

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE
COMPUTAÇÃO

RAILSON RODRIGUES LEITE

**Dispositivo de Análise e Monitoramento
On-Line de Transformadores de
Potência Imersos em Óleo Isolante:
Corrente Elétrica, Temperatura e
Umidade**

Goiânia
2020



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO (TECA) PARA DISPONIBILIZAR VERSÕES ELETRÔNICAS DE TESES E DISSERTAÇÕES NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), regulamentada pela Resolução CEPEC nº 832/2007, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a [Lei 9.610/98](#), o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

O conteúdo das Teses e Dissertações disponibilizado na BDTD/UFG é de responsabilidade exclusiva do autor. Ao encaminhar o produto final, o autor(a) e o(a) orientador(a) firmam o compromisso de que o trabalho não contém nenhuma violação de quaisquer direitos autorais ou outro direito de terceiros.

1. Identificação do material bibliográfico

Dissertação Tese

2. Nome completo do autor

Railson Rodrigues Leite

3. Título do trabalho

"Dispositivo de Análise e Monitoramento On-Line de Transformadores de Potência Imersos em Óleo Isolante: Corrente Elétrica, Temperatura e Umidade"

4. Informações de acesso ao documento (este campo deve ser preenchido pelo orientador)

Concorda com a liberação total do documento SIM NÃO¹

[1] Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. Após esse período, a possível disponibilização ocorrerá apenas mediante:

a) consulta ao(a) autor(a) e ao(a) orientador(a);

b) novo Termo de Ciência e de Autorização (TECA) assinado e inserido no arquivo da tese ou dissertação.

O documento não será disponibilizado durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro;
- Publicação da dissertação/tese em livro.

Obs. Este termo deverá ser assinado no SEI pelo orientador e pelo autor.



Documento assinado eletronicamente por **RAILSON RODRIGUES LEITE, Discente**, em 01/10/2020, às 16:43, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Geyverson Teixeira De Paula, Professor do Magistério Superior**, em 01/10/2020, às 16:44, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1590586** e o código CRC **F8A04EFB**.



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO (TECA) PARA DISPONIBILIZAR VERSÕES ELETRÔNICAS DE TESES E DISSERTAÇÕES NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), regulamentada pela Resolução CEPEC nº 832/2007, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a [Lei 9.610/98](#), o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

O conteúdo das Teses e Dissertações disponibilizado na BDTD/UFG é de responsabilidade exclusiva do autor. Ao encaminhar o produto final, o autor(a) e o(a) orientador(a) firmam o compromisso de que o trabalho não contém nenhuma violação de quaisquer direitos autorais ou outro direito de terceiros.

1. Identificação do material bibliográfico

Dissertação Tese Outro*: _____

*No caso de mestrado/doutorado profissional, indique o formato do Trabalho de Conclusão de Curso, permitido no documento de área, correspondente ao programa de pós-graduação, orientado pela legislação vigente da CAPES.

Exemplos: Estudo de caso ou Revisão sistemática ou outros formatos.

2. Nome completo do autor

Railson Rodrigues Leite

3. Título do trabalho

"Dispositivo de Análise e Monitoramento On-Line de Transformadores de Potência Imersos em Óleo Isolante: Corrente Elétrica, Temperatura e Umidade"

4. Informações de acesso ao documento (este campo deve ser preenchido pelo orientador)

Concorda com a liberação total do documento SIM NÃO¹

[1] Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. Após esse período, a possível disponibilização ocorrerá apenas mediante:

- a) consulta ao(à) autor(a) e ao(à) orientador(a);
 - b) novo Termo de Ciência e de Autorização (TECA) assinado e inserido no arquivo da tese ou dissertação.
- O documento não será disponibilizado durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro;
- Publicação da dissertação/tese em livro.

Obs. Este termo deverá ser assinado no SEI pelo orientador e pelo autor.



Documento assinado eletronicamente por **Geyverson Teixeira De Paula, Professor do Magistério Superior**, em 09/11/2022, às 15:58, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **RAILSON RODRIGUES LEITE, Usuário Externo**, em 09/11/2022, às 16:13, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **3325993** e o código CRC **201C10D9**.

RAILSON RODRIGUES LEITE

**Dispositivo de Análise e Monitoramento
On-Line de Transformadores de
Potência Imersos em Óleo Isolante:
Corrente Elétrica, Temperatura e
Umidade**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação da Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação da Universidade Federal de Goiás, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação.

Área de concentração: Sistemas Inteligentes e Computação Aplicada.

Orientador: Prof. Dr. Geyverson Teixeira de Paula

Goiânia
2020

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Rodrigues Leite, Railson
Dispositivo de Análise e Monitoramento On-Line de Transformadores de Potência Imersos em Óleo Isolante: Corrente Elétrica, Temperatura e Umidade [manuscrito] / Railson Rodrigues Leite. - 2020.
XC, 90 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Geyverson Teixeira de Paula.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação (EMC), , Goiânia, 2020.
Bibliografia.

1. Monitoramento On-line. 2. Monitoramento de Corrente de Transformadores de Potência. 3. Monitoramento de Umidade e Temperatura do Óleo de Transformadores de Potência. 4. Supervisório em Nuvem. 5. Transformadores de Potência. I. Teixeira de Paula, Geyverson, orient. II. Título.

CDU 621.3

RAILSON RODRIGUES LEITE

Dispositivo de Análise e Monitoramento *On-Line* de Transformadores de Potência Imersos em Óleo Isolante: Corrente Elétrica, Temperatura e Umidade

Dissertação defendida no Programa de Pós-Graduação do Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação da Universidade Federal de Goiás como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Progama de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação, aprovada em 29 de Julho de 2020, pela Banca Examinadora constituída pelos professores:



Documento assinado eletronicamente por **Geyverson Teixeira De Paula**, Professor do Magistério Superior, em 29/07/2020, às 10:57, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).

Prof. Geyverson Teixeira de Paula

Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação – UFG
Presidente da Banca



Documento assinado eletronicamente por **Leonardo Da Cunha Brito**, Professor do Magistério Superior, em 29/07/2020, às 10:57, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).

Prof. Leonardo da Cunha Brito

Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação – UFG



Documento assinado eletronicamente por **Cacilda De Jesus Ribeiro**, Professor do Magistério Superior, em 29/07/2020, às 10:57, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).

Profa. Cacilda De Jesus Ribeiro

Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação – UFG



Documento assinado eletronicamente por **ANDRÉ PEREIRA MARQUES**, Usuário Externo, em 29/07/2020, às 10:57, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).

Prof. André Pereira Marques

Departamento de Áreas Acadêmicas IV – IFG



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1458616** e o código CRC **4DD3BESB**.

Dedico esse trabalho à minha mãe Raimunda Rodrigues Leite (*in memoriam*).
Que me incentivou a enfrentar esse desafio, mas infelizmente não pode ver minha vitória.

Agradecimentos

Agradeço à meu orientador Dr. Geyverson Teixeira de Paula, que me guiou durante esse projeto, sempre bem humorado e disposto a ajudar.

À Prof. Dra. Cacilda de Jesus Ribeiro que contribui ativamente com sua experiência na área de transformadores de potência.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Federal de Goiás, pela oportunidade de desenvolver esse trabalho.

E aqueles que me deram força nos momentos mais difíceis: minha esposa Amanda, meu irmão Rámison e à todos os meus amigos e familiares.

Resumo

<LEITE, R. R.. **Dispositivo de Análise e Monitoramento *On-Line* de Transformadores de Potência Imersos em Óleo Isolante: Corrente Elétrica, Temperatura e Umidade**. Goiânia, 2020. 90p. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação, Universidade Federal de Goiás.

Esse trabalho trata do desenvolvimento de um dispositivo capaz de: monitorar, em tempo real, umidade, temperatura e correntes de transformadores de potência imersos em óleo mineral isolante; prover uma solução de análise histórica dos dados monitorados; e ser utilizado como ferramenta de auxílio à tomada de decisão, integrados em um supervisor em nuvem. Essa é uma demanda do setor elétrico, que precisa de soluções precisas e de baixo custo devido à grande quantidade de transformadores de potência do sistema elétrico e à importância estratégica deste ativo. As variáveis monitoradas são: temperatura e umidade relativa do meio ambiente, temperatura e atividade água (umidade) do óleo do transformador, e as correntes nos lados primário e secundário. A configuração do dispositivo é feita através de um aplicativo para dispositivos móveis (*smartphones*, *tablets* e etc), dispensando o uso de *displays* e botões. O dispositivo é tolerante a falhas de alimentação energética e de comunicação, e é provido de diferentes formas de conexão com a internet. Os resultados apresentados nesse trabalho foram satisfatórios, com validação em laboratório, proporcionando duas aplicações de monitoramento do sistema isolante papel-óleo de transformadores de potência, referentes: a) ao estado do equipamento em operação; b) no processo de secagem da parte ativa em procedimento de manutenção. Esse trabalho originou o registro de dois softwares e um depósito de patente.

Palavras-chave

Computação em Nuvem; Internet das Coisas; Monitoramento de Corrente de Transformadores de Potência; Monitoramento *On-line*; Monitoramento de Umidade e Temperatura do Óleo de Transformadores de Potência; Supervisor em Nuvem; Transformadores de Potência.

Abstract

<LEITE, R. R.. **On-line analysis and monitoring device of temperature, humidity and currents for power transformers immersed in insulating oil.** Goiânia, 2020. 90p. MSc. Dissertation. Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação, Universidade Federal de Goiás.

This work deals with the development of a device capable of monitoring real-time power transformers immersed in isolated mineral oil, proving a historical monitoring data analysis solution and a decision-making tool integrated in a cloud supervisory. This is a demand from the power sector, which needs accurate and low cost solutions due to the large number of power system transformers and the strategic importance of this asset. The monitored variables are: temperature and relative humidity of the climate, temperature and water activity (humidity), and currents on the primary and secondary side. Every configuration of device use a application for mobile devices (smartphones, tablets e etc), eliminating the use of displays and buttons. It is tolerant to power and communication failures, presents different ways of connecting to the Internet. The results presented in this work were satisfactory with validation in the laboratory, providing two applications of monitoring of the powertransformer insulation system, regarding: a) the state of the equipment in operation; b) in the drying process of the active part in the maintenance procedures. This work led to the registration of two software and a patent deposit.

Keywords

Cloud Computing; Cloud Supervisory; Internet of Everythings; Online Monitoring; Power Transformers; Power Transformers Current Monitoring; Power Transformer Oil Humidity and Temperature Monitoring.

Sumário

Lista de Figuras	11
Lista de Tabelas	13
Lista de Códigos de Programas	14
1 Introdução	15
1.1 Objetivo	16
1.2 Metodologia	18
1.3 Produções	18
2 Pesquisa bibliográfica	20
2.1 Transformadores de potência	20
2.1.1 Parte Ativa do Transformador	20
2.1.2 Buchas	21
2.1.3 Sistema de Preservação do Óleo	22
2.1.4 Sistemas de Resfriamento	23
2.1.5 Transformadores de Corrente	24
2.2 Análise de óleo isolante de transformadores de potência	26
2.3 Análise do papel isolante de transformadores de potência	28
3 Monitoramento de Transformadores	30
3.1 Monitoramento <i>On-line</i> Contínuo de Transformadores	30
3.2 Supervisório	33
3.3 Protocolos de Comunicação na <i>internet</i>	34
3.4 Bluetooth	35
3.5 Dispositivos de Mercado para Monitoramento de Transformadores	36
4 Desenvolvimento	37
4.1 Coletor	38
4.2 Aplicativo	45
4.2.1 Protocolo de comunicação entre aplicativo e dispositivo coletor de dados.	49
4.3 Supervisório em nuvem	53
4.3.1 Sistema de alertas	59
4.3.2 Avaliações físico-químicas.	60

5	Resultados	71
5.1	Validação com instrumentos e de funcionalidades.	74
5.2	Validação com MUSPO-DAQ.	78
5.3	Validação com laudo de laboratório.	80
5.4	Validação do sistema de avaliação físico-química.	82
6	Conclusão	86
	Referências Bibliográficas	89

Lista de Figuras

2.1	Distribuição de campo elétrico de bucha não capacitiva(esquerda) e capacitiva (direita)	22
2.2	Sistema de preservação do óleo isolante: a) utilizando membrana; b) utilizando bexiga interna	23
2.3	a) Transformador de corrente com enrolamentos primário. b) Transformador de corrente tipo braçadeira.	25
2.4	Instalação típica de TC de bucha em transformador.	26
3.1	Causa de falha em análises de transformadores fabricados depois de 1980. (342 falhas, classe de tensão $\geq 100\text{kV}$)	31
4.1	Diagrama de funcionamento do sistema de coleta de dados	38
4.2	Módulo de armazenamento e carregamento de baterias.	40
4.3	Foto Acquatransf.	41
4.4	Fixação por imãs: a) vista frontal; b) vista lateral	42
4.5	Foto Acquatransf.	43
4.6	Algoritmo do <i>firmware</i> .	44
4.7	Formato do texto representativo da leitura dos sensores.	44
4.8	Tela de configuração de monitoramento do aplicativo.	46
4.9	Algoritmo de configuração do monitoramento.	47
4.10	Algoritmo de monitoramento e transmissão de dados através do aplicativo.	47
4.11	Algoritmo de busca de redes <i>wi-fi</i> disponíveis.	48
4.12	Algoritmo de configuração de rede <i>wi-fi</i> .	48
4.13	Algoritmo de download de dados para a memória do dispositivo.	49
4.14	Algoritmo de envio de dados da memória do dispositivo.	49
4.15	Tela de <i>download</i> de dados do coletor para o aplicativo.	50
4.16	Página de cadastro de transformador.	56
4.17	Página de cadastro de ensaio.	57
4.18	Monitoramento e histórico gráfico do supervisor em nuvem.	59
4.19	Monitoramento e histórico tabelado do supervisor em nuvem.	60
4.20	Formulário de cadastro de alerta	61
4.21	E-mail de alerta enviado pelo sistema	62
4.22	Janela de cadastro de contato	62
4.23	Temperatura de formação de bolhas em função do índice de umidade na isolação sólida	63
4.24	Funções injetoras (Nota versus valor da grandeza) para: a) Tensão Interfacial; e b) Índice de neutralização	65
4.25	Funções injetoras (Nota versus valor da grandeza) para: a) Índice de cor; e b) Rigidez dielétrica	65

4.26	Funções injetoras (Nota versus valor da grandeza) para: a) Teor de água; e b) Fator de potência	65
4.27	Formulário de Classificação de ensaios físico-químicos	69
4.28	Relatório de avaliação físico-química para impressão.	70
5.1	Arranjo de instrumentos para validação: a) Amperímetros; e b) termômetro	75
5.2	Gráficos de leituras e erros aferidos na validação.	76
5.3	Gráfico das temperaturas medidas.	77
5.4	Gráfico de leituras do MUSPO-DAQ x Acquatransf.	80

Lista de Tabelas

2.1	Relação entre problemas no transformador e parâmetros do óleo	27
2.2	Legenda referente à Tabela 2.1	28
4.1	Padronização das classificações finais e ações recomendadas	63
4.2	Critérios de classificação da tensão interfacial	66
4.3	Critérios de classificação do índice de neutralização	66
4.4	Critérios de classificação do Índice de Cor	66
4.5	Critérios de classificação do fator de potência	66
4.6	Critérios de classificação da rigidez dielétrica em função da tensão nominal(V_n)	66
4.7	Critérios de classificação do teor de água em função da tensão nominal(V_n)	66
4.8	Pesos das grandezas de interesse	67
4.9	Critérios para obtenção dos conceitos das Notas Finais e Global	68
5.1	Comparativo entre dispositivos.	73
5.2	Tabela de custos de componentes.	74
5.3	Checagem de funcionalidades.	78
5.4	Constantes para o cálculo de solubilidade de água em óleos.	79
5.5	Teor de água obtido no ensaio com MUSPO-DAQ.	79
5.6	Resultados obtidos MUSPO-DAQ x Acquatransf x Laboratório, para amostra excelente.	81
5.7	Resultados obtidos MUSPO-DAQ x Acquatransf x Laboratório, para amostra péssima.	81
5.8	Especificação dos transformadores analisados	83
5.9	Resultado análise de óleo em laboratório.	83
5.10	Comparativo de resultados Acquatransf x Especialistas.	84

Lista de Códigos de Programas

4.1	Requisição e resposta 'getEnsaio'	51
4.2	Requisição e resposta 'setEnsaio'	51
4.3	Requisição e resposta 'getAmostragem'	52
4.4	Requisição e resposta 'setAmostragem'	52
4.5	Requisição e resposta 'getWifiConectado'	53
4.6	Requisição e resposta 'getWifi'	53
4.7	Requisição e resposta 'setWifi'	54
4.8	Requisição e resposta 'getUltimaLeitura'	54
4.9	Requisição e resposta 'getPendentes'	55
4.10	Requisição e resposta 'baixarDados'	56

Introdução

Os transformadores de potência são de suma importância para a distribuição de energia. Sem eles não seria possível transmitir energia por grandes distâncias, de sua fonte de geração até o consumidor final, pois a perda de energia dissipada nas resistências dos cabos da rede, devido a passagens de altas correntes, seria enorme, o que inviabilizaria tal transmissão.

Os transformadores de potência permitem elevar tensão e reduzir, permitindo assim que por longas distâncias a tensão de transmissão seja elevada minimizando as perdas com a resistência dos cabos, e ao chegar ao destino, seja abaixada para que possa ser utilizada em aparelhos que necessitam de uma alimentação em menor tensão.

A estrutura física de um transformador consiste em dois ou mais enrolamentos acoplados por meio de um fluxo magnético comum. Se um dos enrolamentos for conectado a uma fonte de tensão alternada, produzirá um fluxo magnético capaz de induzir uma tensão no enrolamento secundário, sendo essa tensão menor, maior ou igual, dependendo das características do transformador e da tensão aplicada no primário.[1]

Além disso, para melhorar o isolamento entre as bobinas e dissipar melhor o calor são utilizados óleos isolantes dentro dos transformadores. Esse óleo isolante, com o passar do tempo, sofre alterações químicas como de PH e umidade, esses efeitos devem ser monitoradas para garantir uma maior vida útil do transformador.

Os Transformadores de potência são, portanto, equipamentos de alto custo e de fundamental importância para o bom funcionamento da rede elétrica. Sendo necessários dispositivos para monitoramento dos mesmos, visando a melhoria do desempenho, identificação rápida de problemas e prevenção de falhas. Com base nos dados coletados e dados de análises de outras variáveis, engenheiros podem tomar decisões à cerca de manutenções preditivas, e até mesmo o próprio sistema de monitoramento pode sugerir esse tipo de manutenção.

Para monitorar o funcionamento de um transformador de potência são utilizadas varias técnicas e analisadas diversas variáveis. Uma das técnicas é a análise do sistema isolante papel-óleo. O isolamento do transformador é constituído de óleo e celulose, à medida que esses componentes envelhecem, a capacidade de isolação vai se deteriorando,

causando prejuízos nas margens de segurança do equipamento, podendo levar a falhas prematuras. A celulose é o componente mais suscetível ao envelhecimento de um transformador, sendo que, não é possível substituí-la sem a desmontagem completa do equipamento e troca dos enrolamentos. O custo desse tipo de procedimento é muito alto, e normalmente, quando há uma grande degradação da celulose, é considerado o fim da vida útil do transformador [2].

Para monitorar periodicamente a velocidade de envelhecimento do sistema isolante, são utilizados processos de análise do óleo e papel. A avaliação do óleo se dá por meio da coleta de amostras e posteriormente análise em laboratório. Referente à celulose, sua análise direta só é possível no fim da vida útil do transformador, pois é necessário desmontar o equipamento para coletar uma amostra do papel. Desse modo, para o monitoramento enquanto o equipamento está em uso, são utilizados métodos indiretos para avaliação da degradação do papel, como análise físico-química do óleo e dos gases dissolvidos no óleo, que propiciam indicativos de degradação da celulose. Quando a umidade do óleo está alta é realizado o processo de secagem do óleo, onde é necessário deslocar pessoas e equipamentos até o transformador quando o mesmo não pode ser removido, ou remover o transformador até a oficina de manutenção. O que tem um custo financeiro e operacional a ser avaliado pela equipe de manutenção.

Existem dispositivos eletrônicos que realizam a análise do óleo em tempo real com o transformador em operação, os mesmo são conectados aos transformadores e armazenam os dados coletados. Alguns desses aparelhos conseguem transmitir os dados através de cabos ou redes sem fio, entretanto, para outros é necessário que um técnico se desloque até o equipamento com um computador para coletar os dados. O custo de tais equipamentos são altos, e pela grande quantidade de transformadores de potência na rede de transmissão e distribuição, esse custo afeta diretamente a empresa responsável. A maioria desses equipamento só consegue monitorar um único transformador em um único ponto, assim, a umidade e temperatura podem não ser iguais em diferentes pontos do transformador. Além disso, às vezes esses equipamentos não monitoram outras variáveis como a temperatura e carga à qual o transformador está submetido, para ser realizadas correlações com o estado do óleo. Portanto, ainda há pontos à serem aprimorados nos dispositivos de monitoramento.

1.1 Objetivo

Neste trabalho é proposto um protótipo que seja capaz de monitorar o desempenho de um transformador com base nas condições de umidade e temperatura do óleo mineral isolante e análise das correntes elétricas nos transformadores de corrente (TCs), visando o monitoramento *on-line* do sistema isolante papel-óleo. O objetivo principal desse

projeto é desenvolver uma solução completa capaz de coletar informações de transformadores, permitir um monitoramento em tempo real em campo ou remotamente, garantindo a confiabilidade e preservação dos dados coletados, para isso foi desenvolvido:

- o *hardware*, de baixo custo, capaz de agregar os sensores necessário para realizar a coleta dos dados;
- um *firmware*, que responsável por fazer a configuração dos sensores, coleta de dados, e implementação dos protocolos de comunicação;
- uma interface de configuração e monitoramento local para o equipamento;
- um sistema para monitoramento remoto através da *internet*;
- um sistema de análise de dados históricos e auxílio a tomada de decisão.

Esse protótipo foi validado em laboratório, e teve suas características comparadas com produtos de mercado. O desenvolvimento do protótipo consiste em coletar dados dos sensores e enviá-los para *internet*, para isso foi preciso desenvolver uma placa eletrônica capaz de integrar os sensores com a *internet* enviando os dados de leituras automaticamente para um sistema supervisorio para análise remota e também comunicar-se com *smartphones* via Bluetooth para configuração e verificação de funcionamento no local. Esse projeto é um aprimoramento do dispositivo MUSPO-DAQ, um protótipo de monitoramento do sistema papel-óleo [3].

Destacam-se como inovações nesse dispositivo:

- Dimensões e peso reduzidos, pesando com cabos e sensores acoplados 2,5 (kg) e medindo 25x20x10 (cm);
- Baixo custo de produção;
- Fácil instalação, podendo ser fixado diretamente ao tanque do transformador por meio de imãs;
- Fácil configuração, sendo totalmente realizada através de um dispositivo *smartphone* conectado ao equipamento por meio de conexão sem fio (Bluetooth), de forma simples e intuitiva, facilitando o treinamento dos técnicos que realizarão tal procedimento;
- Tolerância à faltas de energia, o mesmo conta com banco de baterias independentes, tendo autonomia de até 3 horas de funcionamento sem alimentação de energia;
- Conta com sistema próprio de proteção contra curto-circuito e surtos de tensão, preservando assim o dispositivo contra queima de componentes;
- Facilidade de manutenção, o dispositivo foi desenvolvido de forma modular, sendo possível trocar componentes defeituosos do dispositivo de forma simples, como por exemplo fonte de alimentação, baterias, central de coleta, central de processamento, sensores, DPS, disjuntor. Sendo necessário apenas desconectar o componente defeituoso e conectar o novo;

- Segurança na operação do equipamento, sendo que não será necessário o operador estar próximo ao transformador durante a configuração e coleta dos dados;
- Monitoramento em tempo real através da *internet*;
- Acompanhamento em tempo real do processo de secagem da parte ativa, no local ou remotamente;
- Sistema de configuração de alarmes automáticos disparados de acordo com parâmetros definidos pelo operador;
- Módulo de auxílio à tomada de decisão com base em dados de análises físico-químicas realizadas em laboratório integrado ao sistema de monitoramento *on-line*.

1.2 Metodologia

A metodologia empregada para o desenvolvimento desse trabalho consistiu, em um primeiro momento, na análise dos sensores disponíveis no mercado para monitoramento das variáveis desejadas. Após isso, foi projetado um circuito eletrônico para integrar os sensores e possibilitar comunicação com a *internet* e *smartphones*. Posteriormente, foi desenvolvido o aplicativo que se comunica com a placa através do Bluetooth, utilizando um protocolo próprio. Para o supervisor em nuvem, usou-se um banco de dados estruturado para armazenar as informações, facilitando a manipulação e exportação dos dados, tendo sido a interface desenvolvida de forma que o usuário tenha facilidade para analisar as informações por meio de gráficos e tabelas. Os resultados apresentados nesse trabalho foram obtidos em laboratório, através de um teste comparando o protótipo com equipamentos de medição, e outro com equipamentos de medição e também com outro protótipo (MuspoDAQ) testado em campo e validado anteriormente, comprovando-se os benefícios do uso deste dispositivo para monitoramento de transformadores de potência. É feito também uma comparação entre as funcionalidades do dispositivo proposto com as de equipamentos de mercado.

