

DESBALANCEAMENTO DE FASES E OS IMPACTOS NA DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA

Henrique Machado Fernandes¹, Karine Joice de Sousa Magalhães², Victor Muniz de Oliveira³, Wilke Freire Rodrigues⁴

(rich_machado@homail.com, karinejoice.kj@gmail.com, voliveira772@yahoo.com, wilkewellington@gmail.com)

Professora orientadora: Silvana Diniz

Coordenação de curso de Engenharia Elétrica

Resumo

Este trabalho analisa as configurações de carga em redes elétricas monofásicas, bifásicas e trifásicas, identificando as causas de desequilíbrio e seus impactos. O objetivo é analisar o desbalanceamento de cargas em uma rede de distribuição de energia, coletando dados sobre o somatório das cargas em cada ponto da rede. Através da organização desses dados em tabelas, identificaram-se os momentos em que a distribuição das cargas estava desbalanceada. Com base nessas informações, foram sugeridas estratégias para melhorar a distribuição de cargas e aumentar a eficiência do sistema elétrico. O uso do procedimento GRASP resulta em um perfil de cargas mais equilibrada, reduzindo custos adicionais e evitando danos em equipamentos industriais e residenciais. O trabalho contribui para a melhoria da qualidade e confiabilidade do serviço elétrico.

Palavras-chave: Carga elétrica. Redes elétricas. Desequilíbrio. Eficiência energética. GRASP.

1. INTRODUÇÃO

A eficiência e a segurança das redes elétricas dependem diretamente do equilíbrio das fases. Infelizmente, é comum encontrar desequilíbrios em muitas redes elétricas devido à conexão aleatória de cargas e à falta de equipamentos de proteção adequados, o que pode resultar em sobretensões, sobrecarga do neutro, disparos indevidos das proteções e custos adicionais. O equilíbrio das fases é um aspecto crucial em projetos elétricos, pois minimiza a diferença de corrente entre cada fase, prevenindo efeitos indesejados e danosos.

No setor industrial, um dos principais fatores que contribuem para o aumento das perdas é a alimentação desequilibrada, resultando em correntes excessivas circulando no motor, provocando elevação de temperatura e redução da vida útil (FERREIRA. ADRIAN, 2021). É importante destacar que o desequilíbrio de fases pode ser um problema crítico para as indústrias, pois pode resultar em perdas significativas de energia e aumento de custos de manutenção. Já nas instalações elétricas residenciais, além das desvantagens econômicas já citadas, haverá ineficiência energética e risco de incêndio (CREDER. H.,2016). Visando garantir o funcionamento adequado da instalação, a conservação dos bens e a segurança das pessoas e animais, a ABNT NBR 5410:2004 Versão Retificada: 2008 estabelecem procedimentos para a divisão de uma instalação elétrica em circuitos. Esses procedimentos incluem a definição da potência de cada circuito e o balanceamento de fases, que consiste em distribuir uniformemente as cargas para obter o maior equilíbrio possível.

Nesse contexto, pretende-se neste trabalho apresentar uma análise das configurações de carga em redes elétricas monofásicas, bifásicas e trifásicas, identificando as principais causas de desequilíbrio e demonstrando seus impactos. Também serão abordados os motivos pelos quais é importante realizar uma distribuição equilibrada de cargas entre as fases e as possíveis normativas para minimizar os efeitos negativos. Tem-se como objetivo específico:

(a) realizar um estudo comparativo entre diferentes abordagens do tema proposto; (b) estudar uma metodologia para identificar os benefícios do balanceamento de fases; (c) realizar uma revisão sistemática e crítica das metodologias utilizadas atualmente para minimizar os impactos do desbalanceamento de fases; (d) propor novas ideias para a criação de procedimentos normativos. Espera-se, com isso, contribuir para a melhoria da qualidade e da confiabilidade do serviço elétrico, além de reduzir custos adicionais.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Desenvolvimento e regulamentação do setor energético no Brasil

Em meio às décadas de 60 e 70, ainda durante o regime militar no Brasil, pode-se observar uma grande expansão no setor energético, apreciada tanto na oferta, com a criação de várias companhias de geração de energia, sendo essas estatais como a ELETROBRAS, COELBA, CEPISA, CEB, dentre outras, quanto na demanda, marcada pelo período da revolução industrial. Diante desse cenário sedutor, a observância quanto à qualidade no fornecimento de energia era pouco observada e/ou exigida, tanto pelo consumidor quanto pelo fornecedor, provocando situações de fortes racionamentos de energia elétrica. Vale ressaltar a ausência de agentes reguladores da qualidade dos serviços prestados e que esse processo foi implementado de forma tardia. Uma vez que a criação de uma normatização importante para o marco regulatório da qualidade dos serviços somente veio acontecer anos mais tarde, com a publicação das Portarias DNAEE nº 046 e 047/1978 e 031/1980 (que visavam à definição dos limites de variação das tensões, à conceituação de serviços adequados de energia elétrica e ao estabelecimento de método uniforme para apuração dos índices de continuidade de suprimento dos sistemas elétricos, respectivamente), diante de crescentes reclamações dos consumidores (TEODORO, 2005; JANNUZZI, 2007).

Anos mais tarde, já na era dos governos Itamar Franco e Fernando Henrique, ocorreu o advento das privatizações e foi criada a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) por meio da Lei nº 9.427/1996, com atuações voltadas a concessões, regulações, mediações e fiscalizações dos serviços relacionados ao setor energético e que substituiu o antigo Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica (DNAEE).

Naturalmente, as normas foram se alterando com o passar dos tempos e conceitos de estudos internacionais foram utilizados como forma de composição e fortalecimento das experiências e normatização nos processos, dentre elas: CIGRÉ, IEEE, IEC, ANSI (TEODORO, 2005).

2.2 Desequilíbrio entre fases

O conceito de desequilíbrio se define quando em um sistema trifásico, ambas ou uma das fases apresentam valores de tensão e/ou defasagem angular distinta entre si.

Um sistema de corrente alternada é composto por três ondas senoidais e defasadas por um ângulo de 120°, nessas condições se diz que o sistema está equilibrado ou também pode ser denominado como sistema trifásico simétrico (PINTO, 2018).

A expressão que define um sistema ideal pode ser visualizada nas equações 1, 2 e 3:

$$V_a = V_M \cos(\omega t) \quad (1)$$

$$V_b = V_M \cos(\omega t - 120^\circ) \quad (2)$$

$$V_c = V_M \cos(\omega t + 120^\circ) \quad (3)$$

Onde:

V_a, V_b e $V_c =$ Tensão de Fase

$V_M =$ Tensão de Pico

$\omega =$ Velocidade Angular

$t =$ Tempo

Já a forma fasorial representada em PU pode ser vista nas equações 4, 5 e 6:

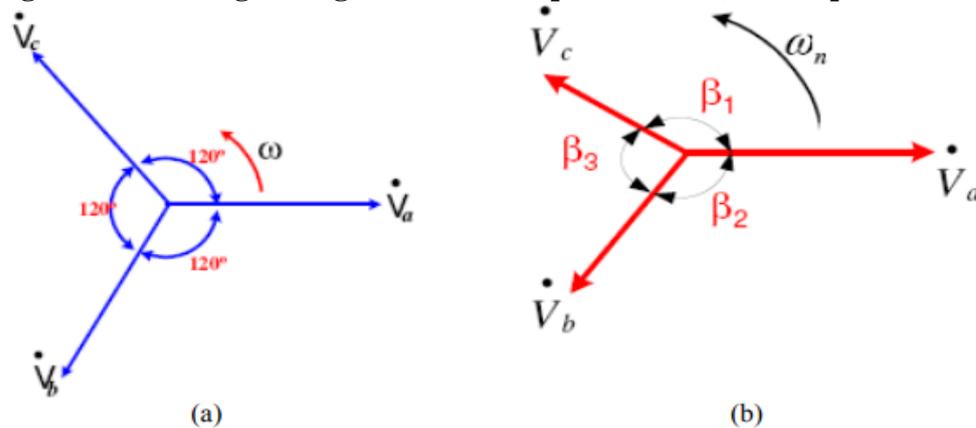
$$V_a = 1,0 \angle 0^\circ \quad (4)$$

$$V_b = 1,0 \angle -120^\circ \quad (5)$$

$$V_c = 1,0 \angle +120^\circ \quad (6)$$

Na Figura 1, pode-se ver na forma vetorial a representação de um sistema equilibrado em que a resultante das tensões é igual a zero e desequilibrado.

