restante do sistema responsável pelo desequilíbrio e pela distorção harmônica. Logo, este método permite estimar uma parte de toda a carga em termos de elementos passivos que não afeta o desequilíbrio e a distorção; enquanto outra parcela da corrente, por sua vez, está vinculada à distorção harmônica promovida pela unidade consumidora analisada e ao desbalanço interno das cargas monofásicas nas fases [8].

No presente trabalho, aplica-se uma nova ideia para atribuição de responsabilidades utilizando-se a Teoria da Potência Conservativa (TPC). Nesta teoria, a potência ativa e reativa não são suficientes para caracterizar o funcionamento de uma rede, com isto, introduz-se um novo termo chamado de energia reativa  $W_r$  [9]. Tanto a potência ativa, quanto a energia reativa são quantidades conservativas, independente da forma de onda das correntes e tensões. A referida metodologia também promove a caracterização de uma corrente residual, a qual não transfere energia e está relacionada a algum distúrbio presente no sistema [2].

### C. Teoria da Potência Conservativa aplicada a circuitos trifásicos desequilibrados

A Teoria da Potência Conservativa é uma metodologia de quantificação de potências que foi influenciada por outras teorias estabelecidas em anos anteriores à sua concepção, de acordo com estudos realizados pelo próprio autor. Desta maneira, de forma a contextualizar, na sequência são descritas sucintamente algumas teorias desenvolvidas ao longo da história: Budeanu, Fryze, Depenbrock e Akagi et al [9].

- *Teoria proposta por Budeanu*: expressa tensão e corrente mediante à série de Fourier no domínio da frequência para determinado sistema monofásico [9];

- *Teoria proposta por Fryze*: faz análise de tensão e corrente no domínio do tempo para determinado sistema monofásico, fazendo o estudo de decomposição da corrente em duas componentes instantâneas ortogonais ativa e não ativas [9];

- *Teoria proposta por Depenbrock*: avalia sistemas polifásicos, utilizando-se de uma referência externa para medições de tensão e corrente, satisfazendo as Leis de Kirchhoff. Efetua decomposição da corrente em componentes instantâneas ortogonais ativa, não ativas, corrente de potência e corrente de potência zero [9];

- *Teoria proposta por Akagi et al*: chamada também de Teoria do  $PQ$ , pois, nesta, considera-se uma potência instantânea real  $P$ , potência instantânea imaginária  $Q$  e uma potência instantânea de sequência zero  $P_0$ . A análise é feita em um sistema trifásico com 4 fios, onde a tensão é medida em relação ao condutor de neutro nas coordenadas  $\alpha, \beta$  e 0 [9].

Em 2011, a TPC foi reformulada de maneira a serem considerados todos os fenômenos presentes nas formas de onda das tensões e correntes provocados pelos efeitos de desbalanço da carga, assimetria, não linearidades e variações de frequência [5].

Dentro deste contexto, a partir da TPC é possível realizar o estudo de circuitos desequilibrados, onde todo o desenvolvimento é feito a partir da abordagem estabelecida na publicação [9]. Os fundamentos matemáticos são periódicos e os termos de potência e energia são definidos em termos médios e instantâneos.

Considerando-se um circuito polifásico, independente da presença de um condutor de retorno, sua potência aparente é o produto dos valores eficazes dos vetores de tensão ( $\underline{v}$ ) e corrente ( $\underline{i}$ ).

$$A = \|\underline{v}\| \cdot \|\underline{i}\| = \mathbf{V} \cdot \mathbf{I} \quad (4)$$

A partir deste, pode-se definir o fator de potência de um sistema polifásico.

$$\lambda = \frac{P}{A} \quad (5)$$

A questão de um referencial de tensão é de extrema importância para os estudos de circuitos polifásicos, pois busca-se relacionar uma referência de tensão de forma a garantir um fator de potência unitário ( $A=P$ ) no caso de uma carga puramente resistiva, independente da presença de um condutor de retorno. Neste artigo, utiliza-se a representação do retorno pela terra com neutro solidamente aterrado, tornando

cada fase independente, sendo estas analisadas individualmente.

Então, o neutro é tomado como uma referência, sendo que este não contribui com os termos instantâneos de potência e energia reativa. Através desta referência, considerando-se uma carga resistiva balanceada, é possível obtermos uma condição de proporcionalidade entre as tensões e correntes de fase.

$$v_\mu = R \cdot i_\mu \quad \mu \in a, b, \dots, m \quad (6)$$

Assim como considerado anteriormente, tendo um fator de potência unitário, calcula-se a potência aparente através do produto entre corrente e tensão eficaz.

$$A = P = \mathbf{V} \cdot \mathbf{I} \quad (7)$$

Os valores de tensão e corrente eficazes coletivos são obtidos através da norma euclidiana das tensões e correntes de cada fase.

$$\mathbf{V} = \sqrt{\sum_{\mu=a}^m V_\mu^2} \quad (8)$$

$$\mathbf{I} = \sqrt{\sum_{\mu=a}^m I_\mu^2} \quad (9)$$

Nas equações (8) e (9), não se leva em consideração a corrente de neutro para o cálculo da corrente eficaz, sendo assim, a corrente de neutro não afeta o valor da potência aparente. Em relação a tensão de neutro, esta possui um valor nulo ( $V_n = 0$ ) pois este é tomado como referência.

Através do sistema polifásico, são obtidos vetores de tensão  $\underline{v}$  e corrente  $\underline{i}$  compostos pelas grandezas de fase. A partir destes, calcula-se a potência ativa coletiva através do produto interno entre tensão e corrente ou pelo somatório da potência ativa de cada fase.

$$P = \langle \underline{v}, \underline{i} \rangle = \sum_{\mu=1}^m \langle v_\mu, i_\mu \rangle = \sum_{\mu=1}^m \frac{1}{T} \int_0^T v_\mu(t) \cdot i_\mu(t) \cdot dt = \sum_{\mu=a}^m P_\mu \quad (10)$$

Para determinação da energia reativa coletiva do sistema basta calcular o somatório da energia reativa de cada fase ou obter o produto interno entre os vetores de tensão  $\underline{v}$  e corrente  $\underline{i}$  em relação a seus vetores de integrais parciais de tensão  $\hat{v}$  e corrente  $\hat{i}$ .

$$W_r = \langle \hat{v}, \hat{i} \rangle = -\langle \underline{v}, \underline{i} \rangle = \sum_{\mu=1}^m \hat{v}_\mu(t) \cdot i_\mu(t) = \sum_{\mu=a}^m W_{r\mu} \quad (11)$$

Em relação as correntes de um determinado circuito polifásico, verifica-se a corrente ativa, a corrente reativa e a corrente residual. As correntes ativas de cada fase  $i_{a\mu}$  são definidas através da divisão da potência ativa de cada fase pela tensão de eficaz de cada fase, sendo este valor multiplicado pela tensão instantânea na fase, ou simplesmente pela condutância de fase equivalente  $G_\mu$  multiplicado pela tensão instantânea na fase.