Os resultados apresentados nesse trabalho são qualitativos, demonstrando os benefícios do uso do dispositivo proposto para monitoramento de transformadores de potência além de compará-lo com outros dispositivos. O procedimento para tratamento da pesquisa foi primeiramente realizar uma revisão bibliográfica sobre o assunto, buscar artigos sobre aspectos a serem monitorados em transformadores, sensores que possam ser utilizados e produtos de mercado para monitoramento de transformadores.

1.3 Produções

Os produtos e produções resultantes do desenvolvimento deste trabalho são:

- um protótipo funcional;
- um aplicativo para dispositivos móveis, utilizado para monitorar e configurar o coletor de dados;
- um sistema de monitoramento remoto em tempo real através da *internet*, análise de dados históricos e apoio a tomada de decisão;
- um artigo aprovado no VIII Simpósio Brasileiro de Sistema Elétricos;
- registro de aplicativo, cadastrado no INPI(Instituto Nacional da Propriedade Industrial) sob o número 512020000924-7 e intitulado "Aplicativo de Configuração e Monitoramento de Transformadores de Potência".
- registro do sistema de monitoramento em nuvem, cadastrado no INPI sob o número 512020000925-5 e intitulado "Supervisório em Nuvem para Monitoramento de Transformadores de Potência";
- depósito de patente de modelo de utilidade intitulado "DISPOSITIVO DE ANÁLISE E MONITORAMENTO DE TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA IMERSOS EM ÓLEO ISOLANTE", cadastrado no INPI sob o protocolo BR-20-2020-013592-4.

Pesquisa bibliográfica

Para desenvolvimento deste trabalho uma pesquisa bibliográfica faz-se necessária para conhecer o que a literatura já abordou e os pontos a serem ainda melhorados. São abordados ao longo deste capítulo aspectos construtivos de transformadores de potência, métodos para monitoramento dos mesmos, correlação entre falhas e grandezas monitoradas, explicação do funcionamento de sistemas supervisórios, protocolos e ferramentas utilizadas no desenvolvimento deste projeto.

2.1 Transformadores de potência

A transmissão de energia por longas distancias só é possível por causa dos transformadores, os mesmos são responsáveis por elevar e diminuir a tensão. Com a tensão elevada a corrente diminui, conseqüentemente a perda de potencia pela resistência dos cabos de transmissão diminui. Falhas nesses equipamentos causam interrupções no fornecimento de energia e também podem danificar outros equipamentos. Portanto os mesmos devem ser frequentemente avaliados quanto a sua condição operativa e de manutenção, para assim evitar que os mesmos sofram falhas durante a operação.

Nesta seção são apresentados aspectos construtivos de transformadores de potência e sua relevância no estudo de manutenção e preservação da vida útil desse equipamento. Os principais componentes de um transformador de potência de alta tensão são: buchas, sistema de preservação do óleo, sistemas de resfriamento, transformadores de corrente, comutadores de derivação de carga, parte ativa do transformador e óleo isolante. Esses componentes são detalhados adiante.

2.1.1 Parte Ativa do Transformador

Engloba os componentes elétricos responsáveis pela transformação da energia, enrolamentos, núcleo e sistema de isolamento. Constitui-se de um conjunto mecanicamente rígido, capaz de suportar condições adversas de funcionamento. O núcleo provê o acopla-

mento magnético entre os enrolamentos do transformador, criando um caminho de menor relutância para as linhas de força do campo magnético [2].

Os enrolamentos, são normalmente feitos por condutores de cobre(ou alumínio) envolvidos por material isolante. O material isolante mais utilizado nos enrolamentos dos transformadores de potência é o papel *kraft*, há casos em que o isolamento é composto de verniz ou outro material sintético. Os condutores são enrolados em forma de bobinas cilíndricas, que são dispostas nas colunas do núcleo[4].

O isolamento do transformador é constituído de óleo e celulose(papel ou *presspan*), além de isolamento o óleo tem também a função de fluido refrigerante. Os condutores são envolvidos em tiras de papel, que formam o isolamento entre espiras, os mesmo são enrolados em cilindros de *presspan*, que proporcionam fixação mecânica e isolamento entre os enrolamentos de fase e entre estes e o núcleo. Tiras de *presspan*, fixadas nesses cilindros, no sentido axial, formam canais de óleo, que contribuem para isolação e refrigeração.[4]

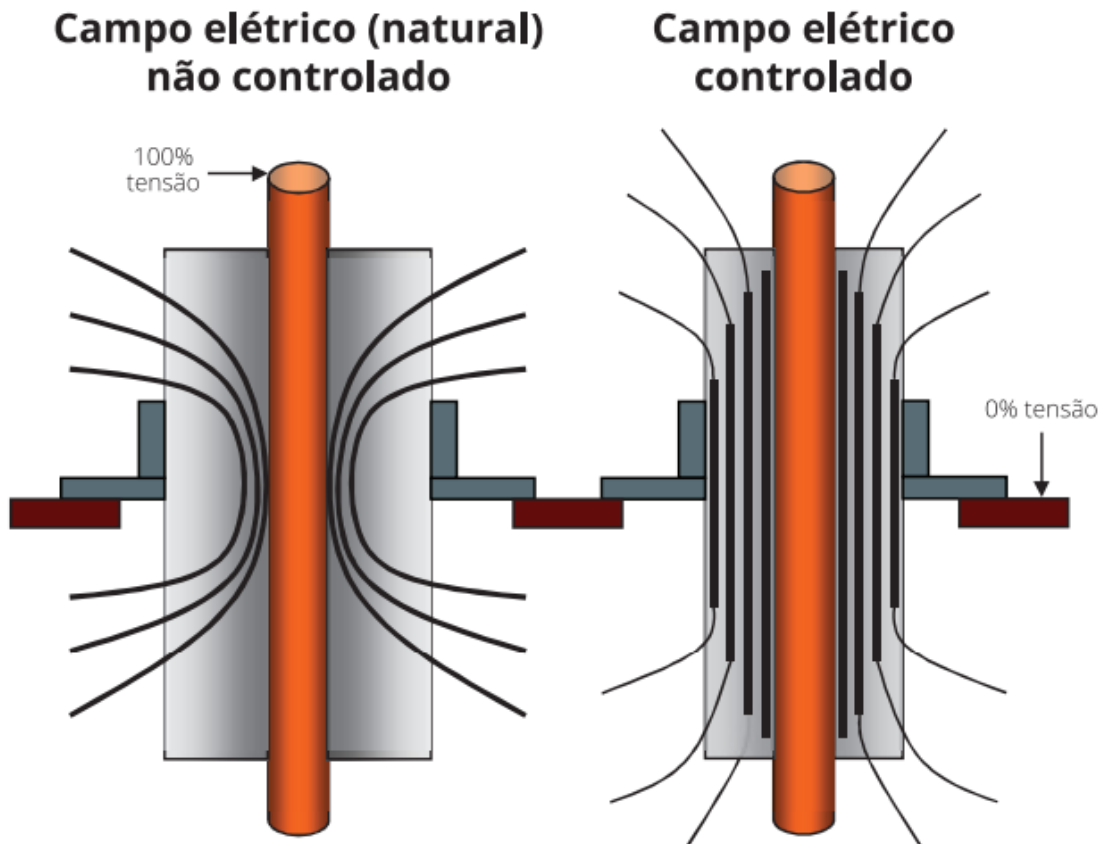
Se um determinado grau de deterioração do óleo for ultrapassado, haverá prejuízos nas margens de segurança do equipamento, podendo levar a falhas prematuras. A compreensão do processo de deterioração do óleo é fundamental na tomada de decisões. O óleo deve apresentar rigidez dielétrica adequada para suportar as solicitações elétricas impostas em serviço, assim como boas características de condutividade térmica, calor específico e viscosidade, para ajudar de forma eficiente a refrigeração do transformador. Devemos ter consciência que os óleos minerais são recursos naturais limitados e devem ser manuseados com cuidados para evitar contaminações ao meio ambiente, especialmente se o óleo estiver contaminado por poluentes orgânicos persistentes, tais como bifenilaspolicloradas (PCB), transformadores que contenham óleo contaminado com PCB, devem ter o impacto ambiental como fator crítico, assim como a legislação. A maioria das legislações consideram o óleo como rejeito controlado [2].

2.1.2 Buchas

As buchas fazem parte do sistema de conexão entre o transformador e o sistema elétrico ao qual o equipamento está conectado. Em outras palavra, é um dispositivo isolado que permite passagem segura de energia elétrica através de parede aterrada como parede de um edifício, tanque de transformadores etc. Existem buchas não capacitivas, mais simples construtivamente, consistindo em um condutor envolto por porcelana.

As do tipo capacitiva, são compostas por uma camada de material isolante e uma condutora, formando superfícies equipotenciais melhorando a distribuição da tensão e tendo um efeito capacitivo, seu objetivo é equalizar o campo elétrico, como mostra a Figura 2.1 [4].

Figura 2.1 – Distribuição de campo elétrico de bucha não capacitiva (esquerda) e capacitiva (direita)



Fonte: [4]

Esse componente do transformador tem grande importância nas políticas de manutenção adotadas pelas empresas do setor elétrico, pois falhas envolvendo esse componente geralmente são seguidas de consequências, como incêndio e explosão, que comprometem completamente a integridade do transformador e podem causar danos a outros equipamentos ao redor, inclusive machucar pessoas que estiverem próximas [2].

Nas buchas podem ser conectados transformadores de corrente, permitindo que seja possível o monitoramento preciso da corrente que o condutor está fornecendo ao transformador por meio dos terminais secundários do mesmo. Desse modo é possível identificar rapidamente sobrecargas ao transformador, evitando que o mesmo seja danificado.

2.1.3 Sistema de Preservação do Óleo

O sistema de preservação do óleo tem como principal função preservar a qualidade do óleo durante sua vida útil. Sua utilização pode ser realizada de duas formas, que variam de acordo com o modelo construtivo do transformador, tanque principal selado ou

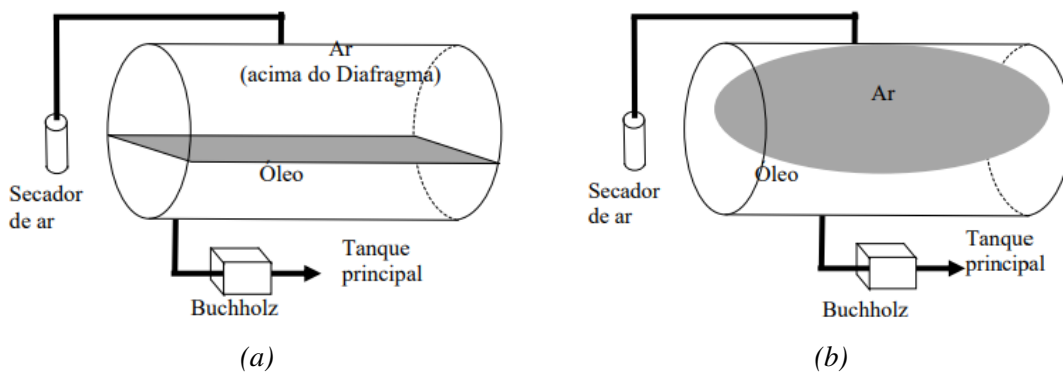
com tanques de expansão.

Outra importante função é acomodar as alterações de volume do óleo isolante inerente à variação de temperatura do equipamento em funcionamento. O tanque conservador é montado acima do tanque principal, com altura suficiente para manter o nível do óleo no equipamento em condições adequadas para o funcionamento (acima da flange de fixação de sua bucha mais alta) independente da temperatura.

Os sistemas internos ao conservador, possuem dentro do tanque conservador, uma bolsa ou membrana que evita o contato direto do óleo isolante com o ar atmosférico, preservando o óleo dos efeitos da umidade e oxidação. O ar que preenche esse espaço passa por um filtro secador de ar para evitar a penetração da umidade do mesmo, o diagrama de funcionamento do mecanismo é mostrado na Figura 2.2.

Existe também o sistema de respiração livre, em que não há separação entre o óleo e o ar atmosférico, contando apenas com o secador de ar [2].

Figura 2.2 – Sistema de preservação do óleo isolante: a) utilizando membrana; b) utilizando bexiga interna



Mesmo utilizando sistemas de preservação do óleo, o mesmo sofrerá alterações químicas, que elevarão a umidade. Além do que esses sistemas não protegem em caso de infiltrações que possam ocorrer. Logo o monitoramento contínuo da umidade do óleo ajuda à identificar falhas no sistema de preservação e possíveis infiltrações.

2.1.4 Sistemas de Resfriamento

Os sistemas de resfriamento são responsáveis por resfriar o transformador para evitar aquecimentos excessivos que podem danificar o equipamento. Além de ter uma função isolante, o óleo tem também a função de ajudar no controle da temperatura. Em um carro por exemplo a água passa pelo motor para reduzir a temperatura com troca de calor aumentando sua temperatura e depois passa pelo radiador, onde novamente troca calor e diminui sua temperatura, no transformador o funcionamento é parecido, o óleo troca calor com o núcleo, e depois passa por um radiador para diminuir sua temperatura.

Conforme descrito na IEC 600076-2 [5] existem vários tipos de sistemas de resfriamento, entre eles, radiador, trocador de calor e ventiladores. Os radiadores mais comuns são constituídos por aletas compostas por duas chapas estampadas formando os canais de resfriamento. E existem também os formados por tubos. Seu funcionamento é baseado no princípio de convecção, onde o líquido quente circula no interior do radiador, e resfriado pelo ar ambiente do exterior do radiador, depois o líquido retorna para o tanque principal.

Para aumentar a eficiência dos radiadores os mesmo podem ser associados à ventiladores que aumentam o fluxo de ar nas aletas e bombas para forçar o fluxo do líquido pelo radiador.

Os trocadores de calor tem funcionamento baseado na condução térmica, transferindo calor de um fluido para outro, sendo os dois separados por uma parede sólida para não haver misturas, esse tipo de equipamento é utilizado para resfriar o óleo do transformador utilizando, na maioria das vezes, água proveniente de reservatórios com líquido refrigerante [2].

O sistema de resfriamento deve ter uma atenção especial em relação a manutenção preventiva, pois em casos de contingência, onde se exija uma operação do transformador em carga máxima ou até em sobrecarga, se o sistema de resfriamento não estiver funcionando bem o transformador pode superaquecer ocasionado danos graves ao equipamento.

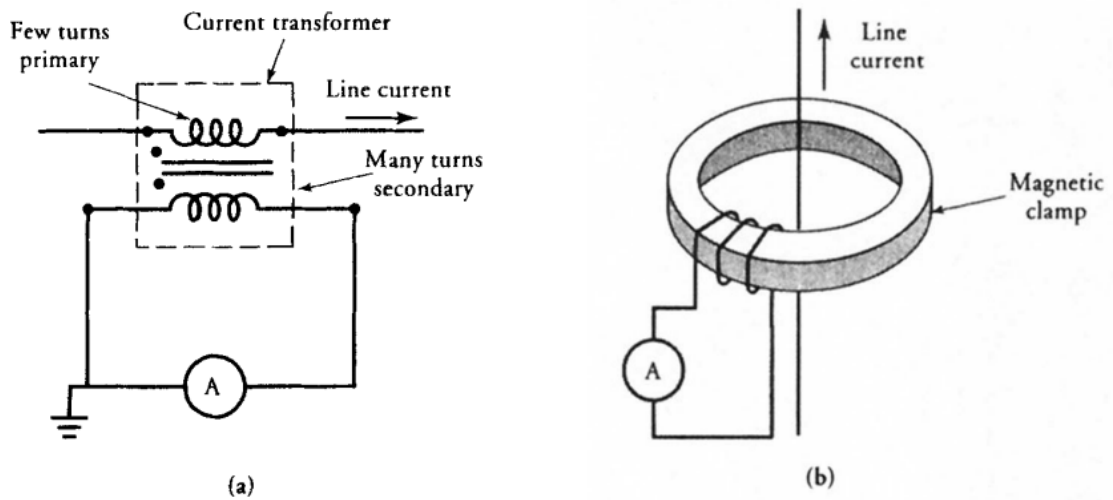
Inspeções periódicas para detecção e eliminação de corrosão, danos, desgaste no radiador, verificação de vazamentos nos trocadores de calor, verificação do funcionamento de bombas de óleo e ventiladores, devem ser adotadas para aumentar a vida útil do sistema de refrigeração e consequentemente do transformador [2].

2.1.5 Transformadores de Corrente

Os transformadores de corrente (TCs) tem a função de reduzir a corrente nos terminais secundários. São projetados principalmente para permitir a medição de altas correntes em sistemas de potência. Tipicamente os TCs tem poucas espiras no enrolamento primário e várias espiras no secundário, fazendo assim com que a tensão no secundário aumente enquanto a corrente diminui, permitindo a medição com amperímetros de menor escala conectados aos terminais secundários, como a resistência interna do amperímetro é insignificante o mesmo é tratado como um curto-circuito.

Os transformadores de corrente são projetados para operarem em condições de curto-circuito [6][p.270]. A Figura 2.3 mostra a representação de um transformador de corrente sendo utilizado para medição com amperímetro.

Figura 2.3 – a) Transformador de corrente com enrolamentos primário. b) Transformador de corrente tipo braçadeira.

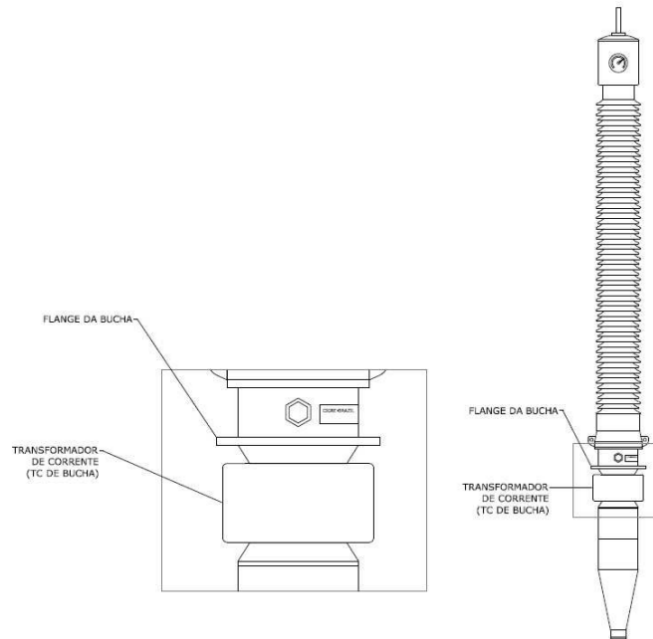


Fonte: [6]

Os transformadores de corrente proporcionam isolamento contra a alta-tensão do lado primário, são chamados de transformadores de instrumentos e suprem os medidores, relés de proteção e os dispositivos de controle com tensões e correntes proporcionais às que circulam pelos circuitos de potência, suficientemente reduzidas. Os medidores e outros dispositivos ficam instalados no lado secundários onde o comportamento da corrente representa o comportamento do lado primário só que em uma escala menor possibilitando por exemplo, medir a corrente do circuito de potência utilizando um amperímetro simples, cujo o resultado adquirido deve ser multiplicado pela relação de transformação do transformador de corrente para se descobrir a corrente no lado primário [4].

Os transformadores de corrente de bucha são dispositivos tipo toroidal, instalados em transformadores para obter uma corrente secundária com valores proporcionais às do circuito primário, necessários para utilização de sistemas de medição instantânea, proteção e controle do equipamento. A instalação típica dos TCs é feita na parte inferior da bucha, como pode ser visto na Figura 2.4 [2].

Sem os TCs não seria possível medir valores tão altos de corrente com sensores simples, já que seriam correntes fora da escala de equipamentos convencionais. Através dos mesmos é possível verificar em tempo real o carregamento do transformador e estimar a temperatura que o transformador deveria estar operando. Assim, é possível comparar os valores estimados com valores medidos, e ao se identificar divergências, verificar se o sistemas de resfriamento esta funcionando adequadamente e o estado do isolamento do transformador.

Figura 2.4 – Instalação típica de TC de bucha em transformador.

Fonte: [2]

2.2 Análise de óleo isolante de transformadores de potência

O óleo mineral é usado como líquido de refrigeração e isolante em equipamentos elétricos desde o início do século XX e precisam atender características de qualidade definidas pela Agência Nacional de Petróleo (ANP), sendo as principais: resistência à oxidação, rigidez dielétrica elevada, fator de dissipação/potência baixos, viscosidade e ponto de fluidez suficientemente baixos para ter circulação em baixas temperaturas, isolamento e refrigeração suficientes para assegurar a extinção de arcos.

O óleo mesmo em um equipamento em condições normais de operação se desgasta com o tempo, fazendo com que as características de qualidade citadas sejam deterioradas, em casos em que durante a operação o equipamento seja exposto à processos de oxidação, contaminação por água, fibras da celulose, arcos elétricos, superaquecimento localizado ou geral a deterioração do óleo será mais rápida [2].

Um dos métodos utilizados para o tratamento do óleo isolante é o processo de secagem da isolação (ou parte ativa). Esse procedimento é necessário, visto que, um transformador com menor teor de água pode ser mais carregado caso necessário, e seu sistema de isolação sólida será mais preservado. O procedimento de secagem pode ser lento, e depende de análise de amostras de óleo durante o processo para definição do momento em que o óleo está suficientemente seco.

Quando o teor de água de um transformador aumenta, é preciso realizar proce-

dimentos de secagem, essa é uma decisão técnica importante e deve ser analisada com critério para que seja escolhida o melhor método, que garanta o melhor custo benefício melhorando a confiabilidade operativa do equipamento. Existem dois tipos de secagem do isolamento, *on-line* ou *off-line*, ou seja, com o transformador em operação ou não. Em casos com o transformador em operação são utilizados tratamento por termo vácuo, filtros absorventes de umidade, peneira molecular. Em casos de tratamento *off-line*, são utilizados, secagem por alto vácuo, secagem por circulação de óleo quente e vácuo e outros [2].

Há um custo agregado ao processo de secagem, em casos *on-line*, é preciso deslocar equipamentos e equipe até o transformador, em casos *off-line* é preciso retirar o transformador de operação e atribuir sua carga a outro, o que pode ocasionar falhas no transformador que recebe a carga, além transporta-lo até a oficina de manutenção. Portanto esse tipo de manutenção atinge diretamente a saúde financeira da concessionária e também pode afetar a sociedade ocasionando interrupções no fornecimento e energia.

Tabela 2.1 – Relação entre problemas no transformador e parâmetros do óleo

Parâmetros do óleo	Problemas no Transformador								
	Superaquecimento			Descarga Parcial			Sist. De Preservação Do Óleo / Vedações		
	Núcleo	Conexão	Enrolamento Refrigeração	Óleo	Papel	Óleo /Papel	Ruptura	Vazamento	Entrada de água
Acidez	A	A	A	B	B	B	B	B	A
	1,2	1,2	1,2						
Cor	A	A	A	B	B	B	B	B	B
	1,2	1,2	1,2						
Teor de Água	B	B	A	B	A	A	B-M	M	A
			5,6		5,6	5,6			6
Rigidez Dielétrica	B	M	A	A	M	A	M	M	A
		3,12	4,6,12			11			
Fator de Dissipação	A	A	A	B	B	B	B	B	A
	1,2	1,2	1,2						
Teor de Gás	A	A	A	A	A	A	A	M	B
	1,10	1,10	1,10						

Fonte: *Guide for Transformer Maintenance A2.34 CIGRÉ*, item 5.3.5[7]

Análises de aspectos físico-químicos do óleo dos transformadores podem fornecer indicativos de falhas em componentes como mostra a Tabela 2.1, sendo, portanto, importante realizar análises periódicas de amostras de óleo como um método de manutenção preventiva. É importante ressaltar que os parâmetros do óleo indicam problemas em partes do transformador, desse modo, são consequências e não a causa do problema.

O monitoramento do óleo isolante permite definir quando é realmente necessário realizar os procedimentos de secagem do isolamento. E durante o processo de secagem,

Tabela 2.2 – *Legenda referente à Tabela 2.1*

Legenda		
Influência do problema no óleo	Problema no transformador	
A - Alta	1 - Degradação do óleo	7 - Ar dissolvido
M - Média	2 - Envelhecimento do óleo	8 - Água
B - Baixa	3 - Carbonização do óleo	9 - Água, Sedimentos, Emulsões
	4 - Degeneração do papel	10 - Produção de gás
	5 - Envelhecimento do papel	11 - Bolhas
	6 - Produção de água	12 - Partículas

Fonte: *Guide for Transformer Maintenance A2.34 CIGRÉ [7]*

informa com precisão quando o mesmo deve ser encerrado, indicando um baixo teor de água.

2.3 Análise do papel isolante de transformadores de potência

O papel isolante de transformadores é o componente mais suscetivo à envelhecimento, não é possível fazer a troca desse material sem a desmontagem total do transformador, e troca completa dos enrolamentos. O custo para esse processo é alto, e na maioria das vezes não é financeiramente viável. Desse modo, quando há uma grande degradação do isolamento sólido, é considerado o fim da vida útil do transformador. Os mecanismos de degradação do papel isolante são: hidrólise, pirólise e oxidação [2].