Figura 1 – Defasagem angular vetorial equilibrada (a) e desequilibrado (b).



Fonte: (REZENDE; SAMESIMA, 2012)

O grau de desequilíbrio é dado Equação 7:

$$\text{Fator de desequilíbrio} = \frac{\text{Componente de Sequência Negativa}}{\text{Componente de Sequência Positiva}} \quad (7)$$

Seu resultado está associado a uma relação entre a componente de sequência negativa e componente de sequência positiva, e pode ser utilizado tanto para tensões quanto para correntes.

2.3 Desequilíbrio entre fases

As causas do desequilíbrio no sistema elétrico podem ser encontradas desde a transmissão até a distribuição, sendo esta última a mais frequente. Na transmissão, a causa mais comum está associada à transposição irregular das fases, devido aos longos trechos percorridos, podendo provocar efeitos que geram transtornos no sistema (susceptância) (ROBBA, 2020), também provocados por efeitos naturais como descargas atmosféricas nas linhas de transmissão.

Já no sistema de distribuição, existem vários pontos a serem observados:

1. Distribuição não uniforme das cargas nas fases;
2. Mau contato de bornes e conectores nas redes de distribuição;
3. Impedâncias desiguais entre fases nos transformadores, devido às diferenças magnéticas oriundas de sua própria construção;
4. Excesso de transformadores monofásicos, sendo comum sua utilização por concessionárias que utilizam redes de distribuição primária a quatro fios e também em ambientes rurais, onde fica, por vezes, inviável a distribuição de redes trifásicas.

Os conceitos pontuados nos tópicos 1 e 2 em sua maioria estão associados a ligações irregulares que por vezes são realizadas por pessoas não habilitadas e/ou desprovidas de conhecimento técnico específico.

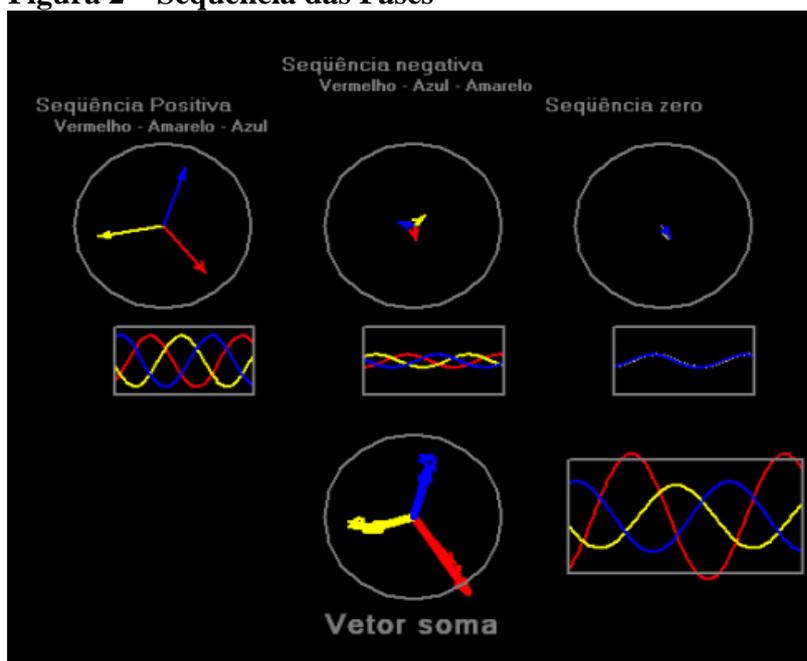
Por fim, anomalias também são encontradas no sistema, como falha de isolamento, abertura de condutores e faltas que, segundo Pinto (2018), podem provocar desequilíbrio no sistema de potência.

2.4 Consequência do Desbalanceamento no Sistema Elétrico

Para entender algumas consequências do desbalanceamento das fases, é importante compreender o conceito de sequência positiva e negativa das fases. "A ordem pela qual as tensões das fases geradas passam pelo seu valor de pico define a chamada sequência de fase do sistema" (ROBBA, 2020, pág. 18).

No caso de máquinas rotativas, quando estão girando no sentido correto, é chamado de sequência positiva. Invertendo a ordem das fases, percebe-se que o sentido de rotação é invertido, nesse caso, o conjunto é denominado sequência negativa. Quando não há nenhum ângulo de diferença entre fases, é denominada sequência zero (FIGUEIREDO, 2009) pode ser observado na Figura 2.

Figura 2 – Sequência das Fases



Fonte: (FIGUEIREDO, 2009)

Os principais afetados pelo desbalanceamento estão presentes no setor industrial, onde se encontram grandes quantidades de equipamentos de potência, sendo os motores elétricos os

mais sensíveis às componentes de sequência negativa, por serem máquinas rotativas. Entre as consequências do desbalanceamento estão:

1. *Sobreaquecimento*: As tensões desequilibradas nos terminais de motores trifásicos e transformadores podem gerar impedâncias que provocam deslocamentos do campo girante e aumento nas correntes de magnetização e nas perdas no núcleo, respectivamente. Esses fenômenos podem contribuir para o aquecimento excessivo desses equipamentos.

2. *Desempenho e operação*: Nos geradores modernos, é fundamental ter em mente que eles possuem uma tolerância limitada em relação aos níveis de corrente de sequência negativa. Sendo assim, os níveis excessivos de desequilíbrio alteram seriamente o desempenho e a operação desses equipamentos, colocando em risco a sua integridade e vida útil.

3. *Aumento de custo*: A redução da eficiência energética ocasionada pelo desbalanceamento pode levar a um aumento no consumo de energia elétrica, o que resulta em um acréscimo nos custos. Além disso, o desbalanceamento pode acelerar o desgaste de peças mecânicas e elétricas, aumentando a necessidade de manutenções corretivas, que podem ser mais frequentes e onerosas, elevando ainda mais os custos de manutenção.

Já no setor residencial, a norma ABNT NBR 5410: Instalações Elétricas de Baixa Tensão estabelece critérios para instalações elétricas de baixa tensão, aplicáveis a circuitos alimentados com tensão nominal igual ou inferior a 1000 V em corrente alternada. O objetivo é garantir a segurança de pessoas e animais contra choques elétricos, incêndios e efeitos térmicos. O Livro de Instruções Gerais de Baixa Tensão – LIG BT da AES Eletropaulo, define três modalidades de fornecimento de energia elétrica em tensão secundária de distribuição para atendimento de entradas de energia elétrica individuais e coletivas com carga instalada total por unidade consumidora de até 75kW, em corrente alternada de 60Hz. O Quadro 01 mostra as três modalidades de fornecimento de energia elétrica em tensão secundária de distribuição conforme pelo Livro de Instruções Gerais de Baixa Tensão - LIG BT:

Quadro 1 – Modalidades de fornecimento de energia

Tipo	Qtd. Fios	Condutores
A	2	1 Fase + Neutro
B	3	2 Fases + Neutro
C	4	3 Fases + Neutro

Fonte: (ENEL, 2014)

A norma técnica ABNT NBR 5410 estabelece que para realizar a previsão de carga em uma instalação elétrica residencial, deve-se considerar a potência nominal do equipamento indicada pelo fabricante ou calculada a partir da tensão nominal, corrente nominal e fator de potência. É importante ressaltar que, em instalações com duas ou três fases, é necessário distribuir as cargas de forma equilibrada.

