LVI SBPO SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL
DE 04 ATÉ 07 NOVEMBRO 2024
FORTALEZA | CEARÁ

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

Leonardo Fontolan, Wilson Enrique Chumbi Quito, e Jônatas Boás Leite
Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual Paulista – UNESP
Av. Prof. José Carlos Rossi, 1370, Ilha Solteira, São Paulo, CEP 15.385-000
e-mail (leonardo.fontolan@unesp.br, enrique.quito@unesp.br, jb.leite@unesp.br)

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 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, são obtidas e comparadas, em que a arquitetura multicamadas é obtida de forma otimizada com o método da bisseção e o algoritmo k-means. O ganho na latência com a arquitetura multicamadas atingiu 80 %.

PALAVRAS CHAVE. Redes Inteligentes; Internet das Coisas; arquitetura em múltiplas camadas; latência de transmissão.

Tópicos (EN&PG – PO na Área de Energia, Petróleo e Gás, PM – Programação Matemática)

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 support 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 number 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, are developed and obtained to compare and determine the best architecture. The gain in latency with the multilayer architecture reaches 80%.

KEYWORDS. Smart Grids; Internet of Things; multilayer architecture; transmission latency.

Paper topics (EN&PG – PO in the Energy, Oil and Gas Area, PM – Mathematical Programming)

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193642
https://proceedings.science/p/193642?lang=en

1. Introdução

No sistema de potência tradicional, 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 é responsável pela produção de eletricidade. 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 o fornecimento de energia elétrica conforme as necessidades dos consumidores, respeitando as restrições dos sistemas de potência.

O sistema de energia elétrica tradicional funcionou bem desde sua criação em 1870 até 1970 (Collier, 2017), período em que a demanda de energia era bastante previsível. No entanto, desde de 1970, vem acontecendo uma mudança 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 uma crescente exigência por confiabilidade e segurança, fontes de energia renováveis emergentes e problemas de transição da infraestrutura.

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 utiliza diversos dispositivos para monitorar, analisar e controlar a rede. Tais dispositivos de monitoramento são instalados em usinas de energia, linhas e torres de transmissão, centros de distribuição e unidades consumidoras, totalizando centenas de milhões ou até bilhões, de unidades. 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 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 conectadas à Internet, 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. Esse comportamento é necessário às RIs (Meng, et al., 2014).

A RI é considerada uma das maiores aplicações da IdC. Hoje, embora muitos dispositivos domésticos estarem conectados à Internet, ainda existe uma grande quantidade que não está. Por exemplo, o número de fornos de micro-ondas e máquinas de lavar conectados à Internet é muito menor que aqueles não conectados. Conectar os dispositivos que usam eletricidade à Internet permitiria operá-los remotamente e fora dos horários de pico, economizando custos e proporcionando conforto através da automação. Padronizar a tecnologia IdC para as comunicações e como base para RI, cria novas oportunidades para futuras inovações.

Este trabalho 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*

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193642
https://proceedings.science/p/193642?lang=en

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. A implementação do algoritmo de agrupamento *K-means*, conjuntamente com o método da bisseção, determina a quantidade ideal de agrupamentos para minimizar a latência de transmissão na arquitetura IdC em multicamadas.

2. Digitalização do Sistema Elétrico de Potência

No sistema elétrico de potência, o sistema de geração é responsável por coletar e converter energia primária em energia elétrica. Essa conversão pode ser realizada por meio de diversas fontes, como usinas hidroelétricas, termoelétricas, nucleares, solares, entre outras. Particularmente, no Brasil a matriz de geração energética é predominantemente hidráulica, sendo que essa representa mais de 60% da matriz energética nacional (ONS, 2023).