A hidrólise é causada principalmente pelos efeitos da água na celulose, produzindo compostos furânicos, dos quais o 2-furfuraldeído (2FAL) em maior quantidade, é mais usado como indicador de degradação do papel, sua análise pode ser feita sem desligamento do transformador através de cromatografia líquida. A oxidação ocorre porque a celulose é altamente suscetível à mesma, e nesse processo são formados produtos secundários como CO , CO_2 , H_2 , H_2O . Já a pirólise é proveniente de aumento de temperaturas a partir de $130^{\circ}C$, que como ocorre na degradação por hidrólise e oxidação o grau de polimerização e resistência a tração são reduzidos, resultando em formação de água e óxidos de carbono [8].

Há acordo entre autores que os três fatores principais, responsáveis pela degradação do papel, são temperatura, oxigênio e umidade, embora outros fatores também sejam importantes como acidez e presença de campos elétricos [2].

Existem testes que podem ser feitos para identificar o grau de deterioração do papel isolante. Um deles é a análise do grau de polimerização do papel, que é uma medida precisa da degradação do mesmo. Porém para realizar esse procedimento é preciso a extração de amostras do papel do transformador, sendo necessário acesso direto aos enrolamentos, o que só é possível em grandes reparações do mesmo ou quando o mesmo é retirado de operação para descarte.

Desse modo a análise do óleo isolante, que está em contato com o papel, tem indícios da degradação do mesmo, como compostos furânicos e outros produtos provenientes da degradação da celulose, por exemplo, água.

Quando olhamos pela perspectiva de quantidade de água dentro do sistema papel-óleo, notamos que se encontra muito mais água na celulose do que no óleo, por exemplo, em um transformador de 150 MVA, 400kV tem aproximadamente sete toneladas de papel, contém aproximadamente 223kg de água. O volume de óleo nesse tipo de transformador é aproximadamente 80 mil litros, assumindo um teor de água de 20 ppm(partes por milhão) teríamos uma massa de água de aproximadamente 2 kg, menos de 1% da quantidade presente no papel [9].

Alguns modelos foram desenvolvidos para mensurar a quantidade de água na celulose, para assim, mensurar seu grau de deterioração. Um dos primeiro modelos foi o de Fabre e Pichon [10], que relacionou a quantidade de água no óleo(em ppm) com o percentual de água no papel(%), levando em consideração a temperatura do óleo. Em 1983 Oommen [11] estabeleceu uma relação entre a umidade relativa do óleo isolante com a umidade relativa do papel.

A quantidade de água no óleo pode ser medida enquanto o equipamento estiver em operação utilizando sondas de umidade para óleo, e atrelando a isso a aferição de temperatura é possível através de modelos matemáticos definir a umidade no papel isolante, que será explicado na próxima seção. Existem outros métodos para medir a quantidade de água no óleo e no papel, porém esse oferece a vantagem de ser feito com o transformador em operação [12].

Monitoramento de Transformadores

Este capítulo apresenta métodos de monitoramento e ferramentas para a realização do mesmo. São apresentadas formas de monitoramento abordadas na literatura e alguns equipamento de mercado que efetuam monitoramento de transformadores. Também são apresentados protocolos de comunicação com a *internet* e entre dispositivos eletrônicos.

3.1 Monitoramento *On-line* Contínuo de Transformadores

O monitoramento é um mecanismo importante para acompanhar o funcionamento de diversos equipamentos e sistemas, anomalias são facilmente detectadas com um monitoramento contínuo. Quando se trata de transformadores de potência, o monitoramento *on-line*, significa que o monitoramento é realizado com o equipamento em operação, ou seja, energizado, sempre respeitando as normas de segurança.

Para um monitoramento eficiente e contínuo, são utilizados dispositivos eletrônicos inteligentes (IED - *Intelligent Electronic Devices*), que são capazes de medir, armazenar, processar e transmitir dados dos equipamentos ao qual está monitorando.

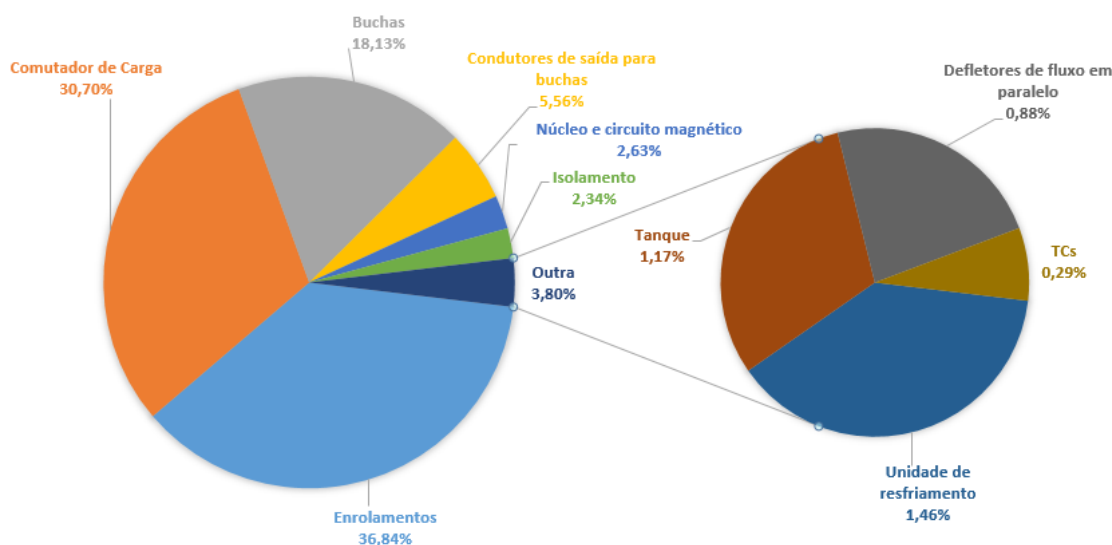
Empresas de energia elétrica pelo mundo, buscam constantemente maior eficiência, qualidade e menores custos. Para isso, adotam sistemas de monitoramento *on-line* contínuo como meio para atingir objetivos como: reduzir risco de falhas, acompanhar evolução de grandezas monitoradas, reduzir custos relacionados à manutenção preventiva e melhoria na gestão de ativos. Quando bem utilizado o monitoramento pode prover detecção de alterações em grandezas monitoradas assim que ocorram, geração de alertas automáticos, e em caso de falhas o monitoramento fornece dados antes, durante e após a falha para serem avaliados [2].

Existem diversos sistemas de monitoramento que fornecem excelentes meios de coleta e armazenamento de dados, porém, ainda se faz necessário melhorias nos sistemas de diagnósticos, para fornecer subsídios para a gestão dos ativos, visando melhorias no

processo de manutenção e na vida útil do equipamento. Se tratando de transformadores de potência, são os bens mais valiosos de uma subestação, é consenso a importância da aplicação de sistemas de monitoramento *on-line* nesses equipamentos. No Brasil, onde o mercado de energia é regulado pela disponibilidade, e penalizado com multas em caso de interrupções de fornecimento, a operação e manutenção do sistema de geração e distribuição devem ser precisas e eficientes, para evitar prejuízos [4].

Através de análise de falhas em transformadores são definidas variáveis chaves que devem ser monitoradas para evitar problemas que levem a retirada do equipamento de operação para manutenção ou substituição. A Figura 3.1 mostra um gráfico retirado da brochura técnica 642 do Cigré (*Transformer reliability survey*), onde podem ser visualizados os componentes que causaram as principais falhas de transformadores analisados na pesquisa.

Figura 3.1 – Causa de falha em análises de transformadores fabricados depois de 1980. (342 falhas, classe de tensão $\geq 100kV$)



Fonte: Adaptado de CIGRÉ(2015)[13]

Para o monitoramento da parte ativa, são utilizados o monitoramento das grandezas, temperatura do óleo, dos enrolamentos e do ambiente, umidade no papel isolante, tensões, correntes e potências ativas e reativas e análise de gases dissolvidos no óleo, tais como: hidrogênio (H₂), metano (CH₄), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), etano (C₂H₆), etileno (C₂H₄) e acetileno (C₂H₂). Para monitoramento de buchas são analisadas a capacitância, tangente delta, corrente de fuga e tensões fase-terra. Quanto ao tanque e óleo, tem-se teor de água e sua tendência de evolução e saturação relativa de água no óleo. Quanto maior o número de variáveis monitoradas, melhor será a avaliação do equipamento seja em condições operativas ou estimativa de sua vida útil [14].

Além dos benefícios referentes à melhoria da operação e manutenção do transformador, possibilitando um caminho para manutenção preditiva desses equipamentos com base nos dados monitorados, tal monitoramento é avaliado por seguradoras que oferecem desconto no valor do prêmio do seguro do equipamento, visto que, está havendo um monitoramento contínuo para diminuir riscos [4].

Existem duas arquiteturas principais em sistemas de monitoramento transformadores, a centralizada e a descentralizada. A centralizada consiste em uma arquitetura onde existe um controlador que concentra as leituras dos sensores, trata, armazena e exibe os dados, os sensores para esse tipo de controlador são específicos, e as vezes não é possível efetuar a troca apenas do sensor, sendo necessário a troca do equipamento por completo, em caso de falhas nesse centralizador, todos os dados armazenados podem ser perdidos. Já a arquitetura descentralizada, os IEDs tem papéis específicos, e são capazes de enviar os dados diretamente para o *software* de monitoramento, onde os dados estarão centralizados e seguros em um *data center*, esse tipo de arquitetura é modular, permitindo a expansão e substituição de IEDs, facilitando assim a manutenção, em caso de falha em algum o sistema continua monitorando os outros que estão em funcionamento.

Dentro dessas arquiteturas podemos dividir o funcionamento em 4 etapas:

- **Medição de grandezas**, trata-se da coleta dos dados pelo sensor e sua conversão para valores digitais que possam ser transmitidos e armazenados;
- **Transmissão de dados**, pode ocorrer por fio ou sem fio, através de diversos protocolos, que podem ser proprietários ou não, que impactam diretamente na manutenção do mesmo;
- **Armazenamento e tratamento de dados**, as informações recebidas são armazenadas de forma estruturada, e tratadas, como, remoção de eventuais duplicidades, conversão para devida escala a ser analisada, processado por algoritmos para remoção de ruído, aplicação de modelos matemáticos para inferir dados relevantes com base nas grandezas monitoradas, como por exemplo, o modelo matemático para cálculo de teor de água no papel isolante com base no teor de água no óleo e sua temperatura;
- **Disponibilização de dados**, é a última etapa no processo, porém, pode ser considerada a mais importante, visto que, é nesse momento que os dados serão disponibilizados e analisados por especialistas para serem utilizados em tomadas de decisões importantes.

Existem requisitos básicos que um sistema de monitoramento *on-line* para transformadores deve atender como:

- **Robustez de hardware**, levando em conta que o mesmo ficará exposto ao ambiente, sujeito á calor, chuva, poeira;

- **Robustez de *software***, deve funcionar 24 horas, e ter consistência nos dados armazenados e exibidos;
- **Confiabilidade e disponibilidade**, o sistema deve ter uma confiabilidade maior do que o equipamento que monitoram, uma vez que o transformador não poderá ser desligado para manutenção no equipamento de monitoramento ou no sensor, portando os mesmos devem ser não invasivos ao transformador;

Em pesquisas pela *internet* é possível encontrar diferentes produtos que executam a função de monitoramento *on-line* de transformadores, cada um com suas particularidades. Alguns funcionam de forma centralizada, sendo necessário ir até o dispositivo para coletar/verificar os dados, outros conseguem transmitir os dados pela *internet* ou rádio, ou outro meio para um banco de dados. Diferentes grandezas podem ser monitoradas, em conjunto ou separadamente, sendo que cada empresa pode optar pelo que promova o melhor custo benefício para a compra desse tipo de produto.

3.2 Supervisório

O supervisório é um *software* utilizado para monitoramento e/ou controle de plantas de automação. Um tipo de supervisório é o SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition), esse tipo de sistema consiste em alguns terminais remotos conectados de alguma forma (fio, *internet*, rádio), e em um computador central, onde os dados são recebidos, processados e visualizados. Em alguns casos é possível também enviar comandos através do supervisório[15].

Os supervisórios são uma importante parte da automação, é preciso além de automatizar os processos, saber se os mesmos estão funcionando corretamente, os supervisórios permitem isso, um monitoramento ativo e até mesmo intervenções caso necessário.

Outro aspecto importante relaciona-se aos dados que o mesmo detém. Geralmente os dados são apenas mostrados e arquivados no próprio computador onde se encontra o supervisório, esses dados contém informações preciosas que devem ser guardadas em locais seguros, para que sejam utilizadas em estatísticas e análises possibilitando a identificação de padrões e anomalias.

O supervisório é uma ferramenta muitas vezes crítica diante de sua importância para o bom funcionamento do sistema. Logo, qualquer falha no mesmo pode acarretar grandes problemas. A facilidade de acesso ao supervisório também deve ser levada em consideração, pois quanto mais simples e fácil o acesso a informação, mais rápidas ações podem ser tomadas.

Diante disso existem diversos casos em que os sistemas supervisórios são migrados para nuvem. Ao transferir o supervisório para uma infraestrutura em nuvem,

todo os dados de monitoramento podem ser armazenados e monitorados de forma remota. No caso de um SCADA existem certos requisitos a serem cumpridos para o bom funcionamento[16], são eles:

- **Segurança**, o sistema deve ter controles de acesso, os dados coletados podem ser sigilosos, portanto, podem ser criptografados antes de serem armazenados, no caso específico da nuvem podem ocorrer ataque de negação de serviço (DDOS), logo, o mesmo deve estar preparado para isso;
- **Disponibilidade**, diz respeito ao fato de que o sistema deve estar disponível todo o tempo para acesso, em pleno funcionamento;
- **Comunicação em tempo real**, em casos que o monitoramento se trata de dados que mudam muito rapidamente o tempo entre a coleta do dado e seu envio até o supervisor para ser disponibilizado ao usuário deve ser levado em consideração antes de se levar o supervisor para nuvem;
- **Confiabilidade**, se da pela capacidade do supervisor suportar adversidades, ter seus dados íntegros e seguros, a infraestrutura em nuvem provê facilidades para isso já que possuem, de maneira fácil, backups automáticos e replicação em tempo real.

3.3 Protocolos de Comunicação na *internet*

A *internet* possui uma arquitetura baseada em camadas, onde cada camada possui seus protocolos, podendo eles serem implementados através de *hardware* ou *software*. A pilha de protocolo da *internet* de cinco camadas está dividida em: Aplicação, Transporte, Rede, Enlace e Física.

As camadas que mais interessam ao desenvolvimento deste projeto são as camadas de aplicação e transporte, já que os dados precisam trafegar na *internet* até chegar ao servidor, o que implica na utilização de um protocolo que evite perda dos dados na transferência, garantindo que eles estejam íntegros até sua chegada ao servidor. A camada de aplicação é onde se encontram os protocolos das aplicações como HTTP (*HyperText Transfer Protocol*), SMTP (*Simple Mail Transfer Protocol*) e outros. Já a camada de transporte é responsável por transportar os dados da camada de aplicação. Na *internet* há dois protocolos de transporte: o UDP (*User Datagram Protocol*) e o TCP (*Transmission Control Protocol*). O TCP dispõe de mecanismos de entrega garantida, assim, ele garante a entrega ao destino e a integridade dos dados recebidos.[17, p.183]

O HTTP é um protocolo de comunicação implementado em dois programas: cliente e servidor, que se comunicam através da troca de mensagens. O HTTP usa o TCP como seu protocolo de transporte, possuindo, assim, confiabilidade de entrega dos dados.[17, p.73]

Entretanto, isso não é suficiente, já que necessita-se também que os dados estejam seguros contra interceptações e alterações durante a transferência e, para garantir isso, será necessário o uso de um outro protocolo sobre o TCP: o HTTPS (*HyperText Transfer Protocol Secure*).

O HTTPS é uma variação do HTTP com auxílio do protocolo SSL(*Secure Socket Layer*), o SSL pode ser interpretado como uma camada de Segurança entre a camada de aplicação e a de transporte. Com isso, é possível se estabelecer uma conexão segura e fazer com que os dados que trafegam por essa conexão sejam criptografados, de forma que somente o remetente e o destinatário saibam como decifrá-los.[18, p.609]

3.4 Bluetooth

A comunicação sem fio está cada dia mais presente em nossas vidas, por exemplo, fones de ouvido e controles de *video-games* não precisam mais de fios para serem conectados à aparelhos, para isso, uma das tecnologias utilizadas é a comunicação Bluetooth.

Na indústria, o Bluetooth, está conduzindo o aumento de coleta de informações, abrindo caminho para a próxima revolução industrial. Essa tecnologia permite comunicação entre redes de sensores para detectar falhas e irregularidade em equipamentos, para que seja possível realizar manutenções preventivas garantindo maior durabilidade dos equipamentos. Além disso telefones e *tablets* estão substituindo *displays* em máquinas e equipamentos, melhorando o monitoramento e controle dos mesmos.[19]

Com o amadurecimento da tecnologia Bluetooth e sua grande presença no mercado, a indústria vem trabalhando para expandir aplicações da tecnologia em comunicações sem fio de curta distância. Diferentes áreas do mercado estão utilizando a tecnologia para comunicação com dispositivos de áudio, *internet* das coisas (IoT), e comunicação machine-to-machine(M2M) [20].

A maioria dos aparelhos *smartphone* tem interface de comunicação Bluetooth, assim, a grande parte das pessoas que possuem esses aparelhos tem contato com essa tecnologia. A mesma permite a comunicação direta entre dois dispositivos que tenham a tecnologia, evitando que seja preciso um outro dispositivo para prover a comunicação, como é no caso do *wi-fi*, onde é preciso um roteador para intermediar a comunicação.

A possibilidade de comunicação direta permite que dispositivos eletrônicos se comuniquem diretamente com aparelhos *smartphones* sem a necessidade de intermediários. Desse modo é possível monitorar e controlar dispositivos eletrônicos por meio de uma interface virtual em aplicativos de *smartphones*. Pelo fato de se utilizar um aplicativo, a interface pode ser mais rica em detalhes e informações, facilitando o treinamento e

entendimento por parte dos usuários, e claro, a possibilidade de atualizações remotas no aplicativo sem necessidade de intervenção do usuário nem alterações no dispositivo.

Assim, é possível desenvolver dispositivos menores, já que serão dispensados o uso de botões e *displays* de dados além de diminuir a interação mecânica com o mesmo, já que a interação será feita por meio do aplicativo. A manutenção de dispositivos que não contam com botões e telas é menor, já que esses componentes são mais suscetíveis a danos por estarem expostos ao meio e em contato físico frequente com os operadores.

3.5 Dispositivos de Mercado para Monitoramento de Transformadores

No mercado existem vários dispositivos voltados para monitoramento de transformadores e subestações de distribuição e transmissão de energia. O foco principal da busca foi por dispositivos capazes de monitorar o estado do óleo isolante. Entre os dispositivos pesquisados disponíveis no mercado brasileiro, os que mais chamam a atenção são: HYDROCAL, MSENSE DGA 2 e TREETECH MO.

O HYDROCAL 1003+ é capaz de monitorar temperatura e umidade do óleo, hidrogênio, monóxido de carbono. Possui um visor onde são exibidas as grandezas monitoradas, gráficos de monitoramento das grandezas e alertas. Comunicação com a *internet* é apenas por modem 2G/3G externo. A configuração do mesmo é realizada através de um *software* de computador, o computador deve ser conectado através de cabo ao dispositivo para realizar a configuração e exportar os dados coletados.

O MSENSE DGA 2 é capaz de monitorar temperatura e umidade do óleo, hidrogênio, monóxido de carbono. Possui visor que exibe valores das grandezas monitoradas, e alertas. Não possui interface de comunicação direta com *internet*. Configuração e análise dos dados é feita por meio de *software* do fabricante, em um computador diretamente ligado ao dispositivo.

O TREETECH MO, é capaz de monitorar temperatura e umidade do óleo, e temperatura ambiente. Possui um visor que exibe os valores das grandezas monitoradas e alertas. Não possui interface de comunicação direta com a *internet*. Toda a configuração é realizada por meio de botões no dispositivo, o módulo de memória é opcional, e não possui uma forma de exportação dos dados.

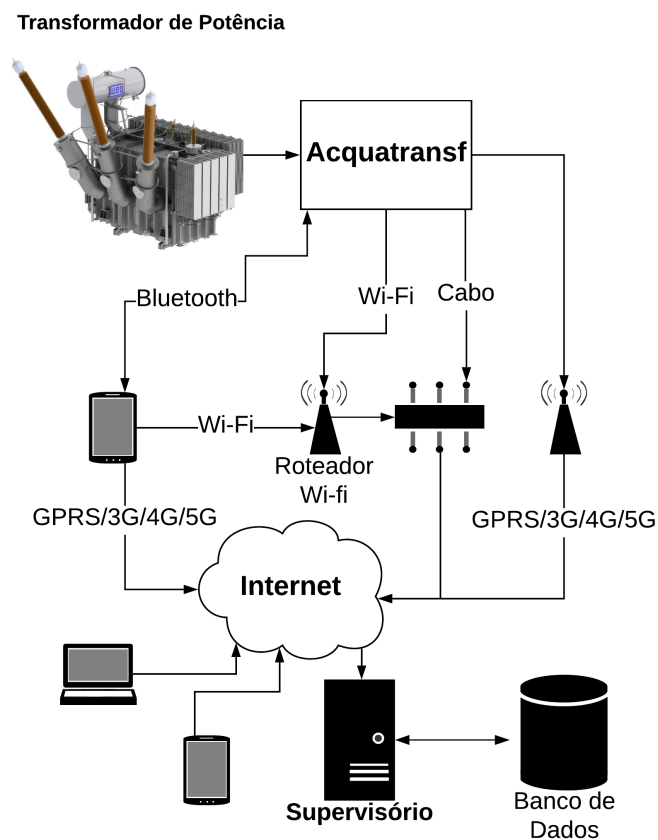
Desenvolvimento

Diante da análise da literatura e dos dispositivos disponíveis no mercado, foram encontrados pontos que podiam ser aprimorados, como por exemplo, o monitoramento de múltiplas variáveis simultaneamente para se verificar correlação entre as mesmas, um sistema que permitisse monitoramento remoto de forma fácil e também a análise histórica dos dados monitorados.

Outro ponto importante foi o custo de produção, já que existe uma grande quantidade de transformadores de potência em operação, para viabilizar o monitoramento de uma grande quantidade de equipamentos é preciso que o custo de produção e instalação desse dispositivo seja suficientemente reduzido para possibilitar economicamente a adoção por empresas do setor elétrico. Para aprimorar também o custo de manutenção do dispositivo, o mesmo foi desenvolvido de forma modular, possibilitando substituição de componentes defeituosos de forma fácil, apenas encaixando e desencaixando conectores. A modularidade também permite que a quantidade de sensores possa ser expandida, possibilitando o monitoramento de vários pontos de um mesmo transformador ou mais transformadores com o mesmo equipamento.

O nome dado ao dispositivo desenvolvido foi Acquatransf. Ele traz inovações como, uso de conexão *wi-fi* para conexão com a *internet*, uso de Bluetooth para ser possível o desenvolvimento de uma interface virtual, através de aplicativo de *smartphone*, assim, evitando o uso de painéis e botões para configuração do dispositivo, uso de sensores de corrente não-invasivos, sensores de umidade e temperatura do óleo e do ambiente. A Figura 4.1 apresenta o diagrama de funcionamento do Acquatransf, coletando os dados do transformador e podendo enviar os dados para o supervisor na *internet* de diferentes maneiras, onde os dados são armazenado em um banco de dados possibilitando a análise histórica.

Figura 4.1 – Diagrama de funcionamento do sistema de coleta de dados.



Fonte: Próprio autor.

O desenvolvimento foi subdividido em três: o "Coletor", se trata do dispositivo de aquisição de dados, o "Aplicativo" é o responsável pela configuração e monitoramento do coletor e o "Supervisor em Nuvem" que é responsável pelo monitoramento remoto e análise histórica dos dados coletados.

4.1 Coletor

Para realizar os objetivos do projeto, foi preciso projetar uma placa de circuito impresso capaz de agregar sensores e dispositivos de comunicação. Assim, a mesma tinha que contar com conversores analógico-digital (ADC), comunicação *wi-fi*, Bluetooth, e capacidade de armazenamento de dados.

O tamanho do dispositivo e o custo de produção foram levados em conta na escolha dos sensores e componentes eletrônicos utilizados. Os sensores utilizados são:

- sensor de temperatura e umidade do óleo modelot LDH-100 da IFM Electronic com 2 saídas analógicas de 4 a 20mA, com alimentação de 9V a 33V;

- sensor de umidade e temperatura ambiente modelo DHT-11, com saída digital, e alimentação de 3.5V a 5.5V;
- sensor de corrente SCT-013-X, com saída analógica e não requer alimentação.

