



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
Campus de Ilha Solteira

LEONARDO FONTOLAN

**DETERMINAÇÃO DA LATÊNCIA DE TRANSMISSÃO EM DUAS ARQUITETURAS
DE INTERNET DAS COISAS NA DIGITALIZAÇÃO DAS REDES DE
DISTRIBUIÇÃO**

Ilha Solteira

2023



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
Campus de Ilha Solteira

LEONARDO FONTOLAN

**DETERMINAÇÃO DA LATÊNCIA DE TRANSMISSÃO EM DUAS ARQUITETURAS
DE INTERNET DAS COISAS NA DIGITALIZAÇÃO DAS REDES DE DISTRIBUIÇÃO**

Trabalho de Graduação apresentado à
Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira –
Unesp como parte dos requisitos para obtenção
do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof Dr. Jonatas Boas Leite

Ilha Solteira
2023

FICHA CATALOGRÁFICA
Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e
Documentação

Fontolan, Leonardo.

F677d Determinação da latência de transmissão em duas arquiteturas de internet
das coisas na digitalização das redes de distribuição / Leonardo Fontolan. -- Ilha
Solteira: [s.n.], 2023

47 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Elétrica) -
Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2023

Orientador: Jonas Boas Leite

Inclui bibliografia


Raiane da Silva Santos

Supervisora Técnica de Seção
Seção Técnica de Referência, Atendimento ao usuário e Documentação
Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação
CRB/8 - 9999

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE GRADUAÇÃO

Aos onze dias do mês de julho do ano de dois mil e vinte e três, o discente **Leonardo Fontolano**, matriculado sob o nº 162053908, tendo como banca examinadora o seu orientador, o *Prof. Dr. Jonatas Boas Leite*, o Prof. Dr. Carlos Antônio Alves e o *Doutorando Wilson Enrique Chumbi Quito*, apresentou o Trabalho de Graduação intitulado "**Determinação da Latência de Transmissão em duas Arquiteturas de Internet das Coisas na Digitalização das Redes de Distribuição**", obtendo a nota 10,0 (DEZ) e conceito APROVADO.



Prof. Dr. Jonatas Boas Leite

- Orientador -



Leonardo Fontolan

- Discente -



Prof. Dr. Carlos Antônio Alves

- Membro da Banca -



Doutorando. Wilson Enrique Chumbi Quito

- Membro da Banca -

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a todas as pessoas que, de alguma forma, contribuíram para meu crescimento pessoal e profissional, em especial meus pais, minha irmã e meus colegas de trabalho.

RESUMO

As redes elétricas tradicionais estão sendo transformadas em redes inteligentes (RIs) para resolver problemas existentes devido ao fluxo de informações unidirecional, perda de energia, demanda crescente, confiabilidade e segurança. As RIs possibilitam fluxo de energia bidirecional entre fornecedores de serviços e consumidores, através de sistemas de geração, transmissão e distribuição. As RIs utilizam vários dispositivos para monitoramento, análise e controle da rede, implantados em usinas, centros de distribuição e em um número muito grande nas instalações das unidades consumidoras. Portanto, uma RI exige conectividade, automação e rastreamento de tais dispositivos. Isso é obtido com o auxílio do ambiente de Internet das Coisas (IdC). A IdC auxilia as RIs no suporte das várias funções de automação da rede incorporando dispositivos com tecnologia embarcada tais como sensores, atuadores e medidores inteligentes. Neste trabalho, assume-se a plataforma de IdC como o ambiente habilitador à digitalização das redes de distribuição de energia elétrica. Devido à elevada quantidade de pontos automatizados relativamente distantes das centrais de operação, a latência dos canais de comunicação da plataforma de IdC representa uma métrica importante de desempenho operacional. As latências de transmissão de duas arquiteturas de IdC, convencional e multicamadas, devem ser obtidas e comparadas para determinar a melhor arquitetura.

Palavras-chave: Redes Inteligentes; Internet das Coisas; arquitetura em múltiplas camadas; latência de transmissão.

ABSTRACT

The traditional electrical grids have been transformed into the new smart grids to solve existing problems due to the unidirectional flow of information, energy loss, increasing power demand, safety and reliability. The smart grids allow a bidirectional flow of energy between consumers and service providers through generation, transmission and distribution systems. Smart grids use several monitoring devices to analyze and control the network, set up on different power plants, distribution centers and on a large number of consumption unit installations. Therefore, a smart grid requires high connectivity, automation and tracking of such important devices. This is obtained with the support of the internet of things (IoT). The IoT supports the smart grids on multiple networks automating functions, upgrading technological devices such as sensors and smart measures. On this work, it is assumed the IoT platform as the main enabling environment to digitalization of the power grids. Due to the high amount of automated locations relatively far from the operational base centers, the communication channel latency of the IoT platform represents a very important measure of operational performance. The transmission latency of two IoT architectures, conventional and multilayer, must be developed and obtained to compare and determine the best architecture.

Key-words: Smart Grids; Internet of Things; multilayer architecture; transmission latency.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	- Representação de Grafo.....	13
Figura 2	- Matriz de adjacência de um grafo com 5 vértices.....	15
Figura 3	- Sistema elétrico de potência	15
Figura 4	- Sistema de transmissão elétrica no Brasil.....	17
Figura 5	- Rede de energia elétrica.....	17
Figura 6	- Topologia de rede com seis barras.....	18
Figura 7	- Mudanças com implementação de smart grid.....	19
Figura 8	- Arquitetura convencional IoT.....	20
Figura 9	- Conexão de clientes MQTT usando a arquitetura multicamadas da IdC com mensagens baseadas no padrão IEC 61968-100.....	21
Figura 10	- Diagrama de classes do modelo de dados para redes de distribuição	24
Figura 11	- Clusterização de dados exemplo 1	26
Figura 12	- Clusterização de dados exemplo 2	26
Figura 13	- Trajeto dos dados para arquiteturas convencional e multicamadas	27
Figura 14	- Redução do intervalo de incerteza pelo método da bisseção.....	29
Figura 15	- Topologia do sistema teste de 136 barras radial	31
Figura 16	- Clusterização do sistema teste de 136 barras radial	33

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	- Posições mínima e máxima nos eixos X e Y, e posição do broker principal.....	32
Tabela 2	- Número ideal de clusters, posições de cada cluster e número de barras em cada cluster	33
Tabela 3	- Somatório das distâncias entre Barras e Barra Raiz	34
Tabela 4	- Distâncias entre as barras e o centroide de cada cluster, e entre a barra raiz e os centroides.....	35
Tabela 5	- Latência média de cada barra para seus respectivos clusters	36
Tabela 6	- Latências para ambas as arquiteturas	36

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
IoT	<i>Internet of Things</i>
IdC	Internet das coisas
MQTT	<i>Message Queuing Telemetry Transport</i>
M2M	<i>Machine To Machine</i>
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
RI	Redes inteligentes
SG	<i>Smart Grid</i>

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
1.1 OBJETIVOS	13
1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	14
2. O SISTEMA ELÉTRICO E A PLATAFORMA IdC	15
2.1 Teoria dos Grafos.....	15
2.2 Sistema Elétrico de Potência.....	17
2.2.1 Unidades de Geração.....	18
2.2.2 Redes de Transmissão.....	18
2.2.3 Redes de Distribuição	19
2.2.4 Topologia de Rede de Distribuição.....	20
2.3 Redes Inteligentes.....	21
2.3.1 Internet das Coisas (IdC).....	22
2.3.2 Protocolo MQTT	23
3. FORMAÇÃO DA ARQUITETURA MULTICAMADAS.....	25
3.1 Estrutura de Dados para Redes de Distribuição	25
3.2 Algoritmo K-means.....	27
3.2.1 Latência de Transmissão	30
3.3 Método da Bissecção	31
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	33
5. CONCLUSÃO.....	40
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	41

1. INTRODUÇÃO

No sistema de potência, a energia elétrica flui apenas em uma direção, ou seja, de um fornecedor de energia para os consumidores. Na geração de energia, um grande número de usinas geram energia elétrica. Na transmissão, a eletricidade é transmitida de usinas para centros de carga remotos por meio de linhas de transmissão de alta tensão. Na distribuição, os alimentadores entregam energia elétrica aos consumidores finais em tensão reduzida. Cada rede é controlada e monitorada centralmente para garantir que as unidades de geração produzam energia elétrica de acordo com as necessidades dos consumidores dentro das restrições dos sistemas de potência.

O sistema de energia elétrica tradicional funcionou muito bem desde sua criação em 1870 até 1970 (COLLIER, 2017), quando a demanda dos consumidores por energia era bastante previsível. No entanto, desde de 1970, tem havido uma mudança dramática na natureza do consumo de energia elétrica, pois a carga de dispositivos eletrônicos tornou-se o elemento de rápido crescimento na demanda total e novas fontes de alto consumo de eletricidade vem sendo desenvolvidas, como os veículos elétricos. (VEs) (DENG et al., 2015). Além disso, na atualidade, as redes de energia enfrentam outros desafios, incluindo a crescente exigência por confiabilidade e segurança, fontes de energia renováveis emergentes e problemas de infraestrutura obsoletos.

Para solucionar esses desafios, o paradigma das redes inteligentes (RI) surgiu como uma solução promissora com uma variedade de tecnologias de informação e comunicação. Tais tecnologias podem melhorar a eficácia, eficiência, confiabilidade, segurança, sustentabilidade, estabilidade e escalabilidade da rede elétrica tradicional. A RI difere das redes elétricas tradicionais em muitos aspectos. Por exemplo, RI oferece um fluxo de comunicação bidirecional entre fornecedores de eletricidade e unidades consumidoras. A RI possui uma infraestrutura de medição avançada (IMA), medidores inteligentes, tolerância a falhas, detecção de uso não autorizado e balanceamento de carga, bem como *self-healing*, ou seja, detecção e restauração automática de falhas (BUSH, 2014).

A RI depende de vários tipos de dispositivos para monitorar, analisar e controlar a rede. Tais dispositivos de monitoramento são instalados em usinas de energia, linhas de transmissão, torres de transmissão, centros de distribuição e unidades consumidoras, e seus números chegam a centenas de milhões ou até bilhões. Na RI, a conectividade,

automação e rastreamento de um número tão grande de dispositivos, exige monitoramento, análise e controle distribuídos por meio de comunicação digital de alta velocidade, onipresente e bidirecional. Isso já está sendo realizado em outras aplicações por meio da tecnologia da Internet das Coisas (IdC). A IdC é definida como uma rede que pode conectar qualquer objeto com a Internet com base em um protocolo para troca de informações e comunicação entre vários dispositivos inteligentes (WANG, et al., 2014).

Inicialmente, a Internet serviu como um meio de conectividade de pessoas para pessoas e pessoas para coisas (COLLIER, 2017). No entanto, em 2008, o número de coisas conectadas à Internet ultrapassou o número de pessoas no mundo. A IdC é uma rede de objetos físicos, ou coisas conectadas à Internet. Tais objetos são equipados com tecnologia embarcada para interagir com seus ambientes internos e externos. Esses objetos detectam, analisam, controlam e decidem individualmente ou em colaboração com outros objetos por meio de comunicações digitais bidirecionais de alta velocidade de maneira distribuída, autônoma e onipresente. Isso é exatamente o que é necessário às RIs (MENG, et al., 2014).

A RI é considerada uma das maiores aplicações da IdC. Hoje, embora muitos dispositivos domésticos que usam eletricidade estejam conectados à Internet, ainda existe um grande número de dispositivos domésticos que não estão conectados. Por exemplo, em todo o mundo, o número de fornos de micro-ondas e máquinas de lavar conectados à Internet é muito menor do que os que não estão conectados. Essencialmente, tudo o que usa eletricidade poderia ser mais útil conectando-o à Internet, pois podem ser operados remotamente e fora dos horários de pico, economizando custos, bem como proporcionar conforto ao ser humano através da automação. Ao tornar a tecnologia IdC um padrão global para as comunicações e a base para RI, novas oportunidades surgem para maximizar as perspectivas de futuras inovações.

