

Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia
Curso de Engenharia Elétrica

**Desenvolvimento de ferramenta computacional
para projeto de redes de distribuição de energia
elétrica**

Lucas Pelicano Rosso

Campo Grande, MS
2021

Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia
Curso de Engenharia Elétrica

Desenvolvimento de ferramenta computacional para projeto de redes de distribuição de energia elétrica

Lucas Pelicano Rosso

Orientador: Valmir Machado Pereira

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Federal de Mato Grosso do Sul na Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Campo Grande, MS

2021

Lucas Pelicano Rosso

Desenvolvimento de ferramenta computacional para projeto de redes de distribuição de energia elétrica

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Federal de Mato Grosso do Sul na Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia, para obtenção da Graduação em Engenharia Elétrica.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Valmir Machado Pereira
Orientador



Prof. Dr. Luigi Galotto Junior

Prof. Dr. Paulo Irineu Koltermann

Campo Grande, MS
2021

RESUMO

O objetivo deste trabalho é incorporar os dados de projetos de rede de distribuição em um programa computacional para análise dos dados auxiliando o prognóstico do usuário. Dessa forma, para as simulações necessárias ao projetista, são implementados algoritmos para o estudo da demanda, queda de tensão, capacidade térmica, proteção e quantificação dos materiais. Nestes algoritmos, modelos físicos consolidados pela literatura para projeção da rede de distribuição são integrados a sistemas computacionais existentes. Os dados são provenientes de modelos digitais produzidos em sistema CAD e planilhas de levantamento inerentes ao fluxo de trabalho do projetista. Baseado no levantamento das necessidades e características associados ao sistema, o programa desenvolvido é capaz de determinar os requisitos a serem atendidos. A função para determinar a demanda de cada unidade consumidora é um aspecto chave para o dimensionamento adequado do sistema. Conforme uma solução é elaborada, os algoritmos propostos simulam o projeto para testar os requisitos de desempenho de seus componentes. A análise efetuada para a queda de tensão, efeito térmico e proteção garantem a operação satisfatória. Por fim, há instruções na ferramenta desenvolvida para contabilizar todos os materiais empregados. O resultado da ferramenta computacional indica que houve um ganho de produtividade na elaboração do projeto e redução de susceptibilidade a erros.

Palavras-chave: Rede de distribuição de energia elétrica. Instalações elétricas. Ferramenta computacional. Análise de dados.

ABSTRACT

The objective of this academic work is to incorporate the project's data from a distribution grid into a software for data analysis, helping the user's prognosis. Therefore, for the necessary simulations, the assessment of demand, voltage drop, thermal capacity, protection and quantification of materials are implemented in the software's algorithms for the required simulations by the designer. In these algorithms, physical models consolidated by the literature about the projection of distribution grid are integrated to existing computational systems. The data comes from digital models produced in a CAD system and spreadsheets from requirements gathering inherent to the designer's workflow. Based on the survey of the requirements and characteristics associated with the system, the developed software is able to identify the standards to be met. The function to find the demand of each power consumer is a key aspect for the proper system sizing. As a solution is developed, the proposed algorithms simulate the project to test the performance requirements of its components. The analysis performed for voltage drop, thermal effect and protection ensure satisfactory operation. Finally, there are instructions in the developed tool to count all the used materials. The software's result indicates that there was an increase in productivity in the project's elaboration and reduction in the susceptibility to errors.

Keywords: Electric distribution grid. Electrical Installations. Computacional tool. Data analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fluxograma do escopo da FCP.	13
Figura 2 – Alimentador trifásico.	24
Figura 3 – RD para atendimento de empreendimento com 37 lotes.	45
Figura 4 – Dados do lote selecionado.	46
Figura 5 – Curva de carga demandada obtida pelo regime de operação, na sexta-feira, da Tabela 11.	47
Figura 6 – Fluxo de dados do modelo CAD para FCP.	47
Figura 7 – Interface gráfica do módulo de demanda da FCP.	48
Figura 8 – Exemplo de cálculo de demanda pela atividade do consumidor e potência instalada.	51
Figura 9 – Exemplo de cálculo de demanda pela atividade do consumidor e tipo de carga.	53
Figura 10 – Curva de carga demandada obtida pelo regime de operação, na quarta-feira e domingo, da Tabela 11.	60
Figura 11 – Alimentador trifásico representado em CAD.	61
Figura 12 – Representação de poste e seus atributos em programa CAD.	62
Figura 13 – Representação do trafo e suas propriedades em programa CAD.	62
Figura 14 – Fluxograma do pré-processamento para a determinação do circuito elétrico a partir do arquivo CAD.	64
Figura 15 – Fluxograma do algoritmo para queda de tensão.	65
Figura 16 – Interface do módulo de queda de tensão da FCP.	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Demanda Diversificada Residencial.	18
Tabela 2 – Categorias de demanda por tipo de carga.	19
Tabela 3 – Seleção da tensão nominal de para-raios MT.	29
Tabela 4 – Temperaturas características dos condutores.	30
Tabela 5 – Dimensionamento dos Elos-Fusíveis para Ramais.	31
Tabela 6 – Elos-Fusíveis para Transformadores Trifásicos.	32
Tabela 7 – Exemplo de comandos SQL.	35
Tabela 8 – Atributos da tabela de lotes da FCP.	39
Tabela 9 – Dados dos lotes que compõem o empreendimento.	40
Tabela 10 – Relação de carga exemplo.	41
Tabela 10 – (continuação).	42
Tabela 11 – Cronograma de operação de carga.	43
Tabela 11 – (continuação).	44
Tabela 12 – Resultado do algoritmo de cálculo de tensão (circuito primário).	64
Tabela 13 – Lista de materiais - resultado da consulta 6.2.	68
Tabela 13 – (continuação)	69
Tabela 13 – (continuação)	70

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AEC	Architecture, Engineering & Construction (Arquitetura, Engenharia & Construção)
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
API	Application Programming Interface (Interface de Programação de Aplicação)
BDR	Banco de Dados Relacionais
BIM	Building Information Modeling (Modelagem da Informação da Construção)
BT	Baixa tensão
CAD	Computer Aided Design (Desenho assistido por computador)
CREA	Conselhos regionais de Engenharia e Agronomia
FCP	Ferramenta Computacional para Projeto (de Redes de Distribuição de Energia Elétrica)
GIS	Geographic Information System (Sistema de Informação Geográfica)
GUI	Graphical user interface (Interface gráfica do usuário)
ID	Identificador
IP	Iluminação pública
MT	Média tensão
NBR	Norma Brasileira
Prodist	Procedimentos de Distribuição (de Energia Elétrica)
RD	Rede de Distribuição (de Energia Elétrica)
SGBDR	Sistema de Gerenciamento de Banco de Dados Relacionais
SQL	Structured Query Language (Linguagem de Consulta Estruturada)
UC	Unidade consumidora

LISTA DE SÍMBOLOS

Γ	Letra grega Gama
Λ	Lambda
ζ	Letra grega minúscula zeta
κ	Letra grega minúscula capa (conjunto de cargas em operação em um instante)
ψ	Letra grega minúscula psi (conjunto de todas cargas de um sistema)
ν	Letra grega minúscula ni (conjunto de unidades consumidoras)
$\in$	Pertence à um conjunto
$\subset$	Está contido em um conjunto

SUMÁRIO

1	Introdução	11
1.1	Objetivos gerais	12
1.2	Objetivos específicos	12
1.2.1	Incorporar informações de levantamento	12
1.2.2	Calcular a demanda do empreendimento	13
1.2.3	Importar informações das iterações em projeto	13
1.2.4	Calcular a queda de tensão	13
1.2.5	Calcular a capacidade térmica	14
1.2.6	Estudar a proteção da RD	14
1.2.7	Obter a relação de materiais	14
1.3	Estrutura do trabalho	14
2	Dimensionamento elétrico	16
2.1	Demanda	16
2.1.1	Demanda diversificada pela área da UC	18
2.1.2	Demanda diversificada pela atividade do consumidor e potência instalada	18
2.1.3	Demanda pela atividade do consumidor e tipo das cargas	18
2.1.3.1	Demanda de iluminação e tomadas	19
2.1.3.2	Demanda dos aparelhos para aquecimento de água	20
2.1.3.3	Demanda secador de roupa, forno de micro-ondas máquina de lavar louça e hidro massagem	20
2.1.3.4	Demanda de fogão e forno elétrico	20
2.1.3.5	Demanda de condicionamento de temperatura de ambientes	20
2.1.3.6	Demanda para máquinas elétricas girantes	21
2.1.3.7	Demanda para cargas especiais	21
2.1.3.8	Demanda total do consumidor	21
2.1.4	Demanda pelo regime de operação da carga	21
2.2	Condutores	23
2.2.1	Queda de tensão	23
2.2.2	Efeito térmico	25
2.2.2.1	Média tensão	26
2.2.2.2	Baixa tensão	27
2.2.3	Isolamento	27
2.3	Seleção e locação das subestações	28
2.4	Proteção e seccionamento	28

2.4.1	Proteção contra sobretensão	28
2.4.2	Seccionamento	29
2.4.3	Proteção contra sobrecorrente e curto-circuito	30
3	Banco de dados	33
3.1	Normalização dos dados	33
3.2	Relacionamento entre tabelas	34
3.3	Gerenciamento dos dados	35
4	Gestão de dados do projeto	37
4.1	Importar informações de levantamento e projeto	37
4.1.1	Informações dos lotes das UCs	38
4.1.2	Levantamento de carga das UCs	39
4.2	Importar informações projeto em CAD	44
5	Dimensionamento elétrico	48
5.1	Cálculo da demanda do empreendimento	48
5.1.1	Demanda diversificada pela área da UC	48
5.1.2	Demanda diversificada pela atividade do consumidor e potência instalada	49
5.1.3	Demanda pelo tipo das cargas e atividade do consumidor	52
5.1.3.1	Demanda de iluminação e tomadas	53
5.1.3.2	Demandas em função do número de equipamentos instalados	54
5.1.3.3	Demanda para máquinas elétricas girantes	55
5.1.3.4	Demanda para cargas especiais	57
5.1.4	Demanda pelo regime de operação da carga	58
5.2	Modelagem da RD na FCP	60
5.2.1	Alimentadores	60
5.2.2	Postes e estruturas	61
5.2.3	Subestação aérea	62
5.3	Critério de queda de tensão	63
5.3.1	Cálculo da queda de tensão	63
6	Relação de materiais	66
6.1	Relação de materiais	66
7	Conclusão	71
	Referências	73

1 INTRODUÇÃO

Com o desenvolvimento econômico e avanço tecnológico, cresce a demanda de energia elétrica. Dessa maneira a ampliação e melhoria do sistema de distribuição é contínua, enquanto exigências de segurança e desempenho ficam mais rigorosas. Somado o efeito da pressão econômica, a expansão rápida do sistema é imposta sobre os construtores. Para agregar valor em todo setor de Arquitetura, Engenharia e Construção (AEC), novas tecnologias vem sendo desenvolvidas para assistir o ciclo de vida de uma obra, desde sua concepção em projeto, passando pela execução e também preocupando-se com a operação e manutenção do mesmo. As ferramentas de desenho assistido por computador (CAD - Computer Aided Design) são um exemplo desse desenvolvimento que continuam evoluindo, havendo hoje o conceito de modelagem da informação da construção (BIM - Building Information Modeling) buscando para os sistemas representações digitais mais precisas e abrangentes (EASTMAN et al., 2011; KOKORUS; EYRICH; ZACHARIAS, 2016).

Durante elaboração de um projeto são feitas inúmeras decisões, as quais dependem das restrições e requisitos de desempenho que é imposto pelo cliente, localidade, escopo da operação e tecnologias disponíveis. Estas deliberações são tomadas a partir da análise das premissas iniciais. Conforme as ideias são aprimoradas, o projeto caminha na direção da solução otimizada perante as limitações estabelecidas. Por fim, é exigido a documentação das decisões tomadas e condições consideradas.

Para elaboração de uma rede de distribuição de energia elétrica (RD), é preciso o levantamento detalhado de dados com informações geográficas e sobre os consumidores a serem atendidos pelo sistema. Esses dados geralmente são coletados em planilhas de campo e/ou sistemas de dados geográficos (GIS - Geographical Information System) para serem processados no planejamento da RD. As análises e escolhas realizadas pelo projetista são registradas no banco de dados do software de CAD, onde se representa digitalmente os elementos do projeto. As estruturas, equipamentos e materiais aplicados na RD são baseadas em cálculos de dimensionamento. Os modelos contidos nesses cálculos são fundamentados em técnicas normatizadas e visam prever o desempenho do sistema. O processamento dos dados envolve grande quantidade de iterações, que através dos modelos buscam encontrar a solução ideal para o cenário em estudo.

Todo o processo requer do projetista a manipulação das informações em diversos documentos, repetindo-as frequentemente, e referenciando-as por toda documentação. Este processo é oneroso, pois exige rigor no desenvolvimento e consome tempo, além de sujeitar o responsável a equívocos. Por isso podem ocorrer falhas na atualização dos dados e acabar com informações incorretas no projeto. Naturalmente na aquisição de materiais e execução,

a quantificação está sujeita a incoerências, especificações inapropriadas. Diante da extensa relação de materiais necessárias para atender a RD, inconsistências podem causar atraso ou prejuízo financeiro.

1.1 Objetivos gerais

Aprimorar a metodologia de projeto de RD, ampliando o potencial de análise dos dados de projeto e confiabilidade destes resultados. Através da caracterização do processo de planejamento de uma RD será desenvolvida uma Ferramenta Computacional para Projeto (FCP). Esta ferramenta visa aproveitar as informações contidas no fluxo de trabalho e automatizar parte das análises realizadas. Os dados são gerados no levantamento e nas iterações do processo de projeção. A ferramenta será composta por um sistema de algoritmos complementar às ferramentas de CAD adotadas. Este sistema irá centralizar o processamento e gestão dos dados de projeto, garantindo maior rigor nos resultados. O escopo de projeto de RDs é assegurar instalações elétricas apropriadas para distribuição de energia elétrica em tensão primária (média tensão) e em tensão secundária (baixa tensão).

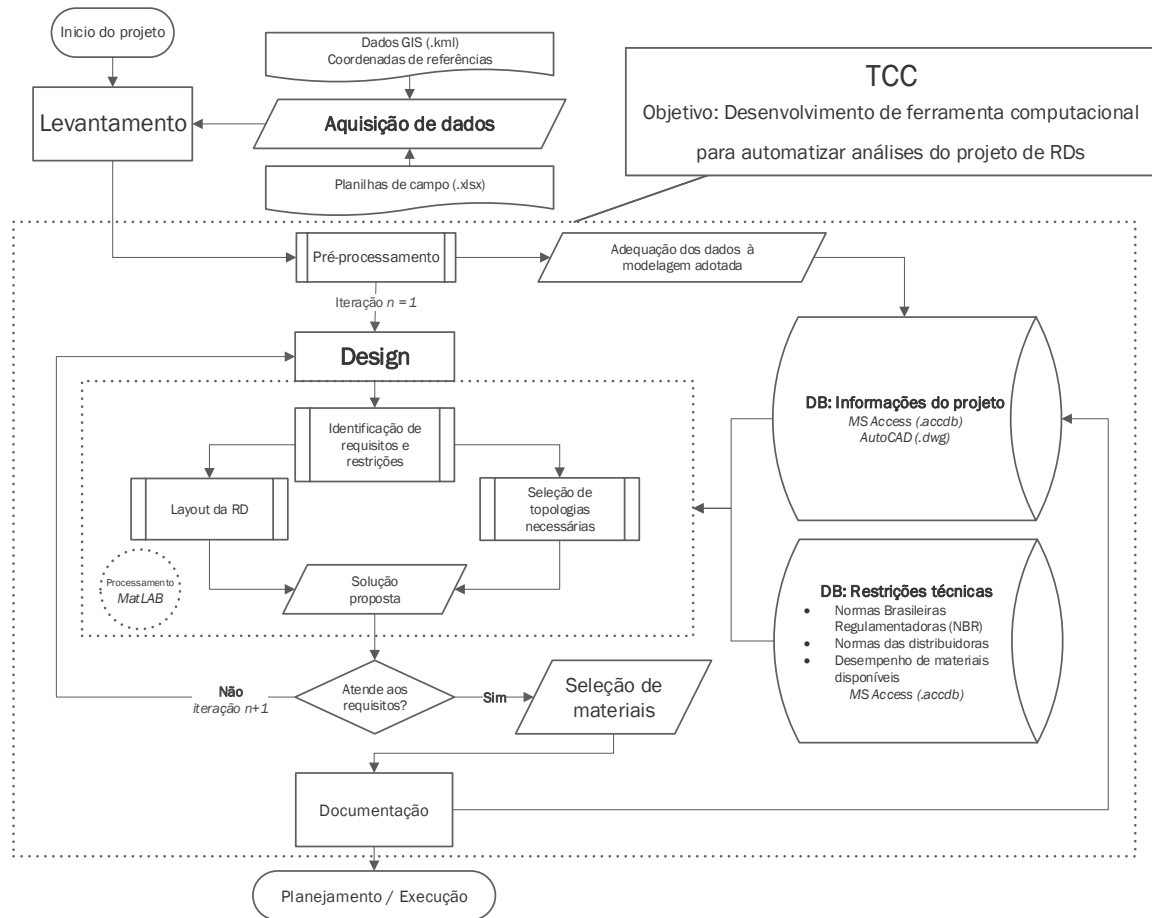
A FCP proposta será composta por módulos responsáveis pelo processamento dos dados de cada etapa que permeia o projeto. Estes módulos serão constituídos por algoritmos computacionais baseados nos cálculos de dimensionamento e análise do desempenho da RD. A metodologia deve garantir o rigor necessário, empregando as técnicas normatizadas. Cada módulo analisará os cenários em estudo pelo projetista, conforme se avança nas iterações inerente ao projeto. O fluxograma da Figura 1 representa o processo do projeto da RD, onde na área tracejada é delimitado o escopo de atuação da FCP. Na sequência é discutido o escopo de cada módulo.

1.2 Objetivos específicos

1.2.1 Incorporar informações de levantamento

Desfrutar dos dados produzidos no levantamento é uma premissa da FCP, que deverá colher as informações relevantes do levantamento para futura análise. Certamente as planilhas de campo e arquivos de GIS contém referências da RD existente onde pode ser derivado, assim como informação de carga para unidade consumidora (UC) específica. O projeto civil, disponível em arquivo de CAD, possui localização e descrição, inclusive geométrica, dos lotes que receberão as UCs.

Figura 1 – Fluxograma do escopo da FCP.



Fonte: Elaborada pelo autor.

1.2.2 Calcular a demanda do empreendimento

O cálculo de demanda é indispensável para o dimensionamento da RD. Dessa forma informações produzidas quanto as UCs, como a área disposta no projeto civil, relação de carga, tipo de consumidor levantado serão utilizados para desenvolver o módulo para previsão de demanda.

1.2.3 Importar informações das iterações em projeto

Durante elaboração do projeto, a ferramenta CAD será utilizada para layout da RD, locação de equipamentos, postes e estruturas. Os dados serão extraídos do CAD para processamento na FCP.

1.2.4 Calcular a queda de tensão

Com o layout da RD em projeto, equipamentos, UCs presentes no modelo criado em CAD serão úteis para desenvolver modelo elétrico da RD na FCP e simular os requisitos

de desempenho de tensão.

1.2.5 Calcular a capacidade térmica

Partindo da demanda obtida no módulo anterior, é viável implementar na FCP verificação e seleção adequada dos condutores de modo a respeitar o limite térmico dos condutores.

1.2.6 Estudar a proteção da RD

Conhecendo a demanda, locação de equipamentos e de consumidores obtém-se a potência instalada de cada alimentador. Obedecendo as restrições de projeto e normas aplicáveis, a FCP verificará a proteção projetada.

1.2.7 Obter a relação de materiais

Para auxiliar o projetista, a FCP irá em contabilizar os materiais utilizados. Contudo será necessário construir um banco de dados com os materiais e estruturas padronizadas para construção de redes de distribuição. As informações do projeto devem estar contidas no banco de dados da FCP para relacionar com os demais e atingir seu objetivo. Estas devem partir das informações inseridas no CAD e quando processadas incorporarão ao banco de dados da FCP. Certamente deverá haver registro das estruturas e demais elementos do projeto. Assim as consultas ao banco de dados devem garantir obtenção da relação de materiais do projeto.

1.3 Estrutura do trabalho

No capítulo 2 é apresentada a fundamentação teórica sobre as técnicas utilizadas para o dimensionamento elétrico de RDs, assim como os requisitos de desempenho dessas instalações conforme normas aplicáveis.

O capítulo 3 acrescenta ao referencial teórico do trabalho uma tecnologia para organização dos dados gerados durante o projeto de RD e o uso eficiente destas informações para quantificação dos elementos do sistema proposto.

Nos capítulos 4, 5 e 6 são apresentados os resultados e a metodologia referentes à concepção dos objetivos do trabalho. Especialmente o capítulo 4 que faz a delineação dos procedimentos utilizados no desenvolvimento do trabalho.

O capítulo 4 também discorre como a FCP se insere no processo de projeto de modo a usufruir dos dados produzidos. Neste capítulo são abertas as possibilidades de intervenção no projeto pela ferramenta desenvolvida neste trabalho.

Para assegurar a automação do dimensionamento elétrico, o capítulo 5 discute os algoritmos e resultados referente a este objetivo.

O capítulo 6 trata do relacionamento dos materiais empregados no projeto em CAD fruto do dimensionamento realizado no capítulo anterior.