$$i_{a\mu} = \frac{\langle v_\mu, i_\mu \rangle}{\|v_\mu\|^2} \cdot v_\mu = \frac{P_\mu}{V_\mu^2} \cdot v_\mu = G_\mu \cdot v_\mu \quad (12)$$

$$\underline{i}_a = \{i_{a\mu}\}_{\mu=a}^m \quad (13)$$

Calcula-se o valor da corrente ativa eficaz coletiva, efetuando o somatório das correntes eficazes de cada fase da forma a seguir.

$$I_a = \|\underline{i}_a\| = \sqrt{\sum_{\mu=a}^m I_{a\mu}^2} = \sqrt{\sum_{\mu=a}^m \left(\frac{P_\mu}{V_\mu}\right)^2} \quad (14)$$

A corrente ativa coletiva não transporta toda a potência ativa (total) do sistema. Em relação a corrente ativa de neutro, esta é obtida através do somatório da corrente ativa de cada fase, sendo considerado o sinal negativo pelo sentido de referência do sistema, ou seja, todas as correntes possuem o mesmo sentido adotado (fonte para carga).

$$i_{an} = -\sum_{\mu=a}^m i_{a\mu} \quad (15)$$

As correntes reativas  $i_{r\mu}$  são definidas como da divisão da energia reativa de cada fase pela integral imparcial de tensão de eficaz de cada fase, sendo este valor multiplicado pela integral imparcial de tensão instantânea na fase, ou simplesmente pela reatividade equivalente de fase  $B_\mu$  multiplicado pela integral imparcial de tensão instantânea na fase.

$$i_{r\mu} = \frac{\langle \hat{v}_\mu, i_\mu \rangle}{\|\hat{v}_\mu\|^2} \cdot \hat{v}_\mu = \frac{W_{r\mu}}{\hat{V}_\mu^2} \cdot \hat{v}_\mu = B_\mu \cdot \hat{v}_\mu \quad (16)$$

$$\underline{i}_r = \{i_{r\mu}\}_{\mu=a}^m \quad (17)$$

O valor da corrente reativa eficaz coletiva é calculado efetuando o somatório das correntes eficazes de cada fase conforme a expressão (18).

$$I_r = \|\underline{i}_r\| = \sqrt{\sum_{\mu=a}^m I_{r\mu}^2} = \sqrt{\sum_{\mu=a}^m \left(\frac{W_{r\mu}}{\hat{V}_\mu}\right)^2} \quad (18)$$

A corrente reativa coletiva não transporta toda a energia reativa do sistema. Em relação a corrente reativa de neutro, esta é obtida pelo somatório das correntes reativas de cada fase, sendo o sinal negativo aplicado pelo sentido adotado no sistema.

$$i_{rn} = -\sum_{\mu=a}^m i_{r\mu} \quad (19)$$

Para a representação das correntes remanescentes, que não transmitem nem potência ativa nem potência reativa, utiliza-se como representação as correntes residuais, representando o vetor  $\underline{i}_v$ , que contém as correntes de cada fase.

$$\underline{i}_v = \underline{i} - \underline{i}_a - \underline{i}_r \quad (20)$$

É possível também existir a corrente residual (nula) de neutro, sendo esta obtida pelo somatório da corrente residual

de cada fase. Novamente o sinal negativo representa o sentido adotado no sistema.

$$i_{vn} = -\sum_{\mu=a}^m i_{v\mu} \quad (21)$$

Ainda para determinado sistema, efetua-se a decomposição das correntes verificadas nas equações acima. Para a corrente residual nula, esta é dividida em correntes dispersas ativa e reativa, e correntes harmônicas geradas pela carga, sendo estas representadas por  $\underline{i}_a^s$ ,  $\underline{i}_r^s$  e  $\underline{i}_g$ .

$$\underline{i}_a^s = \underline{i}_{ah} - \underline{i}_a = \{i_{sa}\}_{\mu=a}^m \quad (22)$$

$$\underline{i}_r^s = \underline{i}_{rh} - \underline{i}_r = \{i_{sr}\}_{\mu=a}^m \quad (23)$$

$$\underline{i}_g = \underline{i}_v - \underline{i}_a^s - \underline{i}_r^s \quad (24)$$

Onde  $\underline{i}_{ah}$  e  $\underline{i}_{rh}$  são os respectivos termos relacionados as correntes harmônicas ativas e reativas. O valor das correntes dispersas eficazes ativa e reativa é obtido através das normas dos vetores  $\underline{i}_{sa}$  e  $\underline{i}_{sr}$ .

$$I_a^s = \|\underline{i}_{sa}\| \quad (25)$$

$$I_r^s = \|\underline{i}_{sr}\| \quad (26)$$

Devido ao desequilíbrio entre as fases, pode ocorrer a presença de corrente no barramento de neutro, possuindo componentes dispersas ativa  $i_{an}^s$  e reativa  $i_{rn}^s$ , e gerada  $i_{gn}$ .

$$i_{an}^s = -\sum_{\mu=a}^m i_{an\mu}^s \quad (27)$$

$$i_{rn}^s = -\sum_{\mu=a}^m i_{rn\mu}^s \quad (28)$$

$$i_{gn} = -\sum_{\mu=a}^m i_{g\mu} \quad (29)$$

Já em relação a componentes de corrente ativa, esta é dívida em corrente ativa balanceada  $\underline{i}_a^b$  e desbalanceada  $\underline{i}_a^u$ , sendo a primeira definida em função dos valores coletivos da potência ativa e da tensão eficaz.

$$\underline{i}_a^b = \frac{P}{V^2} \cdot \underline{v} \quad (30)$$

$$\underline{i}_a^u = \underline{i}_a - \underline{i}_a^b \quad (31)$$

Seus valores coletivos de corrente ativa eficaz balanceada e desbalanceada são obtidos através das normas dos vetores  $\underline{i}_a^b$  e  $\underline{i}_a^u$ .

$$I_a^b = \|\underline{i}_a^b\| = \frac{P}{V} \quad (32)$$

$$I_a^u = \|\underline{i}_a^u\| \quad (33)$$

Como pode ocorrer a presença de corrente no condutor de retorno, as componentes ativas balanceadas e desbalanceadas desta corrente podem ser quantificadas.

$$i_{Ln}^b = - \sum_{\mu=a}^m i_{a\mu}^b \quad (34)$$

$$i_{Ln}^u = - \sum_{\mu=a}^m i_{a\mu}^u \quad (35)$$

Por fim, temos a corrente reativa e suas componentes, determinadas pela corrente reativa balanceada  $i_r^b$  e corrente reativa desbalanceada  $i_r^u$ .

$$i_r^b = \frac{W_r}{\sqrt{2}} \cdot \hat{v} \quad (36)$$

$$i_r^u = i_r - i_r^b \quad (37)$$

Da mesma maneira que para a corrente ativa, os valores coletivos destas componentes podem ser obtidos através da norma euclidiana. Além disso, a presença de corrente reativa circulando pelo barramento de neutro permite o aparecimento das seguintes componentes reativas balanceadas e desbalanceadas.