1.1 OBJETIVOS

Este trabalho de graduação tem como objetivo principal fazer uma análise comparativa das arquiteturas convencional e multicamadas da IdC para viabilizar o monitoramento de informações críticas em sistemas de distribuição. Assumindo a central de operações como o local onde reside o *broker* MQTT principal e as barras de carga ao longo da topologia da rede de distribuição como sendo o local dos clientes IdC, é possível

calcular a latência de transmissão como um parâmetro de desempenho. Alternativamente, *brokers* remotos podem ser otimamente alocados abaixo da nuvem, formando a arquitetura multicamadas da IdC, de forma a possibilitar a minimização da latência de transmissão. Como objetivos específicos para possibilitar o cálculo das latências de transmissão nas redes de distribuição, são estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- ✓ Leitura e estruturação dos dados das redes de distribuição contendo as informações de posicionamento espacial de cada uma das barras;
- ✓ Implementar um algoritmo de agrupamento, particularmente o algoritmo K-means, que possibilita a formação da arquitetura IdC em multicamadas;
- ✓ Utilização de alguma técnica de otimização matemática para determinar a melhor quantidade de agrupamentos capaz de minimizar a latência de transmissão na arquitetura IdC em multicamadas.

1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Neste primeiro capítulo é realizada uma contextualização introdutória do tema desenvolvido neste trabalho de graduação com a especificação dos objetivos global e específicos. O restante do conteúdo desenvolvido neste trabalho de graduação é apresentado nos capítulos subsequentes.

No capítulo 2 são apresentados conceitos importantes da literatura especializada que auxiliam no entendimento mais profundo do tema deste trabalho e das técnicas desenvolvidas para solucionar o problema estudado.

No capítulo 3 é, inicialmente, apresentada a estrutura de dados para uma rede de distribuição genérica considerando seus principais componentes. O algoritmo k-means usado para formar agrupamentos de barra e o método da bisseção para determinar o número ideal de agrupamentos são também descritos neste capítulo.

Nos dois últimos capítulos, 4 e 5, é dado ênfase, primeiramente, nos resultados do caso de estudo, em que foram aplicados os métodos desenvolvidos para calcular a latência na arquitetura convencional e multicamadas da plataforma IdC, e, depois, são feitas as considerações finais sobre o trabalho desenvolvido.

2. O SISTEMA ELÉTRICO E A PLATAFORMA IdC

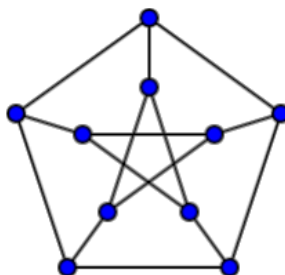
As redes de distribuição de energia elétrica no Brasil são estruturas comuns na engenharia de sistemas aplicadas à transformação de tensões provenientes do sistema de transmissão e ao fornecimento de energia elétrica ao consumidor final. O objetivo deste capítulo é abordar os modelos das redes de distribuição e desenvolvimento da estrutura de dados para as topologias das redes.

2.1 Teoria dos Grafos

A teoria dos grafos é um campo da matemática que estuda as relações entre objetos abstratos, chamados de vértices, por meio de linhas, chamadas de arestas, que os conectam. Um grafo é uma estrutura matemática composta por um conjunto de vértices e um conjunto de arestas que conectam os vértices. As arestas podem ter uma direção (grafo direcionado) ou não ter direção (grafo não-direcionado).

Os grafos são utilizados para modelar problemas em diversas áreas, como redes de computadores, relacionamentos em redes sociais, rotas de transporte, fluxo de informações, entre outros. Eles podem ser representados visualmente através de diagramas que apresentam círculos para os vértices e linhas para as arestas, um grafo pode ser visualizado na Figura 1.

Figura 1 – Representação de Grafo



Fonte: (MELO, 2014)

A teoria dos grafos fornece ferramentas e técnicas para análise e solução de problemas relacionados a sistemas que podem ser representados por grafos. Dentre as

aplicações da teoria dos grafos, destacam-se a otimização de redes de transporte, a identificação de comunidades em redes sociais e a resolução de problemas de programação linear.

Para estudar os grafos, é importante conhecer os conceitos básicos, como vértices, arestas, grafo direcionado, grafo não-direcionado, caminhos, circuitos, grafos completos, grafos bipartidos, entre outros.

O modelo de rede de distribuição utilizando grafo é uma representação gráfica da topologia da rede. Cada dispositivo da rede é representado por um nó do grafo e as conexões entre eles são representadas pelas arestas. É possível utilizar grafos direcionados ou não-direcionados para representar a direção das conexões. Além disso, é possível adicionar informações adicionais às arestas, como o comprimento da linha, a impedância e a capacidade máxima de carga.

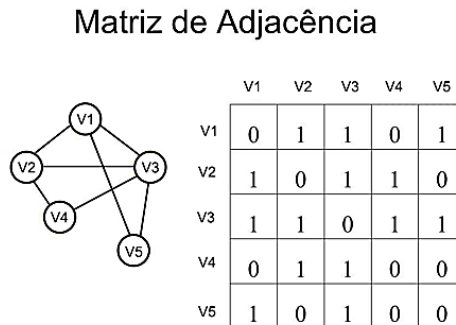
O modelo de grafo pode ser utilizado para realizar diversas análises da rede. Uma das principais análises é a identificação de circuitos, que permite conhecer as áreas da rede que são afetadas em caso de uma falha em um dispositivo. A análise de confiabilidade também é possível, onde o grafo pode ser utilizado para identificar os pontos críticos da rede e os dispositivos que precisam de manutenção preventiva.

Outra análise importante que pode ser realizada é a determinação de caminhos críticos, que são os caminhos mais utilizados para o transporte de energia elétrica. Essa informação é fundamental para a realização de investimentos em novas linhas de transmissão e distribuição. Além disso, é possível utilizar algoritmos específicos para otimizar a operação da rede, como o algoritmo de Dijkstra para encontrar o caminho mais curto entre dois dispositivos.

Uma propriedade da teoria dos grafos que deve ser analisada é a lista de adjacências, um grafo pode ser representado como uma lista de adjacências de modo que cada vértice da rede possui uma lista que armazena todas suas conexões. Esta propriedade é a mais utilizada pelo menor custo computacional, visto que basta uma procura simples na lista de adjacência de um dos vértices para saber as conexões a qual está proposto, e assim são determinados seus vizinhos. A lista de adjacências é obtida a partir da matriz de adjacências, que é definida a partir dos vértices V do grafo, sendo a matriz $M=|V| \times |V|$ composta por 0 e 1, tal que se dois vértices i e j forem conectados, o elemento da matriz

M_{ij} receber 1, do oposto, recebe 0. Para um exemplo de grafo de 5 vértices, tem-se a Figura 2.

Figura 2 – Matriz de adjacência de um grafo com 5 vértices

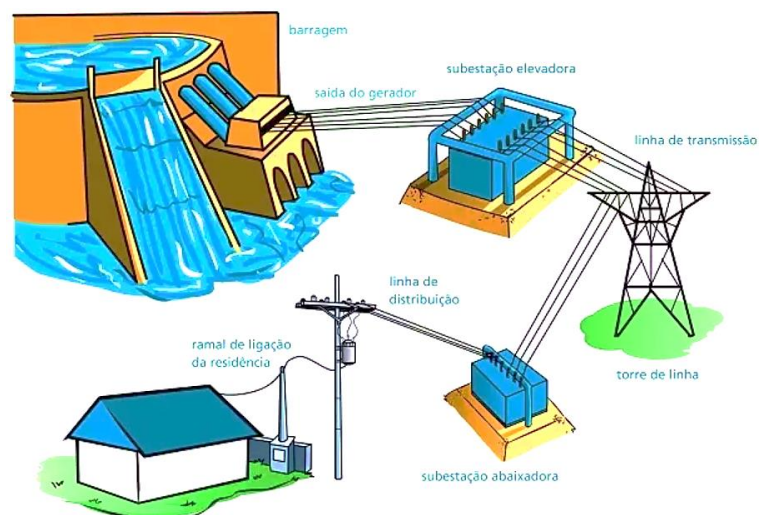


Fonte: (MARTINS, 2019)

2.2 Sistema Elétrico de Potência

Um sistema elétrico de potência é constituído por segmentos geradores, transmissores e consumidores de energia, este sistema é responsável por suprir a demanda de energia dos consumidores, transmitindo a energia por meio das linhas de transmissão e distribuição, aumentando e diminuindo a tensão por meio das subestações e transformadores de energia (MOHAN, 2016). É possível visualizar um diagrama ilustrativo das partes do sistema elétrico de potência na Figura 3.

Figura 3 – Sistema elétrico de potência



Fonte: (MATTEDE, 2023)

2.2.1 Unidades de Geração

As unidades de geração de energia partem do princípio de transformação de fontes de energias primárias, como térmica e cinética, em eletricidade. Os maiores exemplos disso são as grandes usinas elétricas nos países, como a usina hidrelétrica de Itaipu, líder mundial em produção de energia renovável, e a usina termoeletrica de Sergipe, a maior da América Latina. Há algumas diferenças entre tipos de sistemas de geração de energia, os mais comuns são sistemas de geração centralizada e distribuída.

A geração centralizada é o formato mais tradicional, onde poucas unidades geradoras produzem a eletricidade para o maior número possível de consumidores, o maior exemplo são as grandes usinas que são construídas afastadas dos centros de consumo e necessitam de maiores linhas de transmissão. De fato a geração centralizada é predominante no Brasil devido aos custos reduzidos na geração e simplicidade administrativa, entretanto, apresenta desvantagens, por depender de uma fonte única e devido ao afastamento dos grandes centros populacionais, tais como as perdas nas linhas de transmissão e o risco de indisponibilidade devido a falha de uma unidade geradora.

A geração distribuída caracteriza-se pela maior quantidade de unidades geradoras de menor porte que abastecem a rede, de tal maneira que essas unidades abastecem diretamente os clientes locais, minimizando custos e perdas na transmissão de energia (SILVA, 2019).

2.2.2 Redes de Transmissão

Devido ao grande distanciamento das unidades geradoras de energia para os grandes centros consumidores, é necessário uma malha eficaz e interconectada de linhas de transmissão e subestações, afim de evitar perdas energéticas e garantir o abastecimento dos consumidores.

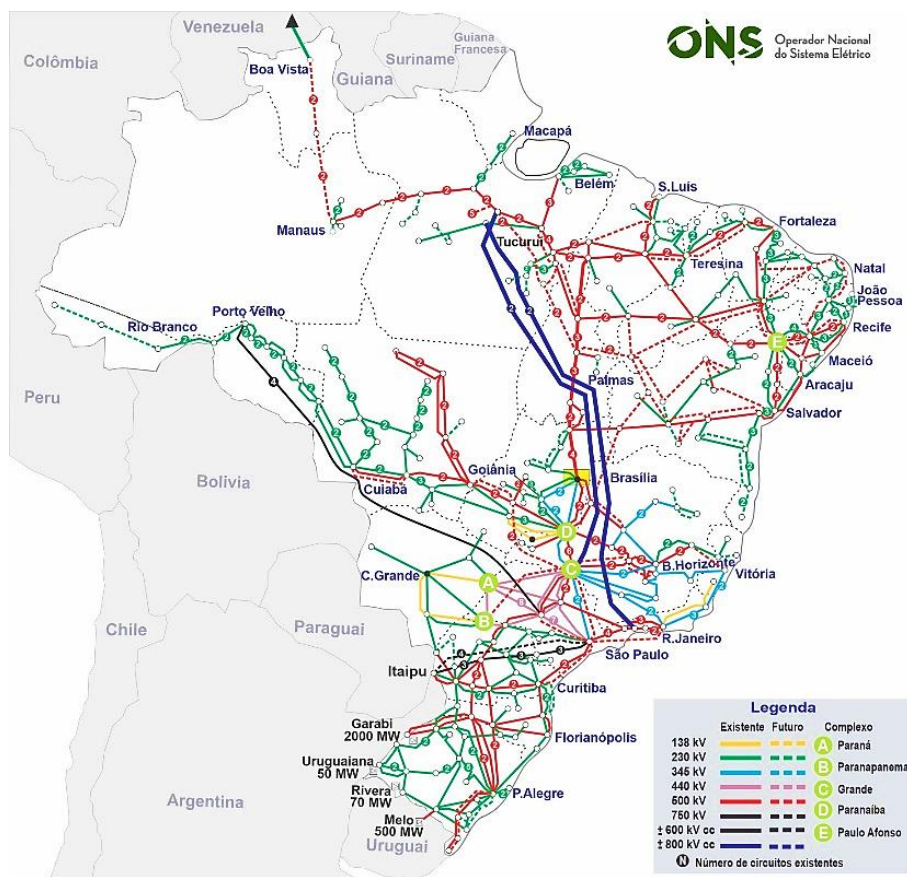
O transporte de energia pode ser dividido em duas categorias, transmissão e subtransmissão. A transmissão compõe a rede básica, definida pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) como linhas, subestações e quaisquer equipamentos associados a tensão igual ou maior que 230 kV com foco em transporte de blocos maiores de energia

por longas distâncias, enquanto a subtransmissão é coordenada pelas transmissoras de energia de acordo com o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) e tem foco principal em tensões de 138 e 69 kV. A malha de transmissão é mostrada na Figura 4.

