

**Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA
Curso de Engenharia Eletrônica**

**DESENVOLVIMENTO DE PROTÓTIPO DE BANCADA
PARA MONITORAR TENSÃO, CORRENTE E
TEMPERATURA DE TRANSFORMADORES DE
BAIXA TENSÃO E SISTEMA PARA ENSAIO DE
RIGIDEZ DIELÉTRICA DE ÓLEOS ISOLANTES**

**Autor: Arilson Terrão Ximenes Junior
Orientador: Gerardo Antonio Idrobo Pizo**

**Brasília, DF
2019**



Arilson Terrão Ximenes Junior

Desenvolvimento de protótipo de bancada para monitorar tensão corrente e temperatura de transformadores de baixa tensão e sistema para ensaio de rigidez dielétrica de óleos isolantes

Monografia submetida ao curso de graduação em (Engenharia Eletrônica) da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em (Engenharia Eletrônica).

Orientador: Prof. Dr. Gerardo Antonio Idrobo Pizo

**Brasília, DF
2019**

CIP – Catalogação Internacional da Publicação*

Ximenes, Arilson.

Título da Monografia: desenvolvimento de protótipo de bancada para ensaio de transformadores de corrente de baixa tensão que usam óleos minerais, vegetais e sintéticos para caracterizar o desempenho e propriedades de isolamento térmico
/ Arilson Terrão Ximenes Junior. Brasília: UnB, 2019.
103 p. : il. ; 29,5 cm.

Monografia (Graduação) – Universidade de Brasília
Faculdade do Gama, Brasília, 2019. Orientação: Gerardo
Antonio Idrobo Pizo.

1. Transformadores. 2. Testes de transformadores. 3. Bancada de testes 3 I. Idrobo, Gerardo. II. Prof. Dr.

CDU Classificação



REGULAMENTO E NORMA PARA REDAÇÃO DE RELATÓRIOS DE PROJETOS DE GRADUAÇÃO FACULDADE DO GAMA - FGA

Arilson Terrão Ximenes Junior

Monografia submetida como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em (Engenharia Eletrônica) da Faculdade UnB Gama - FGA, da Universidade de Brasília, em (data da aprovação 04/12/2019) apresentada e aprovada pela banca examinadora abaixo assinada:

Prof. Dr.: Gerardo Antonio Idrobo Pizo, UnB/ FGA
Orientador

Prof. Dr.: Maria del Pilar Hidalgo Falla, UnB/ FGA
Membro Convidado

Prof. Dr.: Jones Yudi Mori Alves da Silva, UnB/ FGA
Membro Convidado

Brasília, DF
2019

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ter me dado a vida e a oportunidade de ter saúde e capacidade mental para realizar este trabalho.

Agradeço ao meu falecido avô Manoel Pacelli Ximenes por ter me dado a oportunidade de ter um estudo de qualidade durante toda a minha vida, agradeço a minha avó Maria Valdecy Terrão Ximenes por ter me dado apoio durante todos estes anos.

Agradeço aos meus pais por tudo que fizeram por mim e pela oportunidade de estar cursando um curso na renomada Universidade de Brasília.

Agradeço ao meu orientador Gerardo Idrobo pela oportunidade de realizar este trabalho e também pelo apoio que este tem me dado durante todo o decorrer do projeto.

Agradeço a professora Maria Del Pillar pelo apoio e por ceder materiais para análise neste trabalho.

Agradeço ao corpo docente da UnB – FGA que me tornaram uma pessoa melhor e com o intelecto mais desenvolvido graças aos seus ensinamentos e sua dedicação.

Agradeço aos meus amigos, Matheus Araújo, Bianca, Adrianny e ao “bonde” por terem feito parte desses longos 7 anos da minha vida e terem tornado meus dias de graduação mais agradáveis.

Agradeço ao meu amigo Sebastião Braz que me ajudou neste trabalho quando tive dificuldades.

RESUMO

Desenvolvimento de uma bancada de testes para aferir a rigidez dielétrica de óleos isolantes e valores de corrente nominal, tensão e temperatura de transformadores de tensão que operam em baixa tensão, compreendidas entre 110V e 360V, frequências entre 50 e 60Hz de operação. O objetivo é criar um sistema capaz de verificar os valores de tensão, corrente e temperatura de um transformador e também de verificar o valor da rigidez dielétrica de diferentes tipos de óleos isolantes de transformadores, sendo estes vegetais ou não. Foi possível verificar se um determinado tipo de óleo está apto para ser utilizado em um equipamento industrial de maior porte, estimando a sua rigidez dielétrica, também existe a necessidade de verificar o comportamento de um transformador no tempo, coletando valores de tensão, temperatura e corrente. Para realização deste projeto, foram utilizadas ferramentas como LabVIEW, Microsoft Access, técnicas de instrumentação eletrônica, estatística, sensores, microcontroladores, e um computador. O supervisor de controle foi elaborado usando o software LabVIEW o microcontrolador o ATMEGA32. O sistema elaborado foi testado utilizando instrumentos de medidas validados e comercializados no Brasil, apresentando valores muito próximos dos valores teóricos consultados. Este trabalho pode contribuir para o entendimento do conceito de rigidez dielétrica e como esse parâmetro influencia no bom funcionamento de um óleo isolante, seja este, mineral, vegetal ou sintético.

Palavras-chave: Transformadores de tensão, óleos vegetais, resistência dielétrica, LabVIEW, supervisão, banco de ensaios, banco de dados, tensão, corrente, temperatura.

ABSTRACT

Development of a test bench to measure the dielectric strength of insulating oils and nominal current, voltage and temperature values of low voltage transformers, operating between 110V and 360V, operating frequencies between 50 and 60Hz. The objective is to create a system capable of verifying the voltage, current and temperature values of a transformer and also checking the value of dielectric strength of different types of transformer insulating oils, whether or not they are vegetable. It was possible to verify if a certain type of oil is suitable for use in a larger industrial equipment, by estimating its dielectric rigidity, there is also the need to verify the behavior of a transformer over time, collecting voltage, temperature and current values. . For this project, tools such as LabVIEW, Microsoft Access, electronic instrumentation techniques, statistics, sensors, microcontrollers, and a computer were used. The control supervisory was designed using the LabVIEW software, the microcontroller or the ATMEGA32. The elaborated system was tested using validated measuring instruments commercialized in Brazil, presenting values very close to the theoretical values consulted. This work can contribute to the understanding of the concept of dielectric strength and how this parameter influences the good functioning of an insulating oil, whether mineral, vegetable or synthetic.

Keywords: Voltage transformers, vegetable oils, dielectric strength, LabVIEW, supervisory, test bench, database, voltage, current, temperature.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama de estrutura básica planejada da bancada.....	5
Figura 2 - Representação de Transformador de Tensão.....	6
Figura 3 - Representação Esquemática de um transformador ideal.....	7
Figura 4 - Esquemática de um transformador Real.....	9
Figura 5 - Representação de um transformador que utiliza óleo isolante.....	12
Figura 6 - Curvas de saturação comparativa dos fluidos de ésteres naturais e óleo mineral.....	15
Figura 7 - Curva de expectativa de vida dos transformadores.....	23
Figura 8 - Vida Útil do Isolamento do Transformador.....	26
Figura 9 – Cadeia Naftênica e Estrutura base de hidrocarbonetos aromáticos.....	29
Figura 10 – Exemplo de éster metílico de ácido graxo.....	31
Figura 11 - Símbolo de um fotoacoplador.....	32
Figura 12 - Exemplo de uma rede de Petri.....	35
Figura 13 - Rede com pesos nos arcos.....	36
Figura 14 - Sensor de temperatura LM335.....	41
Figura 15 – Comparação entre temperatura no medida no sensor LM335 e AF1506.....	42
Figura 16 - Exemplo de circuito dimmer entrada, pulso e saída.....	44
Figura 17 - Resultado da simulação dimmer microcontrolado.....	46
Figura 18 – Circuito do dimmer microcontrolado.....	47
Figura 19 – Layout de circuito impresso do dimmer microcontrolado.....	47
Figura 20 - PCB dimmer microcontrolado.....	48
Figura 21 – Relação entre a leitura digital do microcontrolador e a tensão.....	48
Figura 22 – Gráfico leitura digital versus tensão.....	50
Figura 23 - Esquemático do circuito de entrada para leitura de corrente.....	51
Figura 24 - Formas de onda em cada ponto do circuito da figura 20.....	52
Figura 25 - Diferença da leitura em relação ao valor medido no microcontrolador ...	53
Figura 26 - Representação das trilhas da placa de circuito impresso do projeto.....	56
Figura 27 - Trilhas da placa de circuito impresso do projeto.....	56
Figura 28 - Placa de circuito impresso do projeto finalizada.....	57
Figura 29 - Esquema polia, fuso e engrenagem da máquina de ensaio de rigidez dielétrica.....	59
Figura 30 - Estrutura da máquina de ensaio de rigidez dielétrica.....	60
Figura 31 - Exemplo de estrutura e máquina de estados orientada a eventos.....	63
Figura 32 – Interface de solicitação de leitura de sensores no LabVIEW.....	65
Figura 33 – Interface inicial com LabVIEW.....	66
Figura 34 – Rede de petri da interface inicial da interface do programa.....	66
Figura 35 - Tela de cadastro de óleos isolantes.....	67
Figura 36 – Rede de petri da tela de cadastros de amostras.....	68
Figura 37 – Interface cadastro de transformadores com LabVIEW.....	69
Figura 38 – Interface análise de temperatura com LabVIEW.....	70
Figura 39 – Rede de petri da interface análise de temperatura com LabVIEW.....	70
Figura 40 – Interface de ensaio de transformadores com LabVIEW.....	71
Figura 41 – Rede de Petri do ensaio de transformadores.....	72
Figura 42 – Exemplo de estrutura produtos consumidor com LabVIEW.....	73
Figura 43 – Relatório gerado pela máquina de ensaio de transformadores.....	75
Figura 44 - Tela de ensaio finalizado do óleo YPF.....	78
Figura 45 - Esquemático de Sub-VI anti erro de Timeout.....	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores limites para parâmetros de transformadores.	13
Tabela 2 - Temperaturas limite por classe do transformador.....	21
Tabela 3 - Classes de temperatura dos óleos de classes 55°C e 65°C.	23
Tabela 4 - Curva de expectativa de vida dos transformadores.....	24
Tabela 5 - Valores de perdas a vazio.....	28
Tabela 6 - Leitura e diferença entre alicate amperímetro MINIPA e Arduino.	53
Tabela 7 - Comandos do LabVIEW e suas respectivas respostas.	64
Tabela 8 - Relação entre Índice de acidez, rigidez dielétrica e rigidez dielétrica encontrada pela máquina do TCC.....	79
Tabela 9 - Custos totais do projeto.....	80

LISTA DE SIGLAS

V - Volts

A - Ampere

mA - Miliampere

mV - Milivolt

I2C - Inter –Inter Circuit

VCC - Positive supply voltage

GND - graduated neutral density

RST - Reset

USB - Universal Serial Bus

LCD - Liquid Cristal Display

IDE - Integrated Development Enviroment

IEEE - Institute of Electrical and Eletronics Engineers

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

OMI - Oleo Mineral isolante

OVI - Oleo vegetal isolante

SGBDR - Sistema de Armazenamento de Banco de Dados Relacional

CPF - Cadastro de Pessoa Física

CEP - Código de Endereçamento Postal

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS

RESUMO

ABSTRACT

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE SIGLAS

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. MOTIVAÇÃO	1
1.2 JUSTIFICATIVA	1
1.3. PROBLEMA DA PESQUISA	2
1.4 OBJETIVOS	3
1.4.1 Objetivos Gerais	3
1.4.2 Objetivos Específicos	3
1.5 ABORDAGEM METODOLÓGICA	4
1.6 OORGANIZAÇÃO DO TEXTO	4
2. REFERENCIAL TEÓRICO	6
2.1 TRANSFORMADORES	6
2.2 EFEITOS DE PERDA NOS TRANSFORMADORES	8
2.2.1 Perdas associadas ao núcleo	9
2.2.2 Perdas associadas aos enrolamentos	10
2.3 TEMPO DE VIDA ÚTIL DO TRANSFORMADOR	10
2.4 TRANSFORMADORES IMERSOS EM ÓLEO	11
2.4.1 Função dos óleos isolantes	12
2.4.2 Temperatura ambiente	16
2.4.3 Definições de Viscosidade em líquidos	16
2.4.4 Teoria de Arrhenius em transformadores	17
2.4.5 Temperatura no transformador	19
2.4.6 Estudo de normas em carregamento de transformadores	21
2.4.7 Sobretensão	26
2.4.9 Óleo Mineral Isolante – OMI	28
2.4.8 Óleo Vegetal Isolante – OVI	29
2.5 CIRCUITOS OPTOACOPADORES	31
2.5.1 Acopladores com fototransistores	31
2.6 LABVIEW NATIONAL INSTRUMENTS	32
2.7 REDES DE PETRI	33
2.8 BANCO DE DADOS RELACIONAL	36
2.8.1 Componentes de um bando de dados relacional	37
2.8.2 Modelo entidade relacionamento	38
2.8.3 Integridade de dados	39
3. AQUISIÇÃO DE DADOS E INSTRUMENTAÇÃO ELETRÔNICA	40
3.1 AQUISIÇÃO DE TEMPERATURA	40
3.2 AQUISIÇÃO DE TENSÃO	42
3.2.1 Calibração do sensor de tensão	43
3.3 AQUISIÇÃO DE CORRENTE NOMINAL	50
4. DESCRIÇÃO DE HARDWARE DO PROJETO	55
4.1.1 DESCRIÇÃO DO HARWARE DE MONITORAMENTO DE TRANSFORMADORES	55
4.1.2 DESCRIÇÃO DO HARDWARE E MECANISMO DE ENSAIO DE RIGIDEZ DIELÉTRICA	58
5. ANÁLISE DE SOFTWARE E INTERFACE GRÁFICA COM LABVIEW 2018	62
5.1 COMUNICAÇÃO LABVIEW E MICROCONTROLADOR	63
5.2 INTERFACÉ INICIAL	65
5.3 INTERFACE DE CADASTRO DE ÓLEOS ISOLANTES	66
5.4 INTERFACE DE CADASTRO DE TRANSFORMADORES	68
5.5 INTERFACE DE ENSAIO DE RIGIDEZ DIELÉTRICA	69
5.6 INTERFACE DE ENSAIO DE TRANSFORMADORES	71

5.6.1 Estrutura Produtor Consumidor	72
5.7 INTERFACE DE GERAÇÃO DE RELATÓRIOS.....	73
6. RESULTADOS E DISCUSSÕES	74
6.1 MÁQUINA DE ENSAIO DE TRANSFORMADORES	74
6.1.1 Dificuldades na máquina de ensaio de transformadores	76
6.2 MÁQUINA DE ENSAIO DE RIGIDEZ DIELÉTRICA	76
6.3 CUSTO DO PROJETO.....	80
6 TRABALHOS FUTUROS	81
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	82
ANEXOS.....	85

1. INTRODUÇÃO

1.1. MOTIVAÇÃO

A maioria dos transformadores de alta tensão utilizados no Brasil utilizam o óleo mineral como isolante, óleo esse que causa sérios impactos ao meio ambiente quando descartado de maneira inadequada.

Como existem projetos coordenados pela professora Maria Del Pilar Hidalgo Falla, na universidade de Brasília campi FGA, que possui como objetivo principal substituir este óleo mineral isolante por óleos vegetais isolantes, com menor risco de contaminação ao meio ambiente, uma bancada de ensaio se torna crucial para testar a reação dos transformadores aos diferentes tipos de óleos isolantes. Portanto, para testar o desempenho destes outros óleos, se faz necessário a criação de uma bancada de testes capaz de verificar tensão, corrente e temperatura ao longo do tempo.

Outro fator importante a ser observado é a rigidez dielétrica do óleo isolante, tendo em vista que através desta medida, é possível tirar várias conclusões a respeito da qualidade do óleo isolante.

1.2 JUSTIFICATIVA

Tratando-se de transformadores de tensão, podemos dizer que estes são uns dos componentes mais valiosos de uma concessionária de energia elétrica, pois o mesmo possui um preço muito elevado e também um custo elevado de transporte e manutenção. Portanto, outra problemática no que diz respeito a transformadores de tensão é o uso de óleos minerais extremamente tóxicos ao ser humano que são usados para resfriamento e isolamento térmico dos transformadores. Sendo assim, estes óleos poderiam ser substituídos por outros óleos de origem vegetal ao invés de mineral, tornando a substância isolante menos tóxica e menos agressiva ao meio ambiente e ao ser humano, pelo seu caráter biodegradável.

Então, é dessa problemática que surge a ideia de um projeto que seja capaz de monitorar o comportamento dos transformadores, com uma bancada que consiga mensurar de maneira eletrônica os parâmetros de tensão e corrente nominal de um transformador quando são usados diferentes tipos de óleos vegetais e minerais, a fim de monitorar o funcionamento destes transformadores e a sua temperatura. Tudo isso

é possível graças ao avanço da microeletrônica e o surgimento dos sensores e dos microcontroladores, dispositivos estes capazes de mensurar valores de características físicas de outro dispositivo ou o ambiente. Este processo de aquisição de dados de sensores e tratamento de sinais é chamado de instrumentação eletrônica, ramo da eletrônica que trata da aquisição de dados e da análise de sinais.

1.3. PROBLEMA DA PESQUISA

Se tratando de desempenho de transformadores, os principais fatores a serem analisados são os **fatores de tensão nominal, corrente nominal e temperatura**, pois, com a mensuração adequada destas três variáveis somos capazes de tirar diversas conclusões no que diz respeito ao desempenho dos transformadores. (SCARDAZZI,2007.)

Quando um transformador tem a sua temperatura elevada demasiadamente, devido ao efeito Joule, isso pode causar sérios danos aos seus componentes e as suas espiras. Garantir um bom isolamento térmico e uma temperatura adequada é muito importante para prolongar a vida útil dos transformadores. (SCARDAZZI,2007.)

Já os fatores de tensão e corrente são essenciais para monitorar o funcionamento de um transformador, com estes dados somos capazes de tirar diversas conclusões como saber se o transformador está entregando a quantidade correta de energia e entre outros. Sabemos que é necessário todo um aparato de dispositivos e um conhecimento em instrumentação eletrônica para elaboração de uma bancada de testes que tem como objetivo coletar dados de diferentes fenômenos físicos para verificar e comparar o funcionamento de uma bancada de testes de baixo custo em termos de componentes, em detrimento com outros dispositivos capazes de realizar essa medição.

Pensando nisso, surge a proposta da criação de uma bancada para que seja possível avaliar os parâmetros de um transformador durante o seu funcionamento, pois desta forma é possível verificar o seu comportamento e detectar possíveis anomalias ou comportamentos inadequados. Utilizando uma leitura da rigidez dielétrica de um óleo isolante, também é possível aferir o tempo de vida útil restante de um óleo e realizar a substituição no tempo adequado, evitando danos ao transformador.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivos Gerais

O projeto tem como objetivo a criação de uma bancada eletrônica conectada a um computador com um software capaz de gerar gráficos de parâmetros em função do tempo para análise do comportamento dos transformadores, bem como emitir relatórios com esses dados. Outro objetivo é criar uma estrutura e sistema responsável por realizar ensaios de rigidez dielétrica em óleos isolantes de transformares, estimando este valor. Realizar testes comparando tensão e corrente com a rede conectada a alguma carga e testes com diferentes tipos de óleos isolante para tirar as conclusões do seu funcionamento e previsão.

1.4.2 Objetivos Específicos

Para que o sistema elaborado seja funcional e se aproxime de uma solução capaz de suprir as necessidades de mercado e as necessidades acadêmicas da UnB Campi FGA, este deve conter as seguintes estruturas:

- Hardware de controle e ensaio de transformadores;
- Hardware de controle de ensaio de rigidez dielétrica;
- Supervisório de controle com auxílio do software LabVIEW;
- Banco de dados para armazenar informações, gerar relatórios;
- Firmware do microcontrolador;

O sistema também deve ser capaz de realizar as seguintes ações listadas abaixo:

- Leitura de valores de tensão, corrente e temperatura;
- Estimar rigidez dielétrica;
- Apresentar valores através de um supervisório;
- Gerenciar, ler e escrever dados em um banco e dados;
- Gerar relatórios;

1.5 ABORDAGEM METODOLÓGICA

Para monitorar o funcionamento dos transformadores se faz necessário uma bancada com diversos sensores integrados a um microcontrolador para fazer a aquisição de dados e enviar via comunicação serial para um computador onde será feita a geração de gráficos. Com estes gráficos será possível fazer uma análise temporal do comportamento do transformador e dos diferentes tipos de óleos isolantes para dizer qual está em melhores condições de uso. A pesquisa possui caráter exploratório, pois se trata de uma inovação e um projeto experimental, onde será desenvolvido uma bancada, foram utilizadas fontes primárias e secundárias para elaboração de todo TCC.

1.6 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

Este trabalho de conclusão de curso está estruturado em sete capítulos, sendo que este capítulo apresenta caráter introdutório. O capítulo dois discute a fundamentação teórica, em que foi realizado o estudo detalhado das seguintes etapas: Transformadores, transformadores imersos em óleo, tempo de vida útil do transformador, circuitos optoacopladores, LabVIEW, bancos de dados, redes de Petri e microcontroladores.

No capítulo três são descritos os procedimentos de instrumentação eletrônica e aquisição de dados. O capítulo quatro contém a descrição do hardware do projeto desenvolvido. O capítulo cinco discute a respeito da interface criada com o software LabVIEW, o capítulo seis contém os resultados dos testes em bancada e discussões a respeito dos relatórios gerados. O último capítulo consiste em recomendações para trabalhos futuros.

Por fim, em anexos estarão os programas utilizados como base para os testes de execução do protótipo.

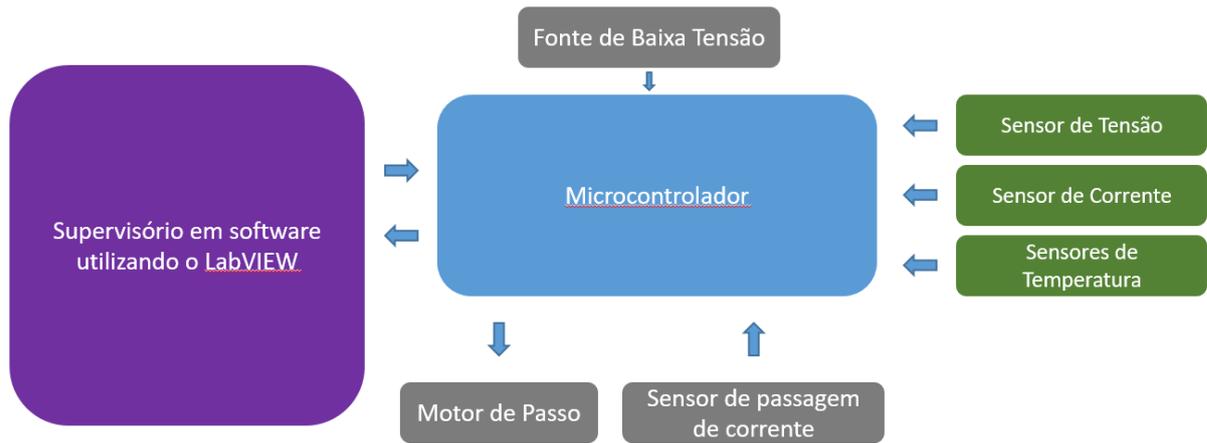


Figura 1 – Diagrama de estrutura básica planejada da bancada

Fonte: Autor, 2019.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 TRANSFORMADORES

Um transformador é constituído por duas ou mais bobinas e um circuito magnético capaz de acoplar essas bobinas, onde temos um circuito magneticamente fechado. (USP,2014.)

