UFBA
UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
ESCOLA POLITÉCNICA
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA INDUSTRIAL - PEI

MESTRADO EM ENGENHARIA INDUSTRIAL

JACKSIEL JOSÉ DE ABREU

ALOCAÇÃO ADEQUADA DO QUADRO GERAL DE BAIXA TENSÃO ATRAVÉS DA BUSCA PELO CAMINHO MAIS CURTO

PEI
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Industrial

SALVADOR
2018

UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
ESCOLA POLITÉNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA INDUSTRIAL

JACKSIEL JOSÉ DE ABREU

ALOCAÇÃO ADEQUADA DO QUADRO GERAL DE BAIXA TENSÃO ATRAVÉS DA BUSCA PELO CAMINHO MAIS CURTO

Salvador
2018

JACKSIEL JOSÉ DE ABREU

ALOCAÇÃO ADEQUADA DO QUADRO GERAL DE BAIXA TENSÃO ATRAVÉS DA BUSCA PELO CAMINHO MAIS CURTO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Industrial, Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, como requisito para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Industrial.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Arthur Mattos Teixeira Cavalcante

Salvador
2018

Abreu, Jacksiel José de
ALOCAÇÃO ADEQUADA DO QUADRO GERAL DE BAIXA TENSÃO ATRAVÉS DA BUSCA PELO CAMINHO MAIS CURTO./ Jacksiel José de Abreu. – Salvador, 2018
75 p. : il.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Arthur Mattos Teixeira Cavalcante

Dissertação (Mestrado - Engenharia Industrial) -- Universidade Federal da Bahia, Escola Politécnica - Universidade Federal da Bahia, 2018.

1.Quadro geral de baixa tensão. 2.Instalações elétricas. 3.Caminho mais curto. 4.Otimização de redes elétricas. I. Cavalcante, Carlos Arthur Mattos Teixeira. II.Título.

ALOCAÇÃO ADEQUADA DO QUADRO GERAL DE BAIXA TENSÃO ATRAVÉS DA BUSCA PELO CAMINHO MAIS CURTO

JACKSIEL JOSÉ DE ABREU

Dissertação submetida ao corpo docente do programa de pós-graduação em Engenharia Industrial da Universidade Federal da Bahia como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de mestre em Engenharia Industrial.

Examinada por:

Prof. Dr. Carlos Arthur Mattos Teixeira Cavalcante_____
Doutor em Engenharia de Produção, pela Universidade de São Paulo, Brasil, 1999.

Prof. Dr. Ângelo Márcio Oliveira Sant'Anna_____
Doutor em Engenharia de Produção, pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2009.

Prof. Dr. Elder de Souza Claudino_____
Doutor em Física da Matéria Condensada, pela Universidade Federal de Alagoas, Brasil, 2013.

Salvador, BA - BRASIL
Abril/2018

Dedico este trabalho a Deus, pelos diversos momentos em que me vali de sua presença para continuar caminhando, aos meus pais José Severino e Maria Rosalina, por abdicarem seus sonhos em função dos meus, à minha esposa Rafaela Carine, pelo companheirismo, compreensão e apoio em todos os momentos da minha vida, à minha irmã Dayanne Maria e a todos que me acompanharam e acreditaram na realização deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por se fazer presente, possibilitando serenidade em todos os momentos, sobretudo nos mais difíceis.

À minha família, em especial aos meus pais, José Severino e Maria Rosalina, à minha esposa Rafaela Carine, à minha irmã Dayanne Maria, por estarem sempre ao meu lado, me incentivando, me ajudando a superar todas as dificuldades, acreditando na minha capacidade de alcançar os meus objetivos, enfim por todos os gestos de amor que têm comigo.

Ao professor Carlos Arthur Mattos Teixeira Cavalcante, pela orientação, apoio, pela contribuição para o meu crescimento profissional, e principalmente pela contribuição para o meu crescimento pessoal, pelas lições que me fizeram alcançar a conclusão deste trabalho e me motivam a iniciar outros.

Aos colegas de pós-graduação José Wandmark Duarte Barros e Álvaro Cavalcanti de Almeida Filho, e ao amigo Allisson Luiz Nascimento da Silva, pelas palavras de incentivo ditas sempre nas horas necessárias, e pelo tempo concedido para as diversas discussões acerca do conteúdo da pesquisa.

Ao Instituto Federal de Alagoas, pela oportunidade concedida, que me possibilitou acesso ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Industrial nas pessoas dos professores Sérgio Teixeira Costa e Carlos Henrique Almeida Alves.

A Universidade Federal da Bahia, em especial aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Industrial, pela socialização do conhecimento e esforços atribuídos, que tornaram possível a minha formação.

Se não puder voar, corra. Se não puder correr, ande. Se não puder andar, rasteje, mas continue em frente de qualquer jeito.

Martin Luther King

RESUMO

A alocação do quadro geral de distribuição de energia elétrica de baixa tensão em estabelecimentos é determinada por parâmetros técnicos, normativos e econômicos. Uma alocação adequada do quadro geral de baixa tensão reduz a metragem da fiação dos circuitos de alimentação e distribuição de energia elétrica projetados para as instalações e, consequentemente, reduz os custos de implantação bem como os custos de operação (consumo) decorrentes das perdas de energia (efeito Joule) a eles associados. O objetivo deste trabalho foi desenvolver e aplicar um modelo de otimização para a determinação do local ótimo de instalação do quadro geral de baixa tensão em casas, apartamentos residenciais, estabelecimentos comerciais e instalações industriais de pequeno porte. Na solução desse problema, adotou-se um modelo de otimização de redes para determinar o caminho mais curto para o trajeto percorrido pela fiação, que conduz à minimização dos custos. Para verificar a validade da solução proposta foi realizado um estudo de caso, onde, com o uso de parâmetros reais, a definição de uma técnica de otimização de rede implementada no Solver do Excel, indicou o ponto considerado ótimo para a alocação do quadro geral de baixa tensão. Em seguida, fez-se uma comparação dos resultados obtidos através da localização do quadro geral no centro de cargas, método tradicionalmente utilizado. Dessa comparação constatou-se a eficiência do método sugerido garantindo uma tomada de decisão confiável e econômica.

Palavras-chave: Quadro geral de baixa tensão; Instalações elétricas; Caminho mais curto; Otimização de redes elétricas.

ABSTRACT

The allocation of the low voltage electrical power general distribution board at buildings is determined by technical, normative and economical parameters. A properly allocation of the low voltage main board reduces the wiring lengths of the feeders and distribution circuits designed for the installations, and, consequently, reduces the deployment costs as well the operative costs (power consumption) related to power dissipation (Joule heating). This work aims to develop and apply an optimization model for the optimal location determination of the low voltage main board at houses, flats, commercial buildings and small industries. To solve this problem, it has been adopted a network optimization model to determine the shortest route to pass the conductors, in which results in costs reduction. For validation of the proposed solution, it was performed a case study, where, taking real parameters, the definition of an optimization technique executed in Excel Solver, has indicated a point considered as the optimal location of the low voltage main board. Then, the obtained results were compared to location returned by load center, method traditionally used. From this comparison, it was verified the efficiency of the suggested method assuring a reliable and economical decision making.

Keywords: Low voltage main board. Electrical installations. Shortest path. Optimization of electrical networks.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Implementação do problema do caminho mais curto. 29
Figura 2 - Planta baixa do projeto modelo. 49
Figura 3 - Etapas para a implementação do método da busca pelo caminho mais curto. 53
Figura 4 - Representação dos pontos fixos no projeto modelo..... 54
Figura 5 - Delimitação das áreas para alocação do quadro geral de baixa tensão (QGBT)..... 54
Figura 6 - Representação dos possíveis pontos de localização do QGBT..... 55
Figura 7 - Trajeto dos condutores..... 56
Figura 8 - Detalhamento dos possíveis trajetos para os condutores. 57
Figura 9 - Trajeto dos condutores, considerando o QGBT no ponto adequado. 60
Figura 10 - Disposição espacial dos quadros de distribuição parciais e do centro de cargas no projeto modelo..... 61
Figura 11 - Trajeto dos condutores considerando o QGBT no centro de cargas..... 62
Figura 12 - Peso dos condutores estimados para o projeto..... 64
Figura 13 - Queda de tensão percentual. 65
Figura 14 - Corrente de curto-circuito presumida. 66
Figura 15 - Perdas por efeito Joule..... 67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Temperaturas características dos condutores. 38
Tabela 2 - Descrição das potências por quadro. 49
Tabela 3 - Corrente do projeto e seção dos condutores. 50
Tabela 4 - Características dos condutores flexíveis de cobre. 51
Tabela 5 - Dados da amostra. 58
Tabela 6 - Coordenadas geográficas dos quadros. 63

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AMN	Asociación Mercosur de Normalización
BEN	Balanço Energético Nacional
BT	Baixa tensão
CB	Comitê Brasileiro
CEE	Comissões de Estudos Especiais
CO_2	Dióxido de carbono
COBEI	Comitê Brasileiro de Eletricidade
Copant	Comissão Pan-Americana de Normas Técnicas
EPE	Empresa Brasileira de Pesquisa Energética
EPR	Composto termofixo à base de etilenopropileno
EU	União Europeia
EUA	Estados Unidos da América
FMI	Fundo Monetário Internacional
IEA	International Energy Agency
IEC	International Electrotechnical Commission
ISO	Organização Internacional de Normalização
kg	Quilograma
kV	Quilovolt
kWh	Quilowatt Hora
m	Metros
mm^2	Milímetro quadrados
MT	Média tensão
MWh	Megawatt Hora
NBR	Norma Brasileira
NM	Associação Mercosul de Normatização
ONS	Organismo de Normatização Setorial
PVC	Composto termoplástico à base de policloreto de vinila
Q1	Quadro de distribuição parcial 1
Q2	Quadro de distribuição parcial 2
QGBT	Quadro Geral de Baixa Tensão
TWh	Terawatt Hora
VPL	Valor Presente Líquido
XLPE	Composto termofixo à base de polietileno reticulado

LISTA DE SÍMBOLOS

Σ	Somatório ou função aditiva
c_{ij}	Custo por unidade de fluxo no arco (ij)
x_{ij}	Número de unidades de fluxo enviados do nó i para o nó j através do arco (i, j)
i	Nó de origem
j	Nó destino
b_i	Oferta líquida, saída menos entrada, no nó i
x_n	Variável de decisão
a_{ij}	Parâmetro conhecido
Xn	Coordenadas x do gráfico
Yn	Coordenadas y do gráfico
Sn	Potências dos pontos de utilização
ºC	Temperatura considerada em graus Celsius
ΔV_c	Queda de tensão
I_c	Corrente do circuito
L_c	Comprimento do material condutor no circuito
R	Resistência do condutor em corrente contínua
X	Reatância do condutor
$\emptyset$	Ângulo do fator de potência da carga
V_{ff}	Tensão entre fases
$\vec{I}_{cs}$	Corrente de curto-circuito presumida
$\vec{Z}_{utot}$	Soma vetorial das impedâncias
R_{ui}	Resistência unitária
X_{ui}	Reatância unitária
pu	Por unidade
$R_{u\Omega}$	Resistência do condutor de sequência positiva
N_c	Número de condutores por fase do circuito analisado
$X_{u\Omega}$	Reatância de sequência positiva do condutor fase
I_b	Corrente de base
P_b	Potência tomada como base
V_b	Tensão tomada como base
ρ	Resistividade do material ou resistividade do volume com o qual o condutor é feito
S	Área da secção transversal do condutor
R_{CA}	Resistência em corrente alternada
ΔR	Variação da resistência em corrente contínua, considerando os fatores relacionados aos efeitos peculiar e de proximidade
γ_s	Componente devido ao efeito peculiar
γ_p	Componente devido ao efeito de proximidade
x_S	Variável efeito peculiar
x_P	Variável efeito de proximidade
π	Número pi
f	Frequência
d_c	Diâmetro do condutor
l	Distância entre eixos dos condutores

c	Espessura do material isolante de um condutor
k_s	Valor experimental de s
k_p	Valor experimental de p
P_j	Perdas por efeito Joule
I_B	Corrente de projeto que circula pelo condutor
E	Energia dissipada ao longo do cabo
R	Resistência elétrica do condutor
i_{nom}	Corrente nominal do circuito
ΔT	Intervalo de tempo de funcionamento do circuito

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO. 14

1.1 MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA 15

1.2 OBJETIVO GERAL DO TRABALHO 17

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS 17

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO. 18

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 20

2.1 CENÁRIO DA DEMANDA POR ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL 20

2.2 ATUALIDADE E IMPORTÂNCIA DA ALOCAÇÃO DOS DISPOSITIVOS E EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS 22

2.3 EFICIÊNCIA DAS INSTALAÇÕES ELÉTRICAS 24

2.4 MODELO DE OTIMIZAÇÃO DE REDES 26

2.4.1 Problema do caminho mais curto 27

2.4.2 Algoritmo simplex 29

3 ANÁLISE DO PROBLEMA 31

3.1 PROJETOS ELÉTRICOS 31

3.2 QUADROS DE DISTRIBUIÇÃO 33

3.3 LOCALIZAÇÃO DO QUADRO GERAL DE BAIXA TENSÃO 34

3.4 CONDUTORES ELÉTRICOS 35

3.4.1 Dimensionamento de condutores elétricos 37

3.4.2 Queda de tensão nos condutores elétricos 39

3.4.3 Corrente de curto-circuito presumida 40

3.4.4 Perdas ôhmicas em condutores 42

3.5 LOCALIZAÇÃO DOS QUADROS NO PROJETO MODELO 47

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO 52

4.1 SOLUÇÃO OBTIDA ATRAVÉS DA BUSCA PELO CAMINHO MAIS CURTO 52

4.2 SOLUÇÃO OBTIDA ATRAVÉS DA LOCALIZAÇÃO DO CENTRO DE CARGAS 61

4.3 ANÁLISE DAS SOLUÇÕES 62

4.3.1 Quantidade de condutores 63

4.3.2 Queda de tensão 65

4.3.3 Corrente de curto-circuito presumida 66

4.3.4 Previsão de perdas por Efeito Joule 67

5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS 69

5.1 CONCLUSÕES 69

5.2 CONSIDERAÇÕES E TRABALHOS FUTUROS 69

REFERÊNCIAS 71

1 INTRODUÇÃO.

Os custos associados ao projeto e à operação de circuitos de distribuição de energia elétrica são fatores determinantes na condução do processo de tomada de decisões referentes ao projeto desses circuitos de distribuição, seja para unidades comerciais e industriais, seja para unidades residenciais. Ao mesmo tempo, a modernização tecnológica e a aplicação de métodos de otimização no dimensionamento de redes de energia têm contribuído significativamente para a redução das perdas energéticas (efeito Joule) dessas redes.

As perdas de energia nos condutores devem ser consideradas em conjunto com as cargas, pois contribuem para o consumo total de energia de uma instalação. As instalações elétricas residências, comerciais e industriais em sua maioria utilizam corrente alternada. Em uma instalação elétrica, o fluxo e a intensidade de corrente elétrica pelos cabos geram calor e este aquecimento relaciona-se às perdas de energia.

A tomada de decisão em uma rede de instalação elétrica deve ser cuidadosamente analisada, pois afeta consideravelmente os custos de instalação e a eficiência de operação (consumo).

O consumo mundial de energia deve aumentar em 38,6% em 2030 segundo estudo apresentado por Fritz em 2012 na 9ª edição da *industrial and commercial use of energy conference* (LOBÃO; DEVEZAS; CATALÃO, 2014). É importante que o consumidor disponha de instrumentos de ação capazes de auxiliá-lo nas decisões acerca da eficiência de suas instalações elétricas.

É crescente a realização de estudos voltados para o desenvolvimento de novos materiais condutores, devido à necessidade de garantir recursos que atendam ao aumento da demanda de energia (LEKAWA-RAUS; HALADYJ; KOZIOL, 2014), logo, de maneira igualmente significativa, são fundamentais as pesquisas que resultam na diminuição de perdas e no aumento da economia dos condutores atualmente utilizados.

A minimização da metragem de fiação necessária por meio da utilização de métodos computacionais modernos na aplicação de modelos de otimização matemática para essa finalidade, com consequente redução nos custos de instalação e de consumo de energia elétrica caracteriza uma importante linha de pesquisa que produzirá maior eficiência para as instalações elétricas.

O correto dimensionamento da seção transversal e do comprimento dos cabos têm influência recíproca e afetam o consumo de energia, bem como, a forma como esses cabos são dispostos em uma instalação pode contribuir para um melhor aproveitamento da energia elétrica. Uma otimização da quantidade de condutores instalados, além de garantir redução de custos de aquisição destes, acarreta em uma respectiva redução de perdas, possibilitando uma instalação elétrica mais sustentável, pois haverá uma aplicação mais eficiente da potência instalada. Manuel e Nunes (2011) destacam que é importante buscar a redução das perdas, com o intuito de promover a eficiência energética e a manutenção da rentabilidade econômica, utilizando a energia existente de forma responsável.

A elaboração do projeto elétrico requer conhecimento das normas técnicas e das particularidades da instalação. Fatores como: segurança, confiabilidade, eficiência e economia devem ser considerados pelo projetista. Qualquer erro no projeto implicará em danos que irão proporcionar enormes prejuízos (DIAS, 2013). Critérios técnicos como queda de tensão e corrente de curto-circuito presumida para os circuitos, são indicadores dos fatores citados, e nesse contexto, uma das etapas que demanda bastante atenção é a determinação do local de instalação do quadro geral de baixa tensão.

A alocação do quadro geral de baixa tensão exige uma análise apurada, uma vez que se trata de uma decisão que pode proporcionar ganhos, garantindo um melhor aproveitamento das instalações elétricas. Além dos fatores considerados relevantes apresentados até aqui, cabe considerar também que o cobre é o material condutor mais utilizado em instalações elétricas de baixa tensão, é um metal escasso e, portanto, tem custo elevado. Assim, os custos com cabos podem representar entre 10% e 30% do total de uma obra (VIANNA, 2015).