$$i_{rn}^b = - \sum_{\mu=a}^m i_r^b \quad (38)$$

$$i_{rn}^u = - \sum_{\mu=a}^m i_r^u \quad (39)$$

Em suma, a corrente total é obtida pela soma de termos balanceados, desbalanceados e residuais.

$$i = i_a^b + i_r^b + i_a^u + i_r^u + i_a^s + i_r^s + i_g \quad (40)$$

Os termos acima são ortogonais, logo a corrente total eficaz é calculada em termos quadráticos.

$$I^2 = I_a^{b^2} + I_r^{b^2} + I_a^{u^2} + I_r^{u^2} + I_a^{s^2} + I_r^{s^2} + I_g^2 \quad (41)$$

Com base na análise das componentes de corrente presentes no sistema, pode-se realizar a obtenção da potência aparente  $A$  através da somatória quadrática de potência ativa  $P$ , potência reativa  $Q$ , potência de desbalanço  $U$  e potência residual  $D$ , conforme equações apresentadas na sequência.

$$P^2 = V^2 \cdot I_a^{b^2} \quad (42)$$

$$Q^2 = V^2 \cdot I_r^{b^2} \quad (43)$$

$$U^2 = V^2 \cdot (I_a^{u^2} + I_r^{u^2}) \quad (44)$$

$$D^2 = V^2 \cdot I_v^2 \quad (45)$$

$$A^2 = P^2 + Q^2 + U^2 + D^2 \quad (46)$$

### III. IMPLEMENTAÇÃO E VALIDAÇÃO DE CÁLCULOS PARA SISTEMAS TRIFÁSICOS DESEQUILIBRADOS

#### A. Implementação dos cálculos

Para a realização dos cálculos utilizou-se como *software* de simulação o *ATPDraw*. A partir deste, tendo como base a publicação [9], efetua-se a implementação de dois circuitos, sendo um equilibrado e o outro desequilibrado, como mostrado nas Figuras 1 e 2, respectivamente. Esta primeira análise tem

por intuito realizar o processo de validação dos equacionamentos inseridos no simulador.

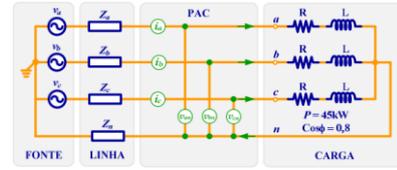


Figura 1 – Circuito balanceado [1]

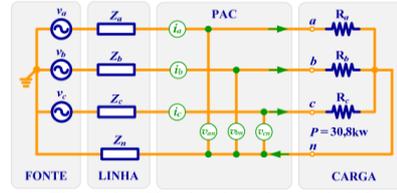


Figura 2 – Circuito desbalanceado [1]

Tanto para o circuito balanceado, quanto para o circuito desbalanceado foram utilizados como parâmetros para linha  $R_{Ln} = R_{La} = R_{Lb} = R_{Lc} = 0,018 \Omega$  e  $L_{Ln} = L_{La} = L_{Lb} = L_{Lc} = 0,0239$  mH. Em relação a carga, para o circuito balanceado considerou-se a partir de dados fornecidos  $R = 0,68817 \Omega$  e  $L = 1,369$  mH iguais para as três fases, e em relação ao desbalanceado, tem-se  $R_a = 1,62 \Omega$ ,  $R_b = 0,82 \Omega$  e  $R_c = 3,24 \Omega$ .

Foram considerados dois casos em relação as tensões de alimentação, sendo, no primeiro, utilizado uma fonte senoidal simétrica e, no segundo caso, assimétrica. Seus valores são mostrados na Tabela 1.

Tabela 1 – Tensões de suprimento.

Tensão [V]	Caso I	Caso II
$V_a$	$127 \angle 0^\circ$	$127 \angle 0^\circ$
$V_b$	$127 \angle -120^\circ$	$127 \angle -104,4^\circ$
$V_c$	$127 \angle 120^\circ$	$127 \angle 144^\circ$

O cálculo da potência instantânea ativa no sistema utiliza a função TACS (*Transient Analysis of Control System*) fornecida no *ATPDraw*, onde, através desta, efetuou-se a multiplicação da corrente instantânea pela tensão instantânea de cada fase, conforme Figura 3.



Figura 3 – Cálculo da potência instantânea

Em relação a potência instantânea reativa, o cálculo é feito utilizando tanto funções TACS quanto MODEL, pois através da função MODEL consegue-se obter o valor médio de tensão em um determinado período e pela TACS efetua-se os cálculos de multiplicação básicos, subtração e o valor da integral da tensão. Aplica-se como entrada as tensões e correntes instantâneas para cada fase e efetua-se a seguinte implementação mostrada na Figura 4.

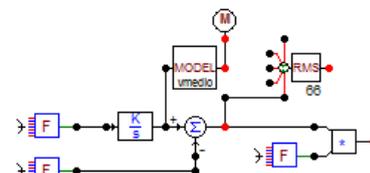


Figura 4 – Cálculo da energia reativa instantânea

Tendo valores de potência ativa instantânea e valores de energia reativa instantânea para cada fase, calculam-se os valores da potência ativa e energia reativa para cada fase através de seus valores médios, utilizando a função MODEL.

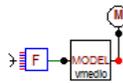


Figura 5 – Cálculo da energia reativa e potência ativa.

Como mostradas nas Equações (10) e (11), a potência ativa coletiva e a energia reativa coletiva são obtidas através do somatório de cada fase, como mostrado na Figura 6.

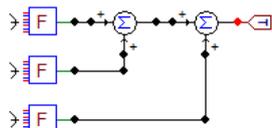


Figura 6 – Cálculo da energia reativa coletiva e potência ativa coletiva

Tendo os valores de potência e energia reativa para cada fase, torna-se possível calcular tanto a corrente ativa quanto a corrente reativa, como mostrado nas Equações (12) e (16), variando a implementação somente em relação aos parâmetros de entrada.

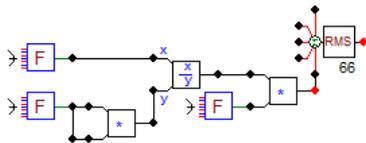


Figura 7 – Cálculo da corrente ativa e corrente reativa

Para um sistema com distorção harmônica, verifica-se a presença de uma corrente residual (nula), sendo esta obtida através da Equação (20). Seu desenvolvimento é mostrado na Figura 8.

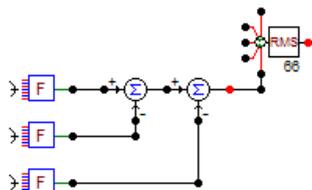


Figura 8 – Cálculo da corrente residual

Para encontrar os valores de corrente ativa balanceada e corrente reativa balanceada para cada fase, foram implementadas no simulador as Equações (30) e (36) de acordo com a Figura 10, modificando somente os valores de entrada obtidos anteriormente.

