

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Lucas Foggiato Lopes

**MODELAGEM DE CURVAS DE CARGA POR TRECHO EM UM
ALIMENTADOR DE DISTRIBUIÇÃO REAL**

Santa Maria, RS
2021

Lucas Foggiato Lopes

**MODELAGEM DE CURVAS DE CARGA POR TRECHO EM UM ALIMENTADOR DE
DISTRIBUIÇÃO REAL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Bacharel em Engenharia Elétrica**. Defesa realizada por videoconferência.

Orientadora: Prof.^a Dra. Alzenira da Rosa Abaide

Santa Maria, RS
2021

Lucas Foggiato Lopes

**MODELAGEM DE CURVAS DE CARGA POR TRECHO EM UM ALIMENTADOR DE
DISTRIBUIÇÃO REAL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Bacharel em Engenharia Elétrica**.

Aprovado em 8 de setembro de 2021:

Alzenira da Rosa Abaide, Dra. (UFSM)
(Presidenta/Orientadora)

Leonardo Nogueira Fontoura da Silva, Me. (UFSM)

Bruno Knevitz Hammerschmitt, Me. (UFSM)

Santa Maria, RS
2021

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais Antônio Carlos e Ilda por todo apoio, carinho e suporte durante esses anos de estudo. Às minhas irmãs Livia e Viviane, pelo incentivo ao estudo e palavras de conselho quando precisei. À minha namorada Géssika, pelo amor, carinho e também por me acompanhar desde o começo dessa jornada, sempre acreditando no meu potencial.

Aos meus amigos de toda vida Alisson, Guilherme, Lucas e Murilo, pelos momentos de distração, jogos, bebidas e conversas sinceras.

Aos colegas de curso Gilson, Guilherme, Hércules, Leonardo, Matheus e Pedro por todas as conversas, risadas, distrações, ajudas, estudos e também por se tornarem grandes amigos.

Aos colegas do CEESP, em especial ao Leonardo, por todo suporte, ensinamentos e contribuições que foram essenciais para realização desse trabalho.

À professora Alzenira, pela orientação, paciência, tempo disponibilizado e todo conhecimento repassado, auxiliando no meu crescimento profissional.

À Universidade Federal de Santa Maria e todos seus funcionários e demais professores por disponibilizar um ambiente de qualidade para estudo e pesquisa, de forma gratuita.

RESUMO

MODELAGEM DE CURVAS DE CARGA POR TRECHO EM UM ALIMENTADOR DE DISTRIBUIÇÃO REAL

AUTOR: Lucas Foggiato Lopes
ORIENTADORA: Alzenira da Rosa Abaide

Conhecer a curva de carga dos consumidores e seus hábitos de consumo são de fundamentais importância para as distribuidoras de energia elétrica, pois a partir dessas informações, podem otimizar suas decisões de planejamento e operação do sistema de distribuição. Como os medidores atualmente instalados nas unidades consumidoras registram apenas o consumo mensal, faz-se necessária a aplicação de métodos e ferramentas computacionais capazes de modelar a curva de carga diária dos consumidores, pois ainda estamos distantes de uma realidade onde medidores inteligentes serão utilizados em larga escala. No cenário atual, o uso de curvas típicas para representar o comportamento de um grupo de consumidores tem sido uma alternativa bastante viável e eficiente. Neste trabalho, será apresentada uma metodologia baseada no uso de curvas típicas de carga para modelar curvas de carga em trechos de seccionamento específicos de um alimentador de distribuição, levando em consideração os equipamentos de comutação existentes ao longo da rede.

Palavras-chave: Curva de Carga. Alimentador de Distribuição. Trecho de Seccionamento.

ABSTRACT

MODELING OF LOAD PROFILES BY EXCERPT ON A REAL DISTRIBUTION FEEDER

AUTHOR: Lucas Foggiato Lopes
ADVISOR: Alzenira da Rosa Abaide

Being capable of knowing the load profile of the clients and their consume habits are of utmost importance for the electrical distribution companies, from this information, they can optimize their decisions regarding the planning and operation of the distribution systems. The way the gauges are installed on the costumers only registers the monthly consumption, currently there is the need for methodes and computational tools capable of modeling the daily load profile of those clients, considering of how far we're from a reality where smart gauges could be used in a large scale. In the current scenery, the use of typical load profiles to represent the behavior of a costumers group has been an highly viable and efficient alternative. On this paper, will be presented a methodology based on the use of tipical load profiles to model load profiles on specific excerpts of the sectioning of a distribution feeder, taking in account the existing commutation equipments along the network.

Keywords: Load Profile. Distribution Feeder. Sectioning Excerpt.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Diagrama Unifilar do Sistema Elétrico de Potência	14
Figura 2.2 – Diagrama Unifilar de Alimentadores Radiais	15
Figura 2.3 – Exemplo de curva de carga	16
Figura 3.1 – Metodologia Proposta	18
Figura 4.1 – Mapa de Localização: Ijuí/RS	23
Figura 4.2 – Topologia do AL-314	26
Figura 4.3 – Diagrama Unifilar Simplificado do AL-314	29

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 4.1 – Proporção de consumo total no alimentador por cada classe tarifária. . .	30
Gráfico 4.2 – Proporção de consumo por faixas na classe Residencial (B1)	30
Gráfico 4.3 – Proporção de consumo por faixas na classe Rural (B2)	31
Gráfico 4.4 – Proporção de consumo por faixas na classe Comercial (B3)	31
Gráfico 4.5 – Proporção de consumo por faixas no subgrupo A4	31
Gráfico 4.6 – Curvas típicas para o subgrupo Residencial (B1)	33
Gráfico 4.7 – Curvas típicas para o subgrupo Rural (B2)	33
Gráfico 4.8 – Curvas típicas para o subgrupo Comercial (B3)	34
Gráfico 4.9 – Curvas típicas para o subgrupo A4	34
Gráfico 4.10 – Curva de carga típica do trecho CF-2206.	40
Gráfico 4.11 – Curva de carga típica acumulada no trecho CF-2205.	41
Gráfico 4.12 – Curva de carga típica acumulada no trecho CF-2225.	42
Gráfico 4.13 – Curva de carga típica no trecho CF-2215.	43
Gráfico 4.14 – Curva de carga típica acumulada no trecho CF-2210.	44
Gráfico 4.15 – Curva de carga típica no trecho CF-2220.	45
Gráfico 4.16 – Curva de carga típica no trecho CF-1040.	46
Gráfico 4.17 – Curva de carga típica no trecho CF-88.	47
Gráfico 4.18 – Curva de carga típica no trecho CF-87.	48
Gráfico 4.19 – Curva de carga típica acumulada no trecho CF-2046.	49
Gráfico 4.20 – Curva de carga típica acumulada no trecho CF-711.	50
Gráfico 4.21 – Curva de carga típica no AL-314 e suas componentes.	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Estratificação de Consumidores	20
Tabela 4.1 – Resumo do AL-314 DEMEI	24
Tabela 4.2 – Lista de transformadores do AL-314	25
Tabela 4.3 – Resumo de Transformadores Equivalentes	27
Tabela 4.4 – Consumo agregado por faixa de consumo	28
Tabela 4.5 – Curvas Típicas de Carga Normalizadas	36
Tabela 4.6 – Curvas Típicas de Carga - Distribuição do consumo % por hora.....	37
Tabela 4.7 – Demanda Média (kW) por Trecho	38
Tabela 4.8 – Demanda Média Horária por Trecho de Seccionamento.....	39

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<i>AL</i>	Alimentador de Distribuição
<i>ANEEL</i>	Agência Nacional de Energia Elétrica
<i>BT</i>	Baixa Tensão
<i>CEESP</i>	Centro de Excelência em Energia e Sistemas de Potência
<i>DEMEI</i>	Departamento Municipal de Energia de Ijuí
<i>kW</i>	Quilowatt
<i>kWh</i>	Quilowatt-hora
<i>MT</i>	Média Tensão
<i>NA</i>	Normalmente Aberta
<i>PRODIST</i>	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica
<i>P.U.</i>	Por Unidade
<i>RD</i>	Rede de Distribuição de Energia Elétrica
<i>SDBT</i>	Sistema de Distribuição de Baixa Tensão
<i>SDMT</i>	Sistema de Distribuição de Média Tensão
<i>SE</i>	Subestação
<i>SEP</i>	Sistema Elétrico de Potência
<i>TR</i>	Transformador de distribuição
<i>UC</i>	Unidade Consumidora

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	OBJETIVOS	11
1.1.1	Objetivo Geral	11
1.1.2	Objetivos Específicos	12
1.2	ORGANIZAÇÃO DOS CAPÍTULOS	12
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
2.1	SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA	13
2.1.1	Sistema de distribuição de energia elétrica	14
2.1.1.1	<i>Alimentadores de Distribuição</i>	14
2.2	CONSUMIDORES DE ENERGIA ELÉTRICA	15
2.3	DEMANDA E CURVAS DE CARGA	15
2.4	CURVAS TÍPICAS DE CARGA	16
2.5	RECONFIGURAÇÃO DE REDES	17
3	METODOLOGIA	18
3.1	LEVANTAMENTO DE DADOS	19
3.1.1	Consumidores	19
3.1.2	Redes de Distribuição	19
3.2	MINERAÇÃO DE DADOS	19
3.2.1	Filtragem	19
3.2.2	Agrupamento	20
3.2.3	Aplicação de Curvas Típicas	21
3.3	MODELAGEM DAS CURVAS DE CARGA	22
4	ESTUDO DE CASO	23
4.1	ESCOLHA DO ALIMENTADOR	24
4.2	APLICAÇÃO DA METODOLOGIA	25
4.2.1	Filtragem dos dados	26
4.2.2	Agrupamento	27
4.2.3	Aplicação de Curvas Típicas	32
4.3	RESULTADOS	40
4.3.1	Trecho da CF-2206	40
4.3.2	Trecho da CF-2205	41
4.3.3	Trecho da CF-2225	42
4.3.4	Trecho da CF-2215	43
4.3.5	Trecho da CF-2210	44
4.3.6	Trecho da CF-2220	45
4.3.7	Trecho da CF-1040	46
4.3.8	Trecho da CF-88	47
4.3.9	Trecho da CF-87	48
4.3.10	Trecho da CF-2046	49
4.3.11	Trecho da CF-711	50
5	CONCLUSÃO	52
5.1	TRABALHOS FUTUROS	52
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	54

1 INTRODUÇÃO

Com o constante crescimento do consumo de energia elétrica no Brasil, as empresas do setor elétrico buscam cada vez mais alternativas eficientes para acompanhar esse crescimento da demanda, de forma segura, confiável e economicamente viável, investindo na modernização de seus sistemas e equipamentos.

As empresas do setor de distribuição necessitam de um acompanhamento contínuo do crescimento da carga, e precisam conhecer ao máximo os hábitos de consumo de seus clientes, para que possam fornecer energia elétrica com uma boa qualidade técnica e confiabilidade. Conhecendo a carga e seu crescimento, é possível fazer um melhor planejamento para investimentos na infraestrutura das redes e expansão de seus sistemas.

Neste contexto, conhecer a curva típica diária da carga nos alimentadores de distribuição se torna uma informação bastante útil para a concessionária. Porém, não é uma tarefa fácil, devido principalmente a aleatoriedade dos consumidores e as infinitas possibilidades de combinações possíveis de consumo. Uma maneira de contornar o problema é tentar caracterizar os consumidores em grupos, conforme a semelhança entre seus hábitos de consumo e também quanto a sua classe, seja ele residencial, rural, industrial, etc.

Conhecer a curva de carga de trechos de um alimentador de distribuição pode ser uma grande vantagem para o operador do sistema, pois quando for necessário um desligamento programado para manutenções, ou até mesmo quando ocorre alguma situação de contingência, o operador consegue analisar a possibilidade de realocar parte da carga de um trecho não afetado por uma falha para outro alimentador, pois conhece as características da carga que está sendo transferida. Uma manobra como essa pode contribuir com a redução do indicador DIC (Duração de Interrupção Individual por Unidade Consumidora), por exemplo.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver uma metodologia capaz de modelar curvas de carga para trechos de rede de um alimentador de distribuição, a partir dos dados de consumo médio mensal das unidades consumidoras disponibilizados pela concessionária de energia local.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Caracterização dos consumidores a partir de curvas típicas de carga;
- Identificação de padrões de consumo de energia por classes de consumidores;
- Apresentação de um sistema de distribuição real como objeto de estudo na aplicação da metodologia;
- Análise dos resultados obtidos e validação do modelo proposto.

1.2 ORGANIZAÇÃO DOS CAPÍTULOS

Incluindo este capítulo introdutório, o presente trabalho foi dividido em cinco capítulos. No Capítulo 2, apresenta-se uma revisão bibliográfica que aborda alguns dos principais conceitos referentes ao tema do trabalho, bem como algumas definições básicas para o entendimento do mesmo. O Capítulo 3 aborda a metodologia proposta e apresenta as principais etapas para sua aplicação. No Capítulo 4, é apresentado um estudo de caso para aplicação da metodologia em um sistema real, e os resultados obtidos no mesmo. O Capítulo 5 apresenta as conclusões, dificuldades encontradas e sugestões para futuros trabalhos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

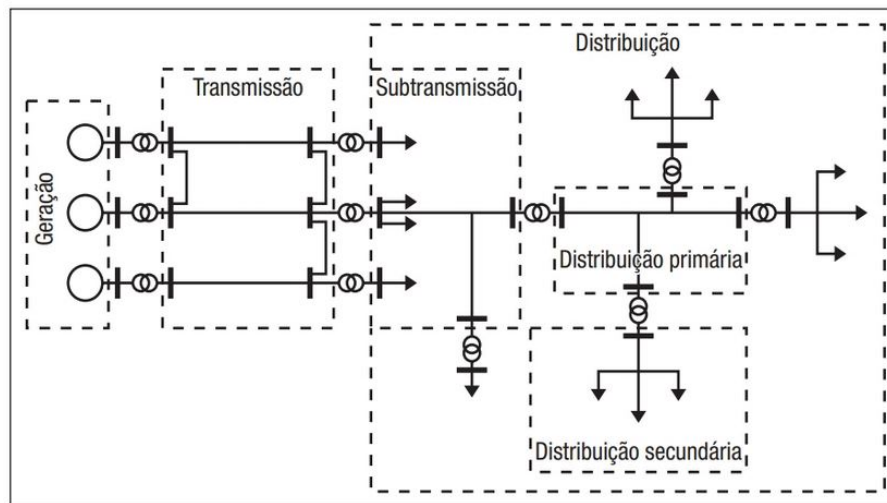
Neste capítulo, serão abordados os principais conceitos sobre o tema deste trabalho, bem como a abordagem destes na visão de alguns trabalhos publicados nessa mesma área.

2.1 SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

O Sistema Elétrico de Potência (SEP) é o sistema responsável por fornecer a energia elétrica aos seus usuários, de maneira confiável e com qualidade, sempre que esta for solicitada. Esse sistema pode ser dividido em três blocos, os quais representam suas principais funções que são: geração, transmissão e distribuição (KAGAN, 2000).