Na figura 2 o enrolamento conectado a fonte de tensão senoidal é chamado de enrolamento primário. Enquanto que o enrolamento conectado na carga é chamado de enrolamento secundário. A energia é transferida de um enrolamento para o outro através de um fluxo eletromagnético. (USP,2014.)

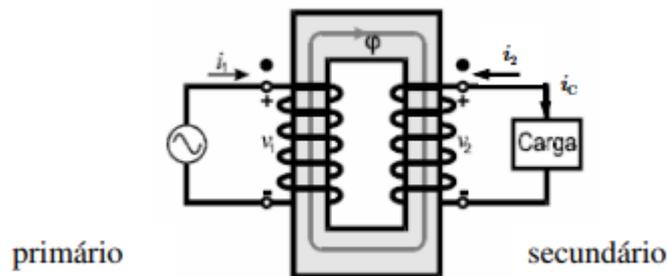


Figura 2 - Representação de Transformador de Tensão

Fonte: Escola politecnica da USP, 2014.

Em geral, o núcleo é construído a partir de um material com propriedade ferromagnética, para que assim o fluxo, para reproduzir um caminho de baixa relutância magnética para o fluxo criado, de maneira geral o núcleo dos transformadores é de aço laminado para evitar a indução de correntes pelo próprio núcleo do transformador. (USP,2014.) (SEN,2001.)

Para que um transformador seja considerado um transformador Ideal, o acoplamento de suas bobinas deve ser ideal, ou seja, todas compartilham o mesmo fluxo magnético, desta forma não é dispersão de fluxo. Sendo assim, a permeabilidade magnética do seu núcleo é infinita e o circuito magnético está fechado e que não há perdas de qualquer natureza. (SEM,2001.)

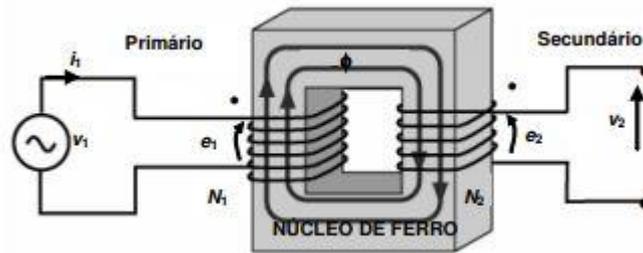


Figura 3 - Representação Esquemática de um transformador ideal.

Fonte: Escola politecnica da USP, 2014.

Considerando um transformador ideal, ou seja, o fluxo magnético (Φ) em ambas as bobinas é igual e são desprezados os efeitos de perdas do material e do núcleo, as forças eletromotrizes e_1 e e_2 induzidas nas bobinas podem ser escritas por:

$$v_1 = e_1 = N_1 \frac{d\Phi}{dt} \quad (1)$$

E,

$$v_2 = e_2 = N_2 \frac{d\Phi}{dt} \quad (2)$$

Efetuada a divisão de v_1 por v_2 temos que:

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{N_1}{N_2} = a \quad (3)$$

Onde N_1 e N_2 representam os números de espiras do transformador 1 e 2 respectivamente.

Sendo a chamada de relação de transformação, propriedade do transformador de refletir tensões de um lado para o outro de acordo com a constante a .

Existem diversos tipos de transformadores, entre os mais comuns estão:

Transformadores de corrente: Esse transformador tem finalidade de medir a corrente que circula em uma barra de alimentação e alterar o valor da sua corrente, geralmente em um valor menor, podendo ser transmitida a um equipamento de medição como um circuito eletrônico. Sua maior utilização é na redução de corrente para que seja possível mensurar a tensão ou corrente.

Transformadores de distribuição: Esse tipo de transformador é usado pelas concessionárias para distribuir altas quantidades de energia elétrica através da rede, sendo valores de tensão diferentes do valor de entrada, cada um adequado ao diferente tipo de consumidor.

Transformadores de força: São utilizados para geração de energia em usinas hidrelétricas, também possuem aplicações específicas que são aplicadas em subestações, como criação de fornos de indução e a arco.

Transformadores de potencial: Ao contrário do que o nome sugere, o transformador de potência altera os valores de tensão na bobina primária, desta forma a espira primária que é excitada pela tensão primária, conduz uma corrente proporcional a tensão primária. Desta forma é criado um fluxo de magnético no núcleo.

2.2 EFEITOS DE PERDA NOS TRANSFORMADORES

Considerando um transformador real, sempre há efeitos de perdas associado ao transformador, pois no mundo real os parâmetros apenas se aproximam do que seria ideal, em geral, existem dois tipos de perdas, sendo elas perdas associadas ao núcleo e perdas associadas aos enrolamentos do transformador, a figura 4 ilustra um modelo de transformador real. (USP,2014.)

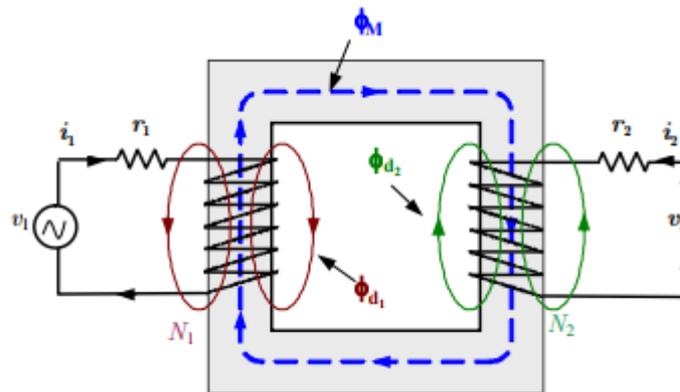


Figura 4 - Esquemática de um transformador Real.

Fonte: Escola politecnica da USP, 2014.

2.2.1 Perdas associadas ao núcleo

O fluxo magnético presente no núcleo do transformador origina em suma dois tipos de perdas, sendo elas as perdas por histerese magnética e perdas Focault.

As perdas por histerese magnéticas estão associadas ao rearranjo dos domínios magnéticos do núcleo a cada semi-ciclo de operação, sendo que essas perdas dependem da frequência e da tensão aplicada ao transformador.

Já as perdas de Focault são originadas por correntes parasitas presentes no material ferromagnético do núcleo, da frequência de variação deste fluxo, das características físicas do material do núcleo e do valor máximo de indução magnética, B_{max} , do núcleo. É importante ressaltar que essas perdas não dependem da carga a qual o transformador está submetido, fazendo com que essas sejam praticamente constantes. (VEKEN, 2001)

De maneira geral as perdas nos transformadores podem ser na equação 4.

$$p_{fe} = \frac{E_i^2}{r_p} \quad (4)$$

Onde p_{fe} são as perdas no núcleo e r_p é a resistência equivalente das perdas no núcleo.

2.2.2 Perdas associadas aos enrolamentos

Quando se trata de enrolamentos do transformador, temos em suma dois tipos de perdas, sendo elas as perdas por efeito Joule que ocorrem através do aquecimento dos enrolamentos primários e secundário, já que os mesmos não possuem resistência nula e a dispersão do fluxo. (USP,2014.)

Como nos transformadores reais a relutância do núcleo é positiva e se fecha pelo ar no primário e secundário, dessa forma o fluxo de dispersão não induz tensão no enrolamento secundário, mas causa uma queda de tensão reativa no primário e quanto maior é o aquecimento dos fios, maior é a resistência destes a passagem de corrente, causando um aquecimento cada vez maior. (SEN,2001.)(VEKEN,2001.)

2.3 TEMPO DE VIDA ÚTIL DO TRANSFORMADOR

De uma maneira geral um transformador de potência, principalmente os de grande porte utilizados em estações de distribuição de energia elétrica possuem um custo muito elevado e são construídos para terem uma expectativa de vida de aproximadamente 30 anos, também chamado de tempo de depreciação e que é uma estimativa de tempo para o colapso dos isolantes imersos em óleo. (MAMEDE FILHO,2001).

De acordo com Scardazzi (2007), a expectativa de vida média dos transformadores no Brasil é de 29 anos, enquanto que os transformadores dos EUA possuem expectativa de vida média de 39 anos, mas como se pode inferir, a expectativa de vida de um transformador é um índice de qualidade e de confiabilidade do transformador e não um valor que limita a vida do mesmo, desta forma, um transformador pode ultrapassar a sua expectativa de vida e continuar operando normalmente ou vir a colapso antes dessa idade. Portanto, para que um transformador tenha um bom desempenho são necessários diversos cuidados em relação ao equipamento, cuidados que vão desde a fabricação, na escolha correta dos materiais para uma excelente qualidade, seu dimensionamento adequando para a sua aplicação, o ambiente de instalação e é claro um bom projeto do seu sistema elétrico de proteção, refrigeração e a manutenção constante e de qualidade.

2.4 TRANSFORMADORES IMERSOS EM ÓLEO

De acordo com a Norma ABNT NBR-5458/86, “Transformadores de Potência – Terminologia”, transformador de potência em líquido isolante é todo equipamento estático que, por indução eletromagnética, transforma tensão e corrente alternadas entre dois enrolamentos, sem alteração de frequência, transformando energia elétrica entre partes de um sistema de potência. Sua parte ativa é imersa em líquido isolante, que deve ser o óleo mineral isolante, cujas características e aplicações são estabelecidas pelo Conselho Nacional de Petróleo – CNP.

Os transformadores imersos em óleo possuem em suma um sistema isolante composto por uma parte sólida chamada de papel isolante e uma parte líquida que é o óleo propriamente dito, esta combinação tem como objetivo garantir a rigidez dielétrica e mecânica das bobinas. Sendo estes os mais comuns em sistemas de distribuição de energia elétrica.

Os três tipos de isolantes mais comuns são o óleo mineral, o silicone e o Ascarel que é proibido em todo território nacional desde 2006 de acordo com a Lei 12.288, de fevereiro de 2006. De acordo com a norma da ABNT NBR 15422 os óleos isolantes dos transformadores podem ser de tipo A que são os de base parafínica, tipo B que são a base de base naftênica ou vegetais de acordo com as normas da ANP, sendo que no caso de transformadores autoprotégidos o óleo deve ser obrigatoriamente mineral de aparência clara, límpida e isento de PCBs.

Em suma os transformadores imersos em óleo são compostos por 3 componentes básicos e outros acessórios, sendo estes componentes o óleo isolante, o tanque principal e o transformador, uma ilustração de um destes transformadores pode ser observada na figura 5.

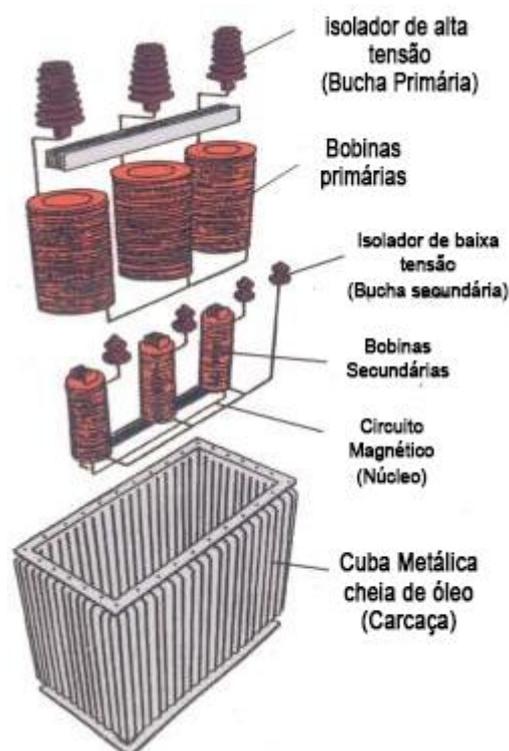


Figura 5 - Representação de um transformador que utiliza óleo isolante.

Fonte: Felipe Rautter (Adaptado), 2011.

Em geral os transformadores de alta tensão são imersos em óleos isolantes para que seja inserido um meio isolante entre as partes energizadas do transformador, bem como a transferência de calor para o meio externo.

Os tanques geralmente são construídos com chapas de metal, já que estes precisam dar sustentação ao transformador e possuem paletas para proporcionar uma melhor área de contato com o meio externo e conseqüentemente uma melhor transferência de calor e uma movimentação do óleo dentro do transformador, onde o fluido frio desce e o fluido quente sobe. (RAUTTER,2011.)

2.4.1 Função dos óleos isolantes

Os enrolamentos do transformador são separados com uso de um isolante sólido como papel ou vernizes, como o material que compõe as espiras possui uma resistência elétrica associada, a passagem de corrente pelos fios causa aquecimento do mesmo. O calor gerado pelo efeito Joule irá causar a degradação térmica do material. (RAUTTER,2011.)

Sendo assim, a principal função dos óleos isolantes é auxiliar o resfriamento do material condutor. Por este motivo, quanto melhor for a qualidade do óleo utilizado, maior será a vida útil do transformador e mais barato e econômico deverá ser o sistema, pois será possível inserir uma distância menor entre as espiras, bobinas, núcleo e partes aterradas. (SEN,2001.)

Logo, podemos dizer que os óleos isolantes possuem duas funções básicas:

- Refrigerar o transformador
- Isolamento elétrico do transformador

Os óleos isolantes devem possuir certas propriedades tais como:

Boa condutibilidade Térmica, para que as trocas de calor com o meio externo sejam mais fáceis, vale ressaltar que isolamento térmico e isolamento elétrico são exigências opostas, afinal materiais isolantes térmicos são também isolantes elétricos. (SEN,2001.) (DANKIN,1947.)

A norma ABNT NBR 15422 trata da “Especificação de óleo vegetal isolante novo”. Os óleos vegetais isolantes novos devem ser ensaiados seguindo a norma ABNT NBR 15422, e devem apresentar características com valores limites especificados na Tabela 1.

Tabela 1 – Valores limites para parâmetros de transformadores.

Fonte: ABNT NBR 15422, 2006.

Características	Unidade	Método de ensaio	Valor especificado
Aspecto visual	-	-	O óleo deve ser claro, límpido e isento de materiais em suspensão
Cor	-	ABNT NBR 14483	1,0 máximo
Densidade relativa a 20/4 °C	-	ABNT NBR 7148	0,96 máximo
Viscosidade cinemática 20 °C 40 °C 100 °C	cSt	ABNT NBR 10441	150 máximo 50 máximo 15 máximo
Ponto de fulgor	°C	ABNT NBR 11341	275 mínimo
Ponto de combustão	°C	ABNT NBR 11341	300 mínimo
Ponto de fluidez	°C	ABNT NBR 11349	- 10 máximo
Rigidez dielétrica Eletrodo de disco Eletrodo de calota	kV	ABNT NBR 6869 ABNT NBR IEC 60156	30 mínimo 42 mínimo
Rigidez dielétrica a impulso	kV	ASTM D 3300	130 mínimo
Fator de perdas dielétricas 25 °C 90 °C 100 °C	%	ABNT NBR 12133	0,20 máximo 3,6 máximo 4,0 máximo
Enxofre corrosivo	-	ABNT NBR 10505	Não corrosivo
Índice de neutralização	mg KOH/g	ABNT NBR 14248	0,06 máximo
Teor de água	mg/kg	ABNT NBR 10710 - Método B	200
Teor de PCB (bifenila policlorada)	mg/kg	ABNT NBR 13882 - Método B	Não detectável

Sendo assim as características principais que um bom óleo isolante obrigatoriamente devem possuir são:

Ponto de fluidez: O ponto de fluidez do óleo vegetal isolante é importante como índice da temperatura mais baixa na qual o material pode ser esfriado sem limitar seriamente seu grau de circulação no equipamento. Alguns fluidos são muito sensíveis ao longo tempo de armazenamento em temperaturas baixas e por isso seus pontos de fluidez podem não indicar adequadamente suas propriedades de escoamento em temperaturas mais baixas.

Fator de perdas dielétricas: Se o fator de perdas dielétricas está em um nível muito baixo, isso quer dizer que o nível de contaminantes também está baixo. Os óleos vegetais isolantes, na grande maioria das vezes, têm fatores de perdas

dielétricas mais altos do que os óleos minerais isolantes, fator que é agravado em temperaturas mais altas.

Teor de água: preciso que o óleo mineral isolante possua um baixo teor de água, assim este mesmo óleo vai apresentar níveis adequados de rigidez dielétrica e baixa perda dielétrica, desta forma ela poderá ter sua vida útil prolongada o que também acarretará em uma menor corrosão metálica. A resistência dos óleos vegetais isolantes é aproximadamente 20 vezes maior que a dos óleos minerais isolantes.

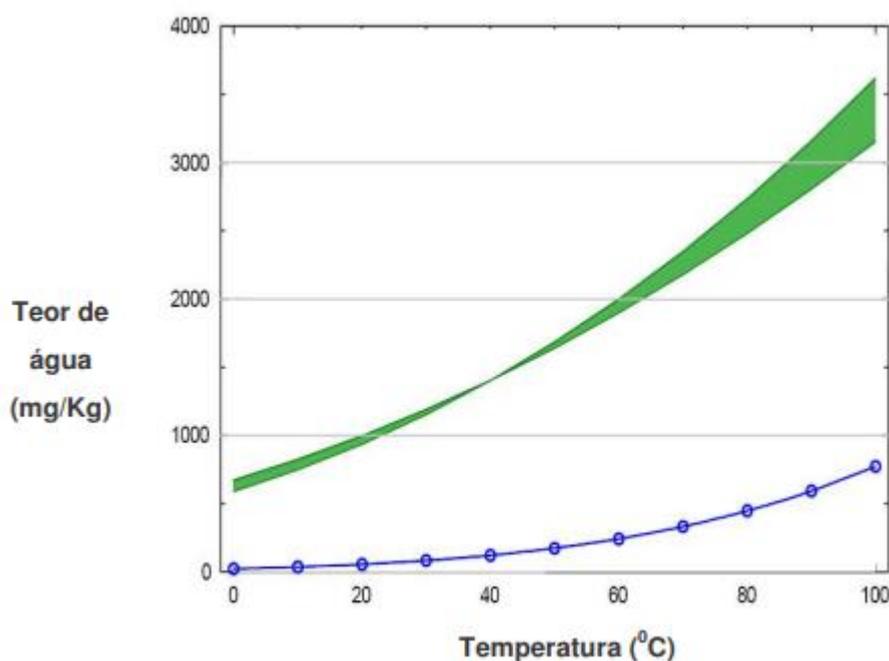


Figura 6 - Curvas de saturação comparativa dos fluidos de ésteres naturais e óleo mineral.

Fonte: adaptado de IEEE, 2004.

Índice de neutralização: Quando o teor de acidez total do óleo vegetal isolante é baixo, a condução elétrica bem como a corrosão metálica também é menor, e isso aumenta consideravelmente a vida útil de todo o sistema de isolamento.

Índice de neutralização: Quando o teor de acidez total do óleo vegetal isolante é baixo, a condução elétrica bem como a corrosão metálica também é menor, e isso aumenta consideravelmente a vida útil de todo o sistema de isolamento.

Baixa viscosidade, para que o óleo possa circular com maior facilidade pelo transformador.

Boa estabilidade térmica, como o óleo estará submetido a altas temperaturas, este não pode ser sensíveis a ação da temperatura.

Baixa reatividade química, como o óleo estará em contato com diferentes tipos de material presentes no transformador, estes materiais não podem sofrer ataque químico por parte dos óleos isolantes.

Resistência ao fogo, em casos onde transformadores são instalados em locais onde há risco de explosões e incêndios, estes óleos também devem ser resistentes ao fogo para preservar o transformador em caso de exposição ao fogo.

2.4.2 Temperatura ambiente

Se tratando de transformadores imersos em óleo, é importante levar em consideração a temperatura ambiente do meio em que o transformador está inserido, já que essa temperatura será somada com a temperatura ambiente para obtermos a elevação de temperatura a qual o transformador está submetido.

As normas técnicas da IEEE/ANSI dizem que para calcular o carregamento máximo admissível em um transformador, seja realizada a leitura da temperatura ambiente no período em que se deseja utilizar o transformador e no ambiente em que ele será inserido para calcular capacidade de carga do transformador. A Norma IEEE C57.91-1995, diz respeito ao efeito da temperatura ambiente, e fornece uma tabela na qual é mostrado o aumento ou diminuição percentual da carga, de acordo com o aumento ou a diminuição da temperatura ambiente, conforme a tabela 1:

Portanto, isto nos leva a crer que a análise da temperatura ambiente no que diz respeito a análise de transformadores é um fator que não pode ser menosprezado, pois necessitamos deste dado para calcular o carregamento admissível dos transformadores. Sendo assim, no que diz respeito a coleta de dados, quanto mais preciso for a coleta do valor da temperatura ambiente melhor será a avaliação do desempenho do transformador.

2.4.3 Definições de Viscosidade em líquidos

A viscosidade é caracterizada por sendo uma propriedade física que mede a resistência do fluido ao escoamento, quando submetido a uma força, o que implica no transporte microscópico de quantidade de movimento por um fenômeno de difusão

molecular. Isso implica que quanto mais elevado é o valor da viscosidade menor será a velocidade de movimento do fluido durante um escoamento. (2008,Brock.)

A viscosidade de um líquido deriva do seu atrito interno, que é originado das forças de atração entre as moléculas quando estão próximas uma das outras, por isso quando a temperatura de um fluido aumenta, a viscosidade diminui, isso acontece porque a agitação de partículas é maior e a distância entre as moléculas também, diminuindo a força de atrito. Assim as forças intermoleculares vão se tornando cada vez mais fracas e a viscosidade diminui quando a temperatura aumenta. (2008,Brock.)

2.4.4 Teoria de Arrhenius em transformadores

O envelhecimento do isolamento do transformador é um fenômeno químico que causa o efeito progressivo da oxidação, perda da resistência mecânica e a diminuição da rigidez dielétrica do material.

Os primeiros estudos a respeito do tempo de vida útil dos transformadores se teve início na década de 30 quando Montsinger colocou pequenas amostras de um dado material usado no isolamento das bobinas dos transformadores, dentro de vários tubos imersos em óleo. (DANKIN,1947) após elevar a temperatura destes tubos, ele então mediu a resistência mecânica do isolamento.

Com base nestes testes, ele observou que a vida desse material foi reduzida pela metade para cada 5 a 10 °C de aumento na temperatura do isolamento. Esse valor que provoca o envelhecimento dobrado, no entanto, não é uma constante, sendo em torno de 6 °C na faixa de temperatura de 100 a 110 °C e 8 °C para temperaturas acima de 120 °C.

Com base nestes testes ele definiu, como ponto do “fim de vida” do isolamento do transformador, o ponto onde se observa que a resistência mecânica do material isolante atinge metade de seu valor inicial. Vale ressaltar que a tendência é de se utilizar o chamado fator de duplicação de envelhecimento como uma constante, e o atual guia de carregamento do IEC considera-o como sendo 6 °C. (IEEE C57.91-1995)

Porém, de acordo com relatos presentes na norma IEEE C57.91-1995, mostra que o fim da vida útil do transformador não é determinado através da metade da redução na resistência mecânica do seu isolamento, foram testados alguns

transformadores com resistência mecânica inferior a 1/5 do seu valor inicial e funcionando de maneira satisfatória. (IEEE C57.91-1995)

EM 1948 Dankin demonstrou uma propriedade importante no que diz respeito ao envelhecimento material de isolamento, demonstrando que o envelhecimento da celulose acontece devido a uma reação química. Desta forma, é possível, a taxa de alteração na propriedade a ser mensurada poderia ser expressa na forma de uma taxa de reação constante, K_0 (DANKIN, 1948). Essa definição pode ser implementada através do produto da constante em função da temperatura, pelo intervalo de tempo em que o envelhecimento ocorre, desta forma podemos encontrar a porcentagem de mudança na propriedade. A constante pode ser expressa por:

$$K_0 = A' \cdot e^{\left(\frac{B}{\theta+273}\right)} \quad (5)$$

Onde A' e B são constantes obtidas de maneira empírica e θ é a temperatura em graus Celsius.