2.2.3 Redes de Distribuição

As redes de distribuição são definidas como o segmento de um sistema elétrico, que a partir das subestações de transformação de energia, são dedicadas a transformação das tensões provenientes do sistema de transmissão.

Figura 4 – Sistema de transmissão elétrica no Brasil

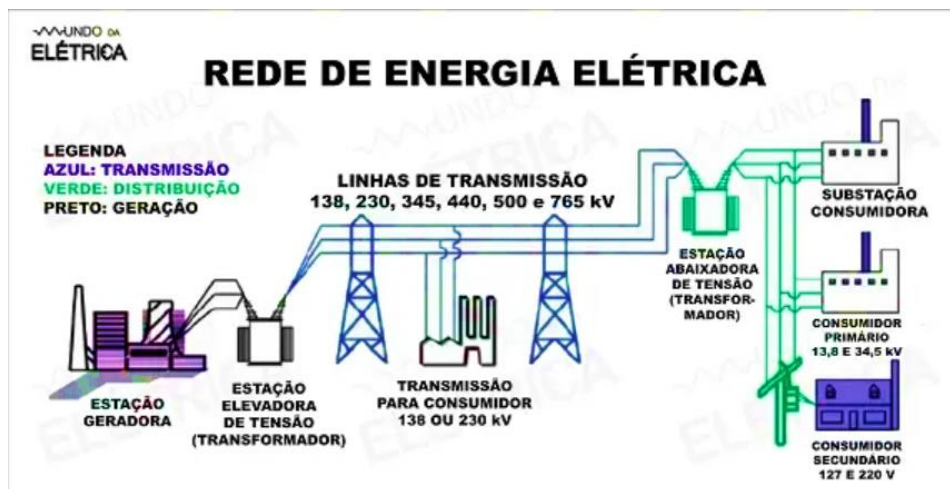


Fonte: (SETOR DE TRANSMISSÃO, 2023)

A conversão de tensão alta para média (13,8 kV) é realizada pelas subestações primárias por meio de transformadores de potência para atender aos consumidores primários (usinas e empresas), entretanto, para chegar aos consumidores secundários

(residências e comércios), é necessário uma nova alteração de tensão para baixa tensão (220 e 127 V) através dos transformadores de distribuição fixados, normalmente, em redes aéreas de distribuição como é possível observar na Figura 5.

Figura 5 – Rede de energia elétrica



Fonte: (REDES DE ENERGIA ELÉTRICA, 2023)

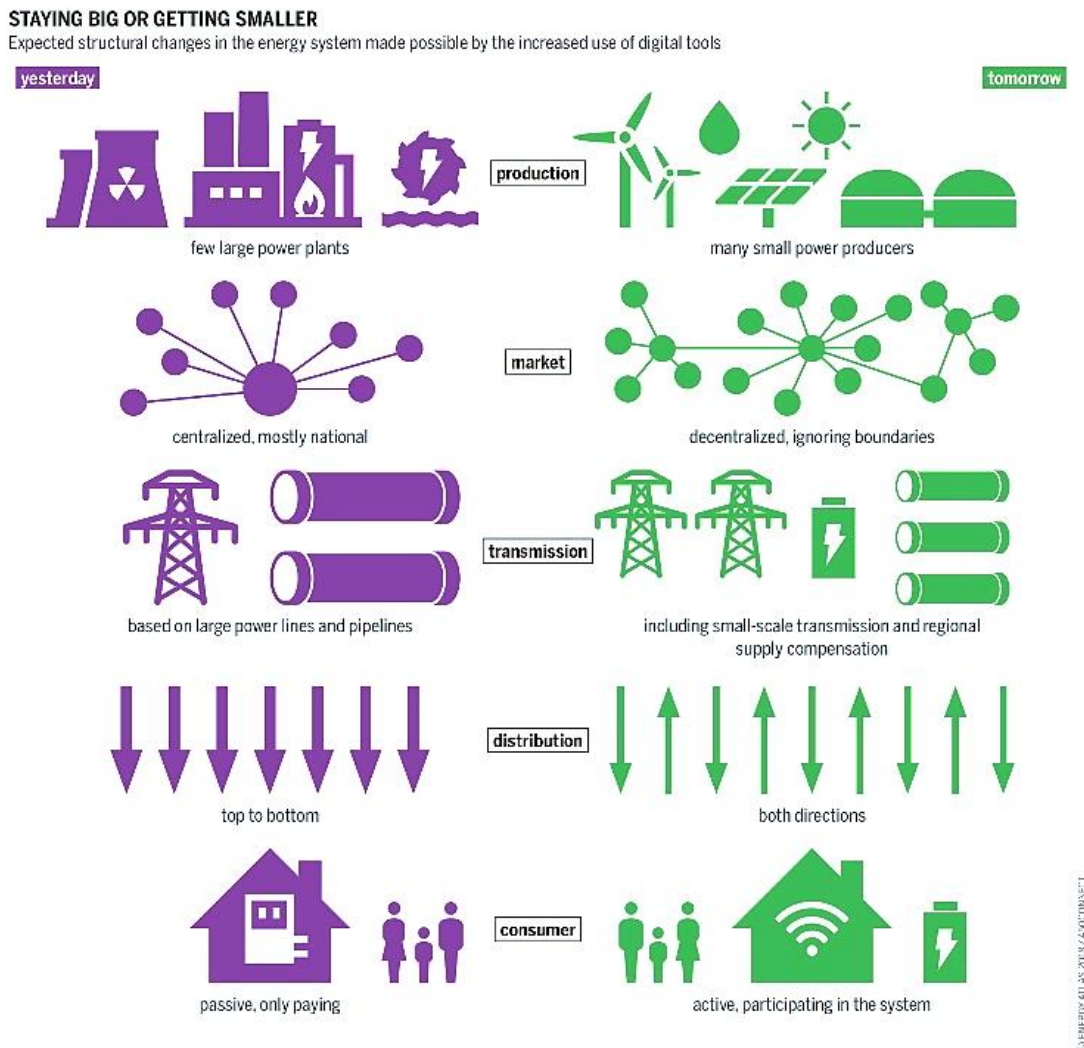
2.2.4 Topologia de Rede de Distribuição

Para redes de distribuição é comumente utilizado sua topologia, através de uma lista de adjacências, em que linhas de distribuição são representadas por ramos, e sensores posicionados para medições, ou consumidores finais, são representados por barras, organizados de maneira sistemática.

Analogamente a teoria dos grafos, cada barra representa um vértice, e cada ramo representaria uma aresta do grafo. Desta forma, é possível fazer a análise da rede de distribuição como um grafo e, a partir do princípio da lista de adjacências, é possível construir uma matriz de adjacências para identificação dos componentes da rede, sendo que cada barra da rede deve ter seus vizinhos (barras conectadas pelos ramos), havendo uma barra raiz associada à subestação geradora (SE) que provém toda a energia e dados recebidos da rede geradora.

Abaixo tem-se a Figura 6 com a representação de uma rede com seis barras e uma subestação geradora (SE).

Figura 7 – Mudanças com implementação de *smart grid*



2.3.1 Internet das Coisas (IdC)

A implementação das redes inteligentes baseia-se na interconexão do sistema, e para isso, os dispositivos IdC, ou IoT (*Internet of Things*) caracterizam-se como os mais aptos para as tarefas. Dispositivos IdC são dispositivos capazes de conectar-se a internet, e também trocar informações com outros aparelhos digitais, sejam eles sensores, chips, rastreadores, ou quaisquer outros aparelhos, fazendo-os adequados para a troca de informações em uma rede inteligente, possibilitando assim, um aumento de produtividade, diminuição de custos operacionais e maior rapidez na verificação e correção de falhas.

A tecnologia IdC fornece uma interação em tempo real através da conexão de rede

para os usuários e dispositivos por diferentes tecnologias de comunicação, fornece energia aos equipamentos e devido a operação ser em tempo real, bidirecional e em alta velocidade compartilhando múltiplas aplicações, a eficiência geral da *Smart Grid* é aumentada (NOEL, YASIR, 2019).

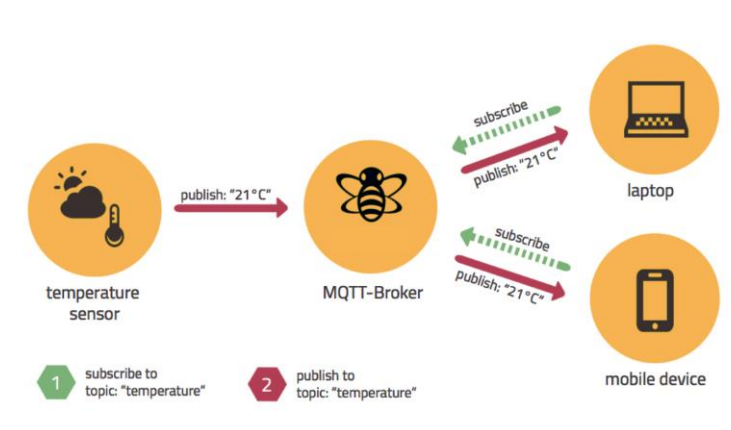
Devido aos requisitos de longo alcance e a conectividade fornecida pelos dispositivos IdC, a solução torna-se válida e melhorada com o auxílio de monitoramento remoto dos dados, permitindo assim um gerenciamento sem necessidade de infraestrutura local, ampla cobertura de área, consumo de energia baixo resultando em medidores de longa duração. Essa comunicação é possibilitada devido ao protocolo *Message Queuing Telemetry Transport* (MQTT) de comunicação entre máquinas (M2M).

2.3.2 Protocolo MQTT

O Protocolo MQTT é um protocolo de transporte de mensagens no formato cliente/servidor majoritariamente utilizado para conectividade de IdC. Nesses sistemas, é utilizado o conceito *Publish/Subscribe*, em que o cliente pode fazer publicações ou captar informações, enquanto o servidor gerencia a transferência dos dados.

Neste modelo é necessário a existência de um gerenciador de mensagens, o *broker*, o qual desempenha o papel de filtrar e gerenciar os dados recebidos capaz de fazer com que a comunicação entre as máquinas ocorra, e também permitindo um desacoplamento entre as partes. Na Figura 8 é apresentado o *broker* em uma rede de sensores.

Figura 8 – Arquitetura convencional IoT



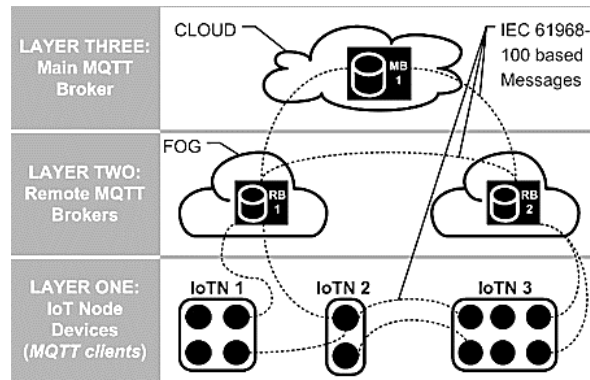
Fonte: (PEREZ, 2017)

Em geral, as vantagens do protocolo MQTT são nítidas para quem deseja um fluxo mais amplo e a possibilidade de conectar várias máquinas e sensores ao mesmo tempo. Codificação mais simples, que permite que o protocolo funcione mesmo em sistemas pouco modernos ou com falhas de armazenamento. Além disso, ele será útil até em redes onde a internet é limitada. Sistema que não se sobrecarrega, só o necessário passa por um protocolo MQTT, o que faz com que ele não fique sobre-carregado e sofra panes. Sendo um protocolo de domínio público, garante que haja mais flexibilidade e que seja instalado em qualquer rede ou hardware. Além disso, pode ser configurado conforme as necessidades.