Por fim, o capítulo 7 apresenta as conclusões dos resultados alcançados e propostas para trabalhos futuros.

2 DIMENSIONAMENTO ELÉTRICO

Para que todas as cargas do sistema possam operar de forma adequada, é necessário que o fornecimento de energia ocorra dentro de parâmetros de qualidade regulamentados. O fornecimento de energia deve respeitar critérios quanto a continuidade do fornecimento, de modo que as ocorrências de interrupções possuam restrições de duração e frequência. Também devem ser atendidos limites de frequência, tensão e forma da onda. Estes requisitos são especificados pela ANEEL (2021).

Para que esses critérios sejam atendidos é necessário que as instalações elétricas desde a geração, passando pela transmissão e por fim na distribuição sejam planejadas e executadas com o rigor técnico que garanta a operação dentro dos requisitos de desempenho. Estas exigências são estabelecidas pela ABNT através da Norma Brasileira (NBR).

O escopo de RDs visa atender empreendimentos de grandes consumidores de energia ou agrupamentos de menor porte de consumo. Estes agrupamentos são chamados de loteamentos, em perímetro urbano, são definidos como subdivisão da gleba em lotes destinados a edificação. Para que a prefeitura aprove a divisão é necessário prever obras de infraestrutura, incluindo energia elétrica. Cada lote representará um novo consumidor de energia a ser atendido pela RD construída. Comumente a RD percorre as vias de circulação do empreendimento, ajustando-se a topografia de modo a alcançar todas UCs.

Uma RD é composta pelo circuito primário e secundário. A rede em tensão primária opera em média tensão que abrange a definição de 1 kV a 36,2 kV. Sendo o circuito primário, o responsável por alimentar transformadores de distribuição ou pontos de entrega sob a mesma tensão primária nominal. Tensões usuais do circuito primário são 13,8 kV e 34,5 kV. O circuito secundário é alimentado pelos secundários dos transformadores de distribuição, operando abaixo de 1 kV em baixa tensão (ENERGISA, 2018b; ABNT, 2006; ABNT, 2008).

2.1 Demanda

A demanda de energia elétrica será tratada simplesmente como demanda para o escopo deste trabalho. Define-se demanda a potência instantânea solicitadas por um sistema, composto por um conjunto de cargas em operação (κ) em um instante de tempo t . Este conjunto depende do escopo do estudo, podendo representar as cargas de um quadro de distribuição ou de consumidor atendido pela distribuidora. Generalizando, na expressão 2.1, a demanda $D(t)$ como a soma das cargas $C_i(t)$ em operação em um dado instante (ELETROBRÁS, 1982a).

$$D(t) = \sum_{i \in \kappa} C_i(t) \quad (2.1)$$

Para determinar a potência de alimentação, necessária para ligação dos consumidores, precisa-se conhecer a demanda máxima verificada no período de operação do sistema. Ou seja a potência máxima solicitada pelo sistema em qualquer momento de sua operação. Isto estabelece um requisito mínimo para o desempenho da instalação. Restringindo as possíveis soluções para os equipamentos como transformadores e os alimentadores estejam dentro de limites adequados de elevação de temperatura e queda de tensão. Expressamos a demanda máxima $D_{máx}$ pela equação 2.2 (FILHO, 2017).

$$D_{máx} = \max(D(t)) \quad (2.2)$$

Existem situações em que se conhece o regime de operação das cargas que compõe o sistema. Entretanto na maioria dos casos a demanda dos sistemas possui caráter estocástico, diante a aleatoriedade inerente ao uso das cargas. Para previsão da demanda máxima de um sistema é considerada a diversificação no regime coincidente de operação. Baseado em estudo estatístico no histórico de demanda de consumidores, sua atividade e carga instalado tem-se um modelo relacionando a demanda máxima com a carga instalada. A razão da demanda máxima, em determinado intervalo de tempo, pela carga instalada P_{inst} do sistema ou da instalação considerada é definida como fator de demanda (F_D) expresso em 2.3 (ENERGISA, 2018b; CEMIG, 2013).

$$F_D = \frac{D_{máx}}{P_{inst}} \quad (2.3)$$

A demanda máxima ($D_{máx}$) das unidades consumidores que compõe um empreendimento, pertencentes ao conjunto ν , leva à identificação da demanda do todo. Como $D_{máx}$ para cada UC (i) em um intervalo de tempo não é concomitante, a soma das demandas não coincidentes ($\sum_{i \in \nu} D_{máx\ i}$) não representa a demanda do conjunto ν . Esta demanda é caracterizada como sendo a demanda máxima diversificada. Com este conceito chega-se à definição de fator de diversidade (F_{DV}), descrito na equação 2.4, como a razão da demanda máxima não coincidente com a demanda máxima diversificada. Muitas concessionárias de energia disponibilizam F_{DV} , de acordo com o tipo e quantidade de consumidores do loteamento. Dessa forma é possível determinar a demanda máxima do grupo (D_{MD}) (MARTINEZ, 2015).

$$F_{DV} = \frac{\sum_{i \in \nu} D_{máx\ i}}{D_{MD}} \quad (2.4)$$

2.1.1 Demanda diversificada pela área da UC

Tabela 1 – Demanda Diversificada Residencial.

Área do lote $A_i[m^2]$	Demanda por lote $[kVA]$
$A_i \geq 250$	0,70
$250 < A_i \leq 350$	1,00
$350 < A_i \leq 450$	2,00
$A_i > 450$	3,00

Fonte: Energisa (2018b, Tabela 2).

Para consumidores ligados em tensão secundária a 2 e 3 fios (monofásicos e bifásicos), a Energisa (2018b) recomenda o cálculo da demanda diversificada residencial. Sendo a demanda por lote ($D_{\text{lote } i}$ [kVA]), em função da área do lote (A_i [m²]) conforme indicado na Tabela 1. A demanda do conjunto de n lotes bifásicos ou monofásicos ($D_{1\phi \text{ \& } 2\phi}$) é expressa pela equação 2.5.

$$D_{1\phi \text{ \& } 2\phi} = \sum_{i=1}^n D_{\text{lote } i}(A_i) \quad (2.5)$$

2.1.2 Demanda diversificada pela atividade do consumidor e potência instalada

Para consumidores com potência instalada acima de 75 kW, geralmente comerciais ou industriais, são atendidos em tensão primária de fornecimento e o cálculo da demanda máxima é recomendado conforme Energisa (2019b, Tabela 13). O projetista deve obter o fator de demanda máximo ($F_{D \text{ máx}}$), de acordo com o ramo de atividade da UC. Em seguida deve-se totalizar a potência instalada (P_{inst}) à partir da soma das cargas (C_i) pertencentes ao sistema em análise (ψ). Para cada intervalo de carga instalada i existe um fator $F_{D \text{ } i}$ relacionado. Então se distribui a potência instalada em intervalos ($P_{\text{inst } i}$) limitados pelo $F_{D \text{ } i}$. A demanda máxima do consumidor em estudo será a soma dos produtos entre o intervalo de potência instalada e seu respectivo fator de demanda, conforme descrito na equação 2.6.

$$D_{\text{máx}} = \sum_{i \in \psi} P_{\text{inst } i} \cdot F_{D \text{ } i} \quad (2.6)$$

2.1.3 Demanda pela atividade do consumidor e tipo das cargas

Para consumidores atendidos em tensão secundária a 4 fios (trifásicos) a Energisa (2018b) recomenda cálculo de demanda conforme Energisa (2019a, p. 47). Neste caso a não simultaneidade na operação das cargas é ponderada pelo conjunto de fatores quanto

à carga e consumidor. A demanda total (D_S [kVA]) é baseada no padrão demandado de uma categoria de consumidor relacionado com o tipo de carga instalada e sua potência instalada. As classificações dos tipos de carga são apresentadas na Tabela 2 - Categorias de demanda por tipo de carga..

Tabela 2 – Categorias de demanda por tipo de carga.

ID da categoria	Descrição
d_1	Demanda de iluminação e tomadas (seção 2.1.3.1)
d_2	Demanda dos aparelhos para aquecimento de água (seção 2.1.3.2)
d_3	Demanda secador de roupa, forno de micro-ondas máquina de lavar louça e hidro massagem (seção 2.1.3.3)
d_4	Demanda de fogão e forno elétrico (seção 2.1.3.4)
d_5	Demanda de condicionamento de temperatura de ambientes (seção 2.1.3.5)
d_6	Demanda para máquinas elétricas girantes (seção 2.1.3.6)
d_7	Demanda para cargas especiais (seção 2.1.3.7)

Fonte: Energisa (2019a, p. 47).

2.1.3.1 Demanda de iluminação e tomadas

Nesta categoria (d_1) engloba-se cargas de iluminação e tomadas previstas conforme ABNT (2008, NBR 5410). A Energisa (2019a, Tabela 3), prevê diferentes categorias de consumidores conforme lista:

1. Residência;
2. Restaurante e Similares;
3. Loja e Similares;
4. Igreja e Similares;
5. Hospital e Similares;
6. Hotel e Similares;
7. Garagem, Áreas de Serviço e Similares;
8. Escritório;
9. Escola e Similares;
10. Clube e Similares;
11. Barbearia, Salão de Beleza e Similares;
12. Banco e Similares;
13. Canteiro de Obras e Similares;
14. Auditório, Salão de Exposição e Similares;
15. Quartel e Similares.

Mediante o enquadramento do consumidor em uma categoria da lista, haverá um intervalo de carga instalada onde cada elemento i é associado a um fator de demanda F_{D_i} . O cálculo é idêntico ao realizado no tópico 2.1.2. Desse modo deve ser calculada a potência instalada (P_{inst}) para as cargas pertencentes a esta categoria de demanda aplicar a fórmula 2.6 para obter a demanda d_1 (Demanda de iluminação e tomadas). A P_{inst} para esta categoria de demanda é dada pela equação 2.7, onde o conjunto ψ representa as cargas pertencentes à categoria "d₁ - Demanda de iluminação e tomadas".

$$P_{inst} = \sum_{k \in \psi} C_i \quad (2.7)$$

2.1.3.2 Demanda dos aparelhos para aquecimento de água

A Energisa (2019a, Tabela 4), relaciona o número de cargas destinadas a aquecimento de água à um fator de demanda (F_D). Então toma-se a P_{inst} pela equação 2.7, onde ψ representando o conjunto de cargas pertencentes a "d₂ - Demanda dos aparelhos para aquecimento de água". Por fim aplica-se o fator de demanda pela equação 2.8.

$$d = P_{inst} \cdot F_D \quad (2.8)$$

2.1.3.3 Demanda secador de roupa, forno de micro-ondas máquina de lavar louça e hidro massagem

A categoria (d₃) relaciona um fator de demanda (F_D) com o número de cargas incluídas no grupo: secador de roupa, forno de micro-ondas máquina de lavar louça e hidro massagem. O F_D é consultado na Energisa (2019a, Tabela 5). Enfim a demanda d_3 é calculada pela equação 2.8.

2.1.3.4 Demanda de fogão e forno elétrico

Para os equipamentos fogão ou forno elétrico, contabiliza a quantidade de equipamentos para obter o fator de demanda em Energisa (2019a, Tabela 6) e obter d_4 pela equação 2.8.

2.1.3.5 Demanda de condicionamento de temperatura de ambientes

A demanda dos aparelhos de ar-condicionado tipo janela ou centrais individuais é calculada conforme o tipo de aplicação. Se residencial utiliza-se F_D da Energisa (2019a, Tabela 8), caso contrário, é considerada a Energisa (2019a, Tabela 9). A demanda da categoria d_5 é encontrada pela equação 2.8.

2.1.3.6 Demanda para máquinas elétricas girantes

A categoria de demanda d_6 engloba motores elétricos e máquinas de solda tipo motor gerador. Para máquinas bipolares é aplicada Energisa (2019a, Tabela 10) e máquinas trifásicas a Energisa (2019a, Tabela 11). Observa-se a restrição, para carga instalada de motores maior que 30 CV não é permitindo atendimento em tensão secundária. Para cálculo da demanda, primeiro é contabilizado a quantidade de motores n para cada potência k do conjunto ψ de motores instalados. A partir da quantidade de motores se identifica a demanda por motor em função de seu quantitativo ($D_k(n_k)$) nas Tabelas mencionadas. Obtém-se a demanda d_6 pela equação 2.9.

$$d_6 = \sum_{k \in \psi} n_k \cdot D_k(n_k) \quad (2.9)$$

2.1.3.7 Demanda para cargas especiais

A demanda d_7 possui fatores de demanda disponíveis pela Energisa (2019a, Tabela 12). Esta categoria abrange cargas especiais como máquinas de solda a transformador e aparelhos de raios X. Primeiro ordena-se a relação desses equipamentos pela potência e na sequência aplica-se cada F_D na sequência ordenada em conformidade com os intervalos de carga.

2.1.3.8 Demanda total do consumidor

A demanda máxima (D_S) do consumidor expressa em [kVA] é dada pela soma das demanda para cada categoria (d_i) em [kW] e convertida para Volt-Ampère pelo fator de potência de referência $f_{p \text{ ref}}$, como descrito na equação 2.10.

$$D_S = \frac{\sum_{i=1}^7 d_i}{f_{p \text{ ref}}}, \quad f_{p \text{ ref}} = 0,92 \quad (2.10)$$

2.1.4 Demanda pelo regime de operação da carga

Aqueles consumidores que possuem informação detalhada do regime de operação das cargas de seu sistema, podem estimar a demanda com esta informação. Tendo como exemplo, consumidores industriais que geralmente possuem cronogramas de operação de seus processos, garantido de forma rigorosa pelos responsáveis técnicos da produção. O cronograma do processo pode ser equivalido para o regime de operação das cargas associadas. Similarmente, para consumidores de regiões remotas em que é instalado sistema fotovoltaico off-grid é necessário estudo detalhado do regime de operação das cargas. Esta exigência se deve ao dimensionamento técnico-econômico do sistema acumulador. Se à

previsão de demanda não for precisa, o consumidor pode ficar sem energia se ocorrer um subdimensionamento das baterias, ou pode resultar em custo demasiado no caso de sobredimensionamento.

Para as situações onde se justifica o estudo ou já é conhecido o regime de operação das cargas, a demanda máxima do consumidor pode ser obtida pela curva de carga que representa a demanda em função do tempo ($\mathbf{D}(t)$). Para obtenção desta curva deve-se conhecer a relação de cargas, contendo n cargas, e para cada carga i as informações: potência a potência ativa (P_i [W]) e fator de potência ($fp_i = \cos \varphi_i$). A partir da equação 2.11 é conhecida a potência aparente nominal de cada carga i ($\mathbf{S}_i$ [VA]). A potência aparente (S) é composta pelas componentes de potência ativa ($P = \Re(\mathbf{S})$ [W]) e potência reativa ($Q = \Im(\mathbf{S})$ [VAr]) (PINHO; GALDINO, 2014).

$$\mathbf{S} = \frac{P}{\cos \varphi} (\cos \varphi + j \sin \varphi) \quad (2.11)$$

À partir do regime de operação, geralmente 24 horas, temos intervalo de tempo t , sendo $\{t \in \Re \mid t_0 \leq t \leq t_f\}$. Para cada carga, seu intervalo de operação t_k é definido pela hora de início de operação em h_i e de término h_f , sendo $\{t_k \subset t \mid h_i \leq t_k \leq h_f\}$. Desta forma sabe-se a potência aparente nominal ($\mathbf{S}_i(t)$) da carga i em todo intervalo t , definida pela função 2.12. À partir do regime de operação levantado se conhece o fator de serviço ($f_{s\ i}$) indicando o percentual da potência nominal em que a carga opera no intervalo t_k , apresentado na função 2.13.

$$\mathbf{S}_i(t) = \begin{cases} \mathbf{S}_i & \text{se, } t \in (t \cap t_k) \\ 0 & \text{se, } t \notin (t \cap t_k) \end{cases} \quad (2.12)$$

$$f_{s\ i}(t) = \begin{cases} f_{s\ i} & \text{se, } t \in (t \cap t_k) \\ 0 & \text{se, } t \notin (t \cap t_k) \end{cases} \quad (2.13)$$

A demanda do sistema ($D(t)$) é dada pela soma do produto entre a potência aparente de carga (S_i) e seu respectivo fator de serviço ($f_{s\ i}$), apresentado na equação 2.14. A demanda máxima do sistema, para dimensionamento dos componentes é dado pela equação 2.2. Com base na demanda encontrada, podemos obter uma previsão do consumo (C) no intervalo t pela equação 2.15.

$$\mathbf{D}(t) = \sum_{i=1}^n \mathbf{S}_i(t) \cdot f_i(t) \quad \therefore \quad D_{\max} = \max(|\mathbf{D}(t)|) \quad (2.14)$$

$$C = \int_{t_0}^{t_f} \Re(\mathbf{D}(t)) \, dt \quad (2.15)$$

2.2 Condutores

Os condutores são os responsáveis pelo transporte eficiente de energia elétrica. Sua seleção adequada garante operação do sistema dentro de parâmetros exigidos de desempenho e segurança, sem que ocorra deterioração da instalação. Estes parâmetros são estabelecidas pelas normas técnicas e condições de fornecimento exigidas pela ANEEL (2021). A demanda máxima do empreendimento, conforme discutido na seção 2.1, é prevista para que a instalação projetada atenda estes requisitos. No escopo de escolha de condutores, deve ser previsto: efeito térmico, queda de tensão e efeito campo elétrico. Outros fatores também intervêm na determinação da seção dos condutores como as proteções contra choque, efeitos térmicos e sobrecorrentes (ABNT, 2006).

Para RD urbanas, do tipo compacta, é utilizado como mensageiro para sustentação do circuito o cabo de aço 9,5 mm², formação a 7 fios. Os cabos protegidos com bitolas e formação para circuitos trifásicos indicados:

- **Cabo 50 mm²:** $3 \times 1 \times 50 \text{ mm}^2 + 9,5 \text{ mm}^2$
- **Cabo 70 mm²:** $3 \times 1 \times 70 \text{ mm}^2 + 9,5 \text{ mm}^2$
- **Cabo 120 mm²:** $3 \times 1 \times 120 \text{ mm}^2 + 9,5 \text{ mm}^2$
- **Cabo 185 mm²:** $3 \times 1 \times 185 \text{ mm}^2 + 9,5 \text{ mm}^2$

2.2.1 Queda de tensão

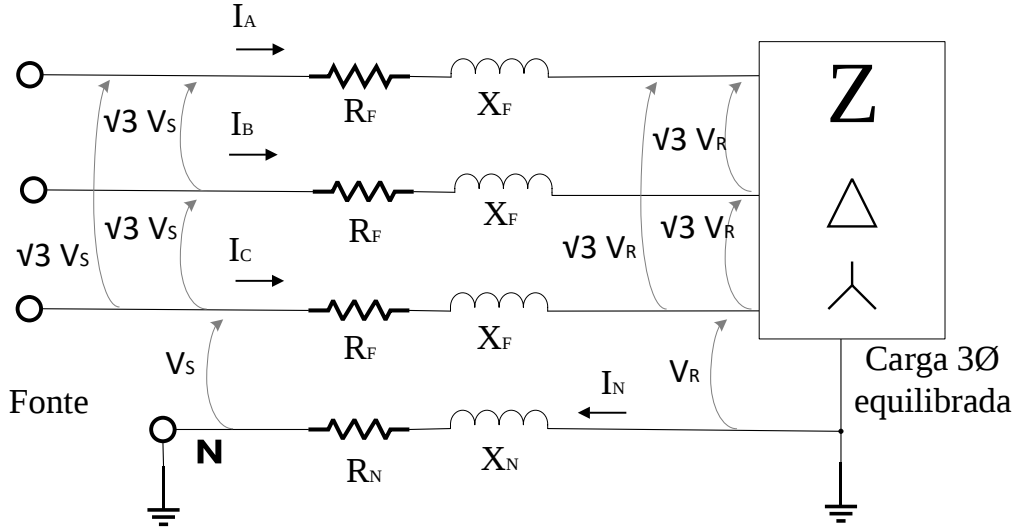
A regulamentação imposta pela ANEEL (2021) exige que o limite de desvio para tensão de fornecimento ao consumidor seja de 5 %. Desse modo, no planejamento da RD deve-se avaliar a queda de tensão para o ponto mais desfavorável da RD, de modo a garantir os limites estabelecidos para tensão em regime permanente. A queda de tensão a ser considerada depende da distância percorrida pelos alimentadores, de suas bitolas e da carga instalada prevista para o horizonte do projeto. Na rede primária os candidatos para o ponto mais desfavorável seriam aqueles mais distantes da fonte (subestação de distribuição) e com maior carga.

A técnica para modelagem matemática da RD depende da complexidade desta e precisão exigida. No escopo deste trabalho será utilizado o método simplificado pelo coeficiente unitário de queda de tensão. Deste modo será abrangido sistema trifásico radial equilibrado. Um sistema trifásico pode alimentar cargas monofásicas, devendo ser planejado a distribuição dessas cargas de modo a garantir condição de equilíbrio (ELETROBRÁS, 1982a).

Na Figura 2 é representado de forma genérica o circuito de um alimentador trifásico de comprimento L [km]. A impedância da linha por fase é Z_F [Ω /km]. A carga do sistema é equilibrado, portanto $I_N = 0$ e $I_A = I_B = I_C = I_F$ [A]. O fator de potência das cargas é dado por $\cos \varphi$. A tensão na carga é V_R [V] e na fonte V_S [V] (geralmente tensão nominal).

Então pela lei das tensões de kirchhoff a equação do circuito monofásico torna-se:

Figura 2 – Alimentador trifásico.