A alocação dos quadros de distribuição afeta consideravelmente a distribuição dos condutores. As particularidades das instalações, normas estabelecidas, restrições existentes são variáveis que influenciam o projeto, tornando a determinação do ponto de instalação um problema muito complexo em termos de análise.

1.1 MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA

O crescimento do número de residências, o aumento no consumo de energia elétrica impulsionado pela melhoria de renda das famílias do Brasil, especificamente no começo deste século, e a utilização da tecnologia pelos brasileiros, requer uma atenção para o setor da

eletricidade (ANDRADE; PINHEIRO, 2005). Projetos elétricos que diminuam possíveis impactos ambientais e prezem pelo aumento da eficiência, se apresentam cada vez mais com maior importância.

A evolução do consumo de energia tem se apresentado crescente para as áreas residenciais, comerciais e industriais. Diante do debate existente entre crescimento econômico e eficiência da utilização de energia, justifica-se a realização de estudos voltados para o melhor aproveitamento dos recursos existentes, assim como para o desenvolvimento de novos métodos e técnicas que proporcionem tal eficiência.

O aumento do consumo de eletricidade industrial esperado até o ano 2050 é de 2,3% em relação ao constatado em 2016. Em contrapartida, avalia-se que a indústria, em 2050, possa obter ganhos de eficiência energética que representam mais de 115TWh, equivalente a 7% do total do consumo estimado (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE, 2016).

É possível obter ganhos quanto ao consumo de energia elétrica, adotando-se métodos mais eficientes de distribuição de condutores em uma instalação elétrica. Em relação ao aspecto ambiental, com a redução do consumo de energia e da quantidade de condutores utilizados em uma instalação, tem-se uma diminuição da utilização de recursos fósseis, baixando o teor de gases de efeito estufa (GABRIEL; SOUTO, 2013). Logo, a redução de condutores de uma instalação elétrica implica em uma possível minimização dos impactos ambientais por meio da emissão de gases à atmosfera.

A racionalização da energia permite a redução de custos referente ao consumo, liberando recursos financeiros para outras finalidades, de modo a obter simultaneamente o melhor aproveitamento dos investimentos.

É de fundamental importância para projetos que tenham como objetivo a redução dos desperdícios, bem como a adoção de ações que diminuam impactos negativos à sociedade, sejam analisados a fim de garantir cada vez mais resultados ótimos. Partindo desse princípio, pode-se afirmar que tão importante quanto encontrar fontes alternativas de energia, é utilizar as existentes de forma responsável.

Os projetos elétricos possuem grande importância, não apenas para o planejamento das instalações elétricas, mas podem contribuir em conjunto com os demais projetos de uma edificação, apresentando soluções com responsabilidade social e sustentabilidade.

Elaborados com base na norma brasileira NBR5410 de 2004, revisada em 2008, os projetistas sempre consideram e evidenciam as questões de segurança e comodidade das

instalações. Porém, a literatura pouco discute quanto ao local considerado ideal para a instalação do quadro geral de baixa tensão, processo de grande relevância por determinar a quantidade necessária de condutores.

O desenvolvimento de novas tecnologias, aliado à revisão de processos que possibilitem o surgimento de novas informações, são fundamentais para a gestão energética. As empresas atuam em um cenário competitivo e sustentável, assim as propostas de redução de material e consequente uso eficiente de energia, ocupam um destaque para os consumidores que visam minimizar custos operacionais em instalações elétricas de baixa tensão.

A redução dos condutores implica na diminuição das perdas decorrentes do aquecimento gerado pelo fluxo muito intenso de correntes elétricas nestes. Esta redução proporciona ganhos no que diz respeito ao melhor aproveitamento da demanda elétrica, além de permitir a racionalização dos custos relacionados à sua contratação, menores queda de tensão e menores corrente de curto-circuito. Desta forma, este estudo oferece uma contribuição técnica, porque se agrega ao conhecimento para a obtenção do melhor aproveitamento dos recursos econômicos.

1.2 OBJETIVO GERAL DO TRABALHO

O objetivo deste trabalho foi desenvolver e aplicar um modelo de otimização para a determinação do local ótimo de instalação do quadro geral de um circuito de distribuição em baixa tensão. Complementa o objetivo deste trabalho a implementação do método da busca pelo caminho mais curto na determinação da configuração de distribuição dos condutores elétricos, de maneira que conduzisse aos mínimos custos de instalação e operação, respeitando as restrições arquitetônicas e normativas (técnicas, segurança, ambientais, etc.).

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Apresentar uma análise da produção científica fundamentada em um histórico dos trabalhos publicados na área de pesquisa;
- Sintetizar as informações relevantes a respeito do problema proposto;

- Abordar os métodos indicados em pesquisas sobre alocação de equipamentos elétricos já realizadas;
- Aplicar o método sugerido por esta pesquisa em uma planta modelo;
- Comparar a solução obtida pelo método proposto com a solução indicada pelo método do centro de cargas;
- Analisar os resultados a fim de apontar uma conclusão.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO.

Este trabalho foi estruturado em 6 capítulos.

No capítulo 1 são apresentados os assuntos introdutórios onde a pesquisa é contextualizada, e são mostrados os fundamentos da dissertação: motivação, justificativa e objetivos.

No capítulo 2, é apresentado um panorama sobre o atual sistema elétrico brasileiro e mundial, alertando quanto à necessidade de estudos voltados para a busca de alternativas capazes de tornar o uso da energia elétrica mais eficiente. Os métodos abordados com o objetivo de obter a melhor alocação dos dispositivos e equipamentos das instalações elétricas, também são apresentados neste capítulo, dando ênfase ao foco principal do trabalho.

As informações consideradas relevantes para a determinação do local de instalação de um quadro geral de baixa tensão são apresentadas no capítulo 3. Os métodos atualmente considerados para a distribuição dos circuitos de alimentação e circuitos terminais são abordados de modo a caracterizar o problema e as possíveis vantagens que podem ser adquiridas com a aplicação de técnicas mais apuradas.

Pode-se verificar no capítulo 4 a explicação do método indicado na proposta do trabalho. São apresentados os motivos relevantes para a determinação da metodologia indicada e as soluções avaliadas como sendo mais viáveis para a determinação da localização ótima de um quadro geral de baixa tensão apontada por cada método. Tais informações e modelos indicados caracterizam uma ferramenta capaz de auxiliar na elaboração de projetos elétricos de baixa tensão. Os modelos propostos compreenderão um estudo de caso realizado com um projeto das instalações elétricas de um edifício comercial, tendo como propósito detalhar os resultados obtidos.

No capítulo 5, é apresentada a análise do trabalho realizado, concluindo o estudo. São expostas as dificuldades encontradas e as limitações existentes para a solução indicada, evidenciando desta maneira, os possíveis assuntos que poderão ser trabalhos em uma futura abordagem ao tema. Por fim, no capítulo 6, são listadas as referências utilizadas na pesquisa.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CENÁRIO DA DEMANDA POR ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL

A energia elétrica é um recurso precioso fundamental para a sociedade. A população mundial, composta por aproximadamente seis bilhões de pessoas no ano 2000, tem crescimento previsto para cerca de nove bilhões de pessoas até 2050. Tal crescimento sinaliza para possíveis problemas de oferta de energia no futuro, especialmente em países como Brasil, China e Índia (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE, 2016).

Os estudos de demanda possibilitam antecipar as possíveis inovações e eventos significativos para mudanças de natureza tecnológica, econômica, ou de mudanças de hábito socioeconômicos que possam produzir impactos no relacionamento da sociedade com a energia (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE, 2016).

Considerando o cenário internacional, a União Europeia registrou em 2009 um consumo residencial de energia elétrica de pouco mais de 1500kWh/habitante, segundo o FMI, IEA, ODYSSEE e BEN. Constatando a importância das instalações residenciais, em 2009, o consumo de energia elétrica representou 55% do consumo nos domicílios norte-americanos (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE, 2016).

Pode-se constatar que no Brasil ocorreu um aumento do consumo de energia elétrica após a crise de 2001. A melhoria da renda das famílias, o surgimento de equipamentos tecnológicos acessíveis à população, assim como a mudança nos hábitos, têm contribuído para um maior consumo de energia (ANDRADE; PINHEIRO, 2005).

O cenário residencial também apresenta uma evolução a longo prazo, apontam os Estudos da Demanda de Energia. Essa demanda é impulsionada pelo maior número de domicílios, o uso de novos equipamentos, novos hábitos a exemplo do tele-trabalho. A expansão do “smart grid” no setor representa uma tecnologia vista como uma alternativa para minimizar os efeitos do aumento de consumo previsto.

Estima-se que só o setor residencial brasileiro registrará um consumo de aproximadamente 336TWh em 2050, representando um considerável adicional quando comparado ao consumo de 124TWh constatado em 2013 (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE, 2016).

É fato que existe um debate sobre a energia e o crescimento econômico. Os países têm cada vez mais se preocupado em fornecer energia limpa, confiável e eficiente, com o intuito de impulsionar a economia (TEYE, 2011). A disponibilidade de energia elétrica indica a viabilidade de um negócio, sobretudo nos projetos de implantação de grandes indústrias (HOLANDA, 2001).

"As atividades do setor de energia elétrica na produção e consumo têm implicações em quase todos os problemas ambientais da atualidade" (LOBÃO; DEVEZAS; CATALÃO, 2014). Tais efeitos podem ser constatados desde a geração, transporte e distribuição até o uso final da energia elétrica, principalmente considerando a emissão de gases de efeito estufa na atmosfera.

A economia brasileira permanece, em média, 26% menos intensa em carbono que a economia europeia, 51% menos do que a economia americana e 73% menos do que a economia chinesa com base nos dados da International Energy Agency (IEA) de 2013. Há uma relação entre o consumo de energia elétrica e a emissão de carbono, o setor elétrico brasileiro emitiu, em média, apenas 139,6 kg CO_2 para produzir 1 MWh, um índice considerado baixo quando se estabelece comparações com países da União Europeia, EUA e China (PESQUISA; EPE, 2016).

Há um comprometimento declarado pelos governos da maioria das nações em limitar as emissões de dióxido de carbono e o consumo de energia através do aumento na eficiência da produção, distribuição e utilização final (MORINI et al., 2013).

Uma prova da preocupação com a redução da emissão de dióxido de carbono (CO_2) é o tratado de Quioto. Trata-se de um protocolo assinado por vários países, firmando um acordo para a adoção de medidas que reduzam a emissão de CO_2 para a atmosfera. O relatório da International Energy Agency (IEA) de 2001 afirma que em países emergentes as emissões de CO_2 têm aumentado, sendo as energias elétrica e térmica responsáveis por 41% das emissões (SOUSA, 2013).

A União Europeia (EU) pretende melhorar sua eficiência energética em 20%, bem como reduzir as emissões de CO_2 até 2020, através do plano "20-20-20", que também pretende aumentar a geração de energia através das fontes de energia renovável em 20% (SOUSA, 2013).

Ainda de acordo com o Balanço Energético Nacional (BEN), constata-se um problema, concernente a um aumento das perdas, considerando o consumo total de energia elétrica. As perdas comerciais e técnicas em 2015 registraram um aumento totalizando o valor de 93,1TWh comparadas com os 91,7TWh constatados em 2014 (PESQUISA; EPE, 2016).

Diante do cenário exposto, observa-se uma crescente demanda por energia elétrica no Brasil para os próximos anos, assim como fica constatada a atenção mundial à realização dos estudos relacionados ao consumo de energia elétrica. A realização de pesquisas voltadas para a análise do consumo de energia elétrica, bem como para a solução de problemas que objetivam eficiência, impulsionam o desenvolvimento de ferramentas que contribuem para a adoção de medidas decisórias que garantam melhoramento.

2.2 ATUALIDADE E IMPORTÂNCIA DA ALOCAÇÃO DOS DISPOSITIVOS E EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS

Há um considerável número de pesquisas voltadas para a alocação ou posicionamento de equipamentos e dispositivos integrantes de um sistema de energia elétrica. Os trabalhos, em sua maioria, visam a minimização das perdas e dos custos a elas relacionados, com o objetivo de tornar os sistemas elétricos cada vez mais eficientes, nos seus setores de geração, de transmissão ou de distribuição.

Contribuindo para uma maior eficiência do setor de geração, Hizam e Ab (2011) adotaram o método algoritmo genético, combinado a um controlador fuzzy, para determinar a alocação de unidades de geração distribuída. Demonstram a adequação dessa abordagem considerando as restrições e de modo a obter uma maximização do sistema, garantindo também viabilidade econômica.

Focados na geração distribuída Rosseti et al. (2013) propuseram um algoritmo heurístico, baseado em índices de sensibilidade para a determinação do ponto ótimo de instalação de unidades de geração distribuída, que apresentou resultados satisfatórios para a minimização das perdas associadas para redes de distribuição radial.

A manutenção da qualidade do fornecimento de energia está condicionada ao gerenciamento dos níveis de potência reativa, sendo o banco de capacitores os responsáveis por este gerenciamento (BEÊ, 2007). O crescente aumento da demanda de energia foi a inspiração para pesquisar a localização ótima dos bancos de capacitores em alimentadores de distribuição através do algoritmo genético, em sua dissertação.

Alocação de banco de capacitores também é tema discutido por Magalhães e Alves (2012), em estudos realizados baseados na Meta-heurística “Colônia de Formigas” para apontar uma solução que minimize as perdas de potência ativa e melhoramento do perfil de tensão dos

alimentadores, reforçando a importância de se pesquisar alternativas capazes de reduzir perdas em sistemas de distribuição.

O problema de alocação ótima de banco de capacitores, em sistemas de distribuição radial, com a finalidade de reduzir perdas de potência e energia, é solucionado através da utilização da metaheurística Particle Swarm como apontam os estudos elaborados por Brandini (2007). O Tema também é discutido por Ramadan, Wahab e Hamada (2014), através de uma abordagem baseada em fuzzy, em que analisou-se os locais de instalação e dimensionamento do banco de capacitores, foi comprovada a possibilidade de redução dos valores da corrente elétrica do sistema.

Por meio de algoritmo genético, Wafa (2013) determinou a alocação ótima de capacitores de sistemas de distribuição. O algoritmo Evolutivo Multiobjetivo proposto por Branco (2013) foi a ferramenta capaz de apontar uma solução para a localização ótima de monitores de qualidade de energia, de distribuição de energia elétrica.

A busca pelo custo mínimo foi objeto de estudo de Ferreira (2007) para a alocação ótima dos dispositivos limitadores de corrente de curto-circuito. Ao passo que a alocação ótima de cargas térmicas, elétricas e de resfriamento entre tecnologias de geração em aplicações domésticas, induz a uma redução do consumo de energia primária, constatação observada em países europeus (MORINI et al., 2013).

A alocação de reguladores de tensão é um problema que pode ser solucionado através da programação linear, de modo a garantir a otimização de sistemas de distribuição de energia (FRANCO et al., 2013). Pensar na concepção econômica das redes de distribuição é uma ação que possibilita a redução dos custos e das perdas de energia (GAN et al., 2011).

A alocação de quadros de distribuição em ambientes industriais foi o tema discutido por Vianna (2015). Através de sua abordagem, apresentou um método para o posicionamento dos quadros de distribuição de maneira inteligente, que possibilitou a redução dos custos dos cabos utilizados, a diminuição das perdas por efeito Joule e contribuiu para a redução de emissão de CO_2 no âmbito das instalações elétricas de uma indústria.

Na pesquisa realizada por Kaur e Sharma (2008) é apresentado um modelo capaz de realizar a seleção ótima dos tamanhos dos condutores em sistemas de distribuição, ressaltando a importância do custo total dos condutores e de suas perdas.

Dias (2013) ressalta a importância da tomada de decisão na elaboração de um projeto de instalações elétricas, em que propõe um conjunto de diretrizes a serem seguidas, sobretudo

quanto ao processo de definição do número e da localização dos quadros elétricos. Processo este, que é apontado como indicador de qualidade e sustentabilidade da solução técnica obtida nos projetos. No trabalho realizado por Dias (2013), a localização do quadro de distribuição para uma instalação residencial é obtida através do cálculo do centro de massa.

Através de uma revisão da literatura, fica evidente a importância e a complexidade que envolve a alocação de dispositivos e equipamentos utilizados ao longo dos sistemas de geração, transmissão, distribuição e das instalações elétricas dos consumidores finais. Muitos dos dispositivos utilizados são considerados essenciais, e por este motivo estabelecem uma relação complexa entre sua importância para os sistemas e o quanto impactam na qualidade de energia. Os trabalhos existentes comprovam que a determinação do local de instalação de muito desses elementos possibilitam a redução das perdas de energia e consequente minimização dos custos, proporcionando maior eficiência.

2.3 EFICIÊNCIA DAS INSTALAÇÕES ELÉTRICAS

Como forma de tornar o uso da energia elétrica mais eficiente, é importante considerar o planejamento dos sistemas de distribuição dos circuitos elétricos de uma instalação. Para isso, deve-se avaliar a possibilidade de redução de custos através do desenvolvimento de novas técnicas, ou o aprimoramento das técnicas comumente adotadas.

A especificação da área da seção transversal dos condutores em instalações elétricas de baixa tensão é crucial para a eficiência do sistema, pois afeta não apenas os custos da instalação, como também os custos de utilização (consumo). Conforme se aumenta a seção do condutor, aumenta-se em proporção direta o custo de instalação (DIAS, 2013).

Ainda de acordo com o estudo realizado por Dias (2013), em uma rede elétrica de baixa tensão não se deve considerar apenas os custos de investimento, pois analisar os custos de exploração também é muito importante, custos estes que podem ser associados às perdas por conta do aquecimento no condutor. Logo, vale salientar que a escolha do tipo de condutor além de seguir as especificações técnicas, se concentra na análise de fatores como custo e vantagens.