Dakin demonstrou que todos os dados a respeito do envelhecimento foram comparados em um comitê do AIE (*American Institute of Electrical Engineering*), que mostraram uma boa aproximação da expressão 5. Para aplicar essa relação para definir a vida útil do transformador, existem dois aspectos que devem ser levados em consideração: (i) a taxa de envelhecimento do transformador e (ii) o critério de final de vida útil. Para tal é separado tratando a vida útil do transformador por unidade (p.u) sendo que 1 p.u equivalente a uma duração total de 180.000 horas, com o transformador trabalhando a temperatura de 110°C, conforme a equação 6:

$$Vida_{pu} = A \cdot e^{\left(\frac{B}{\theta+273}\right)} \quad (6)$$

Onde A é uma constante, derivada da escolha de temperatura equivalente a 110 °C como a temperatura estabelecida para um período de 180.000 horas de vida útil, B é uma constante empírica e θ é a temperatura em graus Celsius.

2.4.5 Temperatura no transformador

O envelhecimento do transformador é um fato que ocorre de maneira constante em qualquer temperatura. Como não existe uma temperatura limite onde acima dela o envelhecimento seja muito rápido, existe uma dificuldade na fixação de padrões de temperatura para a especificação e operação de transformadores. Por este motivo os padrões são fundamentados na experiência em serviço. (NBR 5356,1993.)

As perdas no transformador, advindas dos enrolamentos de cobre por efeito Joule e do núcleo por perdas magnéticas, causam elevação da temperatura dos seus componentes. Estes efeitos podem alterar as características dos materiais a qual são constituídos, como os isolantes, estragando o desempenho e a segurança do equipamento. De acordo com a norma NBR 5356 (NBR 5356,1993.), os transformadores são separados de acordo com suas propriedades térmicas de operação sendo elas:

- Classe 55°C: são aqueles transformadores no qual a elevação de temperatura média dos enrolamentos, não superar 55 °C e a elevação de temperatura em seu ponto mais quente dos enrolamentos, acima da temperatura ambiente não supera 65 °C.
- Classe 65°C: são aqueles transformadores no qual a elevação de temperatura média dos enrolamentos, não superar 65 °C e a elevação de temperatura em seu ponto mais quente dos enrolamentos, acima da temperatura ambiente não supera 80°C.

As principais características do isolamento devem ser consideradas, em conjunto, para se determinar o efeito de temperaturas mais altas que o normal aplicada em um isolamento de um transformador sendo eles: a rigidez dielétrica e a resistência mecânica. (NBR 5356,1993.)

A rigidez dielétrica do isolamento, com o passar do tempo imerso em óleo, mantém um valor alto até alcançar um determinado ponto, a partir deste ponto ocorre a sua falha de maneira muito rápida. Caso uma avaliação do isolamento seja realizada neste ponto, irá observar-se uma resistência mecânica praticamente nula. Pois o material fica muito frágil e carbonizado. Sendo assim, a rigidez dielétrica não pode ser usada

como o único parâmetro para avaliar o efeito da temperatura sobre o material isolante que está imerso em óleo. (NBR 5356,1993.)

Para escolher um valor de temperatura máximo e seguro para operação de um transformador mais trivial se o isolamento do equipamento possuir um valor de agitação térmica acima do qual ocorresse a deterioração rápida e, em um valor abaixo desse, nenhuma deterioração ocorresse. Porém como a deterioração ocorre em todas as temperaturas, e o valor dessa deterioração é dado em função do tempo, se torna inviável fixar um valor de temperatura acima do qual os transformadores não podem operar. Sendo assim, o transformador pode ser carregado além dos seus limites, desde que esse carregamento seja feito de forma controlada. (NBR 5356,1993.)

A partir desse princípio, é que foram especificadas na NBR-2416 três formas de se carregar um transformador além de sua potência nominal:

Carregamento em condição normal de operação: é o carregamento onde o transformador é submetido, sem que as temperaturas do topo do óleo e do ponto mais quente do enrolamento sejam excedidas além dos limites normais, mesmo que em algumas partes do ciclo de carga a potência nominal seja ultrapassada.

- Carregamento em condição de emergência de longa duração: é o carregamento que permite que os limites de temperatura do carregamento em condição normal de operação sejam ultrapassados até um certo limite.
- Carregamento em condição de emergência de curta duração: é o carregamento que envolve condições de risco e cujo tempo deve ser sempre menor que a constante térmica do transformador e nunca maior que 30 min.

Tabela 2 - Temperaturas limite por classe do transformador.

Fonte: NBR 5356.

Tipo de carregamento	Temperatura °C			
	Classe 55 °C		Classe 65 °C	
	Óleo	Ponto mais quente	Óleo	Ponto mais quente
Normal	95	105	105	120
Emergência de longa duração	105	120	110	130
Emergência de curta duração	105	130	110	140

A distribuição de temperatura do transformador não ocorre de maneira uniforme, consideram-se os efeitos do envelhecimento para o ponto mais quente do enrolamento. Mesmo utilizando diversas ferramentas computacionais para identificar o ponto mais quente, ainda existe o risco do ponto em questão não sei o mais adequado, afinal cada transformador possui diferentes características de projeto e construção. (SEN,2001.) (VEKEN,2001.)

2.4.6 Estudo de normas em carregamento de transformadores

Aqui abordaremos as metodologias propostas por algumas normas que falam sobre o carregamento de transformadores. Serão também mostrados os valores limites de temperatura para cada situação específica de carregamento, podendo assim mostrar as semelhanças e diferenças entre cada uma dessas normas.

2.4.6.1 NBR 5416

A NBR-5616 é aplicada em transformadores de potência que se encontram imersos em líquido isolante, com diferentes classes de temperatura, sendo elas de 55°C e 65 °C respectivamente. Essa norma trabalha com um cálculo que se baseia no envelhecimento do isolamento, baseando-se na expectativa de vida do transformador, já que este se encontra sob efeito da temperatura de isolamento o tempo todo. O isolamento se deteriora conforme o tempo passa, podendo assim fazer uma relação entre a deterioração do isolamento em função do tempo, fundamentando-

se na teoria de Arrhenius, onde o logaritmo da vida do isolamento é uma função inversa da temperatura absoluta, sendo como na equação 7:

$$\log_{10}[\text{vida}(\text{horas})] = A + \frac{B}{T} \quad (7)$$

Onde:

A e B são constantes obtidas da curva de expectativa de vida;

T é a temperatura absoluta em Kelvin ($\theta_e + 273$ °C);

Desenvolvendo a expressão 2.3, é possível calcular a perda de vida útil ao longo de um determinado período de tempo Δt em horas, sendo que a temperatura do ponto mais quente do enrolamento (θ_e), permanece constante:

$$PV\% = 10^{\left(\frac{B}{273+\theta_e}+A\right)} \cdot 100\Delta t \quad (8)$$

Onde:

$PV\%$ é a perda de vida;

A é igual a -14,133 e -13,391 para transformadores de classe de temperatura de 55 °C e 65 °C;

B é igual a 6972,15.

Calculando o valor, encontra-se a taxa de envelhecimento a qual o transformador está submetido em um determinado intervalo de tempo em horas. Apesar da temperatura limite do ponto mais quente do enrolamento ser 105 °C e 120 °C, para transformadores de classe 55 °C e 65°C, se for aplicada neste transformador uma carga contínua onde a temperatura do ponto mais quente ultrapassa os 95°C, nos transformadores de 55 °C e 105°C, causam um desgaste acelerado do isolamento.

Tabela 3 - Classes de temperatura dos óleos de classes 55°C e 65°C.

Fonte: NBR 5416.

Classe de Temperatura	55 °C	65 °C
Máxima temperatura do topo do óleo	95 °C	105 °C
Máxima temperatura do ponto mais quente do enrolamento	105 °C	120 °C

Usando a expressão 8 é possível calcular a estimativa de vida de um transformador, utilizando a temperatura do ponto mais quente de um transformador. Se um transformador de classe 55 °C, opera a uma temperatura de 95°C durante 1 hora, este teria uma perda percentual de $1,54 \times 10^{-3}\%$. Logo, este mesmo transformador perderia toda a sua vida útil em aproximadamente 65.000 horas, equivalente a 7 anos e 5 meses de uso. A figura 5 mostra o gráfico da relação entre a expectativa de vida dos transformadores em função da temperatura do ponto mais quente.

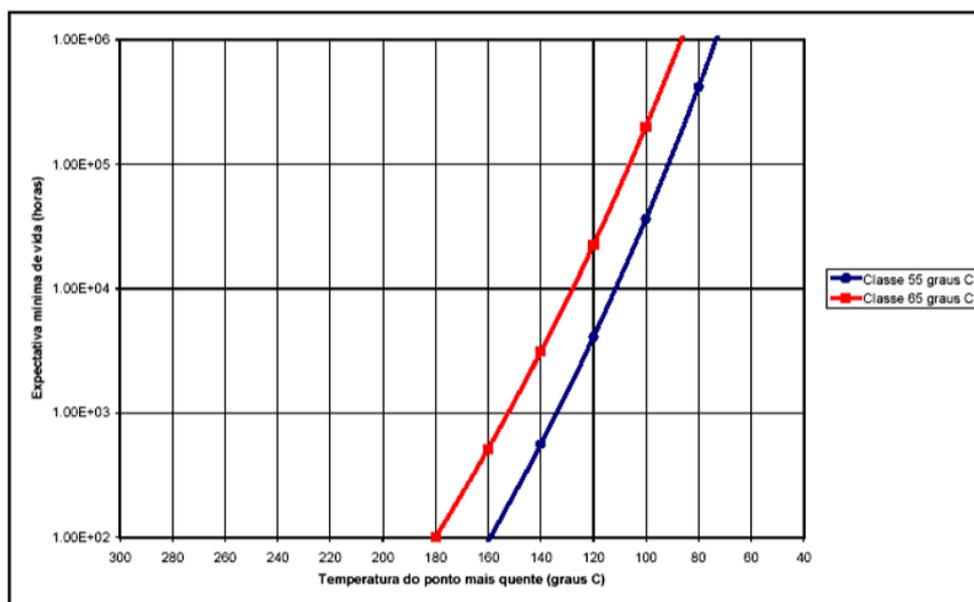


Figura 7 - Curva de expectativa de vida dos transformadores

Fonte: NBR 5416

É importante ressaltar que essa expectativa de vida calculada pela lei de Arrhenius, admite que o óleo isolante apresenta as características de um óleo isolante em boas condições de uso. Conforme os valores de teor de água e índice de

neutralização do óleo se afastam dos valores estipulados como limite, aumenta-se o desvio em relação à lei de Arrhenius, uma vez que o envelhecimento do isolamento do transformador sofre a influência dos agentes contaminantes presentes na sua composição. A tabela 4 mostra os valores limite de cada um desses agentes.

Tabela 4 - Curva de expectativa de vida dos transformadores

Fonte: NBR 5416

Ensaio	Limites
Umidade no papel (% por massa)	< 1
Índice de neutralização (mg KOH/g)	< 0,1
Teor de O ₂ (ppm)	< 3.000

Se os limites não forem respeitados, a perda de vida útil calculada através da lei de Arrhenius sofrerá um desvio muito grande do estado real da vida útil do isolamento, servindo apenas para uma análise relativa da influência de um carregamento, afinal o grau de envelhecimento não será fiel a idade cronológica do transformador.

De acordo com a NBR 5416, existem dois procedimentos para analisar a aplicação de carga em transformadores, a escolha depende do nível de controle disponível para o operador e também depende das condições operacionais. Sendo estes

- Procedimento 1: Não permite o carregamento acima do valor nominal do equipamento em regime de emergência de longa ou curta duração. Este procedimento é usado por usuários que não possuem controle das condições operacionais. É aplicado com dois ou mais enrolamentos e com potências nominais trifásicas de no máximo 100 MVA.
- Procedimento 2: Permite o carregamento do equipamento em regime de emergência de longa e curta duração, os limites de temperatura ultrapassam os valores permitidos no procedimento 1. Só pode ser utilizado caso o operador possua o controle das condições operacionais, otimizando o carregamento dos transformadores. Aplica-se a

transformadores com dois ou mais enrolamentos e sem limitação de potência.

2.4.6.2 IEEE Std C57.91-1995

A IEEE Std C57.91-1995 “Guia IEEE para carregamento de transformadores imersos em óleo” é aplicada a transformadores de potência e transformadores de distribuição com classe de temperatura de 65 °C. No guia IEEE Std C57.91-1995 é sugerido o critério de 25% de resistência mecânica remanescente, proporcionando a liberdade do operador escolher o caso que mais se adequar a sua realidade.

Sobre o envelhecimento do isolamento, no guia IEEE Std C57.91-1995, cita que a relação entre a deterioração do isolamento com o tempo e a temperatura segue uma variação da teoria de Arrhenius, conforme a seguinte equação:

$$Vida_{pu} = A \cdot e^{\left(\frac{B}{273+\theta_H}\right)} \quad (9)$$

Onde:

θ_H é a temperatura do ponto mais quente do enrolamento em °C;

A e B são constantes;

pu significa por unidade;

Usando esta equação é possível traçar uma curva (Figura 8), que faz a relação da vida útil do isolamento do transformador e pu com a temperatura do ponto mais quente do enrolamento, sendo que, a temperatura estabelecida para 1 pu de vida é igual a 110 °C.

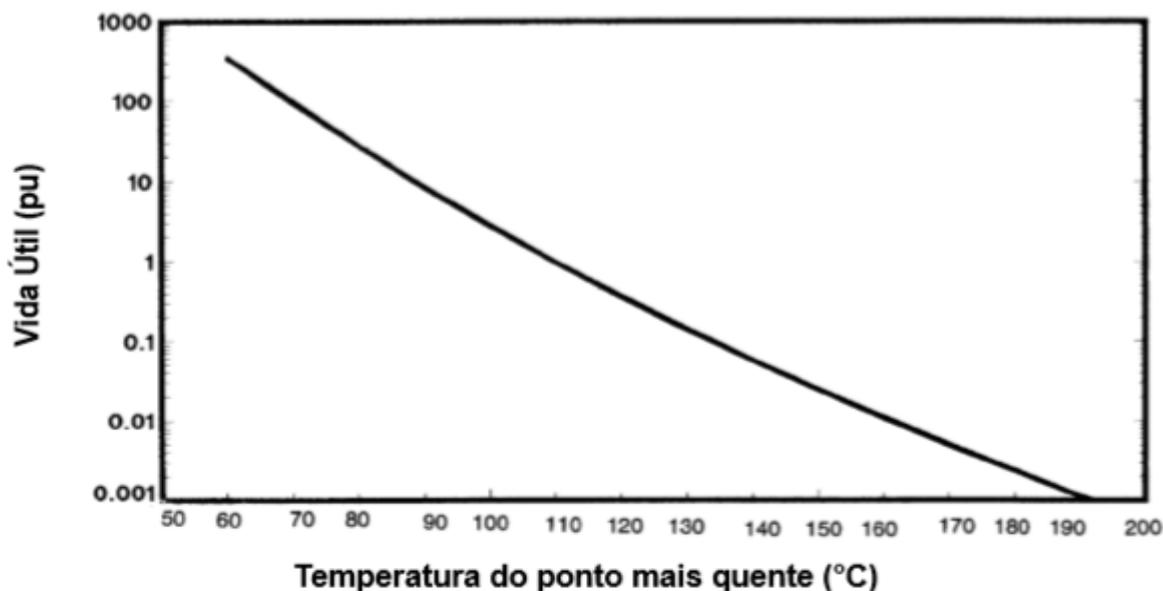


Figura 8 - Vida Útil do Isolamento do Transformador.

Fonte: NBR 5416.

2.4.7 Sobretensão

A sobretensão é um fenômeno que pode causar muita preocupação, afinal seus efeitos podem danificar permanentemente os enrolamentos e até o mesmo o núcleo do seu transformador. Esse dano pode ocorrer quando o transformador opera em uma região de saturação a curva de magnetização, o que pode provocar um aumento significativo na corrente de excitação, mesmo com variações muito pequenas de tensão. Se isso ocorrer, os enlaces de fluxo deixam de ficar confinados no núcleo, assim esses podem se fechar pelo material isolante ou pelo tanque do transformador, causando um a condição chamada de saturação do material magnético. Sendo assim, é válido ressaltar que, ao ultrapassar os valores pré-estabelecidos pelas normas e pelo fabricante para condições de sobretensão, seja elaborado um estudo detalhado para evitar prejuízos que possam ocorrer. (IEC 600354,1991)(IEEE,2000)

2.4.7.1 Consequências da sobretensão

Existem situações em um sistema de distribuição onde a aplicação de sobretensões no enrolamento primário torna-se uma exigência para que o sistema mantenha níveis de tensão adequados nas extremidades dos alimentadores de média

tensão. Porém essa tensão aplicada tem as suas consequências para vida útil de funcionamento do transformador, que devem ser avaliadas com cuidado. Pois essas podem causar diversas consequências como as citadas a seguir. (EBERT,2000.)

Impedância Percentual: A impedância percentual de um transformador é um parâmetro que sofre alteração quando existe uma sobretensão ou uma sub-tensão aplicada no transformado, diferentemente da impedância ôhmica que é constante e independe da excitação do transformador. Se uma sobre-exitação de 10%, mantendo inalterada e constante a potência aparente do transformador, a corrente cai para 90% do seu valor nominal. Desta forma, a queda de tensão é reduzida em 10%. Tomando-se essa queda e dividindo pelo valor da tensão, é possível encontrar a nova impedância percentual. Ou seja, haverá uma queda de tensão no transformador, ficando 0,82 vezes o valor da impedância percentual quando o transformador está com 100% do seu nível de tensão, para um mesmo valor de potência aparente. (EBERT,2000)

Perdas a Vazio (P_v): As perdas a vazio em condições de sobre-excitação ou sub-exitação são obtidas através da equação 10.

$$P_{V2} = P_{V1} \times V_{pu}^{3,7} \quad (10)$$

Onde:

P_{V1} é o valor das perdas a vazio na condição de excitação nominal;

P_{V2} é o valor das perdas a vazio na nova condição de excitação;

V_{pu} é o valor da excitação em pu (por unidade);

3,7 é um fator médio determinado a partir de análise de dados de perda a vazio, medidos em vários transformadores de potência.

A tabela 5 mostra alguns exemplos de perdas a vazio que foram apresentados em relatórios de ensaios, em um comparativo aos valores calculados, através da equação 10, para três diferentes tipos de transformadores:

Tabela 5 - Valores de perdas a vazio.

Fonte: EBERT,2000.

Transformador	Perdas a vazio com tensão nominal	Perdas a vazio com 110% da tensão nominal (relatório de ensaios)	Perdas a vazio com 110% da tensão nominal (valor calculado) (Equação 2.11)
T1	75,45 kW	108,65 kW	107,35 kW
T2	26,11 kW	34,59 kW	37,15 kW
T3	50,86 kW	69,22 kW	72,36 kW

Perdas em carga: As perdas em carga podem se alterar caso, para mantermos a mesma potência aparente, colocando o transformador em uma condição de sobre-excitação a corrente sofrerá um decréscimo na mesma proporção. Portanto, aplicando uma tensão de por exemplo 105%, as perdas em carga serão reduzidas por um fator de $(1/1,05)^2$. (EBERT,2000.)

Nível de Ruído: O principal motivo do ruído ocorre por causa da vibração estrutural que é originada no núcleo quando excitado por forças de magneto estricção, e por forças de atração e repulsão magnética. O nível de ruído aumenta em 0,8dB para cada 2,5% de aumento na excitação. Se acaso ocorrer uma sua excitação, o efeito contrário será observado, ou seja, a cada decrescido de 2,5% na excitação, ocorre uma redução de 0,8dB no nível de ruído do transformador. Elevação de temperatura no topo do óleo e no ponto mais quente: **A elevação da temperatura tem ligação direta com a relação de perdas em carga sob carga nominal e perdas a vazio.** Quanto maior a sobretensão, maiores as temperaturas do topo do óleo de do ponto mais quente. (EBERT,2000.)

2.4.9 Óleo Mineral Isolante – OMI

Os óleos mais utilizados atualmente no isolamento de transformadores são os óleos minerais isolantes, estes são fluidos que são bastante estáveis a elevadas temperaturas e dotado de características isolantes. Sendo estes empregados em

transformadores elétricos, mas também, em outros tipos de componentes como capacitores de alta tensão, chaves, comutadores e entre outros.

Os óleos minerais isolantes são derivados do petróleo, isso faz com que eles possam representar riscos à saúde do ser humano e risco ao meio ambiente. De maneira genérica, as moléculas dos óleos minerais isolantes possuem uma quantidade entre 19 e 12 átomos de carbono combinados em uma estrutura naftênica. Ou seja, possuem hidrocarbonetos saturados de cadeia fechada formando anéis, podendo ou não possuir cadeias laterais. Os hidrocarbonetos que entram na composição de um determinado óleo mineral é formado em anéis benzênicos e anéis alifáticos.

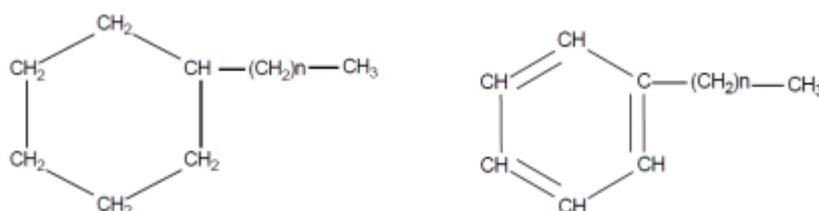


Figura 9 – Cadeia Naftênica e Estrutura base de hidrocarbonetos aromáticos

Fonte: Portella, 2003.

2.4.8 Óleo Vegetal Isolante – OVI

Os óleos minerais são muito prejudiciais ao meio ambiente, por esse motivo existe uma grande necessidade de fluidos que sejam biodegradáveis e ao mesmo tempo com um alto ponto de combustão, os óleos isolantes são fontes alternativas ao OMI. Surgiram álbuns fluidos sintéticos de hidrocarbono, silicone e até mesmo de éster sintético, no entanto, seu uso ficou limitado apenas aos transformadores de distribuição. Alguns também possuem um custo bastante elevado, o que faz com que a indústria não absorva esse produto. (SILVA,2012.)

Os óleos vegetais são uma nova classe de fluidos isolantes que são obtidos de maneira ecologicamente correta, pois são biodegradáveis e renováveis. Os resultados com os primeiros óleos isolantes foram bastante satisfatórios, já que estes cumprem

os requisitos de um óleo isolante de alta temperatura, e ao mesmo tempo são feitos de matéria prima renovável. (SILVA,2012.)(DANKIN, 1947.)