A geração de energia elétrica é na verdade uma transformação de algum outro tipo de energia presente na natureza para a energia elétrica. Entre as principais fontes de energia, se destaca no Brasil a transformação da energia hidráulica, proveniente do vasto potencial hídrico do país, em energia elétrica, por meio das várias usinas hidroelétricas existentes no território nacional. A transmissão, como o próprio nome diz, é o subsistema responsável por transmitir a energia produzida nas usinas geradoras para os centros de carga, visto que os centros de produção estão geralmente afastados geograficamente dos centros de consumo. Entre as redes de transmissão e distribuição, podem existir em alguns casos sistemas de subtransmissão, que são responsáveis por interligar duas ou mais subestações em uma tensão de subtransmissão (geralmente entre 34,5kV, 69kV e 138kV) ou até mesmo alimentar alguns grandes clientes que recebem a energia na tensão de subtransmissão. O subsistema de distribuição, é a parte do sistema responsável por distribuir a energia recebida pela transmissão para os consumidores finais, rebaixando a tensão de transmissão para um nível apropriado para o consumo (KAGAN, 2000). A Figura 2.1 apresenta o diagrama unifilar de um SEP.

Figura 2.1 – Diagrama Unifilar do Sistema Elétrico de Potência



Fonte: Kagan (2000, p. 03).

2.1.1 Sistema de distribuição de energia elétrica

O sistema de distribuição é o responsável por fornecer a energia proveniente das subestações de subtransmissão aos consumidores do sistema, transformando a tensão para um nível apropriado ao consumo (GONEM, 1986).

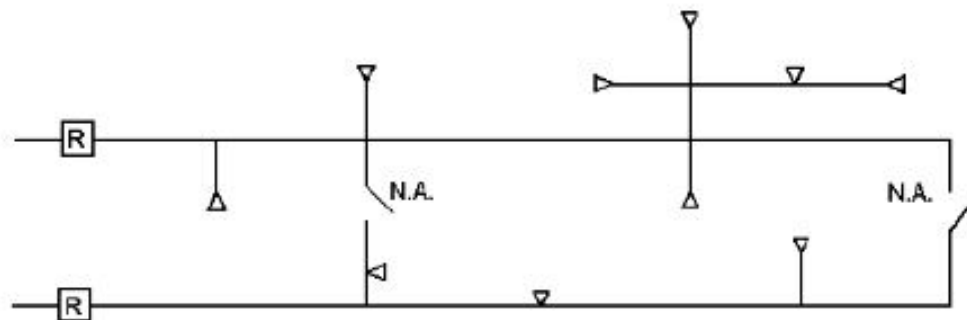
Pode-se dizer que o sistema de distribuição começa na subestação, a qual é alimentada por uma rede de transmissão ou subtransmissão. A subestação faz o rebaixamento da tensão de transmissão para a tensão de distribuição, e cada subestação pode suprir um ou mais alimentadores de distribuição. Os alimentadores, que geralmente possuem característica radial, levam a energia para os consumidores finais, sejam eles atendidos em Média Tensão (MT) ou Baixa Tensão (BT) (KERSTING, 2002).

2.1.1.1 Alimentadores de Distribuição

Os alimentadores de distribuição ou Redes de Distribuição (RD), são responsáveis por levar a energia da subestação até os consumidores primários ou transformadores de distribuição, geralmente operam nas tensões de 13,8kV ou 23,1kV. Possuem como principais características a topologia predominantemente radial, inúmeros ramais (bifurcações) e diferentes tipos de carga agrupados (residenciais, comerciais, industriais, rurais, etc) (BERNARDON et al., 2015).

Os alimentadores com primário radial, contam com uma rede tronco de onde se derivam ramais. Nessas derivações, geralmente são colocadas chaves-fusíveis, que servem tanto para proteção dos ramais quando para desligamentos ou manobras. Usualmente entre dois alimentadores é colocada uma ou mais chaves seccionadoras do tipo Normalmente Aberta (NA), que podem ser fechadas para eventuais transferências de carga entre alimentadores (KAGAN, 2000). Na Figura 2.2, pode-se visualizar um exemplo de diagrama unifilar de dois alimentadores radiais, conectados por chaves-seccionadoras NA.

Figura 2.2 – Diagrama Unifilar de Alimentadores Radiais



Fonte: Adaptado de NEOENERGIA ELEKTRO (2020, p. 16).

2.2 CONSUMIDORES DE ENERGIA ELÉTRICA

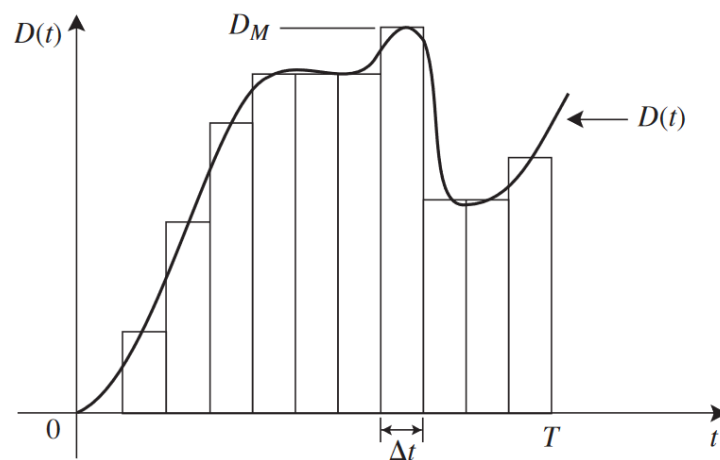
O consumidor de energia elétrica é a Pessoa física ou jurídica, que solicite para a distribuidora o fornecimento de energia elétrica e/ou o uso do sistema elétrico. Este, assume as obrigações legais pelo pagamento das faturas e obrigações regulamentadas pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), assim vinculando-se aos contratos de fornecimento, de uso e de conexão ou de adesão (ANEEL, 2018).

2.3 DEMANDA E CURVAS DE CARGA

Conforme a ANEEL (2018), pode-se definir a demanda de uma instalação como o valor médio da potência ativa das cargas em operação simultânea na unidade consumidora, durante um intervalo de tempo especificado, expressa em quilowatts (kW). Também pode-se ter a demanda reativa de uma instalação, essa expressa em quilo-volt-ampère-reactivo (kvar).

Segundo Cotrim (2009), pode-se definir uma curva de carga como a demanda em função do tempo $D(t)$, para um dado período de tempo T . Essa curva é constituída por patamares de demanda (geralmente dividida em 24 patamares correspondentes as horas de um dia), e o mais comum é que seja representada por uma curva resultante da união dos pontos médios superiores dos retângulos de largura (t) , em um período de T , conforme demonstrado na Figura 2.3. A ordenada máxima dessa curva define a demanda máxima nesse período amostrado, e a área total entre a curva e o eixo do tempo representa a energia total consumida.

Figura 2.3 – Exemplo de curva de carga



Fonte: Cotrim (2009, p. 104).

De acordo com Oliveira (2013), uma curva de carga pode ser descrita como a representação da demanda de um consumidor ou grupo de consumidores em função do tempo, geralmente são curvas de carga diárias, mas também podem representar intervalos de tempo maiores.

2.4 CURVAS TÍPICAS DE CARGA

O uso de técnicas como a criação de curvas típicas de carga se faz necessário para representação do comportamento das cargas quando se estuda o sistema de distribuição. Como a grande maioria dos consumidores possui apenas o registro de medição do seu consumo mensal, pois o uso de medidores inteligentes ainda não foi amplamente difundido, esse registro mensal se torna insuficiente para análise do comportamento diário das cargas dentro do sistema (BERNARDON et al., 2015).

Segundo Bernardon (2004), o uso de curvas típicas para representar o comportamento das cargas ao longo do tempo é bastante eficaz. Porém, é necessário realizar uma

campanha de medição para coleta de dados e agrupamento das curvas de carga similares, para que esse tipo de representação seja possível. É interessante frisar que não é suficiente apenas construir curvas típicas para as principais classes de consumo (Residencial, comercial e industrial) mas também subdividir essas classes por faixas de consumo, pois em uma mesma classe pode haver bastante diferença entre os hábitos de consumo de um consumidor para outro.

2.5 RECONFIGURAÇÃO DE REDES

As RD possuem características bastante peculiares, pois podem existir inúmeras combinações de consumidores (residencial, comercial, industrial, etc) ligados em um único alimentador, cada um com um padrão de consumo diário típico. Além disso, as RD possuem, em sua maioria, uma característica radial, visando principalmente que o fluxo de potência ocorra sempre no mesmo sentido, com a finalidade principal de coordenar os dispositivos de proteção presentes ao longo da mesma (PFITSCHER, 2013).

De acordo com Bernardon et al. (2015), pode-se facilmente alterar a topologia de uma RD por meio da comutação de dispositivos de manobra ou proteção, por exemplo, chaves-fusíveis, chaves-faca ou religadores. As situações em que acontecem a alteração na topologia de uma RD são as seguintes:

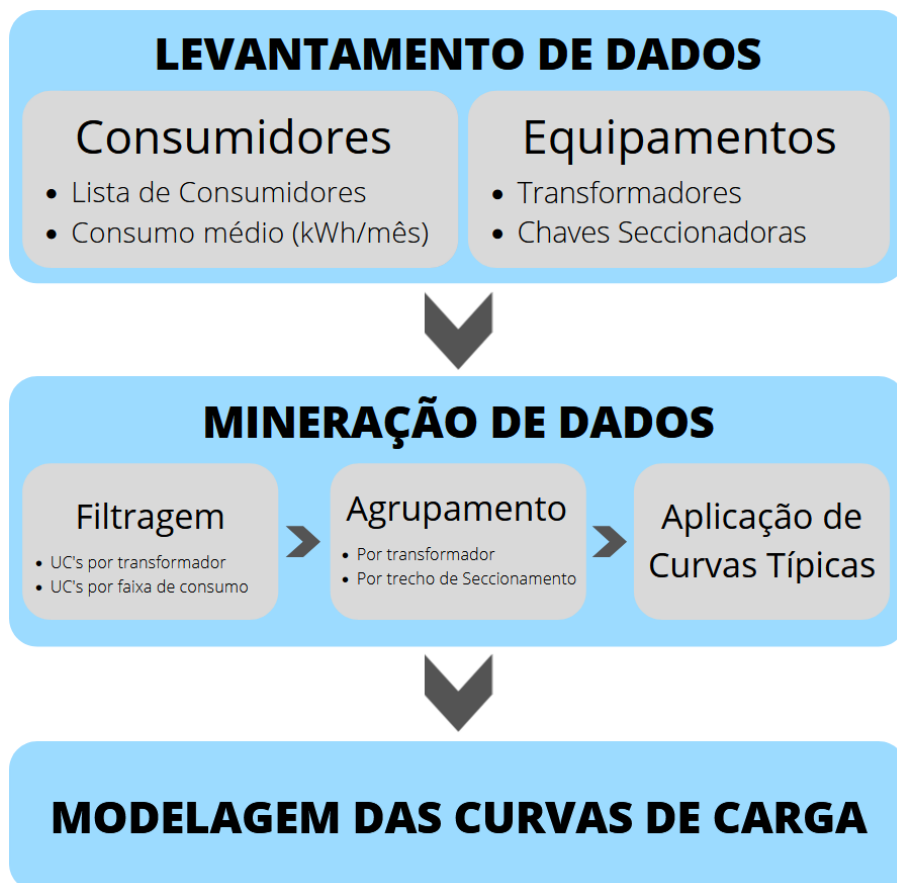
- I. Contingências, onde a reconfiguração tem por objetivo reestabelecer a energia elétrica para consumidores que não se encontram em locais com defeito na rede, isolando a região onde ocorre a falta;
- II. Manutenções programadas, onde modifica-se a topologia da RD para realocar consumidores de uma região a ser desligada para manutenção preventiva;
- III. Em condições normais de operação, quando a reconfiguração tem por objetivo otimizar o desempenho da rede, diminuindo o carregamento, melhorando o nível de tensão ou reduzindo perdas.

3 METODOLOGIA

Possuir uma metodologia eficiente e moldável para obtenção de curvas de carga pode ser de grande importância para uma concessionária distribuidora de energia. Os setores de planejamento e operação do sistema, necessitam dos mais variados tipos de informações para auxiliar na tomada de decisões quanto a desligamentos, manutenções programadas ou realocação de cargas em ocorrências de falhas, e a possibilidade da obtenção de uma curva de carga por trecho de cada alimentador pode ser uma ferramenta de fundamental importância para uma decisão acertada.

Neste contexto, o presente capítulo apresenta uma metodologia que pode ser utilizada para gerar curvas de cargas por trecho de um alimentador de distribuição real, utilizando basicamente mineração de dados e os conceitos básicos abordados nos capítulos anteriores. A Figura 3.1 apresenta o diagrama de blocos da metodologia proposta:

Figura 3.1 – Metodologia Proposta



Fonte: Autor (2021).

3.1 LEVANTAMENTO DE DADOS

A primeira etapa da metodologia proposta é o levantamento dos dados do alimentador de distribuição de interesse. Neste processo, por meio da concessionária de energia elétrica local, são coletadas as informações necessárias para aplicação do método, como por exemplo os dados sobre os consumidores e as redes de distribuição.

3.1.1 Consumidores

Com relação aos consumidores, as informações essenciais a serem coletadas são: Nome, código, classe, tipo de tarifa, consumo médio e transformador ao qual está conectado.

3.1.2 Redes de Distribuição

Quanto as redes de distribuição, os principais dados são o número de alimentadores conectados a subestação, as coordenadas geográficas dos postes que compõem o alimentador, quantidade e localização dos transformadores de distribuição, potência dos transformadores, quantidade e localização dos equipamentos de seccionamento (chaves-faca e chaves-fusíveis).

3.2 MINERAÇÃO DE DADOS

Com base nas informações coletadas sobre a rede de distribuição e as unidades consumidoras (UC's) a ela conectadas, nesta etapa é então feito o tratamento do banco de dados adquirido. Essa mineração de dados pode ser dividida em três estágios, são eles: Filtragem, Aplicação de curvas típicas e Agrupamento.

3.2.1 Filtragem

No primeiro estágio de mineração dos dados, a metodologia conta com uma filtragem, onde a lista de unidades consumidoras de um alimentador de distribuição é separada conforme o transformador ao qual cada UC está conectada.

Ainda no estágio de filtragem, após aplicado o primeiro filtro para separação das UC's por transformador, é então feita uma estratificação das UC's, desta vez separando

as mesmas por classe e faixas de consumo. O critério adotado para estabelecer as faixas de consumo é conforme a resolução da ANEEL (2016). A Tabela 3.1 demonstra de forma sintetizada, os critérios para a estratificação.

Tabela 3.1 – Estratificação de Consumidores

SDMT	SDBT		
	Residencial	Rural	Comercial
Até 50kW	Até 100kWh	Até 300kWh	Até 500kWh
Acima de 50kW até 150kW	Acima de 100kWh até 220kWh	Acima de 300kWh até 1000kWh	Acima de 500kWh até 2000kWh
Acima de 150kW até 300kW	Acima de 220kWh até 500kWh	Acima de 1000kWh até 5000kWh	Acima de 2000kWh até 5000kWh
Acima de 300kW até 800kW	Acima de 500kWh até 1000kWh	Acima de 5000kWh	Acima de 5000kWh
Acima de 800kW	Acima de 1000kWh		

Fonte: Adaptado de ANEEL (2016)

3.2.2 Agrupamento

O segundo passo do processo de mineração se trata do agrupamento das UC's de mesma classe e mesma faixa de consumo. Esse agrupamento deve ser feito primeiramente por transformador, somando os consumos médios mensais de todos os clientes conectados ao mesmo transformador e que fazem parte da mesma faixa de estratificação. Pode-se então obter o consumo total estratificado por faixa em um TR, conforme representado na Equação (3.1), onde n representa o número de consumidores do TR.

$$\text{Cons[Classe]}(\text{Faixa})_{Total} = \sum_{n=1}^N \text{Cons[Classe]}(\text{Faixa})_n \quad (3.1)$$

A Equação (3.2) apresenta um exemplo de cálculo do consumo médio na classe residencial, e faixa de consumo de até 100kWh mensais.

$$\begin{aligned} \text{Cons[RES]}(\text{Ate100})_{Total} = & \text{Cons[RES]}(\text{Ate100})_1 + \text{Cons[RES]}(\text{Ate100})_2 \\ & + \dots + \text{Cons[RES]}(\text{Ate100})_n \end{aligned} \quad (3.2)$$

Após somados os consumos médios em todos os transformadores que fazem parte do alimentador de distribuição de interesse, deve-se agrupar o consumo dos TR's que fazem parte do mesmo trecho de seccionamento, isto é, todos equipamentos que são afetados pelo desligamento/abertura de um único elemento de manobra (chave-fúsivel, chave-faca, etc). Para definir os trechos de seccionamento, é necessária uma análise da

topologia do alimentador de interesse, observando o número de equipamentos de manobra e suas posições geográficas no alimentador, bem como as chaves existentes a jusante e/ou a montante.