Em relação ao desequilíbrio de cargas, é possível identificar três desvantagens econômicas e/ou riscos em uma instalação elétrica residencial com cargas desbalanceadas, a saber:

1. *Sobrecarga de fase*: Quando há uma carga na fase A e metade dessa carga na fase B, haverá uma carga desequilibrada entre as fases. Essa sobrecarga resulta em uma corrente maior na fase B, de acordo com a lei de Ohm.

$$i_A = \frac{V}{R_A} \quad (8)$$

$$i_B = \frac{V}{\left(\frac{R_A}{2}\right)} \quad (9)$$

2. *Perda de energia e ineficiência energética:* Quando ocorre o desequilíbrio de fases em uma instalação elétrica, há uma consequente ineficiência energética e perda de energia devido à geração de calor provocada pela corrente elétrica que passa pelo circuito. Esse calor é gerado devido ao aumento da energia cinética dos elétrons livres, o que resulta em uma elevação da temperatura. Quando uma corrente elétrica flui através de um circuito que apresenta forte resistência à sua passagem, parte da energia elétrica é convertida em energia térmica e dissipada no ambiente, resultando em uma perda do potencial elétrico e em um desperdício de energia.

$$Q = R * i^2 * t \quad [J] \quad (10)$$

$$\frac{Q}{t} = P = R * i^2 \quad [W] \quad (11)$$

Quando uma quantidade maior de equipamentos está conectada a uma mesma fase, a carga equivalente total (R) no circuito é reduzida, o que leva a um aumento da corrente total. Em outras palavras, em uma fase sobrecarregada, a corrente (I) aumenta linearmente à medida que a resistência total (R) diminui. Nesse contexto, a potência elétrica (P) e o calor (Q) gerado também aumentam proporcionalmente ao aumento da corrente (NASCIMENTO, 2016). Igualando essa equação à lei de Joule, obtém-se uma relação com a potência elétrica.

$$\Delta T = \frac{Q}{m.c} \rightarrow \Delta T = \frac{R * i^2 * t}{m.c} \quad [^{\circ}C] \quad (12)$$

Onde:

$Q = \text{calor}$

$\Delta T = \text{variação de temperatura}$

$m = \text{massa do corpo (cobre)}$

$c = \text{calor específico do corpo} \left(\text{para cobre } \frac{0,092}{g} \text{ } ^{\circ}C \text{ ou } 09.10^2 \frac{j}{k.g.K} \right)$

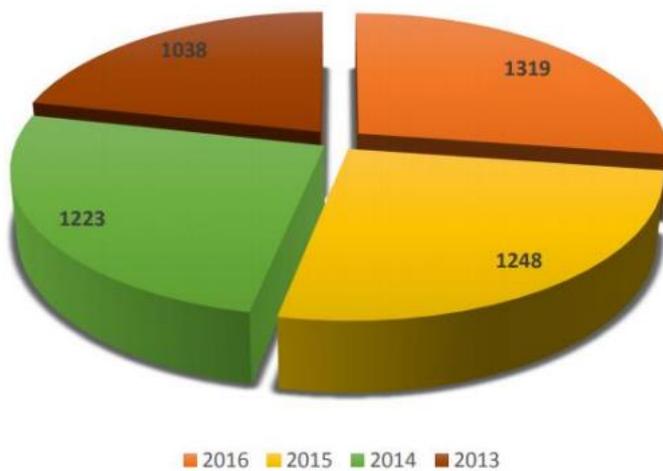
3. *Risco de incêndio:* Quando há uma sobrecarga em um circuito elétrico, ocorre um aumento da corrente elétrica que percorre os condutores, conforme explicado anteriormente. Esse aumento de corrente gera calor, que é dissipado pelo condutor (que, nessas condições, passa para o estado de subdimensionamento). Se o calor gerado for muito grande e o condutor não conseguir dissipá-lo, há um risco iminente de incêndio e que neste caso esta relacionado à sobrecarga de alguma fase.

De acordo com o Triângulo do Fogo, a sobrecorrente em um condutor e consequentemente a alta temperatura são fatores que podem contribuir para o início de um incêndio.

Pode ser visto no Gráfico 1 que o número de acidentes vem aumentando no decorrer dos anos.

Gráfico 1 – Acidentes de Origem Elétrica

2013-2016



Fonte: (PAIVA, 2019)

Segundo dados levantados pela ABRACOPEL apresenta que o principal causador de incêndios em ambientes comerciais e residenciais estão relacionados às deficiências e/ou pane no sistema elétrico. Apresenta também que em 2015 ocorreram 590 acidentes fatais e que 162 mortes aconteceram em ambientes residenciais, todos relacionados à eletricidade.

2.5 Limites dos desequilíbrios

Os limites permitidos de variação de tensão entre as fases são definidos por diversas normas nacionais e internacionais (PAULILLO, 1996). Esses valores são indicadores relevantes para determinar a necessidade de adoção de medidas de mitigação a fim de cumprir com as normas vigentes. Os limites citados estão relacionados ao cálculo do fator de desequilíbrio (K ou FDV) e o mesmo é definido pela relação entre os módulos de tensão de sequência positiva e negativa. A Tabela 2, a seguir, apresenta os limites permissíveis para desequilíbrios de tensão e suas expressões.

Tabela 2 – Limites permitidos de variação de tensão entre fases

Norma	Limite	Expressões
NEMA MG1 14-34 (1)	2%	$K\% = \frac{\Delta V}{V_m} \times 100$
ANSI C.84.1-1989 (2)	3%	$FDV\% = \frac{DV_{Max}}{V_{Med}} \times 100$
IEEE Orange Book – 446/1995 (3)	2,5%	$K\% = \frac{3(V_{Max}-V_{Min})}{V_A + V_B + V_C} \times 100$
CIGRÉ	-	$K\% = \frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}$ sendo $\beta = \frac{V_{ab}^4 + V_{bc}^4 + V_{ca}^4}{(V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2)^2}$

Fonte: (PAULILLO, 1996)

Com base em estudos comparativos de diferentes normas e métodos de avaliação dos fatores de desequilíbrio de tensão, o Operador Nacional do Sistema (ONS) e a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) definiram limites a serem praticados nos pontos de suprimento de energia elétrica. Recomenda-se o uso da fórmula alternativa proposta pelo método CIGRÉ para determinar o nível de desequilíbrio, com o limite máximo determinado em 2%, sendo resultado de um compromisso entre fornecedores de energia e fabricantes de equipamentos (TEODORO, 2005).

Analisando o Procedimento de Distribuição de Energia no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST – Módulo 8), tem se estabelecido limites variáveis de acordo com o nível de tensão, isso pode ser visto na Tabela 3 a seguir.

Tabela 3 – Limites para Tensão Nominal inferior a 2,3 kV (220/127)

Tensão de Atendimento	Faixa de Variação da Tensão de Leitura (Volts)
Adequada	$(202 \leq TL \leq 231)/(117 \leq TL \leq 133)$
Precária	$(191 \leq TL < 202 \text{ ou } 231 < TL \leq 233)/$ $(110 \leq TL < 117 \text{ ou } 133 < TL \leq 135)$
Crítica	$(TL < 191 \text{ ou } TL > 233)/(TL < 110 \text{ ou } TL > 135)$

Fonte: (PRODIST, 2021)

Valores relacionados à tensão de fase e de acordo com o módulo que rege a qualidade do fornecimento da energia elétrica o fator de desequilíbrio pode sofrer alteração de acordo com a tensão fornecida pelo distribuidor.