As grandes empresas de seguros, empresas de energia elétrica e gerentes de risco dizem que os transformadores são os equipamentos mais caros e, portanto, críticos de uma planta industrial, pois dentro de um transformador existem muitos elementos e uma grande quantidade de óleo submetido a tensões elétricas muito elevadas. Podem ocorrer explosões e incêndios de maneira inesperada, e prejudicar o funcionamento de toda uma rede de abastecimento, causando prejuízos consideráveis para o meio ambiente, para companhia e para a comunidade como um todo. Os ésteres de ácidos graxos (óleo vegetal) possuem altos pontos de combustão, tornando-se menos inflamáveis quando comparados aos óleos minerais, aumentando a segurança contra explosões e incêndios, o que reduz a conta nas seguradoras. (MAMEDE, 2011.)

Por seu caráter biodegradáveis, em casos de vazamentos ou derramamentos, a contaminação do solo pode prejudicar o terreno e recursos hídricos, fazendo com que estes fiquem bastante contaminados. As agências reguladoras do governo brasileiro impõem multas severas em caso de acidentes que prejudiquem a natureza. As empresas precisam pagar uma multa e adotar medidas para remediar o ambiente impactado, um processo que pode ser bastante oneroso dependendo do nível do dano causado. Como os óleos vegetais isolantes são facilmente degradados por microrganismos presentes no meio ambiente. O processo de remediação será muito mais barato que em caso de um acidente envolvendo um óleo vegetal. (SCARDAZZI, 2007.)

Devido a sua natureza química, os ésteres vegetais naturais possuem uma grande afinidade com a água. Este tipo de propriedade aumenta a vida útil do isolamento sólido. Alguns estudos demonstram que o papel isolante terá sua vida útil estendida caso esteja na presença de óleos vegetais isolantes, comparando com transformadores isolados com óleos minerais isolantes.

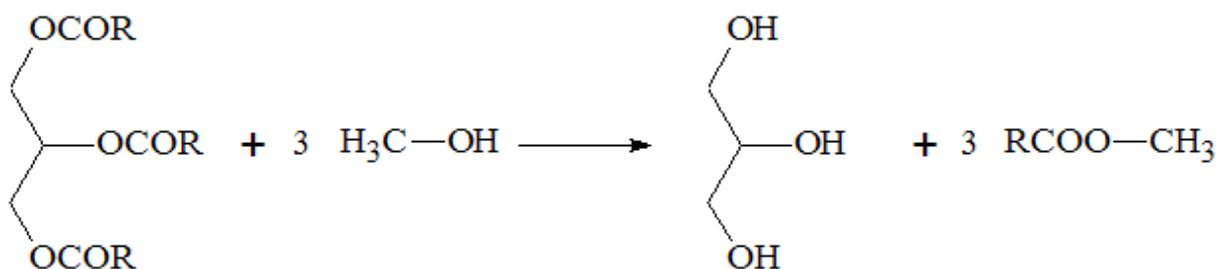


Figura 10 – Exemplo de éster metílico de ácido graxo

Fonte: Schuchardt, 1998.

2.5 CIRCUITOS OPTOACOPLADORES

Os circuitos optoacopladores ou circuitos de interfaceamento ótico são circuitos amplamente utilizados para isolar um circuito do outro, formado por um invólucro contendo um LED que pode ter sua intensidade luminosa controlada com facilidade, do outro lado do encapsulamento existe um receptor capaz de receber e produzir um sinal a partir da intensidade luminosa incidente sobre o equipamento. (PARMA,2000.)

Essa separação permite que um circuito fique isolado de um lado para outro, afinal a radiação eletromagnética permite um isolamento de milhares de volts entre os dois componentes que formam o optoacoplador.

Portanto, o uso de circuitos optoacopladores se faz muito útil para isolar circuitos de alta tensão de circuitos de baixa tensão, pois um sinal de alta tensão que acidentalmente incida sobre um circuito de baixa tensão pode causar danos irreparáveis aos equipamentos.

Em outras palavras os circuitos optoacopladores servem para controlar uma carga externa através de uma determinada tensão aplicada de um lado do circuito.

2.5.1 Acopladores com fototransistores

Como mencionado anteriormente os opto acopladores consistem em uma fonte de luz que pode ser controlada por um circuito de baixa tensão, com um LED que trabalha na faixa do infravermelho e um dispositivo receptor de intensidade luminosa capaz de produzir um sinal elétrico a partir da incidência da luz sobre o dispositivo. (PARMA,2000.)

Os dois elementos isolados por um invólucro dentro de uma câmara hermética e sem contato físico um com o outro é o suficiente para gerar um isolamento elétrico de milhares de volts. (PARMA,2000.)

Variações para este tipo de acoplador utilizam transistores foto-Darlington e LEDs opostos capazes de operar a altas tensões e com sinais alternados, o símbolo deste tipo de optoacoplador pode ser observado na figura 11. (PARMA,2000.)

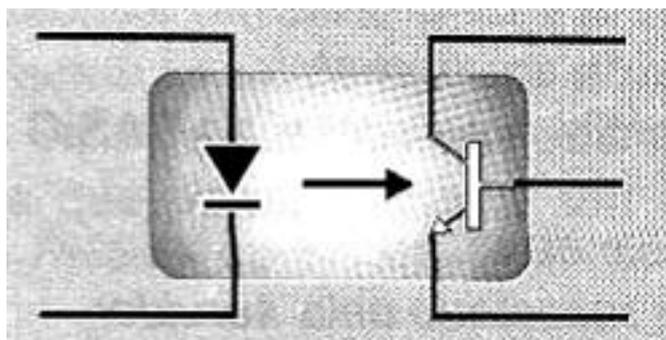


Figura 11 - Símbolo de um fotoacoplador.

Fonte: Instituto Newton Braga, 2007.

2.6 LABVIEW NATIONAL INSTRUMENTS

O LabVIEW é um software desenvolvido pela national instruments desenvolvido com o objetivo de aprimorar e facilitar a integração hardware software através de uma programação gráfica simples, para que seja possível a visualização de dados coletados via hardware. O LabVIEW tem como principal função servir para realizar captura de dados de medições e instrumentação eletrônica no geral e apresentar esses dados em uma plataforma visual, agilizando todo processo de programação com sua interface simples e intuitiva. (TRAVIS,2007.)

O LABVIEW possui uma metodologia de programação orientada por blocos também chamados de “Sub-VI” que são instrumentos virtuais que pode ser usado como um subprograma ou rotina ou também pode ser usado de maneira separada e independente. Trabalhando com fluxo de dados e por esse motivo as chamadas recursivas se tornam impossíveis, sendo aplicadas apenas com refluxo de dados.

O programador liga o fluxo de dados através de linhas no programa, definindo dessa maneira como se dá o fluxo de dados e quais as operações realizadas com estes mesmos dados, sendo que cada uma dessas VIs pode ter várias entradas e

saídas, podendo essas serem configuradas pelo programador de acordo com a sua necessidade ou fixas de acordo com a VI. A VI só inicia quando todas as entradas estão disponíveis, desta forma, os resultados são inseridos nas saídas assim que o processamento é finalizado. Sendo assim, a ordem em que as tarefas são executadas é definida por uma função de dados. (TRAVIS,2007.)

É importante ressaltar que pelo seu processamento em fluxo de dados, o LabVIEW torna possível o processamento paralelo, onde existem várias partes do programa que são independentes uma da outra, dessa forma a velocidade de processamento aumenta, afinal não se faz necessário que uma instrução termine para iniciar a outras todas encadeadas no mesmo processo. (TRAVIS,2007.)

O LabVIEW possui um painel frontal que auxilia o programador a construir uma interface gráfica que seja de fácil uso e bonita para o usuário sem que o programador precise escrever nenhuma linha de código para isso. O seu processamento gráfico e a maneira com que o LabVIEW conecta os elementos gráficos e a programação por fluxo de dados. (TRAVIS,2007.)

Apesar de todas essas vantagens do LabVIEW, ele possui duas grandes dificuldades, mas que não inviabilizam a sua utilização, sendo elas:

- Pequenas mudanças geram uma grande reestruturação do fluxo de dados, pela sua metodologia de programação, qualquer mudança que seja um pouco mais complexa faz com que várias modificações precisem ser feitas.
- Necessita de repetir várias variáveis mais do que o necessário, pois desta forma pode-se evitar que o programa vire uma confusão de várias linhas, isso diminui a velocidade de processamento do programa, mas não chega a inviabilizar o seu uso.

2.7 REDES DE PETRI

Existem diversas formas de se representar, sistemas dinâmicos, sendo eles contínuos no tempo, discretos no tempo ou baseados em eventos. As redes de Petri podem representar um sistema dinâmico baseado em eventos. (CARDOSO,1997.)

Sistemas baseados em eventos, são acionados por eventos, ou seja, uma situação vai mudar quando ocorrer um determinado evento para que haja uma mudança. “Sistemas a Eventos Discretos (SED) é um sistema dinâmico que evolui de acordo com a ocorrência abrupta de eventos físicos, em intervalos de tempo em geral irregulares e desconhecidos” (Cury,2001.). Ou seja, o que está ativando as transições são os eventos, logo os eventos mudam o estado de um estado A para um estado B. (CURY, 2001.)

Tipos de mudanças, Mudanças ocasionadas pelo tempo - Exemplo: carga do travessão a 10kgf durante um período de 10 segundos. Mudanças ocasionadas por eventos - Exemplo: pressionar um botão para ligar um motor. A rede de Petri é um grafo orientado que tem dois tipos de nós: Transições e posições. Os arcos do grafo partem de algumas posições para algumas transições ou vice-versa, aos arcos associam-se números (inteiros) fixos, que são seus pesos. (CARDOSO,1997.)

Uma rede de Petri é uma quintupla se:

$$PN = (P, T, F, W, mo) \quad (11)$$

Onde:

P é um conjunto finito de lugares;

T é um conjunto finito de transições;

$W: F \rightarrow \{1,2,3, \dots\}$ é a função peso;

$M_0: P \rightarrow \{0, 1, 2, 3, \dots\}$ é a marcação inicial,

A estrutura da rede de Petri sem qualquer marcação inicial específica é denotada por N . Uma rede de Petri com uma dada marcação inicial é denotada por (N, M_0) .

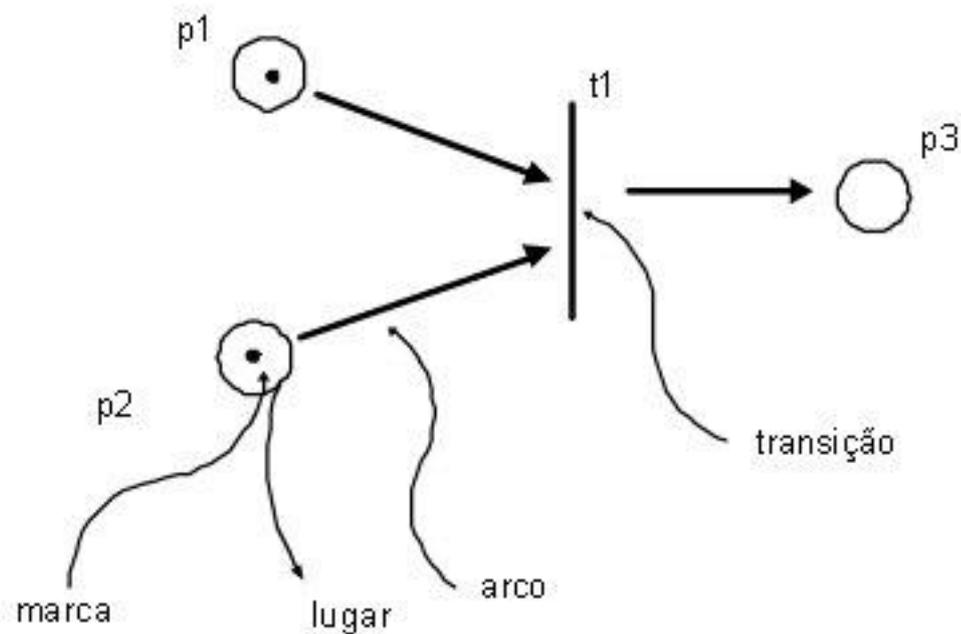


Figura 12 - Exemplo de uma rede de Petri.

Fonte: UFScar, 2010.

p1 e p2 são processos, t1 é uma transição.

Geralmente, as marcas (bolinhas) representam estado do lugar e as transições representam transformações. Redes de Petri representam processos com transformações que são disparados pela presença de marcas nos lugares. Redes de Petri são executadas quando as marcas são retiradas de alguns lugares e colocadas em outros. Quando a rede é executada, as transições retiram as marcas de entrada e as colocam na saída. (OLIVEIRA,2010.) (CARDOSO,1997.)

Pode haver mais de uma marca em um lugar e um arco pode ser associado a um peso. Uma transição só dispara se houver marcas suficientes para todos os arcos de entrada. (OLIVEIRA,2010.)

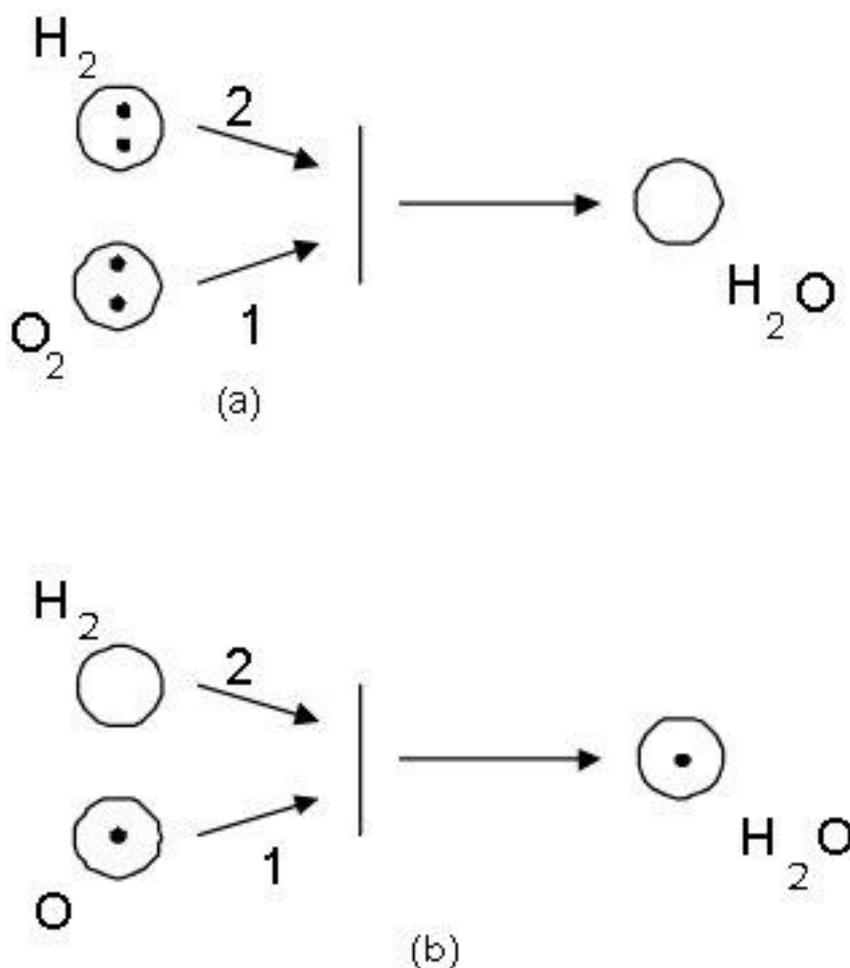


Figura 13 - Rede com pesos nos arcos.

Fonte: UFScar, 2010.

2.8 BANCO DE DADOS RELACIONAL

Quando se trata de banco de dados, existem diversos modelos, cada um adequado a um tipo de situação, para criação do supervisor de controle de travessão foi escolhido o modelo relacional pela sua forma simples de entendimento e pelo fatos de suas entidades se relacionarem entre si, permitindo que os dados sejam armazenados e recuperados de forma rápida e segura. (ELMASRI,2005.)(CERICOLA, 1991.)

O modelo relacional foi criado por E. F. Codd (IBM) em um artigo publicado em junho de 1970, chamado de “*A Relational Model of Data for Large Shared Data Banks*”,

no qual o Dr. Codd propôs o modelo relacional para sistemas de banco de dados, como o próprio nome do artigo já sugere, este modelo se adequa aos requisitos do projeto, já que se trata de um banco de dados relativamente grande, coletando dados de projetos, amostras, sequências de ensaio e entre outros. (CODD, 1970.)

No modelo relacional os dados são organizados em coleções de tabelas bidirecionais (relações), ou seja, uma forma de organizar os dados em linhas e colunas respectivamente. Criado seguindo a lógica e teoria de conjuntos. (CODD, 1970.)

O modelo relacional de banco de dados é composto, em sua essência por:

- Coleções de objetos ou relações que fazer o armazenamento de dados
- Um conjunto de operadores que agem sobre as relações produzindo outras relações.
- Mecanismos de integridade de dados, para melhorar a precisão e consistência destes.

2.8.1 Componentes de um bando de dados relacional

- Tabela: Estrutura de armazenamento no SGBDR (Sistema de Armazenamento de Banco de Dados Relacional). Onde são armazenados todos os dados necessários sobre algo que está presente no mundo real ou virtual. Também chamada de relação. No caso do Banco de dados relacional, este pode contar 1 ou mais tabelas. (CODD, 1970.) (HEUSER,2009.)
- Tupla: Também chamada de linha ou registro, representa todos os dados requeridos por uma determinada ocorrência de entidade particular. Por exemplo, os dados cadastrais de uma determinada pessoa. Cada linha de um tabela deve conter um elemento de identificação, também chamado de chave primária, desta forma, não haverá duplicação de registros. (ELMASRI,2005.)
- Coluna: Unidade que armazena um tipo específico de dado, seu elemento pode se repetir em outras linhas da tabela, no caso de uma coluna não-chave. (ELMASRI,2005.)

- Relacionamento: Associação entre as relações, conectados por chaves primárias de identificação e chaves estrangeiras. (ELMASRI,2005.)
- Chave Primária: Coluna que identifica cada registro de maneira singular na tabela, contendo um valor que nunca irá se repetir durante toda a tabela. (ELMASRI,2005.)
- Chave Estrangeira: Coluna que define a maneira com que as tabelas de relacionam umas com as outras. Onde em uma tabela possui uma chave estrangeira que pode estar direcionada a uma chave primária de outra tabela. (ELMASRI,2005.)

2.8.2 Modelo entidade relacionamento

Quando se trata de bancos de dados relacionais, temos o chamado MER (modelo entidade relacionamento) este por sua vez, trata-se de um diagrama criado a partir de especificações do projeto. Permitindo a visualização das entidades de um projeto e também a forma com os quais estes se relacionam. (CODD, 1970.) (CERICOLA, 1991.)

O MER é composto por 3 elementos primordiais, sendo estes:

Entidade: Algo significativo em que podemos armazenar dados sobre, como por exemplo, corpos de prova, tipos de ensaios, sequências de teste e é marcado com um símbolo quadrado no diagrama. (CODD, 1970.) (CERICOLA, 1991.)

Atributos: Algo que de certa forma qualifique a entidade, como por exemplo, corpos de prova possuem comprimento, largura e altura respectivamente, características que qualificam o corpo de prova em questão, podendo ser obrigatórios ou não, representado por um oval no diagrama.

Relacionamentos: Associação entre entidades, por exemplo, corpos de prova podem ser submetidos a determinado tipo de ensaio, representado pelo losango no diagrama.

2.8.3 Integridade de dados

Para uma melhor manutenção e garantia de consistência e precisão dos dados, o que é um aspecto crítico do design de um banco de dados, para sua implementação e o uso de sistemas de armazenamento de dados. (SILVA FILHO,2002.) (CERICOLA, 1991.)

A confiabilidade do sistema é definida pelas restrições de integridade. Existem ao todo 5 Tipos de restrições de integridade?

- Integridade Referencial
- Integridade de Domínio
- Integridade de Vazio
- Integridade de Chave
- Integridade Definida pelo Usuário

Integridade de Domínio: Respeitar os tipos de dados que são armazenados na tabela, por exemplo preços só podem aceitar letras e strings. Fatores:

- Tipo de dado do campo
- Representação interna do tipo de dado Presença ou não do dado.
- Intervalo de valores do domínio
- Conjuntos de valores discretos

Integridade referencial: Dita se um valor inserido é válido, baseado em valores contidos em outra tabela, por exemplo, se uma amostra com ID 523 é cadastrada na tabela de ensaios, está também deve existir na tabela corpos de prova. Lembrando que podem ser necessárias condições de exclusão e atualização nestas listas. (SILVA FILHO,2002)

3. AQUISIÇÃO DE DADOS E INSTRUMENTAÇÃO ELETRÔNICA

Para processar e converter os dados coletados dos sensores, é necessário o uso de um microcontrolador, dispositivo que consiste em pequeno computador integrado em um (SoC) “System on Chip”, ou seja, um dispositivo que possua periféricos de entrada e saída, memória e um processador integrados em um único CI (Circuito Integrado). (PEREIRA, 2005)

Para processar, coletar dados dos sensores e enviar os dados para o LabVIEW, foi escolhido o microcontrolador Arduino UNO, pela sua capacidade de realizar a conversão analógico digital de vários sensores e a sua plataforma ser completamente *open source*, *open software* e *open hardware*, dessa forma é possível alterar livremente as suas características sem custo adicional. (MCROBERTS,2011)

O Arduino é uma plataforma de hardware livre baseado em chips da linha Atmel AVR, que possui vários periféricos de entrada e saída, uma alimentação de 5V e uma linguagem de programação baseada na linguagem C/C++, criado para ser uma plataforma barata, de baixo custo e ao mesmo tempo robusta e capaz de realizar diversas operações e projetos de hardware. (MCROBERTS,2011)

A placa escolhida para o desenvolvimento do projeto da bancada foi o Arduino NANO, pela sua capacidade de processamento e o seu pequeno tamanho tornando o sistema o mais portátil possível. Os dados são enviados para o LabVIEW através de um computador e uma porta serial que faz a comunicação entre o microcontrolador Arduino nano e o computador onde o software do LabVIEW está instalado.

3.1 AQUISIÇÃO DE TEMPERATURA

Para captar os valores de temperatura de maneira adequada, se faz necessário o uso de um sensor que não seja sensível a umidade de qualquer natureza, afinal este sensor deve ser imerso em óleo isolante para que seja possível captar uma temperatura mais próxima o possível do ponto máximo do transformador.

Segunda dados do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia), a faixa de temperatura do Brasil varia de -10°C a uma máxima de 42°C , como a temperatura ambiente deve ser levada em consideração, pois a temperatura de aquecimento é dada pela variação de temperatura do transformador em relação a temperatura

ambiente, o sensor escolhido foi o sensor LM335 que de acordo com a Dallas Instruments além de ser a prova d'água possui um range de funcionamento que varia de -40 °C a 100 °C, o que é necessário para atender as normas técnicas da ABNT dos transformadores de classe 55 e classe 65.

Também pelas longas distâncias dos fios, afinal como os transformadores são equipamentos que oferecem risco a vida daqueles que operam devido a sua alta corrente e capacidade de gerar explosões, o cabo de leitura deve ser extenso. O sensor varia sua resistência de acordo com a temperatura, desta forma é possível estabelecer uma relação entre a temperatura e a tensão gerada nos polos do equipamento.

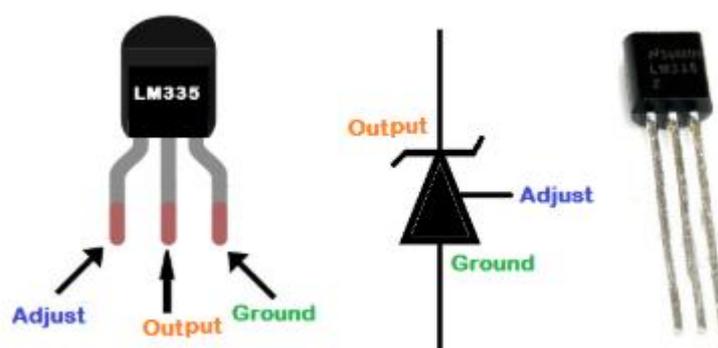


Figura 14 - Sensor de temperatura LM335.