Definidos os trechos de seccionamento, pode-se obter o consumo médio total de cada trecho, por meio da soma dos consumos médios de todos TR's que fazem parte do trecho em questão, conforme representado na Equação (3.3), onde n é o número de transformadores no trecho analisado.

$$\text{Consumo}_{(TRECHO)} = \sum_{n=1}^n \text{Consumo}_{(TR)_n} \quad (3.3)$$

3.2.3 Aplicação de Curvas Típicas

Após o estágio de agrupamento dos dados, o último passo consiste em aplicar curvas típicas de carga para modelar a carga de cada trecho existente na rede de distribuição de interesse. As concessionárias de distribuição de energia geralmente possuem em sua base de dados, curvas de cargas típicas de seus clientes estratificadas em faixas de consumo, oriundas de campanhas de medição incentivadas pela ANEEL.

Conhecendo as curvas típicas normalizadas de cada uma das faixas de estratificação, é possível definir a distribuição percentual horária do consumo diário de cada uma das curvas típicas, por meio da Equação (3.4), onde x é a variável que representa a hora em que o consumo percentual está sendo calculado.

$$\text{Cons}_{\%} h_x = \frac{\text{Cons}_{P.U.} h_x}{\sum_{n=0}^{23} \text{Cons}_{P.U.} h_n} \quad (3.4)$$

Essas curvas típicas, após a distribuição horária percentual, devem ser aplicadas sobre a demanda média diária de cada grupo de UC's por faixa de consumo, resultando em curvas de carga que representam os consumidores de cada faixa de consumo. Para o cálculo da demanda média, é utilizada a Equação (3.5).

$$D_{med}(kW) = \frac{\text{Consumo}_{med}(kWh)}{\Delta T(h)} \quad (3.5)$$

3.3 MODELAGEM DAS CURVAS DE CARGA

Nesta etapa é possível definir a curva de carga geral de um alimentador de distribuição, bem como as curvas de carga de cada trecho do mesmo, por meio do agrupamento das curvas de carga obtidas após a aplicação de curvas típicas nas demandas médias calculadas para cada grupo de consumo estratificado de cada TR.

Assim, pode-se realizar inúmeras análises e atribuir vários cenários de carga de um alimentador, como por exemplo definir a curva de carga do mesmo com exclusão de algum trecho em falha, avaliar possibilidades de transferência de carga entre alimentadores, etc.

4 ESTUDO DE CASO

O presente capítulo apresenta um estudo de caso, que tem por finalidade a observação dos resultados obtidos após a aplicação da metodologia proposta no capítulo anterior em um sistema de distribuição real. Para o estudo, foram considerados os dados de um alimentador de distribuição real, localizado na cidade de Ijuí/RS, fornecidos pela concessionária de energia local em parceria com o Centro de Excelência em Energia e Sistemas de Potência (CEESP).

Ijuí é uma cidade brasileira localizada na região noroeste do estado do Rio Grande do Sul, que possui uma extensão territorial de aproximadamente 689 km^2 , onde vivem cerca de 84.041 habitantes. No ranking do Índice de Desenvolvimento Humano (IDH), o município ocupa a 119ª posição entre os municípios brasileiros e a 13ª posição dentro do estado (IBGE, 2021). Ijuí possui um clima subtropical úmido, com as quatro estações do ano bem definidas e uma elevada amplitude térmica, bastante típica da região sul do Brasil. Na Figura 4.1, é possível visualizar a localização do município no mapa estadual.

Figura 4.1 – Mapa de Localização: Ijuí/RS



Fonte: Município de Ijuí (2021).

O Departamento Municipal de Energia de Ijuí (DEMEI) é a concessionária responsável pela distribuição e parte da geração da energia elétrica na área urbana do município de Ijuí. A concessionária atua em uma área de concessão de aproximadamente 45 km^2 (referente a parte urbana) e conta com mais de 32 mil consumidores ativos (DEMEI, 2021).

4.1 ESCOLHA DO ALIMENTADOR

Após concedido o acesso ao banco de dados da concessionária, o primeiro passo foi analisar os dados a fim de escolher um sistema apropriado para aplicação da metodologia proposta. Desta forma, entre as quatro Subestações (SE) controladas pelo DEMEI, e seus inúmeros alimentadores, foi escolhido o alimentador AL-314 da SE-DEMEI como foco do trabalho. Para essa escolha, foram considerados como fatores determinantes o número de transformadores e consumidores conectados ao alimentador, e a partir disso foi escolhido um alimentador com características intermediárias, pois um alimentador com poucos transformadores seria insuficiente para validar o modelo e um alimentador com centenas de transformadores tornaria a análise muito extensa. Na Tabela 4.1 pode-se visualizar um resumo das principais características do AL escolhido.

Tabela 4.1 – Resumo do AL-314 DEMEI

ALIMENTADOR DEMEI 314	
Potência do Alimentador	10 MVA
Tensão de Linha	23,1 kV
Quantidade de postes	216
Extensão da rede MT	6,5 km
Núm. de transformadores trifásicos	26
Núm. de consumidores Monofásicos	1961
Núm. de consumidores Bifásicos	17
Núm. de consumidores Trifásicos	59
Núm. de chaves-fúsiveis	10
Núm. de chaves-faca	1

Fonte: Autor (2021)

O AL-314 é uma rede de distribuição urbana, com característica radial, responsável por alimentar diretamente 2.037 consumidores por meio de 26 transformadores trifásicos, dos quais 22 são de propriedade da concessionária e outros 4 pertencem a clientes particulares. A Tabela 4.2 a seguir apresenta a lista completa dos transformadores conectados ao alimentador em questão, com suas respectivas potências nominais, números de identificação e números dos elementos seccionadores a montante.

Tabela 4.2 – Lista de transformadores do AL-314

Núm. Placa	Potência (kVA)	Proprietário	Núm. Seccionador
120	150	Concessionária	2225
121	112,5	Concessionária	2205
122	112,5	Concessionária	2220
123	75	Concessionária	2215
124	75	Concessionária	2210
125	112,5	Concessionária	2206
188	75	Concessionária	711
189	75	Concessionária	2046
215	75	Concessionária	711
220	75	Concessionária	2210
239	75	Concessionária	2215
282	75	Concessionária	711
309	75	Concessionária	711
373	112,5	Concessionária	87
389	112,5	Concessionária	1040
390	112,5	Concessionária	1040
399	112,5	Concessionária	2205
418	75	Concessionária	2205
423	75	Concessionária	2210
424	75	Concessionária	2210
438	75	Concessionária	88
450	75	Concessionária	711
5035	300	Particular	2225
5096	30	Particular	2046
5099	300	Particular	711
5111	300	Particular	711

Fonte: Autor (2021)

4.2 APLICAÇÃO DA METODOLOGIA

Uma vez escolhido o alimentador e ser estudado, deve-se analisar a disposição física dos equipamentos (transformadores e chaves) ao longo de sua extensão. Como o banco de dados possui as coordenadas geográficas de todos os postes que compõem a rede, pode-se marcar o traçado do alimentador no mapa. A Figura 4.2 apresenta a topologia do AL-314, onde a linha vermelha representa a rede MT e os pontos destacados marcam a localização dos transformadores na rede.

Figura 4.2 – Topologia do AL-314



Fonte: Adaptado de Google Earth (2021).

4.2.1 Filtragem dos dados

A filtragem do banco de dados consiste em organizar e separar os dados das unidades consumidoras de uma forma ideal para aplicação do método. A estratificação é feita em dois processos: por transformador e por classes e faixas de consumo.

Primeiramente é feita a separação das UCs por transformador, onde pega-se a lista geral de consumidores do AL-314 e divide-se os mesmos conforme o transformador em que estão conectados.

O segundo processo de estratificação que deve ocorrer é por classes e faixas de consumo. Como os medidores instalados nas UCs não tem tecnologia suficiente para registrar o consumo de cada unidade em tempo real, fornecendo inclusive a curva de carga, a solução é trabalhar com os dados disponíveis que são a classe tarifária e o consumo médio mensal. Deve-se então separar os consumidores de cada transformador primeiramente em classes, conforme grupo tarifário a qual cada UC está registrada e depois estratificar os grupos por faixas de consumo, conforme indicado na Tabela 3.1.

4.2.2 Agrupamento

Após concluída a estratificação, o consumo médio mensal de todas as UCs que pertencem ao mesmo subgrupo de um transformador devem ser somados, gerando assim um único valor de consumo médio mensal em kWh para cada faixa de consumo de cada classe consumidora. A Tabela 4.4 apresenta o consumo total agregado por faixas em cada transformador do AL-314.

Com todos os consumos agregados por faixa dentro de um mesmo transformador, soma-se então os consumos médios de cada faixa estratificada para os transformadores que fazem parte do mesmo trecho de seccionamento, ou seja, os transformadores que são desligados pelo mesmo elemento seccionador presente na rede de distribuição. Para fins de simplificação, foram criados transformadores equivalentes para cada trecho de seccionamento. Esses transformadores, representam em um único elemento o consumo somado de todos os TR's de um mesmo trecho de seccionamento. A Tabela 4.3 apresenta a lista de TR's equivalentes.

Tabela 4.3 – Resumo de Transformadores Equivalentes

Seccionador	TR Equivalente	TR Real
711	TR-EQ1	215
		5099
		5111
		282
		309
		450
		188
2046	TR-EQ2	189
		5096
87	TR-EQ3	373
88	TR-EQ4	438
1040	TR-EQ5	389
		390
2220	TR-EQ6	122
2210	TR-EQ7	220
		124
		423
		424
2215	TR-EQ8	239
		123
2225	TR-EQ9	120
		5035
2205	TR-EQ10	121
		399
		418
2206	TR-EQ11	125

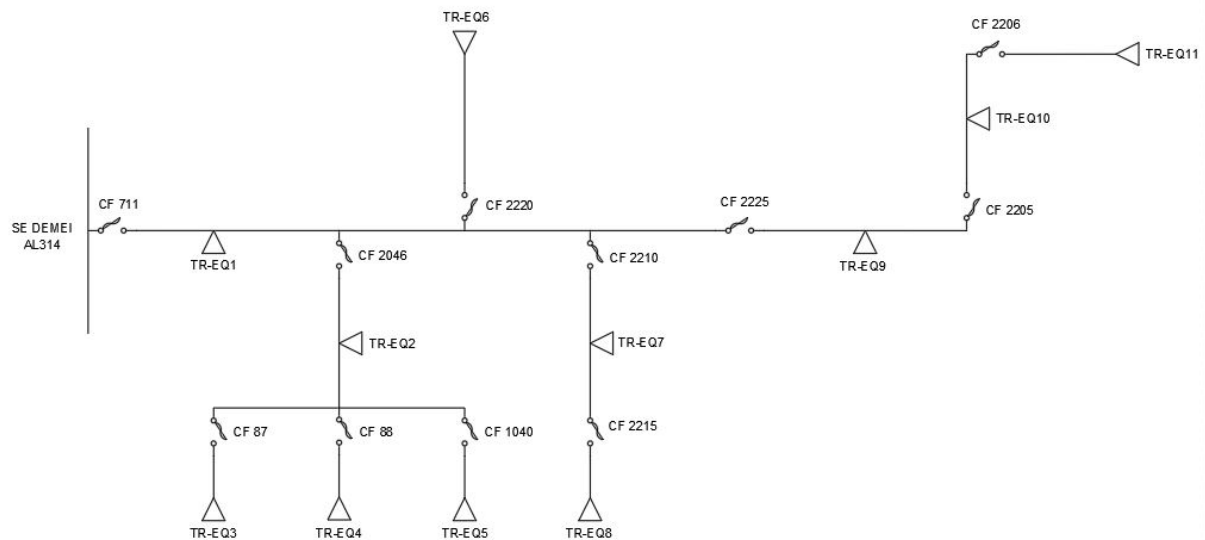
Tabela 4.4 – Consumo agregado por faixa de consumo

Transformador	Consumidores	B1					Acima de 1000kWh	B2		B3			A4	
		Até 100kWh	101-220kWh	221-500kWh	501-1000kWh	501-1000kWh		Até 300kWh	Até 500kWh	501-2000kWh	2001-5000kWh	Até 50kW	150-300kW	
215	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5099	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15272
5111	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
282	46	586	4169	2059	0	2145	0	0	0	0	0	0	0	0
309	118	1756	8885	7347	1154	0	0	0	0	0	0	0	0	0
450	82	838	5756	6076	563	2223	0	0	0	73	0	0	0	0
188	95	1490	7911	4208	0	0	0	0	0	113	0	0	0	0
189	103	1267	7382	3960	1171	0	0	0	0	609	0	0	0	0
5096	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4880	0
373	126	3055	7898	1774	0	0	0	794	0	0	0	0	0	0
438	85	2026	5184	2138	606	0	0	325	0	0	0	0	0	0
389	87	2247	4363	1367	0	0	0	574	0	505	0	0	0	0
390	113	2398	6661	1177	0	0	0	842	0	461	0	0	0	0
122	95	1515	5780	3742	702	0	0	0	0	259	0	0	0	0
220	84	1574	5914	3297	526	0	0	0	0	57	1200	0	0	0
124	108	2581	7466	4898	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
423	88	2135	5133	1462	0	0	0	284	0	219	0	0	0	0
424	105	2779	6853	221	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
239	95	2231	6175	2126	0	1201	0	0	0	390	815	0	0	0
123	96	2486	5959	4377	0	0	0	0	0	39	0	0	0	0
120	97	901	6809	6123	1982	0	0	0	0	552	2906	5495	0	0
5035	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	34403
121	99	1426	7146	5142	531	0	0	0	0	316	0	0	0	0
399	87	1146	6170	4592	557	0	0	0	0	191	0	2510	0	0
418	52	715	4512	2554	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
125	159	1749	11019	10761	2246	0	0	0	0	654	2246	2259	0	0
Consumo total por faixa		36901	137145	79401	10038	5569	2819	4438	7167	10264	4880	49675		

Fonte: Autor (2021)

Com a definição dos transformadores equivalentes por trecho e a localização geográfica das 11 chaves presentes no alimentador, na Figura 4.3 foi construído um diagrama unifilar simplificado do AL-314, onde é possível verificar os trechos de seccionamento e as ramificações do AL. Esse diagrama unifilar pode auxiliar na identificação dos possíveis cenários de desligamentos parciais do alimentador em questão, pois o desligamento de determinada chave pode não afetar somente o seu próprio trecho, como também as demais chaves a jusante (se houverem).