O sensor de umidade e temperatura do óleo utilizado para desenvolvimento e testes foi o LDH-100, podendo analisar tanto óleo mineral como também óleo vegetal. O funcionamento dele se dá através da imersão de um capacitor cuja constante dielétrica depende da temperatura e da umidade do óleo ao qual o mesmo está imerso. O sensor emite uma corrente que varia de 4mA à 20mA, para representar uma variação de temperatura de -20°C a 120°C e de 0% a 100% de umidade. Esse sensor foi escolhido por ter uma boa precisão, ser amplamente comercializado no Brasil e por estar disponível para uso durante o desenvolvimento do projeto. Entretanto o *hardware* desenvolvido pode ser usado com outros sensores que forneçam saídas analógicas, podendo utilizar até mesmo sensores de baixo custo.

Os sensores de corrente utilizados foram da marca YHDC[21] modelos SCT-013-X, onde 'X' representa a capacidade de medição, tal sensor deve ser escolhido de acordo com a corrente do TC(transformador de corrente) que será monitorado, os sensores disponíveis são de 5A, 10A, 15A, 20A, 25A, 30A, 50A, 60A e 100A. O princípio de funcionamento do sensor é gerar uma tensão de saída mediante a corrente induzida pelo campo magnético proveniente do condutor que está sendo envolvido pelo sensor, ou seja o mesmo funciona como um transformador de corrente. A saída que esse sensor disponibiliza é de 0V à 1V que representa uma corrente de 0A à faixa máxima de medição do sensor. Esse tipo de sensor foi escolhido por apresentar boa precisão, ser facilmente encontrado no mercado e ter um baixo preço de aquisição. Todavia, assim como o sensor de umidade e temperatura do óleo, esse sensor pode ser substituído por outro modelo que possa fornecer saída analógica ou digital.

Optou-se em utilizar um Arduino Nano, pois em um único componente já integra 8 entradas ADC (*Analogic Digital Converter*) com 10 bits resolução, interface de comunicação serial e capacidade de processamento dos dados coletados, também por ser uma placa pequena, simples de programar e fácil de encontrar no mercado por um custo acessível.

Para armazenamento e comunicação foi escolhido o Raspberry Pi Zero W, um dispositivo pequeno que tem um sistema operacional completo, contando com interfaces de comunicação serial, *wi-fi* e Bluetooth, podendo também ser acrescido de um modem 3G/4G. O Raspberry conta também com grande capacidade de armazenamento já que aceita uso de cartões de memória, além do que permite programação de alto nível em diferentes linguagens.

No aspecto de alimentação dos componentes os mesmo tem tensões de alimentação diferentes. As sondas LDH-100 podem ser alimentadas de 9V à 33V, o Arduino nano

de 5V à 12V, o Raspberry de 5V à 5.5V. Assim foi preciso integrar na placa um módulo *step-down*, para diminuir a tensão de operação para níveis aceitos pelo Raspberry, assim a fonte utilizada para alimentação pode ser maior, mas no mínimo 9V para atender o sensor de umidade e temperatura do óleo.

Um dos requisitos do dispositivo é ser tolerante a falhas de comunicação e de energia. Para suportar quedas de energia o mesmo precisa de um fonte de energia recarregável para que continue funcionando por algumas horas, visando otimização de tamanho e peso optou-se por utilizar baterias de íon de lítio de 3,7V/4,2V arranjadas em série com três baterias, podendo ser novamente arranjadas em paralelo para ter uma autonomia maior.

A fonte escolhida para alimentação foi de 12V e 5A, a mesma foi arranjada em paralelo com o módulo das baterias de íon lítio exibido na Figura 4.2. Assim, caso se tenha fornecimento de energia, o módulo carrega as baterias e alimenta o circuito. Caso falte energia as baterias assumem a carga. A duração estimada de funcionamento com bateria é de quatro horas.

Figura 4.2 – *Módulo de armazenamento e carregamento de baterias.*



Fonte: Magical Tech Store.

A placa desenvolvida para integrar os sensores com o Arduino e o Raspberry conta com conectores "*plug and play*" para Arduino Nano, Raspberry PI Zero ou 3/3B, e

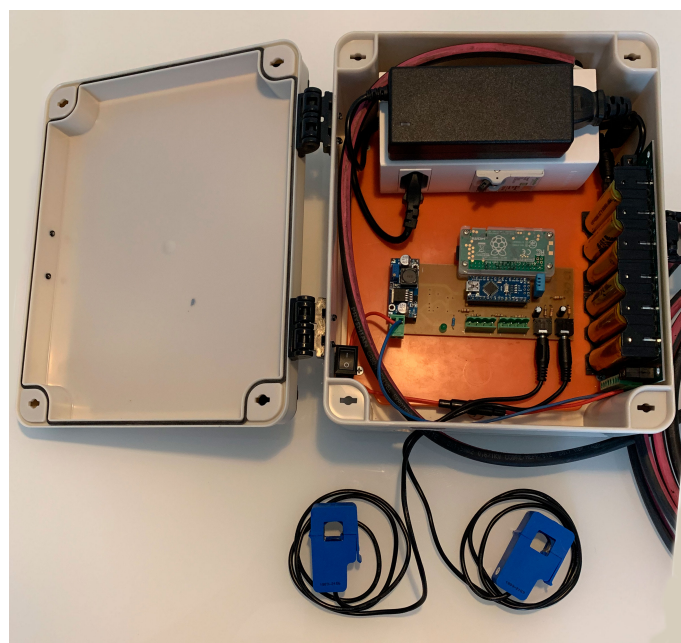
também para os sensores. A alimentação para tais dispositivos será suprida por uma fonte externa com redundância através do uso de baterias.

Foi utilizado um módulo *step-down*, para prover uma alimentação satisfatória para os dispositivos que utilizam menor tensão. O módulo *step-down* aceita tensão de entrada de 3,2V à 40V, saída ajustável de 1,5V à 35V e corrente de saída máxima de 3A, sendo ajustado para operar com entrada de 12V e saída de 5V.

Após impressão da placa projetada, foi feita a soldagem dos componentes e testado a comunicação serial entre o Arduino e o Raspberry, sendo possível coletar os dados com o Arduino e salvar em uma banco de dados SQLITE no Raspberry para que possam ser transmitidos para o servidor em nuvem ou disponibilizados para leitura via Bluetooth.

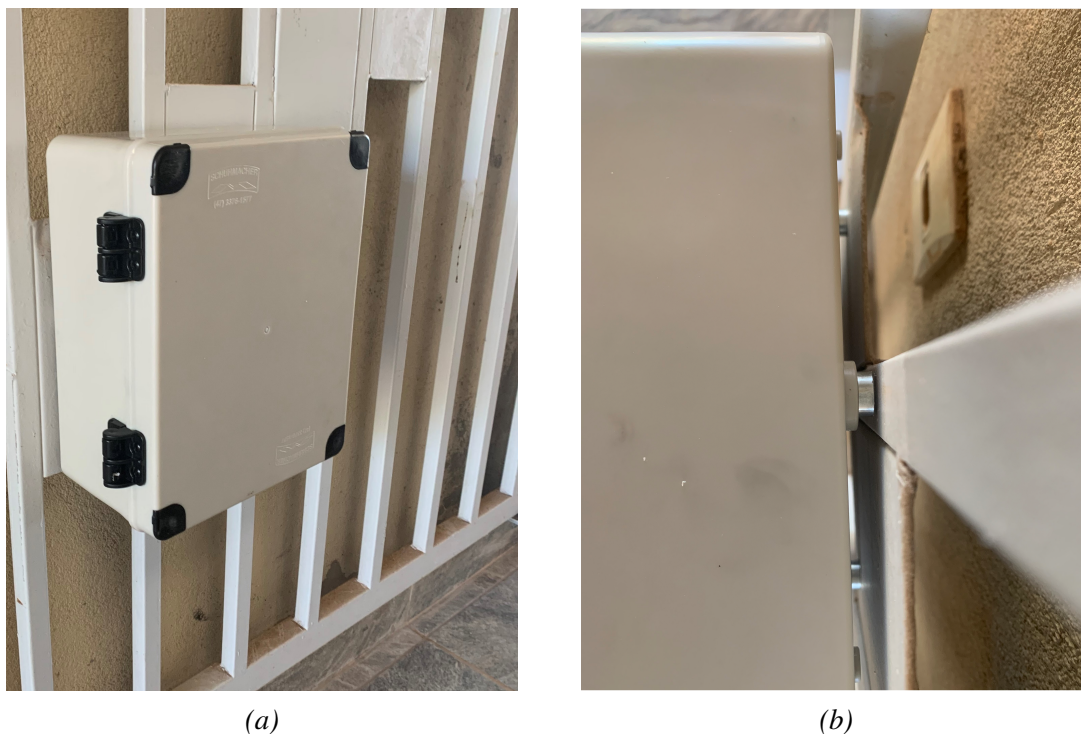
Um outro ponto relevante é a proteção do dispositivo em relação à rede elétrica e aos intempéries do ambiente. Para proteger o dispositivo contra surtos de tensão provenientes da rede elétrica e curto-circuitos, foi integrado ao mesmo um disjuntor juntamente com um dispositivo de proteção contra surtos (DPS) classe II, foi utilizado também um fusível de 1A para proteger os componentes mais sensíveis de um possível curto-circuito. Todos os componentes são armazenados em um involucro de plástico com índice de proteção IP66, ou seja, resistente à poeira ventos e chuvas fortes. O protótipo de coletor produzido pode ser visto na Figura 4.3, o mesmo tem 25x20x10 cm de dimensões e pesa 2,5 kg. Pelo seu peso e tamanho reduzidos o mesmo pode ser fixado ao transformador por meio de quatro imãs presentes na estrutura do coletor, como mostra a Figura 4.4. Caso necessário pode ser acoplado à uma estrutura independente com proteção sol e chuva.

Figura 4.3 – Foto Acquatransf.



Fonte: Próprio autor.

Figura 4.4 – Fixação por imãs: a) vista frontal; b) vista lateral



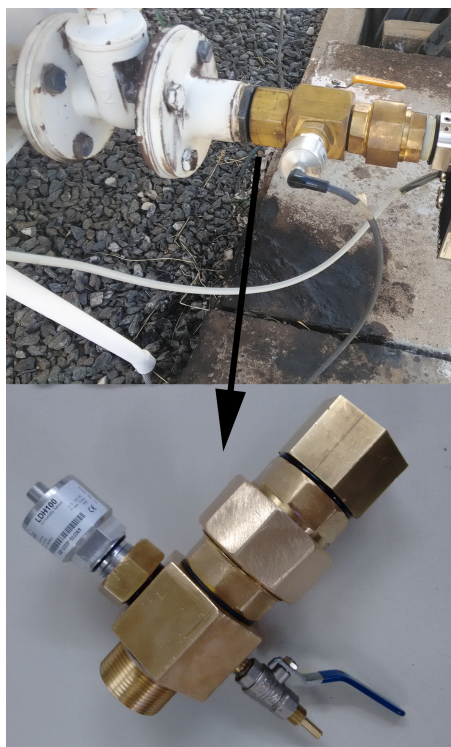
A conexão do sensor de umidade e temperatura do óleo ao transformador pode ser realizada através do coletor de óleo utilizando um conector adaptado para o sensor, que pode ser visto na Figura 4.5.

A próxima etapa foi do desenvolvimento do aplicativo que se comunica com o coletor através da tecnologia Bluetooth. Assim tornando possível a configuração e acompanhamento do funcionamento do coletor sem o uso de botões e *displays*, e sem necessidade de *internet* ou intranet, sendo necessário apenas um dispositivo móvel com Bluetooth.

O coletor é tolerante a falhas de comunicação e alimentação, pois quando o mesmo não consegue se conectar à *internet*, armazena os dados até que seja estabelecida uma nova conexão com o servidor em nuvem, os dados são armazenados no cartão de memória do dispositivo. Um cartão de 8Gb pode armazenar mais de 70 milhões de amostras.

O algoritmo implementado no *firmware* do coletor é simples. O mesmo coleta os dados dos sensores após um tempo pré-definido e tenta enviá-los para *internet*, se conseguir atualiza o banco de dados para que o mesmo não seja enviado novamente, e permanece nesse ciclo como pode ser visto na Figura 4.6. É feita uma nova tentativa de envio de todos os dados não enviados a cada nova amostragem dos sensores. O tempo de amostragem mínimo que pode ser configurado é de 3 segundos, essa configuração é realizada através do aplicativo desenvolvido.

É importante ressaltar que os fatores custo de produção e manutenção foram con-

Figura 4.5 – Foto Acquatransf.

Fonte: Próprio autor.

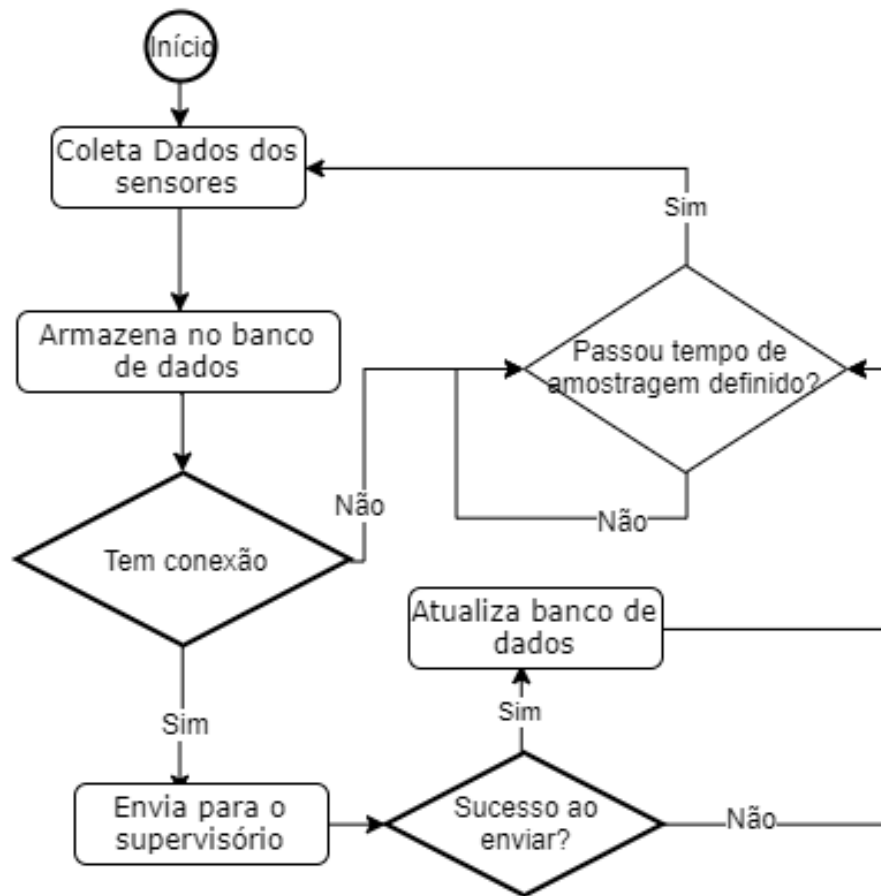
siderados no desenvolvimento desse projeto, e o objetivo foi obter a melhor performance com o menor custo, utilizando componentes de mercado de baixo custo e evitando-se o uso de componentes tais como botões e *displays* de dados, que podem ser substituídos por uma interface virtual através de um aplicativo para dispositivos móveis, o que também diminui a interação mecânica com o dispositivo fazendo com que ele seja menos suscetível a danos.

O dispositivo foi desenvolvido de forma modular, permitindo a fácil substituição de sensores ou componentes defeituosos, permitindo também a expansão de quantidade de sensores, caso seja necessário. Já que o dispositivo não necessita de botões e painéis de configuração, o mesmo se torna mais robusto às intempéries do ambiente, estando alojado em um invólucro fechado, tendo apenas os sensores necessários expostos.

O coletor armazena os dados em um banco de dados estruturado do tipo SQLite nele há duas tabelas "leituras" e "parametros". A tabela "leituras" contém os dados das amostras coletadas de cada sensor, a data e hora da amostragem, o ensaio da amostra e se o dado já foi ou não transmitido para o supervisor. A tabela "parametros" armazena os parâmetros configurados no coletor como nome do transformador, ensaio, taxa de amostragem e outros que possam ser necessários.

Os dados referentes às leituras dos sensores são armazenados em forma de texto onde a amostra de cada sensor é separada da outra por '#', cada amostra é composta

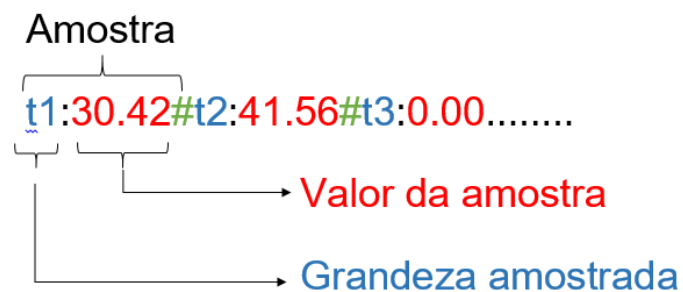
Figura 4.6 – Algoritmo do firmware.



Fonte: Próprio autor.

pele código do sensor, dois pontos(':'), e o valor da amostra. Como mostra a Fig. 4.7. Assim a estrutura é versátil para agregar mais sensores caso necessário.

Figura 4.7 – Formato do texto representativo da leitura dos sensores.



Fonte: Próprio autor.

4.2 Aplicativo

O aplicativo para dispositivos móveis, como *smartphones*, *tablets* e outros, foi desenvolvido para facilitar a comunicação com a *internet* e acesso aos dados do dispositivo coletor de dados. Dispensando assim a necessidade de botões, teclados e *displays*, permitindo o desenvolvimento de uma interface mais amigável de configuração, o que ajuda no treinamento de técnicos que farão a operação do dispositivo.

O aplicativo se comunica com o coletor através da conexão Bluetooth, esse tipo de conexão é utilizada por ser direta entre o dispositivo e o *smartphone*, sem a necessidade de um mediador. Por exemplo, no caso da comunicação *wi-fi* é necessário um roteador para disponibilizar a rede, para só após os dois dispositivos conectados, seja possível a comunicação entre eles. Assim, com o uso do Bluetooth, a comunicação fica totalmente independente de fatores externos, envolvendo apenas o dispositivo móvel e o coletor de dados.

As principais funcionalidades do aplicativo são:

- **Configuração de monitoramento:** permite identificar à qual transformador o dispositivo está conectado e, se for um ensaio de funcionamento, informar a identificação desse ensaio para futuras comparações;
- **Configuração da conexão *wi-fi*:** mostra as redes disponíveis e permite escolher a que se deseja conectar e informar a senha da mesma;
- **Configuração da taxa de amostragem:** essa funcionalidade permite configurar a taxa de amostragem das leituras do dispositivo de acordo com a necessidade do monitoramento;
- **Acompanhamento das leituras:** é possível monitorar os dados coletados em tempo real, para se verificar o perfeito funcionamento e acoplamento dos sensores;
- **Transmissão de dados:** a opção de transmissão é utilizada quando não se tem uma conexão com a *internet* disponível para o Acquatransf, assim é possível utilizar a *internet* do dispositivo móvel para enviar os dados coletados e armazenados no coletor para o supervisor em nuvem; e
- **Download de dados:** permite baixar para o dispositivo móvel os dados coletados, através do Bluetooth, para posteriormente serem enviados para o supervisor, em casos em que não há nenhum sinal de *internet* no local onde está instalado o transformador.

A configuração básica para o funcionamento do coletor é: informar a qual transformador o mesmo está conectado, a taxa de amostragem desejada e opcionalmente um identificador de ensaio. Como dito anteriormente a taxa de amostragem pode ser configurada de acordo com a necessidade do monitoramento sendo o tempo de amostragem mínimo de três segundos. A Fig. 4.8, apresenta a tela do aplicativo onde é realizada a

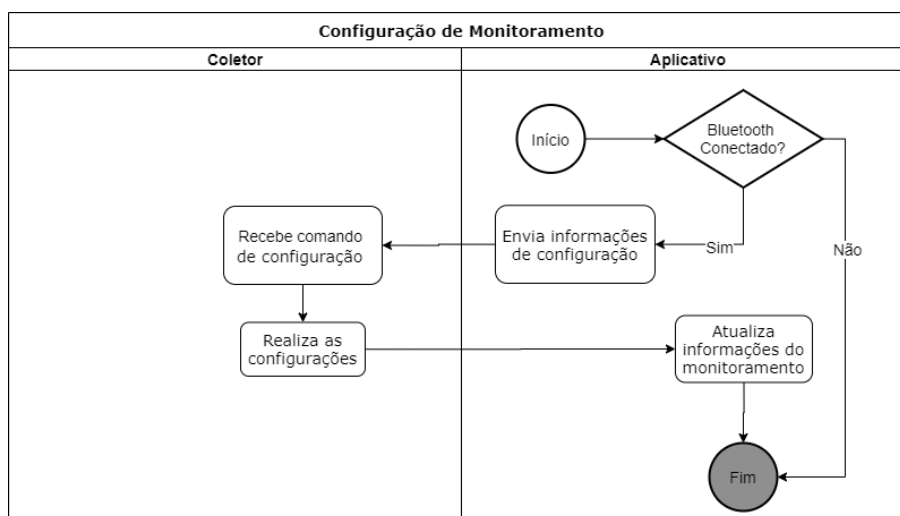
configuração, nessa mesma tela também é possível visualizar a última amostra coletada. O algoritmo de configuração pode ser visto na Fig. 4.9

Na tela de configuração do ensaio existe um botão do tipo "on/off", para definir se os dados deverão ser enviados para o supervisor utilizando a rede móvel ou *wi-fi* do dispositivo móvel utilizado. Caso seja ativado, é enviado um comando para o coletor que retorna todas as amostras não transmitidas, e é realizada a tentativa de envio desses dados para o supervisor, em caso de sucesso as amostras são atualizadas no banco de dados do coletor para não serem enviadas novamente. O algoritmo de transmissão de dados pelo aplicativo pode ser visto na 4.10.

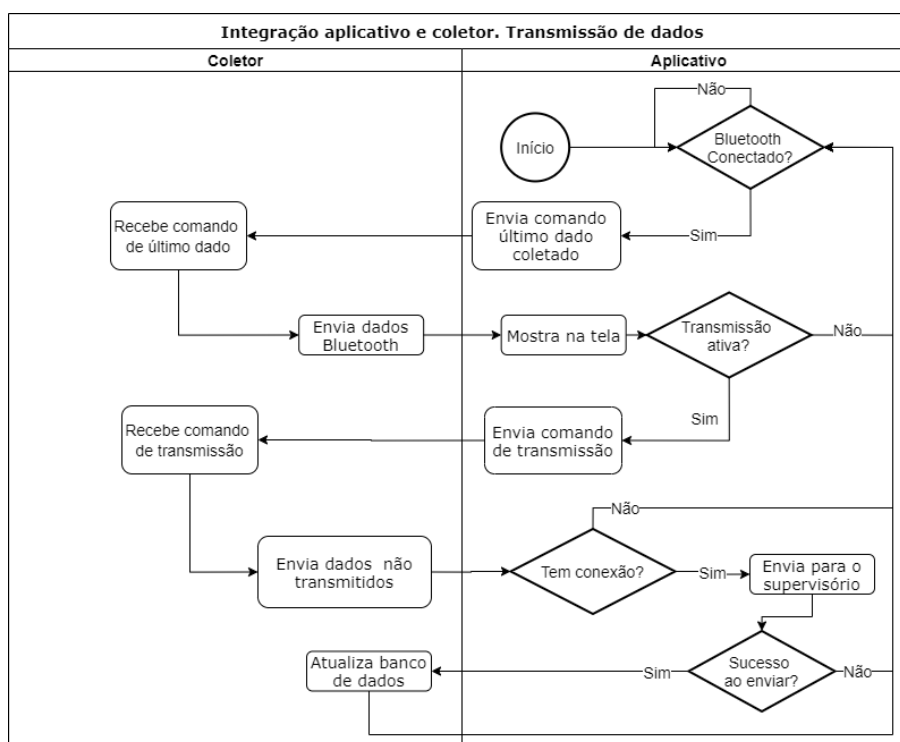
Figura 4.8 – Tela de configuração de monitoramento do aplicativo.



Fonte: Próprio autor.

Figura 4.9 – Algoritmo de configuração do monitoramento.

Fonte: Próprio autor.

Figura 4.10 – Algoritmo de monitoramento e transmissão de dados através do aplicativo.

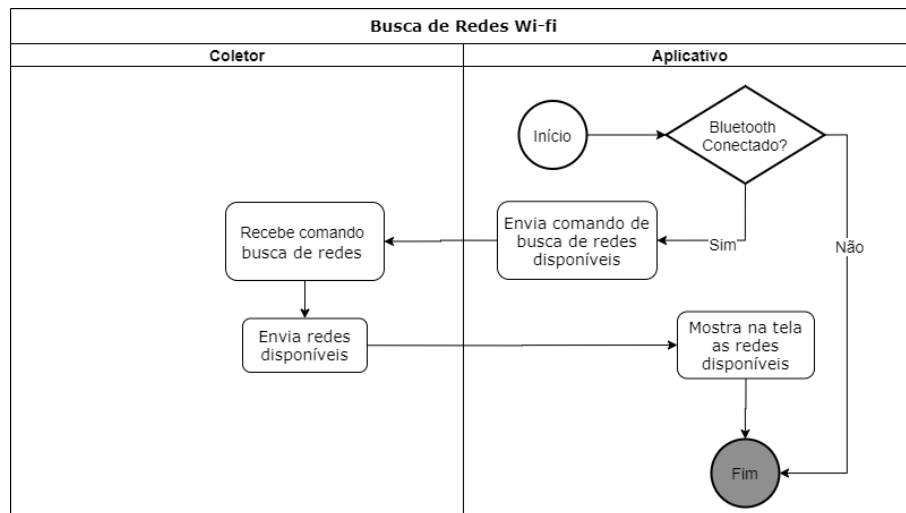
Fonte: Próprio autor.