O consumo de energia elétrica pode ser reduzido através da minimização das perdas nos cabos, proporcionando uma maior eficiência e um melhor proveito da potência total instalada. As perdas, devido ao aquecimento nos condutores, devem ser avaliadas e consideradas como cargas adicionais, atuando como desperdícios que contribuem para o aumento das correntes nos

condutores de uma instalação. Nesse sentido, esta análise poderá proporcionar uma diferença real nas escolhas eficientes e sustentáveis. Desde a produção de energia, considerando as etapas de transmissão e distribuição até o seu consumo final, podem ser observados e evidenciados, os aspectos de caráter ambiental, econômico, a satisfação do usuário, a busca pela redução do consumo e otimização da distribuição operacional do sistema, a redução de perdas de distribuição e o desenvolvimento de equipamento elétrico sustentável (LOBÃO; DEVEZAS; CATALÃO, 2014).

A maioria das instalações opera com corrente alternada, que ao fluir através de um condutor, produz calor, devido a criação de correntes de Foucault. Esse calor é agravado quando submetido ao campo magnético oriundo da proximidade com outros condutores e ao final terá impacto no aumento do consumo de energia, tornando a instalação menos eficiente.

A não linearidade das configurações das instalações e a diversidade dos tipos de cabos tornam a análise das perdas um problema complexo. As perdas nas instalações elétricas fazem a diferença na avaliação econômica afetando inclusive o Valor Presente Líquido (VPL) de um investimento. Optar por soluções eficazes é uma importante ação, sob o ponto de vista da rentabilidade econômica, que pode tornar o uso da energia mais eficiente e sustentável (LOBÃO; DEVEZAS; CATALÃO, 2014).

É sabido o quanto a análise das perdas afeta a qualidade técnica da instalação e, consequentemente, seus custos, como aponta o estudo realizado por D’avila (2007). Algumas pesquisas intensificam a atuação dessas perdas sob os aspectos da fabricação dos condutores e da forma de tarifação de energia elétrica. A avaliação de perdas, bem como o desenvolvimento de métodos de redução destas, são importantes para o design dos cabos (ZUBKO; FETISOV; VYSOTSKY, 2016). Para Taylor et al., (2015) as perdas interferem na vida útil dos condutores de distribuição de energia, e seus custos são tão relevantes que poderiam ser considerados na forma de tarifação dos consumidores finais.

A tecnologia vem contribuindo para o aperfeiçoamento dos meios de condução, isto pode ser constatado através do surgimento dos cabos de alimentação supercondutores, que oferecem alta eficiência, prometendo ser esta, a tecnologia chave para a próxima geração de condutores que irá reduzir as perdas de corrente alternada na compacidade estrutural (LI; TAN; YU, 2014) e (LI; XIN; WANG, 2016). Entretanto, mesmo os supercondutores em linhas de transmissão de corrente constante são submetidos à corrente de flutuação e, consequentemente, perdas (OTABE, 2015).

A característica das perdas deve ser criteriosamente analisada através de estudos realizados com foco nos cabos da instalação. Podemos considerar que este estudo toma por base a realização de uma conexão entre o custo mínimo na distribuição de cabos em baixa tensão e seu impacto na eficiência, agregando benefícios de caráter técnico e para a sustentabilidade, sendo uma análise referenciada por meio da alocação do quadro geral de baixa tensão.

2.4 MODELO DE OTIMIZAÇÃO DE REDES

Os modelos de otimização têm como estrutura básica maximizar ou minimizar uma ou mais funções objetivo, respeitando as funções operacionais dos sistemas. Sendo tais funções objetivo, a forma de medir o desempenho de um sistema, em que as variáveis de decisão definem seu modo de operação (SOUSA; SOARES, 2014).

Os modelos de otimização de redes fundamentam problemas que têm estreita relação com questões práticas, da vida real. Pode-se citar o problema do caminho mais curto como sendo uma dessas ferramentas, que cada vez mais tem sido expandido para outros problemas do caminho, como o caminho mais longo, problemas de caminho com múltiplos constrangimentos, problema do caminho com multiobjetivos, caminho dinâmico e o problema do caminho com o comprimento necessário (YANG; ZHU, 2017).

O problema do caminho mais curto pode ser utilizado para resolver problemas das mais diversas áreas, inclusive os pertinentes ao setor elétrico, como pode ser constatado no estudo realizado por Melo, Zambrano-Asanza e Padinha-Feltrin (2017), no qual aplica o método para solucionar o problema relacionado a alocação de novas cargas em redes de distribuição de energia elétrica.

Carrano (2007), em seu trabalho, define o projeto ótimo de rede como uma tarefa de encontrar o conjunto de arestas capazes de minimizar uma dada função de custo, conectando os vértices de um grafo restringindo-se a uma estrutura pré-estabelecida. Diversos aspectos restringem os possíveis métodos que podem ser utilizados para se definir um projeto ótimo de redes. O método simplex, apesar de restrito, pode ser aplicado para indicar uma solução para problemas de redes.

Através da pesquisa realizada para este estudo, pode-se constatar que alguns trabalhos reconhecem o algoritmo simplex como sendo capaz de resolver com êxito, problemas do

caminho mais curto, condicionado às restrições atreladas a cada problema (PONBOON; QURESHI; TANIGUCHI, 2016), (SEVNAZ; ARCHIS, 2017).

2.4.1 Problema do caminho mais curto

O problema do caminho mais curto é uma técnica que permite encontrar o caminho de menor distância entre dois pontos distintos, sendo um inicial e outro final. Considera-se uma rede conectada e não direcionada com dois pontos, um chamado origem e o outro, destino. Associada a cada uma das ligações há uma distância não negativa, que são os arcos não direcionados. Desta forma, busca-se encontrar o menor caminho, considerado ótimo, pois acarretará nos menores custos associado aos nós de origem e destino.

Partindo da origem, o procedimento se espalha em todas as direções, de modo a identificar sempre o caminho mais curto para cada um dos pontos da rede. A identificação dos pontos é realizada em ordem ascendente, buscando sempre a distância mais curta a partir da origem. O problema é solucionado quando o ponto de destino é alcançado (HILLIER; LIEBERMAN, 2013).

Os algoritmos utilizados para solucionar a busca do caminho mais curto, também chamada de busca pela rota mínima, determinam uma rota de menor distância existente entre a origem e o destino. Quando o método é aplicado a alguns problemas práticos, esta distância é considerada custos ou pesos.

Para a solução de problemas da busca pelo caminho mais curto, alguns pacotes de softwares de programação matemática podem ser utilizados. O Excel possui uma ferramenta solver que se baseia no método simplex genérico para formular e solucionar problemas desse tipo, condicionado a um número restrito de arcos e nós.

Desta forma, objetivo do problema da busca pelo caminho mais curto é encontrar o percurso de menor distância, de modo a satisfazer uma demanda enviada de uma origem a um destino por meio de uma rede. Para possibilitar uma análise mais detalhada de uma rede, os pontos existentes entre a origem e o destino são denominados nós e o trajeto entre esses pontos são os arcos.

Cada arco possui um valor associado que representa uma distância. O nó inicial corresponde ao nó de origem e o destino é denominado nó terminal. O problema do caminho

mais curto identifica a rota que minimiza a distância entre dois nós respeitando-se as restrições de fluxo (COLIN, 2015).

Para o nó de origem deve haver uma restrição estabelecendo que a soma das rotas de saída seja igual a 1, pois somente uma delas será utilizada, da mesma forma, para o nó de destino, a soma de todas as rotas de chegada é igual a 1 (COLIN, 2015).

O problema da busca pelo caminho mais curto pode ser redutível a uma formulação mais genérica denominada problema de fluxo em rede com custo mínimo e, por este motivo, pode ser resolvido com a formulação de fluxo em rede com custo mínimo apresentada pela equação a seguir (COLIN, 2015):

$$min\ Z = \sum_{\substack{Todos\ os \\ arcos\ (i,j)}} c_{ij} x_{ij} \tag{1}$$

Sujeito a:

$$\sum\nolimits_j x_{ij} - \sum\nolimits_k x_{ki} = b_i \tag{2}$$

Para cada nó i da rede.

Em que,

c_{ij} = custo por unidade de fluxo no arco (ij);

x_{ij}= número de unidades de fluxo enviados do nó i para o nó j através do arco (i, j);

i = nó de origem;

j = nó destino;

b_i = Oferta líquida, saída menos entrada, no nó i.

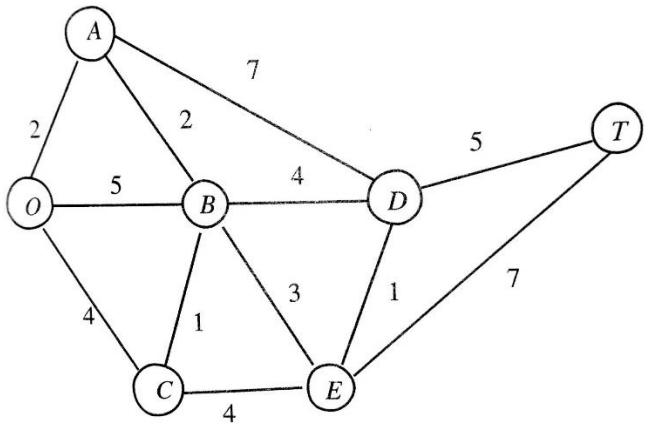
Visto como um problema de programação linear, a variável de decisão x_{ij} representa o trajeto entre os pontos i e j. O fluxo de 1 é designado a um arco (trajeto), caso seja incluído no percurso de menor metragem, ao passo que o fluxo é 0, se ele não for incluído. Portanto, as variáveis de decisão podem ser determinadas da seguinte forma:

x_{ij} = 0 se o trajeto $i \rightarrow j$ não for incluído

x_{ij} = 1 se o trajeto $i \rightarrow j$ for incluído

Um problema clássico solucionado pelo método da busca pelo caminho mais curto é apresentado por Hillier e Lieberman (2013), no qual um viajante pretende encontrar o caminho mais curto entre um ponto de origem (nó O) até um ponto final (nó T) por meio de um sistema viário, visualizado na figura a seguir:

Figura 1 - Implementação do problema do caminho mais curto.



Fonte: HILLIER; LIEBERMAN (2013).

As ligações entre os nós da Figura 1 representam as arestas e possuem um valor associado que especificam à distância, em milhas, correspondente ao trajeto. Após a aplicação de um algoritmo, pode-se constatar duas soluções que determinam o caminho mais curto da origem até o destino, sendo identificados como O → A → B → E → D → T e O → A → B → D → T com uma distância total de 13 milhas em ambos.

2.4.2 Algoritmo simplex

O algoritmo simplex especifica uma região limitada pelas restrições, característica de um problema de pesquisa operacional. Os problemas de pesquisa operacional são modelados na forma de uma função objetivo, e a região delimitada pelas restrições é denominada simplex. É importante ressaltar que apenas os problemas de programação linear podem ter soluções obtidas pelo algoritmo simplex.

Logo, sob a perspectiva matemática, pode-se definir que o algoritmo simplex é o mecanismo que pode ser aplicado para resolver problemas de programação linear. Embora os

problemas de programação linear sejam resolvidos por meio computacionais, a equação apresentada na sequência define a forma padrão dos problemas lineares e permite que seja associada à mesma estrutura de entrada do algoritmo simplex (COLIN, 2015).

$$\text{Minimizar } f(x_1, x_2, \dots, x_n) = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n \quad (3)$$

Sujeito a:

$a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n = b_1$

$a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n = b_2$

$\vdots$

$a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n = b_m$

e

$x_1 \geq 0$

$x_2 \geq 0$

$\vdots$

$x_n \geq 0$

Onde, c_j, b_j e a_{ij} (j = 1, 2, ..., n; i = 1, 2, ..., m) são parâmetros conhecidos, $b_i \geq 0$ e x_j são as variáveis de decisão.

Na forma padrão, tem-se as seguintes características para o problema de programação linear solucionado pelo algoritmo simplex (COLIN, 2015):

- A função objetivo é do tipo minimização;
- Todos os lados direitos das restrições são não negativos;
- Todas as restrições são do tipo igualdade;
- Todas as variáveis de decisão são não negativas.

O algoritmo simplex genérico busca soluções viáveis, de modo que o valor da função-objetivo é diminuído até o ponto ótimo ser alcançado. Para Colin (2015), o algoritmo pode ser definido como contendo três partes: 1- início, etapa em que o algoritmo prepara os dados de entrada; 2- iteração, etapa em que o algoritmo faz a busca pela otimização através da repetição dos procedimentos; e 3- regra de parada, nesta etapa o algoritmo avalia se a solução ótima foi alcançada, ou determina a impossibilidade de obtê-la.

3 ANÁLISE DO PROBLEMA

Neste trabalho, foram abordados os conceitos e regras pertinentes às instalações elétricas de baixa tensão. Portanto, trata-se dos circuitos ligados através do secundário do transformador. É considerada instalação de baixa tensão, a instalação em que o valor eficaz ou constante da sua tensão não excede 1000V, quando em corrente alternada, e 1500V quando em corrente contínua. Define-se a tensão nominal de uma rede de distribuição aquela à qual a rede é relacionada às suas características.

3.1 PROJETOS ELÉTRICOS

O projeto elétrico é uma representação dos equipamentos e dispositivos selecionados e dimensionados com base nas normas técnicas, proporcionando aos usuários das instalações, segurança e efetividade na condução da energia elétrica até os pontos de utilização.

As etapas para a elaboração de um projeto elétrico são determinadas pelo projetista, entretanto, Cotrim (2009) aponta as seguintes etapas a serem adotadas:

- Análise inicial. Trata-se do levantamento de informações que irão orientar o projetista na execução do trabalho;
- Fornecimento de energia normal. Etapa em que são determinadas as condições de alimentação de energia do prédio de acordo com as normas determinadas pelas concessionárias de energia;
- Quantificação da instalação. É realizado o levantamento da carga de uma edificação a fim de se conhecer a potência elétrica presumida;
- Esquema básico da instalação. Esta etapa consiste em especificar uma distribuição dos condutores e alocação dos componentes. São representados os quadros de distribuição e os circuitos de alimentação e terminais;
- Seleção e dimensionamento dos componentes. São realizados os cálculos que resultará no dimensionamento dos condutores, subestação de energia elétrica, quadros de distribuição, aterramento, sistemas de proteção contra descargas atmosféricas. Levantamento das informações necessárias para o dimensionamento dos dispositivos de comando e de proteção;

- Especificações e contagem dos elementos. Especificação dos componentes dimensionados para a instalação.

Quando o tema projetos elétricos em instalações elétricas de baixa tensão é abordado, tem-se que obrigatoriamente se referir a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). As normas brasileiras são elaboras pela ABNT.

A ABNT é o Foro Nacional de Normatização por reconhecimento da sociedade brasileira desde 1940. Trata-se de uma entidade privada, sem fins lucrativos, membro fundador da International Organization for Standardization (Organização Internacional de Normalização - ISO), da Comisión Panamericana de Normas Técnicas (Comissão Pan-Americana de Normas Técnicas - Copant) e da Asociación Mercosur de Normalización (Associação Mercosul de Normalização - AMN), também membro da International Electrotechnical Commission - Comissão Eletrotécnica Internacional – IEC (ABNT, [s.d.]).

A ABNT é responsável pela elaboração das Normas Brasileiras (NBR) através de seus Comitês Brasileiros (ABNT/CB), Organismos de Normalização Setorial (ABNT/ONS) e Comissões de Estudos Especiais (ABNT/CEE). O COBEI, Comitê Brasileiro de Eletricidade, especificamente ABNT/CB-03, um dos 60 Comitês Brasileiros que compõem a ABNT, é composto por mais de 70 subcomitês e determina as normas para a padronização da terminologia até a conservação de energia (ABNT, [s.d.]).

De acordo com a NBR 5410:2004, toda instalação elétrica deve ser executada a partir de um projeto específico, que deve conter no mínimo os seguintes itens:

- Plantas;
- Esquemas unifilares e outros, quando aplicáveis;
- Detalhes da montagem, quando necessários;
- Memorial descritivo da instalação;
- Especificação dos componentes;
- Parâmetro do projeto: correntes de curto-circuito, queda de tensão, fatores de demanda considerados, temperatura ambiente, etc.

Para este estudo é enfatizada a norma técnica mais importante para as instalações elétricas de baixa tensão, trata-se da Norma Brasileira (NBR) 5410:2004 – Instalações Elétricas de Baixa Tensão, revisada em 2008.

É importante ressaltar que a ABNT adotou, como Norma Brasileira por indicação do seu ABNT/CB-03 – Comitê Brasileiro de Eletricidade, a norma MERCOSUL NM 280 para condutores de cabos isolados.

3.2 QUADROS DE DISTRIBUIÇÃO

Os quadros de distribuição, além de permitirem a derivação de condutores, podem ser considerados conjuntos de proteção, manobra e comando. Trata-se do local onde estarão localizados os dispositivos de proteção, que são os disjuntores termomagnéticos, os dispositivos diferencial-residual e os dispositivos de proteção contra surtos. O quadro faz a divisão da instalação em circuitos terminais.

O quadro de distribuição principal, também chamado de quadro geral de baixa tensão, de acordo com a ABNT NBR 5410:2004, deve ser o primeiro quadro de distribuição após a entrada da linha elétrica na edificação. Quando não há mais quadros na edificação, o termo pode ser aplicado a todo quadro de distribuição instalado.

É recomendado que o quadro de distribuição seja instalado em local de fácil acesso e deve ser provido de identificação do lado externo, legível e não facilmente removível (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2004).

A norma da ABNT NBR IEC 60439-3:2004 - Conjuntos de manobra e controle de baixa tensão Parte 3: Requisitos particulares para montagem de acessórios de baixa tensão destinados a instalação em locais acessíveis a pessoas não qualificadas durante sua utilização - Quadros de distribuição, fornece requisitos adicionais para quadros de distribuição, seus invólucros, com ensaio de tipo totalmente testados fixos, contendo dispositivos de proteção e que são destinados a serem utilizados para uso interno, para uso em aplicações domésticas ou em outros locais onde pessoas não qualificadas têm acesso à sua utilização. Os dispositivos de controle e/ou sinalização também podem ser incluídos. Eles são destinados a serem usados em corrente alternada, com uma tensão nominal fase-terra que não exceda 300V. Os circuitos de saída contêm os dispositivos de proteção contra curto-circuito, cada um com uma corrente nominal que não exceda 125A, com uma corrente total de entrada que não exceda 250A (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2004).