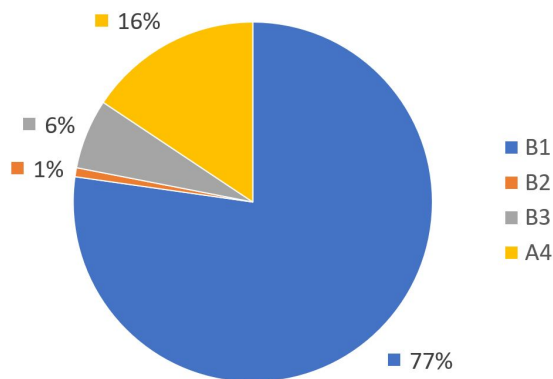
Figura 4.3 – Diagrama Unifilar Simplificado do AL-314



Fonte: Autor (2021).

Partindo para a análise dos dados de consumo médio mensal agregados na Tabela 4.4, pode-se obter algumas informações importantes sobre o conjunto de consumidores. O Gráfico 4.1 apresenta a porcentagem de consumo que cada classe tarifária representa no montante total do alimentador.

Gráfico 4.1 – Proporção de consumo total no alimentador por cada classe tarifária.

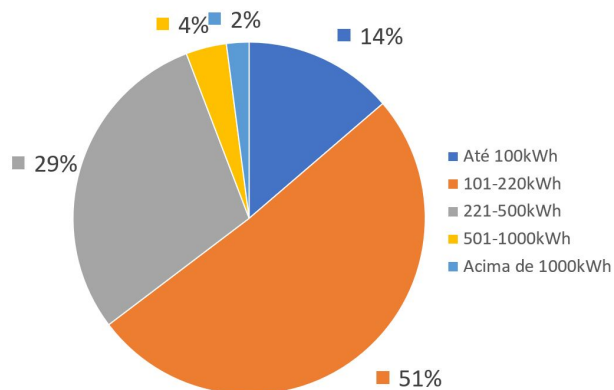


Fonte: Autor (2021).

Segundo dados do Gráfico 4.1, nota-se que consumidores da classe tarifária B1 (Residencial) são responsáveis por 77% de toda energia consumida no AL-314. Clientes dos subgrupos A4, B3 e B2 completam o consumo total com 16%, 6% e 1% respectivamente.

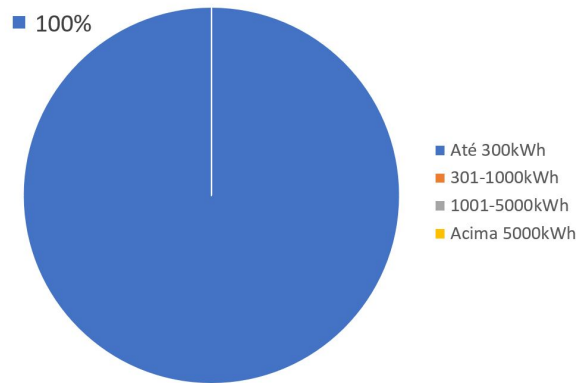
Realizando uma análise individual de cada uma das classes tarifárias (A4, B1, B2 e B3), é possível visualizar a representatividade de cada faixa de consumo dentro da energia total consumida pela classe. Nos Gráficos 4.2, 4.3, 4.4 e 4.5 pode-se visualizar a distribuição do consumo entre as faixas de cada subgrupo específico.

Gráfico 4.2 – Proporção de consumo por faixas na classe Residencial (B1)



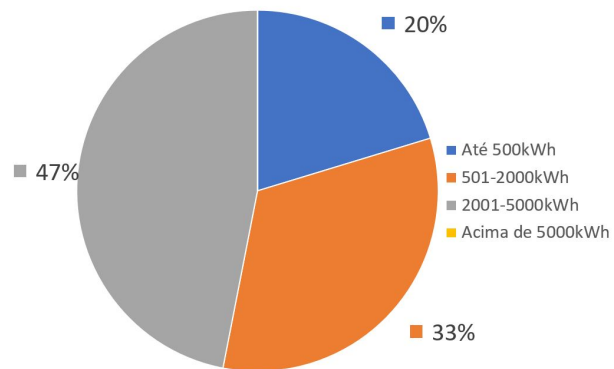
Fonte: Autor (2021).

Gráfico 4.3 – Proporção de consumo por faixas na classe Rural (B2)



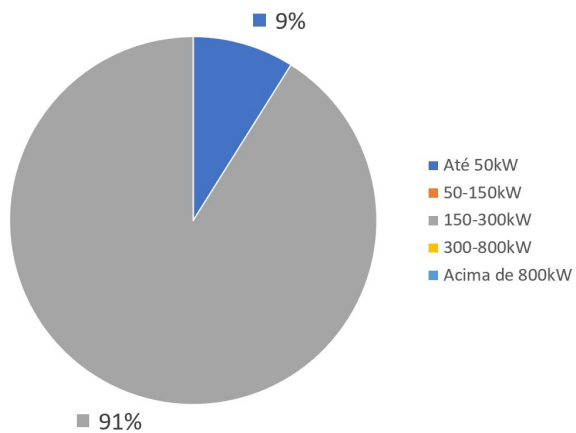
Fonte: Autor (2021).

Gráfico 4.4 – Proporção de consumo por faixas na classe Comercial (B3)



Fonte: Autor (2021).

Gráfico 4.5 – Proporção de consumo por faixas no subgrupo A4



Fonte: Autor (2021).

No Gráfico 4.2 observa-se que a maioria dos clientes residenciais (51%) consomem mensalmente entre 101 e 220kWh e essa classe possui UC's representantes em todas as faixas de consumo estratificadas. Já o Gráfico 4.3, apresenta uma particularidade, pois todos os consumidores do subgrupo B2 consomem dentro da mesma faixa (Até 300kWh mensais), não possuindo representante nas outras faixas. O subgrupo B3, representado no Gráfico 4.4, apresenta uma melhor distribuição entre as faixas de estratificação (com exceção da faixa Acima de 5000kWh, que não possui representatividade). Diferentemente dos demais, no subgrupo A4 as UC's não são estratificadas pelo consumo e sim pela potência demandada. O Gráfico 4.5 apresenta a porcentagem de consumo em cada faixa de demanda, onde observa-se também a ausência de representantes em três das cinco faixas possíveis.

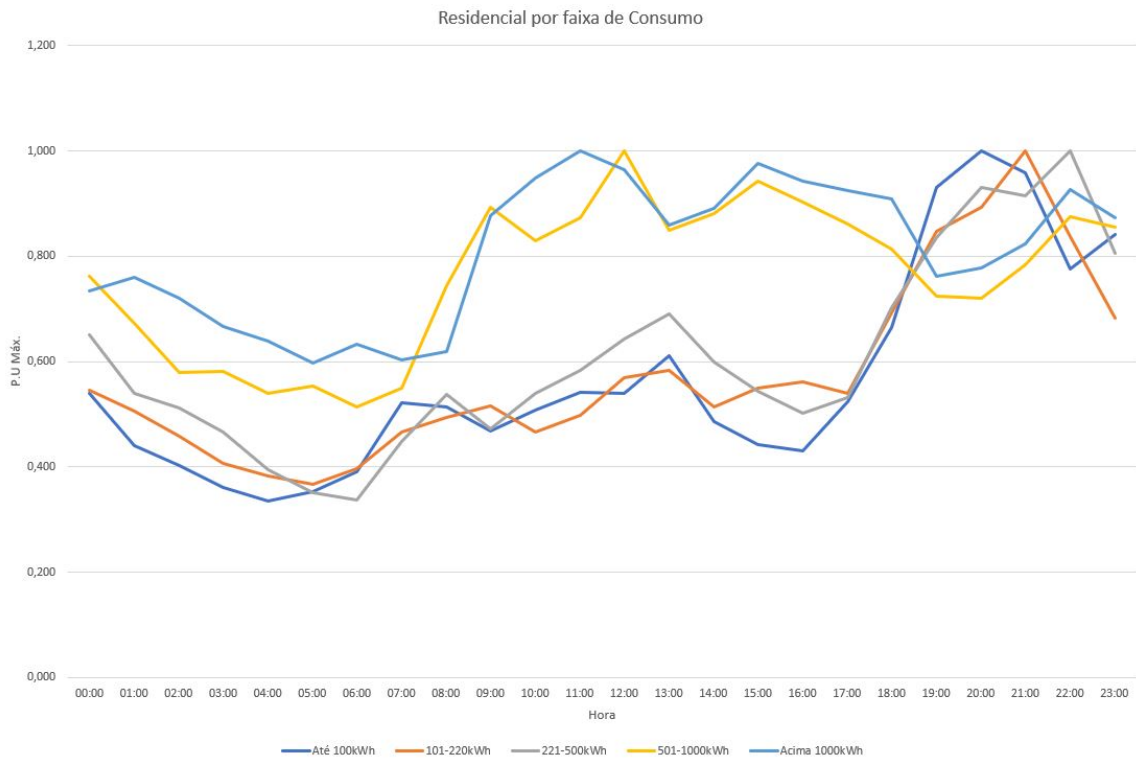
4.2.3 Aplicação de Curvas Típicas

A aplicação de curvas típicas tem por finalidade modelar a curva de carga diária de um conjunto de UC's, distribuindo de forma horária o consumo médio diário de um grupo de UC's da mesma faixa de consumo estratificado e de um mesmo transformador. Para isso, é necessário utilizar curvas típicas de carga, estas obtidas pela concessionária por meio de campanhas de medição.

As curvas típicas de carga utilizadas nesse trabalho foram obtidas por meio do relatório de "Campanha de Medidas e Caracterização da Carga", divulgado pelo DEMEI em janeiro de 2017.

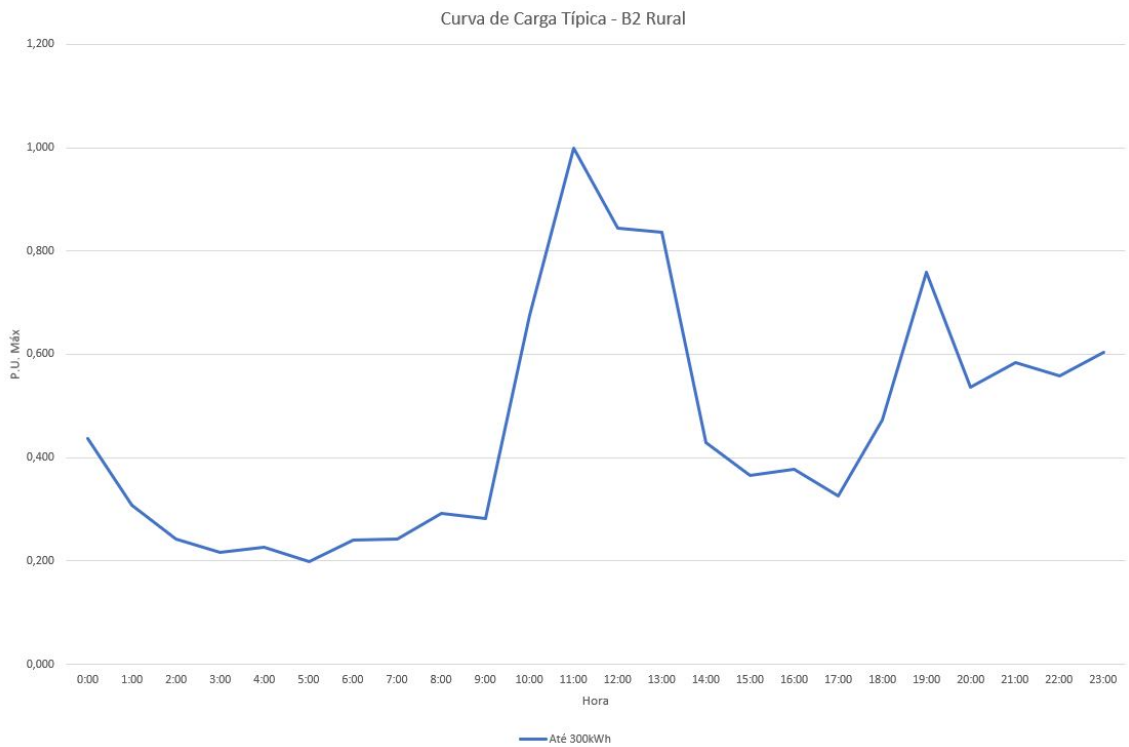
O Gráfico 4.6 apresenta as curvas típicas de carga para consumidores do tipo residencial, onde é possível visualizar 5 curvas distintas, referentes as faixas de consumo estabelecidas para as UC's do subgrupo B1. No Gráfico 4.7 nota-se que existe apenas uma curva típica para os clientes do tipo rural, pois todas as ocorrências de consumidores do subgrupo B2 fazem parte de uma mesma faixa de consumo (Até 300kWh/mês). Já as curvas típicas para consumidores do subgrupo B3 podem ser visualizadas no Gráfico 4.8, onde as quatro curvas representam as faixas de consumo desse subgrupo. Finalmente, o Gráfico 4.9 apresenta uma única curva típica para as duas faixas de demanda dos consumidores do subgrupo A4 e é possível notar uma certa semelhança com as curvas do subgrupo B3.

Gráfico 4.6 – Curvas típicas para o subgrupo Residencial (B1)



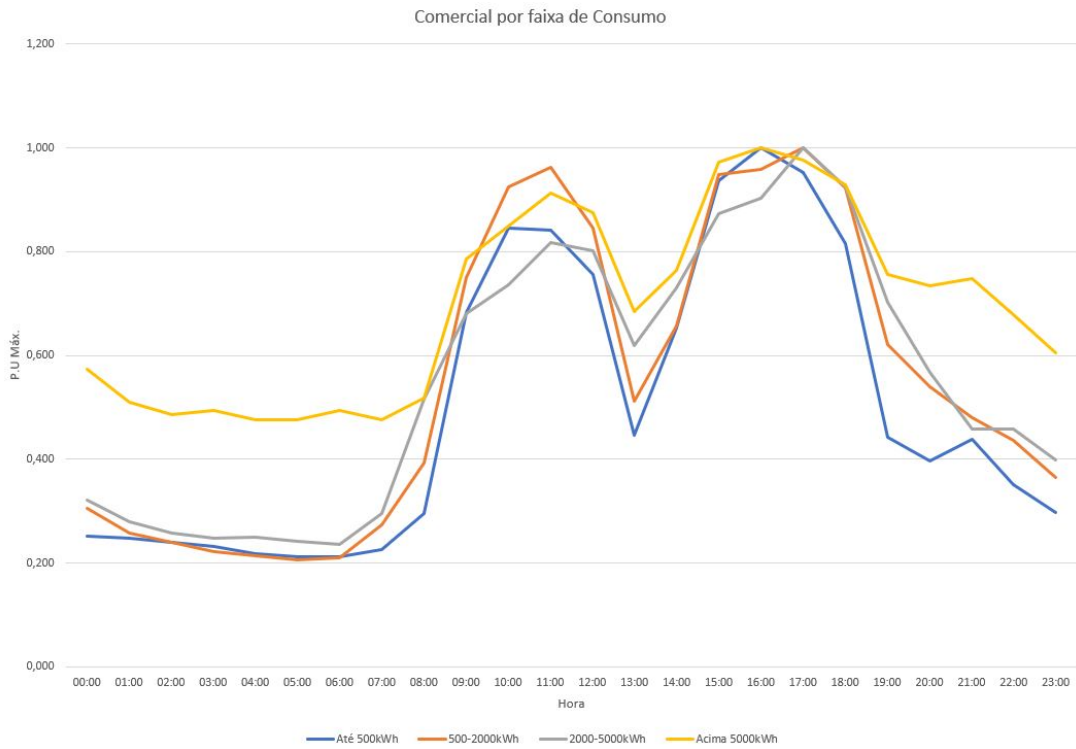
Fonte: Autor (2021).

