

## IoT no Monitoramento de Transformadores de Distribuição de Energia Elétrica: uma revisão sistemática

Rafael A. Sales-Júnior<sup>1,2</sup>, Josileudo R. de Freitas<sup>1</sup>, Jarbas N. Vidal-Filho<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laboratório de Pesquisa, Inovação e Software (LAPIS) – Instituto Federal de Educação Ceará (IFCE) – *campus* Tabuleiro do Norte  
62.960-000 – Tabuleiro do Norte – CE – Brasil

<sup>2</sup>Instituto Federal do Ceará – *campus* Limoeiro do Norte  
62.930-000 – Limoeiro do Norte – CE – Brasil

rafaeljunior333@hotmail.com, josileudorodrigues75@gmail.com,  
jarbas.vidal@ifce.edu.br

**Abstract.** *The present work goal to investigate the application of methods for monitoring distribution transformers in order to assist in the preparation of maintenance plans. The methods analyzed in this work were applications of Internet of Things (IoT) in smart grids, intelligent transformers and common predictive maintenance systems. A comparative analysis is presented aiming at a qualitative study for the idealization of a single system, which combines the best characteristics of each studied system. Through the results discussed, we seek to formalize an IoT solution to solve monitoring problems in transformers and, consequently, assist in maintenance plans.*

**Resumo.** *O presente trabalho tem como objetivo investigar a aplicação de métodos de monitoramento de transformadores de distribuição com o intuito de auxiliar na elaboração de planos de manutenção. Os métodos analisados neste trabalho foram aplicações de Internet of Things (IoT) em redes inteligentes, transformadores inteligentes e sistemas comuns de manutenção preditiva. Uma análise comparativa é apresentada visando um estudo qualitativo para a idealização de um sistema único, que combine as melhores características de cada sistema estudado. Por meio dos resultados discutidos, busca-se formalizar uma solução de IoT para resolver problemas de monitoramento em transformadores, e consequentemente, auxiliar nos planos de manutenção.*

**Keywords:** Transformadores de Distribuição de Energia Elétrica; *Internet of Things*; Redes de Distribuição de Energia

### 1. Introdução

Inventados em 1831 por Michael Faraday, e baseados nos princípios do eletromagnetismo, os Transformadores de Distribuição de Energia Elétrica (TDEE) são dispositivos que atuam em redes de distribuição controlando os níveis de tensão e corrente, mantendo uma frequência constante e potência desejada (FRAGOSO, 1993).

Porém, desde a criação da primeira rede de energia elétrica não se tinha ocorrido inovações tão significativas na maneira como a energia é fornecida ao consumidor. Com o passar dos anos, as redes de energia elétrica passaram por transformações, tais como: o uso de novos materiais nas linhas de transmissão como, por exemplo, cabos de cobre em redes de baixa tensão e óleo mineral na refrigeração de transformadores e, implementação de novos planos de manutenção. No século 21, as transformações continuam a ocorrer com o surgimento das redes elétricas inteligentes.

Segundo (AMIN e MASSOD, 2005), Redes Elétricas Inteligentes (REIs), do inglês *Smart Grid* (SG), introduzem um conceito que representa o novo paradigma do setor elétrico. Esse paradigma aborda a necessidade de tornar o sistema de entrega de energia mais interativo e eficiente. Além disso, incorpora diferentes fontes de energia na rede, tais como: fontes geradoras descentralizadas, renováveis e intermitentes, introduz novos consumidores como, por exemplo, veículos elétricos, e melhora a eficiência e o próprio dimensionamento da rede.

De acordo com (ROUSE, 2020) Internet das Coisas (do inglês, *Internet of Things* - IoT) é um termo sistemático relacionado à ciência da computação, onde vários objetos estão inter-relacionados como, por exemplo, máquinas mecânicas e digitais, objetos ou pessoas, estes podem ser conectados através de uma rede de computadores, sem a necessidade de interferência humana (ver Figura 1).