2.6 Fluxo de potência

As equações 13 e 14 a seguir apresentam o cálculo de fluxo de potência baseado no método de ordenação Jacobiano (KAGAN, OLIVEIRA, ROBBA, 2005):

$$P_T = \sum_{(k,m) \in \Omega} R_{km} I_{km}^2 \quad (13)$$

$$Q_T = \sum_{(k,m) \in \Omega} X_{km} I_{km}^2 \quad (14)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N \\ M & L \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta \delta / \Delta V \end{bmatrix} \quad (15)$$

Onde:

P_T = Potência ativa total do sistema;

Q_T = Potência reativa total do sistema;

R_{km} = Resistência do ramal entre K e M;

X_{km} = Reatância do ramal entre K e M;

I_{km} = Corrente do ramal entre K e M;

ΔP = Variação da demanda de Potência ativa nos pontos;

ΔQ = Variação da demanda de Potência reativa nos pontos;

H, N, M, L : Equações da matriz Jacobiana;

$\Delta \delta$ = Variação do ângulo das tensões;

ΔV = Variação da tensão nos pontos.

2.7 Considerações sobre os estudos do referencial

Um sistema de distribuição de cargas funcionando assimetricamente, pode provocar distúrbios imediatos em equipamentos elétricos, mediante a isso, refletindo nos custos operacionais e prejuízos financeiros.

Tanto as concessionárias distribuidoras quanto os clientes finais são obrigados a cumprir os limites estabelecidos pelos agentes reguladores para garantir a qualidade dos serviços no sistema de energia elétrica. Em casos de desequilíbrio de fases que ultrapassem esses limites, ambas as partes podem ser sujeitas a sanções. Essas medidas são necessárias para assegurar a estabilidade e a confiabilidade do sistema elétrico, além de garantir que todos os usuários recebam energia elétrica de qualidade (ANEEL, 2021).

Em suma, a análise do desequilíbrio de fases é uma prática relevante e essencial para a efetivação de um sistema elétrico seguro e confiável, além de ser de extrema importância para garantir a qualidade e a eficiência do fornecimento de energia elétrica.

3. METODOLOGIA

3.1 Tipo de pesquisa

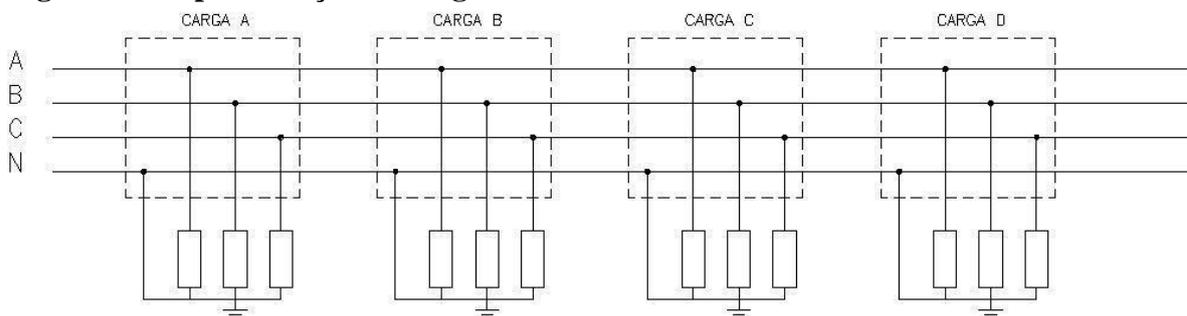
Este trabalho tem como objetivo realizar uma pesquisa básica, de abordagem quantitativa e como foco realizar uma revisão literária, explorando seus fundamentos teóricos, princípios de funcionamento e aplicações práticas.

Este trabalho consiste em uma pesquisa descritiva através de levantamento de dados e estudos bibliográficos, com o objetivo de identificar e analisar os autores e a metodologia utilizada. Serão identificadas as principais contribuições, bem como as referências utilizadas para desenvolver e embasar a ferramenta, bem como as referências utilizadas para desenvolver e embasar o método.

3.2 Universo e amostra

Para realizar a análise, foi levado em consideração duas tabelas de acordo com a monografia “Balanceamento de Fases em Redes Elétricas Utilizando Procedimento Adaptativo de Busca Aleatório e Guloso (GRASP)” (CRUZ, 2019). A seguir pode ser visto na Figura 3 um sistema e suas cargas representadas.

Figura 3 – Representação de cargas



Fonte: Adaptada pelos autores

A Tabela 4 a seguir está relacionada à Figura 3 e mostra os valores de cargas e as potências ativas (P) e reativas (Q) conectadas de forma aleatória.

Tabela 4 – Cargas desbalanceadas

FASE	CARGA A		CARGA B		CARGA C		CARGA D	
	P	Q	P	Q	P	Q	P	Q
A	262.3KW	86.3KVar	326.4KW	107.3KVar	0KW	0KVar	113.9KW	37.4KVar
B	142.4KW	46.8KVar	441KW	144.9KVar	236.8KW	77.8KVar	0KW	0KVar
C	120.1KW	39.5KVar	331.3KW	108.9KVar	216KW	71KVar	0KW	0KVar

Fonte: Adaptada pelos autores

Da mesma maneira, a Tabela 5 a seguir, apresenta os valores das cargas dispostas de forma mais equilibrada entre as fases.

Tabela 5 – Cargas balanceadas

FASE	CARGA A		CARGA B		CARGA C		CARGA D	
	P	Q	P	Q	P	Q	P	Q
A	120.1KW	39.5KVar	326.4KW	107.3KVar	0KW	0KVar	113.9KW	37.4KVar
B	262.5KW	86.3KVar	441KW	144.9KVar	236,8KW	77,8KVar	0KW	0KVar
C	142.4KW	46.8KVar	331.3KW	108.9KVar	216KW	71KVar	0KW	0KVar

Fonte: Adaptada pelos autores

Em relação às potências totais mostradas na Tabela 4 tem se uma relativa distribuição das cargas, ficando na Tabela 5: $P_a = 702,6kW$, $P_b = 820,2kW$ e $P_c = 667,4kW$. Além disso, os valores de reativos também são diferentes entre as figuras.

Na Tabela 6 pode ser visto o comparativo do fator de desequilíbrio relacionado a duas situações apresentadas.

Tabela 6 – Fator K antes e depois da aplicação do método GRASP

Barra	Va Vb Vc (p.u.) (Tabela 4)	Fator de Desequilíbrio (%) (Tabela 5)	Va Vb Vc (p.u.) (Tabela 4)	Fator de Desequilíbrio (%) (Tabela 5)
1	0,9795 0,9842 0,9929	0.7930	0,9848 0,9871 0,9824	0.2768
2	0,9770 0,9850 0,9894	0.7341	0,9831 0,9841 0,9823	0.1011
3	0,9759 0,9847 0,9883	0.7450	0,9826 0,9830 0,9813	0.1073
4	0,9756 0,9845 0,9884	0.7705	0,9823 0,9828 0,9814	0.0795

Fonte: Adaptada pelos autores

Em resumo, a distribuição das cargas de forma mais balanceada entre as fases na Tabela 5 resulta em uma rede mais equilibrada em termos de potência e reativos, refletindo em um menor fator de desequilíbrio em relação à Tabela 4.

O Fator de Desequilíbrio (FD) foi realizado com base no método CIGRÉ apresentado na Tabela 2.

3.3 Coleta de dados

A coleta de dados para esta pesquisa foi realizada por meio de uma abordagem bibliográfica. Os termos de busca utilizados foram "GRASP", "Greedy Randomized Adaptive Search Procedure" e "meta-heurística". Foram examinadas as referências bibliográficas dos artigos selecionados para identificar outras publicações relevantes que pudessem contribuir para a pesquisa.