O MQTT é reconhecido como o protocolo mais adequado para plataformas IdC com alta confiabilidade, comunicações simultâneas seguras para múltiplos destinatários e mensagens persistentes (VENANZI. et al., 2018). O *broker* MQTT reside, normalmente, na nuvem. Apesar de a computação em nuvem atender às principais necessidades dos sistemas IdC, como reconhecimento de localização, mobilidade e distribuição geográfica, ela falha no processo de tomada de decisão oportuna, conforme exigido pelas redes inteligentes. Apenas a computação em nuvem não é suficiente para suportar sistemas ubíquos por causa das restrições de atraso de tempo, conectividade de rede intermitente e largura de banda de comunicação restrita (YANG, 2019).

A arquitetura multicamadas auxilia na solução dos problemas de restrição de tempo introduzindo uma camada intermediária entre a infraestrutura computacional na nuvem e os dispositivos de nó IdC que conectam o aplicativo na nuvem e na borda. O modelo de computação multicamadas em (VEERAMANIKANDAN & SANKARANARAYANAN, 2019) implanta o protocolo MQTT em três camadas, conforme detalhado na Figura 9.

Figura 9 – Conexão de clientes MQTT usando a arquitetura multicamadas da IdC com mensagens baseadas no padrão IEC 61968-100.



Fonte: (VEERAMANIKANDAN & SANKARANARAYANAN 2019)

A camada um hospeda os dispositivos do nó IdC próximos à rede elétrica ou processo de energia. Permitem executar instâncias do cliente MQTT. Na segunda camada, existem os *brokers* remotos que auxiliam o *broker* principal na computação em nuvem. A camada três tem, portanto, o *broker* MQTT principal.

3. FORMAÇÃO DA ARQUITETURA MULTICAMADAS

O objetivo deste capítulo é apresentar os métodos utilizados para determinar a latência na plataforma convencional de IdC e determinar a mínima latência em um plataforma IdC em multicamadas. Primeiramente, define-se a estrutura de dados da rede de distribuição a partir da sua topologia com ramos e barras e da teoria de grafos. Depois, é apresentado o algoritmo do K-means utilizado para cluterização da rede usando os dados de posicionamento espacial das barras. Por fim, o método da bissecção é especificado e aplicado no processo de otimização para determinar o número adequado de clusters capaz de reduzir ao mínimo a latência de transmissão na plataforma IdC em multicamadas.

3.1 Estrutura de Dados para Redes de Distribuição

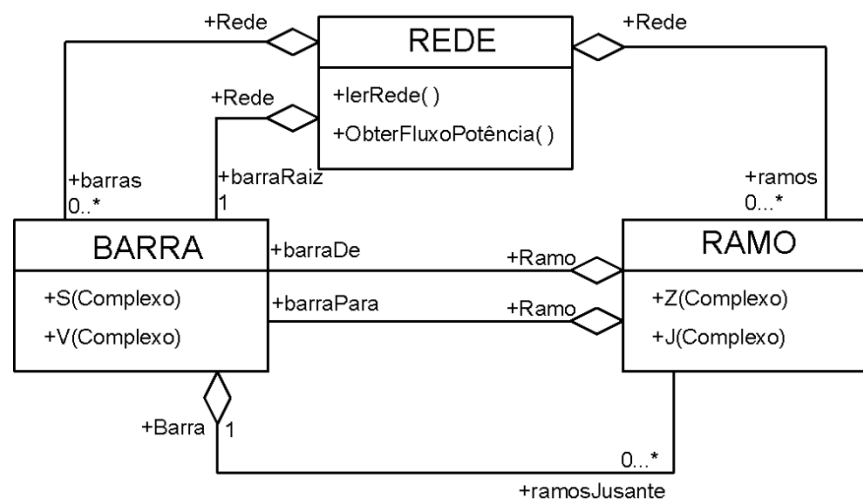
O programa inicia-se considerando uma topologia similar a arquitetura mostrada na Figura 6, formada a partir de barras e ramos, assumindo a barra raiz, ou barra zero, como sendo a subestação (SE) abaixadora que conecta a rede de distribuição à transmissão. Os elementos da rede de distribuição podem ser matematicamente modelados como uma árvore, um caso particular de grafo, cuja representação é auxiliada com a utilização da

linguagem de modelagem unificada (UML), do Inglês *unified modeling language*.

A linguagem UML foi concebida com o conceito de classes e subclasses. É importante mencionar que a subclasse de uma classe tem as mesmas características da classe e, além disso, pode ter suas próprias características. Os diagramas de classe possibilitam também a representação das relações entre as classes, tais como composição, agregação e herança. Na Figura 10 é mostrado o diagrama de classes que define o modelo de dados da rede de distribuição.

No modelo de dados, verifica-se a existência de três classes “*Rede*”, “*Barra*” e “*Ramo*”. Adicionalmente, existem as relações de Agregação e Composição entre as classes (FERREIRA, 2021). Uma rede de distribuição está agregada a um número finito de barras e ramos, ao passo que um ramo é composto por uma barra de origem “*barraDe*” e outra de destino “*barraPara*”. Consequentemente, uma barra é composta por nenhum ou um número finito de ramos à jusante “*ramosJusante*”.

Figura 10 - Diagrama de classes do modelo de dados para redes de distribuição.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A classe “Barra”, tem como atributos padrões um vetor S representado a potência complexa demandada e outro vetor complexo V para as tensões nodais trifásicas. Na classe “Ramo” há a matriz Z da impedância da linha e o vetor J do fluxo de corrente. Para formação dos agrupamentos, às barras são adicionados mais dois atributos, ou seja, as posições espaciais num sistema bidimensional “pX” e “pY” de coordenadas.

3.2 Algoritmo K-means

A rede de distribuição contém um número elevado de barras e ramos, considerando que cada barra tem sua distância definida até a referência, que normalmente é a barra raiz, quanto maior o número de barras, maior a distância até a referência. Analogamente, pode-se definir que para o percurso percorrido pelos dados, quanto maior o percurso, maior a latência de transmissão dos dados, então se faz necessário reduzir as distâncias.

A ideia utilizada para essa redução de distâncias é a clusterização das barras, que significa um agrupamento conforme essas distâncias. Para realizar essa clusterização, é possível utilizar o algoritmo do K-means, que permite um maior controle e gerenciamento dos dados georreferenciados, assim, aprimorando o monitoramento, análise e visualização do próprio sistema de distribuição (MEEHAN, 2013). O agrupamento do K-means é baseado na distribuição das barras de cargas a partir do conceito de centróide, que é um centro de cada agrupamento (*cluster*), de tal forma que o centróide existe para cada agrupamento tal que ele tenha a menor distância em relação aos demais membros do agrupamento, no caso as barras, e esse núcleo é o centro de massa do *cluster* (VANDER-PLAS, 2016).

O algoritmo de agrupamento K-means procura uma configuração $\mathcal{C}$ ótima definida em (01), dividindo um conjunto de dados em k grupos não sobrepostos. Seja $X = \{x_i\}, i = 1, 2, \dots, n$ um conjunto de dados n -dimensional e o parâmetro único k . Cada grupo $\mathcal{C}_j$ engloba um conjunto de amostras tal que a soma das distâncias euclidianas seja minimizada.

$$\mathcal{C} = \bigcup_{j=1}^k \mathcal{C}_j \quad (01)$$

O algoritmo segue um processo iterativo, que começa localizando aleatoriamente o núcleo de cada grupo m_j . E atribui cada uma das amostras x_i , ao núcleo mais próximo calculando a soma das distâncias euclidianas $d_2(x_i, m_j)^2$, conforme (02).

$$\mathcal{C}^0 = \arg \min_{\mathcal{C}} \sum_{j=1}^k \sum_{x_i \in \mathcal{C}_j} d_2(x_i, m_j)^2 \quad (02)$$

Em cada iteração t , a re-atribuição das amostras ao núcleo é feito de acordo com (03) e uma atualização da localização dos núcleos é feito através de (04) até atingir a convergência. Em cada iteração procura-se melhorar o agrupamento.

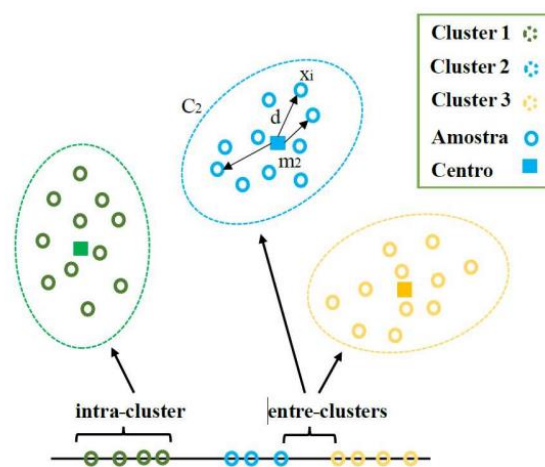
$$C_j^t = \{x_i | d_2(x_i, m_j^t) \leq d_2(x_i, m_{j^*}^t), \forall j^* = 1, 2, \dots, k\} \quad (03)$$

$$m_j^t = \frac{1}{|C_j^t|} \sum_{x_i \in C_j^t} x_i \quad (04)$$

O algoritmo de agrupamento K-means está baseado em dois fundamentos: 1) que o núcleo do agrupamento seja o seu centro de massa e, 2) que a distância de cada elemento ao seu núcleo é menor do que a qualquer outro (VANDER-PLAS, 2016). Observe que, qualquer umas das métricas pode ser usado para calcular a distância entre dois vetores n-dimensionais: distância euclidiana, distância de Manhattan, distância de Chebyshev, distância de Minkowski, etc. (HOSSAIN, 2017).

Nas Figuras 11 e 12, temos dois exemplos de clusterização de dados, organizados através do algoritmo do *k-means*, pode-se observar os diferentes agrupamentos e cada centróide construído dentro de cada cluster com base na menor distância euclidiana entre as amostras e o centróide.

Figura 11 – Clusterização de dados exemplo 1



Fonte: (QUITO, 2022).

Figura 12 – Clusterização de dados exemplo 2



Fonte: (JAVAPOINT, 2023).

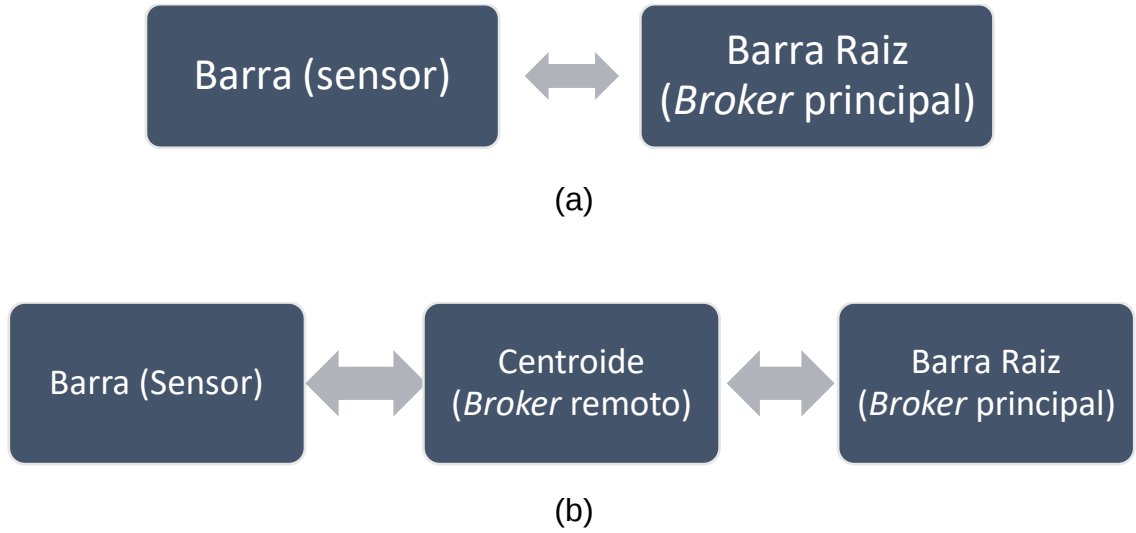
Na utilização do algoritmo do K-means, é necessário encontrar os valores mínimos e máximos dos eixos X e Y para determinar as posições iniciais dos k centróides conforme (05) e (06).

$$m_{X,j}^0 = pX_{min} + \frac{(pX_{max} - pX_{min})}{k + 1} * j, \text{ para } j = 1, 2, \dots, k \quad (05)$$

$$m_{Y,j}^0 = pY_{min} + \frac{(pY_{max} - pY_{min})}{k + 1} * j, \text{ para } j = 1, 2, \dots, k \quad (06)$$

Com o algoritmo do K-means definido e os clusters criados na rede, cada qual com seu respectivo centroide, determina-se as distâncias percorridas dos dados até os centroides. Como os dados provém do cliente publicador, para a arquitetura multicamadas, é necessário que o caminho percorrido seja da barra (sensor ou cliente), até o centroide do *cluster* (*broker* remoto) e desse para o centroide na barra raiz (representando a nuvem que armazena e gerencia as informações – *broker* principal), e o caminho de volta se repete para que a informação dos dados retorne ao publicador. Já para a arquitetura convencional, devido a não clusterização, assume-se que o valor do caminho percorrido pelos dados de transmissão, é a distância entre a barra (sensor/cliente) até a barra raiz (*broker* principal), sem uma atuação de um *broker* remoto. A Figura 13 apresenta o percurso para a arquitetura convencional e a arquitetura multicamadas respectivamente.