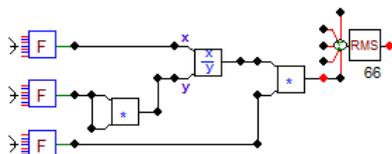


Figura 9 – Cálculo da corrente ativa balanceada e corrente reativa balanceada

Tendo os valores de corrente ativa, corrente ativa balanceada, corrente reativa e corrente reativa balanceada,

consegue-se pelas Equações (31) e (37) encontrar os valores de corrente ativa desbalanceada e corrente reativa desbalanceada.

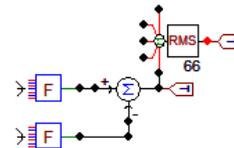


Figura 10 – Cálculo da corrente ativa desbalanceada e corrente reativa desbalanceada

Os valores de tensão eficaz coletiva ( $V$ ), integral imparcial da tensão eficaz coletiva ( $\tilde{V}$ ), corrente eficaz coletiva ( $I$ ), corrente ativa eficaz coletiva ( $I_a$ ), corrente reativa eficaz coletiva ( $I_r$ ), corrente residual eficaz coletiva ( $I_v$ ), corrente ativa eficaz balanceada coletiva ( $I_a^b$ ), corrente reativa eficaz balanceada coletiva ( $I_r^b$ ), corrente ativa eficaz desbalanceada coletiva ( $I_a^u$ ) e corrente reativa eficaz desbalanceada coletiva ( $I_r^u$ ) seguem o mesmo desenvolvimento no *software* pois seus valores de entrada são as tensões e correntes eficazes de cada fase, conforme as Equações (8) e (9). A partir disto e alterando as grandezas de entradas, utilizou-se o procedimento mostrado na Figura 9 para obtenção do parâmetro coletivo.

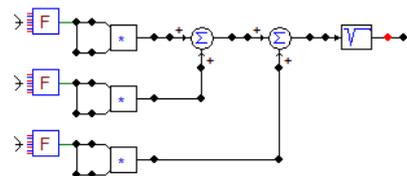


Figura 11 – Cálculo de valores eficazes coletivos

Para obter o valor da potência ativa  $P$ , potência reativa  $Q$  e potência residual  $D$ , foram implementadas as Equações (42), (43) e (45) no ATPDraw, como mostrado na Figura 12.

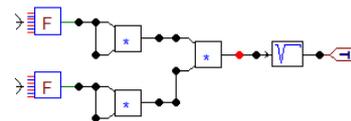


Figura 12 - Cálculo das potências ativa, reativa e residual

Em relação a potência de desbalanço  $U$ , tendo valores das correntes ativas e reativas desbalanceadas eficazes coletivas e o valor de tensão eficaz coletiva, aplicou-se em *software* a Equação (44), tendo como resultado a Figura 13.

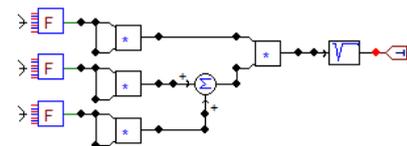


Figura 13 – Cálculo da potência de desbalanço

Por fim, buscou-se calcular a potência aparente  $A$  do sistema, sendo esta verificada na Equação (46). Tendo todos os valores  $P$ ,  $Q$ ,  $D$  e  $U$  quadráticos, aplicou-se uma somatória destes valores, sendo logo após efetuada a raiz quadrada desta soma para encontrar o valor, como ilustrado na Figura 14.

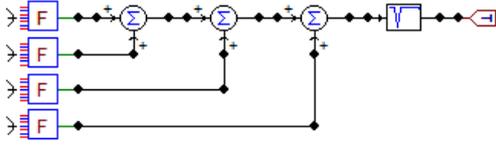


Figura 14 – Cálculo da potência aparente

### B. Validação das implementações matemáticas

Logo após feito o desenvolvimento matemático no software, como mostrado acima, buscou-se comparar os resultados obtidos pela implementação com os resultados fornecidos pela publicação [9]. Nas Tabelas 2 e 3, são mostrados os valores fornecidos e os obtidos em simulação no programa ATPDraw.

Tabela 2 – Dados fornecidos pela publicação [1].

	Sistema Balanceado		Sistema Desbalanceado	
	Caso I	Caso II	Caso I	Caso II
A[VA]	53981,805	56221,178	37796,466	35693,266
P[W]	43186,781	44978,366	33310,449	30924,145
Q[VA]	32387,301	33730,809	0,585	0,537
U[VA]	0,122	0,020	17860,203	17824,323
D[VA]	0,748	0,636	1,015	0,638
$W_r$ [J]	85,909	89,474	0,000	0,000

Tabela 3 – Resultados obtidos pela simulação.

	Sistema Balanceado		Sistema Desbalanceado	
	Caso I	Caso II	Caso I	Caso II
A[VA]	53747	56219	37631	35691
P[W]	42998	44976	33165	30922
Q[VA]	32247	33730	0,012	0,008
U[VA]	1,9011	1,848	17881	17823
D[VA]	4,2373	4,432	2,9754	2,822
$W_r$ [J]	85,538	89,473	0,000	0,000

Nota-se um resultado satisfatório, onde para o sistema desbalanceado no primeiro caso verifica um erro percentual de 0,1164% e para o segundo caso um erro percentual é de 0,0074 % em relação à potência de desbalanço  $U$ , sendo estes praticamente nulos. Para o sistema balanceado, verifica-se uma pequena diferença entre os resultados fornecidos pela publicação [9] em relação aos resultados obtidos pela simulação, sendo estes influenciados pelo passo integração considerado, o qual ficou limitado em função da quantidade de elementos TACS utilizados.

### IV. PROPOSTA COMPLEMENTAR DE QUANTIFICAÇÃO PARA ATRIBUIÇÃO DE RESPONSABILIDADES

Para a atribuição de responsabilidades devido ao desequilíbrio de tensão, necessita-se efetuar a separação das parcelas de desbalanço, em relação ao consumidor analisado que corresponde a  $U$ , a potência total de desbalanço  $U_t$  e ao restante do sistema  $U_s$ .

Como verificado acima, nas equações (30), (31), (36), (37) e (44), a potência caracterizada como potência de desbalanço  $U$  representa a potência atribuída ao desequilíbrio promovido pelo consumidor, pois retira de sua quantificação, por meio do cálculo da parte balanceada, a parcela relativa à assimetria existente nas tensões de suprimento.