Para a definição do número de quadros, algumas informações devem ser consideradas. A definição de cada parte da habitação e a localização dos pontos de utilização e dos equipamentos

são fundamentais para o processo (DIAS, 2013). É possível considerar também os seguintes critérios: versatilidade e flexibilidade desejadas pelo projetista, quantidade de centros de cargas, segurança da instalação e viabilidade econômica. Sendo comum em residências e estabelecimentos comerciais térreos a existência de um único quadro de distribuição; e em edificações com mais de um pavimento, um quadro por andar (CRUZ; ANICETO, 2012).

3.3 LOCALIZAÇÃO DO QUADRO GERAL DE BAIXA TENSÃO

Há uma indicação por parte da literatura existente, que os quadros de distribuição devam estar localizados próximo aos centros de carga da instalação, sendo o centro de carga o local onde há a maior concentração de cargas a serem supridas pela instalação (FILHO, 2013), (CRUZ; ANICETO, 2012), (CAVALIN; SERVELIN, 1998) e (LIMA FILHO, 2001). A escolha do centro de cargas como local para instalação do quadro de distribuição também é apontada como melhoria na segurança, facilidade de execução na instalação e economia (CRUZ; ANICETO, 2012).

O centro de cargas de uma instalação elétrica pode ser definido como o ponto ou região em que está concentrada a maior parcela da potência instalada. Considerando o aspecto do dimensionamento elétrico dos circuitos, a localização do quadro geral de baixa tensão através da determinação do centro de cargas é válida, pois o quadro estando situado na região em que há maior concentração de cargas, as quais ele atende, há uma razoável economia nos condutores, considerando-se as potências individuais das cargas e suas distâncias em relação ao quadro. A localização dos quadros de uma instalação também deverá proporcionar facilidade de acesso, funcionalidade e segurança (LIMA FILHO, 2001).

Em alguns casos, a identificação do centro de cargas é evidente, possibilitando a sua determinação apenas através de uma análise da planta e das informações referentes às cargas a serem instaladas, entretanto nos casos em que a identificação não for clara, será necessário aplicar o método baricentro (CAVALIN; SERVELIN, 1998). Trata-se da ponderação das variáveis quantidade, potência e localização. Os resultados encontrados nas equações seguintes, especificam o local geométrico do centro de cargas da instalação, onde a planta baixa ou parte dela é relacionada a um plano cartesiano, dado pelas coordenadas x e y (CRUZ; ANICETO, 2012).

$$X = \frac{x1 \cdot S_1 + x2 \cdot S_2 + \cdots + xn \cdot S_n}{S_1 + S_2 + \cdots + S_N} \quad (4)$$

$$Y = \frac{y1 \cdot S_1 + y2 \cdot S_2 + \cdots + yn \cdot S_n}{S_1 + S_2 + \cdots + S_N} \quad (5)$$

Em que:

Xn = coordenadas x do gráfico;

Yn = coordenadas y do gráfico;

Sn = potências dos pontos de utilização.

3.4 CONDUTORES ELÉTRICOS

O tema desta dissertação aborda a definição do ponto considerado ótimo para alocação do quadro geral de baixa tensão. Faz-se necessário citar também a regulamentação que trata do dimensionamento de condutores elétricos em baixa tensão, pois a determinação do local de instalação do quadro afetará os resultados e decisões a serem tomadas.

Os cabos condutores de energia elétrica são usados em instalações de baixa tensão para a ligação do transformador ao quadro geral de baixa tensão, através do circuito de alimentação; entre o QGBT e os quadros de distribuição parciais, e entre estes e as cargas, através dos circuitos de distribuição.

Os cabos condutores geralmente são de cobre ou alumínio. A ampacidade (capacidade de condução de corrente), as limitações quanto às dimensões, o custo, e até a massa do cabo, são características que irão determinar a natureza do material condutor. Nas instalações de baixa tensão é predominante a utilização dos condutores de cobre devido às suas superiores características elétricas e mecânicas.

A NBR 5410:2004 – Instalações Elétricas de Baixa Tensão, determina algumas condições que devem ser seguidas para o dimensionamento dos cabos fixados em paredes ou em tetos. Entre essas especificações, considera-se:

- No caso de linhas constituídas por condutos abertos, os cabos devem ser não-propagantes de chama, livres de halogênio e com baixa emissão de fumaça e gases tóxicos. Já os condutos, caso não sejam metálicos ou de outro material incombustível, devem ser não-propagantes de chama, livres de halogênio e com baixa emissão de fumaça e gases tóxicos;
- No caso de linhas em condutos fechados, os condutos que não sejam metálicos ou de outro material incombustível devem ser não-propagantes de chama, livres de halogênios e com baixa emissão de fumaça e gases tóxicos. Na primeira hipótese (condutos metálicos ou de outro material incombustível), podem ser usados condutores e cabos apenas não-propagantes de chama; na segunda, devem ser usados cabos não-propagantes de chama, livres de halogênio e com baixa emissão de fumaça e gases tóxicos.

Entre as definições especificadas pela norma de instalações elétricas em baixa tensão – NBR 5410, encontram-se as máximas intensidades de correntes admissíveis em condutores em função do tipo de eletroduto utilizado. Por razões, sobretudo de segurança, os valores indicados devem ser respeitados, de modo que os isolantes não sejam submetidos às temperaturas incompatíveis com suas características técnicas.

De acordo com a NBR5410:2004 – Instalações Elétricas de Baixa Tensão, os cabos uni e multipolares devem atender às seguintes normas:

- Cabos com isolação de EPR, à ABNT NBR 7286;
- Cabos com isolação de XLPE, à ABNT NBR 7287;
- Cabos com isolação de PVC, à ABNT NBR 7288 ou à ABNT NBR 8661.

Os condutores podem ser instalados de diversas maneiras, pode-se mencionar aqui, por exemplo, a passagem de cabos em bandejas aparentes, em eletrodutos aparentes ou embutidos em alvenaria, e enterrados no solo.

No processo de dimensionamento de condutores elétricos, a determinação da seção dos condutores, norteia-se sob critérios técnicos e econômicos, de modo a satisfazer as seguintes condições:

- Capacidade de condução de corrente;
- Limite de queda de tensão;
- Capacidade de condução da corrente de curto-circuito.

Os condutores têm sua seção especificada de acordo com os valores calculados a fim de obter a secção mínima, para isto o projetista tem o auxílio das informações que apresentam os parâmetros dos condutores, disponibilizadas pela NBR 5410:2004.

3.4.1 Dimensionamento de condutores elétricos

A etapa inicial consiste em determinar o tipo de condutor que será utilizado e a maneira como deverá ser instalado, seguindo as indicações da norma técnica. Em seguida, serão conhecidas as correntes, complementando informações suficientes para determinar a bitola do condutor (CREDER, 2016).

A etapa de dimensionamento dos condutores requer a análise de suas diversas formas construtivas, as características técnicas especificadas afetarão a variação dos custos da instalação.

Os condutores de energia podem ser constituídos por um único fio ou por vários fios que irão formar uma corda. É possível encontrar no mercado diferentes graus de flexibilidade, relacionando a seção total do condutor e a do fio elementar, o passo de encordoamento e o grau de recozimento para o material condutor. Quanto maior o número de fios, mais flexível será o cabo, que devido ao processo de fabricação requerer um número maior de trefilação e encordoamento, elevando os custos do produto acabado.

As características dos materiais isolantes são importantes para a etapa de dimensionamento, pois afetam as perdas em condutores elétricos. Ao se especificar o material isolante dos cabos a serem utilizados na instalação, deve-se observar algumas propriedades consideradas relevantes (TEIXEIRA JUNIOR, 2004):

- Elevada rigidez dielétrica perante solicitações a 60Hz e a impulso;
- Baixas perdas dielétricas;
- Fácil dissipação de calor e, portanto, baixa resistividade térmica;

- Estabilidade térmica em regime permanente durante períodos de emergência e em condições transitórias de curto-circuito;
- Estabilidade de suas propriedades elétricas quando em contato com água;
- Resistência ao envelhecimento nas condições de gradiente elétrico e temperatura de serviço;
- Flexibilidade.

Após a escolha do tipo de condutor e seu material de isolamento, deve-se realizar os cálculos a fim de se especificar a bitola que atenda às condições determinadas pela NBR 5410:2004. Com o intuito de zelar pela segurança das instalações, a norma prevê a seção mínima de condutores fase, a seção do condutor neutro e a seção mínima do condutor de proteção.

Em atendimento a NBR5410:2004, o critério da capacidade de condução de corrente garante uma vida satisfatória aos condutores e às suas isolações, que são submetidas aos efeitos térmicos oriundos da circulação de corrente durante períodos prolongados em serviço normal (CREDER, 2016).

A corrente que circula em um condutor, durante períodos prolongados em funcionamento normal, deve ser tal que a temperatura máxima para serviço contínuo especificada pela norma NBR5410:2004 não seja ultrapassada. As temperaturas características dos condutores podem ser visualizadas através da tabela a seguir:

Tabela 1 - Temperaturas características dos condutores.

Tipo de isolação	Temperatura máxima para serviço contínuo (condutor) ºC	Temperatura-limite de sobrecarga (condutor) ºC	Temperatura limite de curto-circuito (condutor) ºC
Policloreto de vinila (PVC) ≤ 300mm²	70	100	160
Borracha etileno-propileno (ERP)	90	130	250
Polietileno-reticulado (XLPE)	90	130	250

Fonte: NBR5410:2004 (Tabelas 35).

Conforme pode ser observado na Tabela 1, apresentada anteriormente, a capacidade de condução de corrente, também chamada ampacidade, é limitada pela máxima temperatura de operação permissível pela isolação, não apenas em regime permanente de serviço, como também em regime de emergência para sistemas que venham a operar sob contingência, a exemplo de um curto-circuito.

3.4.2 Queda de tensão nos condutores elétricos

Outra condição que deve ser atendida, segundo a NBR 5410:2004 é o limite de queda de tensão. As variações de tensão podem afetar o funcionamento dos aparelhos de energia elétrica, motivo pelo qual a norma da ABNT, NBR 5410:2004 estabelece os percentuais correspondentes às quedas de tensão admissíveis. A tensão nominal de uma instalação elétrica é estabelecida em seu ponto de origem, situado nas conexões dos terminais secundários do transformador MT/BT (Média Tensão e Baixa Tensão) particular, ou da empresa distribuidora de energia elétrica, ou no gerador quando a unidade consumidora possuir geração própria.

As resistências elétricas dos condutores, das emendas nesses e as conexões existentes em uma instalação elétrica provocam uma queda de tensão a partir do ponto de origem da tensão nominal até os pontos de utilização.

Fica estabelecido pela NBR5410:2004, que em qualquer ponto de utilização da instalação, a queda de tensão verificada não deve ser superior ao percentual indicado a seguir, tendo como referência o valor da tensão nominal da instalação:

- 7%, calculados a partir dos terminais secundários do transformador MT/BT, no caso de transformador de propriedade das unidades consumidoras ou da empresa distribuidora de eletricidade, quando o ponto de entrega for ali localizado, ou no caso de geração própria de eletricidade;
- 5%, calculados a partir do ponto de entrega, nos demais casos de ponto de entrega com fornecimento em tensão secundária de distribuição;
- A queda de tensão nos circuitos terminais não pode ser superior a 4%.

As quedas de tensão superiores aos valores indicados pela norma podem ser aplicadas para equipamentos com correntes de partida elevadas, durante o período de partida, desde que atendam às suas normas específicas.

Para o cálculo da queda de tensão deve ser utilizada a corrente de projeto do circuito. Determinada com base na carga estimada para a edificação. Assim, a queda de tensão (ΔV_c) no circuito trifásico pode ser obtida através da seguinte equação (FILHO, 2013):

$$\Delta V_c = \frac{\sqrt{3} \times I_c \times L_c \times (R \times cos\emptyset + X\, sen\emptyset)}{10 \times N_c \times V_{ff}} \ (\%) \qquad (6)$$

Onde,

N_c = número de condutores em paralelo por fase;

I_c = corrente do circuito, em amperes (A);

L_c = comprimento do material condutor no circuito, em metro (m);

R = resistência do condutor, por metro, em miliohm por metro (mΩ/m);

X = reatância do condutor, por metro, em miliohm por metro (mΩ/m);

$\emptyset$ = ângulo do fator de potência da carga;

V_{ff} = tensão entre fases, em volt (V).

A avaliação da queda de tensão percentual sempre deve ser realizada a fim de saber se em algum trecho ultrapassa ou não o limite estabelecido pela NBR5410:2004.

3.4.3 Corrente de curto-circuito presumida

O critério da capacidade de condução de corrente de curto-circuito é mais comum para o suprimento de energia à pequenas cargas, em média tensão, e sistemas que tenham alto nível de curto-circuito (TEIXEIRA JUNIOR, 2004).

Os condutores fase de uma instalação devem ser protegidos, por dispositivos de seccionamento automático, contra sobrecorrentes oriundas de sobrecargas e/ou curtos-circuitos.

As sobrecorrentes podem danificar a isolação e outros materiais próximos aos condutores e por este motivo devem ser analisadas e interrompidas pelos dispositivos de proteção.

Há diversos métodos capazes de calcular a corrente de curto-circuito, de modo a atender o critério do limite de queda de tensão.

As correntes de curtos-circuitos presumidas ($\vec{I}_{cs}$) devem ser determinadas em todos os pontos da instalação, classificados pelo projetista como necessários. Para isto procede-se à soma vetorial de todas as impedâncias ($\vec{Z}_{utot}$) calculadas até o ponto desejado e aplica-se a equação a seguir (FILHO, 2013):

$$\vec{Z}_{utot} = \sum_{i=1}^{i=n} (R_{ui} + jX_{ui})(pu) \tag{7}$$

Onde, R_{ui} e X_{ui} são respectivamente, a resistência e reatância unitárias de cada impedância do sistema até o ponto o qual se pretende determinar o valor da corrente de curto-circuito simétrica.

Logo, a impedância de um circuito está diretamente relacionada com o comprimento deste, pois a resistência e a reatância dos condutores instalados são calculadas com base na metragem dos condutores necessários. A equivalência entre a impedância de um circuito e a extensão dos condutores nele utilizados pode ser constatada através das seguintes equações:

$$R_{c\Omega} = \frac{R_{u\Omega} \times L_c}{1000 \times N_c} \ (\Omega) \tag{8}$$

Onde,

$R_{u\Omega}$ = resistência do condutor de sequência positiva, em miliohm por metro (mΩ/m);

L_c = comprimento do material condutor no circuito o qual se deseja determinar o valor da corrente de curto-circuito, em metro (m);

N_c = número de condutores por fase do circuito analisado.

$$X_{c\Omega} = \frac{X_{u\Omega} \times L_c}{1000 \times N_c} \ (\Omega) \tag{9}$$

Onde,

$X_{u\Omega}$ = reatância de sequência positiva do condutor fase, em miliohm por metro (mΩ/m).

A corrente de base (I_b), necessária para o cálculo da corrente de curto-circuito, pode ser obtida através da seguinte forma:

$$I_b = \frac{P_b}{\sqrt{3} \times V_b} \ (A) \tag{10}$$

Onde,

P_b = potência tomada como base, em quilovolt-ampere (kVA);

V_b = tensão tomada como base, em quilovolt (kV).

O valor eficaz da corrente de curto-circuito simétrica, em quilo-amperes (kA), pode ser determinado aplicando-se a equação vista a seguir:

$$\vec{I}_{cs} = \frac{I_b}{1000 \times \vec{Z}_{utot}} \ (kA) \tag{11}$$

3.4.4 Perdas ôhmicas em condutores

Além dos critérios mencionados, que norteiam o dimensionamento de condutores, os estudos ressaltam a importância da análise econômica para o dimensionamento eficaz dos cabos. Nesse contexto, a apreciação das perdas de energia ao longo da vida útil dos cabos deve ser considerada.

O critério econômico tem levado ao dimensionamento de uma seção maior àquela calculada pelos critérios convencionais. A utilização de cabos, sob a perspectiva da conservação de energia decorrente das menores perdas Joule, torna o investimento superior porém, viável (TEIXEIRA JUNIOR, 2004).

Pode-se considerar que as perdas existentes nas instalações elétricas são de três tipos: Perdas por Efeito Joule, perdas por Histerese, e perdas por correntes de Foucault. As perdas por Efeito Joule e por correntes de Foucault têm relação com os condutores elétricos.

A passagem de corrente através do condutor, ocasiona seu aquecimento, dando origem às perdas por Efeito Joule. Estas perdas são consideradas as mais significativas e variam com o quadrado da corrente elétrica. As perdas por correntes de Foucault são originadas pelas

correntes parasitas induzidas, são mais representativas em condutores de maior secção, sobretudo em circuitos magnéticos de maior porte (ENERGIA, 2005).

Os principais desenvolvimentos da tecnologia de fios de cabos estão voltados para a melhoria dos isolantes, o que não tem efeito em economia de energia. Os condutores, atualmente têm uma elevada capacidade de condução de corrente, são capazes de suportar por um tempo prolongado, temperaturas maiores. Logo, as perdas por efeito Joule crescem proporcionalmente devido à resistividade causada pelo aumento da temperatura (ENERGIA, 2005).

Todos os elementos utilizados em um sistema de distribuição apresentam uma resistência, que quando há passagem de corrente, dissipa uma potência na forma de calor, originando as chamadas perdas ôhmicas ou perdas Joule.

Especificamente nos cabos de energia, diversos pontos de calor podem ser encontrados. Tais fontes de calor se devem não apenas as perdas Joule, mas também às perdas no revestimento metálico e às perdas dielétricas. Todas as perdas têm influência significativa no consumo de energia e, principalmente, na demanda de potência solicitada à rede elétrica. Por serem mais relevantes, as perdas nos cabos condutores foi objeto de estudo deste trabalho.