**Figura 1: Representação do fluxograma de IoT.** (Mulheres programando, 2020)

Conforme apresentado na Figura 1, IoT é uma inovação que auxilia em várias aplicações como, por exemplo, residenciais, saúde e indústria 4.0, e para essas atividades utiliza sensores, atuadores e medidores inteligentes. Segundo (BERNARDO *et al.*, 2019), o uso de IoT melhora os processos já existentes como, por exemplo, manutenção preventiva e preditiva, monitoramento e medição dos dispositivos, interface de comunicação com fio e sem fio, comunicação unidirecional ou bidirecional e protocolos de comunicação, possibilitando a aceleração de processos.

No Brasil, os TDEEs ainda não possuem monitoramento de forma inteligente, o que pode prejudicar a distribuição de energia elétrica. Por exemplo, a falta de monitoramento influencia diretamente na qualidade da distribuição de energia elétrica, e normalmente, gera transtornos à população devido às avarias geradas. Essa falta de monitoramento adequado acaba também por aumentar os custos com manutenções preditivas, preventivas e corretivas.

Por meio de uma análise comparativa, este estudo tem como objetivo investigar pesquisas técnicas ou científicas que utilizam algum método de monitoramento e manutenção de TDEE, cuja a finalidade é formular uma solução única considerando as particularidades de cada trabalho analisado. Além disso, busca-se também garantir um maior desempenho relacionado à qualidade e à velocidade na manutenção de TDEE. Por fim, abordou-se as diferenças entre os sistemas atuais e aqueles que possam utilizar IoT no futuro.

## **2. Trabalhos Relacionados**

Atualmente, existem diversas pesquisas sobre monitoramento de TDEE, estas englobam desde a concepção de novos materiais como, por exemplo, supercondutores e supercapacitores, até a implementação de dispositivos que utilizam IoT. As pesquisas focam em diferentes abordagens como, por exemplo, o planejamento de um plano de manutenção com novos métodos de monitoramento. Esta seção aborda alguns conceitos básicos e trabalhos relacionados.

### **2.1. Redes Inteligentes Monitorada por IoT**

O monitoramento de redes elétricas sempre foi algo requisitado pelas concessionárias de energia elétrica, pois o monitoramento fornece dados de tensão, corrente e temperatura. Esses dados são imprescindíveis para analisar as condições dos diversos equipamentos usados, além de determinar possíveis paradas para manutenções preventivas ou corretivas. Entretanto, a utilização da tecnologia LoRaWAN representa uma alternativa bastante atrativa, pois adota padrões abertos e interoperáveis (BERNARDO *et al.*, 2019).

Em (BERNARDO *et al.*, 2019) há o uso de IoT em uma aplicação onde é proposto um software genérico para se adaptar a diversos ambientes de monitoramento. Nesse software, diversos sensores poderão ser implementados para o monitoramento. Para isso foi utilizada a plataforma ARM mbed OS por ser um sistema operacional embarcado de código aberto, e que possui drivers para diferentes tipos de comunicação. Esse software é utilizado no monitoramento de redes elétricas comuns, pois há variáveis que podem ser monitoradas em um campo flexível, e aceita a inclusão de novas variáveis.

### **2.2. Topologia para Transformador de Potência Aplicado Em Redes Inteligentes**

O aumento da demanda por eletricidade e a integração da geração distribuída aos sistemas de energia são elementos que afetam significativamente a regulação da tensão. Além disso, problemas de qualidade de energia como, por exemplo, afundamentos de tensão e elevação da tensão, serão menos aceitáveis. A partir desse entendimento, aplicações de IoT em TDEE estão buscando minimizar ou prevenir esses problemas por meio do monitoramento de tensão e corrente. Além da regulação de tensão, o transformador inteligente pode melhorar o gerenciamento dos sistemas de distribuição como, por exemplo, permitindo a atuação direta sobre os comutadores de derivação em carga do TDEE, monitorando as variáveis (tensão e corrente), avaliando as taxas de carregamento do TDEE, planejamento de expansões, manutenção e substituição de transformadores (QUEVEDO *et al.*, 2014)

Vale ressaltar que são necessárias basicamente duas estruturas de comunicação nessa rede: uma comunicação entre sensores e equipamentos elétricos, tais como medidores inteligentes, e uma outra comunicação entre os dispositivos e o data center (GUNGOR *et al.*, 2011).