Gráfico 4.7 – Curvas típicas para o subgrupo Rural (B2)



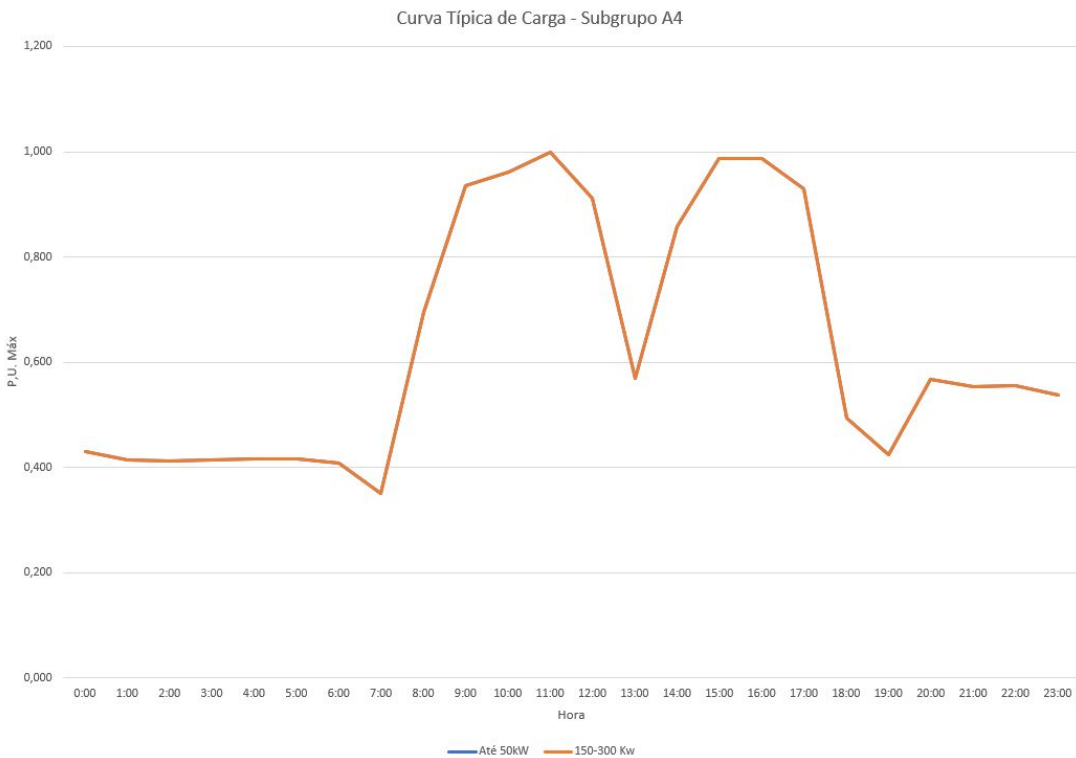
Fonte: Autor (2021).

Gráfico 4.8 – Curvas típicas para o subgrupo Comercial (B3)



Fonte: Autor (2021).

Gráfico 4.9 – Curvas típicas para o subgrupo A4



Fonte: Autor (2021).

Após obtenção das curvas típicas normalizadas por meio da colaboração da concessionária, é possível calcular a distribuição percentual horária do consumo diário de cada uma das curvas típicas obtidas, através da Equação (3.4) apresentada no capítulo 3.

Na tabela 4.5, pode-se visualizar de forma numérica os dados normalizados que são usados para a plotagem das curvas típicas de carga de todas as faixas de consumo. Aplicando então a Equação (3.4) em todos os dados da Tabela 4.5, obtém-se como resultado a Tabela 4.6, onde os dados numéricos representam a distribuição percentual horária do consumo diário da curva típica correspondente.

A Tabela 4.6 é então a responsável por gerar as curvas de carga de cada trecho de chave. Porém, para gerar uma curva diária de carga para cada transformador ou trecho de chave, precisa-se transformar os consumos médios mensais (kWh) já agrupados por trecho em demanda média (kW), por meio da aplicação da Equação (4.1).

$$D_{Med}(kW) = \frac{\text{Cons}_{Méd}(\text{kWh})}{24(h) \times 30(dias)} = \frac{\text{Cons}_{Méd}(\text{kWh})}{720} \quad (4.1)$$

A Tabela 4.7 apresenta um resumo da demanda média em faixas de estratificação para todos os trechos de seccionamento após aplicação da Equação (4.1). Então, multiplicando cada linha da Tabela 4.7 pela Tabela 4.6, obtém-se como resultado a demanda média horária por trecho, conforme demonstrado na Tabela 4.8

Tabela 4.5 – Curvas Típicas de Carga Normalizadas

Hora	Residencial						Rural			Comercial			A4		
	PU Máx	PU Máx	PU Máx	PU Máx	PU Máx	PU Máx	PU Máx	PU Máx	PU Máx	PU Máx	PU Máx	PU Máx	PU Máx	PU Máx	PU Máx
	Até 100kWh	101-220kWh	221-500kWh	501-1000kWh	Acima 1000kWh	Até 300kWh	Até 500kWh	501-2000kWh	2001-5000kWh	Até 50kWh	Até 150-300 Kw				
00:00	0,540	0,546	0,651	0,762	0,735	0,437	0,251	0,306	0,322	0,431	0,431				
01:00	0,440	0,506	0,540	0,672	0,761	0,309	0,247	0,257	0,279	0,415	0,414				
02:00	0,402	0,459	0,511	0,579	0,720	0,242	0,240	0,240	0,258	0,412	0,412				
03:00	0,360	0,406	0,466	0,581	0,667	0,217	0,232	0,221	0,248	0,415	0,415				
04:00	0,336	0,383	0,394	0,540	0,638	0,226	0,218	0,214	0,250	0,416	0,416				
05:00	0,353	0,367	0,351	0,553	0,597	0,198	0,213	0,206	0,242	0,416	0,416				
06:00	0,390	0,397	0,337	0,513	0,634	0,241	0,212	0,210	0,236	0,408	0,408				
07:00	0,522	0,467	0,449	0,549	0,604	0,242	0,226	0,273	0,296	0,350	0,350				
08:00	0,513	0,494	0,538	0,744	0,619	0,293	0,296	0,392	0,515	0,694	0,694				
09:00	0,469	0,516	0,472	0,894	0,878	0,282	0,683	0,750	0,680	0,935	0,935				
10:00	0,507	0,466	0,540	0,829	0,949	0,675	0,845	0,925	0,737	0,962	0,962				
11:00	0,541	0,498	0,583	0,874	1,000	1,000	0,842	0,962	0,817	1,000	1,000				
12:00	0,540	0,569	0,643	1,000	0,965	0,844	0,756	0,845	0,801	0,912	0,912				
13:00	0,612	0,583	0,690	0,850	0,859	0,837	0,446	0,511	0,620	0,570	0,570				
14:00	0,486	0,513	0,600	0,881	0,892	0,430	0,652	0,656	0,731	0,858	0,858				
15:00	0,443	0,550	0,543	0,942	0,976	0,365	0,937	0,948	0,873	0,987	0,987				
16:00	0,431	0,562	0,502	0,904	0,943	0,377	1,000	0,958	0,903	0,988	0,988				
17:00	0,524	0,539	0,532	0,862	0,925	0,326	0,952	1,000	1,000	0,930	0,930				
18:00	0,665	0,692	0,702	0,813	0,910	0,473	0,815	0,923	0,924	0,494	0,494				
19:00	0,931	0,848	0,836	0,725	0,763	0,758	0,443	0,622	0,703	0,424	0,424				
20:00	1,000	0,894	0,931	0,721	0,777	0,537	0,396	0,539	0,567	0,568	0,568				
21:00	0,958	1,000	0,915	0,783	0,823	0,585	0,439	0,481	0,458	0,554	0,554				
22:00	0,775	0,838	1,000	0,875	0,926	0,559	0,352	0,437	0,458	0,556	0,556				
23:00	0,841	0,682	0,806	0,855	0,874	0,604	0,298	0,364	0,398	0,537	0,537				
SOMATÓRIO	13,579	13,775	14,532	18,301	19,435	11,057	11,991	13,240	13,316	15,232	15,231				

Fonte: Adaptado de DEMEI (2017)

Tabela 4.6 – Curvas Típicas de Carga - Distribuição do consumo % por hora

Hora	Residencial						Rural		Comercial			A4	
	% Consum.	% Consum.	% Consum.	% Consum.	% Consum.	% Consum.	% Consum.	% Consum.	% Consum.	% Consum.	% Consum.	% Consum.	% Consum.
	Até 100kWh	101-220kWh	221-500kWh	501-1000kWh	Acima 1000kWh	Até 300kWh	Até 500kWh	501-2000kWh	2001-5000kWh	Até 50kW	Até 150-300 Kw		
00:00	0,03977	0,03964	0,04480	0,04164	0,03782	0,03952	0,02093	0,02311	0,02418	0,02830	0,02830	0,02830	0,02830
01:00	0,03240	0,03673	0,03716	0,03672	0,03916	0,02795	0,02060	0,01941	0,02095	0,02725	0,02718	0,02718	0,02718
02:00	0,02960	0,03332	0,03516	0,03164	0,03705	0,02189	0,02002	0,01813	0,01938	0,02705	0,02705	0,02705	0,02705
03:00	0,02651	0,02947	0,03207	0,03175	0,03432	0,01963	0,01935	0,01669	0,01862	0,02725	0,02725	0,02725	0,02725
04:00	0,02474	0,02780	0,02711	0,02951	0,03283	0,02044	0,01818	0,01616	0,01877	0,02731	0,02731	0,02731	0,02731
05:00	0,02600	0,02664	0,02415	0,03022	0,03072	0,01791	0,01776	0,01556	0,01817	0,02731	0,02731	0,02731	0,02731
06:00	0,02872	0,02882	0,02319	0,02803	0,03262	0,02180	0,01768	0,01586	0,01772	0,02679	0,02679	0,02679	0,02679
07:00	0,03844	0,03390	0,03090	0,03000	0,03108	0,02189	0,01885	0,02062	0,02223	0,02298	0,02298	0,02298	0,02298
08:00	0,03778	0,03586	0,03702	0,04065	0,03185	0,02650	0,02469	0,02961	0,03868	0,04556	0,04556	0,04556	0,04556
09:00	0,03454	0,03746	0,03248	0,04885	0,04518	0,02550	0,05696	0,05665	0,05107	0,06138	0,06138	0,06138	0,06138
10:00	0,03734	0,03383	0,03716	0,04530	0,04883	0,06105	0,07047	0,06986	0,05535	0,06316	0,06316	0,06316	0,06316
11:00	0,03984	0,03615	0,04012	0,04776	0,05145	0,09044	0,07022	0,07266	0,06135	0,06565	0,06565	0,06565	0,06565
12:00	0,03977	0,04131	0,04425	0,05464	0,04965	0,07633	0,06305	0,06382	0,06015	0,05987	0,05987	0,05987	0,05987
13:00	0,04507	0,04232	0,04748	0,04645	0,04420	0,07570	0,03719	0,03860	0,04656	0,03742	0,03742	0,03742	0,03742
14:00	0,03579	0,03724	0,04129	0,04814	0,04590	0,03889	0,05437	0,04955	0,05490	0,05633	0,05633	0,05633	0,05633
15:00	0,03262	0,03993	0,03737	0,05147	0,05022	0,03301	0,07814	0,07160	0,06556	0,06480	0,06480	0,06480	0,06480
16:00	0,03174	0,04080	0,03454	0,04940	0,04852	0,03410	0,08340	0,07236	0,06781	0,06486	0,06486	0,06486	0,06486
17:00	0,03859	0,03913	0,03661	0,04710	0,04759	0,02948	0,07939	0,07553	0,07510	0,06106	0,06106	0,06106	0,06106
18:00	0,04897	0,05024	0,04831	0,04442	0,04682	0,04278	0,06797	0,06971	0,06939	0,03243	0,03243	0,03243	0,03243
19:00	0,06856	0,06156	0,05753	0,03962	0,03926	0,06855	0,03694	0,04698	0,05279	0,02784	0,02784	0,02784	0,02784
20:00	0,07364	0,06490	0,06407	0,03940	0,03998	0,04857	0,03302	0,04071	0,04258	0,03729	0,03729	0,03729	0,03729
21:00	0,07055	0,07260	0,06296	0,04278	0,04235	0,05291	0,03661	0,03633	0,03439	0,03637	0,03637	0,03637	0,03637
22:00	0,05707	0,06083	0,06881	0,04781	0,04765	0,05056	0,02936	0,03301	0,03439	0,03650	0,03650	0,03650	0,03650
23:00	0,06193	0,04951	0,05546	0,04672	0,04497	0,05463	0,02485	0,02749	0,02989	0,03525	0,03525	0,03525	0,03525
SOMATÓRIO	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000

Fonte: Autor (2021)

Tabela 4.7 – Demanda Média (kW) por Trecho

Trecho de Chave	B1					Acima de 1000kWh	B2		B3			A4	
	Até 100kWh	101-220kWh	221-500kWh	501-1000kWh	501-1000kWh		Até 300kWh	Até 500kWh	501-2000kWh	2001-5000kWh	Até 50kWh	150-300kWh	
711	6,4861	37,1125	27,3472	2,3847	6,0667	0,0000	0,2583	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	21,2111	
2046	1,7597	10,2528	5,5000	1,6264	0,0000	0,0000	0,8458	0,0000	0,0000	0,0000	6,7778	0,0000	
87	4,2431	10,9694	2,4639	0,0000	0,0000	1,1028	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	
88	2,8139	7,2000	2,9694	0,8417	0,0000	0,4514	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	
1040	6,4514	15,3111	3,5333	0,0000	0,0000	1,9667	1,3417	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	
2220	2,1042	8,0278	5,1972	0,9750	0,0000	0,0000	0,3597	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	
2210	12,5958	35,2306	13,7194	0,7306	0,0000	0,3944	0,3833	1,6667	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	
2215	6,5514	16,8528	9,0319	0,0000	1,6681	0,0000	0,5958	1,1319	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	
2225	1,2514	9,4569	8,5042	2,7528	0,0000	0,0000	0,7667	4,0361	7,6319	0,0000	0,0000	47,7819	
2205	4,5653	24,7611	17,0667	1,5111	0,0000	0,0000	0,7042	0,0000	3,4861	0,0000	0,0000	0,0000	
2206	2,4292	15,3042	14,9458	3,1194	0,0000	0,0000	0,9083	3,1194	3,1375	0,0000	0,0000	0,0000	

Fonte: Autor (2021)