As linhas de transmissão, também conhecida como rede básica, consistem em linhas aéreas de transmissão que operam entre 230kV e 750kV em corrente alternada e de até 800kV em corrente contínua. Essa rede de alta tensão compõe uma malha que interliga usinas e subestações, conectando-as às cargas consumidoras. Atualmente, a rede básica de transmissão possui aproximadamente 180 mil quilômetros de linhas de transmissão, e segundo estimativas da ONS a previsão é que até o ano de 2027 a rede básica de transmissão tenha mais de 270 mil quilômetros de linhas, o que significa um aumento de aproximadamente 50% na malha de transmissão (ONS, 2023).

As redes de distribuição operam com tensões trifásicas de 13,8 kV até 34,5 kV, essas são denominadas de alimentadores. Na rede de distribuição há a presença de transformadores que abaixam a tensão dos alimentadores para os níveis de consumo em 380 V, 220 V ou 127 V, que são normalmente trifásicos, mas podem existir, em algumas localidades, transformadores monofásicos.

Em uma estrutura hierárquica de geração de energia, o topo da cadeia é o responsável pelo fornecimento a incontáveis consumidores através de um fluxo unidirecional de energia, no qual os consumidores não passam de agentes passivos na cadeia. Para tornar o sistema elétrico mais acessível, confiável e moderno, é necessário que um novo modelo de geração seja implementado com geração centralizada e descentralizada, para passar os usuários de meros passivos, a consumidores e possivelmente produtores de energia elétrica, transformando assim a rede em uma rede inteligente (do Inglês, *Smart Grid*).

O conceito de RI parte do princípio de melhora no monitoramento e gerenciamento da energia e transmissão de dados ao longo da estrutura de transmissão e distribuição da eletricidade, tornando o que era uma rede unidirecional, uma via bidirecional de transmissão de dados capaz de melhorar a performance do sistema. A Figura 1 apresenta as melhorias do sistema com a digitalização das estruturas.

A digitalização moderniza, automatiza e inova os sistemas de administração da rede de energia, permitindo maior controle de dados em tempo real tanto para a distribuidora e comercializadoras, quanto para os consumidores (Galloti, 2021; Soutar, 2021). Há ainda grandes desafios no desenvolvimento de dispositivos inteligentes, sistema de comunicação, segurança cibernética, gerenciamentos de dados e de softwares que merecem atenção e estudo (Bishnoi & Chaturvedi, 2021).

2.2. Internet das Coisas (IdC)

A implementação das RIs baseia-se na interconexão do sistema, e para isso, os dispositivos IdC, ou IoT (do Inglês, *Internet of Things*) caracterizam-se como os mais aptos para as tarefas. Dispositivos IdC são dispositivos capazes de conectar-se à 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,

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193642
https://proceedings.science/p/193642?lang=en

possibilitando assim, um aumento de produtividade, diminuição de custos operacionais e maior rapidez na verificação e correção de falhas.

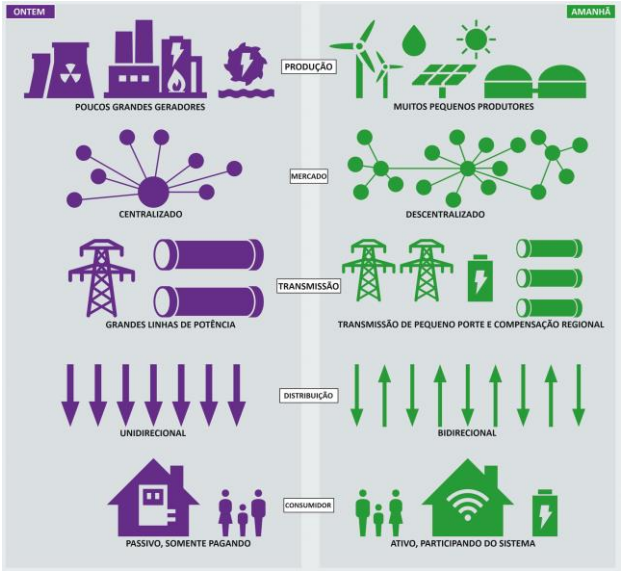


Figura 1. Mudanças na estrutura do sistema elétrico de potência com a digitalização.