Fonte: Autor, 2019.

O sensor LM335 apresenta uma alta resistividade em temperaturas elevadas e uma baixa resistividade em temperaturas mais baixas. De acordo com as especificações da Texas Instruments, o sensor apresenta uma saída de 10mV/°K, utilizando um resistor de pull-up de 1k, teremos um offset de 500mV.

Com o comando de leitura analógica do microcontrolador varia entre 0 e 1023, que corresponde a uma variação entre 0 e 5Volts. De acordo com as especificações da Texas Instruments 1°C é igual a 10mV. Logo a tensão lida pelo microcontrolador pode ser encontrada através da equação 12.

$$T_{pa} = Vdl * \left(\frac{5}{1023} \right) \quad (12)$$

Onde:

T_{pa} é a tensão no pino analógico do microcontrolador;

V_{dl} é o valor lido no pino analógico digital;

Para encontrar a temperatura basta dividir o valor da tensão pelo valor de 10mV para encontrar a temperatura medida pelo sensor. Após implementar estes cálculos no microcontrolador, foram realizadas as comparações com um termômetro digital de modelo AF1506-CE, os resultados podem ser encontrados na figura 15:

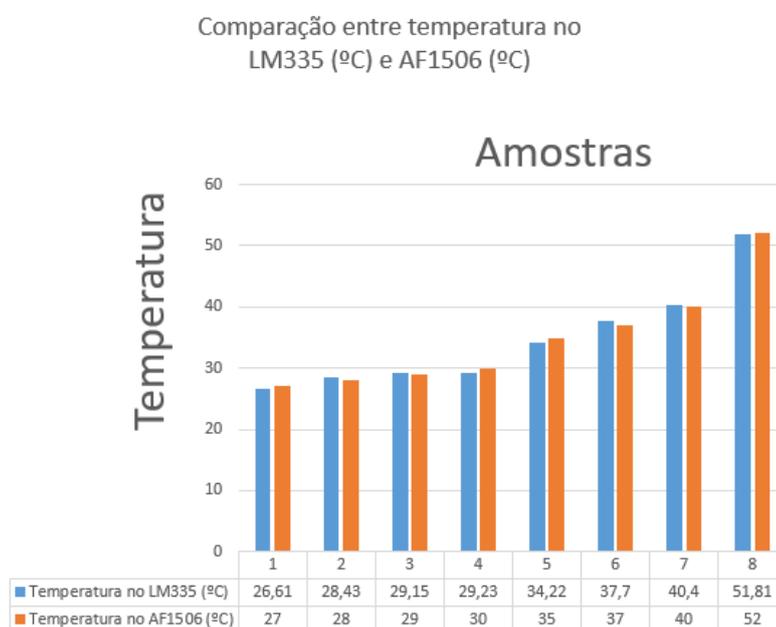


Figura 15 – Comparação entre temperatura no medida no sensor LM335 e AF1506

Fonte: Autor,2019

Apesar de existirem valores altos para diferença entre os valores medidos pelo LM335 e o o termômetro de referência AF1506 CE, como o sensor de referência não possui nenhum dígito decimal significativo, é normal que exista uma diferença tão alta em módulo, como nenhum dos valores ultrapassou a diferença de 1 dígito em módulo, não foram realizados ajustes de calibração neste sensor.

3.2 AQUISIÇÃO DE TENSÃO

Os níveis de tensão em que os transformadores testados operam, são muito superiores aos níveis de tensão do microcontrolador, que varia de 0 a 5 Volts, por este

motivo foram utilizados sensores optoacopladores para isolar o circuito de alta potência do circuito de baixa potência, fenômeno que já foi discutido na seção 2.5.

Para ser utilizado como sensor de tensão, foi utilizado o CI TIL116 que segundo a Farnell, possui um range de operação a partir de 30 Volts e 1500 Volts de isolamento, um optoacoplador onde um LED que funciona em alta tensão, incide uma determinada intensidade luminosa sobre o Gate do fototransistor amplificando a corrente por estar em sua região ativa de funcionamento, a tensão eficaz da entrada foi diretamente relacionada com uma curva de entrada a partir do método dos mínimos quadrados.

3.2.1 Calibração do sensor de tensão

Como a intenção do sensor é realizar a leitura de valores eficazes de tensão, foi preciso verificar diversos pontos de tensão em corrente alternada para realizar a calibragem do sensor através do método dos mínimos quadrados, foi desenvolvido um circuito microcontrolado para variar o valor de tensão eficaz da rede em função do tempo de maneira crescente, para que dessa forma fosse possível coletar amostras suficientes para uma boa curva de aproximação.

Por este motivo foi projetado um dimmer microcontrolado, realizando o controle de potência AC. Desta forma, pode-se variar a tensão de entrada em função do tempo ou fixar a tensão em um determinado valor para que seja possível realizar a coleta das amostras.

O circuito funciona com um detector de fase zero optoacoplado, esse detector é feito com a entrada da tensão da rede elétrica no fototransistor 4N35, a intensidade luminosa gerada pelo LED de alta tensão do 4N35 gera uma saída senoidal de baixa potência na saída, que envia um sinal para o microcontrolador conectado a um resistor de pull-up e uma das entradas digitais do microcontrolador, assim toda vez que a onda passar pelo 0 Volts o Arduino irá detectar essa entrada de 0 Volts.

Para controlar a corrente através do microcontrolador, foi necessário um circuito de isolamento do circuito de baixa tensão para com o circuito de alta tensão, por isso foi utilizado um fototriac MOC3021 que é capaz de ser acionado através de um pulso de entrada da ordem de 3.3 Volts, tensão de saída do próprio

microcontrolador para realizar o disparo do pulso que controla a passagem da onda através do triac BT136.

Com base nessas capacidades do triac, o microcontrolador desliga brevemente a tensão da rede, durante uma parte de cada um dos ciclos. Isso acontece 120 vezes por segundo, ou seja, duas vezes para cada ciclo causando apenas uma redução da potência, equivalente à que acontece quando há uma queda de tensão da rede elétrica, embora causada por outro princípio, modificando o tempo em que a tensão fica disponível, porém em um curto período de tempo.

A figura 16 mostra o que acontece durante cada um dos ciclos de corrente alternada.

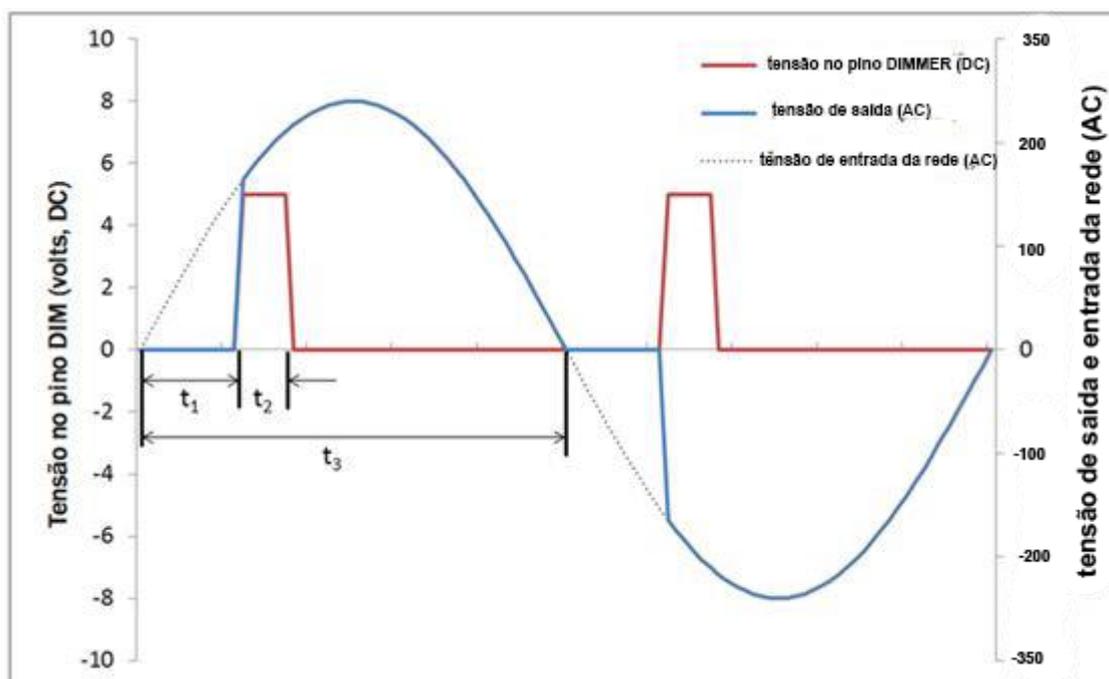


Figura 16 - Exemplo de circuito dimmer entrada, pulso e saída.

Fonte: Autor, 2019.

Na figura 16 o eixo horizontal representa o tempo, e o gráfico inteiro se repete 60 vezes por segundo, ou seja, a linha horizontal representada no gráfico equivale a $1/60$ de segundo. Observe que o eixo Y tem 2 escalas: a da esquerda, de -10V a +10V, vale apenas para a linha vermelha, que indica a tensão ativada pelo microcontrolador no pino digital, e a da direita, que vai de -320V a +320V, e vale para

a linha pontilhada (que indica a tensão recebida da tomada pelo módulo) e para a linha azul (que indica a tensão fornecida à lâmpada pelo módulo).

A linha pontilhada é visível apenas em 2 pequenos trechos, porque nos demais ela é sobreposta pela linha azul. A linha vermelha geralmente está fixa em 0 volts, exceto em 2 breves momentos, que ocorrem após o tempo t_1 (que começa a contar sempre que a tensão da tomada passa pelo 0V) e cuja duração equivale ao tempo t_2 , que correspondem aos pulsos positivos que o microcontrolador envia para o circuito, indicando que ele pode liberar a passagem entre a tomada e a lâmpada.

No mesmo momento em que a linha vermelha começa a estar em nível lógico alto, a linha azul passa de 0 Volts para o mesmo valor da tensão recebida da rede naquele momento: é o momento em que o circuito conduz eletricidade.

Para elaborar um software embarcado no anexo 2 para variar a potência fornecida pela rede, foi realizado o cálculo, com base no valor da variável volátil potência (que deve variar entre 0 e 100), qual será a duração do tempo t_1 - quanto menor a potência desejada, maior deve ser o tempo t_1 , até um limite próximo a 1/160 de segundos, ou aproximadamente 8333 microssegundos.

O cálculo de t_1 é dado pela equação 13.

$$t_1 = 8200 * \frac{100 - potencia}{100} \quad (13)$$

Foi utilizado o valor de 8200 (e não 8333) como o limite máximo, para evitar que a soma de $t_1 + t_2$ (mais o tempo que leva para executar os comandos da `zeroCross()`) ultrapasse os 8333 microssegundos que temos entre cada chamada. O valor de t_2 ficou fixado (logo abaixo) em 6 microssegundos.

Com t_1 e t_2 definidos nos registradores a seguinte sequência lógica é seguida:

- Aguardar t_1 microssegundos
- Mover HIGH para o pino DIM

- Aguardar t_2 microssegundos
- Mover LOW para o pino DIM

E assim termina a função `zeroCross()`. Com isso, a interrupção INT0 se encerra (até que outra aconteça), e a execução retorna ao ponto em que o programa "normal" foi interrompido.

Além disto, o que temos é uma função `loop()` que executa, a cada vez, um loop for que move valores de 5 até 95 para a variável volátil potencia, aguardando 150ms em cada valor, e depois aguardando 1 segundo inteiro (1000ms) antes de recomeçar.

A figura 17 ilustra a simulação com o software Proteus 8.0 do programa, onde a linha amarela representa a tensão da rede, a linha azul a saída do circuito, e a linha vermelha representa a saída de pulsos do microcontrolador, já figura 18 ilustra o circuito do dimmer.



Figura 17 - Resultado da simulação dimmer microcontrolado.

Fonte: Autor,2017.

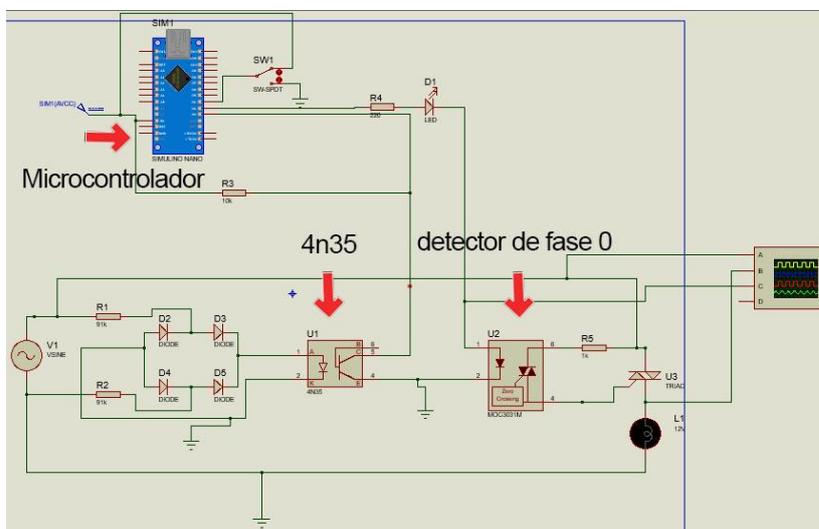


Figura 18 – Circuito do dimmer microcontrolado.

Fonte: Autor,2017.

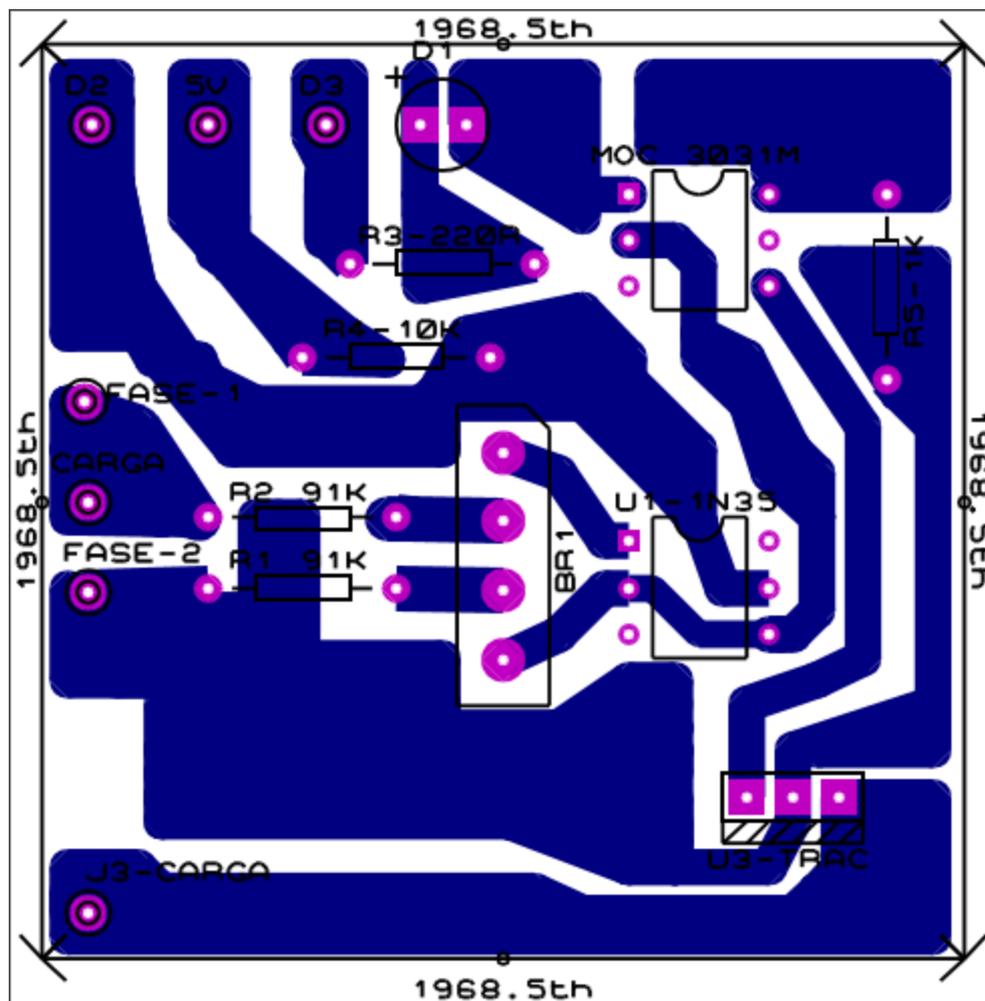


Figura 19 – Layout de circuito impresso do dimmer microcontrolado.

Fonte: Autor,2017.

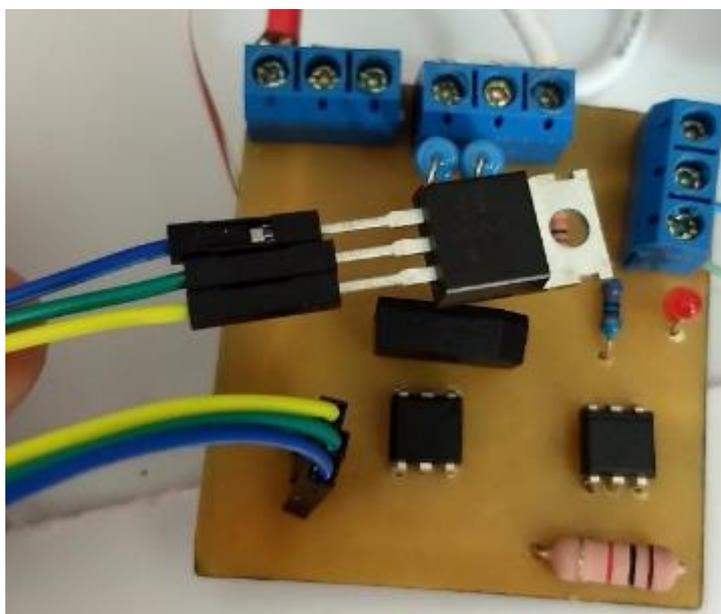


Figura 20 - PCB dimmer microcontrolado.

Fonte: Autor,2019

Além disto, o que temos é uma função loop() que executa, a cada vez, um loop for que move valores de 5 até 95 para a variável volátil potência, aguardando 150ms em cada valor, e depois aguardando 1 segundo inteiro (1000ms) antes de recomeçar.

Com este programa em mãos, foram coletadas amostras de tensão, medidas com o multímetro MINIPA ET-1002, relacionando a tensão medida no multímetro com o valor da entrada analógica lida pelo microcontrolador, para que então fosse elaborado a relação da figura 21:

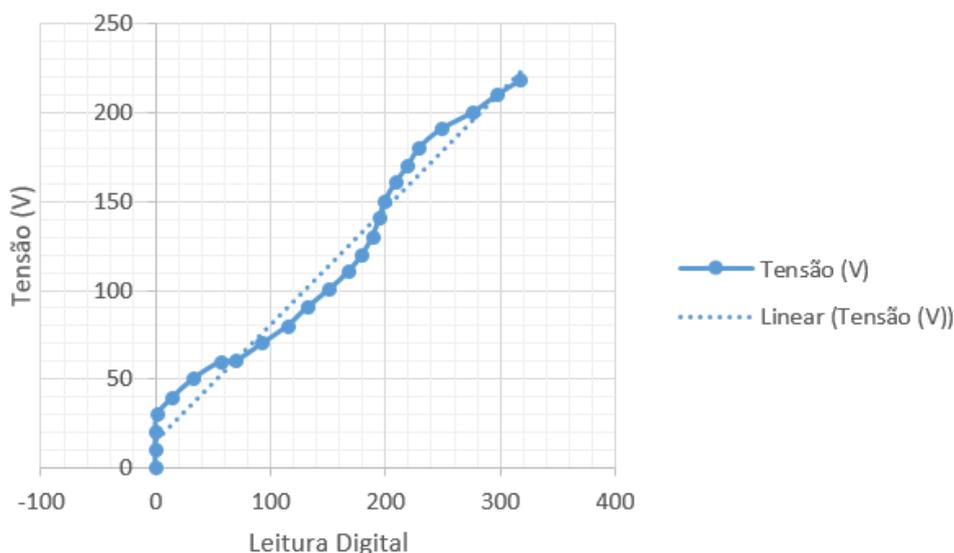


Figura 21 – Relação entre a leitura digital do microcontrolador e a tensão.

FONTE: autor, 2019.

Para fins de calibração, serão utilizados apenas os valores acima de 30V afinal, o sensor não funciona em tensões abaixo de 30V, dessa forma podemos desprezar estes valores e fazer o ajuste apenas para valores acima deste valor, caso o microcontrolador realize uma leitura abaixo de 30V o valor de saída será zero, mas como os transformadores testados funcionam em tensões superiores a 30V o sistema continua funcional.

Foi realizado a aproximação dos pontos da figura 21 por um polinômio de grau 1, devido a semelhança do comportamento da função com uma linha reta, através do

método dos mínimos quadrados, a relação de parâmetros pode ser vista na equação 14.

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 1 & 15 \\ 1 & 33 \\ 1 & 47 \\ 1 & 70 \\ 1 & 93 \\ 1 & 115 \\ 1 & 132 \\ 1 & 151 \\ 1 & 168 \\ 1 & 180 \\ 1 & 189 \\ 1 & 195 \\ 1 & 200 \\ 1 & 209 \\ 1 & 220 \\ 1 & 230 \\ 1 & 249 \\ 1 & 277 \\ 1 & 298 \\ 1 & 318 \end{pmatrix} \quad X = \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix}, \quad Y = \begin{pmatrix} 30.3 \\ 39.7 \\ 50.2 \\ 59.8 \\ 60.3 \\ 70.0 \\ 90.1 \\ 100.1 \\ 110.3 \\ 119.9 \\ 130.0 \\ 140.5 \\ 150.1 \\ 160.2 \\ 169.9 \\ 180.1 \\ 190.3 \\ 200.0 \\ 209.7 \\ 207.7 \\ 217.7 \end{pmatrix} \quad (14)$$

$$A^T A X = A^T Y \quad (15)$$

A partir dos dados coletados a solução de X da equação 14 calculada a partir da equação 15 é dada por a sendo 0.63 e b com valor de 19, gerando uma equação polinomial de grau 1 que aproxima a relação entre a tensão lida através do optoacoplador e a tensão real que desejamos mensurar no transformador.

Na figura 22 pode-se observar o gráfico dos pontos de tensão relacionados com a leitura digital e a reta de ajuste por aproximação pelo método dos mínimos quadrados.