Através do aplicativo também é possível configurar comunicação direta entre o coletor e a *internet*, por meio de uma conexão *wi-fi*. Para se conectar a rede *wi-fi* é preciso informar a rede e a senha, seria necessário um teclado e um *display* para poder efetuar essa configuração diretamente no coletor. O aplicativo propicia a configuração sem a necessidade de contato direto com o dispositivo, o usuário seleciona a rede disponível

e informa a senha da rede diretamente no aplicativo, e o aplicativo envia o comando de configuração para o coletor com os dados informados.

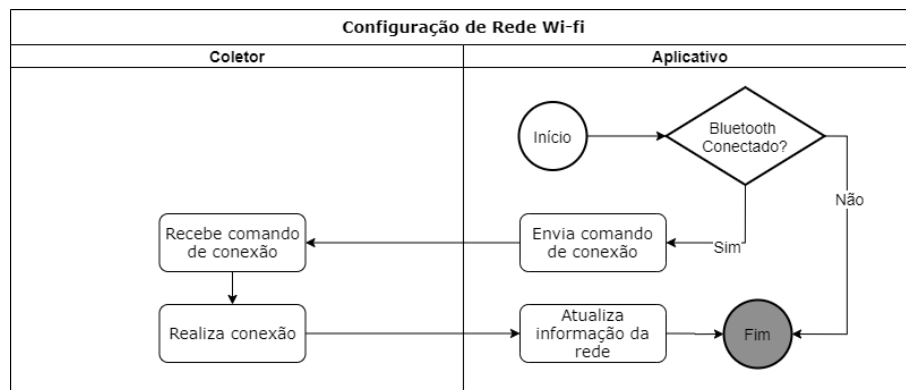
O algoritmo é dividido em duas partes, uma para buscar as redes disponíveis e exibir para o usuário, como pode ser visto na Fig. 4.11, e a outra para configurar o coletor com a rede escolhida e a senha informada pelo usuário como pode ser visto na Fig. 4.12.

Figura 4.11 – Algoritmo de busca de redes wi-fi disponíveis.



Fonte: Próprio autor.

Figura 4.12 – Algoritmo de configuração de rede wi-fi.

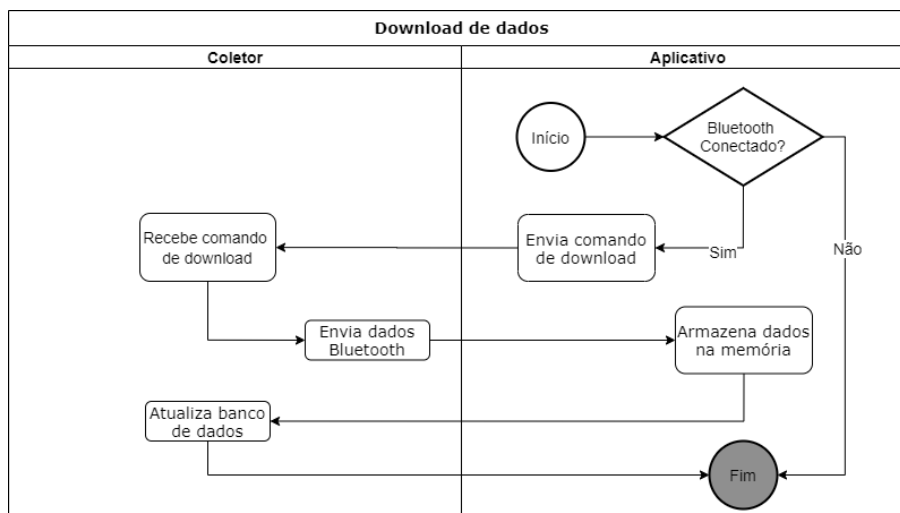


Fonte: Próprio autor.

Podem ocorrer casos em que não esteja disponível nenhum tipo de comunicação, em subestações onde não há nenhum tipo de sinal de *internet*, nem *wi-fi*, nem sinal 3G/4G, nem por rede cabeada. Pensando nisso foi desenvolvido uma funcionalidade no aplicativo para que seja possível coletar os dados para que possam ser enviados para o supervisor posteriormente. A funcionalidade consiste em fazer o *download* dos dados para a memória do dispositivo móvel por meio da comunicação Bluetooth como mostra a Fig. 4.13, e quando o usuário estiver em um local que disponha de acesso à *internet*, possa através do

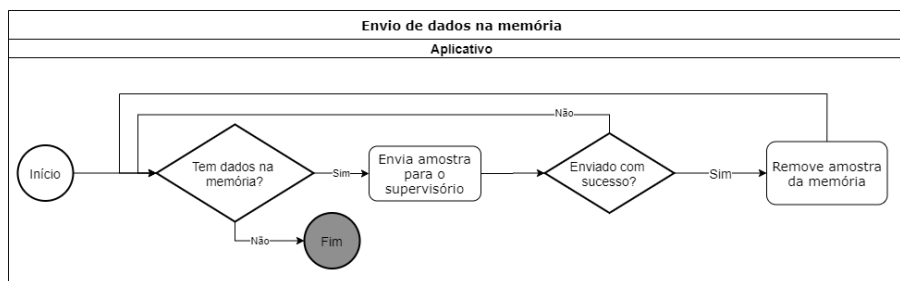
próprio aplicativo enviar os dados para o supervisor como mostra a Fig. 4.14. A tela do aplicativo para realização do *download* dos dados é exibida na Fig. 4.15.

Figura 4.13 – Algoritmo de *download* de dados para a memória do dispositivo.



Fonte: Próprio autor.

Figura 4.14 – Algoritmo de envio de dados da memória do dispositivo.

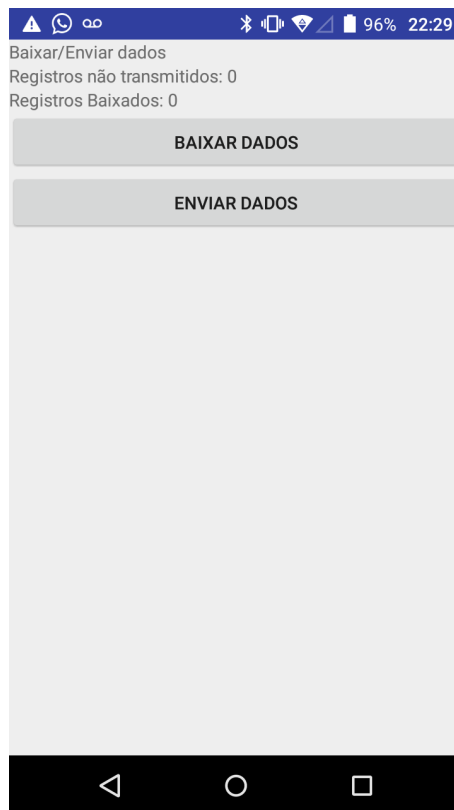


Fonte: Próprio autor.

4.2.1 Protocolo de comunicação entre aplicativo e dispositivo coletor de dados.

O protocolo de comunicação entre o aplicativo e o coletor foi desenvolvido orientado pelo padrão *request-reply*, onde o aplicativo sempre inicia a comunicação e o coletor apenas responde as solicitações recebidas. Para troca de informações foi utilizado o formato JSON, uma notação de troca de dados simples entre sistemas. Foi definido um formato padrão contendo um campo rotulado de "act" que é usado para definir a função que será executada, juntamente com parâmetros auxiliares, a resposta do coletor também segue o formato JSON, com um campo "act" igual ao recebido para indicar que

Figura 4.15 – Tela de download de dados do coletor para o aplicativo.



Fonte: Próprio autor.

a resposta pertence à aquele comando. Abaixo serão listadas as funções implementadas e suas respectivas respostas.

A função "getEnsaio", é utilizada para solicitar os dados do transformador e do ensaio configurado no coletor, o formato da requisição e da resposta pode ser visto no Código 4.1. Para alterar os dados do transformador e do ensaio, é utilizada a função 'setEnsaio', cuja requisição e resposta podem ser vista no Código 4.2

Para configurar a amostragem há duas funções, a 'getAmostragem' retorna o tempo de amostragem configurado no coletor, a requisição e a resposta referente à essa função podem ser vistos no Código 4.3. Para que possa alterar o tempo de amostragem do coletor o aplicativo precisa enviar uma requisição do tipo 'setAmostragem' com o respectivo tempo de amostragem desejado, um exemplo dessa requisição pode ser visto no Código 4.4.

A configuração do *wi-fi* do coletor tem três funções, uma para verificar se o coletor está conectado à alguma rede("getWifiConectado") onde o formato de requisição e resposta pode ser visto no Código 4.5, se conectado retorna o nome da rede, se não, retorna vazio. Outra função é para listar as redes disponíveis para conexão ("getWifi"), assim é possível verificar as redes com melhor potência de sinal para o coletor, o formato

Código 4.1 Requisição e resposta 'getEnsaio'

```
1 //Requisição de ensaio atual de monitoramento
2 {
3     act: 'getEnsaio'
4 }
5 //Resposta getEnsaio
6 {
7     act: 'getEnsaio',
8     nome: 'ENSAIO 1',
9     transformador: 'IDENTIFICADOR TRANSFORMADOR'
10 }
```

Código 4.2 Requisição e resposta 'setEnsaio'

```
1 //Requisição para alterar dados do ensaio
2 {
3     act: 'setEnsaio',
4     nome: 'ENSAIO 1',
5     transformador: 'IDENTIFICADOR TRANSFORMADOR'
6 }
7 //Resposta setEnsaio
8 {
9     act: 'setEnsaio',
10    nome: 'ENSAIO 1',
11    transformador: 'IDENTIFICADOR TRANSFORMADOR'
12 }
```

de requisição e resposta pode ser visto no Código 4.6. Para se conectar a uma rede ("setWifi"), basta informar o identificador da rede e a senha da mesma e o coletor vai tentar realizar a conexão e retornar o resultado para o aplicativo, o formato dessa requisição e da resposta é mostrado no Código 4.7.

Com o aplicativo devidamente configurado, é preciso verificar se os sensores estão respondendo adequadamente, garantindo que não há nenhuma conexão errada no equipamento. Para isso é utilizada a função "getUltimaLeitura", responsável por buscar a última leitura adquirida pelo coletor e quando recebido o retorno exibi-la na tela do aplicativo, essa função também retorna a quantidade de registros na memória do coletor que ainda não foram enviados para *internet*. O formato da requisição e da resposta são apresentados no Código 4.8.

Para enviar os dados para a *internet* através do aplicativo há duas formas, como mencionado anteriormente, uma é enviar utilizando a conexão com a *internet* do dispositivo móvel, para isso é utilizado a função de comunicação 'getPendentes', que solicita ao coletor todos os registros pendentes de envio e quando recebe a resposta envia os dados para *internet*. O formato de requisição e resposta da função 'getPendentes' pode ser visto no Código 4.9.

Código 4.3 Requisição e resposta 'getAmostragem'

```
1 //Requisição de configuração atual de amostragem
2 {
3     act: 'getAmostragem'
4 }
5 //Resposta de getAmostragem
6 {
7     act: 'getAmostragem',
8     amostragem: 3
9 }
10
```

Código 4.4 Requisição e resposta 'setAmostragem'

```
1 //Requisição de nova configuração de amostragem
2 {
3     act: 'setAmostragem',
4     amostragem: 30
5 }
6 //Resposta de setAmostragem
7 {
8     act: 'setAmostragem',
9     amostragem: 30
10 }
11
```

Outra forma de enviar os dados para *internet* através do aplicativo é a função de *download* dos dados do coletor para a memória do dispositivo móvel e posteriormente quando houver disponibilidade de rede enviar os dados para *internet*. A função de comunicação utilizada é a 'baixarDados', que solicita os dados que não foram enviados pela *internet*, e quando recebe a resposta armazena os dados na memória do dispositivo móvel. O formato da requisição da resposta pode ser visto no Código 4.10.

Com base no formato de comunicação explicado é possível fazer com que outros dispositivos sejam capazes de utilizar o aplicativo, bastando apenas os mesmos terem conexão Bluetooth, e implementarem as respostas das requisições de acordo com o que foi demonstrado anteriormente. Isso faz com que o aplicativo seja versátil e possa ser usado como uma ferramenta de integração entre equipamentos de monitoramento de grandezas e o supervisor em nuvem, diminuindo a complexidade da etapa de coleta de dados, e tornando-a mais ágil.

Código 4.5 Requisição e resposta 'getWifiConectado'

```
1 //Requisição da rede em que o coletor está conectado
2 {
3     act: 'getWifiConectado'
4 }
5 //Resposta getWifiConectado caso de conectado
6 {
7     act: 'getWifiConectado',
8     data: 'NOME REDE'
9 }
10 //Resposta getWifiConectado caso desconectado
11 {
12     act: 'getWifiConectado',
13     data: ''
14 }
```

Código 4.6 Requisição e resposta 'getWifi'

```
1 //Requisição de todas as redes disponíveis para conexão
2 {
3     act: 'getWifi'
4 }
5 //Resposta getWifi
6 {
7     act: 'getWifi',
8     data: [
9         {ssid: 'REDE 1', potencia: '80/80'},
10        {ssid: 'REDE 2', potencia: '70/80'},
11        {ssid: 'REDE 3', potencia: '45/80'}
12    ]
13 }
```

4.3 Supervisório em nuvem

Os supervisórios são ferramentas importantes para o monitoramento de equipamentos e sistemas, eles permitem acompanhar em tempo real o funcionamento de equipamentos e grandezas físicas. O avanço dos sistemas de comunicação trouxe a possibilidade dos dados de monitoramento serem disponibilizados na *internet*, levando ao conceito de supervisório em nuvem. Assim, não há necessidade de utilização de programas específicos, o supervisório pode ser acessado de qualquer dispositivo com acesso à *internet* sem a necessidade de instalação de *softwares* específicos, sendo necessário apenas digitar no navegador o endereço de acesso.

O supervisório em nuvem centraliza às informações em uma única aplicação disponibilizando acesso em tempo real as informações e ao histórico dos dados coletados por todos os dispositivos em funcionamento. Essa aplicação pode receber os dados de dife-

Código 4.7 Requisição e resposta 'setWifi'

```
1 //Requisição do proveniente do aplicativo
2 {
3     act: 'setWifi',
4     ssid: 'NOME_DA_REDE',
5     senha: 'SENHA_DA_REDE'
6 }
7 //Resposta do coletor em caso de sucesso
8 {
9     act: 'setWifi',
10    data: true
11 }
12 //Resposta do coletor em caso de falha
13 {
14     act: 'setWifi',
15     data: false
16 }
```

Código 4.8 Requisição e resposta 'getUltimaLeitura'

```
1 //Requisição ultima leitura de sensores
2 {
3     act: 'getUltimaLeitura'
4 }
5 //Resposta getultimaLeitura
6 {
7     act: 'getUltimaLeitura',
8     ensaio: 'ENSAIO 1',
9     data: '01/01/2020 14:01:00',
10    qtdNaoTransmitido: 123,
11    dados: 't1:30.42#t2:41.56#t3:0.00#u1:14.61#u2:18.01#u3:0.00... '
12 }
```

rentes transformadores e de diferentes dispositivos simultaneamente. Disponibilizando os dados para acesso também de forma simultânea.

As principais funcionalidades do supervisório são:

- **Cadastro de transformadores:** permite cadastro e edição dos dados referentes ao transformador;
- **Cadastro de ensaios:** permite cadastrar o período dos ensaios, permitindo assim segmentar a análise do funcionamento do transformador;
- **Interoperabilidade:** o supervisório é capaz de receber informações de outros dispositivos de monitoramento, seja através de importação manual de dados ou integração através *software*.
- **Monitoramento e histórico gráfico:** disponibilizar o monitoramento em tempo real de forma gráfica como também o histórico dos dados recebidos. Os gráficos

Código 4.9 Requisição e resposta 'getPendentes'

```
1 //Requisição de leituras pendentes de envio
2 {
3     act: 'getPendentes'
4 }
5 //Resposta getPendentes
6 {
7     act: 'getPendentes',
8     data: [
9         {id: 1,ensaio: 'ENSAIO 1' , data: '01/01/2020 14:01:12',
10            dados: 't1:30.42#t2:41.56...'},
11        {id: 2,ensaio: 'ENSAIO 1' , data: '01/01/2020 14:01:15',
12            dados: 't1:30.42#t2:41.56...'},
13        {id: 3,ensaio: 'ENSAIO 1' , data: '01/01/2020 14:01:18',
14            dados: 't1:30.42#t2:41.56...'},
15        {id: 4,ensaio: 'ENSAIO 1' , data: '01/01/2020 14:01:21',
16            dados: 't1:30.42#t2:41.56...'}
17    ]
18 }
```

implementados são: umidade e temperatura ambiente, temperatura e umidade relativa do óleo, massa de água no papel, no óleo e total de acordo com modelagem matemática e corrente nos TCs;

- **Monitoramento e histórico tabelado:** disponibiliza funcionalidade de visualização dos dados em formato de tabela dos mesmo dados presentes nos gráficos citados anteriormente, além de permitir exportar os mesmo em formato de planilha eletrônica;
- **Alertas automáticos:** sistema personalizado de alertas, que permite configuração de alertas por grandeza monitorada estabelecendo limites superiores e inferiores que quando ultrapassados um alerta é disparado para os responsáveis;
- **Avaliação físico-química:** permite ao usuário informar dados de análises físico-químicas realizadas em laboratório como: tensão interfacial, índice de neutralização, índice de cor, teor de água, fator de potência e rigidez dielétrica. E com base no trabalho de MARQUES A. P. [22], fornecer uma sugestão de decisão sobre intervir ou não no transformador para manutenção. Também armazena os resultados das análises para servirem de base histórica para futuras decisões.

Através do cadastro do transformador são informados os principais dados do equipamento, que serão utilizados para realização de cálculos para encontrar a massa de água no óleo e na celulose e também na análise físico-química do óleo. Os parâmetros informados são: identificador do transformador, massa de óleo, altura padrão do enrolamento, massa de celulose, relação entre a massa de estruturas espessas e massa celulósica total, relação entre a massa de estruturas finas frias e massa celulósica total, relação en-

Código 4.10 Requisição e resposta 'baixarDados'

```

1 //Requisição de download de dados
2 {
3     act: 'baixarDados'
4 }
5 //Resposta baixarDados
6 {
7     act: 'baixarDados',
8     data: [
9         {id: 1,ensaio: 'ENSAIO 1' , data: '01/01/2020 14:01:12',
10            dados: 't1:30.42#t2:41.56...'},
11         {id: 2,ensaio: 'ENSAIO 1' , data: '01/01/2020 14:01:15',
12            dados: 't1:30.42#t2:41.56...'},
13         {id: 3,ensaio: 'ENSAIO 1' , data: '01/01/2020 14:01:18',
14            dados: 't1:30.42#t2:41.56...'},
15         {id: 4,ensaio: 'ENSAIO 1' , data: '01/01/2020 14:01:21',
16            dados: 't1:30.42#t2:41.56...'}
17     ]
18 }

```

tre a massa das estruturas finas quentes e massa celulósica total, o tipo de óleo utilizado que fornecerá as constantes das equações de Fabre-Pichon e Oommen, a localização do transformador no sistema de distribuição e a tensão nominal do equipamento. A Fig.4.16 mostra a página de cadastro de transformadores.

Figura 4.16 – Página de cadastro de transformador.

Fonte: Próprio autor.

Os ensaios são utilizados para segmentar os dados coletados de determinado transformador por períodos. Desse modo, permite-se uma melhor análise dos dados do equipamento, permitindo por exemplo separar em ensaios os dados de antes e depois de uma manutenção preventiva, assim evidenciando os efeitos da manutenção. O dados que definem um ensaio são: identificador do transformador previamente cadastrado, número do ensaio, data e hora de início, data e hora de término, responsável pelo cadastro e responsável pela análise. A Fig. 4.17 mostra a página de cadastro de ensaio.

Figura 4.17 – Página de cadastro de ensaio.

ACQUATRANSF - Monitoramento de unidade em sistema isolante papel óleo de transformadores de potência

Cadastro de Ensaio

ID do transformador: TRA0000

Número do Ensaio: 1

Data e Hora de início: 2020-01-01 00:00:00

Data e Hora de término: 2020-06-30 00:00:00

Responsável pelo cadastro: Teste

Responsável pela análise: Teste

Enviar Redefinir

Fonte: Próprio autor.

O supervisório pode receber dados de diferentes transformadores simultaneamente de diferentes formas e assim disponibiliza-los para acesso e análise em um único sistema. Para isso o supervisório em nuvem pode receber os dados por meio de importação de dados através de uma planilha eletrônica do tipo CSV (*Comma Separated Values*), com as seguintes colunas na respectiva ordem: transformador, data e hora da amostra, temperatura ambiente, umidade ambiente, temperatura do óleo 1, umidade relativa do óleo 1, temperatura do óleo 2, umidade relativa do óleo 2, corrente 1, corrente 2.

Os dados também podem ser recebidos por meio de requisições HTTP ou HTTPS do tipo POST, possibilitando a integração com dispositivos de monitoramento capazes de enviar esse tipo de requisição, nesse caso também é possível enviar os valores lidos pelos conversores AD, para fins de verificação de bom funcionamento dos sensores e dos conversores de forma remota. O coletor e o aplicativo desenvolvido nesse trabalho são capazes de enviar essas requisições. Os parâmetros esperados pelo supervisório são:

- **a**, identificador do transformador;
- **b**, identificador do ensaio;

- **c**, temperatura ambiente;
- **d**, umidade ambiente;
- **dt**, data e hora da mostra;
- **e**, temperatura do óleo 1;
- **f**, umidade relativa do óleo 1;
- **g**, temperatura do óleo 2;
- **h**, umidade relativa do óleo 2;
- **i**, temperatura do óleo 3;
- **j**, umidade relativa do óleo 3;
- **k**, valor lido pelo conversor AD da temperatura do óleo 1;
- **l**, valor lido pelo conversor AD da umidade relativa do óleo 1;
- **m**, valor lido pelo conversor AD da temperatura do óleo 2;
- **n**, valor lido pelo conversor AD da umidade relativa do óleo 2;
- **o**, valor lido pelo conversor AD da temperatura do óleo 3;
- **p**, valor lido pelo conversor AD da umidade relativa do óleo 3;
- **q**, corrente 1;
- **r**, corrente 2;

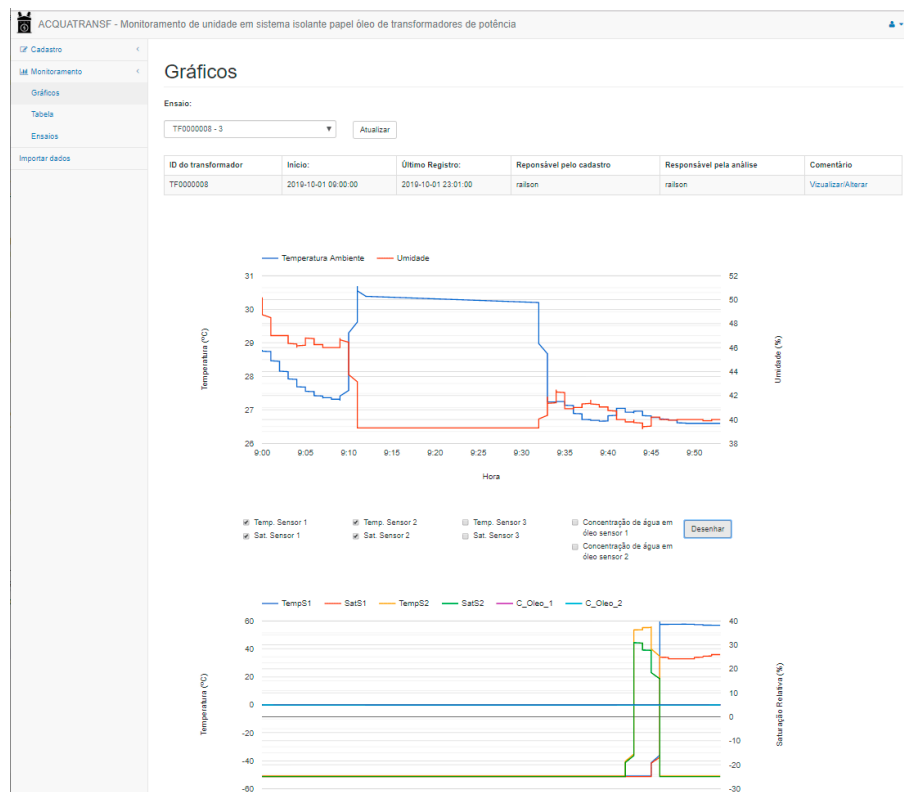
Em casos em que o coletor está conectado à *internet* é possível o acompanhamento em tempo real dos dados do transformador, caso ele não esteja conectado basta que um técnico vá até o local e, através do aplicativo, transmita os dados para o supervisório em nuvem que os disponibilizará para consulta instantaneamente. Os dados ficam armazenados de forma segura em um ambiente controlado sujeito a backups frequentes. Dessa forma, esses dados não serão perdidos e poderão ser analisados ao longo de grandes períodos permitindo o acompanhamento da evolução do estado do transformador e os efeitos que as manutenções estarão efetivamente causando.