A partir dos artigos selecionados, foram extraídas informações relevantes relacionadas aos fundamentos teóricos do método. Essas informações foram organizadas e analisadas para compreender melhor sua eficiência.

Em casos reais esses dados seriam coletados a partir de controladores interligados a Transformadores de Corrente (TC's) e Transformadores de Potência (TP's) dispostos em locais estratégicos nas subestações, redes de distribuição e/ou unidades consumidoras e essas informações são utilizadas para formarem um banco de dados. As figuras 4 e 5 a seguir demonstram modelos de dispositivos.

Figura 4 – Linha BPS Brasformer



Linha BPS



Linha BPS - E

Fonte: Retiradas do site do fabricante

Figura 5 – Linha BCS Brasformer



Modelo BCS (Uso interno)
Corrente primária de 1 até 4.000 A



Modelo BCS (Uso externo)
Corrente primária de 1 até 4.000 A

Fonte: Retiradas do site do fabricante

É importante ressaltar que a coleta de dados foi realizada exclusivamente com base em informações disponíveis na literatura acadêmica e científica. Não foram realizados experimentos empíricos ou coleta de dados primários para esta pesquisa.

3.4 Método e análise

Nesta etapa, será apresentada a metodologia adotada para realizar a pesquisa proposta. Serão descritas as etapas necessárias para alcançar os objetivos do estudo, incluindo a definição das instâncias de problemas, a implementação dos algoritmos selecionados e a definição das métricas de desempenho. Isso incluirá a descrição passo a passo da aplicação dos métodos em cada instância de problema, os parâmetros utilizados, e quaisquer considerações relevantes. O método utilizado para tratar os dados foi o “Meta-heurística GRASP” (Greedy Randomized Adaptive Search Procedure) e comparações. O objetivo é analisar e comprovar a eficiência do mesmo. Também será relatado o ambiente de execução, incluindo a plataforma computacional e outras especificidades da implementação.

A Meta-heurística GRASP é um algoritmo heurístico guloso com uma componente aleatória e adaptativa. Desenvolvido em 1989 por Thomas A. Feo e Maurício G. C. Rezende, é usado para resolver problemas complexos, fornecendo várias soluções. A aleatoriedade do

GRASP ajuda a encontrar muitas soluções factíveis e de boa qualidade. A Figura 6 apresenta o Algoritmo genérico e a Figura 7 mostra o fluxo do processo.

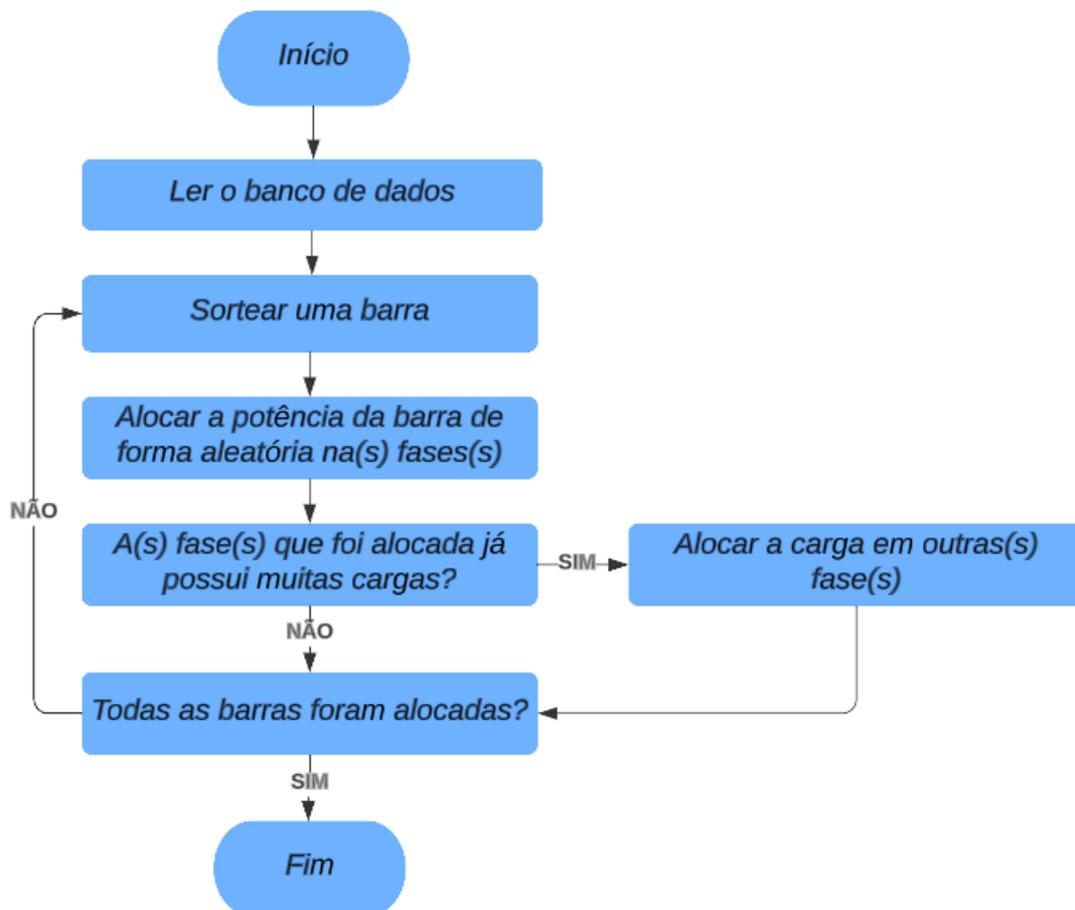
Figura 6 – Algoritmo GRASP

```
Melhor_solução = M, função de avaliação: f.  
Repita  
  X = solução_grasp (criar uma solução aleatória por inserção gulosa de elementos)  
  X = busca_local(X) (aplicar uma busca de vizinhança para melhorar a solução X:  
    trocas de arcos)  
  Se  $f(X) < \text{Melhor\_solução}$ , então  
    Melhor_solução = X (aceita a melhor solução)  
  Fim  
Enquanto o critério de parada não for satisfeito
```

Fonte: (SIQUEIRA, 2021)

A estratégia do GRASP envolve escolher um critério de avaliação para um conjunto de elementos, visando encontrar uma solução que atenda a todas as restrições do problema de otimização. Em cada iteração, os elementos são avaliados por uma função gulosa, que mede o benefício da inserção do elemento na solução final (OLIVEIRA, 2011).