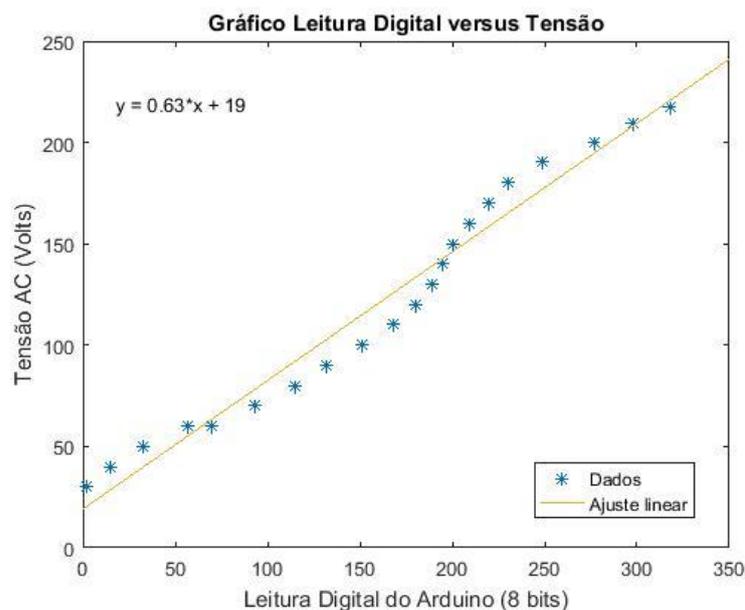


Figura 22 – Gráfico leitura digital versus tensão.

Fonte: Autor, 2019.

A equação de primeiro grau obtida, foi utilizada no cálculo do microcontrolador para converter a o valor digital obtido para diferentes níveis de tensão, lembrando que a equação só é válida para leituras digitais acima de 0, para leituras digitais abaixo de 0 o microcontrolador interpreta a saída como sendo 0.

3.3 AQUISIÇÃO DE CORRENTE NOMINAL

Para capturar valores de corrente dos transformadores, foi escolhido um sensor de corrente indutivo, no caso o sensor de corrente SCT-013-030, fabricado pela empresa Open Energy, que possui range de operação entre 0 e 30V, este sensor foi escolhido pelo seu caráter não invasivo, pois para que o sensor seja utilizado, não é necessário que este faça parte do circuito, pois se trata de um alicate amperímetro. (Open Energy,2013.)

A aquisição de dados com o sensor de corrente SCT-013-030 foi realizada através da *firmware open source* disponibilizada pela própria *Open Energy* para o Arduino, disponível em < <https://learn.openenergymonitor.org/electricity-monitoring/ct-sensors/interface-with-arduino> > o *firmware* realiza a conversão dos dados coletados pelo arduino em valores de corrente eficaz.

Para que seja possível coletar os valores de corrente, é preciso montar um divisor resistivo na entrada com 2 valores de resistores iguais, foram escolhidos resistores de 10K Ω , pois quanto maior o valor da resistência do resistor menores são das discrepâncias entre os dois valores.

Primeiramente será calculada a corrente máxima de entrada do circuito. Como a corrente eficaz máxima a ser medida no sensor é de 30A a corrente de pico será de:

$$L_p = L_{ef} * \sqrt{2} \quad (16)$$

Onde:

L_p é a corrente de pico;

L_{ef} é a corrente eficaz;

A entrada analógica do microcontrolador recebe o formato de onda gerado pela corrente induzida e realiza o cálculo da tensão eficaz através da coleta dos valores de pico, o circuito completo é mostrado na figura 23:

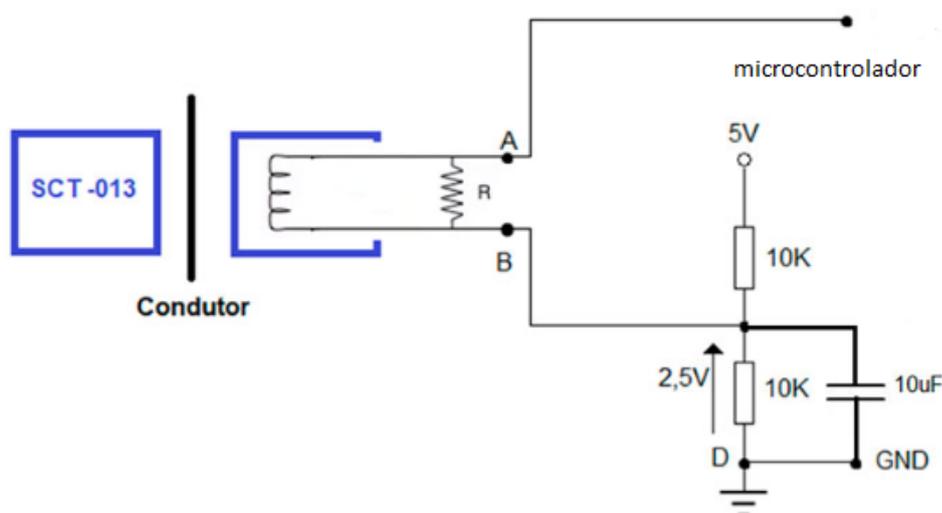


Figura 23 - Esquemático do circuito de entrada para leitura de corrente.

Fonte: Autor, 2019.

O gráfico representativo das formas de onda em cada ponto do circuito pode ser observado na figura 24:

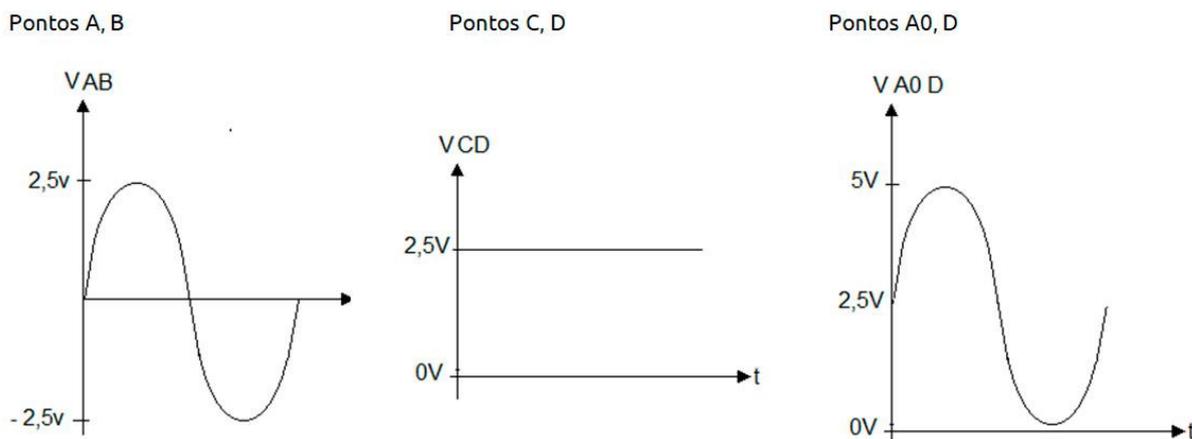


Figura 24 - Formas de onda em cada ponto do circuito da figura 20.

Fonte: Autor,2019.

O controlador faz a leitura consecutiva de 1480 pontos de tensão, detectando as tensões de pico para que então seja possível calcular a tensão eficaz.

Para validar os valores de corrente apresentados pelo microcontrolador, foram comparados valores de corrente apresentados pelo microcontrolador com os dados fornecidos por um alicate amperímetro Minipa ET-3122, sendo coletados do mesmo fio, lembrando que, para uma aquisição adequada dos parâmetros de corrente, deve-se envolver apenas um dos fios condutores para uma medição adequada, a tabela 8 foi elaborada a partir dos dados coletados de diferentes aparelhos elétricos para validar o sistema.

Tabela 6 - Leitura e diferença entre alicate amperímetro MINIPA e Arduino.

Fonte: Autor,2019

Corrente mostrada pelo Arduino (A)	Corrente mostrada pelo Alicate amperímetro (A)	Módulo da diferença de medidas (A)	Incerteza(%)
0.00	0.07	0.07	0.23
0.20	0.23	0.03	0.10
0.62	0.60	0.02	0.06
1.12	1.15	0.03	0.10
1.42	1.37	0.06	0.20
1.80	1.74	0.06	0.20
2.21	2.13	0.08	0.26
3.51	3.44	0.07	0.23

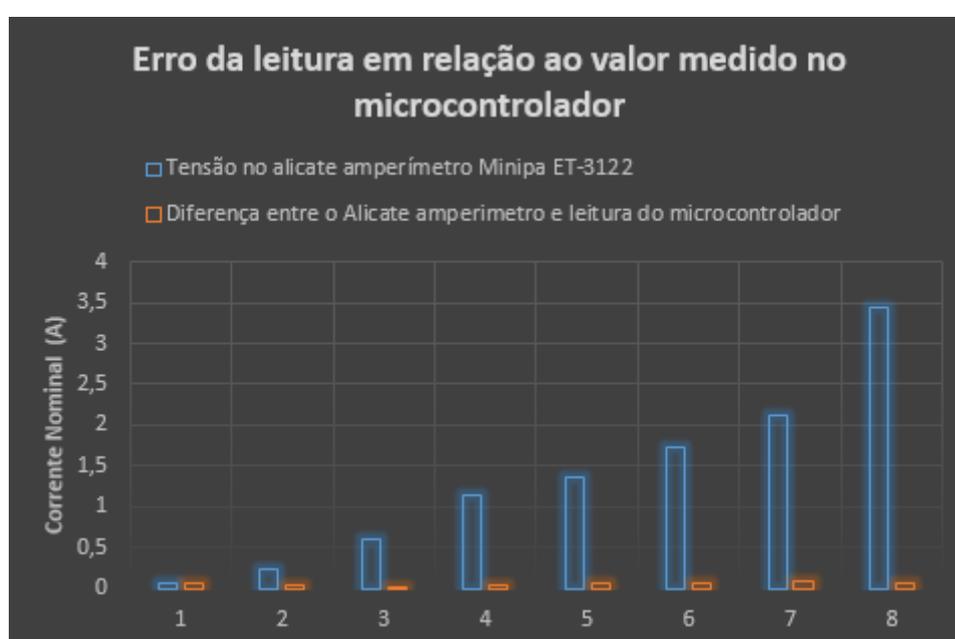


Figura 25 - Diferença da leitura em relação ao valor medido no microcontrolador

Fonte: Autor, 2019

O valor da diferença entre as leituras do sensor SCT-013-030 no *firmware* do Arduino e o alicate amperímetro ET-3122 se mostrou um valor baixo, por esse motivo não foi realizada nenhuma calibração adicional com uma curva de ajuste.

4. DESCRIÇÃO DE HARDWARE DO PROJETO

O Projeto deste trabalho de conclusão de curso é separado em duas máquinas diferentes integradas em um mesmo software de supervisor que será descrito no módulo 5. O primeiro Hardware é o sistema de monitoramento de transformadores, e o segundo é sistema de ensaio de rigidez dielétrica de óleos isolantes.

O microcontrolador é o único dispositivo em comum dessas duas máquinas distintas, o microcontrolador controla todas as funções das duas máquinas e o microcontrolador escolhido foi o ATMEGA32, pois as suas especificações eram capazes de atender os requisitos do projeto, além de ser um microcontrolador de baixo custo, entre as especificações estão:

- Leitura e escrita de portas digitais;
- Leitura de portas analógicas;
- Comunicação serial.

4.1.1 DESCRIÇÃO DO HARWARE DE MONITORAMENTO DE TRANSFORMADORES

O hardware de monitoramento foi criado para coletar os valores de tensão, corrente elétrica, temperatura do óleo e a temperatura ambiente ao longo do tempo. O hardware também é capaz de ligar e desligar o equipamento conforme for necessário. Os equipamentos utilizados para criar o hardware deste trabalho foram os seguintes:

- 2 sensores de temperatura LM335;
- 1 sensor de corrente não invasivo SCT-013 030;
- 1 Optoacoplador TIL 116;
- 1 Relé de contato 5V/220VAC Sanyo;
- 1 Arduino UNO;

Os sensores de temperatura e de corrente, necessitam de alguns circuitos simples para funcionar corretamente, como descrito no capítulo 3, para acoplar esses circuitos em um só lugar, foi criado uma placa de circuito impresso para inserir o divisor

de tensão com capacitor de acoplamento do sensor de corrente, e o resistor de pull-up do sensor de temperatura.

O desenho da placa de circuito impresso foi criado com o auxílio do software Proteus 8.0, e pode ser observado na figura 26.

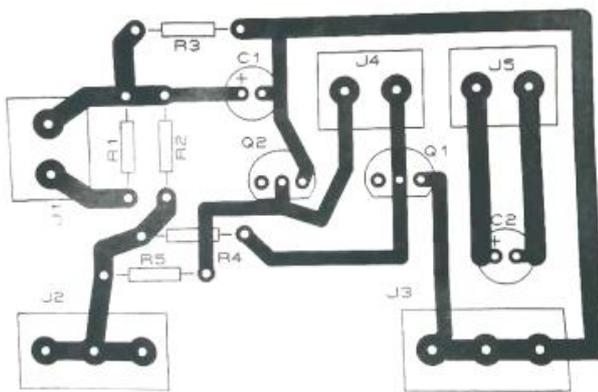


Figura 26 - Representação das trilhas da placa de circuito impresso do projeto.

Fonte: Autor,2019

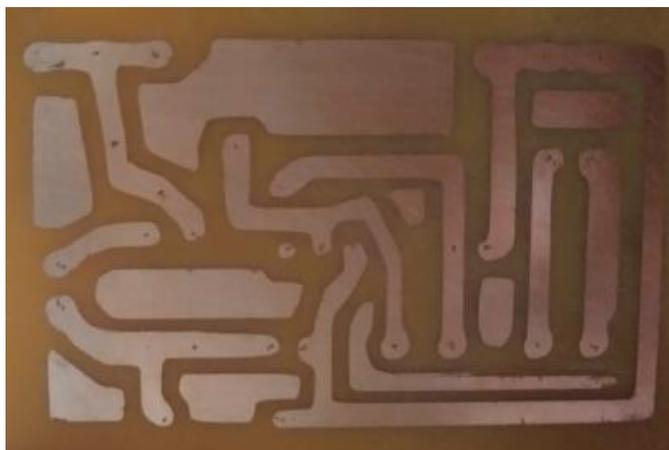


Figura 27 - Trilhas da placa de circuito impresso do projeto.

Fonte: Autor,2019.



Figura 28 - Placa de circuito impresso do projeto finalizada

Fonte: Autor,2019.

A placa de circuitos auxiliares aos sensores foi criada utilizando uma impressora de corte, inserindo um papel adesivo transparente, que foi recortado conforme o desenho da figura 27, posteriormente a placa foi submetida a um banho de uma substância chamada percloro de ferro, substância que corroeu as trilhas que não estavam protegidas pelo papel adesivo.

Os terminais dos sensores de temperatura e o sensor de corrente são conectados a esta placa para que assim seja possível estabelecer suas conexões com o microcontrolador e todos os outros componentes necessários para o seu funcionamento adequado. O optoaclopador TIL116, está contido em uma placa específica com a sua saída analógica conectada no microcontrolador e as outras duas saídas conectadas ao corpo de prova que será inserido no transformador.

Para que seja possível ligar e desligar o transformador através de um comando do microcontrolador, utiliza-se um módulo relé com acionamento em 5V e saída em 220V, desta forma é possível acionar uma contatora para que essa acione o circuito de alimentação.

Lembrando que o circuito de proteção do transformador, depende exclusivamente do dimensionamento para aquele transformador em específico, o recomendado é que sejam utilizados pelo menos um disjuntor de $\frac{1}{4}$ de ciclo, ou seja, um disjuntor capaz de desligar o circuito no período de $\frac{1}{4}$ do ciclo de onda, no caso de uma rede de 60Hz, este circuito previne danos permanentes no transformador.

4.1.2 DESCRIÇÃO DO HARDWARE E MECANISMO DE ENSAIO DE RIGIDEZ DIELÉTRICA

O ensaio de rigidez dielétrica, de acordo com as normas técnicas deve ser realizado através de um equipamento específico, capaz de elevar sua tensão gradativamente até que a tensão seja capaz de romper o dielétrico do óleo isolante.

Como a proposta deste trabalho é criar uma bancada de baixo custo, se tornaria inviável reproduzir uma fonte de tensão semelhante as fontes de alta tensão ajustáveis que são utilizadas em ensaios de rigidez dielétrica em grandes companhias, afinal são necessários componentes exclusivos e fora do orçamento do para este projeto.

Portanto, para medir a rigidez dielétrica sem variar a tensão, e sim variando distância entre um eletrodo e outro, como a rigidez dielétrica é a razão entre a tensão e a distância necessária para que essa tensão possa conduzir energia elétrica. Baseando-se neste princípio, fora elaborado um mecanismo para transmitir o movimento de um motor de passo para um eixo vertical que aproxima os dois eletrodos. Foram utilizados um fuso acoplado a uma polia para transmitir movimento de rotação do motor de passo para o movimento de uma engrenagem, como pode ser observado na figura 29.

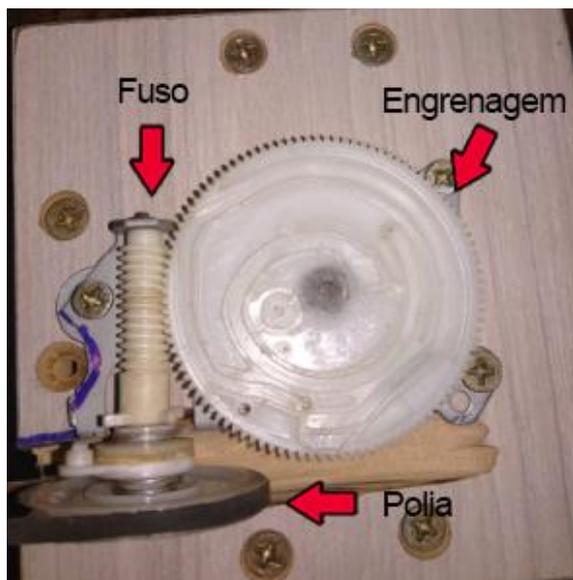


Figura 29 - Esquema polia, fusão e engrenagem da máquina de ensaio de rigidez dielétrica.

Fonte: Autor, 2019.

Cada volta do parafuso acoplado na polia, transfere o seu movimento para um movimento de rotação da engrenagem na mesma imagem, que contém um total de 104 engrenagens, ou seja, são necessários 104 voltas do motor de passo para que sejam transferidas 104 voltas para a polia acoplada ao fusão faça uma volta completa na engrenagem, e cada volta completa na engrenagem corresponde 1/12 cm de movimento vertical no eletrodo de ensaio, o que garante uma velocidade de descida muito lenta, proporcionando uma melhor precisão na medida.



Figura 30 - Estrutura da máquina de ensaio de rigidez dielétrica.

Fonte: Autor,2019.

O hardware da máquina de ensaio de rigidez dielétrica é composto pelos seguintes componentes:

- Bateria Power Bank 4V;
- Fonte de tensão 220V/12V;
- Circuito abaixador de tensão DC – DC 5V;
- Chave de segurança;
- Fusível 1A;
- Fonte de tensão pulsante 15KV;
- Sensor de Corrente ASC712;
- Relé de contato 5V/220VAC.

A fonte de tensão alimenta o circuito abaixador de tensão DC 5V, que por sua vez carrega a bateria do *power bank*. Sendo está responsável por ligar a fonte de tensão pulsante assim que o relé for acionado, energizando os eletrodos de prova. O sensor de corrente ASC712 é responsável por detectar a passagem de corrente pelos eletrodos enviando o comando para que o sistema e finalizando o ensaio.

5. ANÁLISE DE SOFTWARE E INTERFACE GRÁFICA COM LABVIEW 2018

A interface do supervisor foi criada com o software LabVIEW 2018, o projeto foi elaborado utilizando uma estrutura chamada de máquina de estados orientada a eventos, que também pode ser representada através de redes de Petri. Existem um total de 6 programas que funcionam de maneira paralela e interconectada em uma mesmo executável, sendo eles:

- Interface Inicial;
- Interface de cadastro de transformadores;
- Interface de cadastro de óleos isolantes;
- Interface de ensaio de transformadores;
- Interface de ensaio de rigidez dielétrica;
- Interface de geração de relatórios.

Essas interfaces do supervisórios tem como objetivo cumprir diversas funções, sendo elas: Cadastro de usuários, leitura e gravação de banco de dados, processos de ensaio, geração de relatórios e comunicação com o micro controlador.

Também são utilizados outros softwares como apoio, sendo eles, o Microsoft Access, software utilizado para o gerenciamento do banco de dados, os comandos de leitura e escrita do banco de dados são realizados utilizando comando SQL gerenciados pelo microcontrolador.

Toda programação foi baseada em uma estrutura de máquina de estados orientada a eventos, ou seja, é uma máquina de estados onde os eventos de interação do usuário causam a mudança de estado, isso ocorre quando um usuário pressiona algum botão, ou realiza algum tipo de interação com a máquina.

Seguindo as recomendações na *National Instruments*, a estrutura de fluxo de dados do software utiliza apenas uma tela do computador para armazenar toda estrutura de fluxo de dados, o que só é possível graças ao uso das máquinas de estado orientadas a eventos, que possibilita que a organização do código seja muito mais organizada e inteligente. Na figura 31 podemos observar uma das telas de toda essa estrutura.

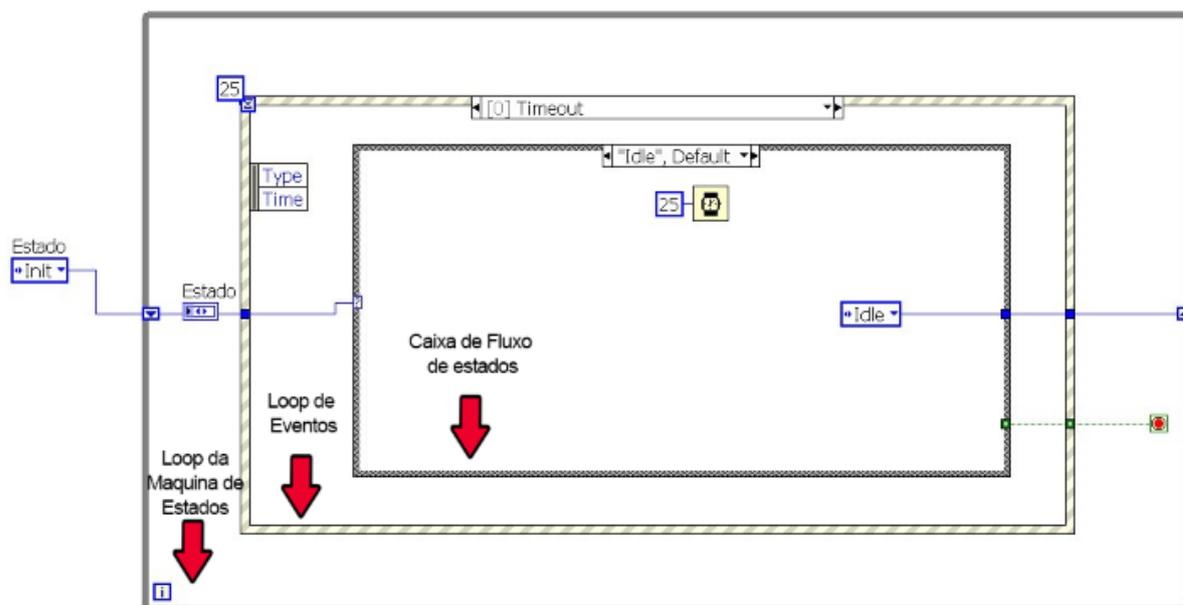


Figura 31 - Exemplo de estrutura e máquina de estados orientada a eventos.

Fonte: Autor,2019

5.1 COMUNICAÇÃO LABVIEW E MICROCONTROLADOR

Como é função do microcontrolador coletar os dados dos sensores e realizar ações, este precisa enviar e receber dados do computador via LabVIEW que pode estar instalado em qualquer computador, desde que esse possua suporte para USB (Universal Serial Bus).

O protocolo de comunicação serial entre o computador e o microcontrolador é o RS232, um dos mais comuns protocolos de comunicação existentes, foi então elaborada uma tabela de comunicação através de caracteres, onde o LabVIEW se comunica com o microcontrolador através de comando pré-estabelecidos via programação, como descrito na tabela 9.