O cálculo da resistência elétrica (R) de um condutor cilíndrico obedece à segunda lei de Ohm, sendo efetuado através da equação a seguir.

$$R = \frac{\rho \times Lc}{S} \tag{12}$$

Onde:

ρ = a resistividade do material ou resistividade do volume com o qual o condutor é feito, em ohm metro (Ω.m);

Lc = o comprimento do material condutor no circuito, em metro (m);

S = a área da secção transversal do condutor, em metro quadrado (m²).

Em corrente alternada, a resistência (R_{CA}) por extensão de cabo, considera as perdas causadas pelo efeito pelicular e pelo efeito da proximidade. O efeito pelicular é o fenômeno que provoca maior valor da densidade de uma corrente perto da superfície externa de um condutor do que no seu interior, pois em corrente alternada não existe uma distribuição uniforme de corrente pela seção do condutor. A corrente tende a circular mais pela periferia. O efeito da

proximidade é o fenômeno caracterizado por uma distribuição não uniforme da densidade de corrente de um condutor, causada pela influência da corrente em condutores próximos, o que contribuirá para a diminuição da seção útil do condutor (COTRIM, 2009).

Dessa forma,

$$R_{CA} = R + \Delta R \ (\Omega/km) \tag{13}$$

Onde:

R_{CA} = resistência em corrente alternada, em ohm (Ω);

R = resistência em corrente contínua, em ohm (Ω).

Sendo,

$$\Delta R = R(\gamma_s + \gamma_p) \tag{14}$$

Onde γ_s e γ_p são fatores relacionados aos efeitos pelicular e de proximidade, respectivamente, sendo obtidos pelas próximas equações apresentadas.

$$\gamma_s \frac{x_s^4}{192 + 0{,}8x_s^4} \tag{15}$$

Com

$$x_S = \left(\frac{8\pi f}{R} \cdot 10^{-4} \cdot k_S\right)^{1/2} \tag{16}$$

e

$$\gamma_p = \frac{x_P^4}{192 + 0{,}8x_P^4} \cdot \left(\frac{d_c}{l}\right)^2 \left[0{,}312 \cdot \frac{d_c^2}{l} + \frac{1{,}18}{\frac{x_P^4}{192 + 0{,}8x_P^4} + 0{,}27}\right] \tag{17}$$

Com

$$x_P = \frac{8\pi f}{R} \cdot 10^{-4} \cdot k_P \tag{18}$$

Onde:

d_c = diâmetro do condutor, em milímetro (mm); para cabos com condutores setoriais d_c = d_x = diâmetro equivalente de um condutor circular de mesma seção;

l = distância entre eixos dos condutores, em milímetro (mm); para cabos com condutores setoriais l = d_x + $2c$, sendo c a espessura do material isolante (mm);

f = frequência, em hertz (Hz);

k_s e k_p = valores experimentais, muitas vezes tomados iguais à unidade.

As perdas por efeito Joule (P_j) especificadas em watt por quilômetro, em um condutor podem ser obtidas pela seguinte equação:

$$P_j = R_{CA} \cdot I_B^2 \text{ (W/km)} \tag{19}$$

Onde:

I_B = corrente de projeto que circula pelo condutor, em ampere (A).

As perdas oriundas por efeito Joule representam a energia dissipada para o meio em forma de calor. É importante ressaltar que a perda analisada, conhecida por meio da Equação 19, compõe uma significativa parcela do consumo de energia elétrica, podendo este consumo ser determinado com base na corrente nominal (medida) da instalação elétrica, através da equação a seguir:

$$E = R\, i_{nom}^2 \Delta T \tag{20}$$

Onde:

E = energia dissipada ao longo do cabo, em watt hora (Wh);

R = resistência elétrica do condutor, em ohm (Ω);

i_{nom} = corrente nominal do circuito, em ampere (A);

ΔT = intervalo de tempo de funcionamento do circuito, em hora (h).

Analisando a Equação 19, que determina as perdas ôhmicas em condutores, constata-se a possibilidade de redução das perdas proporcionalmente à redução da resistência dos condutores e/ou da corrente que circula por eles.

Pode-se constatar então que as perdas ôhmicas (efeito Joule) representam uma parcela da energia consumida e, além disso o comprimento Lc dos condutores tem impacto nesta parcela. Neste caso, uma análise relacionada a essas perdas deve ser realizada com o intuito de possibilitar uma minimização.

O dimensionamento de condutores e a determinação do layout de distribuição ainda na planta baixa compõem uma etapa da elaboração de projetos que pode conduzir a soluções com baixas perdas (FILHO, 2013). Logo, o dimensionamento correto dos condutores não é apenas uma questão de segurança, mas é principalmente uma maneira de evitar desperdícios de energia.

Para tornar a instalação mais eficiente, é fundamental calcular a secção ótima e mais econômica dos condutores. Uma medida de conservação de energia é a realização dos cálculos dos custos dos cabos e sua energia de perda (FILHO, 2013).

A NBR 5410:2004 determina a bitola mínima dos condutores, entretanto a relação entre eficiência e economia torna-se um problema complexo, pois quanto maior a bitola dos condutores, menor é a sua resistência e, consequentemente, menores serão as perdas por efeito Joule. É necessário atender às normas, encontrar alternativas de proporcionar qualidade técnica que resultem em economia de investimento e energia, estabelecendo, desta forma, um equilíbrio.

Com o objetivo de reduzir as perdas que surgem por conta da resistência nos condutores, na literatura disponível constam as seguintes indicações:

- Instalar materiais condutores que possuam baixa resistividade;
- Utilizar condutores de maior secção transversal;
- Reduzir o comprimento dos condutores.

Logo, pode-se afirmar que a redução do comprimento dos condutores é a indicação mais viável para os circuitos de baixa tensão, pois através da redução do comprimento dos condutores é possível reduzir em proporção direta, a resistência total. Tal indicação pode ser atendida

através de uma análise da configuração dos circuitos de distribuição na planta baixa, de modo a obter a solução que apresente sempre o menor comprimento possível.

A maioria das instalações elétricas industriais, sobretudo as de médio e pequeno porte, e instalações comerciais, possuem sistemas de distribuição radial, onde os transformadores de média-baixa tensões se encontram instalados próximo à entrada de energia. A carga final dessas instalações é alimentada por meio de quadros de distribuição parcial, e estes, são alimentados por um quadro geral de baixa tensão, que por fim, possuem a energia elétrica fornecida pelo transformador. Esse arranjo, que encarece a instalação, eleva consideravelmente as perdas de energia.

Para obter melhores resultados quanto à eficiência, é indicado a implantação de transformadores aos centros de consumo, possibilitando menor metragem dos circuitos secundários, porém nem sempre é admissível, devido aos impedimentos impostos pelas estruturas arquitetônicas.

É possível determinar o local considerado adequado para a instalação do quadro geral de baixa tensão, de modo a propiciar a melhor eficiência dos condutores utilizados na instalação, e assim auxiliar ao projetista fornecendo-lhe mais informações e otimizando este processo decisório, garantindo melhores resultados.

3.5 LOCALIZAÇÃO DOS QUADROS NO PROJETO MODELO

Os custos atribuídos às instalações devem ser levados em consideração, pois afetam a viabilidade econômica do empreendimento. É um grande desafio encontrar a combinação perfeita entre o menor valor possível de insumos e a eficiência das instalações, sempre as adequando às normas técnicas, atendendo aos requisitos de segurança, sobretudo com foco em soluções que contribuam para a sustentabilidade.

Nesse estudo, com a intenção de avaliar a aplicação do problema da busca pelo caminho mais curto na determinação do local de instalação do quadro geral de baixa tensão, analisou-se a aderência do método proposto através da análise de um caso real.

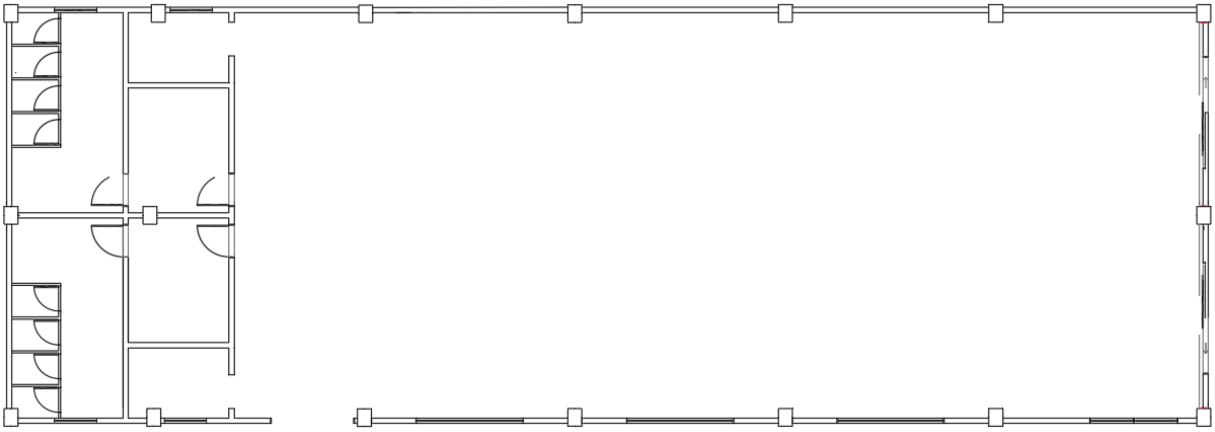
Os condutores do projeto utilizado como modelo foram dimensionados com base nos critérios especificados por norma, sob dadas condições da instalação e operação, considerando a temperatura de operação e analisando as condições de instalação de carregamento.

Os quadros de distribuição em baixa tensão sempre devem ser instalados próximo às cargas, isto porque encontrar o local onde se encontra a maior concentração de cargas permitirá uma redução dos condutores utilizados na alimentação dos equipamentos instalados. Entretanto, em instalações elétricas, outros fatores devem ser analisados, tais como: a impossibilidade de instalação em locais que tenham a circulação de pessoas, localização de equipamentos, características estruturais do edifício que dificultem o acesso ao quadro, ou mesmo a impossibilidade por conta da proximidade às janelas, portas, vigas, colunas, etc.

Para aplicação do método proposto por este estudo foi utilizado como exemplo uma planta baixa de uma edificação comercial (Figura 2), localizada em Alagoas, com as seguintes características:

- A edificação tem 3 pisos, de modo que toda a estrutura constitui uma academia de ginástica. Para uma melhor compreensão da aplicação do método indicado adotou-se apenas o primeiro piso, constituído por uma área total de 412,08m², de dimensões: 34,34m x 12,00m, cuja altura do teto é de 3m;
- Os equipamentos tais como esteiras rolantes, televisores, sistema de sonorização, condicionadores de ar e iluminação, compõem o conjunto das cargas instaladas no piso tomado para análise;
- A instalação deverá ter um quadro principal, aqui chamado de quadro geral de baixa tensão (QGBT), e foi determinado que serão necessários dois quadros parciais de distribuição (Q1 e Q2). Todos os quadros deverão ser instalados a uma altura de 1,60m em consideração ao piso acabado;
- Foram dimensionados: o circuito de alimentação, que compõe a relação dos condutores instalados entre o transformador, situado a 1,70m de altura em relação piso acabado, e o QGBT, sendo a distribuição dos condutores do tipo enterrada no piso até a entrada do edifício, de onde segue pela parede por eletrodutos; 23 circuitos alimentados pelo Q1; e 9 circuitos alimentados pelo Q2, cujas as distribuições dos condutores serão realizadas por meio de eletrocalhas instaladas a 2,70m de altura em relação ao piso acabado;
- De acordo com as normas técnicas utilizadas pela concessionária de energia, Eletrobras Alagoas, o edifício possui fornecimento primário de distribuição, alimentado com uma tensão de 13800V, devendo, portanto, abrigar subestação própria.

Figura 2 - Planta baixa do projeto modelo.



A tabela exibida a seguir, apresenta as potências estimadas no projeto elétrico, expressas em volt-ampere, que cada quadro tem que alimentar.

Tabela 2 - Descrição das potências por quadro.

Tipo de Quadro	Abreviatura	Potência (VA)
Quadro Geral de Baixa Tensão	QGBT	108468
Quadro de distribuição parcial 1	Q1	53258
Quadro de distribuição parcial 2	Q2	33540

Através dessas informações, cabe ao projetista definir o melhor local para a instalação dos quadros. Essa decisão irá afetar consideravelmente toda a instalação, visto que todos os condutores dos circuitos deverão partir do quadro geral de baixa tensão até os quadros parciais, e destes até às cargas. Nesse caso, torna-se fundamental o desenvolvimento de técnicas que auxiliem e garantam ao projetista uma decisão bem fundamentada.

Após a etapa que consiste em determinar a alocação do QGBT, estabelecendo também a localização dos quadros parciais de distribuição na planta baixa, determina-se o traçado dos condutores, ponderando a viabilidade de manutenção e buscando o caminho que resulta na menor quantidade necessária. Os condutores devem desviar de pilares, vigas e paredes divisórias.

A definição do local de instalação do QGBT pode aumentar ou reduzir a quantidade necessária de condutores para a alimentação dos quadros parciais de distribuição, logo, interfere nos custos dos cabos elétricos. A princípio, o QGBT deve estar posicionado o mais próximo possível do ponto de alimentação do edifício, considerada a origem da instalação, visto que os condutores que partem do ponto de entrega de energia até o QGBT são os de maiores espessuras. Os dispositivos de proteção contra corrente de curto-circuito devem ser localizados na origem da instalação, no ponto em que proporcione uma redução do valor da capacidade de condução de corrente dos condutores (COTRIM, 2009). Também há uma indicação que este, deva estar instalado junto ao centro de cargas, ou seja, próximo à área de concentração das cargas, permitindo uma redução dos cabos elétricos utilizados na alimentação dos quadros parciais de distribuição.

Outro fator a ser analisado, quando o estabelecimento requer subestação própria, é a distância máxima entre a subestação e o quadro geral de baixa tensão, e entre este e os quadros parciais de distribuição, que deve ser mensurada de modo que não supere o limite máximo de queda de tensão permitida.

A próxima tabela apresenta as correntes do projeto (I_B) calculadas e a seção dos condutores fase, neutro e de proteção, dimensionados para a alimentação do QGBT e dos quadros parciais de distribuição, Q1 e Q2, referente ao projeto modelo.

Tabela 3 - Corrente do projeto e seção dos condutores.

Alimentação	Corrente I_B (A)	Fase (mm²)	Neutro (mm²)	Proteção (mm²)
QGBT	169,10	70	70	70
Q1	84,86	25	25	25
Q2	54,55	16	16	16

A NBR NM 280 apresenta as características dos condutores de cobre instalados em baixa tensão. As informações referentes aos condutores de cobre especificados no projeto modelo podem ser visualizadas na tabela com as características dos condutores flexíveis de cobre (Tabela 4).

Tabela 4 - Características dos condutores flexíveis de cobre.

Seção nominal (mm²)	Cabos contíguos	
	R_{ca} (Ω/km)	X (Ω/km)
16	1,3761	0,118
25	0,8701	0,121
70	0,3215	0,111

Fonte: (TEIXEIRA JUNIOR, 2004)

A Tabela 4 apresenta a resistência em corrente alternada (R_{ca}) e a reatância (X), como parâmetros elétricos para cabos condutores de cobre, com isolação em PVC, 750V, dimensionados para os circuitos de alimentação dos quadros apresentados no projeto modelo. Os valores correspondem aos cabos contíguos, e R_{ca} a 70ºC.

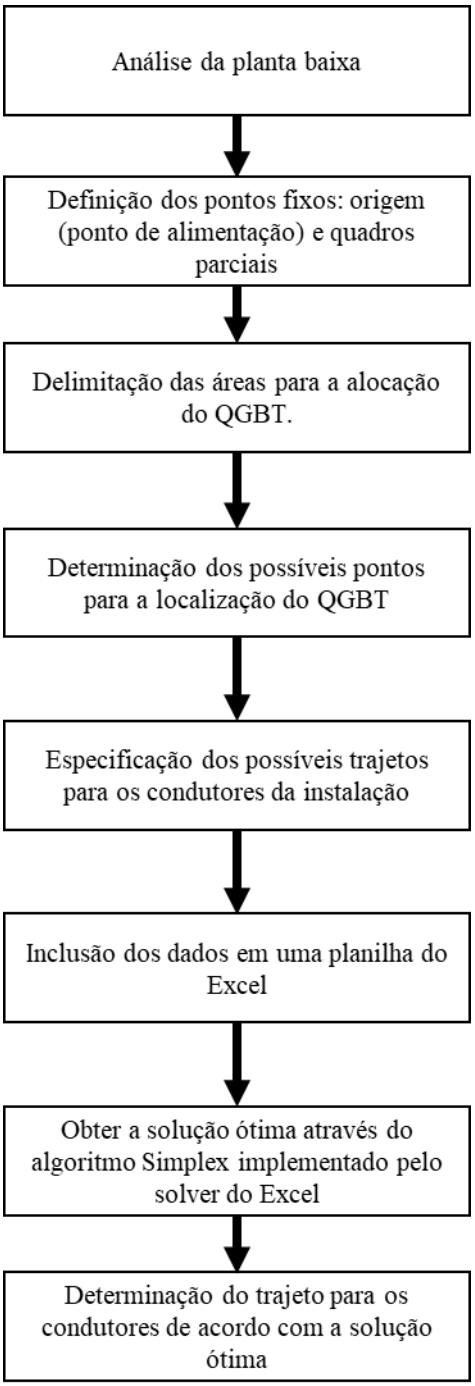
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 SOLUÇÃO OBTIDA ATRAVÉS DA BUSCA PELO CAMINHO MAIS CURTO

Para encontrar a solução que corresponde ao ótimo local de instalação do QGBT, foi considerado o problema clássico de redes, onde a distribuição dos condutores elétricos de uma instalação foi associada a uma rede. Visto como o problema da busca pelo menor caminho, em que o intuito é sair de uma origem e chegar a um destino passando através dos nós existentes, de modo a encontrar o menor trajeto. Para a resolução, foi utilizado o suplemento solver do Excel, de propriedade da Microsoft. Trata-se de uma ferramenta de fácil manipulação, que atende as exigências de performance e apresenta resultados que garantem uma otimalidade.