Figura 7 – Fluxograma GRASP



Fonte: Adaptada pelos autores

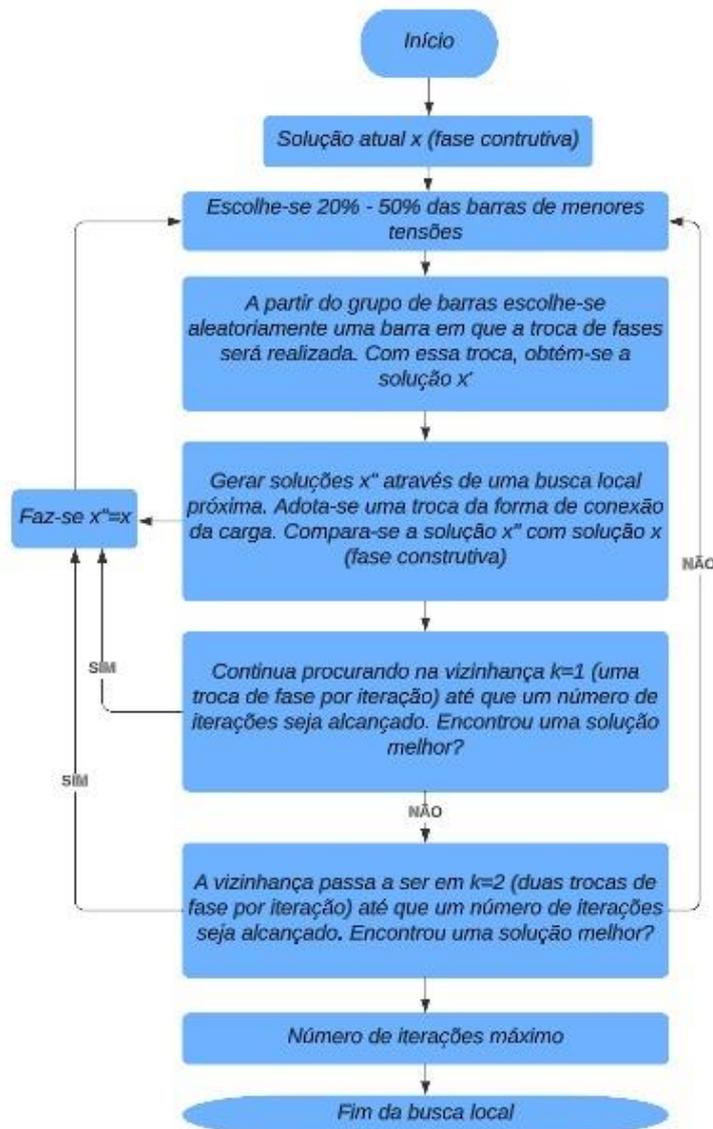
Busca-se a obtenção da melhor solução para o problema proposto, seguindo os passos estabelecidos pelo GRASP (ROMERO; LAVORATO, 2012). Esses passos foram definidos com o objetivo de alcançar uma solução ótima por meio da combinação de estratégias adaptativas e aleatórias. Para melhorar os resultados, podem ser utilizados métodos adicionais como, por exemplo: Variable Neighborhood Search (VNS) (Utilizado nesta seção) e Particle Swarm Optimization (PSO). A figura 8 mostra o algoritmo para a fase melhoramento VNS.

Figura 8 – Algoritmo VNS

```
x0 = Solução_Inicial
x = busca_local(x0) aplica uma melhoria na solução inicial
Repita
    x' = vizinho(x) encontra uma nova solução, vizinha de x através de 1 troca de
    arcos
    x'' = busca_local(x') aplica uma melhoria na solução x'
    Se f(x'') < f(x), então
        x = x'' (aceita a melhor solução)
    Caso contrário, se f(x') < f(x), então
        x = x' (aceita a melhor solução)
Fim
Enquanto o critério de parada não for satisfeito
```

Fonte: (SIQUEIRA, 2021)

Figura 9 – Fluxograma VNS



Fonte: Adaptada pelos autores

Abaixo serão apresentadas as etapas de construção e busca local do algoritmo para aplicação do método GRASP e melhoramento VNS.

3.4.1 Etapa de construção GRASP

Passo 1. Escolha da Solução inicial (vazia ou não).

Nesse caso, vazia, pois é construída através de informações coletadas do banco de dados.

Passo 2. Avaliação dos elementos que farão parte do conjunto solução.

A partir do banco de dados, realizar escolha dos elementos, como, potência e tipo (monofásico, bifásico ou trifásico).

Passo 3. Construir lista/tabela com as variáveis mais atraentes.

Utiliza-se o critério de sensibilidade para adequação das cargas, de forma que a rede fique mais equilibrada.

Passo 4. Escolha aleatória de uma variável da lista.

Aleatoriamente, é feita a escolha de uma barra do banco de dados e aloca-se ao processo, seguindo o mesmo critério.

Passo 5. Verifica o conjunto solução.

Encerra se o processo quando todas as cargas estiverem alocadas.

3.4.2 Etapa de busca local VNS

Passo 1. Leitura dos dados da fase construtiva.

Inicia se a solução x atual com os dados da fase de construção GRASP.

Passo 2. Procurar outra solução dentro da vizinhança.

Realizar uma escolha de 20-50 % das barras de menor tensão. A partir daí, realiza-se a escolha aleatória de uma barra em que deverá ser realizada realocação de fases e obtém então, a solução x' do VNS.

Passo 3. Se a solução encontrada for melhor, faz se a substituição na fase.

Nesse passo, o intuito é gerar uma nova solução x'' através da busca local. Para tanto altera a forma de conexão de uma carga na vizinhança $K = 1$. Obtém se o calculo das potencias e a solução gerada deve ser comparada com a solução x , se $FD(x'') < FD(x)$, se obteve uma melhor solução e x'' passa a ser x . Caso contrário, a busca continua de acordo com o número de pré-estabelecido de interações. Se não obtiver melhora na solução em $K = 1$, passa para $K = 2$, onde deve ser alterada a forma de conexão de duas cargas por vez e o passo se repete. $K_{máx}$ deve ser estabelecido.

Passo 4. Se não for encontrada outra solução melhor, encerra se a fase.

Encerra-se a fase de busca local com a melhor solução encontrada para K .

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

No contexto de um projeto de pesquisa, este estudo teve como objetivo analisar o desbalanceamento de cargas em uma rede de distribuição de energia. Para isso, as características deste sistema foram especificadas levando em consideração critérios disponibilizados na monografia “Balanceamento de Fases em redes elétricas utilizando Procedimento Adaptativo de Busca Aleatório e Guloso (GRASP)” (CRUZ, 2019). Os dados apresentados estão relacionados a uma rede de baixa tensão de 29 barras. A implementação computacional foi realizada via MATLAB, conforme fonte de pesquisa.

No Quadro 2 abaixo são apresentadas informações importantes inerentes ao método utilizado.

Quadro 2 – Parâmetros GRASP e VNS

GRASP	
Quantidade de soluções	10
Critério de construção	Aleatória - Fase que apresenta menor carga total
VNS	
Máximo de estrutura k	2
Critério para gerar soluções (x') na N_k	Fazer 1 troca considerando 20-50% das barras de menores tensões;
Critério para gerar soluções (x'') próximas a x' em k=1	Fazer 1 troca de conexão de uma escolhida aleatoriamente;
Critério para gerar soluções (x''') próximas a x' em k=2	Fazer 2 trocas de conexão de cargas escolhidas aleatoriamente;
Número máximo de visitas em N_k	Para k=1 gerou 15 visitas e para k=2 gerou 10.

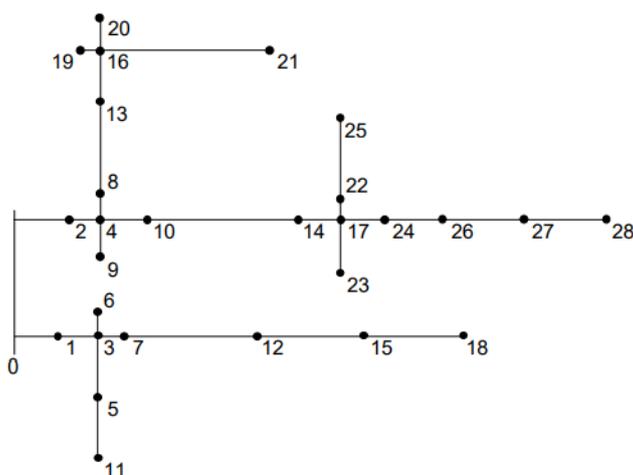
Fonte: Adaptado pelos autores

Através deste quadro podemos analisar a utilização dos critérios que serão utilizados para chegar a um menor fator de desequilíbrio, devido à quantidade de trocas de conexões que são realizadas.

4.1 Rede 29 barras

A Figura 10 ilustra uma rede elétrica da cidade de Bragança Paulista, SP, composta por vários pontos de consumo, onde cada ponto é representado por um nó na rede. Essa rede possui 29 barras e opera com uma potência total de 17,7 kW (P) e 5,8 kVar (Q), A tensão de referencia da rede é de 121,244 V.