A tecnologia IdC fornece uma interação em tempo real através da conexão de rede para os usuários e dispositivos por diferentes tecnologias de comunicação. Ela fornece energia aos equipamentos, e opera de forma bidirecional e em alta velocidade compartilhando múltiplas aplicações, o que aumenta a eficiência geral da RI (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. Isso permite 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).

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 2 é apresentado o *broker* em uma rede de sensores.

As vantagens do protocolo MQTT são nítidas para quem deseja um fluxo de dados mais amplo e a possibilidade de conectar várias máquinas e sensores ao mesmo tempo. Codificação mais simples, permite que o protocolo funcione mesmo em sistemas pouco modernos ou com falhas de armazenamento. Além disso, ele é 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 sobrecarregado 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

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193642
https://proceedings.science/p/193642?lang=en

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).

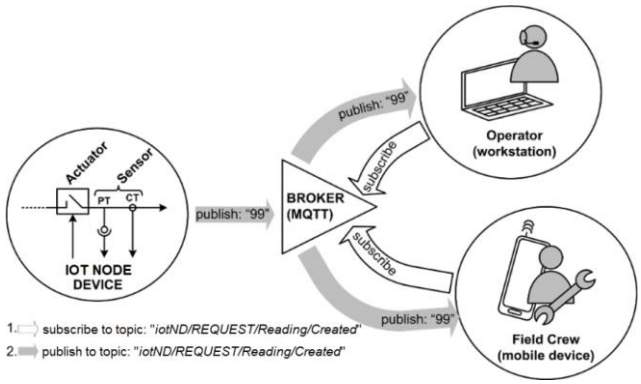


Figura 2. Arquitetura convencional IoT.

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 3.

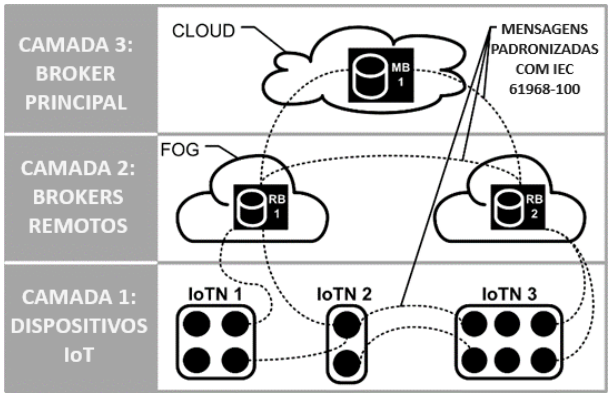


Figura 3. Conexão de clientes MQTT usando a arquitetura multicamadas da IdC com mensagens baseadas no padrão IEC 61968-100.

A camada um hospeda os dispositivos do nó IdC próximos à rede elétrica, ou processo de energia. Eles 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 (Leite & Kezunovic, 2023).

3. Formação da Arquitetura Multicamadas

Nesta seção, apresentam-se os métodos propostos para determinar a latência na plataforma convencional de IdC e determinar a mínima latência em uma plataforma IdC em multicamadas. Primeiramente, é apresentado o algoritmo do *K-means* utilizado para clusterização da rede usando os dados de posicionamento geográfico das barras. Então, 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.

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193642
https://proceedings.science/p/193642?lang=en

3.1. Algoritmo K-means

Uma 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 centroide, que é um centro de cada agrupamento (*cluster*), de tal forma que o centroide 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 $\boldsymbol{C}$ ótima definida em (01), dividindo um conjunto de dados em k grupos não sobrepostos. Seja $\boldsymbol{X} = \{x_i|, i = 1,2,..,n\}$ um conjunto de dados n-dimensional e o parâmetro único k. Cada grupo $\boldsymbol{C}_j$ engloba um conjunto de amostras tal que a soma das distâncias euclidianas seja minimizada.

$$\boldsymbol{C} = \bigcup_{j=1}^{k} \boldsymbol{C}_j \tag{01}$$

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).