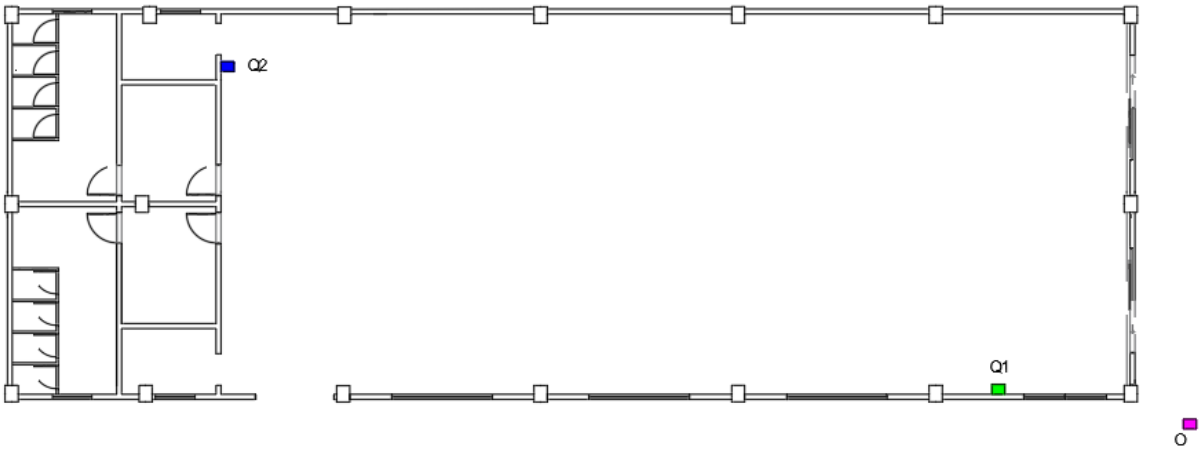
Para ilustrar a implementação do método de otimização de redes na alocação de um quadro geral de baixa tensão através da busca pelo caminho mais curto, foram considerados os dados já apresentados correspondentes ao projeto das instalações elétricas referente à edificação analisada neste estudo, e a realização dos procedimentos, estruturados na figura a seguir:

Figura 3 - Etapas para a implementação do método da busca pelo caminho mais curto.



A Figura 4, apresentada a seguir, mostra a planta baixa com a localização dos quadros parciais de distribuição Q1 e Q2. Também está representado o ponto O, que marca o início da instalação, ou seja, a origem, no qual está situado o transformador. Todos os elementos ilustrados na figura são considerados fixos, portanto suas localizações são inalteradas.

Figura 4 - Representação dos pontos fixos no projeto modelo.



Onde,

- Origem da instalação, ponto de instalação do transformador (O);
- Ponto de instalação do quadro de distribuição parcial 1 (Q1);
- Ponto de instalação do quadro de distribuição parcial 2 (Q2).

Analisando a planta baixa, com base nas restrições mencionadas que impossibilitam a alocação de um quadro de distribuição, pode-se delimitar as áreas impedidas e as áreas que são admissíveis de serem utilizadas para a alocação do QGBT (Figura 5).

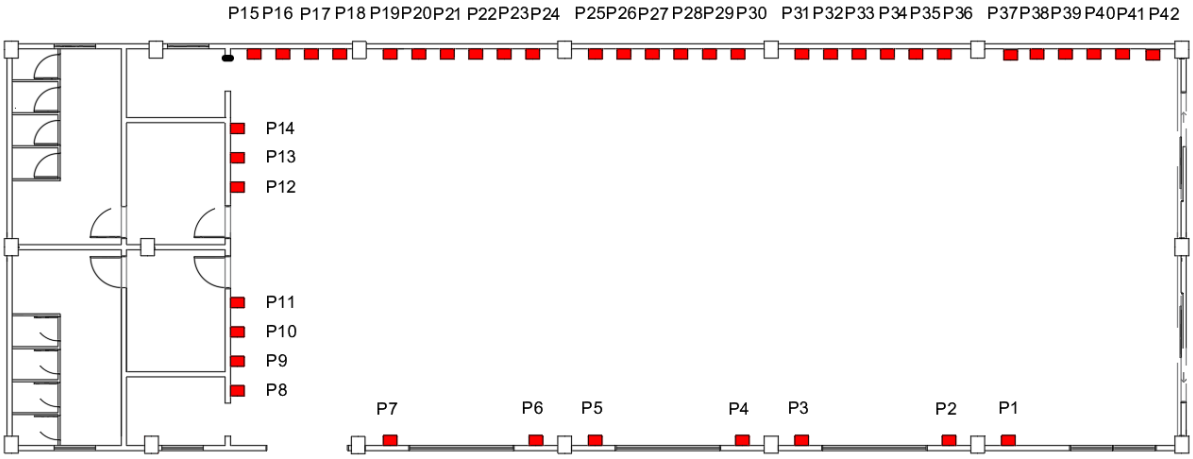
Figura 5 - Delimitação das áreas para alocação do quadro geral de baixa tensão (QGBT).

Onde,

- Colunas e paredes.
- Área impossibilitada de alocar o QGBT devido às restrições.
- Área possível para alocação do QGBT.

Considerando as restrições determinadas pelas normas técnicas e os impedimentos pertinentes à estrutura do edifício, como por exemplo, a localização das portas, janelas e das colunas, baseando-se também na funcionalidade, foram determinados os pontos P1 ao P42, vistos na Figura 6, possíveis e viáveis para a instalação do quadro geral de baixa tensão. A determinação dos 42 pontos levou em consideração um QGBT que possui uma largura correspondente a 0,43m, sendo esses pontos distribuídos proporcionalmente ao longo da área possível para alocação, vista na Figura 5.

Figura 6 - Representação dos possíveis pontos de localização do QGBT.



Onde,

- Possível ponto para localização do QGBT (P1 ao P42).

A solução adequada para a localização do QGBT indica o menor trajeto para os condutores distribuídos no trecho entre o transformador e o QGBT; e para os condutores que saem do QGBT para alimentar os quadros parciais de distribuição Q1 e Q2, tendo como opção de passagem os pontos de intersecção N1 ao N9, que possibilitam opções distintas de trajetos, conforme pode-se identificar na Figura 7, apresentada adiante.

Considerando os possíveis locais de referências para posicionar o quadro geral de baixa tensão e os quadros parciais de distribuição, pode-se determinar os possíveis trajetos para os condutores, conforme exposto amplamente na Figura 7, através das linhas na cor vermelha.

O traçado proposto para os condutores se encontra detalhado na Figura 8. A análise dos possíveis percursos permite determinar o caminho mais curto, que consequentemente irá acarretar em menor metragem para condutores instalados nos circuitos de alimentação dos quadros.

Figura 7 - Trajeto dos condutores

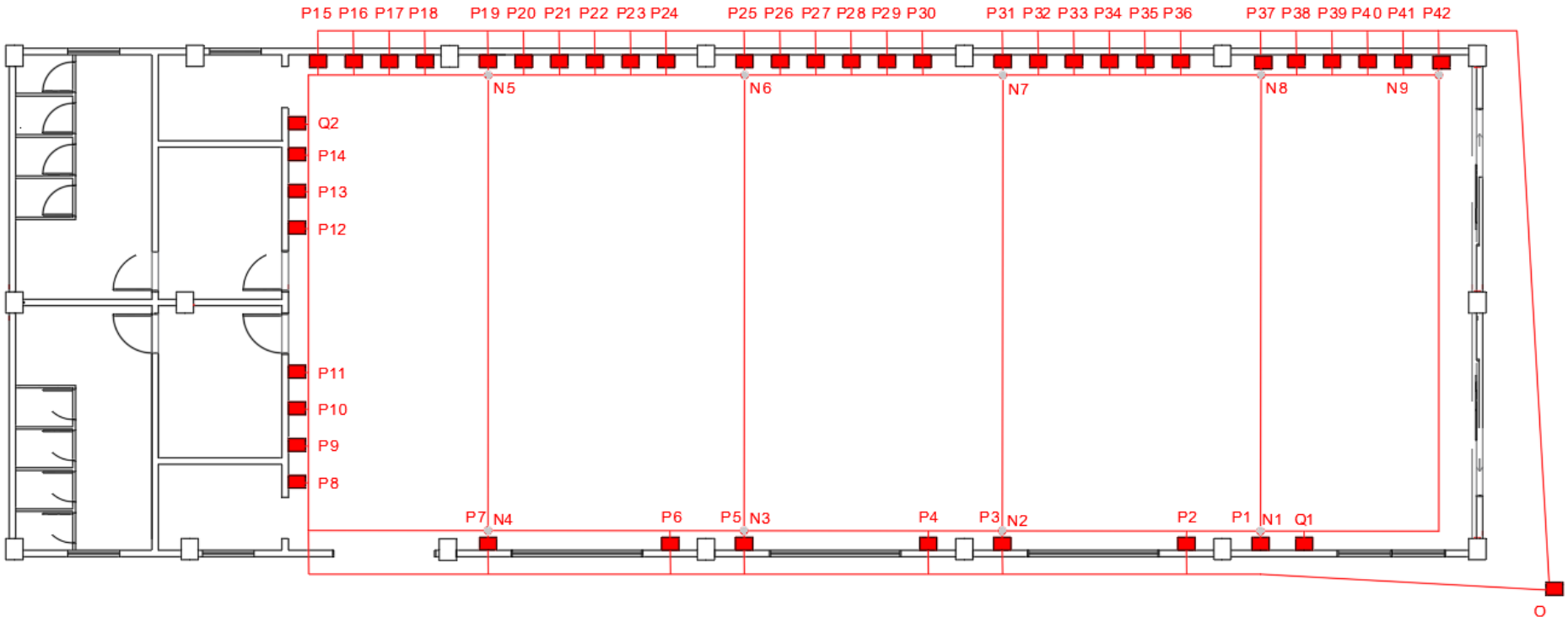
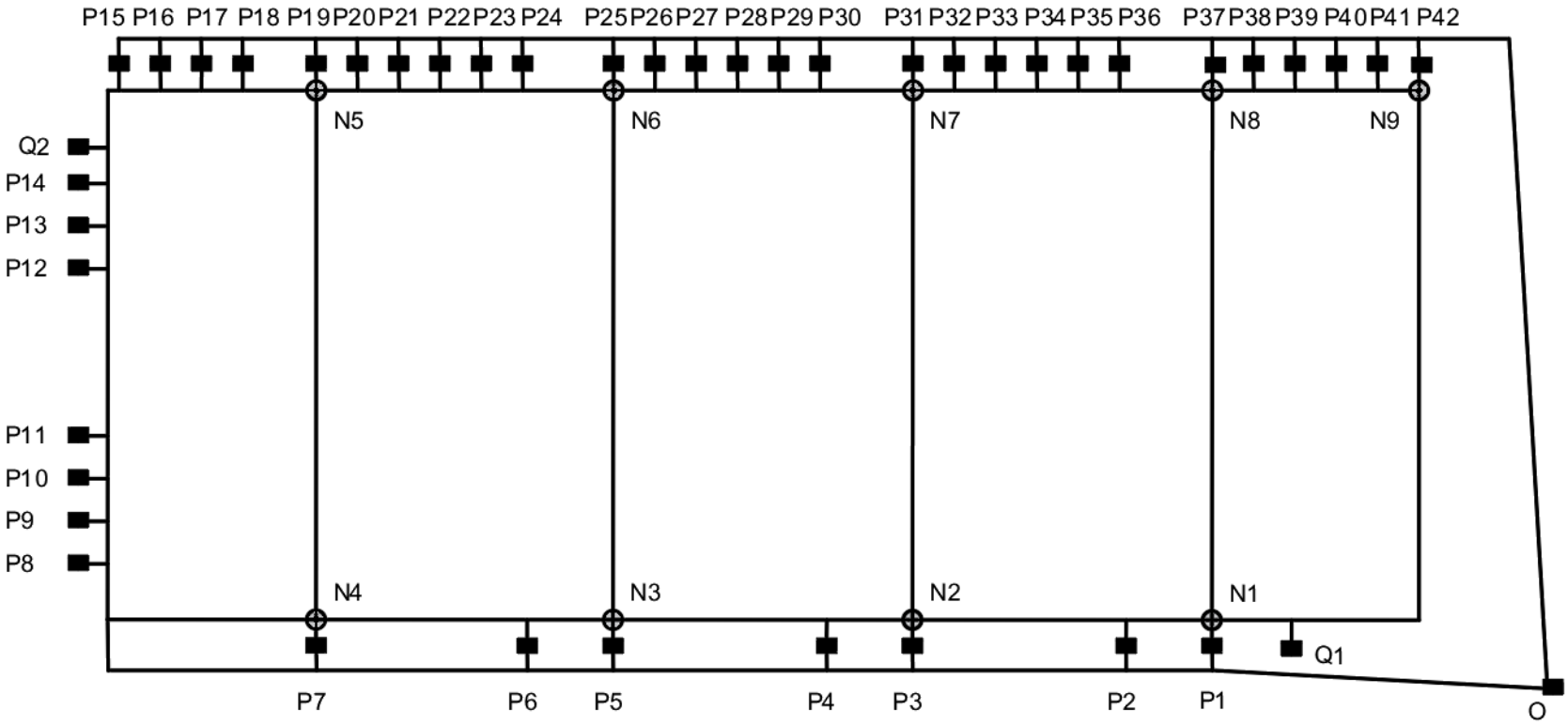


Figura 8 - Detalhamento dos possíveis trajetos para os condutores.



Para encontrar o caminho mais curto para a instalação dos condutores foi utilizado o Excel, pois este software é capaz de oferecer uma maneira conveniente de formulação na resolução de problemas do caminho mais curto que incluam dezenas de arcos e nós, para isso utilizando o algoritmo simplex. A Tabela 5 apresenta os dados inseridos na planilha do Excel que correspondem às conexões entre os pontos já especificados na planta baixa do projeto modelo. Os pontos identificados na planta, considerados nós, são conectados, e formam os arcos que estão relacionados na coluna "Trajetos" da tabela; e a metragem correspondente ao comprimento entre esses pontos são apresentadas pela coluna "Distâncias".

Cada arco na rede é considerado não direcionado, entretanto cada ligação poderá ser substituída por um par de arcos direcionados em direções opostas enquanto a busca pelo caminho mais curto em uma direção é efetuada. Dessa forma, os arcos N1N2, N2N1, N2N3, N3N2, N3N4, N4N3, N5N6, N6N5, N6N7, N7N6, N7N8 e N8N7 são representados duas vezes, uma com o arco em um sentido e outra no sentido oposto, pois são ligações que podem definir o caminho a ser escolhido. As demais ligações são representadas em um único sentido, visto que é a única direção viável a ser escolhida entre a origem e o destino.

O arco da rede que for incluído no caminho mais curto é interpretado com fluxo 1 na coluna "Rota" da tabela que contem os dados da amostra (Tabela 5), evidenciado através das linhas que contêm o fundo em negrito, do contrário, o valor 0 é atribuído. Essa informação irá definir a rota que apresenta melhor solução para o problema. Cada um dos arcos foi considerado na busca.

A equação que busca o caminho mais curto, bem como as restrições correspondentes ao fluxo de oferta e demanda para cada nó foram especificadas no software e o resultado apresentado consistiu na solução ótima indicada.

Tabela 5 - Dados da amostra.

Trajetos	Na rota	Distâncias (m)	Trajetos	Na rota	Distâncias (m)
OP1	1	10,75	P23N5	0	4,86
OP2	0	12,23	P23N6	0	4,20
OP3	0	16,56	P24N5	0	5,69
OP4	0	18,23	P24N6	0	3,37
OP5	0	22,56	P25N6	0	1,55
OP6	0	24,23	P26N6	0	2,38
OP7	0	28,56	P26N7	0	6,72
OP8	0	34,60	P27N6	0	3,21

Tabela 5 - Dados da amostra.