Para a potência total de desbalanço e a potência de desbalanço restante do sistema torna-se necessário realizar inicialmente a definição das correntes ativa e reativa totalmente balanceadas. Assim, considerando que as fases possuem correntes ativas e reativas iguais em módulo e

defasadas de  $120^\circ$ , são calculadas as correntes ativas balanceadas totais  $i_a^{tb}$  e correntes reativas balanceadas totais  $i_r^{tb}$ , onde  $x$  representa a fase de menor corrente.

$$i_{ax}^{tb} = \frac{P_x}{V_x^2} \cdot v_x \quad (47)$$

$$i_{rx}^{tb} = \frac{W_x}{\hat{V}_x^2} \cdot \hat{v}_x \quad (48)$$

A partir destas, calcula-se os valores eficazes de corrente ativa total balanceada  $I_a^{tb}$  e corrente reativa total balanceada  $I_r^{tb}$ , mostrado nas equações (49) e (50).

$$I_a^{tb} = \left| \underline{i}_a^{tb} \right| = \sqrt{3 \cdot (I_{ax}^{tb})^2} \quad (49)$$

$$I_r^{tb} = \left| \underline{i}_r^{tb} \right| = \sqrt{3 \cdot (I_{rx}^{tb})^2} \quad (50)$$

Pelas equações 13 e 47 é possível obter o valor da corrente ativa desbalanceada total por fase  $i_a^{tu}$  e, pelas equações (17) e (48), quantifica-se o valor da corrente reativa desbalanceada total por fase  $i_r^{tu}$ .

$$\underline{i}_a^{tu} = \underline{i}_a - \underline{i}_a^{tb} \quad (51)$$

$$\underline{i}_r^{tu} = \underline{i}_r - \underline{i}_r^{tb} \quad (52)$$

Em relações aos valores das parcelas desbalanceadas ativas e reativas para o restante do sistema, a corrente ativa desbalanceada do restante do sistema por fase  $i_a^{us}$  e corrente reativa desbalanceada do restante do sistema por fase  $i_r^{us}$  são encontradas a partir das diferenças entre as correntes desbalanceadas totais e a causada pelo consumidor, como podem ser vistas nas equações (53) e (54).

$$\underline{i}_a^{us} = \underline{i}_a^{tu} - \underline{i}_a^u \quad (53)$$

$$\underline{i}_r^{us} = \underline{i}_r^{tu} - \underline{i}_r^u \quad (54)$$

Para melhor verificar o surgimento de cada corrente em relação aos seus cálculos propostos, a Figura 15 mostra um fluxograma demonstrando a separação da corrente em suas partes ativas, reativas, balanceadas e desbalanceadas.

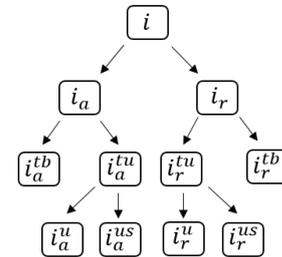


Figura 15 – Fluxograma em relação às correntes.

Assim, pode-se efetuar o cálculo dos valores eficazes da corrente ativa total desbalanceada  $I_a^{tu}$ , corrente reativa total desbalanceada  $I_r^{tu}$ , corrente ativa desbalanceada do restante do sistema  $I_a^{us}$  e corrente reativa desbalanceada do restante do sistema  $I_r^{us}$ .

$$I_a^{tu} = \left| \underline{i}_a^{tu} \right| = \sqrt{\sum_{x=a}^m I_{ax}^{tu^2}} \quad (55)$$

$$U_{at}^2 = V^2 \cdot I_a^{tu^2} \quad (59)$$

$$I_r^{tu} = \left| \underline{i}_r^{tu} \right| = \sqrt{\sum_{x=a}^m I_{rx}^{tu^2}} \quad (56)$$

$$U_{rt}^2 = V^2 \cdot I_r^{tu^2} \quad (60)$$

$$I_a^{us} = \left| \underline{i}_a^{us} \right| = \sqrt{\sum_{x=a}^m I_{ax}^{us^2}} \quad (57)$$

$$U_t = \sqrt{U_{at}^2 + U_{rt}^2} \quad (61)$$

$$I_r^{us} = \left| \underline{i}_r^{us} \right| = \sqrt{\sum_{x=a}^m I_{rx}^{us^2}} \quad (58)$$

Por fim, para cálculo da potência de desbalanço restante do sistema, tem-se as equações 62, 63 e 64.

$$U_{as}^2 = V^2 \cdot I_a^{us^2} \quad (62)$$

$$U_{rs}^2 = V^2 \cdot I_r^{us^2} \quad (63)$$

$$U_s = \sqrt{U_{as}^2 + U_{rs}^2} \quad (64)$$

Com isto, calcula-se o valor da potência de desbalanço total  $U_t$ , tendo esta uma influência tanto da parte ativa  $U_{at}$ , quanto reativa  $U_{rt}$ , como verificado abaixo.

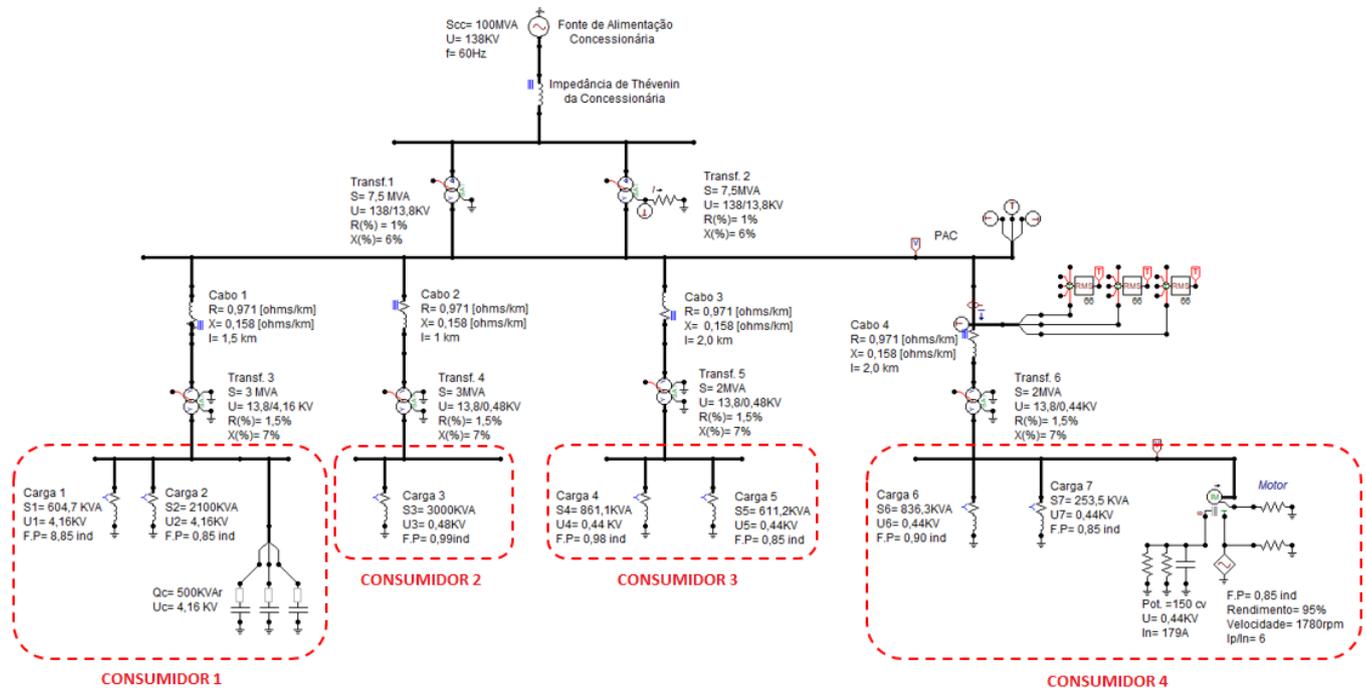


Figura 16 – Sistema de estudo

#### IV. DESCRIÇÃO DO SISTEMA E CASOS ESTUDADOS.

Neste trabalho, é utilizado um sistema elétrico de forma a agregar os principais componentes de uma rede industrial real, onde uma determinada instalação e suprida eletricamente por uma concessionária de distribuição de energia elétrica.