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

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.

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

$$m_j^t = \frac{1}{|C_j^t|} \sum_{x_i \in \boldsymbol{C}_j} x_i \tag{04}$$

Na Figura 04, temos dois exemplos de clusterização de dados, organizados através do algoritmo do k-means, pode-se observar os diferentes agrupamentos e cada centroide construído dentro de cada cluster com base na menor distância euclidiana entre as amostras e o centroide.

Na utilização do algoritmo do *K-means*, é necessário encontrar os valores mínimos e máximos dos eixos X e Y, X_{max}, X_{min}, Y_{max} e Y_{min}, para determinar as posições iniciais dos k centroides conforme (05) e (06).

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193642
https://proceedings.science/p/193642?lang=en

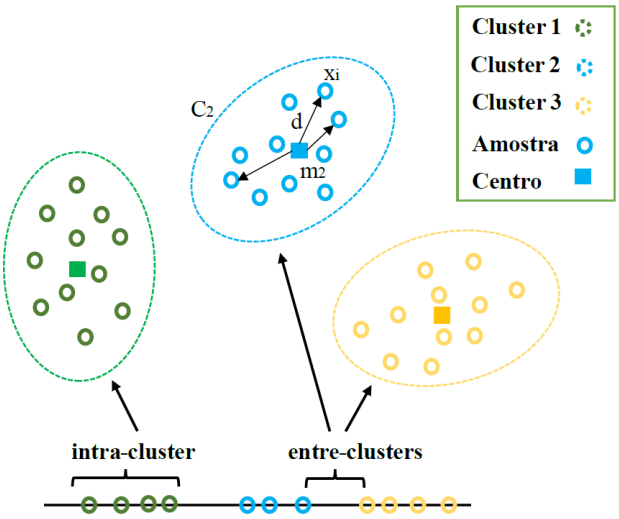


Figura 4. Identificação de três agrupamentos baseado no método *K-means* (Quito, et al., 2022).

$$m_{X,j}^{0} = X_{min} + \frac{(X_{max} - X_{min})}{k+1} * j, \;\; para\, j = 1, 2, \ldots, k \tag{05}$$

$$m_{Y,j}^{0} = Y_{min} + \frac{(Y_{max} - Y_{min})}{k+1} * j, \;\; para\, j = 1, 2, \ldots, k \tag{06}$$

Com o algoritmo *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. 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 utilização de *brokers* remotos.

3.2. 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).

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

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193642
https://proceedings.science/p/193642?lang=en

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).

$$\overline{\lambda_{t_C}} = \sum (l_{\delta}^{\Phi} + l_{\Phi}^{\delta}) \tag{08}$$

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.

$$\lambda_t^{\square} = \frac{\overline{\lambda_t} + \tau}{n} \tag{09}$$

3.2. 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 da rede de distribuição, é necessário que a quantidade de *clusters* seja tal que os somatórios das distâncias sejam minimizados, e para isso, é possível implantar um método de eliminação de programação não linear, particularmente o método da bisseção.

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 $[a, c]$ e $[c, b]$, e assim sequencialmente até que a condição de parada seja atingida (Conte, 1965).

No caso em estudo, o método da bissecção é adicionado para verificar valores no intervalo de quantidade de centroides. A menor divisão possível da rede de distribuição é para o número inteiro dois, i.e. $a = 2$, e a divisão máxima possível é considerada aquela em que cada barra é um centroide de seu próprio *cluster*, $b = n$. O critério de parada analisado é o menor valor para a distância total, $D_t(\cdot)$, 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, conforme o pseudocódigo no Algoritmo 1. Assim, calculam-se as latências: convencional e multicamadas, através de (07) e (08), respectivamente. Com os valores de latências para ambas as arquiteturas multicamadas e convencional, calculam-se as latências médias, como em (09).