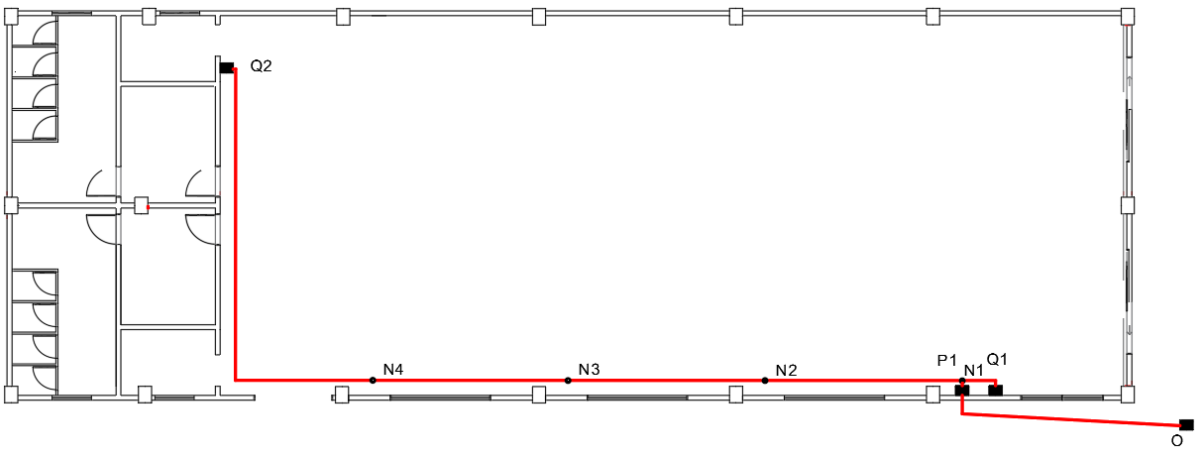
OP9	0	35,47	P27N7	0	5,89
OP10	0	36,34	P28N6	0	4,03
OP11	0	37,20	P28N7	0	5,07
OP12	0	40,56	P29N6	0	4,86
OP13	0	41,42	P29N7	0	4,24
OP14	0	42,28	P30N6	0	5,69
OP15	0	44,84	P30N7	0	3,41
OP16	0	44,01	P31N7	0	1,55
OP17	0	43,18	P32N7	0	2,38
OP18	0	42,35	P32N8	0	6,72
OP19	0	40,88	P33N7	0	3,21
OP20	0	40,05	P33N8	0	5,89
OP21	0	39,22	P34N7	0	4,03
OP22	0	38,39	P34N8	0	5,07
OP23	0	37,56	P35N7	0	4,86
OP24	0	36,73	P35N8	0	4,24
OP25	0	34,91	P36N7	0	5,69
OP26	0	34,08	P36N8	0	3,41
OP27	0	33,25	P37N8	0	1,55
OP28	0	32,42	P38N8	0	2,38
OP29	0	31,59	P39N8	0	3,21
OP30	0	30,76	P40N8	0	4,03
OP31	0	28,90	P41N8	0	4,86
OP32	0	28,07	P38N9	0	4,86
OP33	0	27,24	P39N9	0	4,03
OP34	0	26,41	P40N9	0	3,20
OP35	0	25,58	P41N9	0	2,37
OP36	0	24,74	P42N9	0	1,55
OP37	0	23,92	N8N1	0	10,63
OP38	0	22,06	N9N1	0	14,78
OP39	0	21,23	N9N8	0	4,13
OP40	0	20,40	N7N8	0	6,00
OP41	0	19,57	N8N7	0	6,00
OP42	0	18,74	N7N2	0	10,63
P1N1	1	1,55	N6N7	0	6,00
P2N2	0	5,83	N7N6	0	6,00
P2N1	0	3,27	N6N3	0	10,63
P3N2	0	1,55	N5N6	0	6,00
P4N2	0	5,83	N6N5	0	6,00
P4N3	0	3,26	N5N4	0	20,56
P5N3	0	1,55	N3N4	1	6,00
P6N3	0	3,27	N4N3	0	6,00
P6N4	0	5,78	N2N3	1	6,00

Tabela 5 - Dados da amostra.

P7N4	0	1,55	N3N2	0	6,00
P8N4	0	6,85	N1N2	1	6,00
P9N4	0	7,71	N2N1	0	6,00
P10N4	0	8,57	N1Q1	1	2,31
P11N4	0	9,43	N9Q1	0	15,56
P12N4	0	12,79	P8Q2	0	11,45
P13N4	0	13,65	P9Q2	0	10,60
P14N4	0	14,51	P10Q2	0	9,74
P15N5	0	5,50	P11Q2	0	8,89
P16N5	0	4,67	P12Q2	0	5,53
P17N5	0	3,85	P13Q2	0	4,67
P18N5	0	3,02	P14Q2	0	3,82
P19N5	0	1,55	P15Q2	0	4,47
P20N5	0	2,38	P16Q2	0	5,30
P20N6	0	6,68	P17Q2	0	6,12
P21N5	0	3,21	P18Q2	0	6,95
P21N6	0	5,85	N4Q2	1	15,20
P22N5	0	4,03	N5Q2	0	6,88
P22N6	0	5,03			

A solução indicada pelo algoritmo simplex através do solver do Excel para a instalação do QGBT foi o ponto P1, e a distribuição dos condutores deverá seguir o trajeto em vermelho visto na Figura **9**9, a seguir. O caminho mais curto resultou em um trajeto que correspondeu a 49,36m de comprimento.

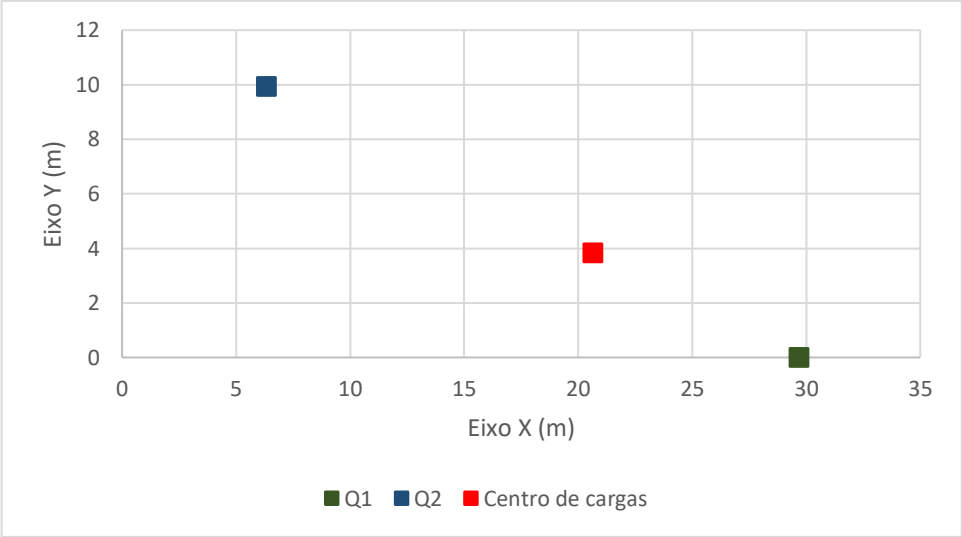
Figura 9 - Trajeto dos condutores, considerando o QGBT no ponto adequado.



4.2 SOLUÇÃO OBTIDA ATRAVÉS DA LOCALIZAÇÃO DO CENTRO DE CARGAS

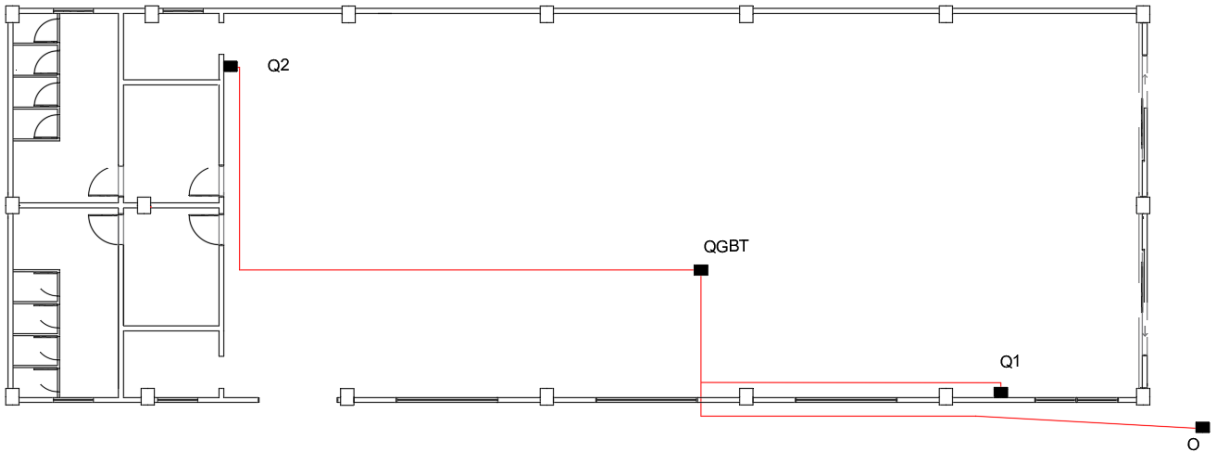
A disposição espacial dos quadros parciais Q1 e Q2, estabelecidos como pontos fixos, localizados junto às cargas que irão alimentar, e o centro de cargas identificado no projeto modelo, encontrado com base nos parâmetros abordados no capítulo 3, podem ser vistos na Figura 10, que relaciona o plano espacial à planta baixa do projeto modelo.

Figura 10 - Disposição espacial dos quadros de distribuição parciais e do centro de cargas no projeto modelo.



A configuração da distribuição dos condutores na planta baixa, considerando o QGBT localizado no centro de cargas, está representada na Figura 11. A linha na cor vermelha representa o trajeto para a distribuição dos condutores. As condições arquitetônicas não foram analisadas, pois o intuito é avaliar a solução com base na localização do QGBT situado exatamente no centro de cargas, conforme indicação da literatura.

Figura 11 - Trajeto dos condutores considerando o QGBT no centro de cargas.



Considerando o QGBT exatamente no centro de cargas, seriam necessários 62,58m de condutores para a realização da instalação.

4.3 ANÁLISE DAS SOLUÇÕES

Com o intuito de avaliar a aderência da solução obtida através da implementação do método do algoritmo genético para determinar o local de instalação do quadro de distribuição, Vianna (2015), em seu estudo obteve resultados significativos. Com base nos dados reais de uma indústria mecânica, foi obtida uma redução de 45,9% dos custos atrelados aos condutores dimensionados quando comparado ao projeto realizado com o método tradicional, como também foram obtidas reduções das perdas por efeito Joule e na emissão de CO_2. O resultado apresentado evidencia a importância de métodos alternativos, que possam garantir eficiência nas instalações elétricas, sobretudo uma redução dos custos. Semelhante ao estudo de Vianna (2015), os resultados apresentados neste trabalho demonstram um viés capaz de proporcionar ganhos técnicos e consequentemente, financeiros.

A seguir, são realizadas as comparações entre os resultados obtidos com o método da busca pelo caminho mais curto, proposto pelo trabalho, e o método indicado pela literatura utilizada como referência para este trabalho, e tradicionalmente adotado, em que o QGBT deve ser localizado no centro de cargas.

Nas colunas X e Y da Tabela 6 são apresentadas, através de uma relação com as coordenadas geográficas associadas à planta baixa do projeto modelo, as localizações dos quadros, considerando cada um dos métodos estudados.

Tabela 6 - Coordenadas geográficas dos quadros.

Quadros elétricos	Caminho mais curto		Centro de cargas	
	Eixo		Eixo	
	X (m)	Y (m)	X (m)	Y (m)
QGBT	28,93	0	20,68	3,83
Q1	29,70	0	29,70	0
Q2	6,34	9,92	6,34	9,92

Quando se altera a localização do QGBT, afeta-se ao mesmo tempo o comprimento entre ele e os quadros parciais Q1 e Q2. Esta alteração de comprimento irá alterar a metragem dos condutores utilizados na instalação e por consequência terá efeitos nos valores da queda de tensão, da proteção contra curto-circuito e nas perdas por efeito Joule.

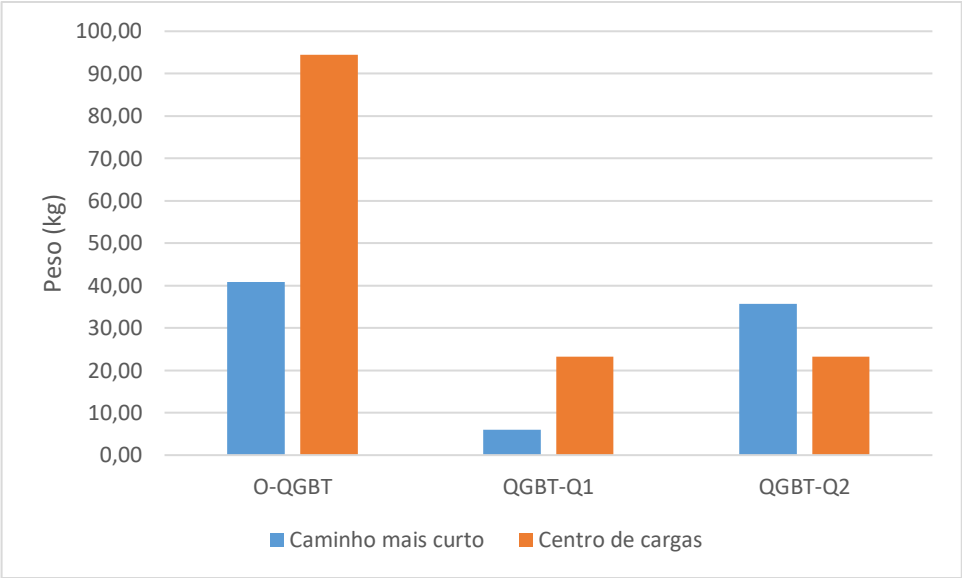
4.3.1 Quantidade de condutores

Apesar de constatada uma redução de 21,12% da metragem dos condutores estimados para o projeto modelo, alcançada por meio da adoção do método do caminho mais curto em relação ao QGBT situado no centro de cargas, cabe aqui analisar também a quantidade de condutores estimados por ambos os métodos tomando como referência o peso da matéria prima dos condutores. O gráfico correspondente ao peso dos condutores estimados para o projeto (Figura 12), apresenta a quantidade de cobre estimada para os trechos que foram analisados na instalação, estabelecendo O-QGBT, o trajeto que inclui o ponto de origem até o QGBT; QGBT-Q1, o trecho compreendido entre o QGBT e o quadro de distribuição parcial Q1, e QGBT-Q2, o trecho entre o QGBT e o quadro de distribuição parcial Q2.

Com base no dimensionamento apresentado pela Tabela 3 e nas informações referente aos cabos Sintenax Flex para uso em baixa tensão (0,6/1kV), 4 condutores (tetrapolar), da

fabricante Prysmian, pode-se averiguar o peso, considerando-se a unidade de medida em quilogramas, para cada um dos métodos aplicados.

Figura 12 - Peso dos condutores estimados para o projeto.



Nota-se que nos dois primeiros trechos há uma significativa redução do peso do cobre correspondente à quantidade de condutores utilizados na instalação, quando aplicado o método de caminho mais curto. Essa vantagem é invertida ao analisar o trecho que liga o QGBT ao Q2, entretanto a soma do peso dos condutores, considerando os três trechos, indica uma superioridade do método do caminho mais curto, pois há uma redução de 41,51% quando comparado ao local de instalação do QGBT apontado pelo centro de cargas, método indicado por Mamede Filho (2013).

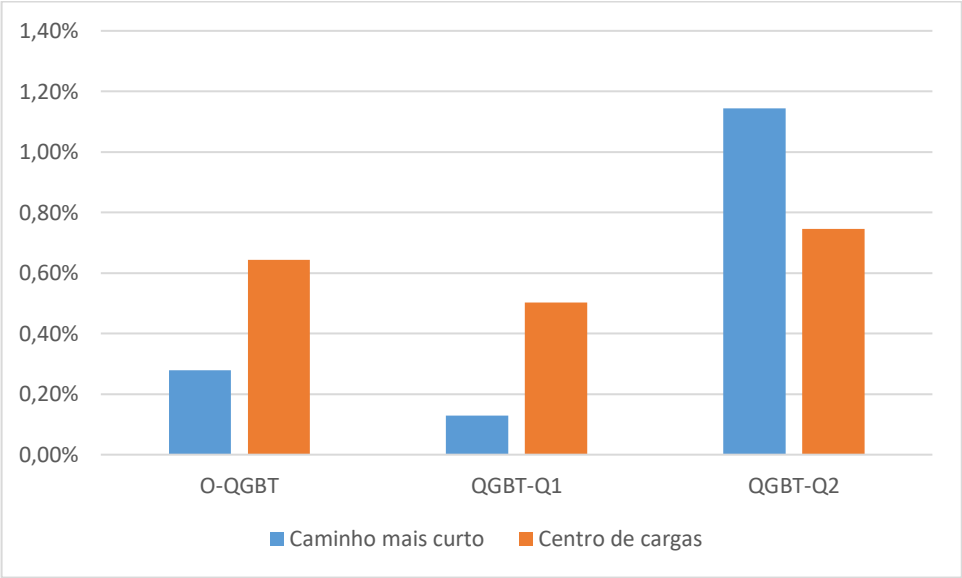
É importante ressaltar que o peso dos condutores está vinculado à metragem dimensionada para o circuito e à seção especificada para cada trecho da instalação do projeto modelo, conforme apresentadas na Tabela 3. Esse percentual representa principalmente uma significativa economia do cobre, que é a matéria prima utilizada na fabricação dos condutores, que por sua vez também proporciona uma redução dos custos financeiros atrelados à aquisição desses condutores.

4.3.2 Queda de tensão

Para a análise da queda de tensão é importante frisar que a seção dos condutores dimensionada no projeto modelo é análoga para os dois métodos. O gráfico apresentado a seguir, na Figura 13, mostra os valores percentuais da queda de tensão calculada através da Equação 6 para o QGBT localizado no ponto determinado pelo caminho mais curto, e no ponto referente ao centro de cargas.

Na figura pode-se observar que ambas as soluções atendem aos limites máximos admissíveis pela NBR5410:2004 para as quedas de tensão (7%). Constata-se que no primeiro e no segundo trecho, a queda de tensão é superior quando o QGBT se encontra no centro de cargas, localização indicada por Cruz e Aniceto (2012), isso acontece porque o comprimento dos cabos sendo maior, fará com que a queda de tensão seja superior, mesmo que os condutores tenham as mesmas resistências.

Figura 13 - Queda de tensão percentual.



Na solução em que o QGBT está no ponto proposto pelo caminho mais curto, no trecho entre o QGBT e o Q2 verifica-se que o valor da queda de tensão, apesar de elevar a variação relativa às quedas de tensão dos trechos anteriores, é relativamente baixo (1,13%).

A localização do QGBT no ponto indicado pelo caminho mais curto é para a maioria dos trechos a melhor solução, pois em dois deles os valores das quedas de tensão são menores e mesmo quando maior, não ultrapassa o limite determinado pela NBR 5410:2004.