Tabela 4.8 – Demanda Média Horária por Trecho de Seccionamento

HORA	CF 711	CF 2046	CF 87	CF 88	CF 1040	CF 2220	CF 2210	CF 2215	CF 2225	CF 2205	CF 2206
00:00	3,888411	0,999962	0,757492	0,583196	1,127538	0,682824	2,604487	1,434852	2,566187	2,08951	1,669615
01:00	3,496618	0,89982	0,662805	0,50952	0,985364	0,599404	2,290176	1,266523	2,357846	1,834704	1,455804
02:00	3,269413	0,838844	0,601905	0,464141	0,895318	0,550589	2,098877	1,167343	2,267177	1,689798	1,341628
03:00	3,009598	0,77787	0,536452	0,417612	0,80017	0,496966	1,878423	1,047699	2,198264	1,524636	1,221851
04:00	2,78737	0,726204	0,499328	0,384386	0,745731	0,451489	1,726718	0,959448	2,133215	1,386982	1,108727
05:00	2,660251	0,701027	0,481815	0,370214	0,720029	0,429963	1,659324	0,916898	2,093245	1,312122	1,047835
06:00	2,727579	0,715667	0,519181	0,390617	0,775085	0,446012	1,757564	0,966219	2,075661	1,357114	1,066602
07:00	3,104847	0,805642	0,63526	0,479141	0,944581	0,549654	2,174625	1,188662	2,079374	1,678358	1,318772
08:00	3,851441	1,033593	0,674125	0,520625	1,008859	0,608313	2,346176	1,287607	3,423945	1,905935	1,556872
09:00	4,209847	1,167153	0,665608	0,515969	1,037705	0,610313	2,362351	1,32434	4,403431	1,931485	1,683672
10:00	4,276039	1,178263	0,688391	0,524659	1,104744	0,612779	2,372552	1,352871	4,583701	1,953313	1,760709
11:00	4,534052	1,243458	0,764202	0,572554	1,224392	0,654382	2,54448	1,442541	4,816886	2,097248	1,881578
12:00	4,718863	1,284856	0,815044	0,621144	1,280053	0,721196	2,763773	1,548934	4,593197	2,296167	2,005616
13:00	4,34383	1,135018	0,855961	0,645801	1,305319	0,74003	2,852545	1,576954	3,316104	2,322761	1,911998
14:00	4,345539	1,177963	0,704994	0,549523	1,096425	0,655354	2,483227	1,400051	4,232921	2,092591	1,80033
15:00	4,537377	1,261282	0,704875	0,548457	1,12359	0,661668	2,530142	1,435481	4,823493	2,13665	1,909364
16:00	4,474317	1,254653	0,704927	0,542606	1,130441	0,652004	2,513179	1,420044	4,828324	2,114451	1,886101
17:00	4,42033	1,228014	0,715671	0,551973	1,141913	0,660063	2,5692	1,45508	4,715718	2,158714	1,929995
18:00	4,598603	1,21648	0,925053	0,699648	1,431116	0,825155	3,24101	1,801273	3,482276	2,648806	2,245265
19:00	5,235272	1,35257	1,183542	0,871277	1,772539	0,989363	3,970111	2,146913	3,217262	3,089055	2,437815
20:00	5,774315	1,49211	1,235799	0,919825	1,834982	1,059216	4,221457	2,287296	3,655689	3,267814	2,543129
21:00	6,013596	1,561821	1,309161	0,968068	1,942306	1,113353	4,436756	2,387898	3,60323	3,404551	2,611405
22:00	5,694734	1,452628	1,134792	0,866009	1,681606	1,023277	3,927351	2,154995	3,526026	3,154138	2,484829
23:00	4,894423	1,257604	1,002783	0,759423	1,494359	0,870523	3,39633	1,86202	3,188772	2,647543	2,084957

Fonte: Autor (2021)

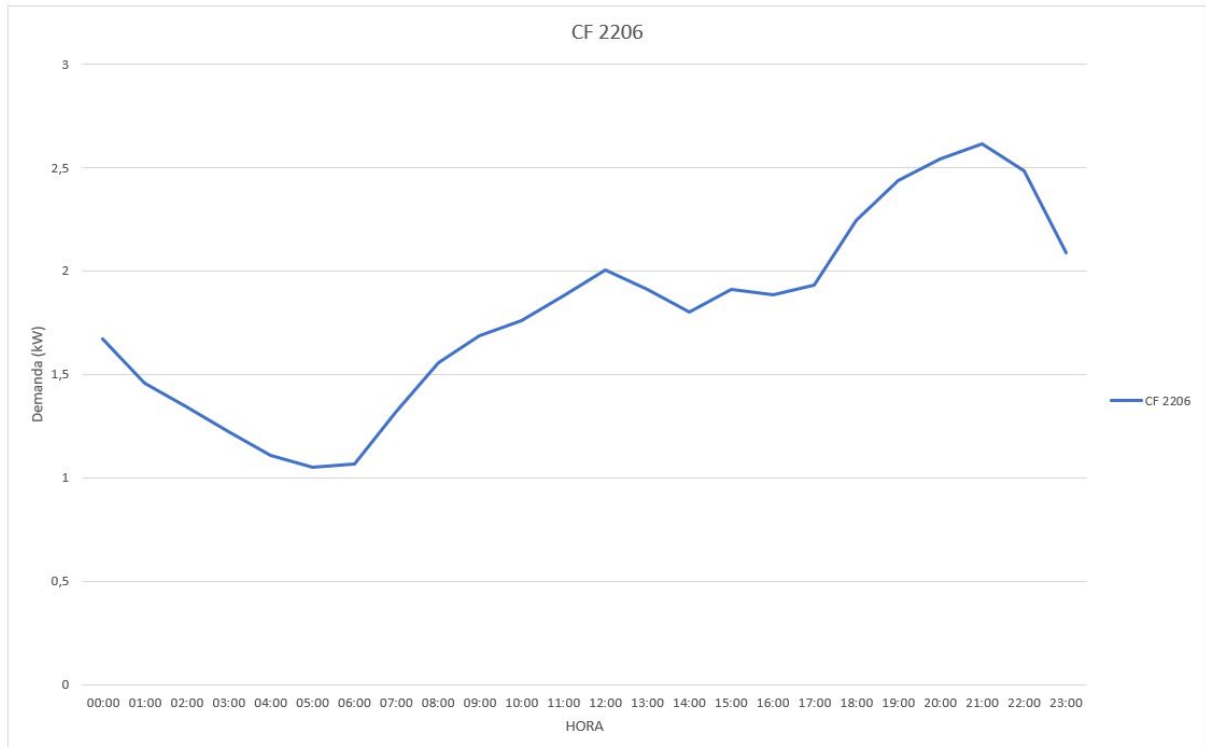
4.3 RESULTADOS

Após aplicada a metodologia, pode-se obter graficamente as curvas de carga por trecho de seccionamento, utilizando os dados gerados na Tabela 4.8. Para construção dessas curvas, deve-se levar em consideração a topologia do alimentador apresentada anteriormente na Figura 4.3, pois para obter a curva de carga para uma determinada chave de trecho, deve-se analisar se a mesma possui outras chaves a jusante. Se a resposta for sim, as demandas médias horárias das chaves a jusante devem ser somadas para gerar a curva de carga de interesse. A seguir, serão apresentadas as curvas de carga de cada trecho do alimentador AL-314.

4.3.1 Trecho da CF-2206

A chave-fusível 2206 não possui nenhuma chave a jusante, pois seu trecho de seccionamento acaba em um final de rede. A curva de carga típica para esse trecho de chave é apresentada no Gráfico 4.10.

Gráfico 4.10 – Curva de carga típica do trecho CF-2206.

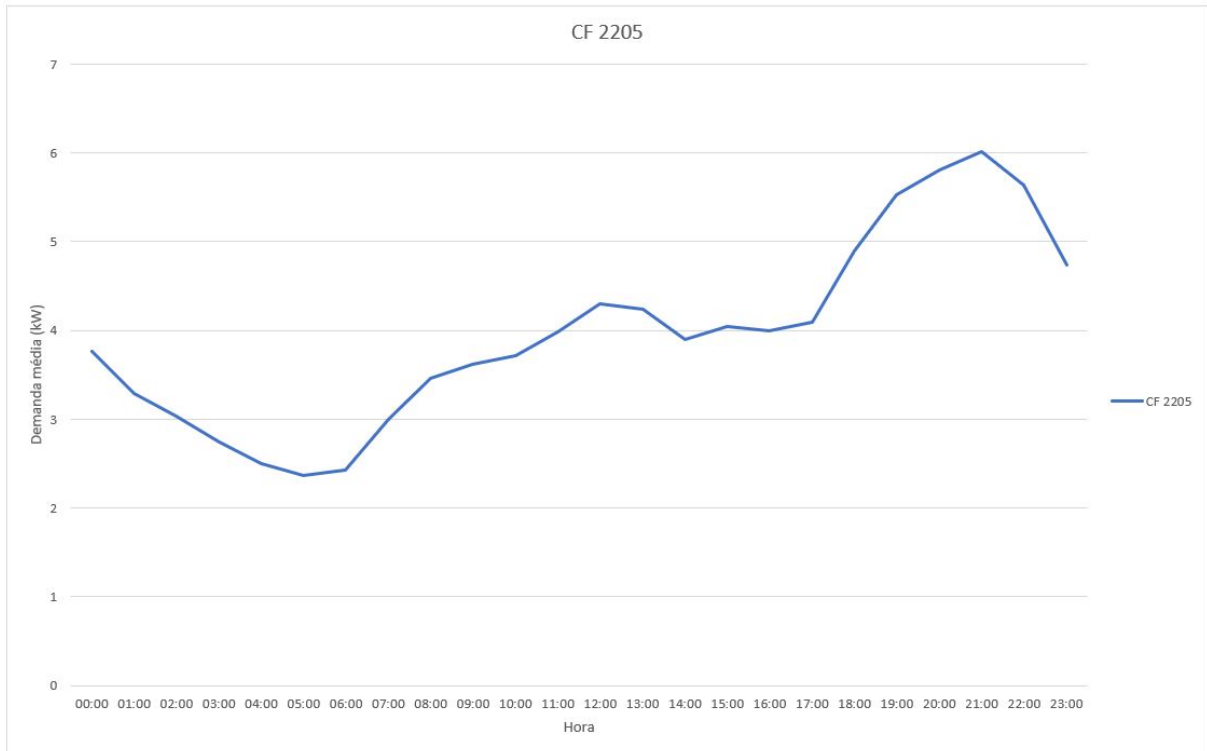


Fonte: Autor (2021).

4.3.2 Trecho da CF-2205

A chave-fusível 2205 é uma chave de trecho a montante da CF-2206. Então, para construir sua curva de carga típica é necessário somar as demandas médias horárias do próprio trecho com o trecho a jusante. A curva típica para essa chave de seccionamento é apresentada no Gráfico 4.11.

Gráfico 4.11 – Curva de carga típica acumulada no trecho CF-2205.

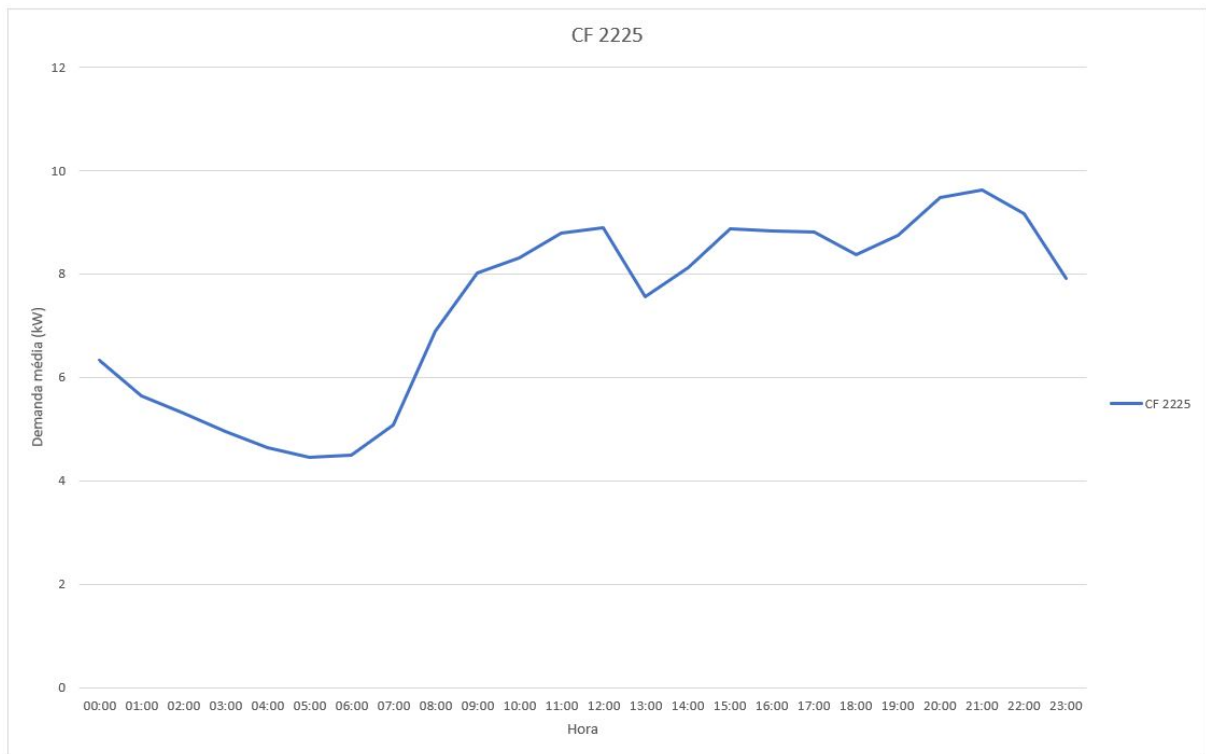


Fonte: Autor (2021).

4.3.3 Trecho da CF-2225

A chave-fusível 2225 é uma chave de trecho a montante da CF-2205. Então, assim como o processo feito na chave analisada anteriormente, é preciso somar a demanda do próprio trecho com a demanda das chaves a jusante. A curva típica para essa chave de seccionamento é apresentada no Gráfico 4.12.

Gráfico 4.12 – Curva de carga típica acumulada no trecho CF-2225.

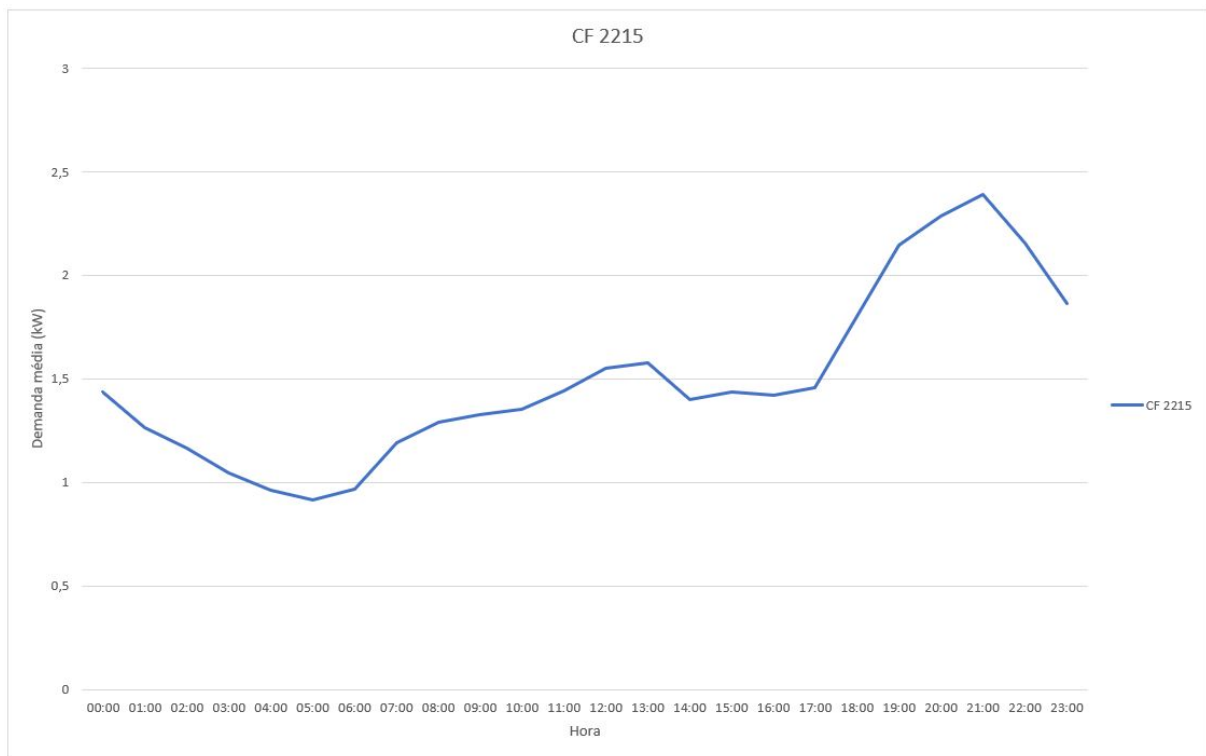


Fonte: Autor (2021).