Fonte: Elaborada pelo autor.

$$\mathbf{V}_S = \mathbf{V}_R + \mathbf{I}_F \cdot \mathbf{Z}_F \cdot L \quad (2.16)$$

Obtemos a magnitude das grandezas pela aproximação na equação 2.17.

$$V_S = V_R + I_F(R_F \cos \varphi + X_F \sin \varphi)L \quad (2.17)$$

A queda de tensão percentual será:

$$\Delta V = \frac{V_S - V_R}{V_S} \cdot 100 [\%] \quad (2.18)$$

Para encontrar a queda de tensão percentual, conforme equação 2.18, isolamos as variáveis de tensão na equação 2.17, multiplica-se por 100 ambos lados da equação, e então divide-se ambos lados da equação por V_S :

$$\frac{I_F(R_F \cos \varphi + X_F \sin \varphi)L}{V_S} \cdot 100 = \frac{V_S - V_R}{V_S} \cdot 100 = \Delta V [\%] \quad (2.19)$$

Substituindo, em 2.19, a relação da tensão de fase da fonte pela sua tensão de linha $V_S = V_S^l / \sqrt{3}$. E multiplicando a expressão pela razão da tensão de linha na carga V_R^l / V_R^l obtém-se:

$$\Delta V = \frac{(R_F \cos \varphi + X_F \sin \varphi)}{V_S^l \cdot V_R^l} \cdot 100 \cdot \sqrt{3} V_R^l I_F \quad (2.20)$$

A potência trifásica é:

$$S_{3\phi} = \sqrt{3}V_R^l I_F \quad (2.21)$$

Substituindo 2.21 em 2.20, e aproximando a tensão na carga V_R^l pela tensão nominal V_S^l . Tem-se a queda de tensão dada pela expressão 2.22.

$$\Delta V = \frac{R_F \cos \varphi + X_F \sin \varphi}{(V_S^l)^2} \cdot 100 \cdot S_{3\phi} \cdot L \quad (2.22)$$

Separando as variáveis de projeto da RD, $S_{3\phi}$ e L , tem-se em 2.23 o coeficiente unitário de queda de tensão H . Este corresponde a queda de tensão em percentual para cada MVA de carga por km.

$$H = \frac{R_F \cos \varphi + X_F \sin \varphi}{(V_S^l)^2} \cdot 100 \quad (2.23)$$

$$\left(\frac{\Omega \cdot 100}{km \cdot kV^2} = \frac{1}{k^2} \cdot \frac{\Omega}{V^2} \cdot \frac{100}{km} = \frac{\%}{MVA \cdot km} \right)$$

À partir da expressão 2.23, as concessionárias fornecem em suas normas valores de H tabelados em função da tensão da rede e fatores de potência padrão. Então, dado valor de H , pode-se reescrever (ELETROBRÁS, 1982a; ELETROBRÁS, 1982b):

$$\Delta V = H \cdot S_{3\phi} \cdot L \quad (2.24)$$

Para cálculo da queda de tensão em circuito secundário (BT), deve-se assumir que carga é distribuída, ou seja, distribui-se linearmente pelo ramal. À partir desta condição muitas concessionárias, como Energisa (2018b) e CEMIG (2013), adotam práticas que simplificam o projeto dos troncos secundários, com exigências que visam garantir queda de tensão dentro de limites. Sendo normatizado para construção de RDs a bitola mínima de 70 mm² (CAA) associada a restrições no comprimento dos circuitos secundários. O comprimento máximo radial para tensões de linha de 220 V é 200 m e para 380 V é 400 m (ENERGISA, 2018b; ENERGISA, 2018c).

2.2.2 Efeito térmico

O dimensionamento do condutor deve ser feito de modo que a corrente transportada por ele não produza efeito térmico prejudicial. O aquecimento com a condução de corrente em função das condições de dissipação de calor não pode ocasionar a degradação dos materiais ou comprometimento da segurança de operação de quaisquer dos componentes da instalação. Dessa maneira a previsão de demanda permite a escolha de condutores

de maneira econômica evitando sobredimensionamento, e garantindo aos consumidores o atendimento adequado do ponto de vista técnico (ABNT, 2006; ABNT, 2008).

A configuração mais comum para RDs é o sistema radial. Para determinar a corrente em qualquer trecho da rede, em um sistema trifásico equilibrado, é analisado toda carga acumulada (S) e a tensão (V_S) a jusante do ponto de interesse. A corrente no trecho a montante do ponto de estudo é dado pela expressão 2.25. A tensão considerada é a tensão obtida no estudo 2.2.1. Dependendo do rigor do estudo pode-se aproximar para tensão V_S para tensão nominal do sistema, visto que o levantamento de carga também está sujeito a estimativa.

$$I_F = \frac{S_{3\phi}}{\sqrt{3}V_S^l} \quad (2.25)$$

2.2.2.1 Média tensão

De modo a garantir uma vida satisfatória aos condutores, deve ser levado em consideração os efeitos térmicos produzidos pela circulação de corrente em função do método de instalação do condutor. Isto interfere diretamente na dissipação do calor produzido, portanto na corrente admissível. Os métodos de referência (**A** a **I**) conforme ABNT (2006, NBR 14039, s. 6.2.5.1) estão relacionados a seguir.

- **A:** cabos unipolares justapostos (na horizontal ou em trifólio) e cabos tripolares ao ar livre;
- **B:** cabos unipolares espaçados ao ar livre;
- **C:** cabos unipolares justapostos (na horizontal ou em trifólio) e cabos tripolares em canaletas fechadas no solo;
- **D:** cabos unipolares espaçados em canaletas fechadas no solo;
- **E:** cabos unipolares justapostos (na horizontal ou em trifólio) e cabos tripolares em eletroduto ao ar livre;
- **F:** cabos unipolares justapostos (na horizontal ou em trifólio) e cabos tripolares em banco de dutos ou eletrodutos enterrados no solo;
- **G:** cabos unipolares em banco de dutos ou eletrodutos enterrados e espaçados $\pm$ um cabo por duto ou eletroduto não condutor;
- **H:** cabos unipolares justapostos (na horizontal ou em trifólio) e cabos tripolares diretamente enterrados;
- **I:** cabos unipolares espaçados diretamente enterrados.

Conforme o método usado na instalação e a corrente calculada pela expressão 2.25, seleciona-se o condutor que suporta a magnitude corrente prevista por meio das Tabelas 28, 29, 30 e 31 da ABNT (2006, NBR 14039, s. 6.2.5). Deve-se levar em consideração a

temperatura de referência do ambiente e de operação para cada tabela, então a capacidade de condução de corrente deve ser corrigida conforme o ambiente da instalação, utilizando os valores da Tabela 32 da mesma norma. Também deve ser consultada a norma da distribuidora onde será construída a RD. Ela pode estabelecer valores mais conservadores que a NBR, exigindo adequação do projeto.

2.2.2.2 Baixa tensão

Condutores de baixa tensão são projetados de forma análoga ao método 2.2.2.1 para condutores de média tensão. Deve ser analisada o método de instalação conforme lista abaixo e a corrente que circula pelo condutor. A capacidade de condução de corrente é dada nas Tabelas 36 à 40 da ABNT (2008, NBR 5410, s. 6.2.5), onde deve ser considerada com suas temperaturas de referências. Então quando aplicável, utilizar os fatores de temperatura e/ou agrupamento indicados nas Tabelas 40 a 45 da mesma norma.

- **A1**: condutores isolados em eletroduto de seção circular embutido em parede termicamente isolante;
- **A2**: cabo multipolar em eletroduto de seção circular embutido em parede termicamente isolante;
- **B1**: condutores isolados em eletroduto de seção circular sobre parede de madeira;
- **B2**: cabo multipolar em eletroduto de seção circular sobre parede de madeira;
- **C**: cabos unipolares ou cabo multipolar sobre parede de madeira;
- **D**: cabo multipolar em eletroduto enterrado no solo;
- **E**: cabo multipolar ao ar livre;
- **F**: cabos unipolares justapostos (na horizontal, na vertical ou em trifólio) ao ar livre;
- **G**: cabos unipolares espaçados ao ar livre.

2.2.3 Isolamento

O efeito do campo elétrico deve ser considerado para atender critérios de segurança e desempenho. As instalações de RD podem ser feitas com condutores nu, protegido ou isolado. O uso de condutores isolados ou protegidos vem se popularizado com queda no preço dos materiais isolantes e da tecnologia de extrusão do material. Algumas distribuidoras, como a Energisa (2018a), exigem no perímetro urbano que as novas RD em baixa tensão sejam instalações autossustentada isoladas (ABNT, 2018). Já instalações em média tensão são comumente com cabos protegidos sustentados por espaçadores (ABNT, 2013b). Redes isoladas em média tensão são geralmente utilizadas para instalações subterrâneas ou aéreas autossustentadas em áreas de grande densidade predial e risco elevado de contato entre condutores ou estruturas. Em área rural ainda é permitido instalações de RD com condutores nu, desde que a vegetação na faixa de servidão seja de baixo porte não

implicando interferência. A isolamento entre os condutores e a estrutura é feita por isoladores tipo pilar ou bastão (ABNT, 2013a).

Para condutores protegidos ou isolados o material isolante é especificado conforme a sua tensão de aplicação e composição. Devido ao caráter externo e exposto a intempérie, as redes em baixa tensão utilizam isolamento 0,6/1 kV XLPE ou EPR. Estes podem ser aplicados a qualquer instalação em baixa tensão caracterizada pelo limite de 1 kV. Já os condutores protegidos possuem camada de proteção em XLPE, e o condutor isolado com camada extra para isolamento. Estes são fabricados em diferentes parâmetros para operação nas tensões de 11,4 kV, 13,8 kV, 22 kV e 36,2 kV.

2.3 Seleção e locação das subestações

A seleção da potência das subestações em uma RD deve visar a distribuição da potência demandada discutida na seção 2.1, transportada pelos circuitos primários, em circuitos secundários. Do ponto de vista da carga a melhor posição da subestação está no centro de carga, definido pelo cálculo do baricentro dos pontos modelados como carga puntiforme. As equações 2.26 e 2.27 possibilitam encontrar as coordenadas X e Y , respectivamente, do centro de carga, onde a potência demandada de cada unidade consumidora (P_i) é considerada como carga puntiforme. As coordenadas X_i e Y_i de cada consumidor (i) é ponderada pela sua potência demandada em relação a demanda global do conjunto de n consumidores (FILHO, 2017).

$$X = \frac{\sum_{i=1}^n X_i \cdot P_i}{\sum_{i=1}^n P_i} \quad (2.26)$$

$$Y = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i \cdot P_i}{\sum_{i=1}^n P_i} \quad (2.27)$$

A seleção da potência das unidades transformadoras deve considerar a disponibilidade de trafos em estoque, seja comercial ou do almoxarifado. Também deve ser consultado restrições impostas pela distribuidora de energia com concessão na área do projeto, como estabelecimento da potência máxima permitida para as subestações aéreas. Após seleção das potências das subestações e sua quantificação, deve-se agrupar os consumidores vizinhos de modo a respeitar o carregamento inicial máximo de 80%. Do aspecto técnico-econômico a subestação deve ser locada no ponto o mais próximo possível do centro de carga do grupo de consumidores. É comum que fatores geográficos como arruamento e arranjo do projeto civil do loteamento crie restrições para posicionamento do trafa no centro de carga, exigindo ao projetista a escolha de um local não ótimo do ponto de vista técnico.

2.4 Proteção e seccionamento

2.4.1 Proteção contra sobretensão

Para rede primária é usado para-raio de óxido de zinco, com base isolante. A tensão nominal do para-raio deve ser conforme a tensão de fase da rede ($V_S^l/\sqrt{3}$), conforme Tabela 3.

Tabela 3 – Seleção da tensão nominal de para-raios MT.

Tensão nominal do para-raio	Tensão de linha do sistema primário
10 kV	11,4 kV
12 kV	13,8 kV
18 kV	22 kV
30 kV	34,5 kV

Fonte: ABNT (2012, s. 5, p. 13).

Devem ser instalados para-raios nos seguintes pontos da RD (CEMIG, 2013):

- Em quaisquer transição de rede. (urbana, rural, subterrânea, compacta e convencional);
- Em estruturas que houver equipamento, ou na estrutura anterior se conveniente;
- Em média a cada 5 km de RD, mesmo se não houver equipamento;
- Fim de circuito primário;
- Ambos lados de chaves normalmente abertas;
- Em ambas estruturas antes e depois de equipamentos como religadores e reguladores;
- Na derivação de tronco alimentador.

A corrente de descarga padrão para para-raios de média tensão são 5 kA e 10 kA. A Energisa (2018b) e CEMIG (2013) exigem o mínimo de 10 kA. A quantidade de para-raios deve ser maior da indicada em caso de alta taxa de descargas atmosféricas, indicadas por estudo, ou em caso de histórico de região com muita ocorrência de sobretensão.

Na rede secundária é instalado nos equipamentos e eventualmente em consumidor reclamante, se houver indicio de sobretensão devido a descarga atmosférica. Estes para-raio são exigidos com corrente nominal mínima de 10 kA por distribuidoras como CEMIG (2013) e Energisa (2018b). A tensão nominal deve ser 280 V e 175 V, conforme tensão nominal de fase da rede, 220 V e 127 V, respectivamente. Os para-raios são equipados com desligador automático para desconexão elétrica e sinalização dos defeituosos.

2.4.2 Seccionamento

O projeto de seccionamento deve ser realizado após o estudo de proteção para garantir complementação dos recursos operativos. A localização das chaves deve ser definida

por análise buscando minimizar áreas afetadas pela interrupção causada por manutenção ou situações de emergência. As chaves seccionadores devem ser previstas nos pontos de interligação, para situações de transferência de carga e divisão do tronco alimentador em trechos de cargas iguais. Também são aplicadas quando não for viável a instalação de dispositivo de proteção devido a critérios de coordenação ou nível de curto-circuito (ABNT, 2006, NBR 14039,s. 6.3.6.1).

2.4.3 Proteção contra sobrecorrente e curto-circuito

Para evitar que os condutores sejam danificados, quando aplicável, deve haver proteção contra sobrecarga interrompendo a corrente de sobrecarga em tempo suficientemente curto. Da mesma maneira, a proteção de curto circuito deve atuar quando o condutor é percorrido pela corrente de curto-circuito. Ambas proteções visam prevenir a deterioração do condutor e componentes associados a instalação devido ao efeito térmico produzido pelo excesso de corrente. Os dispositivos utilizados para esta proteção são fusíveis e disjuntores dispondo de disparo associado a relé (ABNT, 2006).

Para garantir a proteção contra curto-circuito, o dispositivo deve ter capacidade de interrupção de corrente igual ou maior da corrente de curto-circuito máxima prevista no ponto onde é instalado. Este deve atuar para quaisquer corrente de curto-circuito, incluindo a mínima presumida, comumente o curto-circuito bifásico no ponto mais distante da fonte. O tempo de atuação do dispositivo deve ser menor do que o tempo de circulação da corrente de curto-circuito presumida. Desta forma a elevação de temperatura dos condutores seja maior que o limite estabelecido na Tabela 4.

Tabela 4 – Temperaturas características dos condutores.

Tipo de isolação	Temperatura máxima para serviço contínuo	Temperatura limite de sobrecarga	Temperatura limite de curto-circuito
Cloreto de polivinila (PVC)	70 °C	100 °C	160 °C
Polietileno (PE)	70 °C	100 °C	160 °C
Borracha etileno propileno (EPR)	90 °C	130 °C	250 °C
Polietileno reticulado (XLPE)	90 °C	130 °C	250 °C
Borracha etileno propileno (EPR 105)	105 °C	140 °C	250 °C

Fonte: ABNT (2006, Tabela 27).

Em troncos interligáveis não é prevista proteção, sendo utilizados religadores e seccionalizadores, planejados para manobras que garantam a máxima continuidade da

alimentação, priorizando serviços essenciais. Para toda derivação de alimentadores, ou qualquer área que necessite de maior continuidade de serviço é recomendado o uso de chave-fusível. A chave-fusível deve ser substituída por religador em derivações com potência instalada maior que 1 MVA em 11,4 kV e 13,8 kV e maior que 2 MVA em 22 kV ou 34,5 kV (CEMIG, 2013). A chave-fusível deve atender os requisitos da ABNT (2013a) e ser selecionada com os mesmos critérios, de isolamento e capacidade de condução de corrente, utilizados para escolha das chaves seccionadoras (2.4.2).

Tabela 5 – Dimensionamento dos Elos-Fusíveis para Ramais.

ELO	CORRENTE NOMINAL [A]	CORRENTE PERMANENTE MÁXIMA [A]
10K	10	15
15K	15	22,5
25K	25	37,5
40K	40	60

Fonte: Energisa (2018b, Tabela 4).

O elo fusível deve ser selecionado conforme a potência instalada no ramal, conforme Tabela 5. Os elo-fusíveis instalados em série devem obedecer a coordenação, seletividade e sensibilidade do trecho, de modo a isolar a falha com menor área afetada. A corrente nominal do elo-fusível (IN) deve ser maior que a carga prevista no horizonte do projeto. Os elos devem estar coordenados entre si e para o valor da máxima corrente de curto circuito. Quanto a sensibilidade do elo, deverá garantir que sua corrente nominal seja menor ou igual a 25% da corrente de curto-circuito fase-terra no fim do trecho protegido. O mesmo deve suportar a corrente de magnetização por 0,1 s.

Onde houver transformador na RD, deverá ser utilizada proteção com chave-fusível e elo-fusível conforme Tabela 6, de acordo com a capacidade do transformador e a tensão primária de operação.

Tabela 6 – Elos-Fusíveis para Transformadores Trifásicos.

POTÊNCIA [kVA]	ELO- FUSÍVEL							
	11,4 kV		13,8 kV		22 kV		34,5 kV	
	IN [A]	ELO	IN [A]	ELO	IN [A]	ELO	IN [A]	ELO
15	0,76	1H	0,63	0,5H	0,39	0,5H	0,25	0,5H
30	1,52	2H	1,26	1H	0,79	1H	0,50	0,5H
45	2,28	2H	1,88	2H	1,18	1H	0,75	1H
75	3,80	3H	3,14	3H	1,97	2H	1,26	1H
112,5	5,70	5H	4,71	5H	2,95	3H	1,88	2H
150	7,60	8K	6,28	6K	3,94	5H	2,51	3H
225	11,40	12K	9,41	10K	5,90	5H	3,77	5H
300	15,19	15K	12,55	12K	7,87	8K	5,02	5H

Fonte: Energisa (2018b, Tabela 6).

3 BANCO DE DADOS

Em computação um banco de dados é tido como uma coleção de informações concernentes. O objetivo é o armazenamento dessas informações de forma eficiente para uso. O tipo mais comum é o Banco de Dados Relacional (BDR), onde as informações contidas nele possuem vínculo. Para gerenciamento dos dados existem diversos Sistemas Gerenciadores de Banco de Dados Relacionais (SGBDR), com funcionalidades para acesso e inserção de informação. Os elementos básicos dos BDRs são: tabelas, formulários e consultas. A tabela é o repositório de dados, sendo composta por campos ou atributos, que funcionam como colunas de uma planilha, e as tuplas ou linhas que contém os registros das informações (CARVALHO, 2015).

O que diferencia o banco de dados de uma planilha é a dimensão extra nos dados. Na planilha cada linha representa um registro, exigindo todas informações referentes ao registro em colunas e não existindo forma simples de relacionar os dados com múltiplas planilhas. Já no BDR cada registro em uma tabela pode estar relacionado a um ou múltiplos registros em múltiplas tabelas. Isto evita a repetição de dados, portanto pode eliminar a redundância nos registros. O SGBDR possui mecanismos que facilitam o relacionamento entre os dados. Alguns dos SGBDR mais populares são: *MySQL* e *MariaDB*, como opções open-source e o *MS Access*TM (ALEXANDER, 2018).

3.1 Normalização dos dados

Para estabelecer a relação dos dados cada tabela deve conter um campo ou combinação destes como “chave primária” funcionando como identificador (ID) do registro. Este campo especial de chave primária tem a função de criar uma representação única para cada registro contido nas linhas da tabela. Este conceito é fundamental, visto que a chave primária é relacionada a um campo em outra tabela, chamado de chave estrangeira. Isto permite que os dados não sejam repetidos, sendo um critério fundamental para o bom funcionamento de um BDR. A partir desse princípio é conceituado a normalização dos dados, isto é, cada registro contido nas tuplas de uma tabela deve ocorrer uma única vez no BDR. Informações que se repetem entre as tuplas de uma tabela devem ser substituídas por uma chave estrangeira e as informações devem ser agrupadas outra tabela referenciada pela chave primária (CARVALHO, 2015).

Para garantir normalização dos dados, cada campo de uma tabela deve conter apenas um único valor, e não deve conter conjunto repetido de dados na tabela. Também deve-se garantir que cada registro dependa diretamente da chave primária, senão estes dados devem ser organizados em outras tabelas. Por fim, não deve haver nenhum campo

na tabela que possa ser derivado à partir de campos de quaisquer tabelas do BDR.

3.2 Relacionamento entre tabelas

Existem três tipos básicos de relacionamento entre tabelas: *um-para-um* (one-to-one), *um-para-muitos* (one-to-many) e *muitos-para-muitos* (many-to-many). Estes relacionamentos indicam quantos registros de uma tabela estão associados a outra tabela. O relacionamento menos comum é do tipo *um-para-um*. Este tipo ocorre quando apenas um registro de uma tabela na outra tabela, estão poderiam estar condidas em única tabela com todos campos de ambas tabelas. Este tipo de relacionamento é mais comum para gerenciamento dos dados onde o dado de uma das tabelas é restrito a apenas alguns usuários, facilitando pela implementação de controle de acesso por tabela.