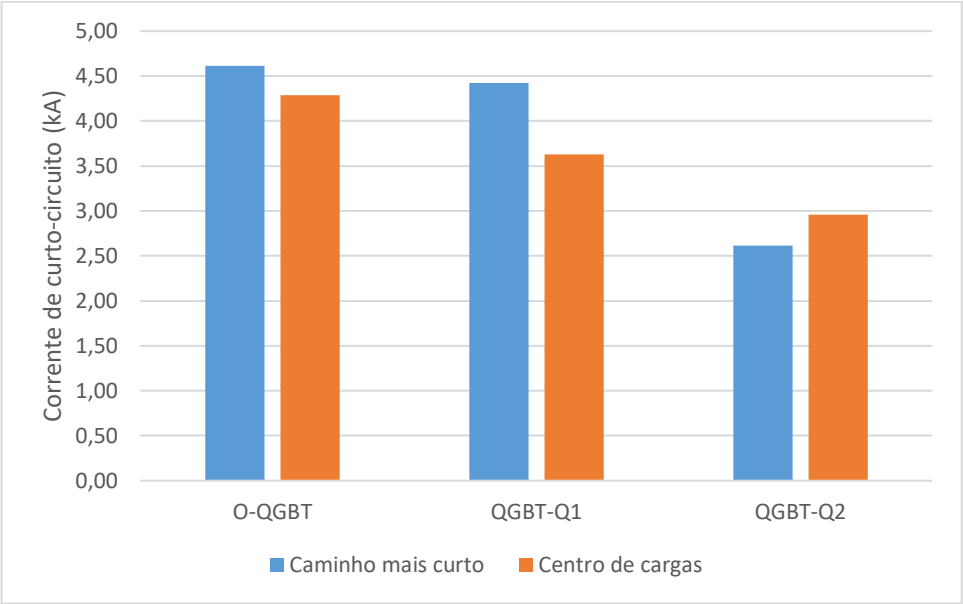
4.3.3 Corrente de curto-circuito presumida

Os dispositivos de proteção devem proteger os circuitos elétricos com base no valor da corrente de curto-circuito. Os dispositivos de proteção contra as correntes de curto-circuito são destinados à proteção dos condutores, desta forma, é necessário que o tempo de atuação do dispositivo seja inferior ao tempo de fadiga térmica dos condutores (COTRIM, 2009).

Através da leitura do tópico 3.4.3, pode-se inferir que a corrente de curto-circuito varia com o comprimento do cabo. Sabe-se que a fadiga térmica do cabo está relacionada à corrente de curto-circuito. Desta forma, a localização do QGBT vai afetar a condição da corrente de curto-circuito.

Os valores das correntes de curto-circuito, calculados por meio da Equação 11, foram analisados considerando a localização do QGBT no ponto especificado pelo método do caminho mais curto e pela identificação do centro de cargas.

Figura 14 - Corrente de curto-circuito presumida.



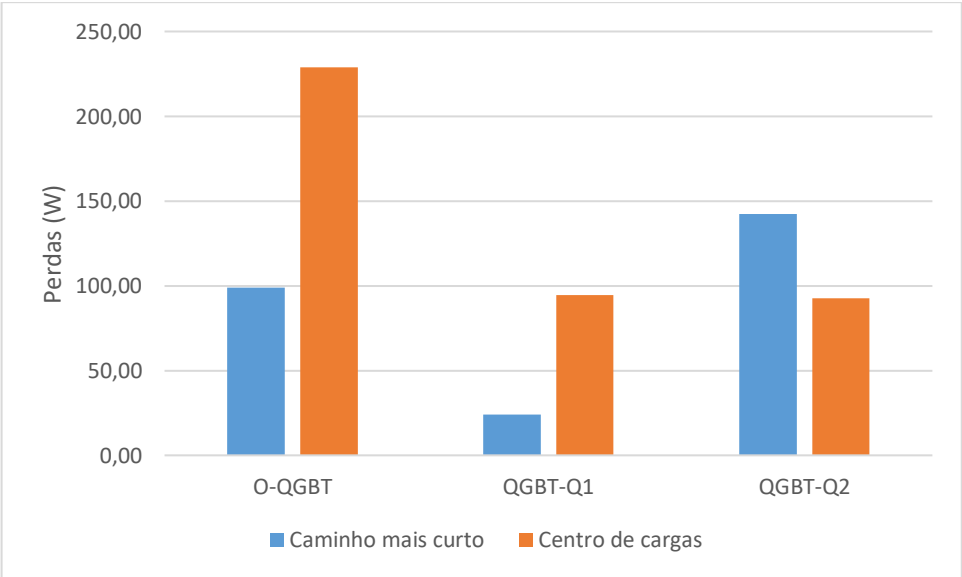
De acordo com o cenário observado na Figura 14 verifica-se que relativamente à corrente de curto-circuito presumida, a solução que apresenta os valores mais elevados corresponde à localização do QGBT no ponto indicado pelo caminho mais curto para os dois primeiros trechos. Por outro lado, a localização do QGBT no centro de carga das potências a serem alimentadas, conforme indicado por Cavalin e Servelin (1998), apresenta valores maiores no trecho compreendido entre o QGBT e o Q2.

De acordo com estudo realizado por Dias (2013), e analisadas as características de funcionamento dos disjuntores, quanto maior for a corrente de curto-circuito menor vai ser o tempo de atuação destes. Portanto, em atendimento as condições de proteção contra curto-circuito, apesar da pouca diferença, o método da busca pelo caminho mais curto é o mais indicado, pois em duas situações apresentou resultados que indicam menor tempo de atuação dos disjuntores, tornando a proteção elétrica mais eficiente.

4.3.4 Previsão de perdas por Efeito Joule

O posicionamento do QGBT define para cada circuito a metragem dos condutores a serem instalados, afetando de forma proporcional as perdas por efeito Joule. Considerando as informações que constam na Tabela 3 e na Tabela 4, através da Equação 19, foi possível obter os valores das perdas elétricas por efeito Joule.

Figura 15 - Perdas por efeito Joule.



De acordo com as coordenadas mostradas na Figura 15, os valores estimados das perdas elétricas relativas à cada trecho, são menores nos circuitos de alimentação do QGBT (O-QGBT) e do Q1 (QGBT-Q1), quando adotado o método do caminho mais curto. Mesmo apresentando um valor elevado no trecho compreendido entre o QGBT e o Q2, a soma total das perdas indica uma superioridade do método do caminho mais curto, que pode ser constatada pela redução de 36,20% quando comparada à soma total calculada pelo método do centro de cargas, recomendado por Lima Filho (2001).

A Equação 20 comprova a relação entre as perdas por efeito Joule e a energia consumida em um intervalo de tempo. Logo, pode-se afirmar que a solução resultante do método do caminho mais curto irá contribuir para uma redução do consumo de energia elétrica, garantindo uma economia para a instalação.

5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

5.1 CONCLUSÕES

A aplicação do método garantiu uma análise criteriosa e uma tomada de decisão assertiva. Analisando-se os resultados apresentados neste trabalho, constatou-se que através do método da busca pelo caminho mais curto é possível obter uma informação que irá auxiliar o projetista quanto à decisão do ponto de instalação do quadro geral de baixa tensão.

Diante da complexa relação entre atender às normas e garantir eficiência com menores custos, o método da busca pelo caminho mais curto mostrou-se mais adequado para identificar o local de instalação do QGBT que impacta em uma redução da quantidade de condutores utilizados em uma instalação elétrica e, consequente, redução do valor das perdas associadas a estes.

Relativamente à localização do QGBT no centro de cargas, através dos resultados obtidos, a solução que indica melhor eficiência corresponde à localização do QGBT no ponto indicado pelo caminho mais curto. A determinação do local de instalação do QGBT pelo caminho mais curto também possibilita que o projetista especifique de maneira prévia os possíveis pontos de alocação que não proporcionam prejuízo ao uso da área central da planta, permitindo que esta seja destinada à montagem de equipamentos.

5.2 CONSIDERAÇÕES E TRABALHOS FUTUROS

Como sequência deste estudo, é possível o desenvolvimento de trabalhos direcionados para a área industrial, com alimentação fornecida em alta tensão, considerando sistemas com maior grau de complexidade sobretudo, considerando os pontos de posicionamento adequado para a subestação e as cargas instaladas, visando o melhor aproveitamento das instalações.

Mesmo em instalações de caráter residencial e comercial, sugere-se a aplicação do método apresentado analisando os circuitos terminais, de modo a contemplar a alimentação de todas as cargas, inclusive em edifícios com mais de um pavimento, acrescentando à verificação um plano vertical.

No que diz respeito ao complemento da análise das perdas, pode-se avaliar o efeito Joule provocado pelas correntes em frequências que diferem de 60Hz, pois os estudos de harmônicas

foram desconsiderados neste trabalho, assim como também há a possibilidade de incluir as perdas em revestimentos metálicos e perdas dielétricas associadas aos condutores. A partir de uma análise mais criteriosa das perdas, é possível abranger os custos financeiros atrelados à redução dos cabos, e possível variação do consumo de energia em virtude da melhor distribuição dos condutores.

É sugerido quantificar os impactos na qualidade atmosférica no que se refere a emissões de CO_2, como forma de complementar a análise dos benefícios oriundos da redução da quantidade de cabos elétricos dimensionados para a instalação.

REFERÊNCIAS

ABNT. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**. Disponível em: <http://www.abnt.org.br/abnt/conheca-a-abnt>.

ANDRADE, F. V; PINHEIRO, R. B. Consumo de energia elétrica no brasil para o setor residencial. **ENGEVISTA**, v. 16, n. 4, p. 340–355, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5410:** Instalações Elétricas de Baixa Tensão. 2. ed. Rio de Janeiro, 2004.

BEÊ, R. T. **Alocação de Bancos de Capacitores em Sistema de Distribuição de Energia Elétrica Utilizando Algoritmos Genéticos**. Curitiba: Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná - PR, 2007. 114 p.

BRANCO, H. M. G. C. **Modelagem multiobjetivo para o problema da alocação de monitores de qualidade da energia em sistemas de distribuição de energia elétrica**. Tese (Doutorado), Universidade de São Paulo, 2013. 140 p.

BRANDINI, P. A. F. **Metaheurística Particle Swarm Utilizada para Alocação Ótima de Bancos de Capacitores em Sistemas de Distribuição Radial**. Ilha Solteira: Dissertação (Mestrado). Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2007. 128 p.

CARRANO, E. G. **Algoritmos Evolucionários Eficientes para Otimização de Redes**. Tese (Doutorado), Universidade Federal de Minas Gerais, 2007.

CAVALIN, G.; SERVELIN, S. **Instalações Elétricas Prediais**. 14a ed. São Paulo: Érica, 1998.

COLIN, E. C. **Pesquisa operacional:** 170 aplicações em estratégia, finanças, logística, produção, marketing e vendas. Reimpr. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2015.

COTRIM, A. **Instalações elétricas**. 5. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2009.

CREDER, H. **Instalações Elétricas**. 16. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

CRUZ, E. C. A.; ANICETO, L. A. **Instalações Elétricas: Fundamentos, prática e projetos em instalações residenciais e comerciais**. 2. ed. São Paulo: Érica, 2012.

D'AVILA, R. S. **Análise de perdas em instalações elétricas residenciais**. São Paulo: Dissertação (Mestrado). Universidade de São Paulo, 2007. 97p.

DIAS, P. P. **Contribuições para um Projeto mais Sustentável de Instalações Elétricas de BT**. Dissetação (Mestrado). Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2013. 75 p.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. **Demanda de Energia 2050**. Série Estudos da Demanda de Energia. Nota Técnica DEA 13/15 Demanda de Energia 2050. Rio de Janeiro, 2016.

COMPANHIA PARANAENSE DE ENERGIA. **Manual de Eficiência Energética na Indústria**. Curitiba, 2005.

FERREIRA, C. S.; BORGES. C. L. T. Solução do problema de superação de disjuntores pela alocação ótima de dispositivos limitadores de corrente de curto-circuito utilizando algoritmos genéticos. **Revista Controle & Produção**, v.18, n. 4, p 501-512, 2007.

FILHO, J. M. **Instalacoes Eletricas Industriais**. 8a ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013

FRANCO, J. F. et al. A mixed-integer LP model for the optimal allocation of voltage regulators and capacitors in radial distribution systems. **International Journal of Electrical Power and Energy Systems**, v. 48, p. 123–130, 2013.

FRIZT, W. Smart grid e the next frontier. Industrial and commercial use of energy conference. **In: Proc. 9th industrial and commercial use of energy conference**. p. 1–3, 2012.

GABRIEL, T.; SOUTO, C. **Racionalização do Consumo de Energia Elétrica em Unidades de Produção de Cabos**. Dissertação (Mestrado). Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2013. 142 p.

GAN, C. K. et al. Statistical appraisal of economic design strategies of LV distribution networks. **Electric Power Systems Research**. v. 81, n. 7, p. 1363–1372, 2011.

HILLIER, F. S.; LIEBERMAN, G. J. **Introdução à pesquisa operacional**. 9ª ed. Porto Alegre: AMGH. 2013.

HIZAM, M. F. A. H.; AB, I. A. M. Z. A. Effective method for optimal allocation of distributed generation units in meshed electric power systems. **IET Gener. Trasm. Distrib**. v. 5, p. 276–287, 2011.

MACIEL, D. M. H. **Internalização de variáveis ambientais na análise de viabilidade de projetos: o caso do setor elétrico**. Florianópolis: Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina, 2001.

KAUR, D.; SHARMA, J. Optimal conductor sizing in radial distribution systems planning. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**. v. 30, n.4, p. 261–271, 2008.

LEKAWA-RAUS, A.; HALADYJ, P.; KOZIOL, K. Carbon nanotube fiber-silver hybrid electrical conductors. **Materials Letters**, v. 133, p. 186–189, 2014.

LI, Q.; TAN, H.; YU, X. Effect of Multilayer Configuration on AC Losses of Superconducting Power Transmission Cables Consisting of Narrow Coated Conductors. **IEEE Transactions On Applied Superconductivity**, v. 24, n. 5, p. 2–5, 2014.

LI, Q.; XIN, Y.; WANG, S. Dependence of AC Loss on Structural Compactness of Superconducting Power Cables With Narrow. **IEEE Transactions On Applied Superconductivity**, v. 26, n. 7, p. 1–5, 2016.

LIMA FILHO, D. L. **Projetos de Instalações Elétricas Prediais**. 6. ed. São Paulo: Érica. 2001

LOBÃO, J. A.; DEVEZAS, T.; CATALÃO, J. P. S. Influence of cable losses on the economic analysis of efficient and sustainable electrical equipment**. Energy**, v. 65, n. 65, p. 145–151, 2014.

MAGALHAES, M.; ALVES, H. N. Alocação ótima de bancos de capacitores utilizando a meta-heurística colônia de formigas. **In: VII Congresso Norte Nordeste de Pesquisa e Inovação**. 2012. ISSN 978-85-62830-10-5.

MANUEL, C.; NUNES, D. P. **Redução de Consumo Através de Equipamentos de Regulação de Tensão**. Dissertação (Mestrado). Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2011.

MELO, J. D.; ZAMBRANO-ASANZA, S.; PADILHA-FELTRIN, A. A local search algorithm to allocate loads predicted by spatial load forecasting studies. **Electric Power Systems Research**, v. 146, p. 206–217, 2017.

MORINI, M. et al. Optimal allocation of thermal , electric and cooling loads among generation technologies in household applications. **Applied Energy**, v. 112, p. 205–214, 2013.

IVANOV, Y. et al. Current Imbalance and AC Losses of Long Distance DC HTS Cable. **In.: IEEE Transactions oon Applied Superconductivity**. v. 26, n. 7, p. 1-4, 2016.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanço Energético Nacional Relatório Síntese - ano base 2015**. Rio de Janeiro: [s.n.]. 2016.

PONBOON, S.; QURESHI, A. G.; TANIGUCHI, E. Branch-and-price algorithm for the location-routing problem with time windows. **Transportation Research Part E: Logistics**

and Transportation Review, v. 86, p. 1–19, 2016.

RAMADAN, H. A.; WAHAB, M. A. A.; HAMADA, M. M. A fuzzy-based approach for optimal allocation and sizing of capacitor banks. **Electric Power Systems Research**. v. 106, p. 232–240, 2014.

ROSSETI, G. J. S. et al. Optimal allocation of distributed generation with reconfiguration in electric distribution systems. **Electric Power Systems Research**, v. 103, p. 178–183, 2013.

SEVNAZ, N.; ARCHIS, G. Duality in Convex Minimum Cost Flow Problems on Infinite Networks and Hypernetworks. **NETWORKS**, v. 70, n. 2, p. 98–115, 2017.

SOUSA, A. C. DE; SOARES, A. K. Modelo para otimização da operação de sistemas de distribuição de água utilizando o algoritmo genético multiobjetivo SPEA. **Exacta**, v. 12, n. 3, 2014.

SOUSA, A. F. F. DE. **Casas em Movimento – Estudo Elétrico**. Disseertação (Mestrado) Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2013.

TAYLOR, P. et al. Allocation of the Loss-of-life Cost of In- service Distribution Cables to Network Customers. **Electric Power Components and Systems**, v. 41, p. 927–942, 2015.

TEIXEIRA JUNIOR, M. D. DA R. **Cabos de energia**. 2. ed. São Paulo: Artliber Editora, 2004

TEYE, E. **A Dynamic Approach to Understanding the Nexus between Electric Power Demand and Economic Growth , Using a Generic Electricity Model: The Case of Ghana**. Noruega: Dissetação (Mestrado). University of Bergen, 2011.

VIANNA, A. **Alocação Inteligente de Quadros de Distribuição da Indústria**. Rio de Janeiro: Dissertação (Mestrado). Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2015.

WAFA, A; Ahmed R. Optimal capacitor allocation in radial distribution systems for loss reduction : A two stage method. **Electric Power Systems Research**, v. 95, p. 168–174, 2013.

YANG, H.; ZHU, W.-H. Pre-treatment of path problems with required lengths. **Journal of Discrete Mathematical Sciences and Cryptography**, v. 20, n. 6–7, p. 1387–1392, 2017.

ZUBKO, V. V; FETISOV, S. S.; VYSOTSKY, V. S. Hysteresis Losses Analysis in 2G HTS cables. **In.: IEEE Transactions oon Applied Superconductivity**, v. 8223, n. 3, p. 1–5, 2016.

UFBA
UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
ESCOLA POLITÉCNICA

PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA INDUSTRIAL - PEI

Rua Aristides Novis, 02, 6º andar, Federação, Salvador BA
CEP: 40.210-630
Telefone: (71) 3283-9800
E-mail: pei@ufba.br
Home page: http://www.pei.ufba.br