Figura 10 – Rede Baixa Tensão de 29 barras



Fonte: (PIZZALI, 2003)

Foi realizada a coleta de informações detalhadas sobre o somatório das cargas em cada um dos pontos dessa rede elétrica. Esses valores foram cuidadosamente organizados na Tabela 7 a seguir.

Tabela 7 – Rede de distribuição BT – 29 Barras

nó	P_a (W)	Q_a (VAr)	P_b (W)	Q_b (VAr)	P_c (W)	Q_c (VAr)
2	451,4	148,4	209,7	68,9	0,0	0,0
5	0,0	0,0	18,1	5,9	329,2	108,2
7	641,7	210,9	397,9	130,8	504,9	166,0
8	188,2	61,9	268,8	88,4	0,0	0,0
9	166,0	54,6	97,2	31,9	349,3	114,8
11	262,5	86,3	142,4	46,8	120,1	39,5
12	326,4	107,3	441,0	144,9	331,3	108,9
13	147,2	48,4	310,4	102,0	127,1	41,8
14	377,1	123,9	348,6	114,6	403,5	132,6
15	1044,4	343,3	1185,4	389,6	1020,1	335,3
18	330,6	108,7	562,5	184,9	754,2	247,9
19	0,0	0,0	236,8	77,8	216,0	71,0
20	311,1	102,3	544,4	178,9	234,7	77,1
21	294,4	96,8	59,7	19,6	0,0	0,0
22	112,5	37,0	112,5	37,0	0,0	0,0
23	113,9	37,4	0,0	0,0	0,0	0,0
24	0,0	0,0	170,8	56,1	170,8	56,1
25	570,8	187,6	273,6	89,9	0,0	0,0
26	507,6	166,8	291,0	95,6	343,1	112,8
27	144,4	47,5	366,7	120,5	569,4	187,2
28	118,1	38,8	118,1	38,8	0,0	0,0

Fonte: (PIZZALI, 2003)

Com o objetivo de proporcionar uma visualização clara e facilitar a interpretação dos resultados, a estrutura organizada da tabela permite uma análise mais precisa e eficiente das informações sobre o somatório das cargas em cada um dos pontos da rede elétrica.

A Tabela 8 a seguir, exhibe os resultados obtidos por meio da aplicação do método GRASP para o fator de desequilíbrio.

Tabela 8 – Resultados do método GRASP

Número da solução	FD (%)	Perdas (W)	Min V (p.u)
Solução inicial	0,5213	189,6341	0,9889
Melhor 1	0,3186	193,3938	0,9799
Melhor 2	0,3355	190,7826	0,9799
Melhor 3	0,3436	179,5332	0,9794
Melhor 4	0,4110	187,9212	0,9794

Fonte: (CRUZ, 2019)

Através dessa análise, torna-se possível identificar a melhoria significativa nos resultados obtidos.

A seguir, é apresentada a Tabela 9 com os resultados aprimorados do fator de desequilíbrio após a aplicação do melhoramento utilizando o VNS:

Tabela 9 – Melhoria VNS

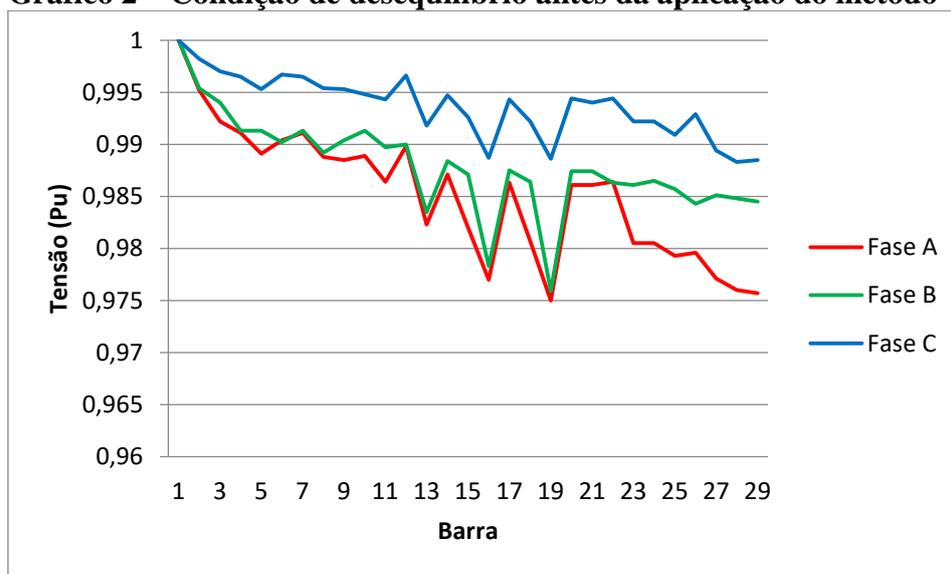
Nº de solução	FD (%)	Perdas (W)	Min V (p.u)	Nº de melhorias	Nº de fluxos de potência utilizados
Solução da fase construtiva	0,3186	193,3938	0,9799	~	~
Melhor 1	0,146	172,025	0,979	15	233
Melhor 2	0,156	171,550	0,979	14	209
Melhor 3	0,178	179,419	0,979	13	203
Melhor 4	0,185	178,954	0,979	12	183

Fonte: (CRUZ, 2019)

Esses resultados indicam que o melhoramento VNS foi efetivo em refinar os valores do fator de desequilíbrio, resultando em uma melhoria no equilíbrio dos dados analisados.

Abaixo é possível analisar o Gráfico 2, que retrata a condição inicial do desbalanceamento das fases antes da aplicação dos métodos.

Gráfico 2 – Condição de desequilíbrio antes da aplicação do método

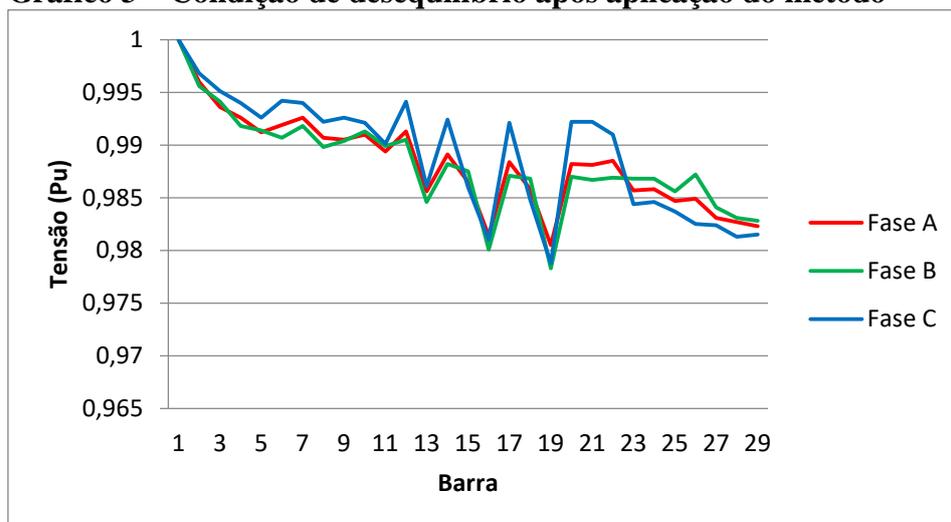


Fonte: Adaptada pelos autores

É possível ter uma visualização ampliada e detalhada do grau de desequilíbrio, revelando de forma evidente as disparidades existentes antes da implementação dos métodos.

No Gráfico 3, é possível analisar a diferença nos resultados após a aplicação dos métodos, destacando claramente as melhorias obtidas.