O relacionamento mais comum é o *um-para-muitos*, este tipo ocorre quando apenas um registro de uma tabela pode ocorrer múltiplas vezes em outra tabela. Um exemplo desse relacionamento é uma tabela contendo informações de responsáveis técnicos (**proj_respTecnico**) e outra contendo a relação de projetos (**projetos**). Na tabela **projetos** tem um campo com chave estrangeira, contendo um ID do responsável técnico, enquanto a tabela **proj_respTecnico** possui todos dados do responsável técnico, distribuídos em campos como a chave primária *ID* e os demais *nome*, *número CREA*, *endereço*, *contato* e *documentos*. Para cada projeto haverá um responsável técnico associado e cada responsável técnico haverá diversos projetos associado (ALEXANDER, 2018).

Desta forma, em uma consulta pode-se construir um relatório de um projeto contendo suas informações e de seu responsável técnico sem precisar inserir todos dados do responsável técnico para cada registro de na tabela **projeto**. Isto reduz a redundância de dados e melhora a dinâmica no controle de dados. A mesma relação *um-para-muitos* ocorre no caso de uma tabela com dados de proprietário de um empreendimento **proj_cliente** e a tabela **projetos**. Onde cada registro de proprietário pode ocorrer múltiplas vezes na tabela de projetos, enquanto cada projeto possui 1 proprietário. A relação ocorre da mesma maneira, com cada cliente possuindo um campo, com valor único, para *ID* (chave primária) e um campo na tabela **projetos** com este mesmo *ID* (chave estrangeira).

A última relação básica é a *muitos-para-muitos*, onde múltiplos itens de uma tabela podem estar relacionados a múltiplos itens de outra tabela. Exemplificando, uma tabela contendo a relação de estruturas padronizadas para montagem e a tabela com a relação de projetos. Cada estrutura, com seu respectivo *ID*, pode ocorrer diversos projetos, assim como cada projeto pode utilizar de diversas estruturas. Esta relação não é tão comum quanto a *um-para-muitos* pois pode-se aumentar a flexibilidade de um BDR criando uma tabela de junção dividindo uma relação *muitos-para-muitos* em duas relações *um-para-muitos* (CARVALHO, 2015).

Um exemplo de tabela de junção seria uma tabela indicando quais estruturas são utilizadas por projeto (`proj_countEstruturas`) relacionando com outras duas tabelas: a de informações dos projetos (`projetos`) e a tabela com informações sobre a estrutura (`db_invEstruturas`). Dessa forma pode ser contemplando muito mais informações sem que haja redundância. Cada estrutura possui dados de diversos materiais relacionada à tabela `proj_countEstruturas`. Assim como cada projeto utiliza várias estruturas de `db_invEstruturas` e essas estruturas são utilizadas por vários projetos.

3.3 Gerenciamento dos dados

Para utilização do BDR existe a linguagem descritiva das operações que o SGBDR interpreta para executar as operações desejadas. Esta é chamada de *Linguagem de Consulta Estruturada* (*SQL - Structure Query Language*), composta por comandos de manipulação de dados, consulta de dados, definição de dados e controle de dados. Alguns desses comandos são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Exemplo de comandos SQL.

Tipo de operação	Exemplos de comandos
DQL: Linguagem de Consulta de Dados	SELECT, WHERE, FROM, GROUP, ORDER
DML: Linguagem de Manipulação de Dados	INSERT, DELETE, UPDATE, LOCK
DDL: Linguagem de Definição de Dados	CREATE TABLE, CREATE INDEX, ALTER TABLE, DROP TABLE, DROP VIEW
DCL: Linguagem de controle de dados	COMMIT, ROLLBACK, GRANT, REVOKE

Fonte: Carvalho (2015, p. 5).

O comando **SELECT**, indica quais campos utilizar, enquanto as tabelas a serem consultadas devem ser indicadas no comando **FROM**. No exemplo do Algoritmo 3.1 é demonstrada a aplicação de alguns comandos SQL. Na linha 1, seleciona-se os campos *descricao* e *quantidade*, nas tabelas *Tabela1* e *Tabela2*, respectivamente. Na linha 2 o comando **FROM** indica que há uma relação entre as Tabelas 1 e 2 onde os campos ID são iguais. Na linha 3, o comando **WHERE**, filtra os resultados em que a quantidade for maior que 10. Por fim a linha 4 ordena o resultado da consulta conforme o campo *descricao*. Sendo este do tipo cadeia de caractere, portanto a ordem é alfabética.

Algoritmo 3.1 – Exemplo de SQL

```

1 SELECT tabela1.descricao, tabela2.quantidade
2 FROM tabela1 INNER JOIN tabela2 ON tabela1.ID = tabela2.ID

```

```
3  WHERE tabela2.quantidade > 10
4  ORDER BY tabela1.descricao
```

4 GESTÃO DE DADOS DO PROJETO

Para assegurar a concepção dos objetivos da FCP, foram mapeadas as etapas de um projeto de RD com interesse de automação abrangendo o processo de análise e simulação do sistema previsto. Desta maneira, foram implementados algoritmos para processamento dos dados do projeto atendendo os objetivos específicos do trabalho, como: cálculos da demanda, corrente e queda de tensão, análise da proteção e lista de materiais.

Os algoritmos foram organizados em módulos e desenvolvidos em linguagem compatível com MATLAB®/GNU Octave, acessíveis por uma interface gráfica para o usuário (GUI - Graphical User Interface). Estes módulos são discutidos nos capítulos seguintes. Cada módulo da FCP interage com os dados importados das planilhas de levantamento e projeto em CAD, assim como as informações dos demais módulos. O acesso centralizado aos dados do projeto somado ao potencial de processamento da FCP permite ao projetista da RD realizar sucessivas iterações simulando diferentes cenários de forma rápida e confiável uma vez que os processos de análise já estão assegurados nos algoritmos propostos. Fica como responsabilidade do projetista o controle do fluxo das análises realizadas e as decisões técnicas baseadas nos resultados obtidos.

Para validação dos algoritmos da FCP, é utilizado um cenário exemplo ilustrado na Figura 3. O empreendimento é composto por 37 lotes de diferentes áreas, para teste de cálculo da demanda diversificada em função da área (seção 2.1.1). A área de cada lote é apresentada na seção 4.1.1, na Tabela 9. Visando simular lotes residenciais ou comerciais com atendimento trifásico (seção 2.1.3) é utilizada a relação de cargas da Tabela 10. Esta relação de cargas também é utilizada em conjunto com regime de operação apresentado na Tabela 11, para previsão da demanda máxima pela curva de carga (seção 2.1.4).

4.1 Importar informações de levantamento e projeto

As operações de importação de dados para o FCP assumem que as condições prévias estejam atendidas para que seja garantida o suprimento dos dados necessários. Os arquivos fonte de dados devem conter as informações corretas, contendo os dados no formato adequado e disposição das informações padronizadas, conforme modelos que acompanham o FCP. As planilhas devem seguir o padrão com ordem e tipo dos dados das colunas assegurados. Os arquivos CAD com o projeto também devem seguir padrão, utilizando os itens do banco de dados do modelo, sendo eles os blocos, objetos e layers representando elementos do projeto. Para extrair informações do banco de dados do arquivo CAD é utilizada a ferramenta “DATAEXTRACTION”, pré configurada para cada módulo.

4.1.1 Informações dos lotes das UCs

A composição de lotes no empreendimento é modelada na FCP como uma tabela contendo as informações: identificação da UC, área do lote, categoria de consumo da UC e método utilizado para cálculo da demanda e a demanda calculada. Os dados de levantamento podem ser obtidos de planilha ou arquivo CAD com projeto civil do loteamento em estudo. Para planilha de levantamento com informações de lotes, deve conter ID da UC e área do lote. Essa função se propõe a disponibilizar um método de entrada de informações para estudo preliminar quando não houver projeto civil concluído.

O programa aceita planilhas nos formatos “.xls” e “.ods”, sendo as células dispostas conforme modelo proposto. A FCP possui botão para seleção do arquivo contendo os dados desejados para importar os dados. Então já é calculada a demanda individual de cada lote e total do empreendimento pelo método 5.1.1. A planilha deve conter as colunas, em ordem, “ID Lote”, “Área”, “Demanda [kVA]”, “ID Circuito”, “ID Poste”, “ID Categoria de Consumo”.

Havendo projeto civil do empreendimento, este deve ser padronizado de modo a inserir os polígonos que descrevem o limite dos lotes e sua locação. Junto à informação geométrica, os polígonos representado os lotes possuem informação estendida contendo número de identificação do lote e do poste qual ocorre a derivação com ramal de ligação. A Figura 4 apresenta a tela do software CAD, no modelo do projeto, com um dos lotes selecionado e a caixa de propriedades aberta ao lado, com as informações estendidas para o objeto lote.

A estrutura dessas informações estendidas sobre o lote é contida dentro do objeto de polilinha (“Polyline > Extended Data > DOCUMENTATION > Notes”), no formato chave-valor (<chave>valor</chave>). Esta escolha foi influenciada pelo campo escolhido, anotações, do objeto de polilinha que permite armazenar texto, sendo o formato chave-valor uma escolha natural pela delimitação clara da localização do valor desejado dentro do texto. As chaves de interesse para cada lote são *ID* e *fonte*, com seus respectivos valores: número inteiro para identificação do lote e número inteiro para identificação do poste de derivação.

O comando de extração de dados do programa CAD (DATAEXTRACTION) é utilizado para exportar essas informações à um arquivo auxiliar em “.csv”. Este arquivo é salvo em diretório de acesso comum à FCP que irá ler o arquivo e importar os dados para análise, sendo a identificação do lote pela UC, área do lote e locação no empreendimento. Ao importar esses dados, a FCP salva em uma tabela de seu banco de dados. As informações salvas e suas propriedades são apresentados na Tabela 8.

Para o empreendimento exemplo da Figura 3, é apresentado na Tabela 9, o resultado do algoritmo de importação dos lotes à partir do banco de dados do arquivo CAD. As

Tabela 8 – Atributos da tabela de lotes da FCP.

Coluna na tabela	Tipo/Unidade da variável	Descrição
ID	índice	Número inteiro para identificação do lote
area	m ²	Área do lote
demanda	VA	Demanda calculada para o lote
IDcircuito	índice	ID do circuito que alimenta o lote
IDposte	índice	ID do poste com ramal de derivação
categoriaConsumo	categoria	Categoria de consumo da UC
CargaInst	W	Carga instalada na UC
consumo	kWh	Consumo previsto para UC (5.1.4)
tipoDemanda	categoria	Método para cálculo de demanda utilizado

Fonte: Elaborada pelo autor.

colunas `categoriaConsumo` e `tipoDemanda` foram omitidos, pois inicialmente a FCP assume que todas UCs serão consumidores residenciais e o tipo de demanda “*Demanda diversificada - área*”. Então a demanda individual de cada lote e a total do empreendimento são calculadas na sequência do processo de importação, considerando o tipo de demanda inicial, pelo cálculo pela área do lote (`tipoDemanda`), conforme será discutido na seção 5.1.1. A configuração individual de cada lote deve ser efetuada na etapa de cálculo da demanda (seção 5.1). Os campos `CargaInst` e `consumo` também foram omitidos pois nesta etapa são nulos, sendo utilizados na seção 5.1.

4.1.2 Levantamento de carga das UCs

A planilha de relação de cargas aceita os mesmos formatos de arquivo que a planilha com informações dos lotes. As informações contidas na planilha e necessárias para o cálculo de demanda são apresentados na lista abaixo na ordem da planilha modelo. Estas planilhas devem ser importadas pelo módulo de demanda, acessível por botão na GUI, onde o lote em estudo deve ser selecionado antes da importação para o programa associar corretamente a relação de cargas à UC. A relação de carga da Tabela 10 servirá de exemplo para os cálculos de demanda da seções 5.1.2, 5.1.3 e 5.1.4.

Planilha `relacao_carga` (Utilizado no cálculo de demanda pelos métodos 2.1.2 e 2.1.3):

Tabela 9 – Dados dos lotes que compõem o empreendimento.

ID	area	demanda	ID circuito	ID poste		ID	area	demanda	ID circuito	ID poste
1	352.2086	2000	1	2		20	351.7601	2000	1	2
2	351.9285	2000	1	2		21	351.4116	2000	1	2
3	351.6339	2000	1	3		22	393.1983	2000	1	2
4	351.3957	2000	1	3		23	392.1493	2000	1	10
5	351.3299	2000	1	3		24	340.6036	1000	1	10
6	363.441	2000	1	4		25	530.1547	3000	1	11
7	351.583	2000	1	4		26	557.2064	3000	1	10
8	351.7225	2000	1	4		27	769.2912	3000	1	10
9	351.8545	2000	2	5		28	483.0422	3000	1	4
10	351.9736	2000	2	5		29	351.7204	2000	2	5
11	352.106	2000	2	6		30	352.0925	2000	2	5
12	352.2326	2000	2	6		31	352.2405	2000	2	6
13	352.351	2000	2	6		32	352.2568	2000	2	6
14	352.3879	2000	2	7		33	352.2756	2000	2	6
15	352.3596	2000	2	7		34	352.0857	2000	2	7
16	352.4217	2000	2	8		35	352.352	2000	2	8
17	356.1927	2000	2	8		36	352.3253	2000	2	8
18	403.0587	2000	2	9		37	447.3551	2000	2	9
19	351.9509	2000	1	2						

Fonte: Elaborada pelo autor.

- **ID:** Identificador único para cada carga. (Inteiro sem sinal);
- **Descrição carga:** Texto descritivo (“String”, vetor de caracteres);
- **qtde.:** Quantidade de cargas instalada (Inteiro sem sinal);
- **Potência Individual [W]:** Potência de 1 unidade da carga em ID (“Double”, número decimal);
- **Fator de potência:** (“Double”, número decimal entre 0 e 1);
- **Eficiência:** (“Double”, número decimal entre 0 e 1);
- **Tensão [V]:** (“Double”, número decimal);
- **Fases alimentação [1 2 3 – mono bi tri]:** (Inteiro sem sinal);
- **ID da Categoria de Demanda:** (Inteiro sem sinal entre 1 e 7);
- **Categoria de Demanda:** Descrição do identificador da categoria (“String”, vetor de caracteres);

- **Pot. Tot. Parcial [kW]**: Potência total da carga (“Double”, número decimal calculado pelo FCP);
- **Corrente [A]**: (“Double”, número decimal calculado pelo FCP);
- **Potência Reativa [VAr]**: (“Double”, número decimal calculado pelo FCP);
- **Potência Aparente [VA]**: (“Double”, número decimal calculado pelo FCP).

Tabela 10 – Relação de carga exemplo.

ID	Descrição carga	qtd.	Pot. [W]	fp	U [V]	Fases	Cat. de de- manda
1	Chuveiros	13	5400	1,00	127	2	d2
2	Lampadas LED	120	12	1,00	220	1	d1
3	Refletor metálico	13	400	0,99	220	2	d1
4	Bebedouro	1	350	0,99	127	2	d1
5	Freezer	13	600	0,98	220	1	d1
6	Geladeiras	8	600	0,98	220	1	d1
7	Tanquinho	7	600	0,97	127	1	d1
8	Maquina de lavar roupa	6	1000	0,97	220	1	d1
9	Forno universal	7	1000	0,70	220	1	d4
10	TV	12	100	0,80	220	1	d1
11	Aparelho de ar 12.000 BTU	7	1200		220	2	d5
12	Aparelho de ar 9.000 BTU	4	900		220	2	d5
13	Aparelho de ar 18.000 BTU	2	1850		220	2	d5
14	Panela elétrica	4	1200		127	1	d4
15	Micro-ondas	6	1200		127	1	d3
16	Bomba submersa 4 CV trifásico	1	3820		220	3	d6
17	Vulcanizadora de pneu	2	800		220	2	d1
18	Compressor 5 CV trifásico	1	4780		220	3	d6
19	raio X	3	1000		220	2	d7
20	Esmeril	1	2208		220	2	d1
21	Furadeira bancada	1	1000		220	2	d1
22	TUGs para oficina	1	2070		127	1	d1

Tabela 10 – (continuação).

ID	Descrição carga	qtd.	Pot. [W]	fp	U [V]	Fases	Cat. de de- manda
23	Lixadeira	2	800		220	2	d1
24	Furadeira	1	800		127	1	d1
25	Bomba de abastecimento 2CV	1	2070		220	3	d6
26	TUGs - Área de serviço	1	2910		127	1	d1
27	Máquina solda resistência	3	1000	0,80	220	2	d7
28	Maquina de solda 250 A	5	1000		220	2	d7

Fonte: Elaborada pelo autor.

Planilha `cronograma_carga` (Utilizado no cálculo de demanda pelo método 2.1.4):

- **ID:** Identificador único para cada carga. (Inteiro sem sinal);
- **Descrição:** Texto descritivo, buscado da planilha `relacao_carga` (“String”, vetor de caracteres);
- **ID Carga:** Seleciona ID da carga na planilha `relacao_carga` (Inteiro sem sinal);
- **Início:** Hora de inicio de operação da carga;
- **Fim:** Hora do fim de operação da carga;
- **fs:** Fator de serviço, indicando o fator de serviço de operação da carga e quantas cargas foram acionadas (“Double”, número decimal);
- **Colunas - Seg, Ter, Qua, Qui, Sex, Sáb, Dom:** Valor lógico indicando falso (0) quando a carga não opera no dia da semana e verdadeiro (1) quando opera no dia.

Quando existe tabela com cronograma de carga anexa à planilha de relação de carga a FCP importa estas informações automaticamente. A Tabela 11 contém o cronograma de operação das cargas de um sistema para o período de uma semana. Este regime de funcionamento, associado as cargas da Tabela 10, será utilizado como exemplo para cálculo da demanda na seção 5.1.4. Na Figura 10 é apresentado o resultado de sexta-feira.

Tabela 11 – Cronograma de operação de carga.

ID	ID Carga	Período operação		Fator Ser- viço fs [%]	Dia de operação da carga						
		Início	Fim		Seg	Ter	Qua	Qui	Sex	Sáb	Dom
01	09	11:30	12:30	0,9	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(0)	(0)
02	19	8:00	9:30	0,7	(0)	(1)	(0)	(1)	(0)	(0)	(0)
03	24	9:00	9:30		(0)	(1)	(0)	(1)	(0)	(0)	(0)
04	04	6:00	8:00	1	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(0)
05	04	8:00	11:30	0,2	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(0)
06	04	11:30	13:00	1	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(0)
07	04	13:00	17:00	0,3	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(0)
08	04	17:00	0:00	0,05	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(0)
09	04	0:00	6:00	0,05	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(0)
10	04	0:00	23:59	0,1	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(1)
11	02	18:00	22:00	12	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)
12	02	22:00	5:30	4	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)
13	16	21:00	23:00	1	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)
14	16	11:00	13:00	1	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(0)
15	16	11:00	11:30	1	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(1)
16	25	6:00	6:50	1	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(0)
17	03	18:00	22:00	13	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)
18	05	0:00	5:00	0,65	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)
19	05	5:00	9:00	10,4	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)
20	05	9:00	11:00	2,6	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)
21	05	12:00	13:30	13	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)
22	05	13:30	0:00	2,6	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)
23	01	18:00	20:00	6,4	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(0)
24	01	20:00	22:00	2,5	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(0)

Tabela 11 – (continuação).

ID	ID Carga	Período operação		Fator Ser- viço fs [%]	Dia de operação da carga						
		Início	Fim		Seg	Ter	Qua	Qui	Sex	Sáb	Dom
25	06	22:00	5:30	0,4	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)
26	06	5:30	13:30	6,4	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)
27	13	20:30	22:30	2	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)
28	11	20:30	22:30	7,2	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)
29	13	22:30	5:00	0,4	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)
30	11	22:30	5:00	1,35	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)

Fonte: Elaborada pelo autor.

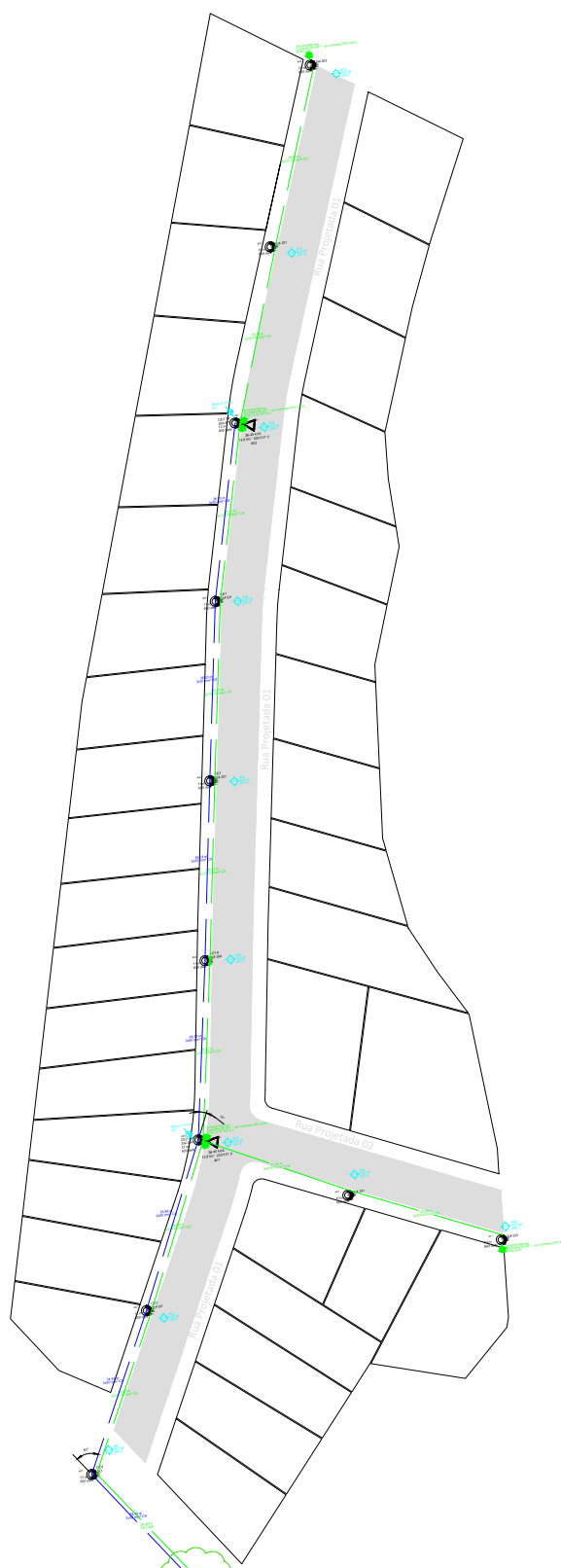
4.2 Importar informações projeto em CAD

Durante a elaboração do projeto no modelo CAD são locados postes, equipamentos e o percurso da RD. Essas informações são necessárias para dimensionamento elétrico e mecânico. Para que a FCP possa processar suas análises são utilizadas o banco dados do desenho em CAD. Desta forma, a cada iteração no desenvolvimento do projeto que envolva alterações no modelo CAD, o usuário da FCP deve executar os módulos para obtenção dos dados modificados. Então a FCP atualizará as análises associadas aos novos dados.