A Figura 4.18 mostra a página de monitoramento e análise gráfica que pode ser acessada de qualquer computador, *smartphone* ou *tablet* conectado à *internet*. O monitoramento em tempo real permite que analistas tenham acesso fácil e rápido aos dados sem a necessidade de uso de programas específicos para analisá-los, bastando abrir um navegador de *internet* e acessar o endereço do sistema de monitoramento.

Nessa página é possível visualizar os gráficos de temperatura e umidade ambiente, temperatura e umidade relativa do óleo, massa de água no óleo, massa de água no papel (pelo modelo de Oommen ou Fabre-Pichon) e as correntes monitoradas

O histórico das variáveis monitoradas pode ser acompanhado também no formato de tabela caso o usuário desejar. Há também a opção de baixar o arquivo no formato de planilha eletrônica, permitindo que os dados sejam importados em outros sistemas ou analisados em outras ferramentas. A Fig. 4.19 mostra a tela de exibição de dados no formato de tabela, nela está o botão que permite realizar o *download* da planilha eletrônica.

Figura 4.18 – Monitoramento e histórico gráfico do supervisório em nuvem.



Fonte: Próprio autor.

4.3.1 Sistema de alertas

O sistema de alertas foi desenvolvido para aprimorar o monitoramento dos transformadores, assim não é preciso que alguém fique monitorando o mesmo durante 24 horas por dia. O mesmo consiste em uma tela de configuração onde o usuário pode configurar alarmes para cada transformador monitorado, sendo que, é possível definir um alarme para cada grandeza monitorada.

A Figura 4.20, mostra o formulário de cadastro de alerta. Como é possível ver, os alarmes são baseados em transformadores e sensores a serem monitorados. Para cada alarme é definido um limite superior e inferior do valor à ser observado, é definido também a periodicidade em minutos (de quanto em quanto tempo a grandeza será verificada pelo sistema) e o tipo de alerta que será enviado (e-mail, sms, mensagem instantânea). O sistema conta com botões que preenchem automaticamente os limites para alertas quando a grandeza monitorada chegar ao estado ruim ou péssimo. A Fig. 4.21 mostra um e-mail enviado pelo sistema de alerta, o tempo para recebimento desse e-mail pode variar dependendo do provedor do serviço, em testes realizados utilizando o provedor GMAIL o recebimento ocorreu em menos de 10 segundos.

Na parte de "Contatos" são definidos os dados dos contatos que receberão os

Figura 4.19 – Monitoramento e histórico gráfico do supervisório em nuvem.

ACQUATRANSF - Monitoramento de unidade em sistema isolante papel óleo de transformadores de potência

Cadastro Monitoramento Gráficos Tabela Ensaio Importar dados

Tabela

Ensaio: TF0000008 - 14

ID do transformador	Início:	Último Registro:	Responsável pelo cadastro	Responsável pela análise
TF0000008	2020-05-05 07:00:00	2020-05-06 14:00:00	Railson muspo e acqua	Railson

Download csv

10 resultados por página Pesquisar

Data e Hora:	Temperatura Ambiente °C:	Umidade ambiente %:	Temperatura do Sensor 1 °C:	Saturação do sensor 1 %:	Temperatura do sensor 2°C:	Saturação do sensor 2 %:	Temperatura do sensor 3°C:	Saturação do sensor 3 %:
2020-05-05 09:10:14	0.00	0.00	-55.04	-25.03	27.01	47.10	0.00	0.00
Massa de água em óleo: 0.00135539073 Massa de água em papel (Fabre-Pichon): 0.00003520551 Massa de água em papel (Oommen): 0.0000149093 Massa de água total (Fabre-Pichon): 0.00139067624 Massa de água total (Oommen): 0.00137030003								
2020-05-05 09:10:17	0.00	0.00	-55.04	-25.03	26.95	47.11	0.00	0.00
2020-05-05 09:10:20	0.00	0.00	-55.04	-25.03	27.14	46.56	0.00	0.00
2020-05-05 09:10:24	0.00	0.00	-55.04	-25.03	26.88	47.14	0.00	0.00
2020-05-05 09:10:27	0.00	0.00	-55.04	-25.03	26.81	46.54	0.00	0.00
2020-05-05 09:10:30	0.00	0.00	-55.04	-25.03	26.73	47.15	0.00	0.00

Fonte: Próprio autor.

alertas. Serão essas as pessoas que tomarão atitudes caso recebam um alerta. Um contato pode ser cadastrado nessa mesma tela, clicando no botão "Novo Contato", os dados necessários para o cadastro são: nome, e-mail e número do celular. A Figura 4.22 mostra a janela para cadastro de um novo contato. Nessa tela também é possível disparar um alerta de teste, para verificar se o contato irá receber corretamente o alerta.

Uma funcionalidade desse tipo permite ações rápidas para conter possíveis falhas nos equipamentos, pois mesmo que ninguém esteja monitorando ativamente o equipamento os responsáveis serão avisados caso algo anormal aconteça como um sobreaquecimento, corrente elevada ou umidade do óleo fora do normal. A partir do momento que o responsável receber o alerta o mesmo pode imediatamente verificar o monitoramento completo do equipamento e tomar atitudes rápidas para preservar a vida útil do mesmo.

4.3.2 Avaliações físico-químicas.

O objetivo das avaliações físico-químicas é propiciar ao usuário do sistema uma forma simples e automatizada de detectar possíveis falhas em transformadores de potência, e sugerir manutenções preventivas a fim de prolongar a vida útil do equipamento. Para isso o sistema utiliza dados de análises em laboratório de amostras de óleo coletadas de

Figura 4.20 – Formulário de cadastro de alerta

Cadastro de Alerta

Transformador:

Limites Estado Ruim

Limite Superior:

Periodicidade(em minutos):

Sensor:

Limites Estado Péssimo

Limite Inferior:

Tipo de Alerta:

Contatos

Listagem de Alertas

Transformador	Sensor	Lim. Sup	Lim. Inf	Tipo	Periodo
TF0000008	TempS1	90	0	email	
TF0000008	Tempamb	40	0	email	

Fonte: Próprio autor.

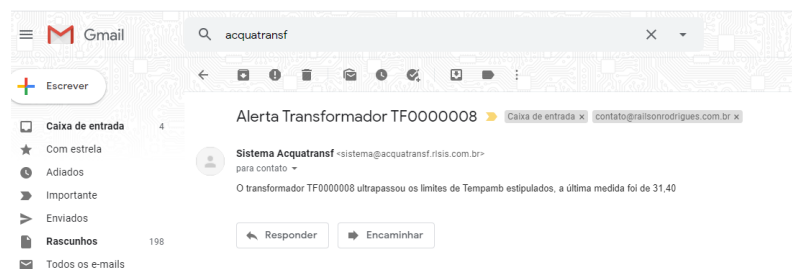
transformadores em atividade ou em processos de manutenção.

Com base nas informações fornecidas pela análise da amostra de óleo, o sistema calcula três notas, e as classifica em uma escala de "A" à "E", a especificação de cada nota e sua respectiva ação recomendada pode ser encontrada na Tabela 4.1.

Para decidir se é necessário ou não intervir na operação de um transformador é preciso que sejam analisadas diversas variáveis e da experiência de um engenheiro especialista para analisar essas variáveis e tomar a decisão de retirar o transformador de operação para realizar a manutenção no mesmo ou deixá-lo operando.

Essa decisão é muito importante, pois, para realizar a manutenção desse tipo de equipamento é necessário a mobilização de muitos profissionais e até interrupções na distribuição ou geração de energia, o que também ocasiona um alto custo financeiro, e desgaste em indicadores de qualidade e energia. Assim, tais decisões devem ser tomadas com cuidado, e quanto mais informações disponíveis para apoiar essa decisão melhor. Desse modo faz-se necessário um mecanismo automatizado para minimizar as possibilidades de falhas humanas, e também fornecer uma observação a ser considerada antes da decisão de intervir ou não no equipamento.

Esse mecanismo foi integrado ao sistema de monitoramento em nuvem do Ac-

Figura 4.21 – E-mail de alerta enviado pelo sistema

Fonte: Próprio autor.

Figura 4.22 – Janela de cadastro de contato

Adicionar Contato ✕

Nome: E-mail:

Celular/Whatsapp(com DDD):

[Salvar mudanças](#)

Contatos Cadastrados

[Novo](#)

Nome	E-mail	Telefone	Opções
Railson	contato@railsonrodrigues.com.br	62992676893	✎ ✕ ↻

[Fechar](#)

Fonte: Próprio autor.

quatransf, possibilitando a inserção dos dados das análises físico-químicas, as sugestões geradas pelo sistema de análise e os dados ficam salvos e podem ser comparadas com anteriores possibilitando a avaliação da evolução das grandezas analisadas.

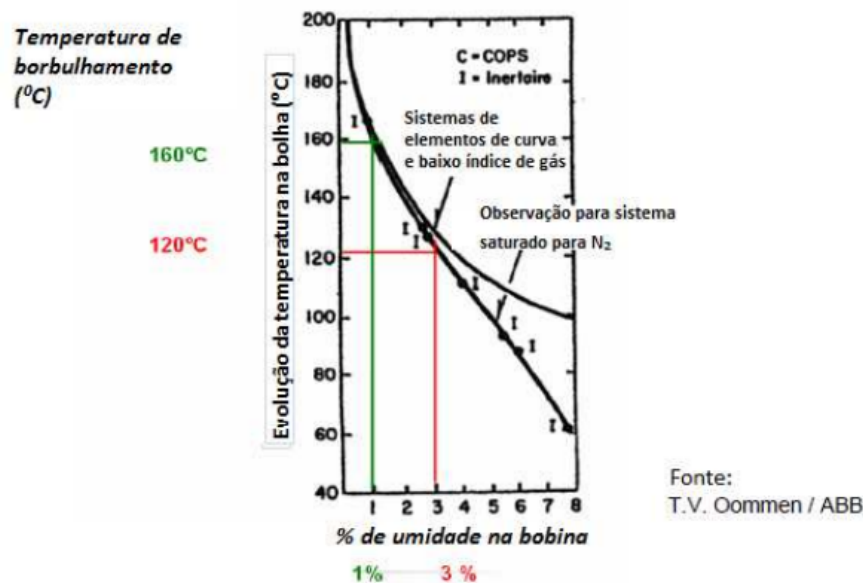
A umidade no sistema isolante do transformador de potência é uma grandeza que impacta diretamente na vida útil e na operação do mesmo. Reduzindo de 3% para 1% a umidade relativa do óleo do transformador é possível estender sua vida útil em até 20 anos[2]. O aumento no teor de água na celulose reduz a confiabilidade do transformador em função do aumento da possibilidade de formação de bolhas em situações de sobrecarga ou carregamento repentino, devido ao aumento rápido da temperatura. Quanto maior o teor de água, menor é a temperatura de formação de bolhas como mostra a Fig. 4.23 sendo assim, maior as chances do transformador ser danificado[2].

Tabela 4.1 – Padronização das classificações finais e ações recomendadas

Classificação	Significado	Ações Recomendadas
A	Excelente	Continuar a operar o equipamento normalmente
B	Bom	Continuar a operar o equipamento, estando atento à evolução de resultados nos próximos registros
C	Marginal	Investigar e realizar outros ensaios em curto prazo para confirmar resultados e tendências
D	Ruim	Programar retirada do equipamento de operação para inspeção interna, localização e correção de defeito
E	Péssimo	Retirar o equipamento de operação em caráter de emergência para inspeção interna, localização e correção de defeito

Fonte: [22]

Figura 4.23 – Temperatura de formação de bolhas em função do índice de umidade na isolação sólida



Fonte: [2]p.151.

Um sistema preciso de monitoramento da umidade no papel isolante de transformadores ajuda a evitar falhas nos equipamentos durante sobrecargas de emergências, e permite um plano de substituição de equipamentos degradados estimando a expectativa de vida do isolamento [12].

É importante mencionar que para a tomada de decisão de intervir ou não no

transformador, devem ser usadas diferentes técnicas de manutenção preditivas, a análise físico-química do óleo representa uma delas, sendo uma técnica importante, eficiente e usualmente utilizada, que auxilia no diagnóstico final do transformador.

Para o desenvolvimento dessa ferramenta foi utilizada a contribuição do trabalho de MARQUES(2019)[22], onde são explanadas várias técnicas preditivas de manutenção de transformadores de potência, com base em grandezas específicas. Um desses métodos é a análise do óleo isolante de transformadores, no trabalho são apresentadas duas abordagens, uma contínua e uma discreta, onde a contínua apresentou melhores resultados, assim, esse foi o método implementado no supervisório em nuvem.

Na abordagem contínua cada grandeza analisada tem uma nota distinta, e cada nota é atribuída à um conceito com base em funções injetoras. As grandezas do óleo isolante analisadas são: Tensão Interfacial (TI), Índice de Neutralização (IN), Índice de Cor (IC), Rigidez Dielétrica (RD), Teor de Água (TA), Fator de Potência (FP). Sendo essas grandezas divididas em dois grupos:

1. Composto pelas grandezas tensão interfacial, índice de neutralização e índice de cor, que estão diretamente ligadas à degradação do óleo, à oxidação do fluido e formação da borra.
2. Composto pelas grandezas fator de potência, rigidez dielétrica e teor de água, que estão relacionadas à detecção de contaminantes, umidade e compostos polares no óleo.

Na abordagem contínua as notas referentes às grandezas são relacionadas às mesmas por meio de funções injetoras que variam de 0 à 1, fazendo com que valores distintos da mesma grandeza tenham notas diferentes. Os limiares das notas individuais são iguais para todas as grandezas de forma equalizar a avaliação. A cada grandeza foram atribuídas notas individuais e seus respectivos pesos. E pôr fim a ponderação das grandezas na composição da nota global.

Os gráficos de nota individual em função do valor da grandeza foram retirados do trabalho de MARQUES(2019)[22], e são mostrados nas Fig.4.24, Fig.4.25, Fig.4.26. Para rigidez dielétrica e para o teor de água, as equações variam em função da tensão nominal do equipamento, isso se deve ao fato do impacto dessas grandezas no isolamento do equipamento.

As tabelas de classificação de cada grandeza em função dos conceitos são mostradas nas tabelas e 4.2, 4.3, 4.4, 4.5, 4.6 e 4.7.

Figura 4.24 – Funções injetoras (Nota versus valor da grandeza) para: a) Tensão Interfacial; e b) Índice de neutralização

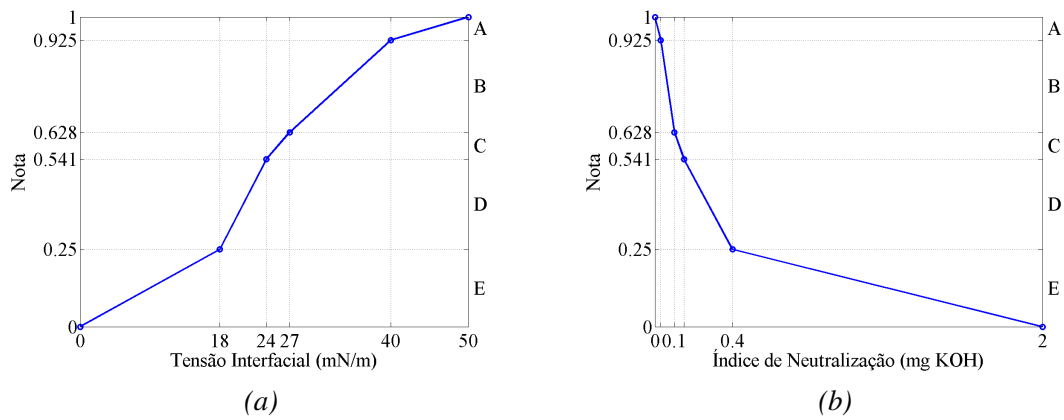


Figura 4.25 – Funções injetoras (Nota versus valor da grandeza) para: a) Índice de cor; e b) Rigidez dielétrica

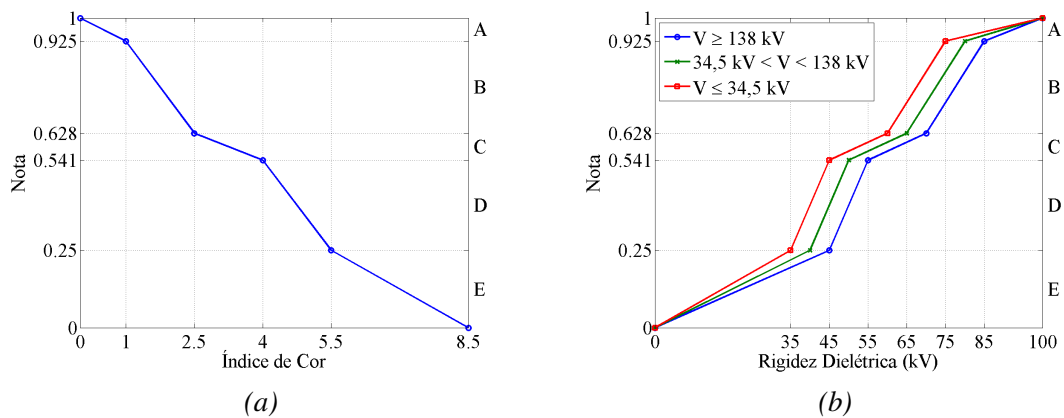


Figura 4.26 – Funções injetoras (Nota versus valor da grandeza) para: a) Teor de água; e b) Fator de potência

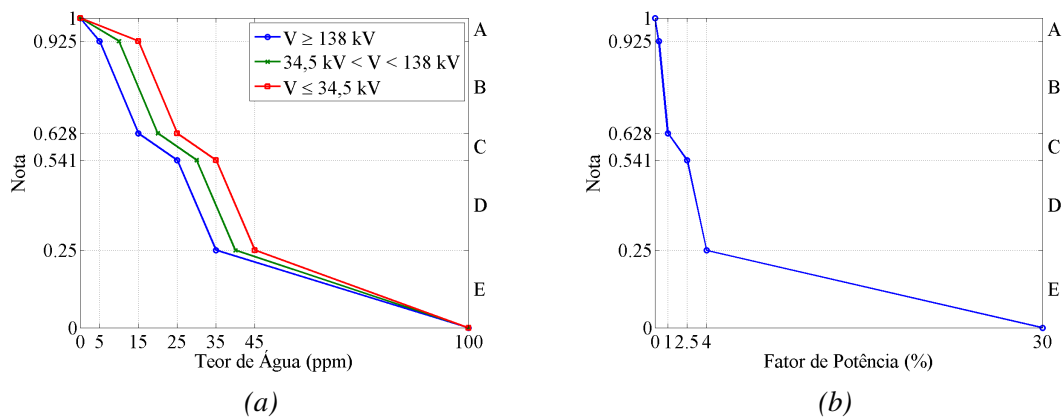


Tabela 4.2 – Critérios de classificação da tensão interfacial

Conceito	Tensão Interfacial (mN/m)
A(excelente)	$TI \geq 40$
B(bom)	$27 \leq TI < 40$
C(marginal)	$24 \leq TI < 27$
D(ruim)	$18 \leq TI < 24$
E(péssimo)	$TI < 18$

Tabela 4.3 – Critérios de classificação do índice de neutralização

Conceito	Índice de Neutralização (mgKOH)
A(excelente)	$IN \leq 0,03$
B(bom)	$0,03 < IN \leq 0,10$
C(marginal)	$0,10 < IN \leq 0,15$
D(ruim)	$0,15 < IN \leq 0,40$
E(péssimo)	$IN > 40$

Tabela 4.4 – Critérios de classificação do Índice de Cor

Conceito	Índice de Cor
A(excelente)	$IC \leq 1,0$
B(bom)	$1,0 < IC \leq 2,5$
C(marginal)	$2,5 < IC \leq 4,0$
D(ruim)	$4,0 < IC \leq 5,5$
E(péssimo)	$IC > 5,5$

Tabela 4.5 – Critérios de classificação do fator de potência

Conceito	Fator de potência (%)
A(excelente)	$FP \leq 0,3$
B(bom)	$FP \leq 1,0$
C(marginal)	$1,0 < FP \leq 2,5$
D(ruim)	$2,5 < FP \leq 4,0$
E(péssimo)	$FP > 4$

Tabela 4.6 – Critérios de classificação da rigidez dielétrica em função da tensão nominal(Vn)

Conceito	$V_n \geq 138 \text{ kV}$	$34,5 < V_n \leq 138 \text{ kV}$	$V_n \geq 34,5 \text{ kV}$
A (excelente)	$RD \geq 85$	$RD \geq 80$	$RD \geq 75$
B (bom)	$70 \leq RD < 85$	$65 \leq RD < 80$	$60 \leq RD < 75$
C (marginal)	$55 \leq RD < 70$	$50 \leq RD < 65$	$45 \leq RD < 60$
D (ruim)	$45 \leq RD < 55$	$40 \leq RD < 50$	$35 \leq RD < 45$
E (péssimo)	$RD < 45$	$RD < 40$	$RD < 35$

Tabela 4.7 – Critérios de classificação do teor de água em função da tensão nominal(Vn)

Conceito	$V_n \geq 138 \text{ kV}$	$34,5 < V_n \leq 138 \text{ kV}$	$V_n \geq 34,5 \text{ kV}$
A (excelente)	$TA \leq 5$	$TA \leq 10$	$TA \leq 15$
B (bom)	$5 < TA \leq 15$	$10 < TA \leq 20$	$15 < TA \leq 25$
C (marginal)	$15 < TA \leq 25$	$20 < TA \leq 30$	$25 < TA \leq 35$
D (ruim)	$25 < TA \leq 35$	$30 < TA \leq 40$	$35 < TA \leq 55$
E (péssimo)	$TA > 35$	$TA > 40$	$TA > 45$

Tabela 4.8 – Pesos das grandezas de interesse

Grandeza	Peso
Tensão Interfacial (TI)	0,1488
Índice de Neutralização (IN)	0,2746
Índice de Cor (IC)	0,0316
Rigidez Dielétrica (RD)	0,2771
Teor de Água (TA)	0,1690
Fator de Potência (FP)	0,0990

Através do uso do método de otimização computacional Hill Climbing, foram definidos pesos para as seis grandezas de interesse, que são apresentados na Tabela 4.8, para cálculo das notas de cada grupo e notas finais, são utilizados também pesos em função da nota individual de cada grandeza. A relação entre os pesos e as notas é mapeado de acordo com (4-1), a qual corresponde a uma ponderação exponencial em função das notas, com objetivo de aumentar o rigor da classificação, de maneira que as notas ruins provoquem pesos maiores.

$$p_c(n) = 7,6409e^{(2,2542n)} + 0,0242 \quad (4-1)$$

Com as notas e os pesos definidos as notas finais e globais podem ser calculadas utilizando (4-2). Para a Nota Final 1, $i \in TI, IN, IC$, pela sua relação com a degradação do óleo. Para a Nota Final 2, tem-se, $i \in RD, TA, FP$, pela sua relação com a detecção de contaminantes. E por fim para Nota Global, $i \in TI, IN, IC, RD, TA, FP$. Com base nas notas é possível definir o conceito de cada uma com base na Tabela 4.9

$$N = \frac{\sum_i n_i \cdot p_c(n_i) \cdot p_{g,i}}{\sum_i p_c(n_i) \cdot p_{g,i}} \quad (4-2)$$

Os valores que definem os limites das classificações foram obtidos através do algoritmo de otimização Hill Climbing, visando minimizar o erro em relação às classificações fornecidas por especialistas, para isso foram utilizados 218 resultados de ensaio físico-químicos de amostras de óleo previamente classificadas por especialistas. Como dito no início desta seção, a abordagem contínua teve uma ótima assertividade, sendo 94,95% de acerto em relação a Nota Final 1 e 88,99% de acerto em relação a Nota Final 2 e 93,58% de acerto em relação a Nota Global[22].