Na Figura 16, verifica-se o sistema utilizado no estudo, onde uma fonte de tensão trifásica em série com uma impedância representa uma concessionária. Logo após verifica-se dois transformadores em paralelo, representando uma subestação de distribuição de energia. Interligados a estes, têm-se quatro alimentadores de distribuição que suprem cargas lineares resistivas e indutivas representando quatro instalações comerciais e industriais, um banco de capacitores para suprir a compensação reativa e um motor de indução trifásico.

Todas as simulações no sistema foram feitas utilizando-se o software de simulação *Alternative Transients Program (ATP)*,

tendo como princípio os dados de validação mostrados no item III.

Foi considerado cinco condições de operação em nosso estudo, as quais são descritas abaixo:

- *Condição de operação I:* Sistema encontra-se totalmente equilibrado, com uma fonte de alimentação trifásica equilibrada e as cargas das instalações balanceadas entre as fases.

Tabela 4 – Dados condição I.

	Tensão [V]
$V_a$	79674.34∠30°
$V_b$	79674.34∠-90°
$V_c$	79674.34∠150°

- *Condição de operação II:* Aplica-se um nível de desequilíbrio de tensão de 1,91% na fonte de alimentação

(concessionária), como verificado na Tabela 5. Considera-se o restante do sistema totalmente equilibrado.

Tabela 5 – Dados condição II.

Tensão [V]	
$V_a$	$81210\angle -0.2527^\circ$
$V_b$	$78910\angle -121.2^\circ$
$V_c$	$78920\angle 120.7^\circ$

- *Condição de operação III:* Nesta condição a fonte de alimentação está equilibrada e o desequilíbrio é aplicado nas cargas 2 e 3. O desequilíbrio foi efetuado dividindo-se a potência de cada carga em percentuais diferentes para cada fase, conforme a Tabela 6.

Tabela 6 – Dados condição III.

	Carga 2	Carga 3
Potência Nominal (KVA)	2100	3000
Percentual da potência na fase A	9,53%	6,67%
Percentual da potência na fase B	33,33%	33,33%
Percentual da potência na fase C	57,14%	60,00%

A partir deste verifica-se duas cargas com impedâncias resistivas e indutivas mostrados na Tabela 7.

Tabela 7 – Cargas 2 e 3 para condição III.

	Carga 2		Carga 3	
	Resistência [ $\Omega$ ]	Indutância [ $\Omega$ ]	Resistência [ $\Omega$ ]	Indutância [ $\Omega$ ]
Fase A	24.50034	15.18395	0.37997	0.05414
Fase B	7.00534	4.34151	0.07604	0.01084
Fase C	4.08625	2.53243	0.04224	0.00602

- *Condição de operação IV:* Nesta operação, são considerados os desequilíbrios promovidos tanto na fonte de alimentação quanto nas cargas 2 e 3. Com isso utilizou-se das condições de operações II e III.

- *Condição de operação V:* Para este caso, tanto a fonte de alimentação quanto as cargas 2 e 3 estão equilibradas. Aplica-se um desequilíbrio nas cargas 6 e 7 referentes ao consumidor 4 do sistema. O desequilíbrio foi aplicado dividindo-se a potência de cada carga em percentuais diferentes para cada fase, conforme verificado na Tabela 8

Tabela 8 – Dados condição V.

	Carga 6	Carga 7
Potência Nominal (KVA)	836,3	253,5
Percentual da potência na fase A	6,67%	6,67%
Percentual da potência na fase B	33,33%	33,33%
Percentual da potência na fase C	57,14%	60,00%

A partir deste verifica-se duas cargas com impedâncias resistivas e indutivas mostrados na Tabela 9.

Tabela 9 – Cargas 6 e 7 para condição V.

	Resistência [ $\Omega$ ]	Indutância [ $\Omega$ ]	Resistência [ $\Omega$ ]	Indutância [ $\Omega$ ]
Fase A	1,0412	0,5042	3,2441	2,0105
Fase B	0,2083	0,1009	0,6492	0,4023
Fase C	0,1157	0,056	0,3606	0,2235

## VI. AVALIAÇÃO COMPUTACIONAL DOS CASOS ESTUDADOS

Em relação as condições propostas no item IV, neste trabalho efetua-se a análise para os consumidores 1 e 4, onde o consumidor 1 é composto pelas cargas 1 e 2, além do banco de capacitores, enquanto o consumidor 4 possui as cargas 6 e 7 e o motor de indução trifásico.

Para a primeira condição como citado acima, todo o sistema está balanceado, tanto cargas quanto fonte de alimentação; e tomando-se as equações implementadas em III, foram obtidos através da simulação os seguintes resultados. Inicialmente, são apresentadas as potências aparente, ativa, reativa e residual na Tabela 10.

Tabela 10 – Resultados gerais de potências para condição I.

	Consumidor 1	Consumidor 4
A [kVA]	2136,20	1101,40
P [kW]	1943,20	952,23
Q [kVA]	887,30	553,43
D [kVA]	6,82	1,43

Considerando o mesmo caso citado acima, em relação aos valores de potência de desbalanço, os resultados encontrados estão na Tabela 11.

Tabela 11 – Valores das potências de desbalanço para condição I.

	Consumidor 1	Consumidor 4
U [kVA]	0,08	0,04
$U_s$ [kVA]	4,93	2,52
$U_t$ [kVA]	4,93	2,51
$U + U_s$ [kVA]	5,01	2,56

Analisando-se a condição I, buscamos um resultado onde a potência de desbalanço dos consumidores 1 e 4 seja praticamente nula, pois não há nenhum desequilíbrio em relação a estas, com isto toda a potência de desbalanço será voltada para o restante do sistema. A partir destas considerações foram obtidos os seguintes resultados percentuais.

Tabela 12 – Valores percentuais das potências de desbalanço para condição I.