A extração dos dados é feita no programa CAD por rotinas da FCP, pré-configuradas, para acessar as informações desejadas e então exportar para arquivo em diretório de acesso comum à ambas plataformas. Por fim os dados são pré-processados para um formato utilizável e incorporados em variáveis da FCP para estudo. A Figura 6 representa o fluxo de informações importadas do banco de dados do modelo CAD para estudo na FCP.

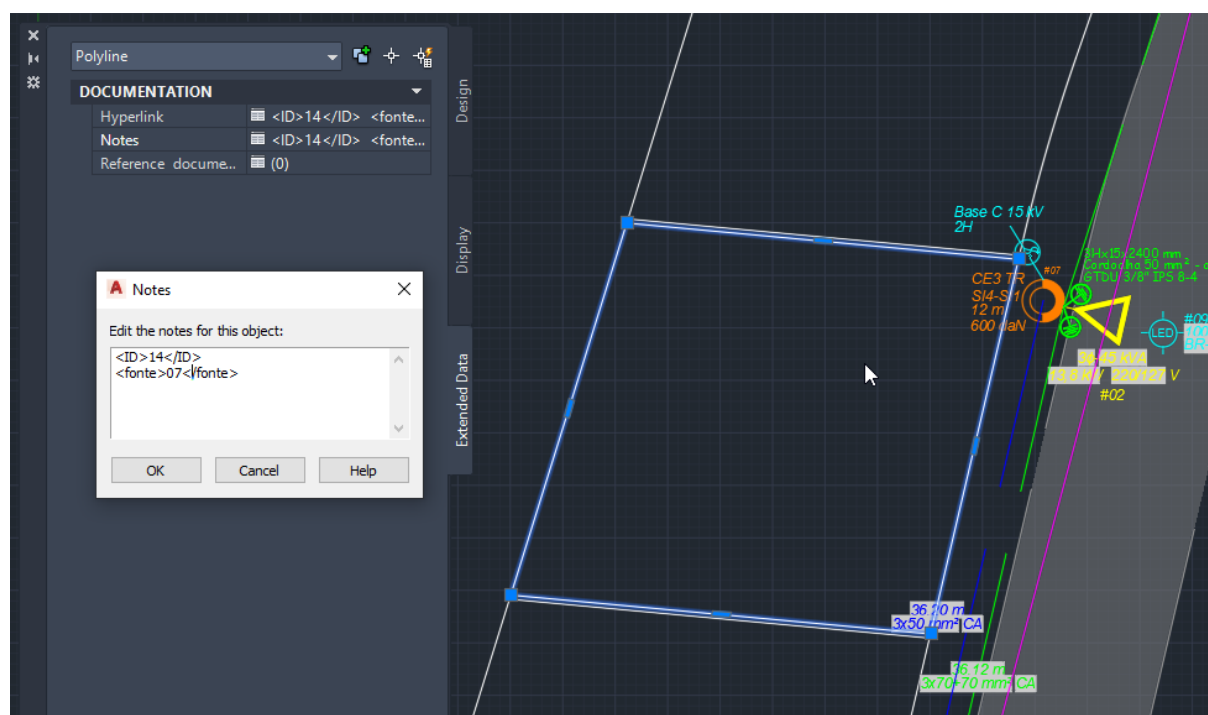
Cada sub-bloco do item “Pré-processamento” possui um algoritmo contendo comandos do software CAD para exportar os objetos de seu banco de dados e comandos da própria FCP responsáveis por tratar as informação. O tratamento da informação engloba filtragem e conversão do tipo de dados. Dessa forma é feita seleção dos itens relevantes para o uso no algoritmo, futura documentação e ajuste do tipo de dados para compatibilizar com o utilizado nas variáveis da FCP.

Figura 3 – RD para atendimento de empreendimento com 37 lotes.



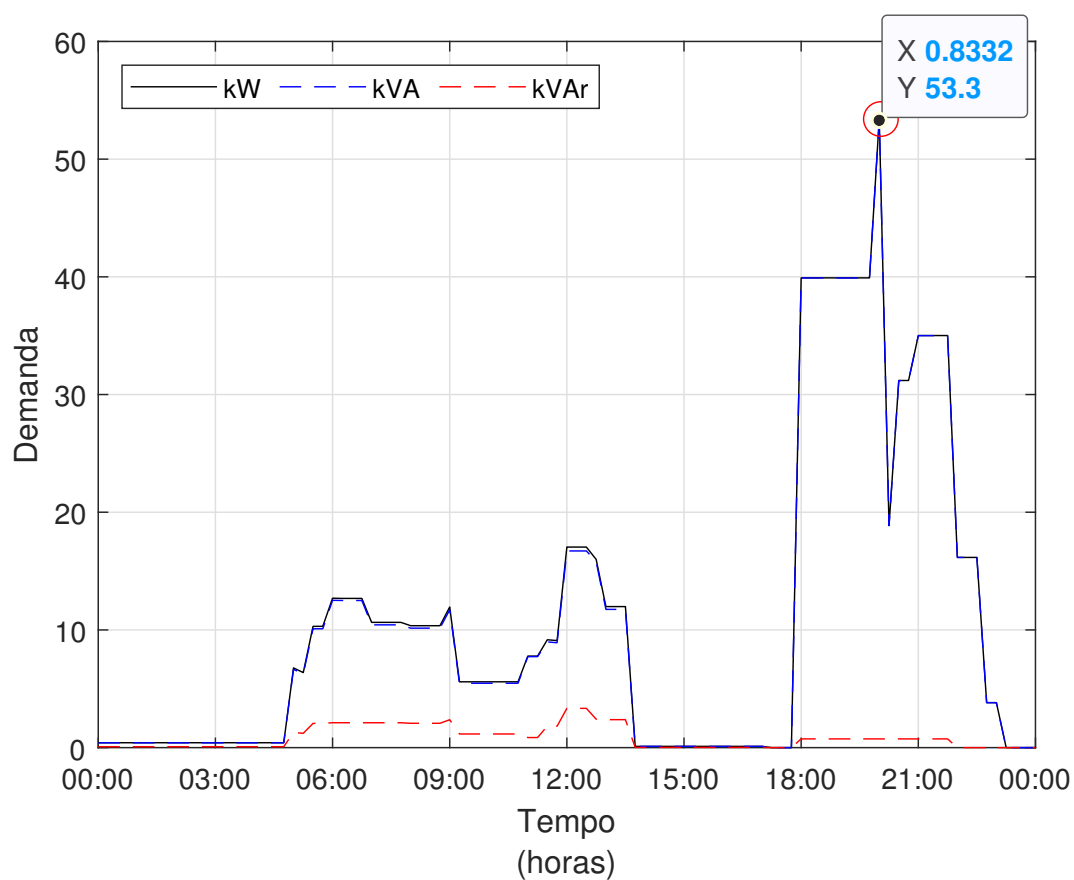
Fonte: Elaborada pelo autor (Sem escala).

Figura 4 – Dados do lote selecionado.



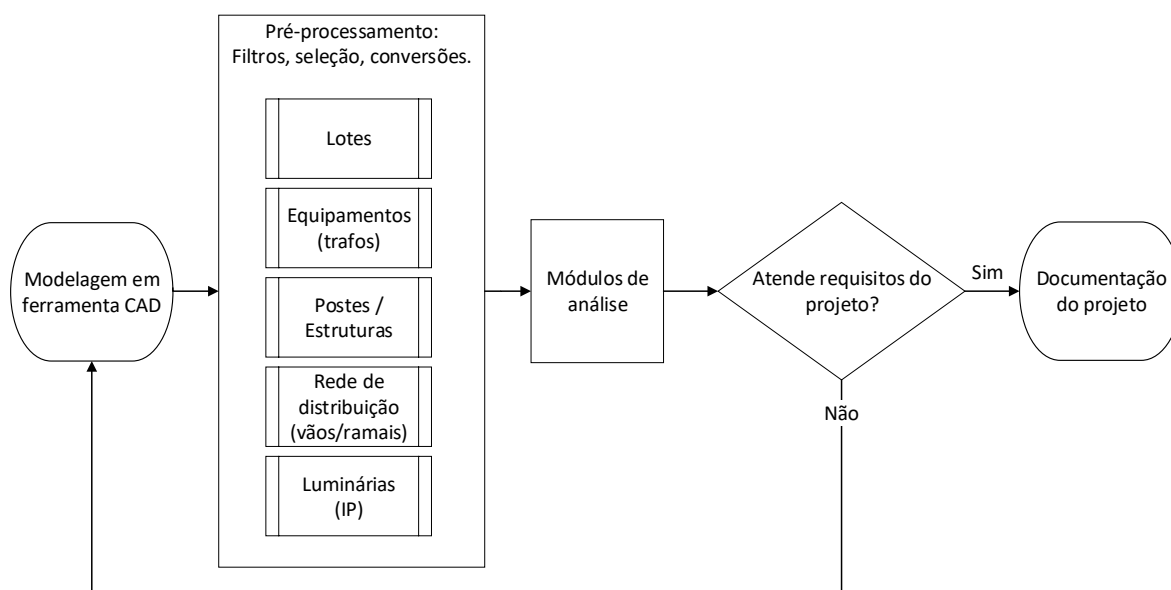
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 5 – Curva de carga demandada obtida pelo regime de operação, na sexta-feira, da Tabela 11.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 6 – Fluxo de dados do modelo CAD para FCP.



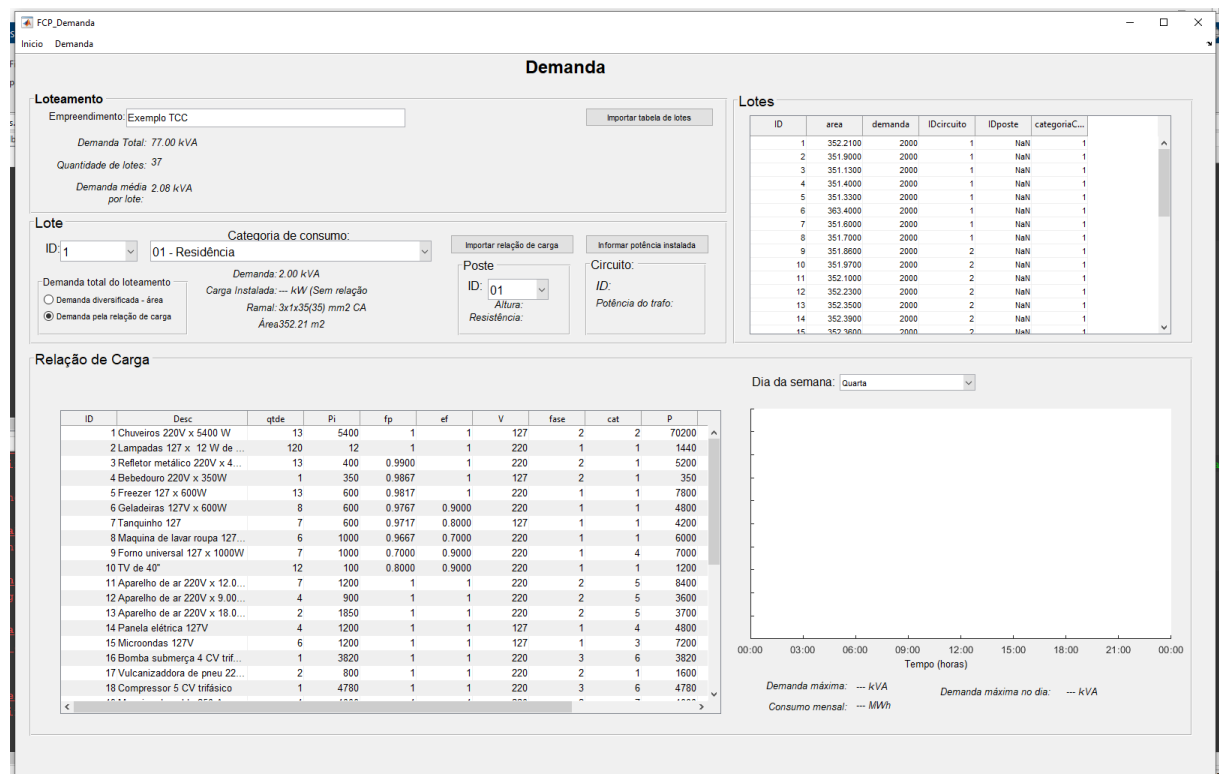
Fonte: Elaborada pelo autor.

5 DIMENSIONAMENTO ELÉTRICO

5.1 Cálculo da demanda do empreendimento

Para estudo da demanda no empreendimento foi elaborado um módulo que abrange as técnicas de cálculo de demanda apresentadas na seção 2.1. Cabe ao projetista da escolha da metodologia de acordo com as especificidades da UC em análise. O módulo gerencia qual técnica foi aplicada, seus resultados e integra à análise de todo do empreendimento. Na Figura 7 está a interface na qual o usuário acessa e gerencia o estudo de demanda.

Figura 7 – Interface gráfica do módulo de demanda da FCP.



Fonte: Elaborada pelo autor.

5.1.1 Demanda diversificada pela área da UC

Na FCP a demanda diversificada residencial é considerada a opção padrão. O cálculo da demanda para empreendimento de loteamento residencial segue o método apresentado na seção 2.1.1. A operação se baseia nos dados dos lotes obtidos na seção 4.1.1, inicialmente assumindo-os como atendimento monofásicos ou bifásicos. Para o Algoritmo 5.1, baseado na equação 2.5, utiliza-se a base de dados da Energisa (2018b, Tabela 02). Para função do cálculo de demanda (`demandaResAreaLote`), tem-se a tabela de lotes

(**tabLotes**) como entrada. Como saída a função retorna a demanda individual de cada lote (**demandaInd**) e a demanda total do empreendimento (**demandaTot**).

Algoritmo 5.1 – Demanda diversificada residencial

```

1  function [demandaTot, demandaIndv] = demandaResAreaLote(tabLote)
2      demandaTot = 0; demandaIndv = zeros(length(tabLote.demanda),1);
3      limite = [251 351 451 Inf]; % Area do lote
4      fd = [.7 1 2 3]*1e3; % Demanda diversificada VA por lote
5      for i=1:length(limite)
6          if i > 1
7              demandaIndv = demandaIndv + (tabLote.area < limite(i) & tabLote.area >
                  ↪ limite(i-1)) * fd(i);
8          else
9              demandaIndv = (tabLote.area < limite(i)) * fd(i); end
10     end
11     demandaTot = sum(demandaIndv);
12 end

```

Após obter os dados do empreendimento da Figura 3, através dos dados obtidos pelo projeto civil no CAD (seção 4.1.1) ou pela planilha de levantamento sobre os lotes (seção 4.1.1), a FCP executa o Algoritmo 5.1 e obtém a demanda diversificada de cada UC em função da área do terreno. O resultado é apresentado na coluna “*demanda*” da Tabela 9. A ferramenta também totaliza a demanda de todo empreendimento (**demandaTot**), somando a demanda de todos lotes. O valor total é atualizado conforme estudos específicos são realizados para cada UC, utilizando outra metodologia para previsão de demanda.

5.1.2 Demanda diversificada pela atividade do consumidor e potência instalada

O projetista deve identificar as unidades consumidoras atendidas em tensão primária para cálculo de demanda conforme recomendado pela Energisa (2018b). O Algoritmo 5.2, aplica a metodologia exposta em 2.1.2 através da função **demandaIntv**. Esta função é responsável pelo cálculo de demanda baseada na equação 2.6, e sua entrada são as variáveis: Potência instalada (**Pinst**), identificação do ramo de atividade (**codEmpreendimento**) e tabela da norma utilizada (**tabNorma**).

A potência instalada é obtida à partir do total importado na relação de cargas (4.1.2), ou total informado pelo botão “*Informar carga instalada*” (Ver Figura 7). Para identificação do ramo de atividade, no modulo de demanda do FCP, seleciona-se: “*Categoria de consumo* → 16 - Outros → <Atividade do consumidor>”, conforme Energisa (2019b, Tabela 13 - Fatores de Demanda por Ramo de Atividade Produtiva). Então o algoritmo obterá de seu banco de dados os fatores de demanda adequados para entrada **codEmpreendimento**. Conforme a área de concessão para fornecimento de energia, presente nas informações de projeto (6.1), é estabelecida a tabela adequada de fatores de demanda: **tabNorma**.

Algoritmo 5.2 – Demanda pelo ramo de atividade

```

1  function [demanda, dmax] = demandaIntv(finst, codEmpreendimento, tabNorma)
2  demanda = 0; delta = 0; dmax = 0;
3  limtsIntv = tabNorma.limitsIntv(tabNorma.cod == codEmpreendimento)' * 1e3;
4  fd = tabNorma.f(tabNorma.cod == codEmpreendimento)';
5  for i = 1:length(limitsIntv)
6      fi = (i-1) + (i==1);
7      if (finst < limitsIntv(i))
8          delta = limitsIntv(fi);
9          if delta==Inf; delta = 0; end
10         demanda = (finst - delta)*fd(i) + demanda;
11         break
12     else
13         delta = limitsIntv(i) - limitsIntv(fi) * (i~=1);
14         demanda = demanda + fd(i)*delta;
15     end
16 end
17 if contains([tabNorma.Properties.VariableNames{:}], 'FDmax')
18     fd = tabNorma.FDmax(tabNorma.cod == codEmpreendimento)';
19     delta = 0;
20     for i = 1:length(limitsIntv)
21         fi = (i-1) + (i==1);
22         if (finst < limitsIntv(i))
23             delta = limitsIntv(fi);
24             if delta==Inf; delta = 0; end
25             dmax = dmax + (finst - delta)*fd(i);
26             break
27         else
28             delta = limitsIntv(i) - limitsIntv(fi) * (i~=1);
29             dmax = dmax + fd(i)*delta;
30         end
31     end
32 else
33     dmax = []; end
34 end

```

No módulo de demanda deve ser selecionado o ramo de atividade pela lista suspensa “*Categoria de consumo* → 16 - *Outros*”. Então deve-se selecionar o ramo de atividade, baseado na Energisa (2019b, Tabela 13). Para potência instalada considerada pelo módulo, o projetista pode utilizar a relação de cargas da UC importada conforme a seção ou pode inserir o valor da potência instalada pelo botão “*Informar carga instalada*” ao lado do botão usado para importar a relação de carga “*Importar relação de carga*”.

No exemplo da Figura 8, temos a UC de uma mineradora de ferro com carga instalada de 800 kW, com a demanda apresentada na figura da direita, calculada pelo Algoritmo 5.2. O módulo aplica os fatores de demanda da norma para cada intervalo de

Figura 8 – Exemplo de cálculo de demanda pela atividade do consumidor e potência instalada.

FCP_Demanda
Início Demanda

Demanda

Loteamento

Empreendimento: Exemplo TCC

Demanda Total: 77.00 kVA

Quantidade de lotes: 37

Demanda média 2.08 kVA por lote.

Lote

ID: 9

Categoria de consumo: ID 6: Extração de pedras e outros minerais não ...

Demanda: 2.00 kVA

Carga Instalada: --- kW (Sem relação)

Ramal: 3x1x35(35) mm2 CA

Área 351.86 m2

Demanda total do loteamento

☐ Demanda diversificada - área

☒ Demanda pela relação de carga

Importar relação de carga

Poste

ID: 31

Altura: 800

Resistência:

Informar potência instalada

Circuito:

ID:

Potência do trafo:

Relação de Carga

Dia da semana: Segunda

ID	area	demand	IDcircuito	IDpos
1	352.2100	2000	1	
2	351.9000	2000	1	
3	351.1300	2000	1	
4	351.4000	2000	1	
5	351.3300	2000	1	
6	363.4000	2000	1	
7	351.6000	2000	1	
8	351.7000	2000	1	
9	351.8600	2000	2	
10	351.9700	2000	2	
11	352.1000	2000	2	
12	352.2300	2000	2	
13	352.3500	2000	2	
14	352.3900	2000	2	
15	352.3600	2000	2	

FCP_Demanda
Início Demanda

Demanda

Loteamento

Empreendimento: Exemplo TCC

Demanda Total: 551.00 kVA

Quantidade de lotes: 37

Demanda média 14.89 kVA por lote.