Com base no método apresentado foi integrado ao supervisório em nuvem um formulário para coleta das grandezas necessárias para a realização avaliação do óleo do transformador, o mesmo pode ser visto na Fig. 4.27. Nesse formulário o usuário escolhe um transformador e um ensaio técnico, ambos previamente cadastrados, e informa o responsável pela avaliação do óleo. Após a selecionar o transformador é apresentado logo

Tabela 4.9 – Critérios para obtenção dos conceitos das Notas Finais e Global

Classificação Final ou Global	Nota Final 1 (Nf1)	Nota Final 2 (Nf2)	Nota Global (Ng)	Ações Recomendadas
A (excelente)	$Nf1 > 0,927$	$Nf2 > 0,854$	$Ng > 0,877$	Continuar a operar o equipamento normalmente
B (bom)	$0,782 < Nf1 \leq 0,927$	$0,684 < Nf2 \leq 0,854$	$0,758 < Ng \leq 0,877$	Continuar a operar o equipamento, estando atento à evolução de resultados nos próximos registros
C (marginal)	$0,633 < Nf1 \leq 0,782$	$0,589 < Nf2 \leq 0,684$	$0,641 < Ng \leq 0,758$	Investigar e realizar outros ensaios em curto prazo para confirmar resultados e tendências
D (ruim)	$0,458 < Nf1 \leq 0,633$	$0,335 < Nf2 \leq 0,589$	$0,468 < Ng \leq 0,641$	Programar retirada do equipamento de operação para inspeção interna, localização e correção de defeito
E (péssimo)	$Nf1 \leq 0,458$	$Nf2 \leq 0,335$	$Ng \leq 0,468$	Retirar o equipamento de operação em caráter de emergência para inspeção interna, localização e correção de defeito

Fonte: [22].

abaixo a tensão nominal do mesmo, pois, essa informação altera os limiares de avaliação da rigidez dielétrica (RD) e do teor de água (TA).

A medida que o usuário informa o valor da grandeza o sistema calcula automaticamente o conceito atribuído a tal valor de acordo com as funções injetoras, e o exibe logo à frente. Quando as informações de tensão interfacial, índice de neutralização e índice de cor são preenchidas, automaticamente o valor e respectivo conceito da Nota Final 1 são apresentados. Igualmente quando os campos teor de água, fator de potência e rigidez dielétrica são preenchidos a Nota Final 2 e seu conceito são apresentados. Quando todos os campos são preenchidos a Nota Global e seu conceito são exibidos, além disso também é destacado uma sugestão de acordo com a nota encontrada, essa sugestão é proveniente da Tabela 4.9.

Quando todos os dados são preenchidos é possível salvá-los para serem consultados futuramente, como pode ser visto na parte inferior da Fig. 4.27, além disso é possível editá-los e excluí-los. É muito importante manter esses dados guardados e acessíveis, pois

Figura 4.27 – *Formulário de Classificação de ensaios físico-químicos*

Classificação de ensaios físico-químicos

Transformador: <input type="text" value="Selecione"/>	Ensaio: <input type="text"/>
Tensão Nominal: <input type="text"/>	Responsável: <input type="text"/>
Tensão interfacial: Valor: <input type="text" value="mN/m"/>	Índice de neutralização: Valor: <input type="text" value="mg KOH"/>
Índice de Cor: Valor: <input type="text"/>	Teor de Água: Valor: <input type="text" value="ppm"/>
Fator de potência: Valor: <input type="text" value="%"/>	Rigidez Dielétrica: Valor: <input type="text" value="mg KOH"/>

Avaliação:

Nota Final 1: -
Nota Final 2: -
Nota Global: -

Ações Recomendadas: -

Classificações Realizadas:

ID	Trafo	Ensaio	Conceito 1	Conceito 2	Conceito Global	Cadastro	Responsável	Opções
3	TF0000008	13	D	E	E	13/04/2020	Railson, amostra ruim ensaio lab	 
4	TF0000008	12	B	A	B	13/04/2020	Railson, Amostra boa ensaio lab	 

Fonte: próprio autor.

permitirá aos analistas consultarem o histórico de evolução do transformador, permitindo assim verificação das medidas de manutenção tomadas, e intervenção no equipamento antes que o mesmo seja danificado.

Os cálculos executados para obtenção das notas e conceitos segue o método explicado ao longo desta seção. Foram implementados em código Java Script os limiares das funções injetoras de cada grandeza, e através de uma variação linear entre os limiares é obtido a nota referente a respectiva grandeza. De posse da nota é possível definirmos o conceito da mesma, e também usa-las em (4-2) para se obter as notas finais e global. Após salvar a análise é possível imprimir um relatório com os dados da mesma para ser encaminhado para equipes de campo e outros departamentos, um exemplo de relatório impresso pode ser visto na Fig. 4.28.

Figura 4.28 – Relatório de avaliação físico-química para impressão.

Acquatransf - Relatório de Avaliação Físico-Química de Óleo Isolante

Transformador: **TC0000091**
 Responsável: **RAILSON**
 Data Coleta: **22/02/2015**
 Data Cadastro: **22/04/2020**
 Nome Ensaio: **TC0000091 - 1**

Resultados

TI	IN	IC	TA	FP	RD	NF1	NF2	NG
22	0.13	6.5	15	24.76	86	0.503	0.391	0.445

Conceito Final 1: D

Conceito Final 2: D

Conceito Global: E

Ação Recomendada:

Retirar o equipamento de operação em caráter de emergência para inspeção interna, localização e correção de defeito.

Fonte: próprio autor.

Resultados

Foram avaliados os diferenciais que esse dispositivo apresenta em relação aos outros disponíveis no mercado e o custo de produção do mesmo. E para verificar sua precisão três validações foram realizadas: validação de precisão com instrumentos, comparação com protótipo MUSPODAQ [3] e validação das medições com análise em laboratório.

O protótipo apresenta inovações significativas em relação aos dispositivos existentes, são elas:

- **Leitura de corrente no TC:** permite a leitura de até 4 correntes dos transformadores, permitindo assim cruzamento de informações da umidade e temperatura do óleo com as correntes medidas, além do monitoramento da carga do transformador.
- **Modularidade:** permite a troca de sensores e componentes de forma rápida e simples, atualização do *firmware* pode ser feita apenas trocando o cartão de memória do dispositivo, sem necessidade de levar o dispositivo até o laboratório para uma reprogramação. Em caso de falha de algum sensor o mesmo pode ser substituído facilmente, diminuindo assim o custo de manutenção do dispositivo.
- **Configuração e monitoramento através de dispositivo móvel:** dispensa o uso de implementação de IHM(Interface Homem Máquina) no dispositivo, diminuindo assim os custos de produção e também o tamanho do mesmo. Todas as configurações como identificador do transformador, número do ensaio, taxa de amostragem, conectar ao *wi-fi*, transmissão de dados para o servidor podem ser realizadas por meio de um aplicativo para dispositivos móveis. Além de acompanhar os dados coletados em tempo real.
- **Envio de dados para o servidor:** os dados podem ser enviados para o servidor de duas formas, conectando o dispositivo à uma rede *wi-fi*, ou através do aplicativo no dispositivo móvel do operador, o aplicativo buscará os dados no dispositivo e através da rede móvel(GPRS, 2G, 3G, 4G, 5G) do aparelho, enviará os dados para o servidor. Em casos onde não há conexão disponível os dados podem ser baixados para o dispositivo móvel para serem enviados posteriormente.

- **Tolerância a falhas de comunicação:** em caso de falha na comunicação são feitas novas tentativas até conseguir enviar os dados. Evitando assim que informações sejam perdidas.
- **Facilidade de conexão:** os sensores podem ser facilmente conectados e desconectados do protótipo, as conexões são de encaixe único que evitam erros nesse processo. Os sensores de temperatura e umidade podem ser conectados em diferentes pontos do transformador e os sensores de corrente por serem não invasivos podem ser conectados sem intervenções nos TC's sendo necessário apenas que o mesmo envolva o fio do terminal secundário.
- **Monitoramento via internet:** O monitoramento via internet pode ser realizado por qualquer pessoa com o devido acesso ao sistema de monitoramento. Desse modo não é necessário que o mesmo se desloque até o transformador para verificar o funcionamento ou coletar os dados dos sensores. Além disso os dados ficam disponíveis para que sejam consultados e analisados posteriormente.
- **Taxa de amostragem dinâmica:** A taxa de amostragem pode ser configurada de acordo com a necessidade do monitoramento, sendo a mesma configurada através do aplicativo para dispositivos móveis, isso possibilita uma versatilidade no monitoramento permitindo aos analistas verificarem anomalias de forma rápida. Alguns dispositivos de mercado trabalham com taxa de amostragem fixa.
- **Tamanho:** o tamanho do dispositivo é reduzido, estando acondicionado em um envólucro plástico IP66 de dimensões 25x20x10 (cm) pesando 2,5 (kg).
- **No-Break:** em caso de quedas de energia, o dispositivo pode continuar funcionando até que sua bateria chegue ao fim. O tempo estimado para o fim da carga da bateria é de 3 horas.
- **Sistema de alerta:** permite configurar alertas, quanto ao nível de umidade, temperatura e corrente, ao atingir o nível configurado uma alerta é disparado para um contato previamente configurado.

A Tabela 5.1 mostra os aspectos ao qual o Acquatransf oferece vantagens sobre os concorrentes. É perceptível que o acesso aos dados coletados é realizado de forma muito simplificada no Acquatransf, ao passo que no HIDROCAL 1001+ é preciso conectar um computador ao dispositivo através de um cabo e baixar os dados coletados, ou seja, é preciso fazer isso para cada dispositivo que se queira analisar.

Além disso os dados coletados estarão disponíveis apenas no computador que os coletou, impossibilitando acessos simultâneos de diferentes analistas aos dados e também em caso de falha desse computador as informações serão perdidas. Já no Acquatransf, se o mesmo estiver conectado à uma rede *wi-fi* ele enviará os dados automaticamente pela *internet*, caso não esteja, basta se aproximar do aparelho, conectar o dispositivo móvel ao Acquatransf através do *bluetooth* e enviar os dados pela *internet* usando a conexão móvel

do aparelho. Na *internet* os dados estarão disponíveis para qualquer analista acessar, além de estarem protegidos contra perdas através de sistemas de *backups* automáticos.

Existe um pacote de extensão chamado HYDROCAL MS-7, que permite ao HYDROCAL 1001+ coletar leituras de temperatura ambiente, corrente, e tensão do transformador[23] , porém ele é vendido separadamente e não foi considerado na tabela comparativa.

Tabela 5.1 – Comparativo entre dispositivos.

Característica	Hydrocal			MSENSE	Treetech	Acquatransf
	1001+	1003	1009	DGA 2	MO	
Temperatura do óleo	Sim	Sim	Sim	Sim	-	Sim
Umidade do óleo	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Exportar dados	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Temperatura ambiente	-	-	-	-	-	Sim
Componentes modulares	-	-	-	-	-	Sim
Qtd. máx. sondas lidas	1	1	1	1	1	até 4
Sensor de corrente	-	-	-	-	-	até 4
Monitoramento via <i>internet</i>	-	-	-	-	-	Sim
Conexão <i>Bluetooth</i>	-	-	-	-	-	Sim
Conexão <i>wi-fi</i>	-	-	-	-	-	Sim
Conexão <i>ethernet</i> RJ45	-	-	-	-	-	Sim
Conexão GPRS	-	-	-	-	-	Sim
Configuração por aplicativo	-	-	-	-	-	Sim
Monitoramento por aplicativo	-	-	-	-	-	Sim
Tolerante à falhas de conexão	-	-	-	-	-	Sim
Configuração taxa de amostragem	-	-	-	-	-	Sim
Tolerante à falhas de energia	-	-	-	-	-	Sim
Proteção elétrica	-	-	-	-	-	Sim

O custo de produção desse dispositivo foi levado em consideração, visando minimizá-lo para que seja possível monitorar um grande número de transformadores. O item responsável por quase 90% do valor de produção é o sensor de temperatura e umidade do óleo, qualquer dispositivo similar também terá esse custo. Os outros 10% são usados para prover os novos sensores e a integração com o dispositivos móveis e a *internet*. A Tabela 5.2, detalha os custos dos componentes utilizados para desenvolvimento do dispositivo.

Vale ressaltar que o dispositivo é capaz de funcionar com qualquer sonda de umidade e temperatura que forneça um sinal de 4mA a 20mA, assim o custo pode variar de acordo com a sonda escolhida. A sonda utilizada para o protótipo foi a LDH-100 da IFM.

A estrutura em formato modular do dispositivo permite se que seja possível expandir a quantidade de sensores lidos, permitindo que o mesmo dispositivo seja capaz

de monitorar mais pontos de um mesmo transformador ou transformadores diferentes simultaneamente. Também permite que seja possível realizar troca de componentes defeituosos de forma simples, diminuindo o custo de manutenção.

Tabela 5.2 – Tabela de custos de componentes.

Componente	Qtd	Valor Unitário	Valor total
Arduino Nano	1	R\$ 29,90	R\$ 29,90
Raspberry Pi Zero W	1	R\$ 109,90	R\$ 109,90
SD Card 8 GB	1	R\$ 39,90	R\$ 39,90
Bournes	-	-	R\$ 13,47
Sensor LDH100	2	R\$ 3.221,20	R\$ 6.442,40
Cabo com conector LDH100	2	R\$ 222,98	R\$ 445,96
Sensor de corrente não invasivo 20A SCT-013	1	R\$ 52,90	R\$ 52,90
Sensor de corrente não invasivo 30A SCT-013	1	R\$ 48,51	R\$ 48,51
Conector <i>jack</i> P2 áudio 3.5mm	2	R\$ 2,99	R\$ 5,98
Sensor de umidade e temperatura DHT11	1	R\$ 9,50	R\$ 9,50
Resistores, capacitores, transistores e C.I.	-	-	R\$ 9,71
Bateria 18650	6	R\$ 10,00	R\$ 60,00
Suporte para bateria 18650 com controlador	1	R\$ 90,00	R\$ 90,00
Fonte 12V	1	R\$ 37,50	R\$ 37,50
Quadro de proteção	1	R\$ 66,90	R\$ 66,90
Fixador Magnético com Pino Rosca	4	R\$ 9,03	R\$ 36,12
		Total em real:	R\$ 7.498,65
		Total em dólar:	\$ 1.407,40*

*Dólar cotado 16/07/2020: (\$1 = R\$ 5,328)

5.1 Validação com instrumentos e de funcionalidades.

Uma validação com instrumentos é necessária para avaliar o bom funcionamento dos sensores e das conexões. Essa é a primeira etapa para validar a precisão e bom funcionamento do dispositivo. A metodologia empregada foi comparar os sensores de corrente com um multímetro de mercado calibrado com margem de erro conhecida e comparar o sensor de temperatura do óleo com um termômetro. A umidade do óleo não pode ser validada nessa etapa, já que não havia disponível nenhum dispositivo de mercado com erro conhecido para comparação.

Para verificar o monitoramento de corrente, foram utilizados dois sensores não invasivos modelos SCT-013-20 e SCT-013-30, cuja as correntes máximas medidas são

respectivamente 20A e 30A, a margem de erro de ambos é de $\pm 1\%$ de acordo com o fabricante. Para comparação foi utilizado um multímetro digital MINIPA ET-2042E, cuja corrente máxima medida é de 20A, a precisão do mesmo é de $\pm 3\% + 5D$, e um amperímetro alicate Finest 170 com precisão de $\pm 1.5\% + 2D$.

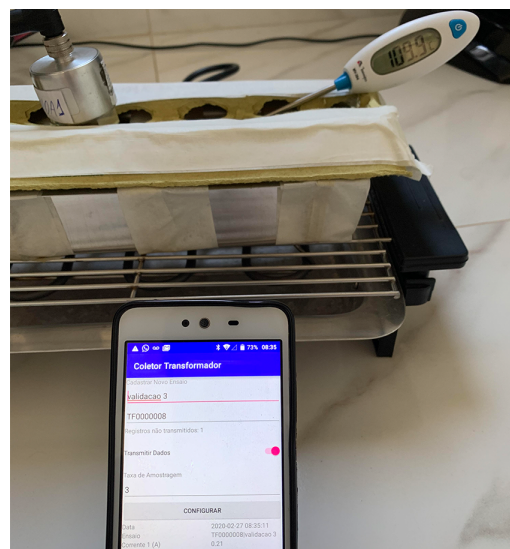
O multímetro foi conectado em série com o circuito de alimentação do aquecedor, enquanto os sensores não invasivos e o amperímetro alicate foram acoplados no mesmo condutor como pode ser visto na Fig. 5.1(a). A resistência do aquecedor é constante, logo a corrente medida tende a permanecer no mesmo valor, que pela potência nominal do aquecedor é de 4,54A .

As leituras do dispositivo foram coerentes com os valores medidos pelo multímetro e pelo esperado pela potência nominal do equipamento, como mostra a Fig. 5.2. Foram coletas 57 amostras em um período de 25 minutos. O erro médio do valor medido pelo Acquatransf em relação ao amperímetro alicate foi de $\pm 0,22A$, a divergência já era esperada já que a escala do amperímetro é para grandes correntes. Em relação ao amperímetro em série, o erro médio foi de $\pm 0,034A$, assim o dispositivo se mostrou eficaz para monitoramento de corrente.

Figura 5.1 – Arranjo de instrumentos para validação: a) Amperímetros; e b) termômetro



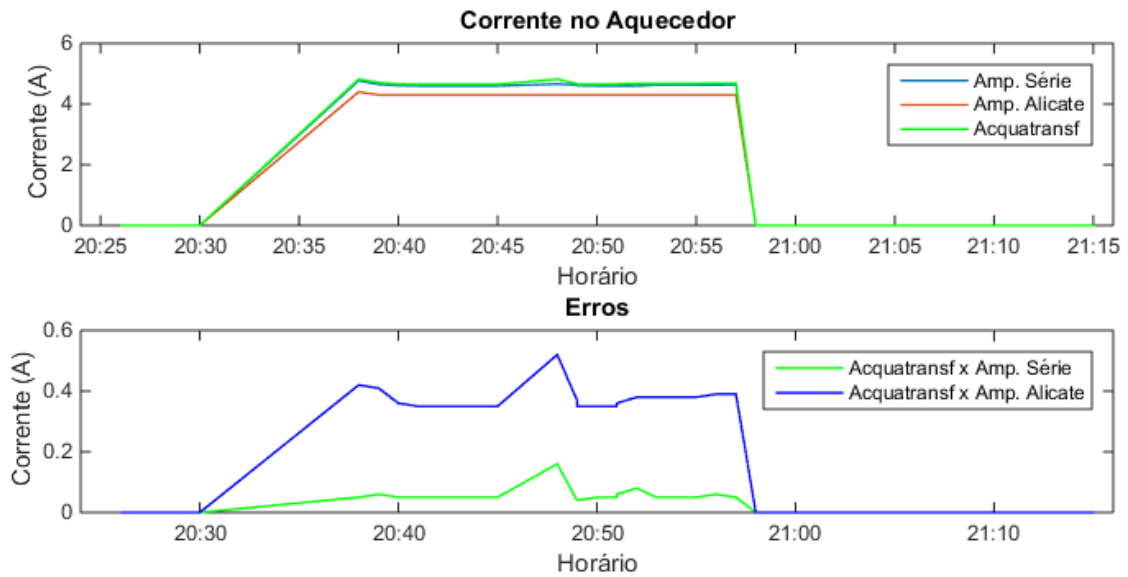
(a)



(b)

Fonte: próprio autor.

Para verificar a precisão dos valores medidos em relação à temperatura do óleo, as leituras foram comparadas com as de um termômetro digital MINIPA MV-363, cuja faixa de medição é de $-10^{\circ}C$ a $200^{\circ}C$ com precisão média de $\pm 4^{\circ}C$. O sensor utilizado pelo Acquatransf nesse teste foi a sonda LDH-100 da IFM ELETRONIC sua faixa de medição é de $-20^{\circ}C$ à $120^{\circ}C$, e sua corrente de saída varia de 4mA a 20mA, sua precisão é de $\pm 2\%$.

Figura 5.2 – Gráficos de leituras e erros aferidos na validação.

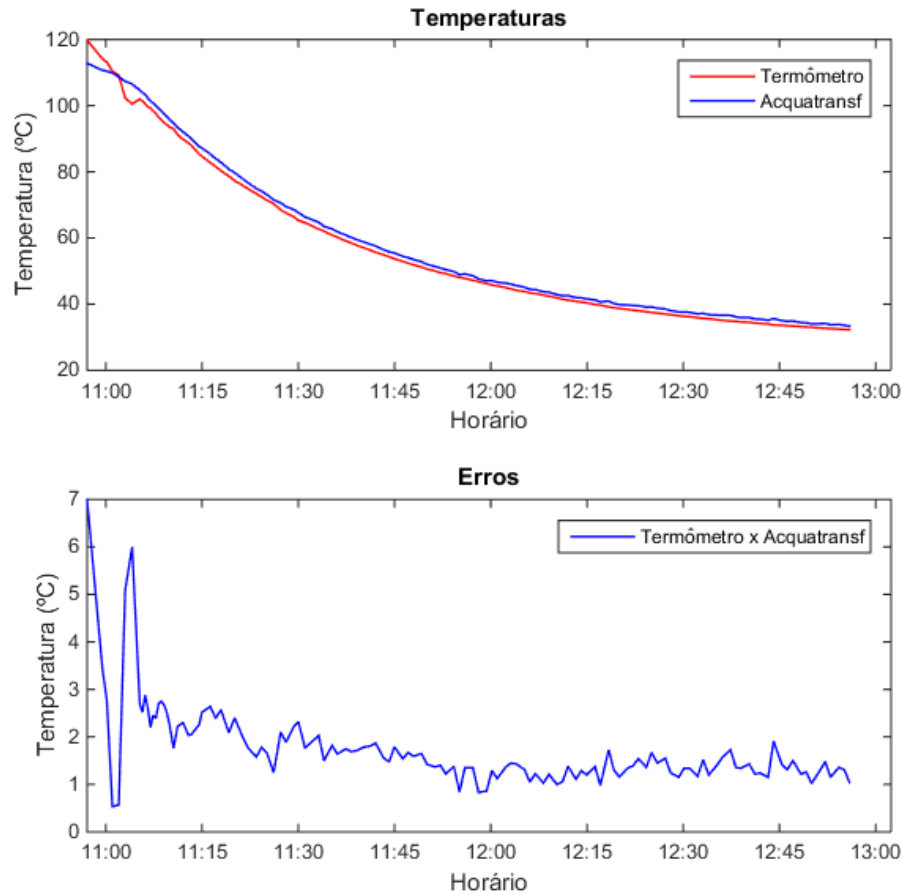
Fonte: Próprio autor.

O sensor e o termômetro foram imersos na amostra de óleo isolante, como pode ser visto na Fig. 5.1(b), após isso o óleo foi aquecido até a temperatura de 120°C, que é o limite de leitura do sensor utilizado. A partir desse momento foi acompanhado o resfriamento do óleo até a temperatura de 33°C, sendo coletada uma amostra por minuto, totalizando 128 amostras.

O gráfico das medidas pode ser visto na Fig. 5.3, percebe-se um atraso na leitura do sensor, que é devido ao período de inércia térmica do mesmo. É notável que o erro é maior quando a temperatura chega próximo ao limite de medição do sensor. Ainda assim foi possível obter um erro satisfatório, sendo o erro médio de $\pm 1,74^\circ\text{C}$.

Além dos testes de precisão das leituras foram realizados também verificações nas funções propostas para o dispositivo, como ser tolerante a falhas de alimentação energética. O dispositivo foi ligado e foi conectado à um dispositivo móvel para monitoramento, logo após o fornecimento de energia foi interrompido por 30 minutos, e o dispositivo continuou a efetuar as leituras de amostras normalmente.

Durante o teste de funcionamento da bateria, as leituras coletadas não foram enviadas para o supervisor, pois, não havia nenhuma forma de conexão habilitada. Esses dados foram utilizados para verificar a funcionalidade de transmissão de dados, que consiste em copiar os dados para o dispositivo móvel que está conectado ao Acquatransf, e posteriormente utilizar a funcionalidade envio de dados para enviar os dados para o supervisor em nuvem. Após copiar os dados para o dispositivo móvel, a *internet* do mesmo foi habilitada e acionado o comando de envio de dados. O resultado foi um

Figura 5.3 – Gráfico das temperaturas medidas.

Fonte: Próprio autor.

sucesso, em poucos segundos os dados já estavam disponíveis no supervísório em nuvem.

É possível também enviar os dados em tempo real para o supervísório por meio da *internet* do dispositivo móvel se a opção de transmissão de dados estiver habilitada, os dados são enviados automaticamente. Com a opção de transmissão habilitada o dispositivo móvel foi configurado em "modo avião", fazendo com que o mesmo não tenha nenhuma conectividade com redes móveis, e assim, não tenha conexão com a *internet*. Sem conexão os dados não são transmitidos e ficam se acumulando no coletor, porém assim que o "modo avião" é desligado, os dados retidos são automaticamente transferidos. Assim, o aplicativo é tolerante há falhas de conexão, não permitindo que dados sejam perdidos em caso de falhas na transmissão.

Para que o dispositivo envie os dados automaticamente para a *internet* é preciso que o mesmo conecte-se à uma rede *wi-fi*, para isso é utilizada a funcionalidade de configuração de *wi-fi* do aplicativo. Foi escolhida uma rede conhecida e informada a sua respectiva senha, após alguns segundos o dispositivo já estava conectado à rede e enviando os dados para *internet* sendo possível acompanhá-los pela *internet* em tempo real através do supervísório em nuvem desenvolvido. A comunicação com a *internet* da rede *wi-fi* foi

Tabela 5.3 – *Checagem de funcionalidades.*

Funcionalidade	Funcionamento		
	Bom	Parcial	Ruim
Conexão Bluetooth	X		
Configuração do coletos por aplicativo	X		
Monitoramento por aplicativo	X		
Configuração de taxa de amostragem	X		
Transmissão de dados pela rede móvel	X		
Retomada de transmissão após interrupção de rede	X		
<i>Download</i> de dados para dispositivo móvel	X		
Envio de dados do dispositivo móvel para o supervisor	X		
Buscar redes <i>wi-fi</i> disponíveis	X		
Conectar à rede <i>wi-fi</i>	X		
Monitoramento pelo supervisor	X		
Recebimento de alerta	X		
Interrupção no fornecimento de energia	X		

interrompida, assim os dados não podiam ser enviados para o supervisor, os mesmo ficaram armazenados no coletor e assim que a conexão foi restaurada os dados foram enviados. A Tabela 5.3 mostra as funcionalidades checadas e o resultado da checagem.