Figura 13 – Trajeto dos dados para arquiteturas convencional e multicamadas



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2.1 Latência de Transmissão

A latência de transmissão é fundamental na obtenção da resposta mais rápida. Em geral, a latência de transmissão é o tempo gasto para percorrer a distância entre a origem e o destino e o retorno. Isso é denotado por λ_t . Na arquitetura multicamadas, há a ocorrência de múltiplas transmissões em diferentes pontos finais de um sistema. Para todo evento que ocorrer no nó IdC δ , devido ao sensor e/ou atuador, deve ser notificado por δ . Após a notificação, δ deve ser acionado para enviar uma requisição ao *broker* remoto φ . Na camada intermediária, o φ deve processá-la e, se necessário, deve ser encaminhada para o *broker* principal Φ na nuvem. A mesma informação/dados deve viajar no sentido inverso para chegar ao δ para dar a resposta para o pedido particular. As distâncias entre dois dispositivos são representadas pelo símbolo l .

A equação para calcular a latência de transmissão do modelo computacional multicamadas IdC proposto é dada por (07) (VEERAMANIKANDAN & SANKARANARAYANAN, 2019).

$$\overline{\lambda_{t_f}} = \sum (l_{\delta}^{\varphi} + l_{\varphi}^{\Phi} + l_{\Phi}^{\varphi} + l_{\varphi}^{\delta}) \quad (07)$$

Para a arquitetura convencional, por não ocorrer a clusterização dos componentes, não há o trajeto entre os *brokers* remotos, sendo assim a equação de latência é dada por (08) (VEERAMANIKANDAN & SANKARANARAYANAN, 2019).

$$\overline{\lambda_{t_c}} = \sum (l_{\delta}^{\phi} + l_{\phi}^{\delta}) \quad (08)$$

Considerando possíveis atrasos devido ao tamanho elevado das distâncias de transmissão, e possíveis perdas para o ambiente, é possível que haja retransmissão de alguns pacotes, variável denotada por τ assumindo que τ é 1,5% do tempo de transmissão total, uma média da latência de transmissão pode ser calculada pela equação (09), sendo “n” o número de barras total.

$$\lambda_t = \frac{\overline{\lambda_t} + \tau}{n} \quad (09)$$

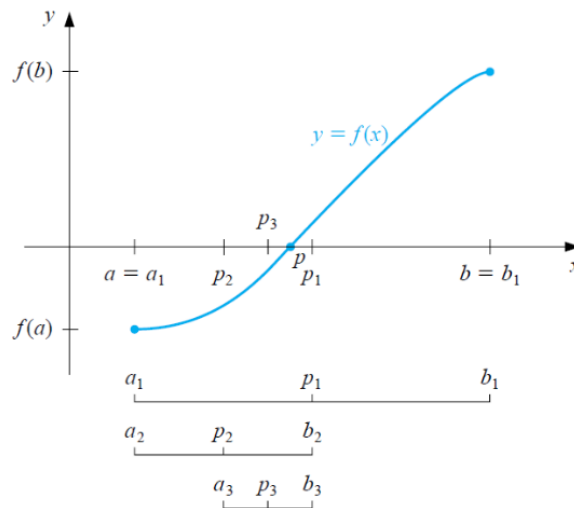
3.3 Método da Bissecção

Com a utilização do algoritmo de K-means capaz de retornar a clusterização para as barras, é necessário definir o número k de clusters, de modo que a clusterização retorne apenas a configuração ideal para a qual o número de clusters é tal que a transmissão dos dados ao longo da rede se torne otimizada com o menor tempo possível (latência).

Entretanto, para calcular o valor mínimo de distâncias para uma clusterização ideal do sistema de rede, é necessário que a quantidade de clusters seja tal que os somatórios das distâncias sejam minimizadas, e para isso, é necessário implantar um método de eliminação de programação não linear, o método escolhido é o método da bissecção.

O método da bissecção é inteiramente baseado no Teorema do Valor Intermediário, a ideia é garantir uma solução para uma função dentro de um intervalo $[a,b]$, tal que a partir de uma sequência de divisões do intervalo são obtidos subintervalos $[a,m]$ e $[m,b]$, e assim sequencialmente até que a condição de parada seja atingida (CONTE, 1965). Na Figura 14, é ilustrada a redução do intervalo de incerteza de $[a_1,b_1]$ para $[a_2,b_2]$ e, depois, para $[a_3,b_3]$ na busca pelo zero da função através do método da bissecção.

Figura 14 – Redução do intervalo de incerteza pelo método da bisseção



Fonte: Elaborado pelo autor.

No caso em estudo, o método da bissecção foi adicionado para verificar valores no intervalo de quantidade de centroides [“minCentroides”, “maxCentroides”], sendo que a menor divisão possível do sistema é para o número inteiro dois, e a divisão máxima possível é considerada aquela em que cada barra é um centroide de seu próprio cluster. O critério de parada analisado é o menor valor para a “distanciaTotal”, sendo esse valor o somatório das distâncias entre barra e centroide de seu respectivo cluster, com o somatório das distâncias entre o centroide e a barra raiz, retornando assim o número ideal de clusters, e a quantidade de barras em cada cluster para a configuração ideal do sistema minimizando as distâncias percorridas pelos dados durante uma transmissão de pacotes.

Com o algoritmo do K-means e o método da bisseção para determinar a melhor configuração, é possível obter o número de clusters ideal e os valores de distâncias entre barras, centroides e barra raiz. Assim, calcula-se as latências: “LatenciaConvencional” para a arquitetura convencional da plataforma IdC; “LatenciaMulticamadas” para a arquitetura em multicamadas; e “LatenciaCluster”, sendo o valor de latência dentro de cada cluster otimizado.

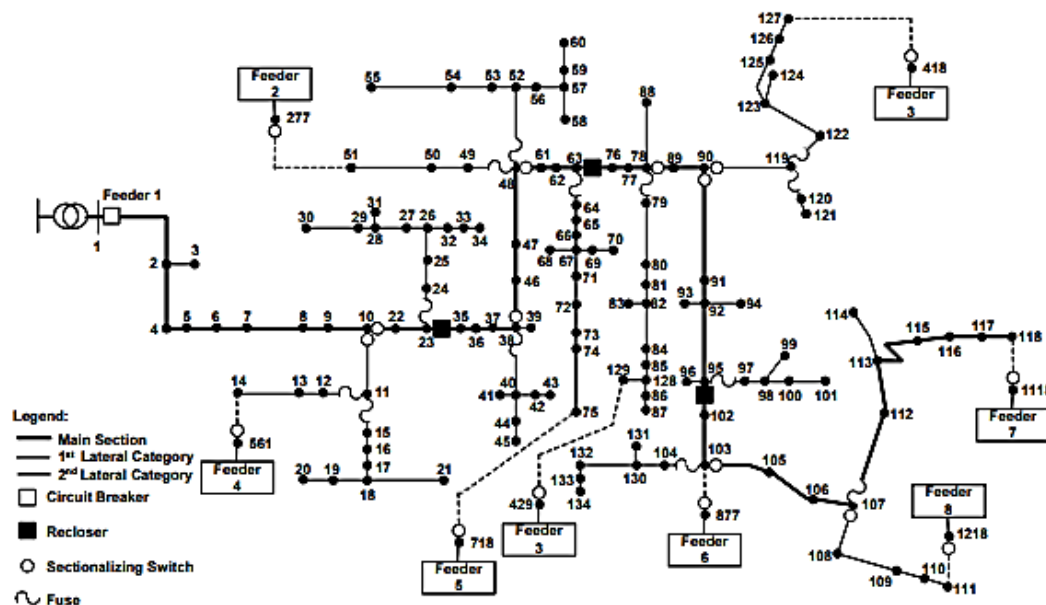
Por fim, com os valores de latências para ambas as arquiteturas multicamadas e convencional, calculou-se as latências médias previstas em (08), “MediaFinalLatenciaMulticamada” e “MediaFinalLatenciaConvencional”.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com o objetivo de comparar as latências na arquitetura convencional e multicamadas da plataforma IcD, é utilizado um sistema trifásico desbalanceado de 135 barras da literatura (LAPSEE, 2022) com a adição das coordenadas de posicionamento das barras. Os algoritmos de clusterização e otimização foram implementados na linguagem C# e estes foram executados em um sistema computacional Intel® Pentium® CPU N3540 @ 2.16GHz.

A Figura 15 mostra um diagrama com a topografia da rede, em que é uma rede de distribuição aérea de trifásica típica de 13,8 kV, 136 barras que possui possibilidade de reconfiguração com outros sete alimentadores vizinhos. Presentes no anexo A estão localizadas as Tabelas 1 e 2, com os dados da capacidade total, incluindo capacidade de reserva para cada alimentador vizinho, e dados das linhas de distribuição, como comprimento das linhas, bitola do condutor e carga conectada no nó receptor de cada linha de distribuição respectivamente. Normalmente, o fator de potência da carga é 0,92 (LAPSEE, 2022).

Figura 15 – Topologia do sistema teste de 136 barras radial.



Fonte: (LAPSEE, 2022)

Para os cálculos de cada arquitetura do IoT, deve-se referenciar geograficamente o sistema afim de determinar as distâncias entre os principais pontos, *brokers* remotos, *broker* principal e sensores/clientes. Inicialmente com auxílio dos valores pX e pY de cada barra da rede, determinaram-se os valores de mínimo e máxima posição nos eixos X e Y assim como a posição da barra raiz que é o *broker* principal do sistema. Os valores obtidos são mostrados na Tabela 1.

Tabela 1 – Posições mínima e máxima nos eixos X e Y, e posição do *broker* principal

	Posição mínima do sistema	Posição máxima do sistema	Barra Raiz (broker principal)
Eixo X (m)	31	958	31
Eixo Y (m)	11	557	202

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os valores de posições mínimas e máximas encontrados foram utilizados como parâmetros de entrada no algoritmo do K-means, de forma a performar as primeiras definições de cluster, entretando, com o auxílio do método da bissecção introduzido, o algoritmo do K-means busca a solução ideal do sistema para a qual as distâncias entre barras e o centroide definido, e centroide e a barra raiz sejam mínimas, caracterizando uma clusterização ideal para o sistema. O método implementado retorna, portanto, o número de clusters e centroides ideal para o sistema na variável “NumerodeCentroide”, assim como o número de barras em cada cluster “*nCluster*”, e a posição geográfica de cada cluster exibida pela variável “centroide”. Os valores de número ideal de cluster e posições de cada cluster são exibidos na Tabela 2, para melhor visualização, foi considerado duas casas decimais nos cálculos.

Na Figura 16 é possível visualizar um gráfico de dispersão com as posições espaciais das barras e dos centroides que definem cada cluster. Nas regiões mais densas, os clusters tem um maior número de barras que os clusters na periferia da rede, por exemplo, os clusters 0, 1, 2 e 11 estão nas extremidades da rede por agruparem uma menor quantidade de barras.