3. Resultados e Discussões

Na comparação entre as latências na arquitetura convencional e multicamadas da plataforma IcD, é utilizado uma rede de distribuição trifásica desbalanceado de 13,8 kV com 136 barras (LAPSEE, 2023). A topologia da rede de distribuição é apresentada na Figura 5, que segue 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.

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193642
https://proceedings.science/p/193642?lang=en

Algoritmo 1 – Determinação do número ótimo de *clusters* na arquitetura multicamadas

```
SEJAM: a=2 e b=n
EXECUTE: K-means(a) e K-means(b) # divisão da rede em a e b clusters
CALCULE: Dt(a), Dt(b) e ΔD=Dt(a) – Dt(b) # distâncias totais
ENQUANTO ΔD > 0
  c ← (a + b)/2 # novo ponto médio
  EXECUTE: K-means(c) # divisão da rede em c clusters
  SE Dt(a) < Dt(b) ENTÃO
    CALCULE: Dt(c) e ΔD=Dt(a) – Dt(c) # distâncias totais
    k ← a
    b ← c
  SENÃO
    CALCULE: Dt(c) e ΔD=Dt(b) – Dt(c) # distâncias totais
    k ← b
    a ← c
  FIM SE
FIM ENQUANTO
RETORNE: k # número ótimo de clusters
```

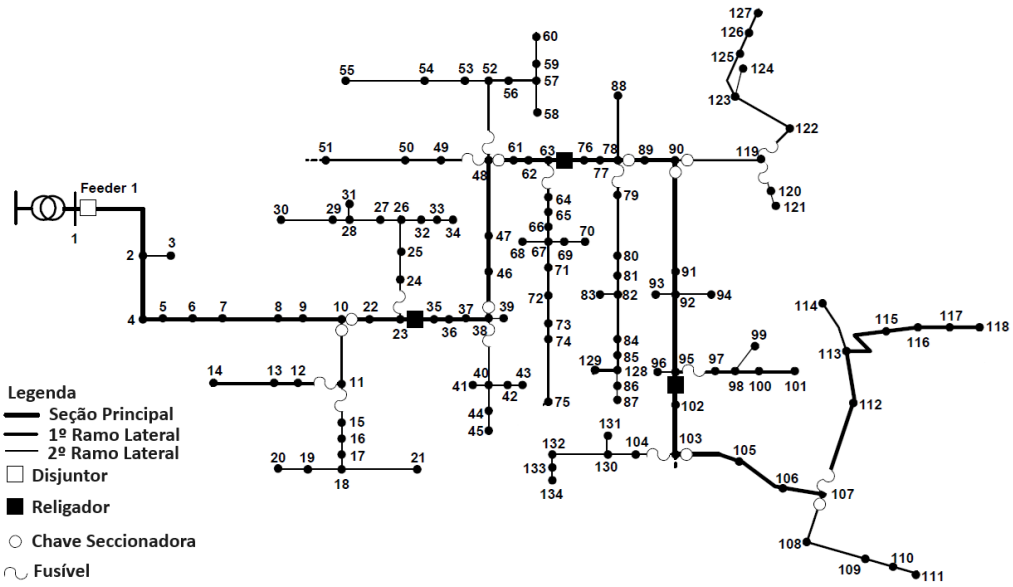


Figura 5. Topologia do sistema teste de 136 barras radial.

Para os cálculos de cada arquitetura do IdC, 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 das coordenadas (x_i, y_i) de cada barra da rede, determinaram-se os limites mínimo e máxima das coordenadas nos eixos X e Y, assim como a coordenada da barra raiz, onde está alocado 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

	Mínima Posição	Máxima Posição	Barra Raiz (*broker* principal)
Eixo X (m)	31	958	31
Eixo Y (m)	11	557	202

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193642
https://proceedings.science/p/193642?lang=en

4.1. Arquitetura Convencional

Com a posição 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 e retorno. Os dados para o somatório das distâncias entre as barras (sensores/clientes) e a barra raiz (*broker* principal) encontram-se na Tabela 2.