Tabela 7 - Comandos do LabVIEW e suas respectivas respostas.

Fonte: Autor,2019

Caractere enviado pelo LabVIEW	Comando Executado pelo Microcontrolador
'z'	Liga o relé transformador.
'x'	Desliga o relé do transformador.
'm'	Gira o motor de passo para suspender o travessão.
'n'	Desliga o motor de passo do travessão.
'e'	Inicia processo de ensaio do óleo.
'f'	Requisita o número de voltas que o motor de passo já deu.
'a'	Requisita leitura dos sensores de tensão corrente e temperatura.

Quando o LabVIEW envia um caractere de solicitação para o microcontrolador, ele executa uma função de tempo de espera, para que o microcontrolador possa executar as ações necessária e imprimir o dado correspondente na porta serial.

O LabVIEW então recebe este valor, podendo armazenar e exibir, no caso de valores de sensores, ele armazena e trata os dados, já alguns dados recebidos são apenas flags que dizem que algum comando já fora executado.

A figura 32 mostra o esquemático de programação do labview para aquisição de dados dos sensores do microcontrolador, é possível observar que o fluxo de dados, ocorre da seguinte maneira, a porta serial é iniciada, escolhendo a frequência de entrada e a porta serial entre as portas disponíveis, o software envia o caractere "a" para o microcontrolador, solicitando uma leitura dos sensores. Depois que o caractere é enviado existe um tempo de espera de 500 milissegundos, então é solicitado a leitura do que está impresso na porta serial e enviado para saída, quando esse processo termina, o software limpa a porta serial e em seguida fecha a porta serial.

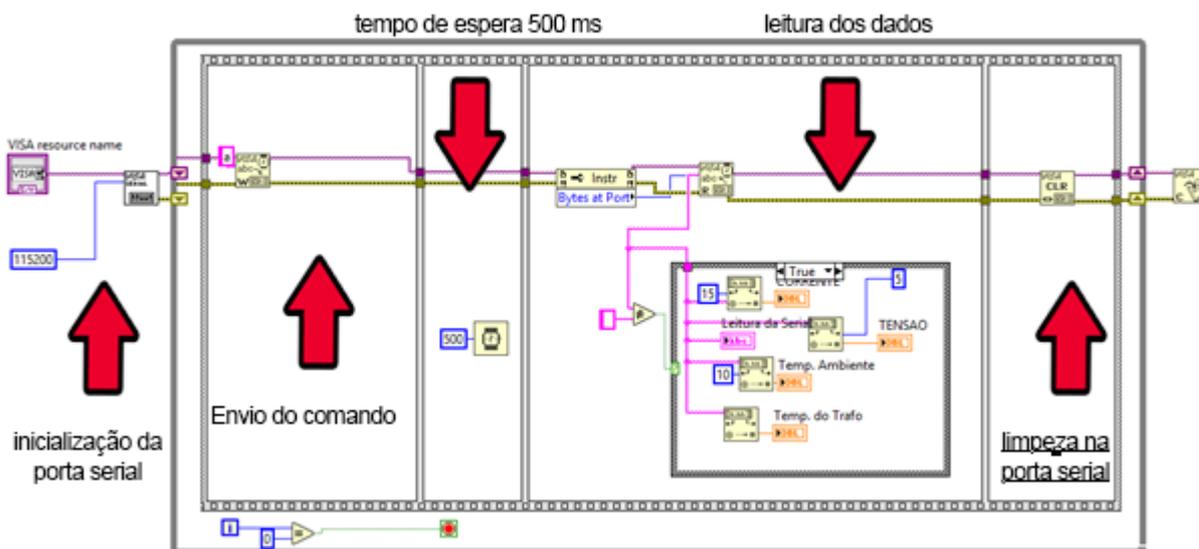


Figura 32 – Interface de solicitação de leitura de sensores no LabVIEW.

Fonte: Autor, 2019

Esse mesmo padrão de funcionamento é utilizado em todo processo de comunicação entre o supervisor e o microcontrolador, o software do LabVIEW solicita um comando e obtém a resposta em seguida.

5.2 INTERFACE INICIAL

A interface inicial é onde o usuário tem o primeiro contato com o software do supervisor, neste momento, o usuário precisa ter uma senha de acesso ou pedir para que alguém que possuía a senha necessária para realizar um novo cadastro o faça. Os dados dos usuários cadastrados são armazenados no banco de dados do associado ao software.

Depois de passar pela etapa de verificação de login e senha, o usuário finalmente terá acesso a página inicial, onde ela poderá escolher entre as opções mostradas nos botões da figura 33.

Cada uma dessas funções acontece de maneira paralela, ou seja, é possível realizar duas ações ao mesmo tempo, como “Cadastrar Transformador” e “Cadastrar Óleo”, só não é possível realizar dois tipos de ensaio ao mesmo tempo, pois só um dos ensaios irá funcionar corretamente.



Figura 33 – Interface inicial com LabVIEW.

Fonte: Autor,2019

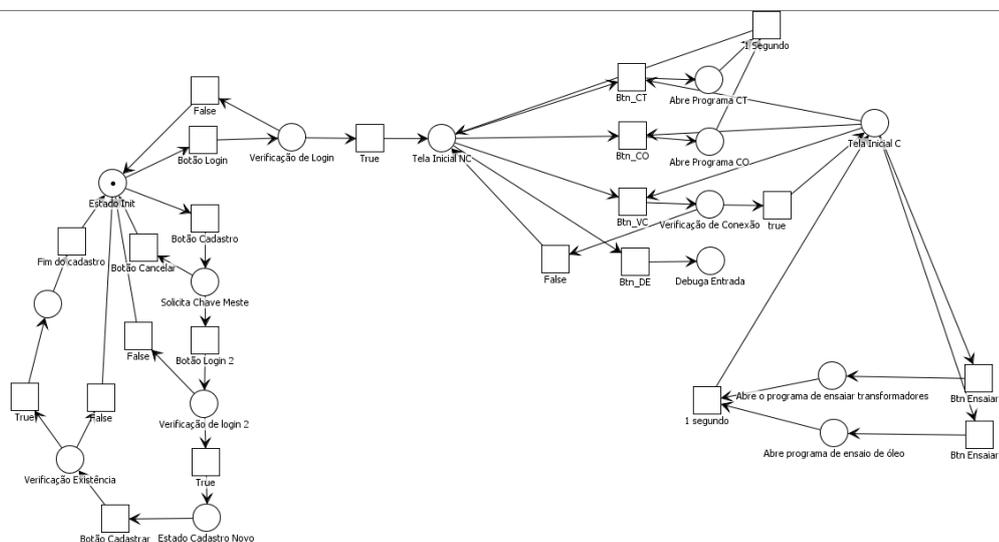


Figura 34 – Rede de petri da interface inicial da interface do programa.

Fonte: Autor,2019

5.3 INTERFACE DE CADASTRO DE ÓLEOS ISOLANTES

O cadastro de amostras de óleo é realizado por uma VI paralela que é iniciada através da VI principal, a função dessa VI é cadastrar novas amostras no banco de dados, para que essas possam ser ensaiadas posteriormente.

Os campos que podem ser cadastrados, são baseados nos parâmetros de análise da vida útil de óleos isolantes, como citado no capítulo 2, também é possível cadastrar o projeto e um ID única para cada amostra, que não pode ser repetida.

Os dados cadastrados nessa etapa são:

- ID;
- Projeto;
- Tipo do óleo (Mineral ou vegetal);
- Cor e Aspecto (0 a 8);
- Teor de água (mgH₂O/kg);
- Índice de acidez (mgKOH/g óleo);
- Teor de inibidor antioxidante (%).

Com a leitura desses parâmetros é possível criar um relatório de diagnóstico que pode mostrar se um determinado óleo isolante está perto do fim de sua vida útil. Comparando os dados inseridos com os dados limite aceitáveis para estes mesmos parâmetros, criando um relatório de diagnóstico em um momento futuro. A tela de cadastro pode ser observada na figura 35.

Figura 35 - Tela de cadastro de óleos isolantes.

Fonte: Autor,2019.

A rede de PETRI desta VI, é consideravelmente menos complexa que a VI da tela inicial, afinal esta VI verifica se o ID inserido já foi cadastrado, se já está cadastrado, exibe uma mensagem de alerta, pedindo outra ID, se a ID não está cadastrada ela realiza o cadastro dos dados normalmente, utilizando comandos SQL e encerra a aplicação, a rede de PETRI dessa VI pode ser observada na figura 36:

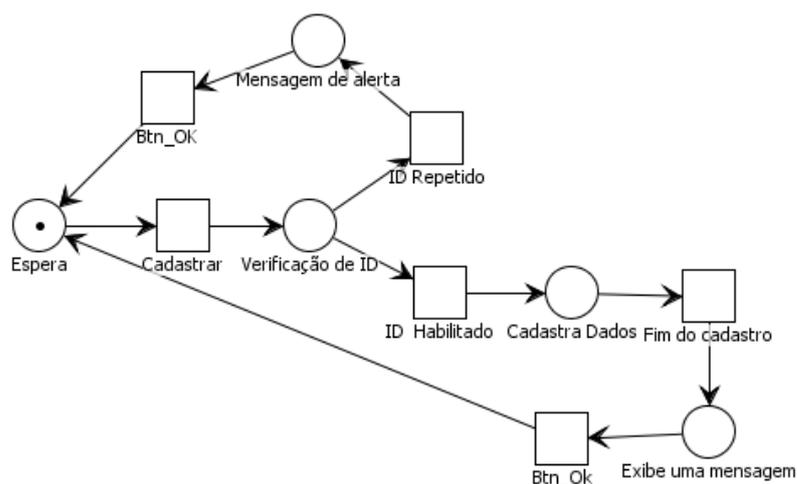


Figura 36 – Rede de petri da tela de cadastros de amostras.

Fonte: Autor,2019.

5.4 INTERFACE DE CADASTRO DE TRANSFORMADORES

A Interface de cadastro de transformadores funciona de maneira quase idêntica a interface de cadastro de óleos isolantes. A única mudança está nas variáveis de entrada, a rede de PETRI é a mesma figura 35, já as variáveis são as seguintes:

- ID;
- Projeto;
- Comprimento;
- Altura;
- Largura;
- Tipo do transformador;
- Material do núcleo.

Figura 37 – Interface cadastro de transformadores com LabVIEW.

Fonte: Autor, 2019

5.5 INTERFACE DE ENSAIO DE RIGIDEZ DIELÉTRICA

O ensaio de rigidez dielétrica é realizado através do cálculo da distância do travessão com o eletrodo cobre até a outra ponta de prova dentro do tubo de ensaio. Quando o ensaio é iniciado, o travessão desce devagar e o software calcula a distância baseado no número de voltas do motor de passo, quando a corrente elétrica circula no fluido de ensaio, ela é detectada pelo sensor ACS712, que envia uma resposta analógica para o microcontrolador e disparando o comando de parada e gravação dos resultados em banco de dados, depois é necessário reposicionar o motor, então existe um botão específico para realizar essa reposição, elevando o eletrodo de cobre até o final do seu curso.

As figuras da interface de ensaio de rigidez dielétrica e sua respectiva rede de PETRI podem ser observadas nas figuras 38 e 39.

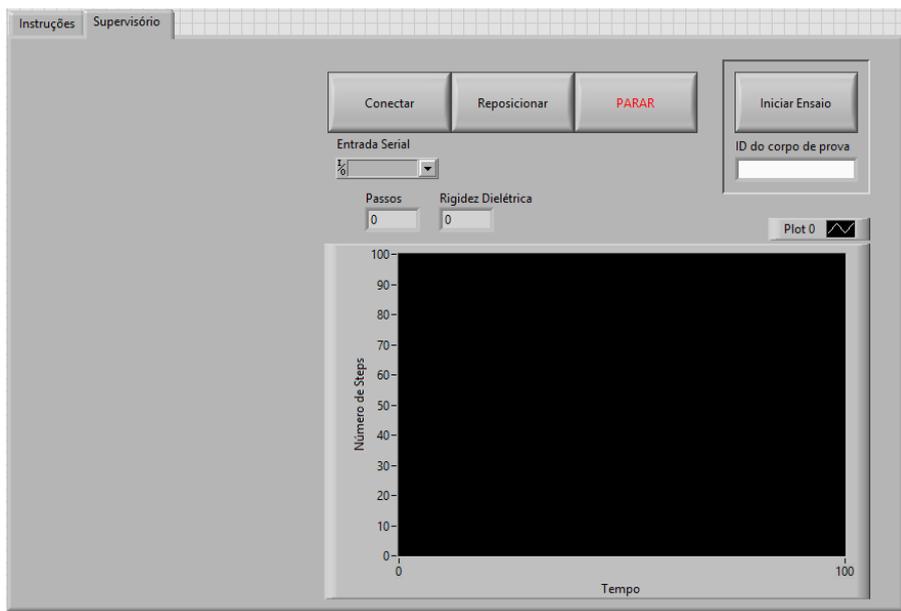


Figura 38 – Interface análise de temperatura com LabVIEW.

Fonte: Autor,2019.

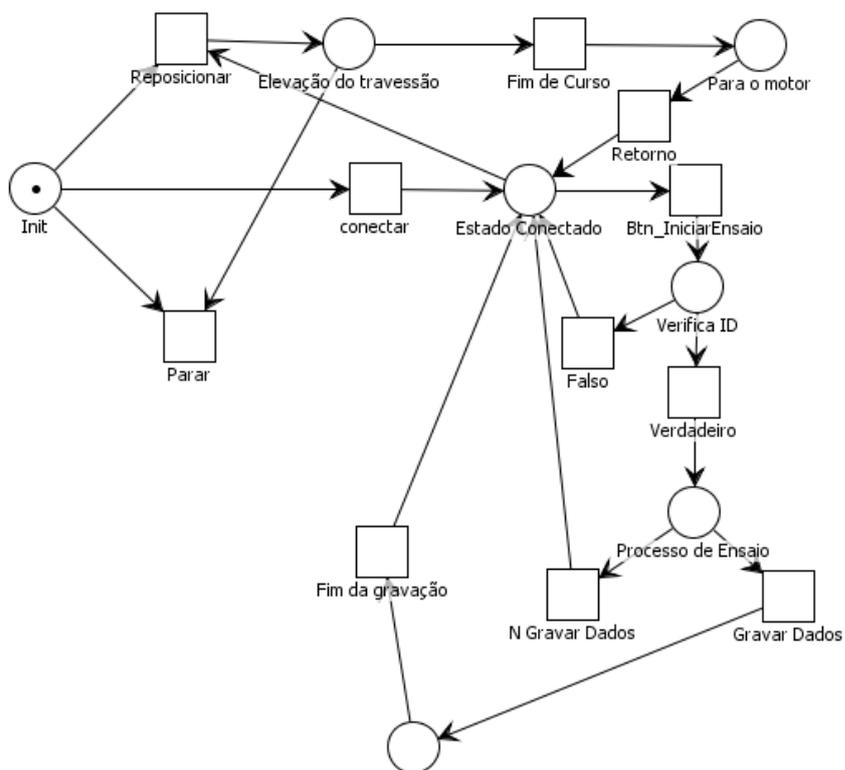


Figura 39 – Rede de petri da interface análise de temperatura com LabVIEW.

Fonte: Autor,2019.

A tela apresenta o valor do número de voltas, o número de passos, e uma evolução da distância ao longo do tempo, também existe um campo para inserir o ID do corpo de prova, para evitar ensaios repetidos.

5.6 INTERFACE DE ENSAIO DE TRANSFORMADORES

Ao iniciar a tela de ensaio de transformadores, o usuário irá se deparar com 3 abas distintas, uma aba referente a tela inicial antes do ensaio, outra com dados de temperatura e outra com dados de tensão e corrente.

Na tela inicial o usuário encontra as instruções para utilização correta da máquina e campos de aquisição informações necessárias, para iniciar a aplicação, sendo elas a frequência de amostragem do banco de dados, tempo de ensaio em segundos, e o número de identificação (ID) do transformador. A figura 40 ilustra a tela inicial da interface de ensaio de transformadores.



Figura 40 – Interface de ensaio de transformadores com LabVIEW.

Fonte: Autor,2019.

As demais abas da interface mostram gráficos de tensão, corrente, temperatura ambiente e temperatura do ponto mais quente em tempo real. A rede de PETRI desse sistema de ensaio foi a mais complexa de todas, por causa do sistema produtor consumidor, a figura 41 mostra a rede de petri da estrutura de ensaio:

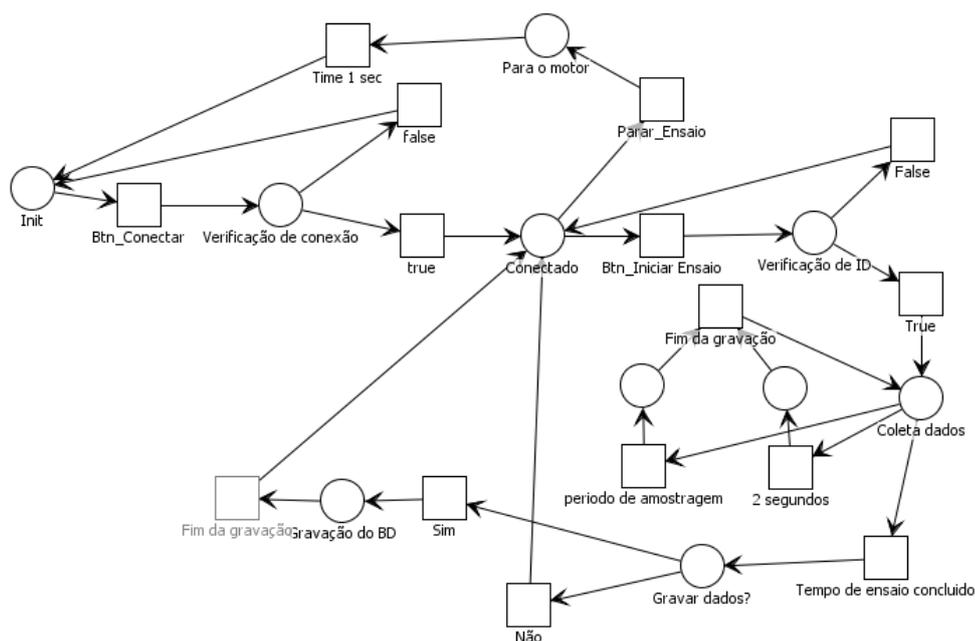


Figura 41 – Rede de Petri do ensaio de transformadores.

Fonte: Autor, 2019.

5.6.1 Estrutura Produtor Consumidor

Durante o ensaio de transformadores, existe um problema de sincronização de frequências, pois existem 3 frequências diferentes que operam utilizando os mesmos dados, sendo elas, frequência de coleta de dados dos sensores, frequência de gravação no banco de dados e frequência de atualização do sensor.

A solução para esse tipo de problema, é a utilização de uma estrutura chamada produtor-consumidor, no caso da aplicação deste trabalho, temos como produtor, a aquisição de dados do microcontrolador, e como consumidores a atualização da tela do supervisor e a atualização do banco de dados.

Utilizando uma estrutura produtor consumidor, cada laço pode operar na sua própria frequência, capturando todos os dados em tempo real, ou seja, os dados mais atualizados, para isso basta capturar o último valor da fila.

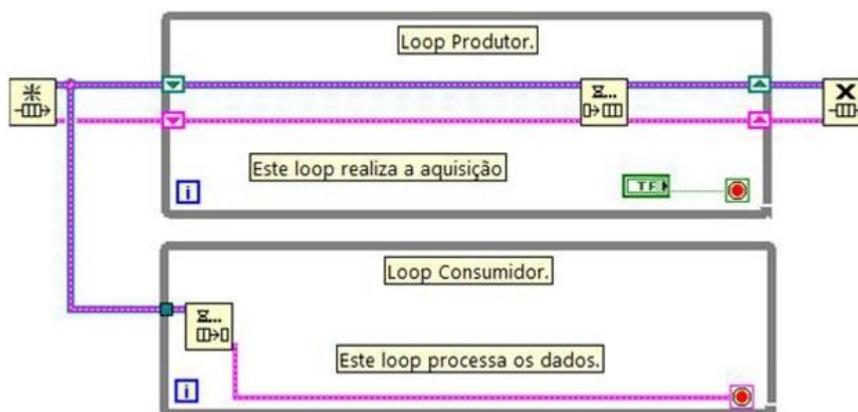


Figura 42 – Exemplo de estrutura produtos consumidor com LabVIEW

Fonte: Autor,2019

5.7 INTERFACE DE GERAÇÃO DE RELATÓRIOS

Na VI de geração de relatórios, é possível realizar 3 tipos distintos de relatórios, os relatórios de transformadores, relatórios de projeto e relatórios de óleos isolantes.

Basta selecionar a opção desejada e escolher o nome para o arquivo final e o relatório será gerado em um arquivo do tipo CSV, com os dados separados por vírgulas, a VI faz a busca dos valores no banco de dados e exporta para um arquivo final.

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo é destinado a discutir a respeito dos resultados obtidos com este projeto de trabalho de conclusão de curso, sendo este dividido em das partes respectivamente, máquina de ensaio de transformadores e máquina de teste de rigidez dielétrica respectivamente.

6.1 MÁQUINA DE ENSAIO DE TRANSFORMADORES

Com a máquina de ensaio de transformadores construída e conectada ao supervisor criado no LabVIEW, e aferir o comportamento da máquina em um teste real.

Para um primeiro teste, foi escolhido um transformador de isolamento galvânico de entrada de 220V e saída e também 220V, com uma carga de 750W, devidamente conectadas todas as terminações, em primeiro lugar foi realizado um ensaio de 3 minutos no total.

Foi possível observar que a máquina era capaz de realizar coleta e tratamento de sinais dos sensores, apresentando valores muito próximos dos instrumentos de referência citados no capítulo 4, que também foram utilizados como parâmetros de comparação nesta etapa, a diferença entre os valores medidos em todos os sensores e os seus devidos instrumentos de referência não ultrapassou 9% de seus valores absolutos em todo período do ensaio.

No entanto, os sensores de temperatura apresentavam uma pequena flutuação em torno do seu valores ideais, para diminuir essa variação foi implementado um filtro média simples, coletando um total de 10 amostras e tirando a média entre esses valores, eliminando a flutuação.

O sistema apresentou uma certa limitação em sua velocidade de processamento durante um ensaio, o microcontrolador demora em um tempo de aproximadamente 492 milissegundos para responder ao LabVIEW quando solicitada a leitura de todos os sensores, esse tempo alto é devido as várias medições necessárias para calcular a corrente nominal e as várias aquisições do valor de temperatura para implementar o filtro média. Por este motivo, o tempo de timeout estabelecido na programação do LabVIEW foi de 500 milissegundos, desta forma a

frequência de amostragem máxima para o banco de dados é de 2Hz, caso esse valor seja ultrapassado, a leitura do banco de dados apresentará valores repetidos.

O cadastro e a geração de relatórios funcionou na maneira esperada, o sistema é capaz de reunir os dados de cadastro corretamente, reunir os dados de ensaio e criar um arquivo de saída em tipo CSV, facilitando o pós processamento de dados do usuário, como é possível observar na figura 40.

Com base nestes resultados, é possível afirmar que este sistema é capaz de monitorar os parâmetros de tensão, corrente e temperatura ao longo do tempo de maneira satisfatório para o que foi proposto neste trabalho. No entanto, para aplicações que necessitam de uma maior precisão, é necessário utilizar equipamentos mais sofisticados e que sejam aprovados para gerar laudos.