### **2.3. Sistema de Monitoramento Descentralizado**

O sistema de monitoramento baseado em arquitetura descentralizada geralmente é constituído de *Intelligent Electronic Devices* (IEDs). Estes são dispositivos micro controlados de alta confiabilidade. Cada IED é um conjunto de sensor e IHM, que provê inteligência e funcionalidade no próprio dispositivo (ARAÚJO *et al.*, 2007). Eles possuem todas as características que os sistemas de proteção e supervisão utilizam, tais como: contatos secos e saídas analógicas, e também, portas de comunicação serial, que utilizam protocolos de comunicação RS-485 e Modbus. Porém, nesses sistemas não há um centralizador (ARAÚJO *et al.*, 2007), logo pode-se ter os dados necessários para o sensoriamento e supervisão usuais, além dos dados que estão sendo monitorados por um software. A ideia é evitar dependência de falhas entre sistemas, algo que ocorre nos sistemas mais comuns.

Todavia, o principal empecilho deste sistema está no custo dos sensores IED's, que são relativamente mais caros que os sensores comuns. Entretanto, esses sensores apresentam um benefício significativo, pois possibilitam o armazenamento das informações coletadas em um banco de dados, o que não ocorre nos sistemas centralizados, visto que o monitoramento ocorre em tempo real, mas as informações não são armazenadas.

### **2.4. Manutenções Preditivas**

As manutenções baseiam-se em um conjunto de medidas e ações técnicas que objetivam a preservação e o bom desempenho dos equipamentos (AZEVEDO *et al.*, 2009). As técnicas de manutenções preditivas mais comuns são conhecidas como não invasivas e sem desligamentos. As mais aplicadas em TDEE são: as Análise de Gases Dissolvidos em Óleo (AGD), Análises Físico-Químicas (FQ), detecção de Descargas Parciais (DPs) pelo método de Emissão Acústica (EA). Dentre os parâmetros de monitoramento mais comuns tem-se a tensão, corrente, vibração e temperatura como os parâmetros de monitoramento mais comuns entre elas.

Em (MARQUES *et al.*, 2013), foi observado um estudo de caso de manutenção preditiva. Nesse tipo de manutenção, a obtenção de dados é realizada apenas no momento da vistoria dos equipamentos. A vistoria é marcada com uma periodicidade específica em razão dos custos de deslocamento da equipe e os custos adicionais para treinamento da mesma.

A manutenção tradicional é feita de forma padronizada. Os técnicos analisam a periodicidade de manutenção dos TDEE, que se concentra basicamente no quesito de substituição de peças como, por exemplo, se há parafusos soltos, se o óleo está em um

estado aproveitável e se existem pontos isoladores. Portanto, uma manutenção inteligente pode minimizar uma grande parte dos problemas.

### 3. Análise Comparativa De Aplicações Para Monitoramento De TDEE

Nesta seção, buscou-se realizar um estudo comparativo entre as principais abordagens encontradas na literatura. Buscou-se considerar os principais aspectos relacionados à manutenção dos TDEE. As Tabelas 1 e 2 apresentam uma análise qualitativa dos sistemas de monitoramento de TDEE estudados. Os sistemas utilizam diferentes tecnologias como, por exemplo, IoT, sensores IEDs, sensores de tensão e corrente. Os trabalhos investigados utilizam sistemas de baixa, média ou alta complexidade. As Tabelas 1 e 2 apontam as principais características identificadas na comparação dos trabalhos estudados.

**Tabela 1. Análise de parâmetros de equipe e metodologia utilizada nos sistemas de monitoramento de TDEE (Autor: próprio)**

<b>Características</b>	<b>Redes Elétricas Inteligentes</b>	<b>Manutenção Preditiva</b>	<b>Sistema Descentralizado</b>	<b>Transformador es Inteligentes</b>
Deslocamento de Equipe	Deslocamento apenas para instalação dos equipamentos	Deslocamento constante para cada sensoramento	Deslocamento apenas para instalação dos equipamentos	Deslocamento apenas para a instalação dos equipamentos
Metodologias	Monitoramento por IoT	Monitoramento por sensores indicadores	Monitoramento por IEDs com comunicação serial RS-485	Monitoramento por IoT
Custo Com Equipe	Custo de equipe média	Alto custo de equipe, necessita de treinamento para uso dos dispositivos de sensoramento	Custo de equipe médio, necessita de treinamento para a instalação dos equipamentos	Custo de equipe baixo devido às tecnologias utilizadas
Treinamento de Equipe	Nível de treinamento médio, riscos na instalação dos sensores	Nível alto, por conta do treinamento de segurança do trabalho	Nível de treinamento médio, necessária para a instalação dos IEDs	Nível de treinamento médio por necessitar de uma equipe qualificada