Tabela 2 – Somatório das distâncias e latências na arquitetura convencional.

Somatório dos percursos (km)	71,21
Somatório das Latências (ms)	0,57
Latência média (μs)	4,25

No cálculo das latências, assume-se um atraso de propogação igual à 4 μs/km para sistema de comunicação terrestre via radio (ITUT,G.114, 2003). A partir do valor do somatório das latências e, utilizando (09), calcula-se a latência média convencional para cada barra.

4.2. Arquitetura Multicamadas

Com o Algoritmo 1, obtém-se o um número ideal de clusters, no caso $k = 12$. As coordenadas de cada cluster são exibidos na Tabela 3. Para melhor visualização, foi montado o gráfico da Figura 6 com posições das barras e dos centroides de cada *cluster*.

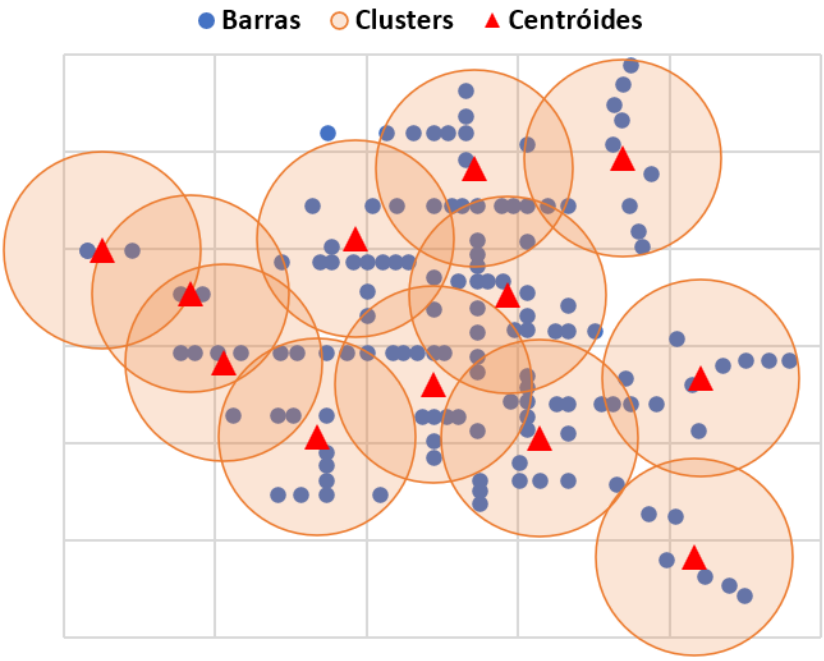


Figura 6. Clusterização do sistema teste de 136 barras radial.

Para o cálculo da latência na arquitetura multicamadas, os *brokers* remotos são alocados nos centroides dos *clusters*. Dessa forma, as distâncias foram calculadas e, utilizando as coordenadas 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 somatórios dessas distâncias são apresentados na quarta e quinta coluna da Tabela 3, respectivamente.

Utilizando o somatório das distâncias calculadas na Tabela 3, obteve-se a distância total do percurso dos dados para a latência multicamadas. Para calcular a latência multicamadas, deve-se considerar o percurso de ida e retorno dos dados mais o atraso de propagação. A partir do valor de latência multicamadas, utilizando (09), calculou-se a latência média multicamadas para cada barra, como apresentado na Tabela 4.

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193642
https://proceedings.science/p/193642?lang=en

Tabela 3 – Coordenadas de cada centroide e somatórios das distâncias.