5.2 Validação com MUSPO-DAQ.

O MUSPO-DAQ é um dispositivo capaz de monitorar a temperatura e umidade do óleo isolante de transformadores, utilizando o mesmo sensor usado no Acquatransf, a sonda LDH-100 da IFM ELETRONIC. O mesmo foi validado em processo de manutenção em transformadores onde seus resultados foram comparados com análises laboratoriais tendo bons resultados [3].

Um novo ensaio com o MUSPO-DAQ foi realizado em laboratório no dia 19/02/2020, onde foram utilizadas duas amostras de óleo analisadas em laboratório dia 12/02/2020 à temperatura de 30°C, uma em estado excelente com teor de água de 5ppm (partes por milhão), e uma em estado péssimo com teor de água em 118ppm. As medidas foram realizadas pelo dispositivo à uma temperatura ambiente de 26,4°C e com a temperatura do óleo à 26,2 °C.

Tabela 5.4 – Constantes para o cálculo de solubilidade de água em óleos.

Tipo de óleo	A	B
1	$16,97 \times 10^6$	3777
2	$24,65 \times 10^6$	3835
3 (óleo envelhecido)	$1,84 \times 10^6$	2752

Fonte: [24].

Tabela 5.5 – Teor de água obtido no ensaio com MUSPO-DAQ.

Amostra	MUSPO-DAQ	Laboratório	Erro
Excelente	5ppm	3ppm	2ppm
Péssima	120ppm	118ppm	2ppm

É importante ressaltar que o sensor utilizado fornece o valor da atividade de água/umidade relativa em percentual(%), e o laudo do laboratório em ppm. Assim é preciso utilizar (5-1) para converter os valores percentuais em ppm, sendo "S" a atividade de água percentual, "A" e "B" constantes que variam com o tipo de óleo e "t" a temperatura do óleo em Kelvin. As constantes sugeridas pela literatura são apresentadas na Tabela 5.4. Para cálculo do óleo em estado excelente foi utilizado as constantes do tipo 1, e para o estado péssimo foi utilizado a constante do tipo 3.

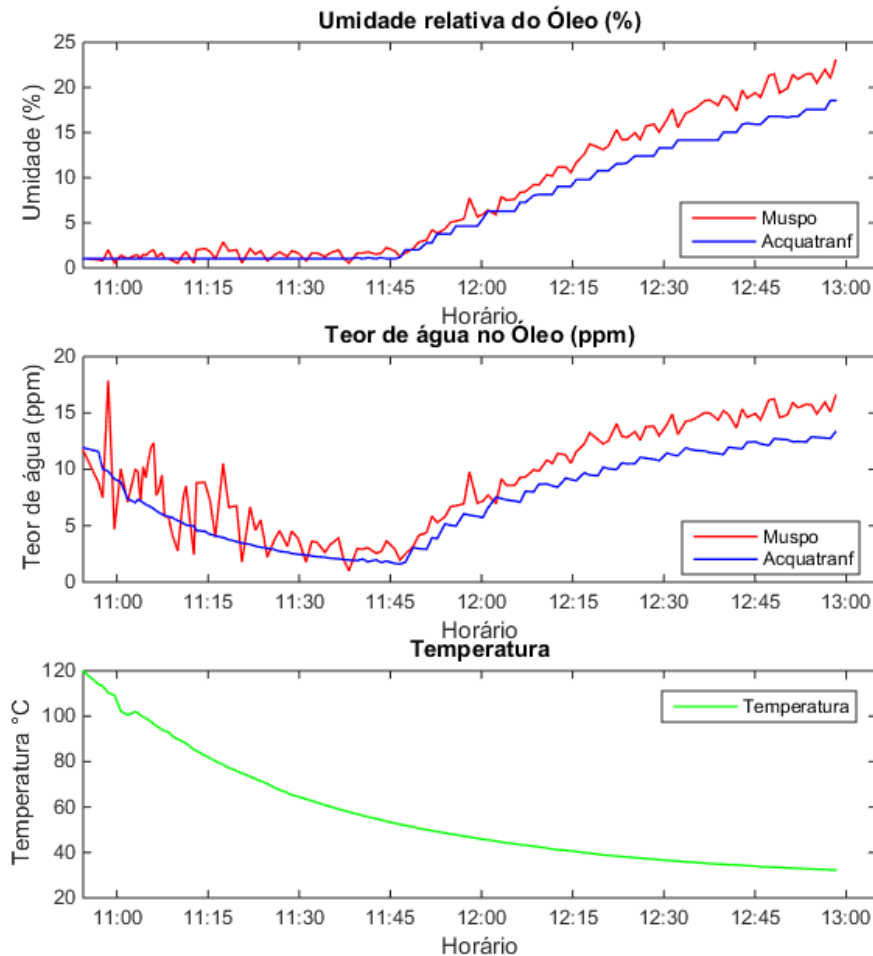
$$C_{\text{óleo}} = S \times C_{\text{óleo,sat}} \quad (5-1)$$

$$C_{\text{óleo,sat}} = A \times e^{-B/t} \quad (5-2)$$

Os resultados obtidos no ensaio em laboratório são apresentados na Tabela 5.5. Os valores de umidade fornecidos pelo sensor foi de 5% para a amostra excelente e 54,91% para a amostra péssima, sendo transformada em ppm, temos respectivamente, 5ppm e 120ppm, mostrando uma excelente precisão.

O MUSPO-DAQ se mostrou novamente eficiente, fornecendo valores bem próximos dos resultados obtidos em laboratório. Desse modo um comparativo entre o Acquatransf e o MUSPO-DAQ pode indicar se as leituras de umidade do Acquatransf estão coerentes. Para realizar essa comparação uma amostra de óleo teve sua temperatura elevada à 120°C e os dois dispositivos acompanharam a umidade durante o resfriamento da amostra.

A temperatura usada para o cálculo do teor de água em ppm é a mesma para os dois dispositivos, a temperatura lida pelo termômetro, visando equalizar o cálculo. As constantes utilizadas foram a do tipo 3 da Tabela 5.4.

Figura 5.4 – Gráfico de leituras do MUSPO-DAQ x Acquatransf.

Fonte: Próprio autor.

Nos gráficos da Fig. 5.4, é possível notar oscilações nas leituras do MUSPO-DAQ, isso se deve ao fato de o mesmo se utilizar de leituras instantâneas, enquanto o Acquatransf realiza uma média de 500 medidas para chegar a uma amostra, assim não há grandes oscilações. Em termos de umidade percentual medida pelos sensores, o erro médio entre os dispositivos foi de 1,57pp(pontos percentuais) com desvio padrão de 1,4pp. Em relação ao teor de água calculado o erro médio foi de $\pm 2,2$ ppm com desvio padrão de 1,33ppm. Os valores medidos estão com erros dentro do esperado, já que há a imprecisão do sensor que é de $\pm 2\%$ como mencionado anteriormente.

5.3 Validação com laudo de laboratório.

A intenção desta validação foi verificar a precisão do dispositivo em relação à uma análise realizada em laboratório. Foram utilizadas duas amostras de óleo analisadas

Tabela 5.6 – *Resultados obtidos MUSPO-DAQ x Acquatransf x Laboratório, para amostra excelente.*

	Acquatransf	MUSPO-DAQ	Laboratório
Umidade(%)	26,51	32,31	-
Teor de água(ppm)	14,47	20,13	5
Temperatura(°C)	25,6	28,8	30

Tabela 5.7 – *Resultados obtidos MUSPO-DAQ x Acquatransf x Laboratório, para amostra péssima.*

	Acquatransf	MUSPO-DAQ	Laboratório
Umidade(%)	56,83	52,59	-
Teor de água(ppm)	109,07	117,54	120
Temperatura(°C)	27,17	32,24	52,59

em laboratório dia 12/02/2020 à temperatura de 30°C, uma em estado excelente com teor de água de 5ppm (partes por milhão), e outra em estado péssimo com teor de água em 118ppm.

O método utilizado para verificar a umidade foi, inserir os sensores do Acquatransf e do MUSPO-DAQ na amostra analisada, à temperatura ambiente de 26,2°C, aguardar a estabilização das leituras e verificar os valores medidos. Os valores medidos para amostra excelente podem ser visto na tabela 5.6, para cálculo do teor de água em ppm, foi utilizado a temperatura medida pelo dispositivo e as constantes utilizadas foram as do tipo de óleo 1.

Os valores medidos para amostra péssima podem ser visto na tabela 5.7, para cálculo do teor de água em ppm, foi utilizado a temperatura medida pelo dispositivo e as constantes utilizadas foram as do tipo de óleo 3.

A validação foi realizada em 28/06/2020, devido aos imprevistos durante o desenvolvimento do projeto, o tempo entre a análise laboratorial e a validação afetou a amostra de óleo excelente, que sofreu degradação natural em função da forma de armazenamento e tempo, assim seu teor de água aumentou, como pode ser verificado com o resultado obtido com o MUSPO-DAQ e a mesma amostra no dia 19/02/2020, como mostrado na Seção 5.2. Em relação a amostra em estado péssimo, não houve muita mudança já que a mesma já não estava em boas condições.

Para a amostra excelente o erro médio da leitura de umidade relativa do Acquatransf em relação ao MUSPO-DAQ foi de $\pm 5,8$ pp, já quanto ao teor de água foi de $\pm 5,66$ ppm, em relação ao teor de água vale ressaltar que o cálculo foi realizado utilizando a temperatura lida pelo sensor, assim o erro do sensor de temperatura também influencia

no resultado. Em relação ao laudo do laboratório não se pode comparar o erro, pois o tempo entre a análise e a validação foi muito longo, sendo que amostra se deteriorou nesse período, assim é mais relevante considerar a informação do MUSPO-DAQ, já que o mesmo se mostrou eficiente na análise da mesma amostra anteriormente.

Para a amostra péssima o erro médio da leitura de umidade relativa do Acquatransf em relação ao MUSPO-DAQ foi de $\pm 4,24$ pp, já quanto ao teor de água foi de $\pm 8,47$ ppm, em relação ao teor de água, como na amostra excelente, o cálculo foi realizado utilizando a temperatura lida pelo sensor, assim o erro do sensor de temperatura também influencia no resultado. Em relação ao laudo do laboratório temos um erro no teor de água de 10,93ppm, um erro aceitável considerando as diferenças de temperatura e o tempo entre a análise laboratorial e a validação.

5.4 Validação do sistema de avaliação físico-química.

Para validação da implementação foram utilizados dados de análises laboratoriais de óleo de transformadores em operação entre 2013 e 2015, fornecidos pela concessionária de distribuição de energia local, com as grandezas sendo classificadas por especialistas da área de manutenção de transformadores de potência. As especificações dos transformadores analisados podem ser vistas na Tabela 5.8. Os valores das grandezas analisadas são mostrados na Tabela 5.9. Os resultados das análises podem ser comparados na Tabela 5.10. As abreviações usadas nas especificações das colunas das Tabelas 5.9 e 5.10 são:

- **RD**, rigidez dielétrica;
- **TI**, tensão interfacial;
- **H₂O**, teor de água;
- **FP**, fator de potência;
- **IC**, índice de cor; e
- **IN**, índice de neutralização.

Os resultados encontrados foram precisos em comparação com a análise dos especialistas, todos os conceitos foram definidos de forma correta, ocasionando uma taxa de acerto de 100%. A ferramenta se mostrou eficiente para ajudar na tomada de decisão, e por se tratar de um software que já está integrado ao monitoramento de temperatura, corrente e umidade do transformador em tempo real, o analista do resultado da classificação fornecida pelo Acquatransf pode imediatamente consultar as condições operativas do equipamento no momento, e seu histórico para tomar decisões ainda mais precisas em relação a intervir ou não no equipamento.

Tabela 5.8 – Especificação dos transformadores analisados

ID	Tensão Nominal (kV)	Potência (MVA)	Alta (kV)	Baixa (kV)
1	145	33,3	138	13,8
2	145	33,3	138	13,8
3	145	25	138	13,8
4	145	25	138	13,8
5	145	25	138	13,8
6	72,5	20	69	13,8
7	72,5	6,24	69	13,8
8	72,5	4	69	34,5
9	72,5	15	69	13,8
10	72,5	15	69	13,8
11	36,2	3,75	34,5	13,8
12	36,2	6,25	34,5	13,8
13	36,2	2,5	34,5	13,8
14	36,2	1,5	34,5	13,8
15	36,2	2	34,5	13,8

Tabela 5.9 – Resultado análise de óleo em laboratório.

ID	RD (kV)	TI (mN/m)	H ₂ O (ppm)	FP a 100° (%)	IC	IN (mg-KOH)
1	88	37	5	0,44	2	0,01
2	83	31	9	6,53	2,5	0,02
3	75	21	26	8,11	5	0,22
4	88	38	10	0,834	0,5	0,01
5	92	25	24	6,62	3,5	0,1
6	84	45	17	0,665	0,5	0,01
7	66	32	15	3,924	2	0,02
8	86	22	15	24,76	6,5	0,13
9	87	33	10	0,589	2	0,01
10	77	32	21	1,896	2,5	0,02
11	84	20	19	4,48	2,5	0,12
12	87	26	22	2,355	3	0,04
13	89	33	3	2,022	2	0,02
14	81	17	31	7,56	5	0,26
15	80	41	11	0,104	0,5	0,01

Tabela 5.10 – *Comparativo de resultados Acquatransf x Especialistas.*

Avaliação	RD	TI	H₂O	FP	IC	IN	Geral
1 - Especialista	A	B	A	B	B	A	A
1 - Acquatransf	A	B	A	B	B	A	A
2 - Especialista	B	B	B	E	B	A	C
2 - Acquatransf	B	B	B	E	B	A	C
3 - Especialista	B	D	D	E	D	D	E
3 - Acquatransf	B	D	D	E	D	D	E
4 - Especialista	A	B	B	B	A	A	B
4 - Acquatransf	A	B	B	B	A	A	B
5 - Especialista	A	C	C	E	C	B	D
5 - Acquatransf	A	C	C	E	C	B	D
6 - Especialista	A	A	B	B	A	A	B
6 - Acquatransf	A	A	B	B	A	A	B
7 - Especialista	B	B	B	D	B	A	D
7 - Acquatransf	B	B	B	D	B	A	D
8 - Especialista	A	D	B	E	E	C	E
8 - Acquatransf	A	D	B	E	E	C	E
9 - Especialista	A	B	A	B	B	A	A
9 - Acquatransf	A	B	A	B	B	A	A
10 - Especialista	B	B	C	C	B	A	C
10 - Acquatransf	B	B	C	C	B	A	C
11 - Especialista	A	D	B	E	B	C	D
11 - Acquatransf	A	D	B	E	B	C	D
12 - Especialista	A	C	B	C	C	B	C
12 - Acquatransf	A	C	B	C	C	B	C
13 - Especialista	A	B	A	C	B	A	B
13 - Acquatransf	A	B	A	C	B	A	B
14 - Especialista	A	E	C	E	D	D	E
14 - Acquatransf	A	E	C	E	D	D	E
15 - Especialista	A	A	A	A	A	A	A
15 - Acquatransf	A	A	A	A	A	A	A

Vale lembrar que a análise físico-química do óleo do transformador é uma de várias técnicas preditivas, eficiente e usualmente utilizada na conservação de transformadores, e deve ser usada com outras análises para se tomar a decisão de intervir ou não no transformador. A ferramenta desenvolvida, como foi dito, é uma ferramenta de apoio à tomada de decisão, que permite uma análise rápida para sinalizar que se deve ou não se preocupar com o equipamento no momento.

Conclusão

Qualquer tomada de decisão sem informações é mais difícil, o desenvolvimento desse dispositivo buscou prover informações relevantes para a área de manutenção de transformadores por um baixo custo, possibilitando acompanhamento em tempo real do estado de operação do equipamento, e ainda provendo uma ferramenta de análise histórica e de auxílio à tomada de decisão.

Um sistema preciso de monitoramento da umidade no papel isolante de transformadores ajuda a evitar falhas nos equipamentos durante sobrecargas de emergências[12]. Quando interligado com o monitoramento de outras variáveis permite uma análise muito mais ampla, sendo possível cruzar informações e fornecer *insights* que podem evitar falhas e prejuízos.

Esse projeto proporcionou o desenvolvimento de um dispositivo funcional, capaz de monitorar ativamente transformadores de potência em operação ou em manutenção, um aplicativo de dispositivos móveis para configuração e monitoramento do dispositivo desenvolvido e de outros que possam ser programados para se comunicar com o aplicativo e um sistema supervisorio em nuvem para monitoramento remoto das informações coletadas, sendo também possível que o mesmo receba dados de outros dispositivos e sistemas.

A forma de configuração do dispositivo entrega mais segurança para os operadores, que poderão após realizar a instalação do dispositivo, configurá-lo e monitorá-lo a distância, ficando assim menos expostos aos perigos provenientes do ambiente onde se encontra o transformador.

A interface de configuração através de um aplicativo na palma da mão do operador, permite uma melhor interação na configuração do equipamento, facilitando o processo de treinamento das equipes que farão a instalação e acompanhamento do dispositivo.

Sua estrutura modular permite que o dispositivo seja expansível e flexível, possibilitando substituição de componentes defeituoso sem afetar o restante do equipamento e também aumentar a quantidade de sensores lidos. Atualizações do *firmware* podem ser

realizadas apenas substituindo um cartão de memória, ou até mesmo de remotamente através da *internet*.

O supervisor é capaz de fornecer informações importantes para análise do funcionamento dos transformadores monitorados, além de fornecer alertas automáticos que podem evitar danos ao equipamento monitorado. Enquanto o módulo de classificação físico-química, auxilia a programar melhor os procedimentos de manutenção, com base em métodos de manutenção preditiva.

Diante das inovações propostas, este projeto deu origem à dois registros de *softwares*, um depósito de patente no INPI e uma publicação aceita no VIII SBSE(Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos), demonstrando assim o potencial de inovação que o mesmo possui.

A precisão aferida nos testes em laboratório foi satisfatória, se mostrando um equipamento confiável acerca dos valores medidos. Durante o desenvolvimento do trabalho não foi possível realizar o monitoramento de um transformador em operação, embora o dispositivo esteja preparado para um teste em campo, estando isolado em um invólucro capaz de resistir aos intempéries.

Sendo assim, constata-se que essa solução contribuirá para o monitoramento "*on-line*" de diversos transformadores ajudando nas tomadas de decisões e contribuindo para práticas mais eficientes e de baixo custo na manutenção, propiciando melhor avaliação das condições de operação dos transformadores, e conseqüentemente na preservação da vida útil desses equipamentos

Ainda há espaço para maiores aprimoramentos no dispositivo, no aplicativo e no supervisor, como utilização de outras formas de comunicação, aprimoramento do sistema de alertas, e quando se possuir uma quantidade relevante de dados de monitoramentos de transformadores em operação se desenvolver modelos de inteligência capazes de identificar e notificar falhas e anomalias.

Com a utilização do Acquatransf são esperadas melhorias dos índices de qualidade do fornecimento de energia elétrica, diminuição das interrupções, aumento da confiabilidade do sistema elétrico, e maior segurança na operação e manutenção de transformadores de potência.

Os produtos desenvolvidos podem ser usados em conjunto ou de forma separada. O supervisor pode receber dados de outros sensores, o aplicativo pode operar outros *hardwares* e o coletor pode fornecer dados para apoio a tomada de decisão e também ser integrado à outros sistemas supervisórios.

Pela originalidade do dispositivo e dos *softwares* agregados, foram realizados pedidos de registro de programa de computador e de patente do dispositivo junto ao INPI, para proteger a propriedade intelectual e assegurar devido reconhecimento aos idealizadores do projeto. Os programas registrados foram: "Supervisor em Nuvem

para Monitoramento de Transformadores de Potência" processo **BR512020000925-5** e "Aplicativo de Configuração e Monitoramento de Transformadores de Potência" processo **BR512020000924-7**. Para o dispositivo de monitoramento o depósito do pedido de patente foi realizado em 02/07/2020 intitulado "Dispositivo de Análise e Monitoramento de Transformadores de Potência Imersos em Óleo Isolante" processo **BR202020013592-4**.

Referências Bibliográficas

- [1] FITZGERALD, A.; Kingsley Jr, C.; UMANS, S. D. *Máquinas Elétricas*. 6. ed. [S.l.: s.n.], 2006.
- [2] CIGRE A2.05 GT. Guia de Manutenção para Transformadores de Potência. *CIGRÉ BRASIL*, 2013.
- [3] SOUZA, F.; RIBEIRO, C.; BRITO, L. Um Dispositivo de Aquisição de Dados para o Monitoramento da Umidade em Sistemas Isolantes Papel-Óleo de Transformadores de Potência. In: *XXIII Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica*. Fortaleza: [s.n.], 2018.
- [4] FRONTIN, S. O. *Equipamentos de Alta Tensão: Prospecção e Hierarquização de Inovações Tecnológicas*. [S.l.: s.n.], 2013. ISBN 9788588041097.
- [5] IEC. *IEC 60076-2 Edition 3.0 2011-02*. [S.l.], 2011.
- [6] LARAMORE, R. D. *An introduction to electrical machines and transformers*. [S.l.]: Wiley, 1990.
- [7] CIGRE, W. G. *A2. 34: Guide for Transformer Maintenance*. [S.l.]: Brochure, 2011.
- [8] PAHLAVANPOUR, B.; PABLO, A. D.; OTHERS. Insulating Oil Reclamation and Dechlorination. CIGRE. Cigre, CIGRE. *WG D1*, v. 1, 2010.
- [9] DU, Y. et al. Moisture equilibrium in transformer paper-oil systems. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, v. 15, n. 1, p. 11–20, jan 1999. ISSN 1558-4402.
- [10] FABRE, J.; PICHON, A. Deteriorating processes and products of paper in oil. Application to transformers. *CIGRÉ paper*, v. 137, p. 18, 1960.
- [11] OOMMEN, T. V. MOISTURE EQUILIBRIUM IN PAPER-OIL INSULATION SYSTEMS. In: *Proceedings of the Electrical/Electronics Insulation Conference*. [S.l.: s.n.], 1983. ISSN 03622479.

- [12] MARTIN, D.; SAHA, T. A review of the techniques used by utilities to measure the water content of transformer insulation paper. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 2017. ISSN 08837554.
- [13] CIGRE Working Group A2.37. *Transformer Reliability Survey*. [S.l.: s.n.], 2015. ISBN 9782858733460.
- [14] CIGRE Working Group A2.23. Gerenciamento de Dados para Monitoramento e Avaliação da Condição Operativa de Transformadores (GMDT). *Cigre*, 2006.
- [15] BAILEY, D.; WRIGHT, E. Practical SCADA for Industry. *Elsevier Science*, p. 304, 2003. ISSN 01419331. Disponível em: <https://www.fer.unizg.hr/_download/repository/Practical_SCADA_for_Industry.pdf>.
- [16] CHURCH, P. et al. Moving SCADA systems to IAAS clouds. In: IEEE. *2015 IEEE International Conference on Smart City/SocialCom/SustainCom (SmartCity)*. [S.l.], 2015. p. 908–914.
- [17] KUROSE, J.; ROSS, K. *REDES DE COMPUTADORES Uma abordagem top-Down*. [s.n.], 2010. ISBN 9788478290611 8478290613. Disponível em: <<http://dialnet.unirioja.es/servlet/dcart?info=link&codigo=2741660&orden=170694>>.
- [18] TANENBAUM, A. S. *Redes de computadores*. [s.n.], 2003. 1–632 p. ISSN 13891286. ISBN 8535211853. Disponível em: <<http://www.prenhall.com/tanenbaum>>.
- [19] Bluetooth SIG, C. *Smart Industry | Bluetooth Technology Website*. 2019. Disponível em: <<https://www.bluetooth.com/markets/smart-industry/>>.
- [20] CHANG, K. Bluetooth: a viable solution for IoT? [Industry Perspectives]. *IEEE Wireless Communications*, v. 21, n. 6, p. 6–7, 2014. ISSN 1558-0687.
- [21] YHDC. *Dechang Electronic Co. Ltd Electronic and electrical*. 2020. Disponível em: <<http://en.yhdc.com/>>.
- [22] MARQUES, A. P. *Diagnóstico Otimizado de Transformadores de Potência: Integração de Técnicas Preditivas*. [S.l.]: Editora Kelps, 2019.
- [23] MTE. *Accessories - MTE Meter Test Equipment AG*. 2019. Disponível em: <<https://www.mte.ch/en/products/transformer-monitoring/accessories-10025>>.
- [24] CIGRE. Moisture equilibrium and moisture migration within transformer insulation systems. *WG A2.30. [S.I.]*, p. 53, 2008.