Gráfico 3 – Condição de desequilíbrio após aplicação do método



Fonte: Adaptada pelos autores

As tabelas forneceram uma visão clara e estruturada do somatório de cargas em cada ponto da rede. Dessa forma, foi possível identificar possíveis desvios em relação ao equilíbrio ideal, ou seja, momentos em que a distribuição das cargas estava desbalanceada. Com base nessas informações, foi possível analisar os padrões de desbalanceamento ao longo do tempo e identificar quais pontos da rede apresentavam maior desvio em relação ao equilíbrio. Essa análise permitiu compreender os fatores que contribuem para o desequilíbrio e sugerir estratégias para melhorar a distribuição de cargas e, conseqüentemente, aumentar a eficiência do sistema elétrico.

5 CONCLUSÕES

Conclui-se, com base nos resultados obtidos, que a aplicação do GRASP resulta em um perfil de tensão mais equilibrado em comparação ao perfil inicial. É importante ressaltar que o balanceamento de fases das cargas pode oferecer benefícios significativos, como a postergação de investimentos na infraestrutura elétrica, como a construção de novas linhas e/ou subestações, evitando assim danos precoces em equipamentos industriais e residenciais tanto em unidades consumidoras como também em distribuidores e geradores do setor elétrico.

Como sugestão para futuras atividades, recomenda-se a inclusão de aspectos relacionados à qualidade de energia elétrica no modelo matemático. Essa abordagem mais abrangente permitiria uma análise mais completa e precisa dos impactos do balanceamento de fases nas redes elétricas.

Recomenda-se também trabalhos relacionados a eventuais aplicações no âmbito operacional do sistema e implementação de normativas, sendo estas fundamentais para garantir a segurança e a eficiência energética, estabelecendo assim diretrizes padronizadas, assegurando a conformidade regulatória e contribuindo para o funcionamento adequado e sustentável do sistema elétrico como um todo.

Essa tarefa pode ser considerada desafiadora, uma vez que a qualidade de energia elétrica envolve diversos parâmetros, como a variação de tensão, a presença de harmônicas, a estabilidade do sistema, entre outros. No entanto, ao incorporar esses aspectos ao modelo, seria possível obter uma compreensão mais abrangente dos benefícios do balanceamento de fases, contribuindo para uma melhor gestão e planejamento das redes elétricas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5410: **Instalações elétricas de baixa tensão**. Disponível em:

<https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5810747/mod_resource/content/1/NBR5410%20-%20Instala%C3%A7%C3%B5es%20el%C3%A9tricas%20de%20baixa%20tens%C3%A3o.pdf> Acesso em: março de 2023

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL: **Procedimentos de distribuição de energia elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST, Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica**. Disponível em:

<https://www2.aneel.gov.br/cedoc/aren2021956_2_7.pdf> Acesso em: março de 2023.

ANEEL. **Resolução Normativa nº 202/1956**. Disponível em:

<<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2021956.pdf>> Acesso em: maio de 2023.

REZENDE, Paulo Henrique Oliveira; SAMESIMA, Milton Itsuo. **Efeitos do desequilíbrio de tensões de suprimentos nos motores de indução trifásica**. Horizonte Científico, v. 6, n. 2, 2012. Disponível em:

<<https://seer.ufu.br/index.php/horizontecientifico/article/view/4473/11857>> Acesso em: março de 2023.

PINTO, Milton de Oliveira. **Energia elétrica: geração, transmissão e sistemas interligados** - 1. ed. - [Reimpr.]. - Rio de Janeiro: LTC, 2018. Disponível em:

<<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/books/978-85-216-2526-1>> Acesso em: março de 2023.

FIGUEIREDO, Robson Lage. **Sistema de Controle para Balanceamento de cargas no secundário do transformador**. Monografia – UFOP Escola de Minas. Colegiado do curso de Engenharia de Controle e Automação, 2009. Disponível em:

<<https://silo.tips/download/sistema-de-controle-para-balanceamento-de-cargas-no-secundario-do-transformador>> Acesso em: março de 2023.

PAIVA, G. A. **Uma proposta de sistema de detecção e classificação de defeitos em sistemas elétricos de potência baseada em inteligência computacional**. 2019. 88 f.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019. Disponível em:

<https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/45188/3/2019_tcc_gapaiva.pdf> Acesso em: março de 2023.

CREDER, H. **Instalações elétricas**. 16. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016. Disponível em: <

<https://drb-m.org/av1/0-Instalacoes%20Elétricas%2016%20ed%20%20%20Helio%20Creder.pdf>> Acesso em: março de 2023.

PAULILLO, G.; ABREU, J. P. G. **Development of a voltage imbalance electromagnetic compensator. Computational Methods in Circuits and Systems Applications**, WSEAS Press, 2003, p. 253-257. Disponível em: <

https://www.osetoelettrico.com.br/wp-content/uploads/2013/03/Ed86_fasc_qualidade_cap3.pdf> Acesso em: abril de 2023.

TEODORO, Ricardo Gouveia. Metodologia para compensação de desequilíbrio em redes

elétricas. **Metodologia Para Compensação de Desequilíbrio em Redes Elétricas**, 2005. Disponível em: < https://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariaeletrica/pos-graduacao/141-dissertacao_ricardo_gouveia_teodoro.pdf> Acesso em: maio de 2023.

ROBBA, F. **Análise de sistemas de transmissão de energia elétrica**. 1. ed. São Paulo: Novatec, 2020. Disponível em: <<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/books/9786555060096>> Acesso em: maio de 2023.

ROMERO, R. A.; LAVORATO, M. **Metaheurísticas em sistemas elétricos de potência: introdução ao estudo e aplicações**. 2012 Disponível em: <http://www.swge.inf.br/anais/sbse2012/pdfs/Minicursos/Minicurso_2_Metaheurísticas_Ruben_Marina.pdf> Acesso em maio de 2023.

JANNUZI, Antonio Cezar. **Regulação da qualidade de energia elétrica sob o foco do consumidor**. 216 f. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade de Brasília, Brasília, 2007. Disponível em: < <https://repositorio.unb.br/handle/10482/2712#>> Acesso em: maio de 2023.

SIQUEIRA, P. H., SCHEER, S., STEINER, M. T. A. **A new approach to solve the Traveling Salesman Problem**. *Neurocomputing* (Amsterdam), v. 70, p. 1013-1021, 2007. Disponível em: <<https://paulohscwb.github.io/metaheurísticas/>> Acesso em: maio de 2023.

CRUZ, Gabriela Alexandra da Silva. **Balanceamento de fases em redes elétricas utilizando procedimento adaptativo de busca aleatório e guloso (GRASP)**, 2019. Disponível em: <https://www.monografias.ufop.br/bitstream/35400000/1912/1/MONOGRAFIA_BalanceamentoFasesRedes.pdf> Acesso em: maio de 2023.

PIZZALI, Luis Fernando Ochoa. **Cálculo de fluxo de potência em redes de distribuição com modelagem a quatro fios**. UNESP. Ilha solteira, 2003. Disponível em: <https://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariaeletrica/lapsee/2003_diss_nando.pdf> Acesso em: junho de 2023.

FERREIRA, Adrian Ribeiro. **Uma Proposta Metodológica para a Atribuição da Responsabilidade das VTCDs baseada na Correlação dos Fatores de Desequilíbrio**. Disponível em: <<https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/32540>> Acesso em: junho de 2023.

OLIVEIRA, Marlon Borges Correia De. **Reconfiguração de Alimentadores em Sistemas de Distribuição Usando a Metaheurística GRASP**. 2011. 89 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Ilha Solteira, São Paulo, 2011. <https://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariaeletrica/lapsee/2011_diss_marlon_borges.pdf> Acesso em: junho de 2023.

BRASFORMER. (s.d.). Linha de Produtos. Em: Brasformer. Disponível em: <<https://brasformer.com.br/linha-de-produtos/>> Acesso em: 13 jun. 2023.