Dentre os trabalhos analisados em (ARAÚJO *et al.*, 2007) (QUEVEDO *et al.*,

2014), (MARQUES *et al.*, 2013) e (BERNARDO *et al.*, 2019), pode-se destacar dois aspectos principais. O primeiro aspecto refere-se aos baixos custos de operação com IoT, e o segundo é o tempo de resposta baixo dos sistemas usuais de monitoramento e manutenção de TDEE. O monitoramento de TDEE por IoT representa um avanço nos métodos usuais de supervisão, pois possibilita um monitoramento a distância, e em tempo real com a possibilidade de armazenamento dos dados monitorados para diagnósticos em REIs e TDEE inteligentes.

**Tabela 2. Análise de parâmetros de tempo, tecnologias e formas de monitoramento dos sistemas de monitoramento de TDEE (Autor: próprio)**

<b>Características</b>	<b>Redes Elétricas Inteligentes</b>	<b>Manutenção Preditiva</b>	<b>Sistema Descentralizado</b>	<b>Transformadores Inteligentes</b>
Tempo de Resposta	Tempo de resposta alto	Tempo de resposta baixo	Tempo de resposta médio, há "delay" na comunicação devido aos IED's	Tempo de resposta alto com baixa transmissão de dados
Forma de monitoramento	Monitoramento da rede em tempo real	Monitoramento da rede apenas no dia da manutenção preditiva	Monitoramento em tempo real	Monitoramento da rede em tempo real
Tecnologias Utilizadas	Plataforma ARM mbed OS	Sensores indicadores de temperatura, tensão e corrente	Sensores IEDs e comunicação via RS-485 e Modbus	ZigBee, 6LowPAN e Z wave

Como pode-se observar nas Tabelas 1 e 2, o monitoramento por IoT é de baixo custo por não necessitar de visitas rotineiras aos equipamentos monitorados, diferente dos atuais sistemas de monitoramento por manutenção preditiva. Portanto, a utilização de IoT é interessante para essas aplicações de monitoramento de TDEE's, principalmente, as aplicações que necessitem de baixo custo e monitoramento em tempo real com a possibilidade de armazenamento dos dados monitorados utilizando IoT. Os resultados das Tabelas 1 e 2 apontam que os TDEE inteligentes são os melhores sistemas, pois combinam o baixo custo pelo uso de IoT e outras plataformas como, por exemplo, ZigBee, 6LowPAN e Z wave. O principal ponto negativo é a baixa faixa de transmissão proveniente das plataformas utilizadas, porém tal propriedade não é uma situação preocupante, pois o sensoriamento necessário para os TDEE não necessita de uma elevada transmissão de dados, visto que o monitoramento usualmente envolve menos de 10 variáveis.

A transmissão de dados aferidos em manutenções preditivas é mais baixa devido ao monitoramento ser *in loco*, e os equipamentos utilizados são sensores indicadores, que fazem o sensoriamento em tempo real. Esse tipo de sistema é o mais utilizado, porém é de maior custo, pois o monitoramento para manutenção preditiva requer treinamento de equipe e custos com as viagens.

Comparando as características dos sistemas analisados nas Tabelas 1 e 2, pôde-se identificar que os sistemas usando IoT possuem um menor custo com equipe, pois o deslocamento nesse sistema é necessário apenas para a instalação dos sensores e do equipamento de transmissão. Portanto, o monitoramento por IoT tende também a evitar custos quando comparado aos sistemas descentralizado e manutenções preditivas. As REIs e os TDEE inteligentes possuem essa vantagem de custo baixo de operação, pois utilizam IoT, porém são tecnologias novas e pouco difundidas na indústria, logo acabam por não serem tão utilizadas.