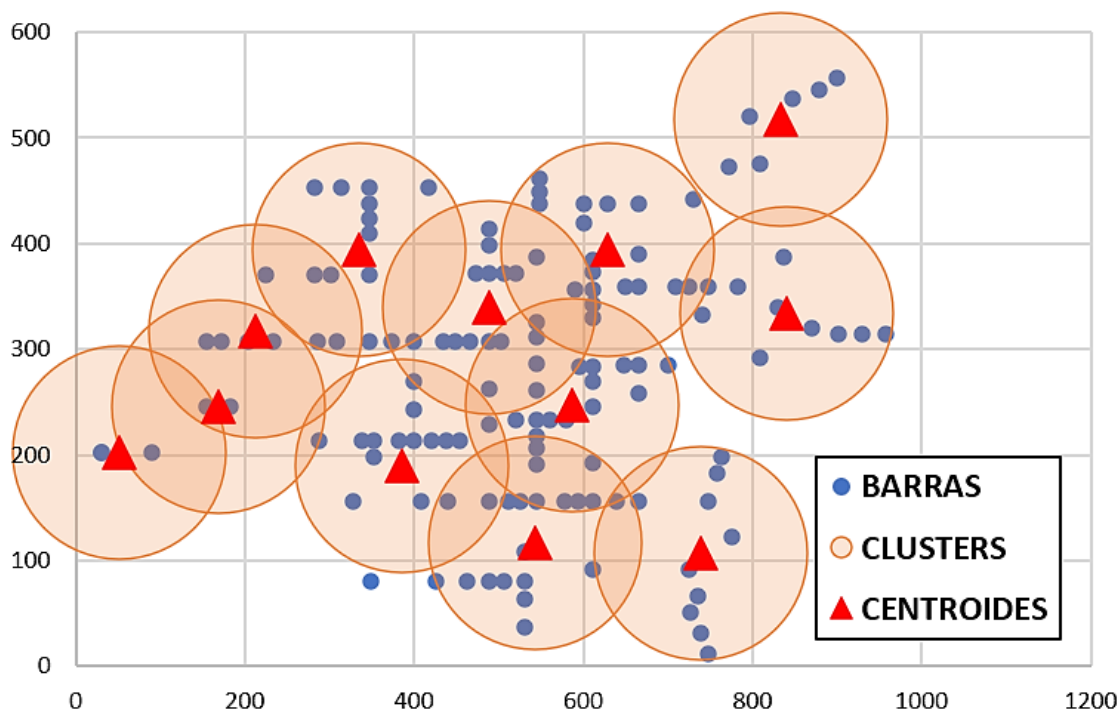
Tabela 2 – Número ideal de clusters, posições de cada cluster e número de barras em cada cluster

NumerodeCentroide	12
-------------------	----

CLUSTER	POSIÇÃO EM X (m)	POSIÇÃO EM Y (m)	Quantidade de Barras
0	50,67	202	2
1	168	246	2
2	212,17	317,67	6
3	335,38	393,54	13
4	386,12	190,12	16
5	489,06	339,25	16
6	542,75	116,75	16
7	586,1	247,74	19
8	627,89	394,47	19
9	738	106,7	10
10	840,5	333,4	10
11	833,33	517,83	6

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 16 – Clusterização do sistema teste de 136 barras radial.



Fonte: (LAPSEE, 2022)

Com o número de cluster definido para a configuração ideal, as posições de cada centroide Tabela 2, da barra raiz Tabela 1, e das barras, realizaram-se os cálculos das latências na arquitetura convencional, como definida por (07). O percurso da transmissão dos dados é o caminho de ida (somatório de barras até barra raiz) e retorno. Os dados para o somatório das distâncias entre as barras (sensores/clientes) e a barra raiz (*broker principal*) encontram-se na Tabela 3.

Tabela 3 – Somatório das distâncias entre Barras e Barra Raiz

Somatório distâncias -> Barra - Barra raiz (m)	71.209,5
--	----------

Fonte: Elaborado pelo autor.

Considerando o caminho de ida e retorno dos dados, a latência convencional é calculada por (10) de forma simplificada assumindo o atraso de propagação igual à 4 $\mu\text{s}/\text{km}$ para sistema de comunicação terrestre via rádio (ITU-T, G.114, 2003).

$$\text{Latência convencional} = 71209,5 * 2 * 4 \cdot 10^{-9} \cong 0,57 \text{ (ms)} \quad (10)$$

A partir do valor de latência convencional e utilizando (09) calculou-se a média final de latência convencional para cada barra, exibida por (11).

$$\text{Média final Latência convencional} = \frac{0,57 + (0,57 * 0,015)}{136} \cong 4,25 (\mu\text{s}) \quad (11)$$

Para o cálculo da latência na arquitetura multicamadas, deve-se considerar a adição dos centroides como *broker* remotos. Dessa forma, as distâncias foram calculadas e utilizando os valores da Tabela 2 para as posições dos centroides, obtiveram-se as distâncias entre as barras e o centroide de cada um dos doze clusters e as distâncias de cada centroide até a barra raiz (*broker principal*),. Os valores são mostrados na Tabela 4.

Utilizando o somatório das distâncias calculadas na Tabela 4, para as distâncias entre as barras do sistema e o centroide de cada um dos respectivos clusters, e entre a barra raiz e os centroides, obteve-se a distância total do percurso dos dados para a

latência multicamadas, o valor obtido é apresentado por (12).

Tabela 4 – Distâncias entre as barras e o centroide de cada *cluster*, e entre a barra raiz e os centroides

Cluster	somaCluster(m)	DistanciaBarraRaizCentroide (m)
0	59	19,67
1	28	143,89
2	266,43	214,94
3	797,33	359,63
4	988,17	355,32
5	872,19	478,18
6	965,80	518,80
7	1.094,73	556,99
8	1.175,79	627,16
9	640,16	713,39
10	683,80	820,10
11	316,53	862,26

Fonte: Elaborado pelo autor.

$$\begin{aligned}
 \text{Distância total} &= \left(\sum \text{somaCluster} \right) + \left(\sum \text{DistanciaBarraRaizCentroide} \right) \\
 &= 7.887.92 + 5.670.34 \cong 13.558,26 \text{ (m)}
 \end{aligned}
 \tag{12}$$

Para calcular a latência multicamadas, deve-se considerar o percurso de ida e retorno dos dados mais o atraso de propagação, sendo assim o valor final é dado por (13).

$$\text{Latência multicamadas} = 13.558,26 * 2 * 4 \cdot 10^{-9} \cong 0,11 \text{ (ms)}
 \tag{13}$$

A partir do valor de latência multicamadas, utilizando a equação (09), calculou-se a média final de latência multicamadas para cada barra, exibida por (14).

$$\text{Média final Latência multicamadas} = \frac{0,11 + (0,11 * 0,015)}{136} \cong 0,81(\mu s)
 \tag{14}$$

Afim de determinar o valor médio de latência para a arquitetura multicamadas para cada barra no sistema, determinou-se o valor de latência em cada cluster . Na Tabela 5

são apresentados os valores de latência de cada barra em cada cluster.

Tabela 5 – Latência média de cada barra para seus respectivos *clusters*

CLUSTER	Latência Média (μ s)
0	0,32
1	0,70
2	0,65
3	0,72
4	0,68
5	0,69
6	0,75
7	0,71
8	0,77
9	1,10
10	1,22
11	1,60

Fonte: Elaborado pelo autor.

Com os valores de latência final para cada arquitetura, e os valores médios para cada barra considerando fatores externos, plotou-se a Tabela 6 para melhor visualização. Através de (15), obtiveram-se os valores de ganho percentual na latência para a arquitetura multicamadas em comparação com a convencional.

Tabela 6 – Latências para ambas as arquiteturas

	Latência (ms)	Latência Média (μ s)
Convencional	0,57	4,25
Multicamadas	0,11	0,81

Fonte: Elaborado pelo autor.

$$Ganho\ Latência\ (\%) = \left(1 - \frac{0,11}{0,57}\right) * 100 \cong 80,70(\%) \quad (15)$$

$$Ganho\ Latência\ Média\ (\%) = \left(1 - \frac{0,81}{4,25}\right) \frac{(0,81)}{4,25} * 100 \cong 80.96(\%) \quad (16)$$

O ganho com a arquitetura multicamadas é de 80% em relação a arquitetura convencional tratando-se de valores de latência, deste modo, o uso da arquitetura multicamadas para clusterização do sistema de rede de distribuição com uso de dispositivos IdC faz-se válido e extremamente eficiente em comparação ao método convencional.

5. CONCLUSÃO

O ambiente da IdC definido como habilitador à digitalização das redes de distribuição de energia elétrica auxilia na automação e rastreamento dos dispositivos de monitoramento e análise da rede. Tais dispositivos capazes de realizar medições são fundamentais na manutenção e melhora da rede. Com o auxílio de implementação de uma arquitetura multicamadas da plataforma IdC para esses dispositivos na rede, foi possível mensurar uma melhora de 80% na *performance* de latência total e média para cada barra em comparação com uma arquitetura convencional, devido a uma elevada quantidade de pontos automatizados. A clusterização é essencial para uma melhora na transmissão dos dados, medidos através da latência. A utilização do método de clusterização usual com o algoritmo do K-means fez-se válida e precisa na obtenção de um número máximo de clusters de tal forma que as distâncias entre os *brokers* fossem mínimas, diminuindo consequentemente as latências trazendo maior confiabilidade e velocidade ao fluxo de informações bidirecional da rede inteligente. Por fim, este trabalho conclui que, a utilização de uma arquitetura multicamadas de IdC é a melhor em comparação com a arquitetura convencional, dos pontos de vistas de confiabilidade e velocidade.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BOLL, HEINRICH, “Energy Atlas”, Atlas Manufaktur, 2018. Disponível em: <https://gef.eu/publication/energy-atlas-2018/>. Acesso em 23 de junho 2023.

C. WANG, X. LI, Y. LIU, AND H. WANG, “The research on development direction and points in IoT in China power grid”, in Proc. Int. Conf. Inf. Sci., Electron. Electr. Eng. (ISEEE), vol. 1, Apr. 2014, pp. 245-248.

JAVAPOINT, “K-means Clustering Algorithm” 2023. Disponível em: <https://www.javatpoint.com/k-means-clustering-algorithm-in-machine-learning>. Acesso em 23 de junho 2023.

MARTINS, PAULO, “Grafos – representação e implementação”, UNESP, Outubro, 2019. Disponível em: https://medium.com/@paulomartins_10299/grafos-representa%C3%A7%C3%A3o-e-implementa%C3%A7%C3%A3o-f260dd98823d. Acesso em 23 de junho 2023.;

MATTEDE, HENRIQUE, “Um pouco mais sobre o sistema elétrico de potência”, Junho, 2023. Disponível em: <https://www.mundodaeletrica.com.br/um-pouco-mais-sobre-o-sistema-eletrico-de-potencia-sep/>. Acesso em 23 de junho 2023.

MATTEDE, HENRIQUE, “O que são linhas de transmissão? Características e curiosidades”, Junho, 2023. Disponível em: <https://www.mundodaeletrica.com.br/o-que-sao-linhas-de-transmissao-caracteristicas-curiocidades/>. Acesso em 23 de junho 2023.

MEEHAN, B. (2013). “GIS for Enhanced Electric Utility Performance. Power Engineering. Artech House.” Disponível em: <https://books.google.com.ec/books?id=-wEgAgAAQBAJ>. Acesso em 23 de junho de 2023.

MOHAN, NED. “Sistemas Elétricos de potência” LTC, 2016.

M. VEERAMANIKANDAN, S. SANKARANARAYANAN, “Publish/subscribe based multi-tier edge computational model in Internet of Things for latency reduction”, Journal of Parallel and Distributed Computing, v. 127, 2019, pp. 18-27.

NOEL, Saleem, YASIR, Crespi. "Internet of Things-aided Smart Grid: Technologies, Architectures, Applications, Prototypes, and Future Research Directions" 2019 IEEE, pp 1-39, 2019.