	Consumidor 1	Valor esperado consumidor 1	Consumidor 4	Valor esperado consumidor 4
U [%]	1,52	-	1,56	-
$U_s$ [%]	98,48	-	98,44	-
$U + U_s$ [%]	100	100	100	100

Nota-se que os valores obtidos de potências de desequilíbrio estão próximos ao esperado, onde verifica-se um baixo nível de desequilíbrio em relação aos consumidores, sendo de 1,52% para o consumidor 1, e 1,56% para o consumidor 4. Logo quase toda atribuição de responsabilidade devido ao desequilíbrio nesta condição foi voltada a concessionária geradora de energia que para o consumidor 1 teve valor percentual de 98,48% e para consumidor 4 um valor de 98,44%. Destaca-se ainda que a análise da atribuição de responsabilidades desta condição é apenas ilustrativa, pois o sistema está todo equilibrado, apresentando apenas imprecisões das grandezas entre as fases relativas aos cálculos do simulador.

Já na segunda condição, aplicando-se um nível de desequilíbrio de tensão na fonte representativa de uma

subestação da distribuidora de energia, foram obtidos os seguintes resultados.

Tabela 13 – Resultados gerais de potências para condição II.

	<i>Consumidor 1</i>	<i>Consumidor 4</i>
<b>A [kVA]</b>	2136,90	1101,9
<b>P [kW]</b>	1943,80	952,52
<b>Q [kVA]</b>	887,6	553,84
<b>D [kVA]</b>	6,67	1,44

Nesta condição, é esperado que toda a totalidade de atribuição de responsabilidade de desequilíbrio de tensão seja voltado para o restante do sistema, pois não houve alteração em relação as cargas. A partir destas considerações foram obtidos os seguintes valores.

Tabela 14 – Valores das potências de desbalanço para condição II.

	<i>Consumidor 1</i>	<i>Consumidor 4</i>
<b>U [kVA]</b>	0,28	11,82
<b><math>U_t</math> [kVA]</b>	57,51	38,24
<b><math>U_s</math> [kVA]</b>	57,50	35,03
<b><math>U + U_s</math> [kVA]</b>	57,77	46,84

Tabela 15 – Valores percentuais das potências de desbalanço para condição II.

	<i>Consumidor 1</i>	<i>Valor esperado consumidor 1</i>	<i>Consumidor 4</i>	<i>Valor esperado consumidor 4</i>
<b>U [%]</b>	0,48	0	25,22	0
<b><math>U_s</math> [%]</b>	99,52	100	74,78	100
<b><math>U + U_s</math> [%]</b>	100	100	100	100

Em relação ao consumidor 1 os valores obtidos são próximos aos esperados onde atribui-se 99,52% de reponsabilidade para a concessionária fornecedora, sendo somente 0,48% para o consumidor. Já em relação ao consumidor 4, é possível verificar uma grande parcela de contribuição da carga com valor 25,22%, podendo este ser causado pela presença do motor de indução, causando uma influência negativa ao método proposto. Este aspecto demonstra que a metodologia é afetada por componentes do sistema que apresentam desbalanço de corrente superior ao desequilíbrio de tensão aplicado.

Na terceira condição, tem-se as cargas 2 e 3 desbalanceadas e a fonte de alimentação equilibrada, obtendo os seguintes resultados. Ressalta-se que tais cargas pertencem aos consumidores 1 e 2, respectivamente.

Tabela 16 – Resultados gerais de potências para condição III.

	<i>Consumidor 1</i>	<i>Consumidor 4</i>
<b>A [kVA]</b>	2302,10	1100,80
<b>P [kW]</b>	1888,60	951,44
<b>Q [kVA]</b>	866,27	553,43
<b>D [kVA]</b>	7,07	1,48

Em relação a atribuição de responsabilidades, para o consumidor 1, busca-se obter uma potência de desequilíbrio tanto na carga quanto para o restante do sistema; e para o consumidor 4 somente valores em relação a potência de desequilíbrio do restante do sistema. A partir destas considerações foram obtidos os seguintes resultados nas simulações.

Tabela 17 – Valores das potências de desbalanço para condição III.

	<i>Consumidor 1</i>	<i>Consumidor 4</i>
<b>U [kVA]</b>	991,11	11,82
<b><math>U_t</math> [kVA]</b>	1554,20	63,24
<b><math>U_s</math> [kVA]</b>	1205,60	35,03
<b><math>U + U_s</math> [kVA]</b>	2196,71	46,84

Tabela 18 – Valores percentuais das potências de desbalanço para condição III.

	<i>Consumidor 1</i>	<i>Valor esperado consumidor 1</i>	<i>Consumidor 4</i>	<i>Valor esperado consumidor 4</i>
<b>U [%]</b>	45,12	-	25,22	0
<b><math>U_s</math> [%]</b>	54,88	-	74,78	100
<b><math>U + U_s</math> [%]</b>	100	100	100	100

Pela tabela 18, nota-se que para o consumidor 1 são atribuídas parcelas de responsabilidade pelo desequilíbrio de tensão tanto para a carga, quanto para o restante do sistema, conforme esperado, sendo ainda com um maior percentual (54,88%) para o restante do sistema, o que certamente pode estar vinculado a existência de um desbalanço de carga superior para a carga 3. Em relação ao consumidor 4, esperava-se um valor de  $U$  praticamente nulo, com isto observa-se novamente que houve uma interferência negativa do motor nos resultados.

Na quarta condição, foi aplicado tanto um nível de desequilíbrio nas cargas 2 e 3 quanto desequilíbrio na fonte de alimentação. Os resultados obtidos são mostrados na tabela 19.

Tabela 19 – Resultados gerais de potências para condição IV.

	<i>Consumidor 1</i>	<i>Consumidor 4</i>
<b>A [kVA]</b>	2282,60	1102,80
<b>P [kW]</b>	1872,70	952,53
<b>Q [kVA]</b>	853,82	554,96
<b>D [kVA]</b>	7,10	1,53

A partir das considerações realizadas, é importante mencionar que espera-se um resultado em que o consumidor 1 tenha uma potência de desequilíbrio tanto no consumidor quanto para o restante do sistema e, para o consumidor 4, possua algum valor somente em relação a  $U_s$ . Com isto foram obtidos os seguintes resultados mostrados na tabela 20 e 21.

Tabela 20 – Valores das potências de desbalanço para condição IV.

	<i>Consumidor 1</i>	<i>Consumidor 4</i>
<b>U [kVA]</b>	987,04	28,10
<b><math>U_t</math> [kVA]</b>	1524,80	98,46
<b><math>U_s</math> [kVA]</b>	1178,90	90,26
<b><math>U + U_s</math> [kVA]</b>	2165,94	118,36

Tabela 21 – Valores percentuais das potências de desbalanço para condição IV.

	<i>Consumidor 1</i>	<i>Valor esperado consumidor 1</i>	<i>Consumidor 4</i>	<i>Valor esperado consumidor 4</i>
<b>U [%]</b>	45,57	-	23,74	0
<b><math>U_s</math> [%]</b>	54,43	-	76,26	100
<b><math>U + U_s</math> [%]</b>	100	100	100	100

Em relação ao consumidor 1, nota-se valores de distribuição de reponsabilidades tanto para o consumidor quanto para o restante do sistema, sendo de maior valor percentual de atribuição (54,43%) para o restante do sistema. No consumidor 4, esperava-se obter um desequilíbrio de tensão da carga

praticamente nulo, com isto ainda se verifica, como nos casos anteriores a influência do motor de indução.