#### **4. Conclusão e Trabalhos Futuros**

Neste trabalho foram realizadas discussões sobre como IoT pode ser utilizado para o monitoramento de TDEE, além disso, investigaram-se diferentes aplicações, tais como: REIs por IoT, topologias para TDEE inteligentes aplicados em redes inteligentes, sistema descentralizado e manutenções preditivas.

Identificou-se que o monitoramento por IoT apresentou menor custo de operação e treinamento com equipe, além de possuir monitoramento em tempo real. Essas vantagens são significativas quando comparadas aos outros sistemas. Com base nesse entendimento, o monitoramento baseado em IoT pode ser utilizado nas mais diversas aplicações, incluindo a manutenção preditiva de transformadores de potência, pois nesse tipo de aplicações o monitoramento de baixo custo e em tempo real são características desejáveis.

Nas REIs e na topologia para TDEE inteligente, verificou-se um bom resultado na análise qualitativa. O fato de possuir monitoramento em tempo real é um fator que implica em uma redução nas viagens para manutenção preditiva. Portanto, existe diminuição nos custos com treinamento de equipe e em deslocamentos, já que esses sistemas serão monitorados à distância.

Por outro lado, nos sistemas descentralizado e manutenções preditivas, identificou-se um custo elevado, pois existe a necessidade de uma equipe treinada na área de segurança do trabalho. Além disso, utilizam tecnologias que não são compatíveis para monitoramento que envolve grandes áreas geográficas. Por fim, esse tipo de sistema só identifica o problema quando o mesmo ocorre, logo sua atuação é necessária para manutenções corretivas, e não são adequadas para manutenção preditiva.

Para trabalhos futuros, a manutenção e monitoramento de TDEE poderia fazer uso de tecnologias no contexto de IoT. Esses sistemas podem se adequar perfeitamente para o monitoramento em manutenções preditivas, visto que não há perda de qualidade no monitoramento à distância. Dessa forma, o monitoramento poderia ser utilizado na supervisão dos TDEE, associando com tecnologias de baixo custo como, por exemplo, ZigBee e LoRaWAN, ambas propiciam uma comunicação sem fio de baixo custo.

Pretende-se também realizar validações utilizando sensores e TDEE.

## Referências

- AMIN, S. M.; MASSOD, B. F. Toward a smart grid: power delivery for the 21st century. IEEE Power and Energy Magazine, Minneapolis, v. 3, p. 34-35, September 2005. ISSN 5.
- ARAÚJO, D. C. P. *et al.* sistemas de monitoramento e diagnóstico de transformadores de subestações. Décimo Segundo Encontro Regional Ibero-americano do CIGRÉ, Iguazu, 20 a 24 maio 2007. 1-9.
- AZEVEDO, C. H.; MARQUES, A. P.; RIBEIRO, J. Methodology for the detection of partial discharges in power transformers using the acoustic method. IEEE EUROCON, St.-Petersburg, maio 2009.
- BERNARDO, G. D. S.; CUNHA, A. D.; SILVA-JÚNIOR, E. T. Arquitetura para o desenvolvimento de soluções embarcadas de internet das coisas aplicadas em redes elétricas inteligentes. Anais do IX Simpósio Brasileiro De Engenharia De Sistemas Computacionais (SBESC), 2019. 1-8.
- FRAGOSO, C. M. Transformadores: Teoria e projeto. IFPB. João Pessoa, p. 1-2. 1993.
- GUNGOR, C. *et al.* Smart Grid Technologies: Communication Technologies and Standards. IEEE Transactions on industrial Informatics, v. 7, p. 529-539, September 2011. ISSN 4.
- MARQUES, A. P. *et al.* Técnicas preditivas de manutenção em transformadores de potência – um estudo de caso. I World Congress on Systems Engineering and Information Technology, Porto, 17-20 November 2013. 2-5.
- Mulheres programando. O que é internet das coisas? Disponível em: <<http://www.mulheresprogramando.com.br/internet-das-coisas/>>. Acesso em: 01 fevereiro 2020.
- QUEVEDO, J. O. *et al.* Transformador de distribuição inteligente. Eletrônica de Potência, Campo Grande, v. 19, p. 277-284.
- ROUSE, M. Internet of Things (IoT). Disponível em: <<https://internetofthingsagenda.techtarget.com/definition/Internet-of-Things-IoT>>. Acesso em: 10 fevereiro 2020.