Lote

ID: 9

Categoria de consumo: ID 6: Extração de pedras e outros minerais não ...

Demand: 476.00 kVA

Carga Instalada: 800.00 kW

Ramal: 2 AWG

Área 351.86 m2

Demanda total do loteamento

☐ Demanda diversificada - área

☒ Demanda pela relação de carga

Importar relação de carga

Poste

ID: 31

Altura:

Resistência:

Informar potência instalada

Circuito:

ID:

Potência do trafo:

Relação de Carga

Dia da semana: Segunda

ID	area	demand	IDcircuito	IDpos
1	352.2100	2000	1	
2	351.9000	2000	1	
3	351.1300	2000	1	
4	351.4000	2000	1	
5	351.3300	2000	1	
6	363.4000	2000	1	
7	351.6000	2000	1	
8	351.7000	2000	1	
9	351.8600	2000	2	
10	351.9700	2000	2	
11	352.1000	2000	2	
12	352.2300	2000	2	
13	352.3500	2000	2	
14	352.3900	2000	2	
15	352.3600	2000	2	

Fonte: Elaborada pelo autor.

carga, conforme discutido na seção 2.1.2. Os fatores de demanda e intervalo de carga para o exemplo são:

“*Extração de pedras e outros minerais não metálicos*”, ID do ramo de atividade: 6 (ENERGISA, 2019b, Tabela 13).

- Intervalo de carga: $\leq 500 \rightarrow FD_{M\acute{a}x} = 54\%$
- Intervalo de carga: $> 500 \rightarrow FD_{M\acute{a}x} = 67\%$

Confirmando o resultado do módulo (Figura 8) para o exemplo:

$$\begin{aligned}
 P_{inst} &= 800 \text{ kW} \\
 P_{intervalo\ 1} &= 500 \text{ kW} \\
 P_{intervalo\ 2} &= (800 - 500) \text{ kW} = 300 \text{ kW} \\
 D &= P_{intervalo\ 1} * 0,54 + P_{intervalo\ 2} * 0,67 = 500 * 0,54 + 300 * 0,67 \\
 \therefore D &= 471 \text{ kVA}
 \end{aligned} \tag{5.1}$$

5.1.3 Demanda pelo tipo das cargas e atividade do consumidor

Para lotes onde o estudo de demanda em função do tipo de cada carga presente na relação de cargas combinado com o ramo de atividade do consumidor é aplicado a metodologia em 2.1.3. No módulo de demanda do FCP, deve ser selecionado o campo “*Demanda pela relação de carga*”, presente dentro do painel “*Lote*” (Ver Figura 7), no campo destinado as opções *Demanda total do loteamento*.

O algoritmo 5.3, responsável por esta metodologia, possui como entrada: tabela da relação de cargas para o lote em estudo (**carga**) e ramo de atividade da UC (**catConsumo**). A relação de cargas é obtida de levantamento da seção 4.1.2. O ramo de atividade da UC é necessário para correta aplicação do fator de demanda associado à atividade. Como saída desta função, tem-se a demanda máxima da UC (**D**) em [VA], e também dois vetores com 7 elementos, um elemento para cada tipo de categoria de carga $d_1 \dots d_7$: a demanda (**d**) e a potência instalada (**Pinst**). Estas saídas são usadas pela interface gráfica do módulo de demanda, como informações para o usuário.

Algoritmo 5.3 – Demanda pelo tipo das cargas

```

1  function [D, d, Pinst] = demandaRelCarga(carga, catConsumo)
2    d = zeros(1,7); Pinst = zeros(1,7);
3    fp = .92;
4    filename = 'tabelasNDU001.mat'; load(filename);
5    Pinst(1) = sum( carga.P(carga.cat==1) );
6    d(1) = demandaIntv(Pinst(1), catConsumo, t3d1); % Tabela 3
7    [d(2), Pinst(2)] = demandaNumEquip(2, carga, t4d2); % Tabela 4
8    [d(3), Pinst(3)] = demandaNumEquip(3, carga, t5d3); % Tabela 5
9    [d(4), Pinst(4)] = demandaNumEquip(4, carga, t6d4); % Tabela 6
10   if (catConsumo == 1) % RESIDENCIAL
11     [d(5), Pinst(5)] = demandaNumEquip(5, carga, t8d5); % Tabela 8
12   else % N RESIDENCIAL
13     [d(5), Pinst(5)] = demandaNumEquip(5, carga, t9d5); % Tabela 9
14   end
15   [d(6), Pinst(6)] = demandaMotor(carga, t10d6, t11d6);
16   [d(7), Pinst(7)] = demandaSolda(carga, t12d7);
17   D = sum(d)/fp; % Demanda [VA]
18 end

```

Conforme Energisa (2019a), é considerado o fator de potência de referência de 0,92 na linha 3 do Algoritmo 5.3. Na linha 4 é selecionada as tabelas aplicáveis neste estudo de demanda da UC. No arquivo indicado são carregadas as normas da distribuidora com concessão na localidade do projeto. O cálculo de demanda começa a ser processado a partir da linha 5. Na Figura 9 é selecionada o lote 15, sendo uma hospedagem, e então associado a relação de carga da Tabela 10.

Figura 9 – Exemplo de cálculo de demanda pela atividade do consumidor e tipo de carga.

FCP_Demanda

Início Demanda

Demanda

Loteamento

Empreendimento: Exemplo TCC Importar tabela de lotes

Demanda Total: 174.70 kVA

Quantidade de lotes: 37

Demanda média 4.72 kVA por lote:

Lote

ID: 15 Categoria de consumo: 06 - Hotel e Similares Importar relação de carga

Demanda: 99.70 kVA

Carga Instalada: 169.75 kW

Ramal: 2 AWG

Área: 352.36 m²

☐ Demanda total do loteamento
☒ Demanda pela relação de carga

Computa na demanda total do loteamento a demanda calculada pela relação de carga do lote.

Poste

ID: 07

Altura:

Resistência:

Circuito:

ID:

Potência do trafo:

Relação de Carga

ID	Desc	qtde	Pi	fp	ef	V	fase	cat	P	I	vi
1	Chuveiros ...	13	5400	1	1	127	2	2	70200	552.7559	
2	Lampadas...	120	12	1	1	220	1	1	1440	6.5455	
3	Refletor m...	13	400	0.9900	1	220	2	1	5200	23.8751	740
4	Bebedour...	1	350	0.9867	1	127	2	1	350	2.7931	51
5	Freezer 1...	13	600	0.9817	1	220	1	1	7800	36.1167	1.514
6	Geladeira...	8	600	0.9767	0.9000	220	1	1	4800	22.3394	1.055
7	Tanquinho...	7	600	0.9717	0.8000	127	1	1	4200	34.0352	1.021
8	Maquina d...	6	1000	0.9667	0.7000	220	1	1	6000	28.2132	1.589
9	Forno univ...	7	1000	0.7000	0.9000	220	1	4	7000	45.4545	7.141
10	TV de 40"	12	100	0.8000	0.9000	220	1	1	1200	6.8182	900
11	Aparelho ...	7	1200	1	1	220	2	5	8400	38.1818	
12	Aparelho ...	4	900	1	1	220	2	5	3600	16.3636	
13	Aparelho ...	2	1850	1	1	220	2	5	3700	16.8182	
14	Panela el...	4	1200	1	1	127	1	4	4800	37.7953	
15	Microonda...	6	1200	1	1	127	1	3	7200	56.6929	
16	Bomba su...	1	3820	1	1	220	3	6	3820	10.0249	
17	Vulcaniza...	2	800	1	1	220	2	1	1600	7.2727	
18	Compress...	1	4780	1	1	220	3	6	4780	12.5442	

Fonte: Elaborada pelo autor.

5.1.3.1 Demanda de iluminação e tomadas

Para cálculo da demanda d_1 , cargas de iluminação e tomadas, é utilizado o mesmo Algoritmo 5.2 da seção 5.1.3. Isto é viável pois a álgebra para o problema em ambos casos

é a mesma obedecendo a formulação da equação 2.6. O ajuste necessário se dá repassando à função a tabela com fatores de demanda adequado. Desta forma, na linha 5 do Algoritmo 5.3, é totalizada a potência instalada das cargas pertencentes a categoria d_1 de demanda: `Pinst(1)`. Então, na linha 6 é invocada a função `demandaIntv`, que por sua vez o valor desejado em `d(1)`.

Validação do resultado da Figura 9: d_1 - “Fatores de demanda de iluminação e pequenos aparelhos”, ID do ramo de atividade: 6 - Hotelaria (ENERGISA, 2019a, Tabela 3).

- Intervalo de carga ≤ 20 kW $\rightarrow FD_{Máx} = 50\%$;
- 20 kW < Intervalo de carga ≤ 100 kW $\rightarrow FD_{Máx} = 40\%$.

$$\begin{aligned}
 P_{inst \in d_1} &= 43,178 \text{ kW} \\
 P_{intervalo \ 1} &= 20 \text{ kW} \\
 P_{intervalo \ 2} &= (43,178 - 20) \text{ kW} = 23,178 \text{ kW} \quad (5.2) \\
 d_1 &= P_{intervalo \ 1} * 0,5 + P_{intervalo \ 2} * 0,4 = 20 * 0,5 + 23,178 * 0,4 \\
 \therefore d_1 &= 19,271 \text{ kW}
 \end{aligned}$$

5.1.3.2 Demandas em função do número de equipamentos instalados

Conforme analisado nas seções 2.1.3.2, 2.1.3.3, 2.1.3.4 e 2.1.3.5, estas categorias de demanda (d_2 à d_5) possuem fator de demanda em função do número de equipamentos instalados. Então para os cálculos nas as linhas 7 à 13 de 5.3, foi implementada função `demandaNumEquip` responsável para consulta do fator de demanda conforme o número de equipamentos e o cálculo da demanda conforme a equação 2.8. Como entrada a função tem a categoria de demanda `catDemand`, relação de cargas (`tabelaCarga` e tabela de demanda à ser aplicada(`tabelaDemanda`) relacionada a `catDemanda` em análise.

Algoritmo 5.4 – Demanda pelo número de equipamentos da categoria de demanda

```

1  function [demanda, Pinst] = demandaNumEquip(catDemand, tabelaCarga, tabelaDemanda
    ↪ )
2  catCarga = tabelaCarga.cat == catDemand;
3  Pinst = sum(tabelaCarga.P(catCarga));
4  qty = sum(tabelaCarga.qtde(catCarga));
5  flag = qty < size(tabelaDemanda,1);
6  qty = flag * qty + ~flag * size(tabelaDemanda,1);
7  demanda = Pinst * tabelaDemanda.f(qty);
8  end

```

A função possui duas saídas, a demanda para categoria estudada (`catDemanda`), e a potência instalada das cargas que se enquadram nesta categoria. Para cada estudo das demandas d_2 à d_7 , foi repassado a função `demandaNumEquip` à respectiva categoria

estudada nas as linhas 7 à 13 de 5.3. Na linha 2 do Algoritmo 5.4 são filtradas as cargas pertencentes à `catDemanda`. Já na linha 3 é computada a potência instalada da categoria. Conforme a quantia de equipamentos totalizados na linha 5, é aplicado o fator de demanda na linha 7. Este por sua vez consultado na linha 6 pela respectiva tabela passada como parâmetro para função do Algoritmo 5.3, entre as linhas 7 à 13.

Validação do resultado da Figura 9: d_2 - “*Demanda dos aparelhos para aquecimento de água*” (ENERGISA, 2019a, Tabela 4).

- Quantidade de aparelhos $\in d_2$: 13 $\rightarrow F_D = 43\%$.

Da equação 2.8:

$$\begin{aligned} P_{inst \in d_2} &= 70,2 \text{ kW} \\ d_2 &= P_{inst} \cdot F_D = 70,2 \cdot 0,43 \\ \therefore d_2 &= 30,186 \text{ kW} \end{aligned} \quad (5.3)$$

Validação do resultado da Figura 9: d_3 - “*Demanda secador de roupa, forno de micro-ondas máquina de lavar louça e hidro massagem*” (ENERGISA, 2019a, Tabela 05).

- Quantidade de aparelhos $\in d_3$: 6 $\rightarrow F_D = 60\%$.

Da equação 2.8:

$$\begin{aligned} P_{inst \in d_3} &= 7,2 \text{ kW} \\ d_3 &= P_{inst} \cdot F_D = 7,2 \cdot 0,6 \\ \therefore d_3 &= 4,32 \text{ kW} \end{aligned} \quad (5.4)$$

Validação do resultado da Figura 9: d_4 - “*Demanda de fogão e forno elétrico*” (ENERGISA, 2019a, Tabela 6).

- Quantidade de aparelhos $\in d_4$: 11 $\rightarrow F_D = 30\%$.

Da equação 2.8:

$$\begin{aligned} P_{inst \in d_4} &= 11,8 \text{ kW} \\ d_4 &= P_{inst} \cdot F_D = 11,8 \cdot 0,3 \\ \therefore d_4 &= 3,54 \text{ kW} \end{aligned} \quad (5.5)$$

Validação do resultado da Figura 9: d_5 - “*Demanda de condicionamento de temperatura de ambientes - não residencial*” (ENERGISA, 2019a, Tabela 09).

- Quantidade de aparelhos $\in d_5$: 13 $\rightarrow F_D = 30\%$.

Da equação 2.8:

$$\begin{aligned} P_{inst \in d_5} &= 15,7 \text{ kW} \\ d_5 &= P_{inst} \cdot F_D = 15,7 \cdot 0,9 \\ \therefore d_5 &= 14,13 \text{ kW} \end{aligned} \quad (5.6)$$

5.1.3.3 Demanda para máquinas elétricas girantes

A demanda de máquinas girantes, detalhada na seção 2.1.3.6, é computada pelo Algoritmo 5.5. Esta função tem como entrada (linha 1) a relação de cargas **tabelaCarga**, e as tabelas com fator de demanda para máquinas monofásicas (**tabMono**) e trifásicas (**tabTri**). A saída consiste na mesma das demais funções nesta seção, com demanda e potência instalada para o tipo de carga de motores e máquina de solda à gerador.

Algoritmo 5.5 – Demanda para máquinas elétricas girantes

```

1  function [demanda, Pinst] = demandaMotor(tabelaCarga, tabMono, tabTri)
2    coluna_fd = 9; i=0; demanda = 0;
3    Pinst = sum(tabelaCarga.P(tabelaCarga.cat==6));
4    %% Demanda MONOFASICO
5    qty = zeros(length(tabMono.ID),1);
6    ismotor = tabelaCarga.ID( tabelaCarga.cat==6 & (tabelaCarga.fase==2|tabelaCarga.fase
        ↪ ==1) );
7    [~,potMotorIndex] = findClosest(tabelaCarga.P(ismotor), tabMono.PotRedekW*1e3);
8    for i=1:length(potMotorIndex)
9      qty( potMotorIndex(i) ) = tabelaCarga.qtde(ismotor(i)) + qty(potMotorIndex(i)); end
10   fd = (qty==1).*tabMono.Motor1 + (qty==2).*tabMono.Motores2 + (qty>=3&qty<=5).*
        ↪ tabMono.Motores35 + (qty>5).*tabMono.Motores5p;
11   demanda = sum(qty .* fd)*1e3;
12   %% TRIFASICO
13   qty = zeros(length(tabTri.ID),1);
14   ismotor = tabelaCarga.ID( tabelaCarga.cat==6 & tabelaCarga.fase==3);
15   [~,potMotorIndex] = findClosest(tabelaCarga.P(ismotor), tabTri.PotRedekW*1e3);
16   for i=1:length(potMotorIndex)
17     qty( potMotorIndex(i) ) = tabelaCarga.qtde(ismotor(i)) + qty(potMotorIndex(i)); end
18   fd = (qty==1).*tabTri.Motor1 + (qty==2).*tabTri.Motores2 + (qty>=3&qty<=5).*
        ↪ tabTri.Motores35 + (qty>5).*tabTri.Motores5p;
19   demanda = sum(qty .* fd)*1e3 + demanda;
20 end

```

No Algoritmo 5.5, é computada a potência instalada de motores na linha 6. Nas linhas 5 e 13, são criados vetores contendo zeros. Estes de comprimento associado aos motores disponíveis para consultas nas tabelas de demanda para motor. Em sequência nas linhas 6 e 14, são identificados os motores da relação de carga. As linhas 7 e 15, encontram na tabela da norma, o motor de referência para cálculo de demanda associado a carga da **tabelaCarga**. Os laços “**for**” da linha 8 e 16, contabilizam o quantitativo de motores. Então, as linhas 8 e 16, adquirem a demanda drenada da rede associada aos motores utilizados. Por fim nas linhas 11 e 19, são totalizadas a demanda desta categoria.

Validação do resultado da Figura 9: d_6 - “Demanda para máquinas elétricas girantes” (ENERGISA, 2019a, Tabela 11).

- Quantidade motores de 2 CV: $n = 1 \rightarrow D = 2,39 \text{ kVA}$ ($n = 1$);
- Quantidade motores de 4 CV: $n = 1 \rightarrow D = 4,97 \text{ kVA}$ ($n = 1$);
- Quantidade motores de 5 CV: $n = 1 \rightarrow D = 5,62 \text{ kVA}$ ($n = 1$).

Da equação 2.9:

$$\begin{aligned}
 d_6 &= \sum_{k \in d_6} n_k \cdot D_k(n_k) \\
 d_6 &= 1 \cdot 2,39 + 1 \cdot 4,97 + 1 \cdot 5,62 \\
 \therefore d_6 &= 12,98 \text{ kW}
 \end{aligned} \tag{5.7}$$

5.1.3.4 Demanda para cargas especiais

Máquinas de solda a transformador e aparelhos de raios X possuem uma particularidade no cálculo da demanda, sendo esta em função da maior máquina. Para computar esta demanda, o Algoritmo 5.6 precisa das entradas: relação de cargas (**tabelaCarga**) e tabela de demanda para estas máquinas (**tabSolda**).

Algoritmo 5.6 – Demanda de máquinas especiais

```

1  function [demanda, Pinst] = demandaSolda(tabelaCarga, tabSolda)
2      solda.desc = tabelaCarga.Desc(tabelaCarga.cat==7);
3      solda.p = tabelaCarga.P(tabelaCarga.cat==7);
4      solda.cat = zeros(length(solda.p),1);
5      demanda = 0; Pinst = sum(solda.p);
6      for i=1:length(solda.cat)
7          if contains(lower(solda.desc(i)), 'raio x')
8              solda.cat(i) = 3;
9          elseif contains(lower(solda.desc(i)), 'resist')
10             solda.cat(i) = 2;
11          else
12             solda.cat(i) = 1; end
13      end
14      for i=1:3
15          fd = tabSolda.f(tabSolda.ID==i);
16          pot = sort(solda.p(solda.cat==i), 'descend');
17          for j=1:length(pot)
18              if ( j>length(fd) )
19                  fd(j)=fd(j-1); end
20              demanda = pot(j) .* fd(j) + demanda;
21          end
22      end
23  end

```

O Algoritmo 5.6 começa nas linhas 1 e 2 filtrando as informações necessárias da relação de carga, sendo estas o texto de descrição da carga e sua potência. No primeiro laço “**for**” da linha 6, ele identifica cada carga especial em sua respectiva categoria: “*Solda a arco e aparelhos de galvanização*”, “*Solda a resistência*” ou “*Aparelho de raios X*”. Na sequência

o laço “for” da linha 14 percorre cada categoria ordenando, em ordem decrescente, as respectivas cargas por sua potência. Por fim, o laço “for” da linha 17, percorre todas cargas da categoria em estudo pelo laço “for” anterior, aplicando seu respectivo fator de demanda na linha 20,

Validação do resultado da Figura 9: d_7 - “*Demanda para cargas especiais*” (ENERGISA, 2019a, Tabela 12).

- Solda a arco: Potência do equipamento $\rightarrow$ 1° Maior ($F_D = 100\%$), 2° Maior ($F_D = 70\%$), 3° Maior ($F_D = 40\%$), Soma dos demais ($F_D = 30\%$)
- Solda a resistência: Potência do equipamento $\rightarrow$ Maior ($F_D = 100\%$), Soma dos demais ($F_D = 60\%$)
- Aparelho de raios X: Potência do equipamento $\rightarrow$ Maior ($F_D = 100\%$), Soma dos demais ($F_D = 70\%$).

$$\begin{aligned}
 P_{inst \text{ Solda arco}} &= \{1, 1, 1, 1, 1\} \text{ kW} \\
 P_{inst \text{ Solda resistência}} &= \{1, 1, 1\} \text{ kW} \\
 P_{inst \text{ raiosX}} &= \{1, 1, 1\} \text{ kW} \\
 d_7 &= (\{1, 1, 1, (1 + 1)\} \cdot \{1, 0, 7, 0, 4, 0, 3\} + \{1, (1 + 1)\} \cdot \{1, 0, 6\} + \{1, (1 + 1)\} \cdot \{1, 0, 7\}) \cdot 10^3 \\
 \therefore d_7 &= 7,3 \text{ kW}
 \end{aligned} \tag{5.8}$$

Validação do resultado da Figura 9: D_{total} - “*Demanda da unidade consumidora*”. Pela equação 2.10:

$$\begin{aligned}
 P_{inst} &= 169,748 \text{ kW} \\
 D &= \frac{d_1 + d_2 + d_3 + d_4 + d_5 + d_6 + d_7}{0,92} \\
 &= \frac{19271.2 + 30186 + 4320 + 3540 + 14130 + 12980 + 7300}{0,92} \\
 \therefore D &= 99,7035 \text{ kVA}
 \end{aligned} \tag{5.9}$$

5.1.4 Demanda pelo regime de operação da carga

Para estimar demanda conforme proposto em 2.1.4 é implementado o Algoritmo 5.7. Este precisa das entradas: relação de carga (**carga**) e cronograma do regime de operação (**cronOpCarga**) oriundas da seção 4.1.2. O processo assume que o padrão de operação das

cargas varia a cada dia e se repete em um período semanal. Desta forma, é calculado a demanda para cada dia da semana de segunda a domingo, conforme informado na planilha de levantamento com o regime de operação da carga.