4.3.4 Trecho da CF-2215

A chave-fusível 2215 é a chave responsável por um trecho de fim de rede, e então não possui nenhuma chave a jusante. A curva de carga típica para esse trecho de chave é apresentada no Gráfico 4.13.

Gráfico 4.13 – Curva de carga típica no trecho CF-2215.

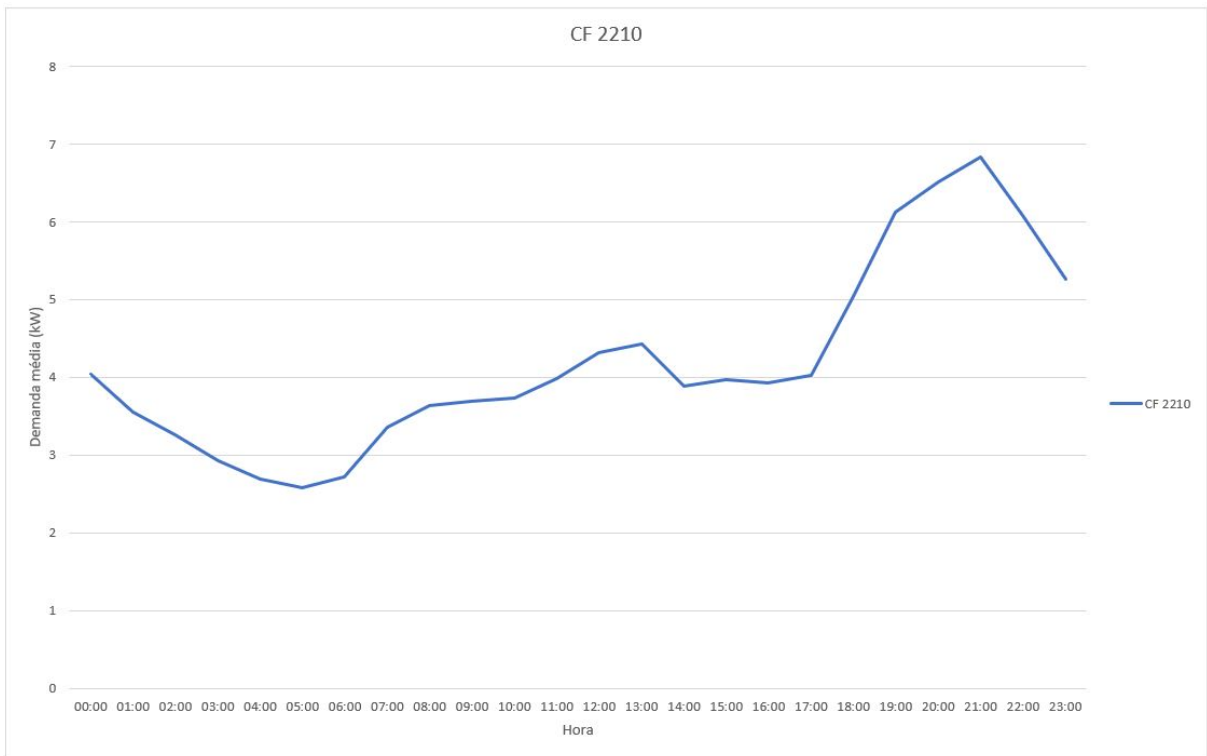


Fonte: Autor (2021).

4.3.5 Trecho da CF-2210

A chave-fusível 2210 é uma chave de trecho a montante da CF-2215. Para gerar a curva de carga desse trecho deve ser somada a demanda do trecho com a demanda a jusante (CF-2215). A curva de carga obtida pode ser visualizada no Gráfico 4.14.

Gráfico 4.14 – Curva de carga típica acumulada no trecho CF-2210.

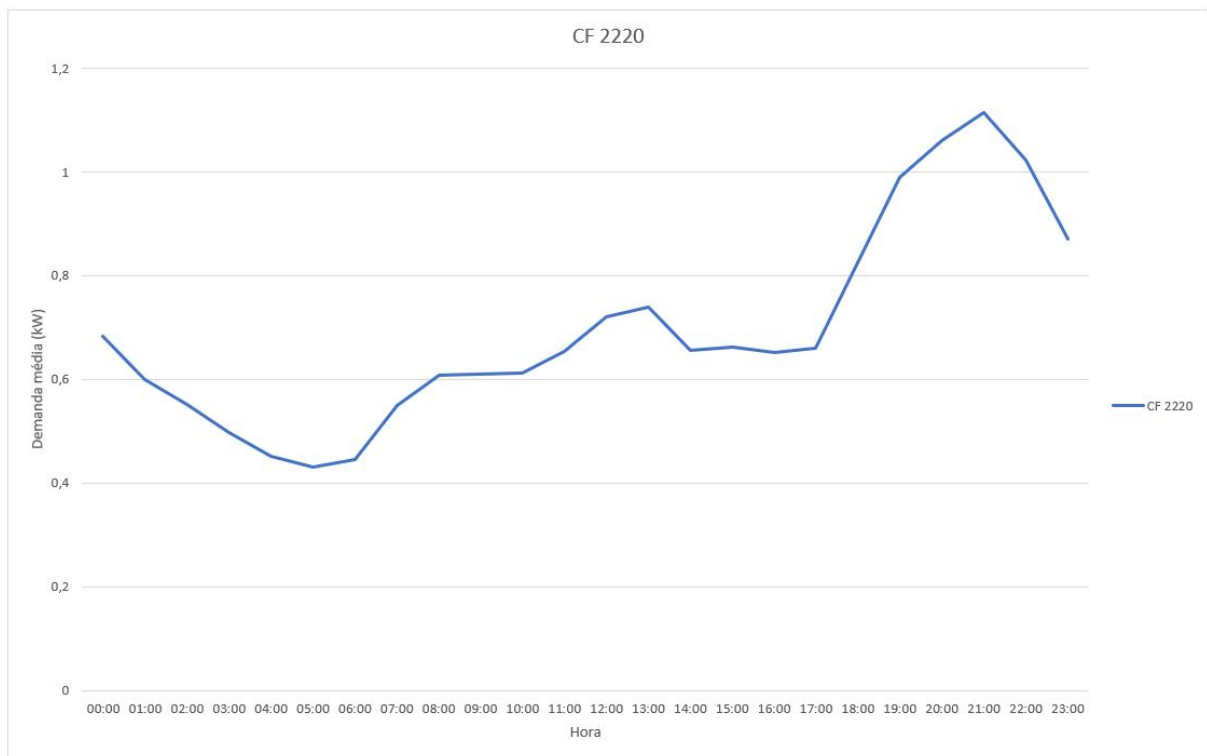


Fonte: Autor (2021).

4.3.6 Trecho da CF-2220

A chave-fusível 2220 também é uma chave de um trecho de fim de rede, logo não possui nenhuma chave a jusante. A curva de carga típica dessa chave é demonstrada no Gráfico 4.15.

Gráfico 4.15 – Curva de carga típica no trecho CF-2220.

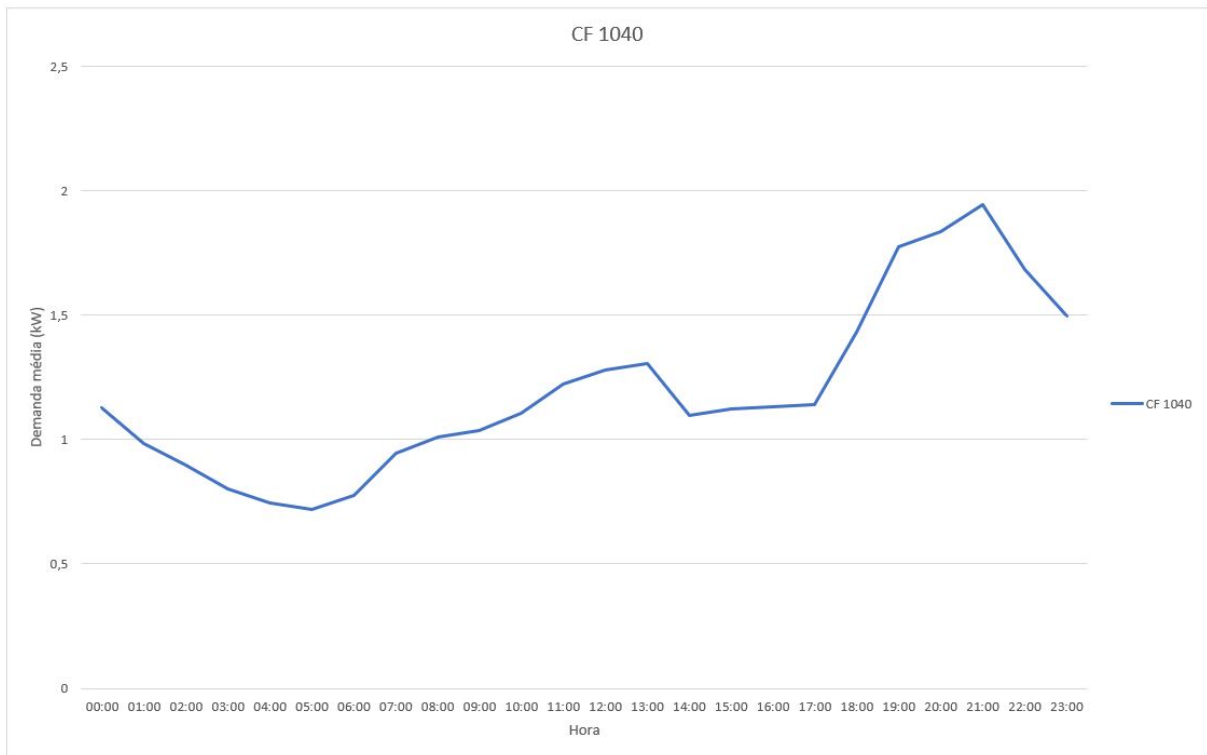


Fonte: Autor (2021).

4.3.7 Trecho da CF-1040

A chave-fusível 1040 não possui nenhuma chave a jusante, pois seu trecho é outra ramificação que resulta em final de rede. Sua curva de carga típica é apresentada no Gráfico 4.16.

Gráfico 4.16 – Curva de carga típica no trecho CF-1040.



Fonte: Autor (2021).

4.3.8 Trecho da CF-88

A chave-fusível 88 não possui nenhuma chave a jusante, pois é uma ramificação paralela com a CF-1040 que também resulta em um fim de rede MT. O Gráfico 4.17 apresenta a curva de carga típica dessa chave.

Gráfico 4.17 – Curva de carga típica no trecho CF-88.

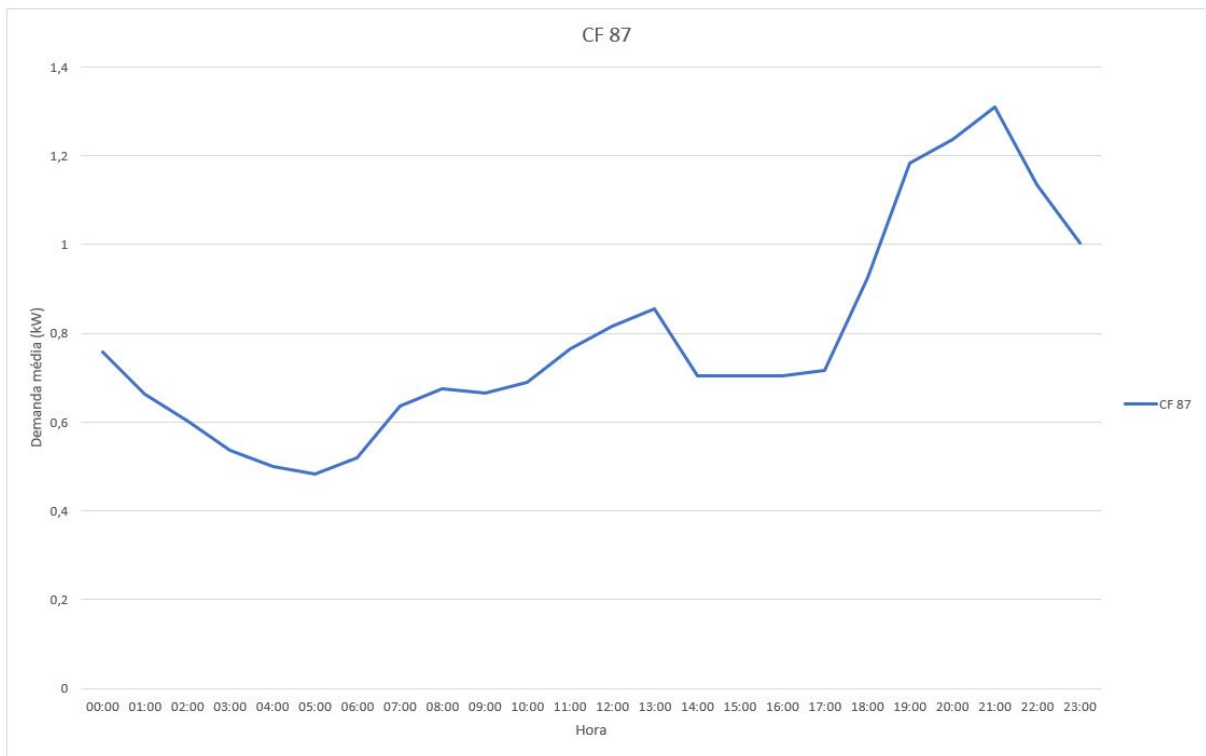


Fonte: Autor (2021).

4.3.9 Trecho da CF-87

A chave-fusível 87 é outra chave de um trecho final de rede, pois é uma ramificação paralela com as CF-88 e CF-1040. O Gráfico 4.18 apresenta a curva de carga típica dessa chave.

Gráfico 4.18 – Curva de carga típica no trecho CF-87.