PEREZ, CRISTIANO, "Arquitetura para aplicações realtime utilizando MQTT", Dezembro 2017. Disponível em: <https://blog.elo7.dev/arquiteturas-para-aplica%C3%A7%C3%B5es-realtime-utilizando-mqtt/>. Acesso em 23 de junho de 2023.

QUITO, W. E. C. ; ASTUDILLO, J. E. C. ; LEÓN, B. D. J. ; LEITE, J. B. . "Análise de Métodos para Agrupamento de Cargas Elétricas em Redes de Distribuição de Grande Porte usando Sistema de Informação Geográfica". In: XXIV Congresso Brasileiro de Automática (CBA 2022), 2022, Fortaleza - CE. Anais do XXIV Congresso Brasileiro de Automática (CBA 2022). Campinas - SP: Editora da SBA, 2022. v. 1. p.

R. DENG, Z. YANG, M. CHOW, AND J. CHEN, "A survey on demand response in smart grids: Mathematical models and approaches", IEEE Trans. Ind. Informat., vol. 11, no. 3, pp. 570-582, Jun. 2015

R. VENANZI, et al. "MQTT-Driven Node Discovery for Integrated IoT-Fog Settings Revisited: The Impact of Advertiser Dynamicity", 2018 IEEE Symposium on Service-Oriented System Engineering (SOSE), pp. 31-39, 2018.

S. D. CONTE. "Elementary Numerical Analysis". MacGraw-Hill, 1965.

S. E. COLLIER, "The emerging ethernet: Convergence of the smart grid with the Internet of Things", IEEE Ind. Appl. Mag., vol. 23, no. 2, pp. 12-16, Mar./Abr. 2017.

S. F. BUSH, "Network theory and smart grid distribution automation", IEEE J. Sel. Areas Commun., vol. 32, no. 7, pp. 1451-1459, Jul. 2014.

SILVA, RAFAEL SCHINCARIOL DA. II. "Sistemas Elétricos de Potência I" [S.I] Editora e Distribuidora Educacional S.A, 2019

SOARES DE MELO, GILDSON, "Introdução a Teoria dos Grafos", UFPB, Agosto, 2014.

TAESA, "Setor de transmissão", Disponível em: <https://ri.taesa.com.br/sobre-a-taesa/setor-de-transmissao/>. Acesso em 23 de junho de 2023.

VANDERPLAS, J. (2016). Python Data Science Handbook: “Essential Tools for Working with Data”. O’Reilly Media. Disponível em: <https://books.google.com.ec/books?id=6omNDQAAQBAJ>. Acesso em 23 de junho de 2023.

W. MENG, R. MA, AND H.-H. CHEN, “Smart grid neighborhood area networks: A survey”, IEEE Netw., vol. 28, no. 1, pp. 2432, Jan./Fev. 2014.

Y. YANG, “Multi-tier computing networks for intelligent IoT”, Nat Electron, v. 2, pp. 4–5, 2019.

ANEXO A – Dados do sistema testado

Tabela 1 – Valores definidos para os ramos.

RAMO FROM-TO		SWITCH	LENGTH	raa	xaa	rab	xab	rac	xac
136	1	0	0	0	0	0	0	0	0
1	2	0	0	0.38448	0.86481	0.054	0.4302	0.054	0.405
2	3	0	900	0.0542	0.0499	0.003	0.0239	0.003	0.0225
3	4	0	50	0.04272	0.09609	0.006	0.0478	0.006	0.045
3	5	0	100	0.017088	0.038436	0.0024	0.01912	0.0024	0.018
5	6	0	40	0.08544	0.19218	0.012	0.0956	0.012	0.09
6	7	0	200	0.08544	0.19218	0.012	0.0956	0.012	0.09
7	8	0	200	0.08544	0.19218	0.012	0.0956	0.012	0.09
8	9	0	200	0.004272	0.009609	0.0006	0.00478	0.0006	0.0045
9	10	0	10	0.02136	0.048045	0.003	0.0239	0.003	0.0225
10	11	0	50	0.1644	0.1006	0.006	0.0478	0.006	0.045
11	12	1	100	0.09864	0.06036	0.0036	0.02868	0.0036	0.027
12	13	0	60	0.04932	0.03018	0.0018	0.01434	0.0018	0.0135
13	14	0	30	0.26304	0.16096	0.0096	0.07648	0.0096	0.072
14	15	0	160	0.04932	0.03018	0.0018	0.01434	0.0018	0.0135
12	16	0	30	0.01644	0.01006	0.0006	0.00478	0.0006	0.0045
16	17	0	10	0.03288	0.02012	0.0012	0.00956	0.0012	0.009
17	18	0	20	0.06576	0.04024	0.0024	0.01912	0.0024	0.018
18	19	0	40	0.04336	0.03992	0.0024	0.01912	0.0024	0.018
19	20	0	40	0.0542	0.0499	0.003	0.0239	0.003	0.0225
20	21	0	50	0.1626	0.1497	0.009	0.0717	0.009	0.0675
19	22	0	150	0.012816	0.028827	0.0018	0.01434	0.0018	0.0135
11	23	1	30	0.029904	0.067263	0.0042	0.03346	0.0042	0.0315
23	24	0	70	0.0822	0.0503	0.003	0.0239	0.003	0.0225
24	25	0	50	0.03288	0.02012	0.0012	0.00956	0.0012	0.009
25	26	0	20	0.04932	0.03018	0.0018	0.01434	0.0018	0.0135
26	27	0	30	0.06504	0.05988	0.0036	0.02868	0.0036	0.027
27	28	0	60	0.04336	0.03992	0.0024	0.01912	0.0024	0.018
28	29	0	40	0.02168	0.01996	0.0012	0.00956	0.0012	0.009
29	30	0	20	0.13008	0.11976	0.0072	0.05736	0.0072	0.054
30	31	0	120	0.02168	0.01996	0.0012	0.00956	0.0012	0.009
29	32	0	20	0.03288	0.02012	0.0012	0.00956	0.0012	0.009
27	33	0	20	0.00822	0.00503	0.0003	0.00239	0.0003	0.00225
33	34	0	5	0.0411	0.02515	0.0015	0.01195	0.0015	0.01125
34	35	0	25	0.004272	0.009609	0.0006	0.00478	0.0006	0.0045
24	36	0	10	0.029904	0.067263	0.0042	0.03346	0.0042	0.0315
36	37	0	70	0.004272	0.009609	0.0006	0.00478	0.0006	0.0045
37	38	0	10	0.004272	0.009609	0.0006	0.00478	0.0006	0.0045
38	39	0	10	0.029904	0.067263	0.0042	0.03346	0.0042	0.0315
39	40	0	70	0.04272	0.09609	0.006	0.0478	0.006	0.045
39	41	0	100	0.09864	0.06036	0.0036	0.02868	0.0036	0.027
41	42	0	60	0.0822	0.0503	0.003	0.0239	0.003	0.0225
41	43	0	50	0.01644	0.01006	0.0006	0.00478	0.0006	0.0045
43	44	0	10	0.012816	0.028827	0.0018	0.01434	0.0018	0.0135

41	45	0	30	0.017088	0.038436	0.0024	0.01912	0.0024	0.018
45	46	0	40	0.025632	0.057654	0.0036	0.02868	0.0036	0.027
39	47	1	60	0.008544	0.019218	0.0012	0.00956	0.0012	0.009
47	48	0	20	0.051264	0.115308	0.0072	0.05736	0.0072	0.054
48	49	0	120	0.02136	0.048045	0.003	0.0239	0.003	0.0225
49	50	0	50	0.008544	0.019218	0.0012	0.00956	0.0012	0.009
50	51	0	20	0.072624	0.163353	0.0102	0.08126	0.0102	0.0765
51	52	0	170	0.04272	0.09609	0.006	0.0478	0.006	0.045
49	53	0	100	0.09864	0.06036	0.0036	0.02868	0.0036	0.027
53	54	0	60	0.04932	0.03018	0.0018	0.01434	0.0018	0.0135
54	55	0	30	0.21372	0.13078	0.0078	0.06214	0.0078	0.0585
55	56	0	130	0.03288	0.02012	0.0012	0.00956	0.0012	0.009
53	57	0	20	0.13152	0.08048	0.0048	0.03824	0.0048	0.036
57	58	0	80	0.0542	0.0499	0.003	0.0239	0.003	0.0225
58	59	0	50	0.06504	0.05988	0.0036	0.02868	0.0036	0.027
58	60	0	60	0.02168	0.01996	0.0012	0.00956	0.0012	0.009
60	61	0	20	0.017088	0.038436	0.0024	0.01912	0.0024	0.018
49	62	1	40	0.004272	0.009609	0.0006	0.00478	0.0006	0.0045
62	63	0	10	0.02136	0.048045	0.003	0.0239	0.003	0.0225
63	64	0	50	0.022701	0.030201	0.0018	0.01434	0.0018	0.0135
64	65	0	30	0.015134	0.020134	0.0012	0.00956	0.0012	0.009
65	66	0	20	0.022701	0.030201	0.0018	0.01434	0.0018	0.0135
66	67	0	30	0.015134	0.020134	0.0012	0.00956	0.0012	0.009
67	68	0	20	0.04932	0.03018	0.0018	0.01434	0.0018	0.0135
68	69	0	30	0.03288	0.02012	0.0012	0.00956	0.0012	0.009
68	70	0	20	0.03288	0.02012	0.0012	0.00956	0.0012	0.009
70	71	0	20	0.037835	0.050335	0.003	0.0239	0.003	0.0225
68	72	0	50	0.030268	0.040268	0.0024	0.01912	0.0024	0.018
72	73	0	40	0.030268	0.040268	0.0024	0.01912	0.0024	0.018
73	74	0	40	0.015134	0.020134	0.0012	0.00956	0.0012	0.009
74	75	0	20	0.083237	0.110737	0.0066	0.05258	0.0066	0.0495
75	76	0	110	0.008544	0.019218	0.0012	0.00956	0.0012	0.009
64	77	0	20	0.012816	0.028827	0.0018	0.01434	0.0018	0.0135
77	78	0	30	0.02136	0.048045	0.003	0.0239	0.003	0.0225
78	79	0	50	0.029904	0.067263	0.0042	0.03346	0.0042	0.0315
79	80	0	70	0.029904	0.067263	0.0042	0.03346	0.0042	0.0315
80	81	0	70	0.012816	0.028827	0.0018	0.01434	0.0018	0.0135
81	82	0	30	0.012816	0.028827	0.0018	0.01434	0.0018	0.0135
82	83	0	30	0.0822	0.0503	0.003	0.0239	0.003	0.0225
83	84	0	50	0.02136	0.048045	0.003	0.0239	0.003	0.0225
83	85	0	50	0.012816	0.028827	0.0018	0.01434	0.0018	0.0135
85	86	0	30	0.012816	0.028827	0.0018	0.01434	0.0018	0.0135
86	129	0	20	0.008544	0.019218	0.0012	0.00956	0.0012	0.009
129	87	0	30	0.14092	0.12974	0.0078	0.06214	0.0078	0.0585
87	88	0	20	0.002136	0.004805	0.0003	0.00239	0.0003	0.00225
79	89	0	130	0.02136	0.048045	0.003	0.0239	0.003	0.0225
79	90	1	50	0.076896	0.172962	0.0108	0.08604	0.0108	0.081
90	91	0	50	0.008544	0.019218	0.0012	0.00956	0.0012	0.009
91	92	1	180	0.03252	0.02994	0.0018	0.01434	0.0018	0.0135
92	93	0	20	0.07588	0.06986	0.0042	0.03346	0.0042	0.0315
93	94	0	30	0.04272	0.09609	0.006	0.0478	0.006	0.045
93	95	0	70	0.04336	0.03992	0.0024	0.01912	0.0024	0.018