Algoritmo 5.7 – Demanda pelo regime de operação

```

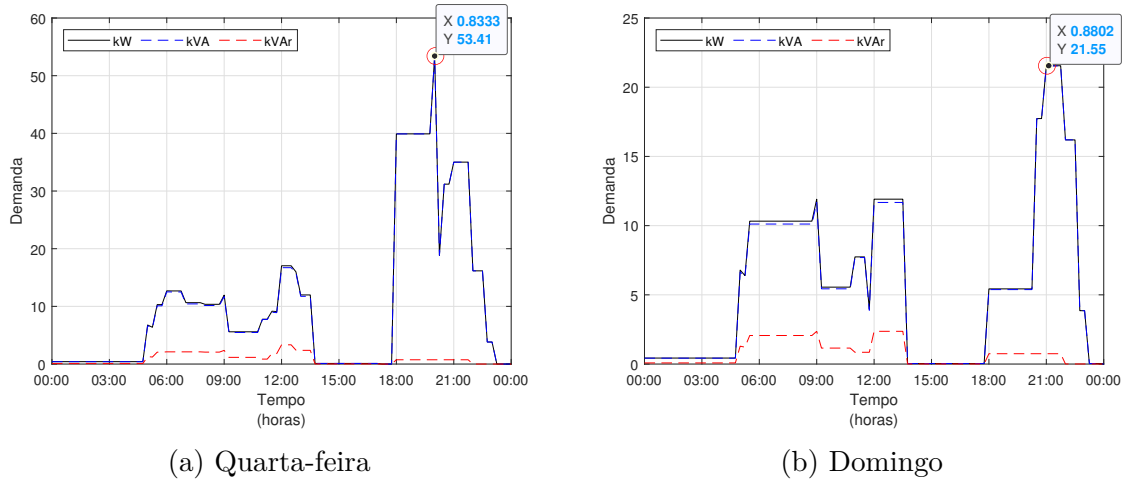
1  opC.t = (0:15:24*60)' * (24*60)^-1;
2  opC.d = zeros([length(opC.t) 7]);
3  fweek = 1:length(cronOpCarga.Properties.VariableNames)==0;
4  for i = {'Seg', 'Ter', 'Qua', 'Qui', 'Sex', 'Sab', 'Dom'}
5      fweek = strcmp(cronOpCarga.Properties.VariableNames, i) | fweek; end
6  for i = 1:height(cronOpCarga)
7      fOp = (opC.t >= cronOpCarga.Hi(i)) & (opC.t <= cronOpCarga.Hf(i));
8      fD = cronOpCarga{i,fweek}==true;
9      idx = cronOpCarga.cargaID(i);
10     S = carga.Pi(idx) * (1 + 1j* tan(acos(carga.fp(idx))));
11     opC.d = opC.d + (fD .* fOp) * S * cronOpCarga.fs(i);
12 end
13 [dMax, idMax] = max(abs(opC.d));
14 [demanda, diadMax] = max(dMax);
15 for i = 1:7
16     opC.Cw(i) = trapz(opC.t, real(opC.d(:,i))); end
17 opC.Cm = sum(opC.Cw) * 365/12/7;
```

Entre as linhas 1 e 5, são inicializadas as variáveis necessárias para operação do algoritmo. O laço “for” das linhas 6 até 12, percorre todas entradas quanto ao regime de operação. Para a informação de índice *i* no laço, são identificados: o intervalo de operação *fOp* (linha 7), os dias da semana em que opera *fD* (linha 8) e o índice na relação de carga para a carga estudo *idx* (linha 9). A potência aparente é computada, na linha 10 pela 2.11. Com base no intervalo de operação da carga discutido em 2.1.4, tem-se na linha 11 o cálculo da demanda conforme equações 2.12 e 2.14.

Neste ponto a informação de interesse para demanda é o módulo da potência aparente pois este parâmetro irá estabelecer a potência disponibilizada a UC e as respectivas instalações elétricas para este atendimento. Na linha 13 é obtida a demanda máxima para cada dia da semana. Na sequência, a linha 14 computa a demanda máxima na semana, representando a demanda máxima da UC diante das presunção inicial de periodicidade semanal. Conhecendo a demanda diária é possível estabelecer uma previsão de consumo, diário e então mensal. Fundamentado na equação 2.15, o laço “for” da linha 15 calcula o consumo diário e a linha 17 computa a previsão mensal. A integração numérica aplicada a amostra discreta *opC.d* e *opC.t* é pelo método trapezoidal.

O resultado do Algoritmo 5.7, a partir dos dados da Tabela 10 e da Tabela 11, é apresentado na Figura 10. Está retratada na Figura 10a a curva de carga para uma quarta-feira e na Figura 10b a demanda de um dia de domingo.

Figura 10 – Curva de carga demandada obtida pelo regime de operação, na quarta-feira e domingo, da Tabela 11.



Fonte: Elaborada pelo autor.

5.2 Modelagem da RD na FCP

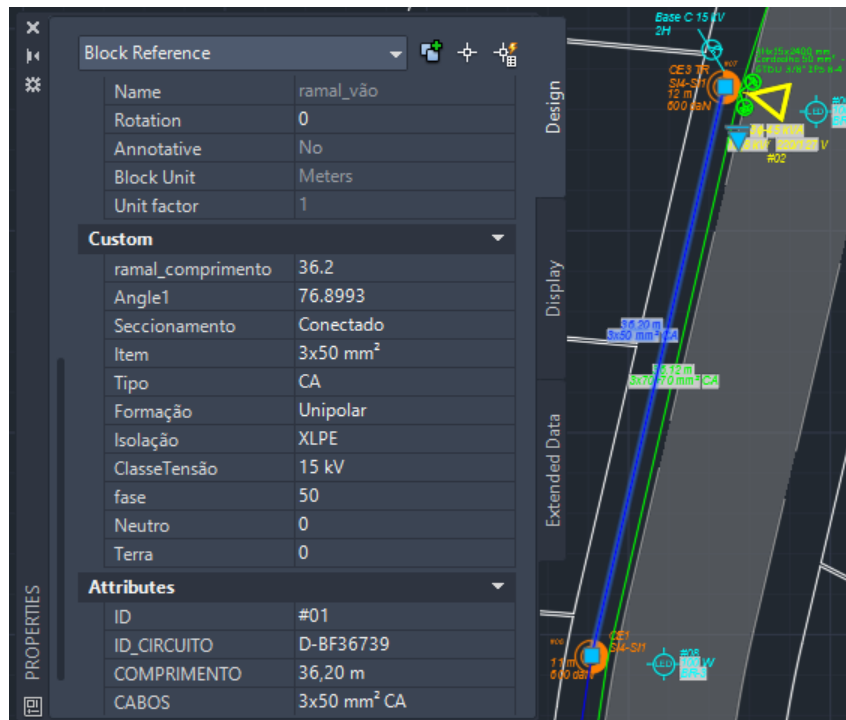
Nesta seção será discutido como a FCP obtém e armazena as variáveis necessárias. Os dados utilizados, importados do software CAD em 4.2, são tabelas contendo: topografia da RD e seus condutores, equipamentos instalados, como trafos e iluminação pública, lotes com suas demandas do item 5.1.

5.2.1 Alimentadores

As linhas da RD representam a projeção 2D na planta baixa e descrevem seu percurso da fonte até a carga, com as ramificações necessárias. No escopo desse trabalho o terreno do projeto é considerado plano e a representação em CAD dos alimentadores da RD se limita a linhas indicando sua projeção no plano XY em metros. Estas linhas descrevem seu percurso, conexões e contém metainformação descrevendo qual a formação de condutores utilizada. A Figura 11 apresenta um trecho de alimentador selecionado (em azul) no programa CAD e suas propriedades (à direita em “Custom”), como posição no plano, comprimento, formação, tipo de condutor (material e seção), classe de tensão e identificação do circuito.

Na etapa de pré-processamento (4.2) as informações de cada trecho de alimentador são guardadas como registro em uma tabela auxiliar da FCP (**tabRD**). De todas informações disponíveis pelo CAD, são filtradas apenas aquelas que interessam para os cálculos obtendo-se apenas as mencionadas. O programa CAD disponibiliza a linha de cada trecho como posição XY de seu ponto inicial, comprimento (L) e ângulo (θ) com o eixo das abscisas. Para modelagem da RD na FCP será preciso as coordenadas XY dos pontos definindo o início (x, y) e fim (x', y') da linha. Para isso a FCP usa a equação 5.10.

Figura 11 – Alimentador trifásico representado em CAD.



Fonte: Elaborada pelo autor.

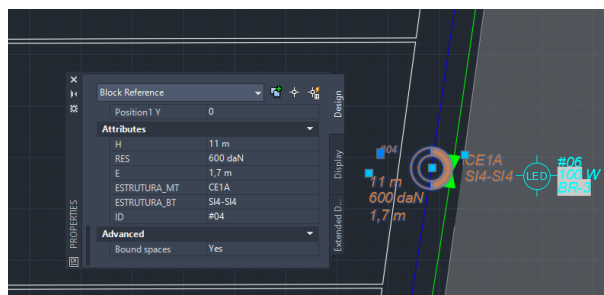
$$\begin{aligned} x' &= x + L \cdot \cos \theta \\ y' &= y + L \cdot \sin \theta \end{aligned} \quad (5.10)$$

Contendo ambos pontos da linha que representa um vão na RD, sendo o alimentador sustentado entre dois postes é salvo em uma tabela no programa chamada RD. A flecha do condutor é considerada utilizando um fator global de acréscimo definido pelo projetista. Este fator aumenta o comprimento do condutor influenciando na queda de tensão e relação de materiais. Cada linha é inserida com seus pontos em algum poste, caracterizando um vão da RD. Baseado na identificação do circuito contida na representação do alimentador e com a informação dos dois pontos representando os extremos de cada vão, a FCP pode inferir todas conexões da RD.

5.2.2 Postes e estruturas

A Figura 12 mostra um poste circular de concreto selecionado no programa CAD e a esquerda seus atributos: Altura (H), resistência mecânica (RES), engastamento (E), estruturas para circuito primário ($ESTRUTURA_MT$) e secundário ($ESTRUTURA_BT$) montadas no poste e identificador (ID). Além dos atributos o objeto representando o poste possui informação de sua posição XY de inserção no modelo CAD. A FCP relaciona o ID do poste com os lotes e IP atendidos para determinar a carga em um ponto específico do circuito secundário, identificando os nós da rede BT.

Figura 12 – Representação de poste e seus atributos em programa CAD.

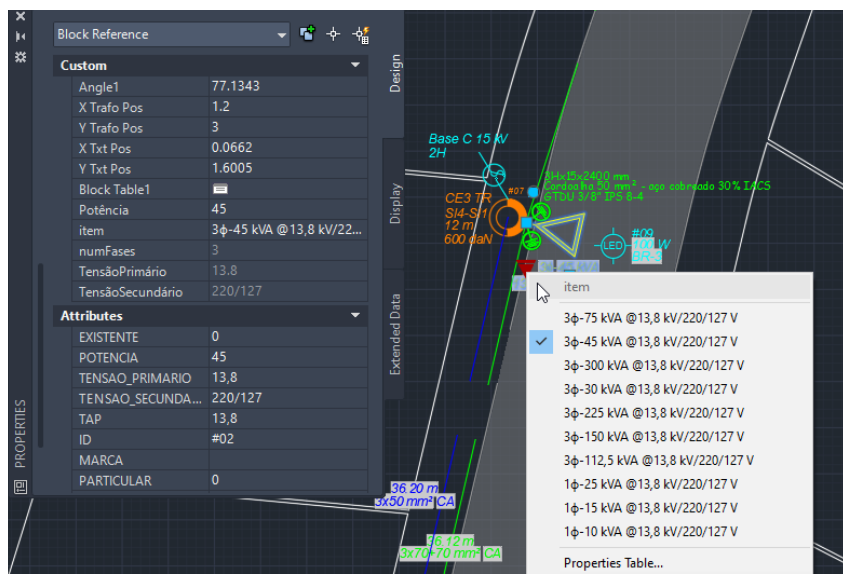


Fonte: Elaborada pelo autor.

5.2.3 Subestação aérea

O transformador de distribuição representado na Figura 13 possui os atributos: Potência (*POTENCIA*), Tensões nas buchas do primário (*TENSAO_PRIMARIO*), e secundário (*TENSAO_SECUNDARIO*), tap utilizado (*TAP*), identificação do trafo (*ID*), marca do equipamento (*MARCA*), número de fases (*N_FASES*), identificação do circuito primário (*ID_CIRCUITO_PRIMARIO*), que está conectado. O ID do circuito primário e posição do bloco do trafo com sua potência são utilizados para determinar a carga com a posição no circuito primário. Seu ID é utilizado para identificar os circuito de baixa tensão alimentado por ele, e posição indicando o ponto fonte do circuito.

Figura 13 – Representação do trafo e suas propriedades em programa CAD.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A seleção e posicionamento dos trafos no CAD deve seguir os critérios discutidos na seção 2.3. O bloco representando o trafo, que contém os dados do equipamento, deve ser posicionada no modelo CAD e seu ponto base conectado ao vértice do alimentador primário e sua intersecção no poste. O equipamento adequado deve ser selecionado na lista

suspensa do bloco, cujo banco de dados possui informações de trafos de distribuição.

5.3 Critério de queda de tensão

Para avaliar a queda de tensão, a FCP precisa de informações sobre a RD. É preciso conhecer onde há nós, qual a carga instalada e acumulada neste nó, os condutores que interconectam os nós e seu comprimento. As variáveis necessárias para cálculo da queda de tensão são discutidas na seção 2.2.1 e são obtidas pela FCP a partir das informações inseridas no CAD. Além do cálculo, a ferramenta proposta também sinaliza trecho em que a queda de tensão acumulada ultrapassar o máximo admissível. Como configuração inicial o limite é de 5%, exigindo ajuste conforme o a queda de tensão no ponto de derivação da RD existente.

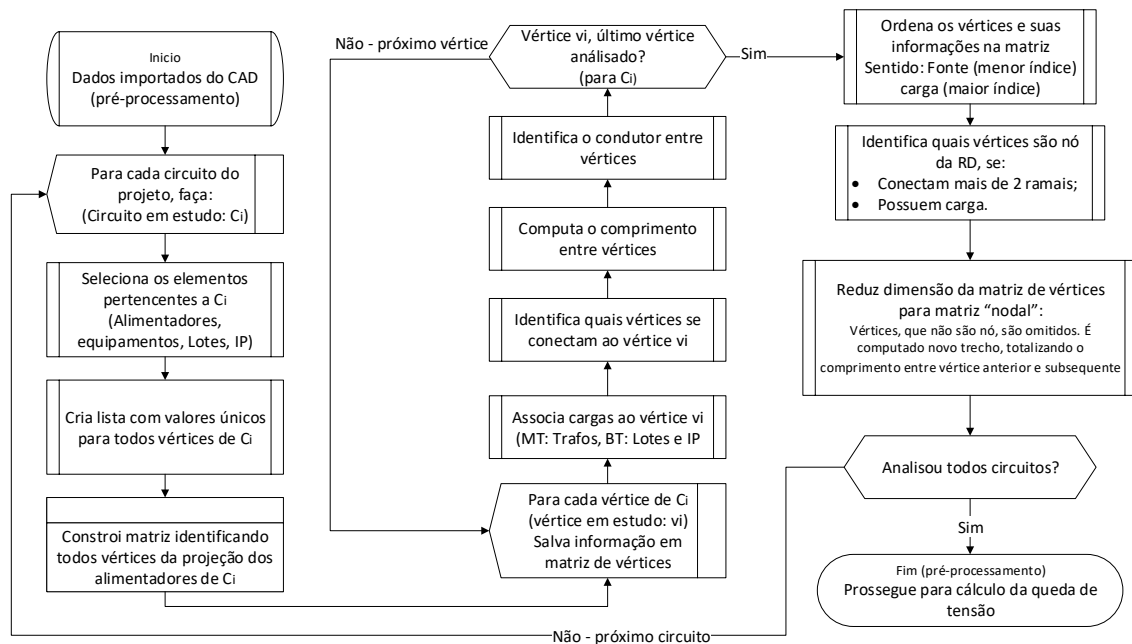
Para cálculo da queda de tensão a FCP precisa organizar as informações oriundas do CAD associando o layout geométrico e posição das cargas com o modelo elétrico da RD. O fluxograma da Figura 14 representa as etapas de pré-processamento da FCP, inferindo o modelo elétrico da RD à partir dos dados disponíveis. Primeiramente são separados os circuitos do projeto pelo seu ID presente no modelo em CAD. Para cada circuito o algoritmo identifica o percurso da RD, a posição da carga e assim encontrando os nós da RD e totalizando o comprimento e bitola dos alimentadores entre nós. Montado o modelo elétrico da RD com nós, identificação do alimentador, comprimento entre nós e carga, a FCP prossegue para cálculo da queda de tensão.

5.3.1 Cálculo da queda de tensão

O algoritmo para cálculo da queda de tensão da FCP é representado no fluxograma da Figura 15. A queda de tensão é simulada em todos circuitos para os fatores de potência informados no formato de lista $(fp_1, fp_2, \dots, fp_n)$. O processo organiza, para todos os nós do circuito, a identificação dos trechos da RD no formato: $nó_{fonte} - nó_{carga}$. Para cada trecho é identificada a carga acumulada no fim do trecho (carga no nó em análise), o comprimento do trecho entre o nó em análise e nó fonte e o condutor utilizado. Conforme o fator de potência em estudo, a tensão do sistema e o condutor utilizado é calculado o coeficiente unitário de queda de tensão pela equação 2.23. Então é calculada a queda de tensão pela equação 2.24. A queda de tensão acumulada é calculada pela soma da queda de tensão acumulada no nó fonte do nó em análise e sua queda de tensão no trecho estudado.

Para utilizar o módulo de queda de tensão da FCP (Figura 16) deve-se carregar as informações do CAD pelo botão “*Importar dados do CAD*”. Então a RD é carregada e aparece a figura representando a RD, em azul o circuito primário e em verde o circuito secundário. A numeração para cada nó serve como referência para Tabela 12 com os resultados da queda de tensão.

Figura 14 – Fluxograma do pré-processamento para a determinação do circuito elétrico a partir do arquivo CAD.



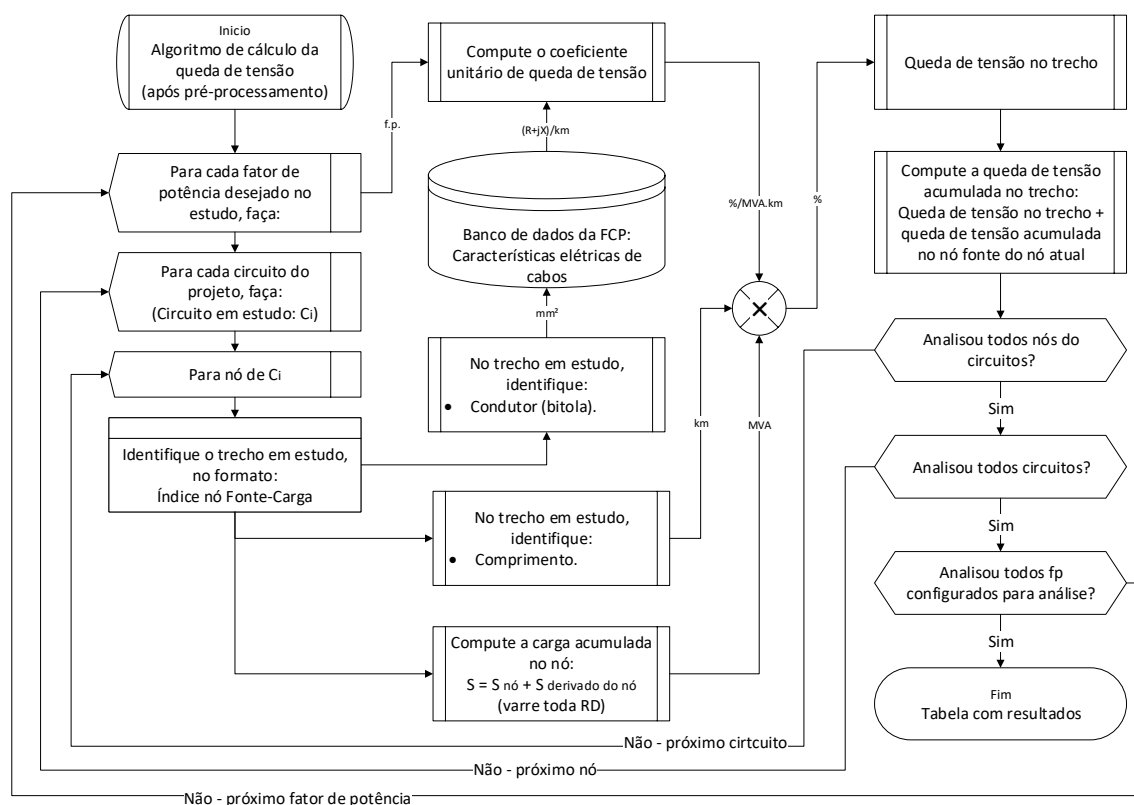
Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 12 – Resultado do algoritmo de cálculo de tensão (circuito primário).