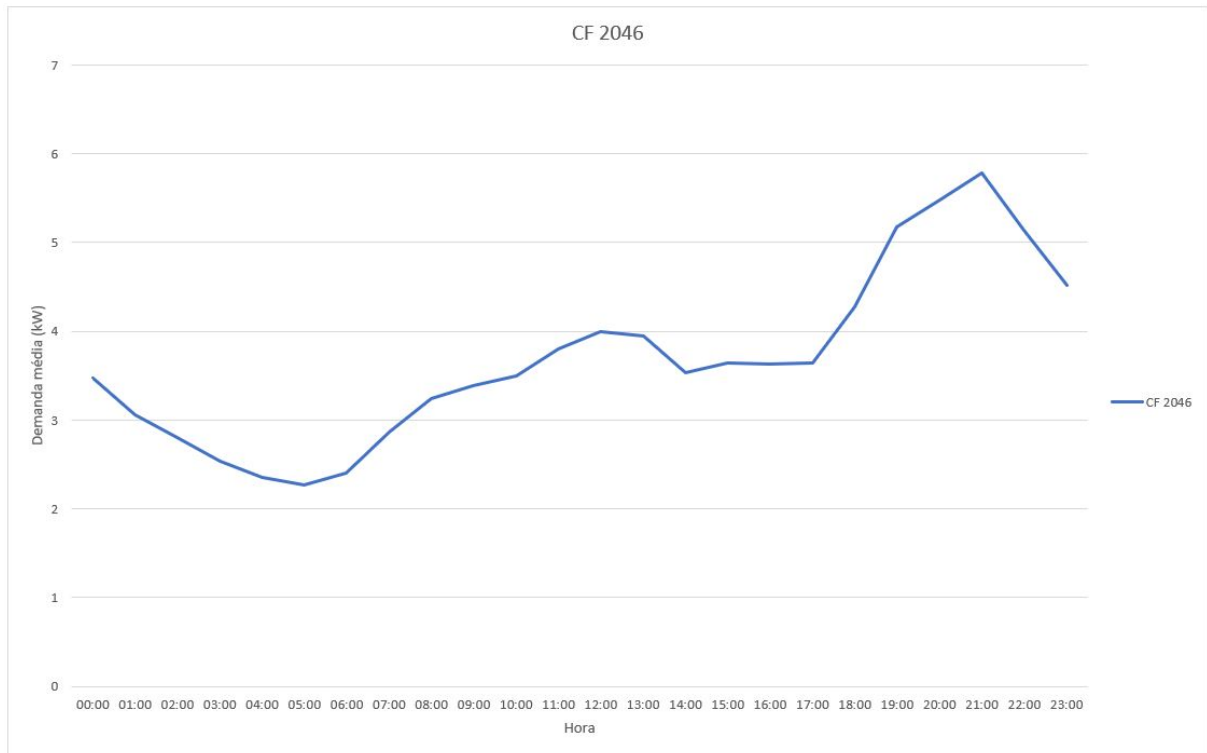


Fonte: Autor (2021).

4.3.10 Trecho da CF-2046

A chave-fusível 2046 é uma chave de trecho a montante das chaves CF-1040, CF-88 e CF-87. Para gerar a curva de carga desse trecho devem ser somadas a demanda do trecho com as demandas das chaves a jusante. A curva de carga obtida pode ser visualizada no Gráfico 4.19.

Gráfico 4.19 – Curva de carga típica acumulada no trecho CF-2046.

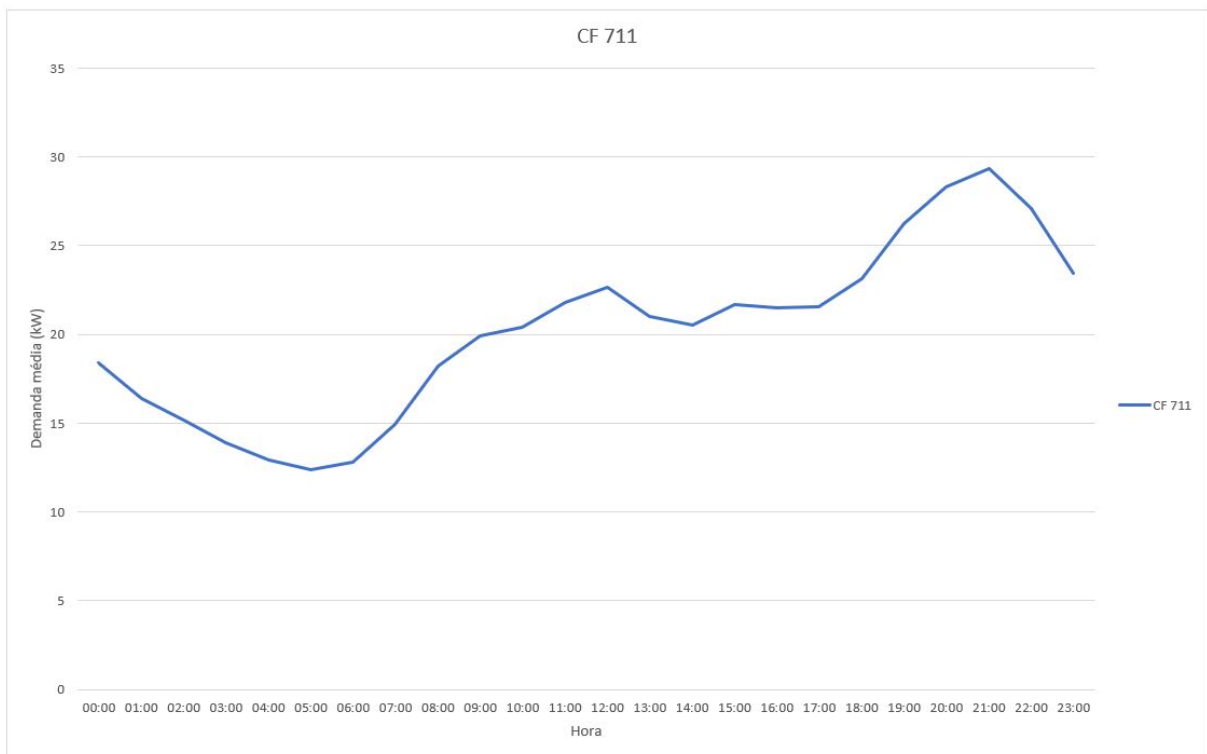


Fonte: Autor (2021).

4.3.11 Trecho da CF-711

Diferentemente das demais, a CF-711 é uma chave do tipo faca. Essa chave está localizada logo após a saída da subestação e não possui nenhuma chave a montante. Seu desligamento implica no desligamento total do alimentador, logo a curva de carga típica dessa chave é a soma de todas as curvas de trecho. O Gráfico 4.20 apresenta a curva de carga típica da CF-711/AL-314.

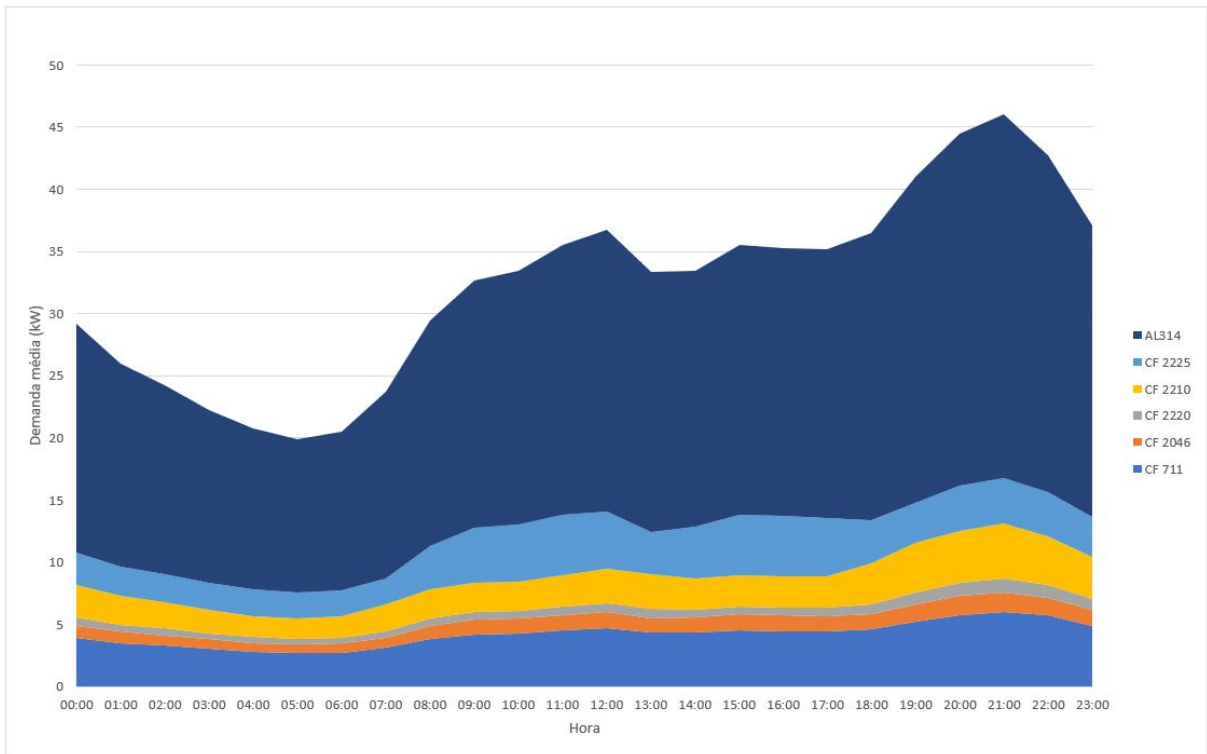
Gráfico 4.20 – Curva de carga típica acumulada no trecho CF-711.



Fonte: Autor (2021).

No Gráfico 4.21 pode-se visualizar novamente a curva de carga geral obtida para o AL-314, desta vez apresentando também no mesmo gráfico as componentes dos outros trechos de chave que são somadas para formar essa curva.

Gráfico 4.21 – Curva de carga típica no AL-314 e suas componentes.



Fonte: Autor (2021).

5 CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo avaliar a aplicação de uma metodologia para modelar a curva de carga em trechos de alimentadores de distribuição. Como o método consiste na utilização de técnicas de mineração de dados combinadas com o uso de curvas típicas para modelar a curva de carga de um grupo de consumidores, é necessário que a concessionária de energia atualize constantemente seu banco de dados, para uma melhor otimização dos resultados.

Nesse contexto, os resultados obtidos após aplicação da metodologia proposta se mostraram satisfatórios, visto que conseguiu-se plotar as curvas de carga de interesse com o método utilizado. As curvas de carga obtidas nos gráficos por trecho de seccionamento da seção anterior se mostraram bem próximas da forma das curvas típicas de consumidores residenciais utilizadas no modelo. Essa forma de curva, com consumo baixo durante a noite, estável durante o dia e com um pico de carga durante o final do dia, já era em partes esperada, pois 77% de toda energia consumida no alimentador é solicitada por clientes do subgrupo B1. A única curva de carga que ficou similar a uma forma típica comercial/industrial foi visualizada no trecho da CF-2225, justamente onde está concentrado o maior consumo por clientes dos subgrupos B3 e A4.

Por fim, destaca-se a validade do modelo, pois com ele pode-se obter e analisar curvas de cargas para trechos específicos em um alimentador de distribuição e assim, obter um melhor planejamento operacional do sistema, pois tem-se uma estimativa da demanda horária solicitada por cada trecho de rede. Ainda, vale ressaltar que um aspecto negativo na utilização desse modelo é não levar em consideração as perdas técnicas e não técnicas existentes nas redes de distribuição para a modelagem da curva de carga dos trechos do alimentador.

5.1 TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão de futuros trabalhos a serem desenvolvidos com a utilização desta metodologia ou outra similar, pode-se citar:

- Incrementação do cálculo de erro percentual absoluto na curva gerada e estimativas de perdas, em comparação com a memória de massa da demanda do alimentador registrada na subestação;
- Verificação dos efeitos de uma possível reconfiguração de rede, com transferência de carga de uns dos trechos do alimentador estudado para um alimentador vizinho,

afim de manter o abastecimento de parte da rede em algum caso de contingência, onde o defeito não se situa no trecho realocado;

- Aplicação de um método de previsão de carga por trecho de alimentador de distribuição, utilizando como uma das entradas as curvas de carga características dos trechos, modeladas nesse trabalho;
- Comparação do modelo utilizado neste trabalho com outros métodos existentes para modelagem de curvas em trechos de alimentadores de distribuição.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. **PRODIST Módulo 1 - Introdução aos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica.** Brasília, 2018. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/documents/656827/14866914/Módulo1_Revisão10/f6c63d9a-62e9-af35-591e-5fb020b84c13>

_____. **PRODIST Módulo 2 - Planejamento da Expansão do Sistema de Distribuição.** Brasília, 2016. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/documents/656827/14866914/Módulo2_Revisão7.pdf/c1cf5bd8-b2bc-4d57-9b42-285a7fd8c2a5>

_____. **PRODIST Módulo 4 - Procedimentos Operativos do Sistema de Distribuição.** Brasília, 2010. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/arquivos/PDF/Modulo4_Revisao_1.pdf>

_____. **PRORET Módulo 7 Estrutura Tarifária das Concessionárias de Distribuição de Energia Elétrica - Submódulo 7.1 Procedimentos Gerais.** Brasília, 2021. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/aren2021912_Proret_Submod_7_1_V2.5.pdf>

_____. **Resolução Normativa n. 414/2010.** Brasília, 2010. Disponível em: <<https://www.aneel.gov.br/documents/656877/14486448/bren2010414.pdf/3bd33297-26f9-4ddf-94c3-f01d76d6f14a?Version=1.0>>

BERNARDON, D. P. et al. **Sistemas de distribuição no contexto das redes elétricas inteligentes: uma abordagem para reconfiguração de redes.** 163p. 1. ed. Santa Maria: AGEPOC, 2015.

BERNARDON, D. P. **Desenvolvimento de Algoritmos e Sistema Computacional para Estimação de Estados em Redes de Distribuição.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2004.

COTRIM, A. A. M. B. **Instalações Elétricas.** 5. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2009.

DEPARTAMENTO MUNICIPAL DE ENERGIA DE IJUÍ - DEMEI, **Institucional.** Disponível em: <<https://www.demei.com.br/site/home/pagina/id/139/?Institucional.html>> Acesso em: 16 ago. 2021.

DEPARTAMENTO MUNICIPAL DE ENERGIA DE IJUÍ - DEMEI, **Relatório campanha de Medidas e Caracterização da Carga - 4CRTP**, Ijuí, 2017.

GONEN, T. **Electric Power Distribution Engineering**. 3. ed. Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2014.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Panorama -Ijuí**. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rs/ijui/panorama>> Acesso em: 30 ago. 2021.

KAGAN, N. **Introdução aos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica**. 2ª. ed. São Paulo: Blucher, 2000.

KERSTING, W. H. **Distribution System Modeling and Analysis**. CRC Press, USA, 2002.

MUNICÍPIO DE IJUÍ. **A Cidade - Geografia**. Disponível em: <<https://www.ijui.rs.gov.br/pagina/4/geografia>> Acesso em: 27 ago. 2021.

MUNICÍPIO DE IJUÍ. **A Cidade - Localização**. Disponível em: <<https://www.ijui.rs.gov.br/pagina/7/localizacao>> Acesso em: 27 ago. 2021.

NEOENERGIA ELEKTRO. **Critérios para Elaboração de Projeto de Rede de Distribuição Aérea**. São Paulo, 2020. Disponível em: <https://www.neoenergiaelektro.com.br/Media/Default/normas-tecnicas/DIS-NOR-012-01-Criterios-para-Elaboracao-de-Projeto-de-Rede-de-Distribuicao-Aerea_REV01.pdf>

OLIVEIRA, L. A. A. DE. **Tratamento de dados de curvas de carga via análise de agrupamentos e transformada wavelets**. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, p. 74, 2013.

PAULA, G.M.F. **Curvas típicas de carga para o planejamento operacional do sistema de distribuição**. 166 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2006.

PFITSCHER, L. **Reconfiguração automática das redes de energia elétrica com monitoramento em tempo real**. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) Universidade Federal de Santa Maria - UFSM, Santa Maria, p. 146, 2013.

SAUSEN, J. P.; DA ROSA ABAIDE, A. Residential Charging Scheduling of Electric Vehicles in Brazilian Context. **IEEE Latin America Transactions**, v. 19, n. 10, p. 16241631, 2021.