93	96	0	100	0.0542	0.0499	0.003	0.0239	0.003	0.0225
96	97	0	40	0.06504	0.05988	0.0036	0.02868	0.0036	0.027
96	98	0	50	0.18084	0.11066	0.0066	0.05258	0.0066	0.0495
98	99	0	60	0.04336	0.03992	0.0024	0.01912	0.0024	0.018
99	100	0	110	0.11924	0.10978	0.0066	0.05258	0.0066	0.0495
99	101	0	40	0.025632	0.057654	0.0036	0.02868	0.0036	0.027
101	102	0	110	0.017088	0.038436	0.0024	0.01912	0.0024	0.018
96	103	0	60	0.022701	0.030201	0.0018	0.01434	0.0018	0.0135
103	104	0	40	0.113505	0.151005	0.009	0.0717	0.009	0.0675
104	105	0	30	0.158907	0.211407	0.0126	0.10038	0.0126	0.0945
104	106	1	150	0.022701	0.030201	0.0018	0.01434	0.0018	0.0135
106	107	0	210	0.07567	0.10067	0.006	0.0478	0.006	0.045
107	108	0	30	0.1644	0.1006	0.006	0.0478	0.006	0.045
108	109	1	100	0.04932	0.03018	0.0018	0.01434	0.0018	0.0135
109	110	0	100	0.03288	0.02012	0.0012	0.00956	0.0012	0.009
110	111	0	30	0.072624	0.163353	0.0102	0.08126	0.0102	0.0765
111	112	0	20	0.046992	0.105699	0.0066	0.05258	0.0066	0.0495
108	113	0	170	0.18084	0.11066	0.0066	0.05258	0.0066	0.0495
113	114	0	110	0.3288	0.2012	0.012	0.0956	0.012	0.09
114	115	0	110	0.3288	0.2012	0.012	0.0956	0.012	0.09
114	116	0	200	0.3288	0.2012	0.012	0.0956	0.012	0.09
116	117	0	200	0.3288	0.2012	0.012	0.0956	0.012	0.09
117	118	0	200	0.11924	0.10978	0.0066	0.05258	0.0066	0.0495
118	119	0	200	0.029904	0.067263	0.0042	0.03346	0.0042	0.0315
91	120	1	110	0.029904	0.067263	0.0042	0.03346	0.0042	0.0315
120	121	0	70	0.07588	0.06986	0.0042	0.03346	0.0042	0.0315
121	122	0	70	0.21372	0.13078	0.0078	0.06214	0.0078	0.0585
120	123	0	70	0.03288	0.02012	0.0012	0.00956	0.0012	0.009
123	124	0	130	0.03288	0.02012	0.0012	0.00956	0.0012	0.009
124	125	0	20	0.06576	0.04024	0.0024	0.01912	0.0024	0.018
124	126	0	20	0.06576	0.04024	0.0024	0.01912	0.0024	0.018
126	127	0	40	0.008544	0.019218	0.0012	0.00956	0.0012	0.009
127	128	0	40	0.06504	0.05988	0.0036	0.02868	0.0036	0.027
129	130	0	60	0.052969	0.070469	0.0042	0.03346	0.0042	0.0315
105	131	0	70	0.008544	0.019218	0.0012	0.00956	0.0012	0.009
131	132	0	20	0.07567	0.10067	0.006	0.0478	0.006	0.045
131	133	0	100	0.030268	0.040268	0.0024	0.01912	0.0024	0.018
133	134	0	40	0.030268	0.040268	0.0024	0.01912	0.0024	0.018
134	135	0	40	0.030268	0.040268	0.0024	0.01912	0.0024	0.018

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 2 – Valores definidos para os barras.

ID (barra)	pX	pY	pa	pb	pc	qa	qb	qc
1	31	202	0	0	0	0	0	0
2	90	202	0	0	0	0	0	0
3	154	246	0	0	0	0	0	0
4	182	246	13.8	13.8	13.8	5.8788	5.8788	5.8788

5	154	307	0	0	0	0	0	0
6	173	307	23	23	23	9.798	9.798	9.798
7	203	307	23	23	23	9.798	9.798	9.798
8	233	307	34.5	34.5	34.5	14.6969	14.6969	14.6969
9	286	307	23	23	23	9.798	9.798	9.798
10	308	307	23	23	23	9.798	9.798	9.798
11	347	307	0	0	0	0	0	0
12	347	371	0	0	0	0	0	0
13	302	371	2.6375	2.6375	2.6375	1.1235	1.1235	1.1235
14	282	371	23	23	23	9.798	9.798	9.798
15	224	371	23	23	23	9.798	9.798	9.798
16	347	409	34.5	34.5	34.5	14.6969	14.6969	14.6969
17	347	423	13.8	13.8	13.8	5.8788	5.8788	5.8788
18	347	438	34.5	34.5	34.5	14.6969	14.6969	14.6969
19	347	453	0	0	0	0	0	0
20	313	453	23	23	23	9.798	9.798	9.798
21	283	453	34.5	34.5	34.5	14.6969	14.6969	14.6969
22	417	453	34.5	34.5	34.5	14.6969	14.6969	14.6969
23	373	307	34.5	34.5	34.5	14.6969	14.6969	14.6969
24	400	307	0	0	0	0	0	0
25	400	269	0.92	0.92	0.92	0.3919	0.3919	0.3919
26	400	243	13.8	13.8	13.8	5.8788	5.8788	5.8788
27	400	213	0	0	0	0	0	0
28	382	213	34.5	34.5	34.5	14.6969	14.6969	14.6969
29	353	213	0	0	0	0	0	0
30	338	213	23	23	23	9.798	9.798	9.798
31	288	213	34.5	34.5	34.5	14.6969	14.6969	14.6969
32	353	198	34.5	34.5	34.5	14.6969	14.6969	14.6969
33	421	213	34.5	34.5	34.5	14.6969	14.6969	14.6969
34	438	213	34.5	34.5	34.5	14.6969	14.6969	14.6969
35	454	213	34.5	34.5	34.5	14.6969	14.6969	14.6969
36	435	307	0	0	0	0	0	0
37	448	307	3.8025	3.8025	3.8025	1.6199	1.6199	1.6199
38	466	307	34.5	34.5	34.5	14.6969	14.6969	14.6969
39	488	307	0	0	0	0	0	0
40	502	307	0.92	0.92	0.92	0.3919	0.3919	0.3919
41	488	372	0	0	0	0	0	0
42	473	372	23	23	23	9.798	9.798	9.798
43	506	372	23	23	23	9.798	9.798	9.798
44	520	372	23	23	23	9.798	9.798	9.798
45	488	398	34.5	34.5	34.5	14.6969	14.6969	14.6969
46	488	414	13.8	13.8	13.8	5.8788	5.8788	5.8788
47	488	262	0.3065	0.3065	0.3065	0.1306	0.1306	0.1306
48	488	229	34.5	34.5	34.5	14.6969	14.6969	14.6969
49	488	156	0	0	0	0	0	0
50	440	156	34.5	34.5	34.5	14.6969	14.6969	14.6969
51	408	156	23	23	23	9.798	9.798	9.798
52	328	156	34.5	34.5	34.5	14.6969	14.6969	14.6969
53	488	80	0	0	0	0	0	0
54	462	80	0.368	0.368	0.368	0.1568	0.1568	0.1568
55	426	80	34.5	34.5	34.5	14.6969	14.6969	14.6969
56	349	80	23	23	23	9.798	9.798	9.798

57	507	80	23	23	23	9.798	9.798	9.798
58	531	80	0	0	0	0	0	0
59	531	108	3.0665	3.0665	3.0665	1.3064	1.3064	1.3064
60	531	63	34.5	34.5	34.5	14.6969	14.6969	14.6969
61	531	37	1.1655	1.1655	1.1655	0.4964	0.4964	0.4964
62	512	156	0.92	0.92	0.92	0.3919	0.3919	0.3919
63	526	156	1.6865	1.6865	1.6865	0.7185	0.7185	0.7185
64	545	156	0	0	0	0	0	0
65	545	191	23	23	23	9.798	9.798	9.798
66	545	206	23	23	23	9.798	9.798	9.798
67	545	217	1.0735	1.0735	1.0735	0.4572	0.4572	0.4572
68	545	233	0	0	0	0	0	0
69	520	233	34.5	34.5	34.5	14.6969	14.6969	14.6969
70	560	233	2.1465	2.1465	2.1465	0.9145	0.9145	0.9145
71	580	233	34.5	34.5	34.5	14.6969	14.6969	14.6969
72	545	261	23	23	23	9.798	9.798	9.798
73	545	286	2.6065	2.6065	2.6065	1.1104	1.1104	1.1104
74	545	311	0.5825	0.5825	0.5825	0.2482	0.2482	0.2482
75	545	326	34.5	34.5	34.5	14.6969	14.6969	14.6969
76	545	387	34.5	34.5	34.5	14.6969	14.6969	14.6969
77	578	156	34.5	34.5	34.5	14.6969	14.6969	14.6969
78	593	156	1.8095	1.8095	1.8095	0.7708	0.7708	0.7708
79	611	156	0	0	0	0	0	0
80	611	192	23	23	23	9.798	9.798	9.798
81	611	245	34.5	34.5	34.5	14.6969	14.6969	14.6969
82	611	269	34.5	34.5	34.5	14.6969	14.6969	14.6969
83	611	283	0	0	0	0	0	0
84	595	283	23	23	23	9.798	9.798	9.798
85	611	330	23	23	23	9.798	9.798	9.798
86	611	342	34.5	34.5	34.5	14.6969	14.6969	14.6969
87	611	373	4.7535	4.7535	4.7535	2.0249	2.0249	2.0249
88	611	385	23	23	23	9.798	9.798	9.798
89	611	92	23	23	23	9.798	9.798	9.798
90	639	156	23	23	23	9.798	9.798	9.798
91	665	156	0	0	0	0	0	0
92	665	258	13.8	13.8	13.8	5.8788	5.8788	5.8788
93	665	285	0	0	0	0	0	0
94	648	285	34.5	34.5	34.5	14.6969	14.6969	14.6969
95	701	285	7.2065	7.2065	7.2065	3.07	3.07	3.07
96	665	359	0	0	0	0	0	0
97	650	359	23	23	23	9.798	9.798	9.798
98	709	359	1.84	1.84	1.84	0.7838	0.7838	0.7838
99	724	359	0	0	0	0	0	0
100	741	333	7.2065	7.2065	7.2065	3.07	3.07	3.07
101	748	359	23	23	23	9.798	9.798	9.798
102	782	359	34.5	34.5	34.5	14.6969	14.6969	14.6969
103	665	390	34.5	34.5	34.5	14.6969	14.6969	14.6969
104	665	438	0	0	0	0	0	0
105	628	438	23	23	23	9.798	9.798	9.798
106	730	442	23	23	23	9.798	9.798	9.798
107	772	472	33.2735	33.2735	33.2735	14.1744	14.1744	14.1744
108	808	475	0	0	0	0	0	0

109	796	520	0	0	0	0	0	0
110	847	537	33.2735	33.2735	33.2735	14.1744	14.1744	14.1744
111	878	546	34.5	34.5	34.5	14.6969	14.6969	14.6969
112	899	557	34.5	34.5	34.5	14.6969	14.6969	14.6969
113	837	387	23	23	23	9.798	9.798	9.798
114	829	339	0	0	0	0	0	0
115	809	292	0	0	0	0	0	0
116	870	320	9.2	9.2	9.2	3.9192	3.9192	3.9192
117	901	315	9.2	9.2	9.2	3.9192	3.9192	3.9192
118	930	315	9.2	9.2	9.2	3.9192	3.9192	3.9192
119	958	315	9.2	9.2	9.2	3.9192	3.9192	3.9192
120	747	156	0	0	0	0	0	0
121	758	182	9.2	9.2	9.2	3.9192	3.9192	3.9192
122	763	198	16.8665	16.8665	16.8665	7.1852	7.1852	7.1852
123	775	123	0	0	0	0	0	0
124	724	92	0	0	0	0	0	0
125	736	67	4.7535	4.7535	4.7535	2.0249	2.0249	2.0249
126	726	51	4.7535	4.7535	4.7535	2.0249	2.0249	2.0249
127	738	31	13.8	13.8	13.8	5.8788	5.8788	5.8788
128	748	11	34.5	34.5	34.5	14.6969	14.6969	14.6969
129	611	357	0	0	0	0	0	0
130	590	357	13.8	13.8	13.8	5.8788	5.8788	5.8788
131	601	438	0	0	0	0	0	0
132	601	420	34.5	34.5	34.5	14.6969	14.6969	14.6969
133	549	438	0	0	0	0	0	0
134	549	449	34.5	34.5	34.5	14.6969	14.6969	14.6969
135	549	462	34.5	34.5	34.5	14.6969	14.6969	14.6969
136	31	202	34.5	34.5	34.5	14.6969	14.6969	14.6969

Fonte: Elaborado pelo autor.