TRECHO		CARGA		CONDUTOR	QUEDA DE TENSÃO		
Descrição	Comprimento		Acumulada no fim do Trecho		Coefficiente Unitário	No Trecho	TOTAL
Primário	km		MVA	AWG /mm ²	%	%	%
PD 1	0,6836		0,0900	50 mm ²	0,405	0,0249	0,0249
1 2	0,1448		0,0450	50 mm ²	0,405	0,0026	0,0276 1
PD 1	0,6836		0,0900	50 mm ²	0,398	0,0245	0,0245
1 2	0,1448		0,0450	50 mm ²	0,398	0,0026	0,0271

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 15 – Fluxograma do algoritmo para queda de tensão.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 16 – Interface do módulo de queda de tensão da FCP.



Fonte: Elaborada pelo autor.

6 RELAÇÃO DE MATERIAIS

De modo a reduzir a onerosidade na gestão das informações de projeto, necessárias para documentação e contabilização dos materiais, foi elaborado um banco de dados relacional (BDR) das informações do projeto e materiais de distribuição. O SGBDR possui consultas configuradas que, quando executadas no banco de dados, totalizam os materiais aplicados na solução em estudo.

6.1 Relação de materiais

À partir dos dados contidos no projeto em estudo, na seção 4.2 são importadas as informações do banco de dados do desenho em CAD para as tabelas `proj_countEstruturas` e `proj_countMateriaisRD` do BDR. A tabela `proj_countEstruturas` contém os campos `projetoID`, indicando o projeto em estudo, e `estruturaID`, contendo a identificação das estruturas utilizadas no projeto. Já a tabela `proj_countMateriaisRD` contém informações de materiais não contemplados nas estruturas como cabos, espaçadores e miscelânea de materiais. A tabela `proj_countMateriaisRD` também é carregada com informações do projeto na etapa de pré-processamento. Contendo os campos de `projetoID`, `materialID` e `qtde`. O campo `materialID`, representa o material usado no projeto e presente entre os materiais de distribuição disponíveis para uso. Já o campo `qtde` indica o número de itens quantificados pela seção 4.2 para o projeto.

Para obter a relação de materiais para o projeto são efetuadas duas consultas no banco de dados. A consulta 6.1 une as informações das tabelas `proj_countEstruturas` e `proj_countMateriaisRD`, visto que não possuem campos iguais, exigindo adequação prévia. A consulta 6.2 finaliza a relação de materiais, inserindo as informações necessárias, agrupando e ordenando seus elementos.

Algoritmo 6.1 – Consulta auxiliar para lista de materiais

```

1  SELECT db_almoxarifado.ID, db_relacaoMateriais.qtde
2  FROM (proj_countEstruturas INNER JOIN db_relacaoMateriais
3    ON proj_countEstruturas.estruturaID = db_relacaoMateriais.estruturaID)
4    INNER JOIN (db_invMateriais
5    INNER JOIN db_almoxarifado
6    ON db_invMateriais.refID = db_almoxarifado.materialRefID)
7    ON db_relacaoMateriais.materialID = db_almoxarifado.ID
8  WHERE ((proj_countEstruturas.projetoID)=<var:IDprojeto>);
9  UNION ALL
10 SELECT db_almoxarifado.ID, proj_countMateriaisRD.qtde
11 FROM proj_countMateriaisRD INNER JOIN
```

```

12      (db_invMateriais INNER JOIN db_almoxarifado
13      ON db_invMateriais.refID = db_almoxarifado.materialRefID)
14      ON proj_countMateriaisRD.materialID = db_almoxarifado.ID
15  WHERE ((proj_countMateriaisRD.projetoID)=<var:IDprojeto>)

```

A consulta 6.1 é do tipo de união pelo operador da linha 9, concatenando duas sub consultas. O projeto em estudo é filtrado pelo operador de seleção condicional nas linhas 8 e 15, indicando que os campos `projetoID` devem corresponder ao ID do projeto, representado genericamente como “<var:IDprojeto>”. Ambas sub consultas devem obter os mesmos campos em suas operações de seleção nas linhas 1 e 10, Esta consulta faz a seleção dos materiais existentes no banco de dados (`db_almoxarifado.ID`) e a quantidade dos materiais que são aplicados nas estruturas (`db_relacaoMateriais.qtde`) ou no restante do projeto `proj_countMateriaisRD.qtde`.

A relação das informações entre as tabelas do banco de dados ocorre na intersecção do campo `estruturaID` nas tabelas `proj_countEstruturas` e `db_relacaoMateriais` com a intersecção do campo `refID`, representando a identificação conforme ABNT (2013b, Tabela A.1), nas tabelas `db_invMateriais` e `db_almoxarifado` com a intersecção do campo `materialID` nas tabelas `db_relacaoMateriais` e `db_almoxarifado`. A relação da segunda sub consulta ocorre na intersecção do campo `materialID` na tabela `proj_countMateriaisRD` com a intersecção do campo `refID`, nas tabelas `db_invMateriais` e `db_almoxarifado`.

Por fim, é necessário obter a relação de materiais para aquisição, devendo conter as colunas *Descrição, Quantidade e Unidade do quantitativo*. Para isso, são selecionados os campos de descrição e especificação do material nas tabelas `db_invMateriais` e `db_almoxarifado`, respectivamente. Essa seleção é concatenada em único campo `descricao` com operador `AS` na primeira linha. Também são selecionados os campos `qtde` e `unidade`. A consulta 6.1 está referenciada como `UnionAllQuery` na consulta 6.2. A relação entre os dados selecionados ocorre nas linhas 2 até 5, indicando a intersecção do campo `refID` nas tabelas `db_invMateriais` e `db_almoxarifado` com a intersecção do campo `ID`, nas tabelas `UnionAllQuery` e `db_almoxarifado`.

Algoritmo 6.2 – Consulta final para lista de materiais

```

1  SELECT [db_invMateriais.descricao] & " " & [db_almoxarifado.SpecA] AS descricao, Sum
    ↪ (UnionAllQuery.qtde) AS qtde, db_almoxarifado.unidade
2  FROM db_invMateriais INNER JOIN
3      (UnionAllQuery INNER JOIN db_almoxarifado
4      ON UnionAllQuery.ID = db_almoxarifado.ID)
5      ON db_invMateriais.refID = db_almoxarifado.materialRefID
6  GROUP BY [db_invMateriais.descricao] & " " & [db_almoxarifado.SpecA],
    ↪ db_almoxarifado.unidade
7  ORDER BY [db_invMateriais.descricao] & " " & [db_almoxarifado.SpecA];

```

Este processo retorna um novo elemento baseado na tabela `db_almoxarifado` para cada elemento da primeira consulta 6.1. Então na linha 6, o resultado é agrupado (`GROUP BY`) onde a descrição e unidade são idênticos. Sendo que, na ocorrência desta operação o campo `qtde` é somado, obtendo o total de materiais, na linha 1 pelo operador `Sum()`. Este operador totaliza o uso dos materiais nas diferentes estruturas e pontos do projeto. Na linha 7, o comando `ORDER BY`, ordena a descrição em ordem alfabética. Dado o identificador correto para o projeto exemplo neste trabalho, o resultado obtido na execução da consulta 6.2 é dada pela Tabela 13.

Tabela 13 – Lista de materiais - resultado da consulta 6.2.

<i>Descrição</i>	<i>qtde.</i>	<i>tipo</i>
Abraçadeira plástica 390 mm	48	pç.
Alça pré-formada de distribuição p CAA 1/0	22	pç.
Alça pré-formada de estai p cabo aço 9,5 mm 7 fios	5	pç.
Anel de amarração p Espaçador losangular 15 kV	72	pç.
Anel de amarração p Isolador polimérico 15 kV, 160 mm	6	pç.
Armação secundária para 1 roldana (com 1 contrapino)	29	pç.
Braço afastador horizontal	2	pç.
Braço antibalanço 15 kV	1	pç.
Braço de iluminação pública BR3	10	pç.
Braço tipo "C" 15 kV, 580 mm	2	pç.
Braço tipo "L" 15 kV, 354 mm	3	pç.
Cabo aço cobreado 50 mm ² , composição 3x 9AWG	68	kg
Cabo de aço 9,5 mm (3/8"), 7 fios, SM ou HS, Classe A	870	kg
Cabo de alumínio coberto CA 50 mm ² , proteção XLPE 15 kV	2634	m
Cabo de alumínio com alma de aço CAA 1/0	31	m
Cabo isolado de cobre 750V Unipolar 10 mm ² PVC Preto	60	m
Cabo multiplexado de alumínio Quadruplex 3X35 +3X35 mm ² , Neutro Nu, XLPE colorido	10	m
Cabo multiplexado de alumínio Quadruplex 3X70 +3X70 mm ² , Neutro Nu, XLPE colorido	340	m
Chave fusível Base "C", 15 KV	6	pç.

Tabela 13 – (continuação)

<i>Descrição</i>	<i>qtde.</i>	<i>tipo</i>
Cinta para poste circular 190 mm	16	pç.
Cinta para poste circular 240 mm	22	pç.
Cinta para poste circular 260 mm	20	pç.
Cobertura protetora para estribo, conector e conector derivação de linha viva p GLV	6	pç.
Cobertura protetora para terminal de equipamentos (Protetor de bucha)	12	pç.
Conector derivação de compressão Cunha alumínio, CN13, Vermelho	14	pç.
Conector estribo tipo cunha 2AWG	6	pç.
Conector paralelo de parafuso tipo Perfuração, Principal 10-95 mm ² , Derivação 4-35 mm ²	71	pç.
Conector paralelo de parafuso tipo Perfuração, Principal 10-95 mm ² , Derivação 1,5-10 mm ²	20	pç.
Elo fusível 2H DE LIGA EUTÉTICA, 500 mm, CABEÇOTE DE COBRE	6	pç.
Espaçador losangular 15 kV	24	pç.
Estribo para braço tipo “L”	1	pç.
Fita auto fusão 76mm x 10m	5	pç.
Fita isolante 19mm x 10 m	5	pç.
Fixador para perfil U	1	pç.
Gancho-olhal	9	pç.
Grampo de linha viva 100A, Cobre 2/4/0 AWG / 10-95mm ²	6	pç.
Haste de aterramento cobreado 5/8"x2400 mm	12	pç.
Isolador composto bastão (ancoragem) 15 kV	9	pç.
Isolador polimérico pino 15 kV, Rosca 25 mm	6	pç.
Isolador roldana de porcelana 76x79 mm	29	pç.
Laço pré-formado de topo p AWG 1/0; 6/1	23	pç.
Luminária fechada Iluminação pública 120W Ilumatic Ares 4000k Encaixe 60mm	10	pç.

Tabela 13 – (continuação)

<i>Descrição</i>	<i>qtde.</i>	<i>tipo</i>
Manilha-sapatilha	9	pç.
Olhal para parafuso M16	12	pç.
Parafuso de cabeça abaulada M16 x 45 mm	13	pç.
Parafuso de cabeça abaulada M16 x 70 mm	30	pç.
Para-raios baixa tensão (PRBT), 280 V, 10 kA	6	pç.
Para-raios ZnO, 12 kV, 10 kV	6	pç.
Perfil U	1	pç.
Pino curto para isolador 194mm, Rosca 25 mm M16	6	pç.
Porca quadrada M16	0	pç.
Relé fotoelétrico intercambiável Relé fotocontrolador 220V Liga a noite	10	pç.
Sapatilha p cabo de aço 3/8-1/2"	5	pç.
Suporte para transformador em poste de concreto circular Cinta 260 mm	4	pç.
Suporte Z	6	pç.
Terminal para uso externo à compressão anel 23,0x 85,00 mm 1 furo 9,47 mm 50mm ²	34	pç.
Terminal para uso externo à compressão anel 30,0x 140,0mm 2 furos 70,00mm ²	12	pç.
Transformador de distribuição Trifásico 45 kVA 13,8 kV /220-127 V	2	pç.

Fonte: Elaborada pelo autor.

7 CONCLUSÃO

Seguindo a tendência tecnológica de detalhados modelos digitais para projeto de RD, este trabalho se fez bem sucedido em incorporar ferramentas analíticas em um fluxo de trabalho vigente. Sobretudo ao usufruir da fidelidade descritiva em modelo digital construído em CAD. Dispondo além dos símbolos e dados geométricos, tais modelos possuem as características elétricas dos materiais e equipamentos que são utilizadas pelos algoritmos desenvolvidos neste trabalho.

Estes algoritmos obedecem rigorosamente os modelos propostos em normas. Após os testes, simulando os diferentes cenários abrangidos em norma, se constata a acurácia dos resultados encontrados. Independente das ferramentas para projeto, entende-se que os esforços prévios no levantamento garantam dados confiáveis. Assim sendo, a FCP permite ao projetista obter resultados rigorosos em uma fração do tempo que era necessário. Portanto a ferramenta desenvolvida neste trabalho promove um ganho de produtividade na elaboração do projeto e redução de susceptibilidade à erros.

No capítulo 4 foi discutido a gestão das informações do projeto e como a FCP obtém os dados do fluxo do projeto. A FCP possui acesso às informações das planilhas geradas em levantamento e do elaborado em software CAD. Essa integração garante à metodologia proposta no trabalho pleno acesso aos dados necessários para análise sem interferir no fluxo de trabalho nativo do projetista. Sendo assim, não é necessário a entrada dos dados manualmente para informações já produzidas pelas diferentes etapas do projeto. Assim sendo a FCP empodera o usuário com ferramentas de análise pertinente ao projeto de RDs, sem onerar o processo estabelecido à priori.

As ferramentas de análise da FCP são propriamente discutidas no capítulo 5. Para compreensão dos requisitos do projeto, a seção 5.1 elabora o estudo de demanda uma grande variedade de circunstâncias. Dessa forma o projetista pode combinar os diferentes métodos para o empreendimento, criando a conjuntura de análise de demanda que melhor aproxime da realidade de cada UC. A correta estimativa de demanda, em suma, permite melhor análise técnico-econômica para o projeto. Para assegurar a correta operação da RD, a seção 5.3 simula a operação do projeto se atenderá as restrições impostas.

Para garantir correta documentação e orçamento assertivo da execução do projeto foi concebido a solução proposta no capítulo 3. Baseado nos itens utilizadas no projeto, a FCP possui banco de dados contendo os materiais padronizados para RDs, bem como o quantitativo de materiais utilizados em cada estrutura. Desse modo a FCP realiza contabilização rápida fornecendo a relação acurada de materiais e equipamentos empregados.

Para trabalhos futuros, sugere-se o aprimoramento da modelagem do sistema elétrico. Diante do poder computacional disponível em computadores pessoais, é factível implementar o cálculo do fluxo de carga em sua formulação básica. A modelagem estática do sistema, representado por equações algébricas linearizadas, atenderia o escopo desejado pela FCP. Assume-se que o problema transitório da RD não entra no interesse da FCP visto que as proteções atuariam antes de faltas ou manobras causassem impacto nocivo ao sistema.

Diante das informações presentes no banco de dados da FCP, pode-se aprimorar a modelagem da fecha nos alimentadores. Dessa forma, considerando maior precisão no comprimento do alimentador. Como a FCP possui dados sobre os vãos da RD e peso dos condutores, o próximo módulo a ser implementado seria para dimensionamento mecânico da RD. A tração provocada pelos cabos e equipamentos na estrutura é de suma importância para correta seleção da resistência do poste e engastamento adequado. Durante o desenvolvimento da FCP foi considerado RD urbana aérea, inserindo informações de materiais para este tipo de projeto. A ampliação do banco de dados da ferramenta seria o próximo passo para abranger mais sistemas, como rurais e subterrâneos.

No cálculo da demanda pelo regime de operação das cargas é obtido uma curva de carga para cada dia da semana e então o pior caso de demanda é considerado para dimensionamento do sistema. Sugere-se em trabalhos futuros a ampliação do estudo estatístico considerando a distribuição das possíveis demandas neste intervalo. Desta forma será possível apresentar ao projetista uma análise em único gráfico indicando o intervalo provável de carga em operação em função do tempo. Pode-se ampliar a dimensão da análise preenchendo a área, que representa o intervalo de demanda provável, com gradiente de cor pela função densidade de probabilidade. Dessa forma a região com a maior probabilidade de ocorrência fica em evidência visual ao analista.

Propõe-se ampliação da FCP com módulo adicional para auxiliar a seleção e locação dos trafos no projeto de RD. Baseado nas restrições da localidade e materiais disponíveis poderia ser desenvolvido um algoritmo para sugestão de potências adequadas para as subestações. Outro aspecto viável seria plotar um mapa de calor cujo gradiente de cores indicasse a posição do centro de carga, para visualmente facilitar o posicionamento dos trafos.

Outra melhoria seria a implementação de software acessando banco de dados do modelo CAD e trazendo o resultado diretamente para o banco de dados da FCP. Esse processo ampliaria as possibilidades de dados obtidos e capacidade de intervenções no projeto pela própria FCP. Como sugestão, utilizando o AutoCAD®, seria implementar na FCP um conector ActiveX para acessar o programa de CAD. Uma solução mais robusta seria escrever uma API usando a tecnologia ObjectARX® da Autodesk®.

REFERÊNCIAS

- ABNT. *NBR 14039: Instalações elétricas de média tensão de 1,0 kV a 36,2 kV*. [S.l.]: ABNT, 2006. v. 14039. (Norma Brasileira, v. 14039).
- ABNT. *NBR 5410: Instalações elétricas de baixa tensão*. [S.l.]: ABNT, 2008. v. 5410. (Norma Brasileira, v. 5410).
- ABNT. *NBR 16050: Para-raios de resistor não linear de óxido metálico sem centelhadores, para circuitos de potência de corrente alternada*. [S.l.]: ABNT, 2012. v. 16050. (Norma Brasileira, v. 16050).
- ABNT. *NBR 15688: Redes de distribuição aérea de energia elétrica com condutores nus*. [S.l.]: ABNT, 2013a. v. 15688. (Norma Brasileira, v. 15688).
- ABNT. *NBR 15992: Redes de distribuição aérea de energia elétrica com cabos cobertos fixados em espaçadores para tensões até 36,2 kV*. [S.l.]: ABNT, 2013b. v. 15992. (Norma Brasileira, v. 15992).
- ABNT. *NBR 16615: Redes de distribuição aérea de energia elétrica com cabos multiplexados autossustentados*. [S.l.]: ABNT, 2018. v. 16615. (Norma Brasileira, v. 16615).
- ALEXANDER, D. K. M. *Access® 2019 Bible*. 2018.
- ANEEL. *Prodist 8 revisão 12*. [S.l.]: ANEEL, 2021. v. 8. (Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional, v. 8).
- CARVALHO, V. *MySQL Comece com o principal banco de dados open source do mercado*. [S.l.]: Casa do Código, 2015. v. 1.
- CEMIG. *ND 3.1: Projetos de Redes de Distribuição Aéreas Urbanas*. [S.l.]: CEMIG, 2013. v. 3. (ND, v. 3).
- EASTMAN, C. et al. *BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers and Contractors*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2011. v. 1. ISBN 978-11-1802-169-9.
- ELETROBRÁS, C. de D. *Volume 1 Planejamento de sistemas de distribuição*. [S.l.]: ELETROBRÁS, 1982a. v. 1. (Coleção Distribuição de Energia Elétrica, v. 1).
- ELETROBRÁS, C. de D. *Volume 6 Manual de construção de redes*. [S.l.]: ELETROBRÁS, 1982b. v. 1. (Coleção Distribuição de Energia Elétrica, v. 1).
- ENERGISA. *NDU 004.3: Instalações Básicas para Construção de Redes de Distribuição Multiplexadas de Baixa Tensão V5.0_R1*. [S.l.]: Energisa, 2018a. v. 4. (Norma de Distribuição Unificada, v. 4). Revisão 5.0.
- ENERGISA. *NDU 006: Critérios Básicos para Elaboração de Projetos de Redes de Distribuição Aéreas Urbanas V5.0: R8*. [S.l.]: Energisa, 2018b. v. 6. (Norma de Distribuição Unificada, v. 6). Revisão 5.0.

ENERGISA. *NDU 007: Critérios Básicos para Elaboração de Projetos de Redes de Distribuição Aéreas Rurais V5.0 R8*. [S.l.]: Energisa, 2018c. v. 7. (Norma de Distribuição Unificada, v. 7). Revisão 5.0.

ENERGISA. *NDU 001: Fornecimento de Energia Elétrica em Tensão Secundária a Consumo*. [S.l.]: Energisa, 2019a. v. 1. (Norma de Distribuição Unificada, v. 1). Revisão 6.2.

ENERGISA. *NDU 002: Fornecimento de Energia Elétrica em Tensão Primária*. [S.l.]: Energisa, 2019b. v. 2. (Norma de Distribuição Unificada, v. 2). Revisão 5.2.

FILHO, J. M. *Instalações Elétricas Industriais*. [S.l.]: Grupo Gen: LTC, 2017. v. 1. ISBN 978-85-2163-372-3.

KOKORUS, M.; EYRICH, W.; ZACHARIAS, R. *Innovative approach to the substation design using Building Information Modeling (BIM) technology*. [S.l.]: IEEE, 2016. v. 1.

MARTINEZ, M. L. B. *Análise de consumo de energia e aplicações. Capítulo II*. [S.l.]: o setor elétrico, 2015. v. 109. (Edição, v. 109).

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. *Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos*. [S.l.]: CRESESB, 2014. v. 1.