Cluster	Posição X	Posição Y	Barras → Centroide (m)	Centroide → Barra Raiz (m)
0	50,67	202,00	59,00	19,67
1	168,00	246,00	28,00	143,89
2	212,17	317,67	266,43	214,94
3	335,38	393,54	797,33	359,63
4	386,12	190,12	988,17	355,32
5	489,06	339,25	872,19	478,18
6	542,75	116,75	965,80	518,80
7	586,10	247,74	1.094,73	556,99
8	627,89	394,47	1.175,79	627,16
9	738,00	106,70	640,16	713,39
10	840,5	333,40	683,80	820,10
11	833,33	517,83	316,53	862,26

Tabela 4 – Somatório das distâncias e latências na arquitetura multicamadas.

Somatório dos percursos (km)	13,56
Somatório das Latências (ms)	0,11
Latência média (μs)	0,81

Comparando os valores de latências nas Tabelas 2 e 3, o ganho com a arquitetura multicamadas é de 80% em relação a arquitetura convencional. 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.

4. Considerações Finais

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 aprimoramento 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.

A utilização do algoritmo de otimização fundamentado no método de clusterização *K-means* fez-se válido e preciso na obtenção de um número ideal 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, da perspectiva da confiabilidade e velocidade. Em trabalhos futuros, o algoritmo desenvolvido deve ser integrado ao supervisório do sistema avançado de gerenciamento de distribuição através de interfaces de visualização com sistema de informação geográfica. Desta forma, dados georreferenciados das redes de distribuição de grande porte podem contribuir para assegurar o desempenho do método proposto.

Referências

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.

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193642
https://proceedings.science/p/193642?lang=en

R. Deng, Z. Yang, M. Chow, e 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

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

C. Wang, X. Li, Y. Liu, e 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.

W. Meng, R. Ma, e H.-H. Chen, "*Smart grid neighborhood area networks: A survey*", IEEE Netw., vol. 28, no. 1, pp. 2432, Jan./Fev. 2014.

Operador Nacional do Sistema – ONS. Evolução da Capacidade Instalada no SIN – maio/2023 a dezembro/2027, 2023. Disponível em: https://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-sistema-em-numeros.

Gallotti, V. D. M. Redes de energia elétrica inteligentes (*Smart grids*). Research, Society and Development, v. 10, n. 9, p. e30010918322-e30010918322, 2021.

Soutar I. *Dancing with complexity: Making sense of decarbonisation, decentralisation, digitalisation and democratisation*. Energy Research & Social Science, v. 80, p. 102230, 2021.

Bishnoi, D & Chaturvedi H. *A Review on Emerging Trends in Smart grids Energy Management Systems*. Carbon, v. 60, p. 65, 2020.

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.

Y. Yang, "*Multi-tier computing networks for intelligent IoT*", Nat Electron, v. 2, pp. 4–5, 2019.

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.

Noel, S., Yasir, C. "*Internet of Things-aided Smart Grid: Technologies, Architectures, Applications, Prototypes, and Future Research Directions*" 2019 IEEE, pp 1-39, 2019.

Leite, J. B.; Kezunovic, M. *Integrating IoT Devices with Distribution Energy Management System by Harmonizing Their Logical Models Using IEC Standards 61970/61968 and 61850*. In: 2023 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM), Orlando, EUA, 2023. p. 1.

Vanderplas, J. *Python Data Science Handbook: "Essential Tools for Working with Data"*. O'Reilly Media. 2016. Disponível em: https://books.google.com.ec/books?id= 6omNDQAAQBAJ. Acesso em 23 de junho de 2023.

Meehan, B. "*GIS for Enhanced Electric Utility Performance*". Power Engineering. Artech House. 2013. Disponível em: https://books.google.com.ec/books?id=-wEgAgAAQBAJ. 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.

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

Laboratório de Planejamento de Sistemas de Energia Elétrica—LAPSEE, "Distribution Test System—363 Buses" (2023). Available online: http://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/Engenhariaeletrica/lapsee807/home/distribution_network_363_lines.rar. Acessado:2023-27-03.

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193642
https://proceedings.science/p/193642?lang=en