Por fim, na quinta condição, aplica-se um desequilíbrio nas cargas 6 e 7, mantendo-se as demais cargas e a fonte de alimentação equilibradas. Na tabela 22, podem ser verificados os resultados gerais das potências obtidas.

Tabela 22 – Resultados gerais de potências para condição V.

	Consumidor 1	Consumidor 4
A [kVA]	2136,20	1238,40
P [kW]	1943,20	935,28
Q [kVA]	887,29	555,09
D [kVA]	6,80	1,57

A partir da condição citada acima, busca-se um resultado onde para o consumidor 1 a potência de desequilíbrio da carga seja praticamente nula, e em relação ao consumidor 4 a potência de desequilíbrio esteja voltada unicamente ao consumidor. Levando em conta essas considerações, foram obtidos os resultados mostrados nas tabelas 23 e 24.

Tabela 23 – Valores das potências de desbalanço para condição V.

	Consumidor 1	Consumidor 4
U [kVA]	0,12	592,31
$U_t$ [kVA]	23,40	935,34
$U_s$ [kVA]	23,42	724,99
$U + U_s$ [kVA]	23,54	1317,30

Tabela 24 – Valores percentuais de potências de desbalanço para condição V.

	Consumidor 1	Valor esperado consumidor 1	Consumidor 4	Valor esperado consumidor 4
U [%]	0,50	0	44,96	100
$U_s$ [%]	99,50	100	55,04	0
$U + U_s$ [%]	100	100	100	100

Foi verificado que em relação ao consumidor 1 quase a totalidade da potência de desequilíbrio está voltada ao restante do sistema 99,50%, conforme esperado. No entanto, para o consumidor 4, observa-se um percentual de atribuição 44,96% para o consumidor e 55,04% para o restante do sistema, enquanto era esperado 100% para  $U$ , ou seja, para o consumidor. Este aspecto demonstra uma fragilidade do método de atribuição em estabelecer valores percentuais somente a um consumidor que provoca o desequilíbrio, quando for o caso. Esta foi a situação do consumidor 4 nesta condição de operação. Em futuras análises, tal observação possivelmente poderá ser tratada por meio da avaliação do ângulo de fase das correntes de desbalanço.

## VII. CONCLUSÃO

Este trabalho buscou analisar novas metodologias de aplicação de responsabilidades devido ao desequilíbrio de tensão, tendo como principal foco a Teoria da Potência Conservativa. Todo o levantamento de dados e resultados ocorreu através do *software* de simulação ATPDraw, onde verificou-se, em um primeiro momento, uma leve variação devido aos arredondamentos efetuados em seus cálculos do valor eficaz.

Efetuada a validação de dados, foi proposta uma quantificação complementar para TPC, onde foi estabelecida uma metodologia de separação de grandezas para atribuição de

responsabilidades para o consumidor analisado e o restante do sistema. Nota-se, quase em todas as condições, a interferência negativa do MIT no método baseado na TPC, pois este atribuiu injustamente ao consumidor, que possuía este equipamento, uma porcentagem elevada de desequilíbrio de tensão quando este não estava com cargas desbalanceadas.

Contudo, mesmo havendo uma dificuldade de atribuição de responsabilidades em consumidores com a presença de motores de indução, pode-se utilizar estes cálculos para a atribuição sem a presença do MIT, pois como verificado para o consumidor 1, os resultados foram pertinentes ao esperado.

Por fim, destaca-se que este trabalho permitiu a realização da implementação computacional da TPC para sistemas desequilibrados no ATPDraw, o qual foi usado para efetuar a análise do compartilhamento de responsabilidades devido ao desequilíbrio de tensão através da potência de desbalanço, promovendo a separação de percentuais para os consumidores do sistema elétrico.

Não obstante a relevância das conclusões apresentadas, ressalta-se que investigações adicionais serão úteis para o avanço desta pesquisa, como por exemplo: realizar análises dos fasores de corrente de desbalanço, visando a interpretação e a correção das deficiências apresentadas pelo método, como por exemplo, aplicar no sistema analisado um outro MIT com diferentes parâmetros de máquina, podendo assim ter uma maior ideia do quão este é influente em relação a separação de responsabilidades.

## VII. REFERÊNCIAS

- ARÃO, L. F. L. "Avaliação comparativa entre métodos para atribuição de responsabilidades devido ao desequilíbrio de tensão". 2014. 111 f. Dissertação (mestrado em engenharia elétrica) - Faculdade de Tecnologia, departamento de engenharia elétrica, Universidade de Brasília, Brasília - DF. 2014. Publicação: PPGEE.DM - 557/14.
- ARCADEPANI, M. B. "Aplicação da teoria da potência conservativa para atribuição de responsabilidade devido á distorção harmônica". Dissertação (graduação em engenharia elétrica) – Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Uberaba – MG. 2018.
- ANEEL PRODIST. (2017). Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST: Módulo 8, Revisão 10 – Qualidade da Energia Elétrica. Brasília.
- IEC/TR 61000-3-13. (2008). Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 3-13: Limits – Assessment of emission limits for the connection of unbalanced installations to MV, HV and EHV power systems.
- BOGILA, Alessandro. Teorias de Potência Conservativa e Instantânea: Análise Comparativa. 2014. 198 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2014.
- PINTO, P. H. I. S. "Avaliação de métodos para a atribuição da responsabilidade pelo desequilíbrio de tensão em sistemas elétricos com cargas motrizes". Dissertação (graduação em engenharia elétrica) – Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Uberaba – MG. 2017.
- MENDES, L. A. "Análise da atribuição de responsabilidade devido ao desequilíbrio de tensão mediante a inserção de geração distribuída". Dissertação (graduação em engenharia elétrica) – Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Uberaba – MG. 2018.
- GONÇALVES, A. L. S. "Contribuições ao processo de compartilhamento de responsabilidades devido ao desequilíbrio de tensão". Dissertação (graduação em engenharia elétrica) – Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Uberaba – MG. 2018.
- PAREDES, Helmo K. Morales. Teoria de Potência Conservativa: uma nova abordagem para o controle cooperativo de condicionadores de energia e considerações sobre atribuição de responsabilidades. Campinas: Faculdade de Engenharias Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas, 2011.
- PINTO, P. H. L. S., MENDONÇA, M. V. B., MOURA, F. A. M. "Avaliação de Método para Atribuição da Responsabilidade pelo Desequilíbrio de Tensão em Sistemas com Motores Elétricos", XII CBQEE - Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica, Curitiba, Paraná, Brasil, 2017.

- [11] FUCHS, E. F., MASOUM, M. A. S. Power Quality in power systems and electrical machines. California, Second Edition., Elsevier Inc, 2008.
- [12] IEEE 1159. (2009). IEEE 1159-2009: recommended practice for monitoring electric power quality. [S.l.].