1	Relatorio	Transformador					
2							
3	ID	Projeto	Comprimento	Largura	Altura	Tipo	Material do N.º leo
4	1471	Teste	50	657	550	Transformador de corrente	N.º leo de ar
5							
6							
7							
8	Tempo	Tensao	Corrente	Temperatura ambiente	Temperatura do transformador		
9	0.00	216	0.00	0.00	0.00		
10	1.00	216	0.17	25.34	24.85		
11	2.00	216	0.20	24.51	26.22		
12	3.00	216	0.21	24.80	25.68		
13	4.00	216	0.16	25.68	26.37		
14	5.00	216	0.20	25.63	25.29		
15	6.00	216	0.19	24.65	24.85		
16	7.00	216	0.16	24.02	25.14		
17	8.00	216	0.24	25.68	25.29		
18	9.00	216	0.22	24.70	23.48		
19	10.00	216	0.21	25.58	25.00		

Figura 43 – Relatório gerado pela máquina de ensaio de transformadores.

Fonte: Autor,2019

Também foram realizados testes para verificar se a interface estava seguindo o que fora proposto nas redes de Petri inicialmente desenhadas, neste caso todas as validações e eventos foram concluídos e implementados com sucesso, ou seja, não é possível cadastrar IDs repetidas em nenhuma linha do mesmo banco de dados, são necessárias diversas validações diferentes para passar para próxima etapa do banco dados. Conforme está descrito nas figuras do capítulo 5.

Por fim, é possível concluir que máquina está apta a ser utilizada para fins didáticos e para encontrar valores muito próximos do real em testes de

transformadores, mas devido as limitações físicas, até por ser um projeto de baixo custo, este não seria adequado para emissão de laudos.

6.1.1 Dificuldades na máquina de ensaio de transformadores

A maior dificuldade na construção dessa máquina foi encontrar boas referências para guiar a programação em LabVIEW, que apesar de ser um software que já possui mais de 10 anos no mercado, ainda possui pouco literatura disponível na internet. A montagem das conexões também foi difícil, como essa máquina possui muitos sensores externos, existe uma dificuldade muito grande em organizar os fios e as conexões de forma que o projeto fique harmônico no final da montagem.

A calibração dos sensores também foi muito difícil, afinal foi demandado muitos cálculos complexos e foi preciso recorrer a outros softwares para auxiliar na criação das curvas de ajuste, como foi o caso de o MATLAB, software que auxiliou no cálculo do método dos mínimos quadrados para encontrar a curva de ajuste do sensor de tensão optoacoplador.

6.2 MÁQUINA DE ENSAIO DE RIGIDEZ DIELÉTRICA

Logo após realizar a construção da máquina de ensaio de rigidez dielétrica, o primeiro desafio era encontrar a distância entre o fim de curso superior do travessão de ensaio e a amostra no final da máquina de ensaio. Como é sabido que a cada volta que o motor de passo realiza movimentando a segunda polia e conseqüentemente todo o sistema, equivale a uma movimentação no travessão de aproximadamente 8×10^{-3} mm, colocou-se o sistema para contar o número de voltas enquanto o travessão se deslocava para baixo, ao invés da fonte de alta tensão nos eletrodos, uma fonte de 5V com resistor de *pull-down* foi inserida com saída para o microcontrolador, quando uma ponta de ensaio encosta-se na outra, o sistema retornava o número de voltas.

Realizado este teste o valor encontrado foi de 1149 voltas, o que equivale a 0,920 centímetros aproximadamente, essa distância foi utilizada como base para todos os demais ensaios que viram a seguir.

De acordo com os dados do fabricante, a fonte de tensão pulsante possui uma tensão de saída de 15.000 volts, neste caso, esse valor de tensão é dividido pelo valor

da distância encontrada no rompimento do dielétrico para encontrar o valor da rigidez dielétrica.

Para testar a funcionalidade do sistema, foram utilizados 3 tipos de óleos isolantes diferentes, que foram coletados no mês de outubro de 2016 pelo aluno Felipe de Souza Campos, todas situadas próximo ao município de Dianópolis no estado do Tocantins. Coletas feitas de maneira amadora, afinal no local não haviam instrumentos apropriados para realizar a coleta. As amostras foram coletadas das subestações de Boa Sorte, Riacho Preto e Lagoa grande respectivamente. (Souza, 2016)

O óleo desenvolvido pela professora Maria Del Pilar, o YPF Repsol foi submetido ao ensaio na máquina de ensaio de rigidez dielétrica, após aproximadamente 50 minutos de ensaio, este apresentou uma rigidez dielétrica de 41,667 KV/mm, após 1105 voltas do motor de passo a uma distância de 0,36 mm entre os dois eletrodos de prova, na figura 41 mostra os resultados em distância, número de voltas e um gráfico de deslocamento do travessão, a parte mais importante da imagem é o valor mostrado na rigidez dielétrica, o gráfico mostra apenas o deslocamento e serve de orientação para o usuário ter o valor da distância já percorrida pelo travessão.

Os picos de nos valores do gráfico na figura 44 ocorrem quando o microcontrolador não responde a solicitação do LabVIEW em um período de 500ms, ou quando ocorre algum erro pontual de comunicação, desta forma, foi elaborada uma função que solicita novamente o valor quando a porta serial estiver vazia no momento da leitura, conforme a figura 42.

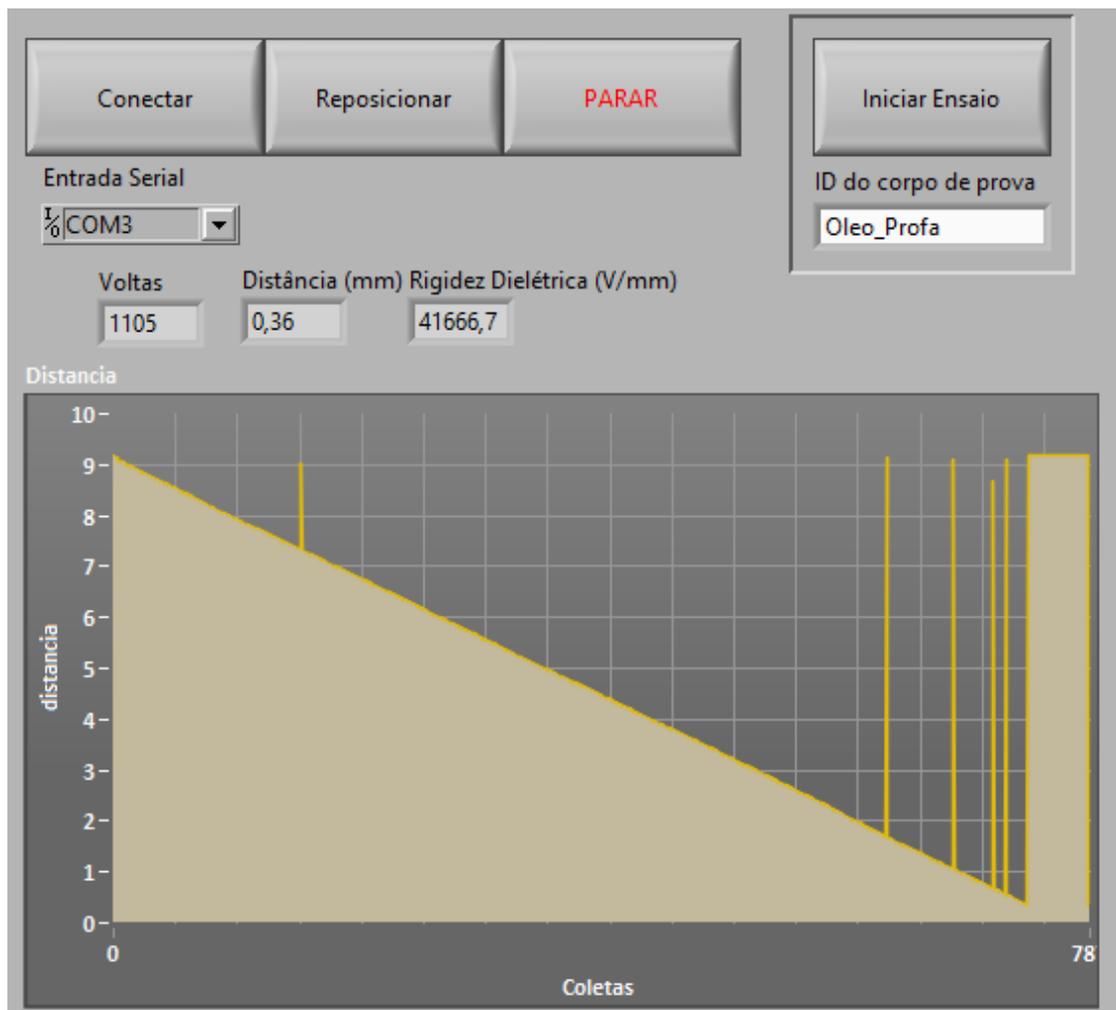


Figura 44 - Tela de ensaio finalizado do óleo YPF.

Fonte: Autor, 2019.

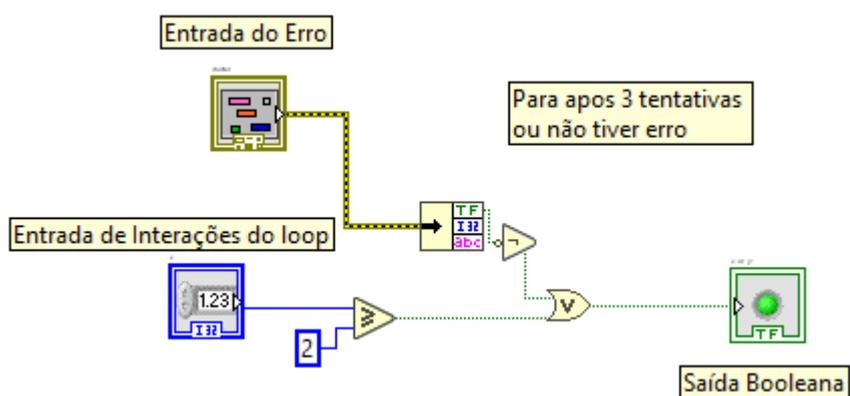


Figura 45 - Esquemático de Sub-VI anti erro de Timeout.

Fonte: Autor, 2019.

As amostras foram experimentadas na máquina de ensaio de rigidez dielétrica, cada ensaio durou em média 45 minutos de experimentação, pois o número de voltas

é muito grande para realizar um ensaio, e o sistema realiza várias pausas para enviar os dados para o LabVIEW, os resultados e comparações são descritos na tabela 8.

Tabela 8 - Relação entre Índice de acidez, rigidez dielétrica e rigidez dielétrica encontrada pela máquina do TCC.

Fonte: Autor,2019

	Índice de Acidez (mgKOH/g)	Rigidez dielétrica correlata (KV/mm)	Rigidez dielétrica ensaiada (KV/mm)	% Incerteza
SE Boa Sorte	0,17	41	40,214	3,21%
SE Lagoa Grande	0,17	41	39,154	2,89
SE Riacho Preto	0,33	22	23,888	4,07%
YPF Repsol novo	0,03	45	41,667	5,23%

Os dados de índice de acidez e rigidez dielétrica correlata foram encontrados pelo aluno Felipe de Souza, em seu trabalho de conclusão de curso, submetido e aprovado no ano de 2016 sob orientação da Professora Doutora Maria Del Pilar Hidalgo Falla.

Analisando os dados da tabela 10, podemos observar que existe uma proximidade entre os valores correlatos e valor analisado pela máquina, no entanto, por ser tratar de uma correlação feita a partir de outro ensaio, cujo número de dígitos significativos é muito baixo, não é possível ter uma aproximação precisa do valor da rigidez dielétrica deste óleo, seria necessário levar estes mesmos óleos para serem ensaiados em uma máquina certificada para emissão de laudos, equipamento este que não está disponível na universidade.

No entanto, os valores encontrados estão muito próximos dos valores estimados, mesmo que com poucos dígitos significativos de aproximação, o que demonstra que este tipo de equipamento pode ser capaz de realizar medições aproximadas da rigidez dielétrica de OVIs.

No capítulo 6 serão sugeridas diversas melhorias para tornar esse sistema mais robusto e eficiente.

6.3 CUSTO DO PROJETO

Em uma pesquisa feita no dia 01 de julho de 2019, uma máquina de ensaio de óleos isolantes de transformadores modelo HZJQ-1 Huazheng custa US\$ 2.000,00, que transferindo para cotação do dólar nesta mesma cada custa R\$ 7.700,00. O custo total do hardware e equipamentos do projeto está descrito na tabela 9.

Tabela 9 - Custos totais do projeto

Fonte: Autor,2019

Equipamento	Preço
Estrutura em madeira	R\$ 160,00
Sensor de temperatura LM335 (2x)	R\$ 17,50
Sensor de tensão TIL116	R\$ 23,00
Arduino UNO	R\$ 70,00
Placa de circuito impresso	R\$ 50,00
Motor de passo + Driver ULN 2003A	R\$ 40,00
Sensor de corrente SCT 013 030	R\$ 70,00
Módulo Relé de 2 canais	R\$ 12,00
Fonte de tensão 220V/DC ajustável	R\$ 120,00
Fonte pulsante 15kV	R\$ 30,00
Sensor de corrente ACS712	R\$ 15,00
Chave seletora com chave	R\$ 10,00
Fios e conectores	R\$ 50,00
Polias e engranagens	R\$ 10,00
Total	R\$ 677,50

6 TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros, o recomendado seria, como primeira medida uma reformulação total da estrutura mecânica de ensaio de rigidez dielétrica, pois apesar desta se mostrar funcional, ainda é muito passível de variações devido ao grande contato humano com toda a estrutura, no entanto seria necessário um investimento maior para que fosse possível criar uma estrutura mais robusta.

Outro investimento recomendado, seria aumentar o número de canais de aquisição de dados de tensão e corrente. Tendo em vista que a grande maioria dos transformadores imersos em óleo isolante são transformadores trifásicos, seriam necessários um total de 4 canais distintos para uma análise mais completa desse tipo de transformador que é trifásico.

A escolha de melhores sensores, com um range de atuação maior e maior confiabilidade também seriam excelentes aquisições para melhora do projeto como um todo, um investimento alto, mas que poderia trazer muitos benefícios a toda comunidade acadêmica.

Outra melhora importante seria a implementação das estruturas necessárias para criar um sistema completo de análise de OVI, com máquinas integradas ao supervisor para calcular o índice de acidez, teor de água e cor.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

MCROBERTS, Michael. **Arduino básico**. São Paulo: Novatec, 2011.

PEREIRA, Fábio; MSP430, Microcontroladores. Teoria e prática. São Paulo, SP: Érica, 2005.

Escola Politécnica da USP. 2014. Transformadores Teoria. São paulo, disponível em

<https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/349452/mod_resource/content/2/Transformadores_Teo_2014%20%281%29.pdf> acesso em 05 de maio de 2017.

SCARDAZZI, Alaor. Ferramentas para o **Monitoramento da Vida Útil de Transformadores**. São Paulo: Siemens, 2007. 47 slides, color. FIEE Elétrica 2007 - Empresa Siemens. Disponível em: <<http://www.tec.abinee.org.br/2007/arquivos/s1002.pdf> >. Acesso em: 26 maio 2017.

MAMEDE FILHO, João. **MANUAL DE EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS**. 3. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2011a. 778 p.

Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial. 2003. *Vocabulário internacional de termos fundamentais e gerais de metrologia*. 3. Rio de Janeiro : INMETRO, 2003. p. 75. ISBN 85-87090-90-9.

VEKEN, W. Van; BAELMANS, M.; MILEGHEM, S. Van. **New Perspectives To Overloading with Accurate Modeling of Thermal Transients in Oil-Immersed Power Transformers**. *Transmission and Distribution Conference and Exposition*, 2001

IEEE/PES Volume 1, 28 Oct.-2 Nov. 2001 Páginas :147 - 152 vol.1.

SEN, P. K.; PANSUWAN, S. **Overloading and Loss-of-Life Assessment Guidelines of Oil-Cooled Transformers**. *Rural Electric Power Conference*, 2001; 29 April-1 May 2001 Page(s):B4/1 - B4/8.

SOTAMBA, Mejía; LUIS, Jorge; MONTESDEOCA PALADINES, Moisés Eduardo. **Propuesta de implementacion de un módulo didáctico de monitoreo y control de transformadores eléctricos de distribución mediante labview, utilizando la tarjeta de interfaz NI SB-RIO**. 2012. Trabalho de Conclusão de Curso.

TRAVIS, Jeffrey; KRING, Jim. **LabVIEW for everyone: graphical programming made easy and fun**. Prentice-Hall, 2007.

M. D. G. Portella. **AVALIAÇÃO DA PRESENÇA DE INDICADORES DE OXIDAÇÃO DO PAPEL ISOLANTE TERMOESTABILIZADO EM EQUIPAMENTOS DE SUBESTAÇÕES**. Engenharia e Ciência dos Materiais, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.

ABNT, NBR. 15422 standard." **Insulating vegetable oil for electrical apparatus**". **Associação Brasileira de Normas Técnicas: Rio de Janeiro, Brazil**, 2006.

NBR 5356/1993 - Transformador de Potência.

IEEE Standard C57.91-1995 - Guide for Loading Mineral Oil Immersed Transformers.

ANSI/IEEE Standard C57.92-1981 - Guide For Loading Mineral Oil Immersed Power.

IEC Publication 600354 - Loading Guide for Oil-Immersed Power Transformers. 1991

DAKIN, T. W. Electrical Insulation Deterioration Treated as a Chemical Reaction Rate Phenomenon. AIEE Transactions, Vol. 66, pp. 113-122, 1947.

PARMA, Gustavo G.; MENEZES, Benjamim R.; BRAGA, Antônio P. **A new approach to measure the PWM voltage applied to electrical machines.** In: Proceedings of the 2000 Industry Applications Conference.

HEUSER, Carlos Alberto. **Projeto de banco de dados: Volume 4 da Série Livros didáticos informática UFRGS.** Bookman Editora, 2009.

ELMASRI, Ramez et al. **Sistemas de banco de dados.** 2005.

SILVA FILHO, Demóstenes Ferreira da et al. Banco de dados relacional para cadastro, avaliação e manejo da arborização em vias públicas. **Revista Árvore**, p. 629-642, 2002.

CARDOSO, Janette; VALETTE, Robert. **Redes de petri.** Editora da UFSC, 1997.

CURY, José Eduardo Ribeiro. Teoria de controle supervisorio de sistemas a eventos discretos. **V Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente (Minicurso)**, 2001.

OLIVEIRA, João; **Redes de petri.** UFSCar, 2010. Disponível em <<http://www.cyan-lang.org/jose/courses/tg/petri.pdf>> acessado 26 de março de 2018 às 15:32

CERICOLA, Osvaldo Vicente. **Banco de dados relacional e distribuído.** Livros Tecnicos e Cientificos Editora, 1991.

Ulf Schuchardt, Ricardo Sercheli and Rogério Matheus Vargas; [Transesterification of Vegetable Oils: a Review](#); J. Braz. Chem. Soc., Vol. 9, No. 1, 199-210, 1998.

HEUSER, Carlos Alberto. **Projeto de banco de dados.** [s.l.]: Bookman, 2009.

SILVA, Claudia R. et al. Caracterização físico-química e dielétrica de óleos biodegradáveis para transformadores elétricos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental-Agriambi**, v. 16, n. 2, 2012.

ABNT, NBR. 15422 standard. " **Insulating vegetable oil for electrical apparatus**". **Associação Brasileira de Normas Técnicas: Rio de Janeiro, Brazil, 2006.**

LM335, **Precision Temperature Sensor. National Semiconductor. 2003.**

IEC Publication 600354 - **Loading Guide for Oil-Immersed Power Transformers.** 1991

EBERT, J. A. **Power Transformer Operation at Over and Underexcitation, Benefits and Consequences.** IEEE Transactions On Power Delivery, Vol. 15, Nº 1, January 2000, pp.192-196.

BROCK, Josiane et al. Determinação experimental da viscosidade e condutividade térmica de óleos vegetais. **Ciência e tecnologia de alimentos**, v. 28, n. 3, p. 564-570, 2008.

ANEXOS

ANEXO A FIRMWARE DA BANCADA

```
#include "EmonLib.h"
```

```
#include <Stepper.h>
```

```
int aux = 0;
```

```
const int stepsPerRevolution = 500;
```

```
int passos = 1;
```

```
//Inicializa a biblioteca utilizando as portas de 8 a 11 para
```

```
//ligacao ao motor
```

```
Stepper myStepper(stepsPerRevolution, 8,10,9,11);
```

```
//Pino do sensor SCT
```

```
int pino_sct = 1;
```

```
char c;
```

```
int var;
```

```
int reading1;
```

```
int reading2;
```

```
double tempA;
```

```
double tempO;
```

```
void ligatrafo()
```

```
{
```

```
digitalWrite(12, HIGH);
```

```
}

int sensorPin = A2; // select the input pin for the tensão
int sensortempamb = A3;
int sensortempoleo = A4;
int aux1;

EnergyMonitor emon1;

void setup() {
  Serial.begin(115200);
  pinMode(8, INPUT);
  pinMode(12, OUTPUT);
  myStepper.setSpeed(60);

  myStepper.setSpeed(90);

  pinMode (sensorPin, INPUT);

  //Pino, calibracao - Cur Const= Ratio/BurdenR. 1800/62 = 29.
  emon1.current(pino_sct, 29);
  //Informacoes iniciais display

}
```

```
void loop() {  
  if(Serial.available())  
  {  
    var=Serial.read();  
    if(var=='a')  
    {  
      double Irms = emon1.calclrms(1480);  
      sensorValue = analogRead(sensorPin);  
      //tempA = (analogRead(sensortempamb)* 0.789) - 190 - 273;  
      float sensorValue = 0;  
      int ReadTimes = 0;  
      for (int i1 =0; i1 < 10; i1++)  
      {  
        tempA = (analogRead(sensortempamb)* 0.489)- 273;;  
        if (tempA > 0)  
        {  
  
          sensorValue = sensorValue + tempA;  
          ReadTimes++;  
          delay(2);  
        }  
      }  
      tempA = sensorValue / ReadTimes;  
      sensorValue = 0;  
      ReadTimes = 0;
```

```
    for (int i1 =0; i1 < 10; i1++)
    {
tempO = (analogRead(sensortempoleo)* 0.489)- 273;;
if (tempO > 0)
    {

        sensorValue = sensorValue + tempO;
        ReadTimes++;
        delay(2);
    }
}
tempO = sensorValue / ReadTimes;
sensorValue = 0;
ReadTimes = 0;

if (tempA == 0)
    Serial.print("000");    // incluá 3 zeros
else if (tempA < 10)
    Serial.print("000");    // incluá 2 zeros
else if (tempA < 100)
    Serial.print("00");     // incluá 1 zero
else if (tempA < 1000)
    Serial.print("0");      // incluá 1 zero
Serial.print(tempA);
Serial.print(" ");
```

```
if (tempO == 0)
    Serial.print("000"); // inclui 3 zeros
else if (tempO < 10)
    Serial.print("000"); // inclui 2 zeros
else if (tempO < 100)
    Serial.print("00"); // inclui 1 zero
else if (tempO < 1000)
    Serial.print("0"); // inclui 1 zero
```

```
Serial.print(tempO);
```

```
Serial.print(" ");
```

```
if (sensorValue == 0)
    Serial.print("000"); // inclui 3 zeros
else if (sensorValue < 10)
    Serial.print("000"); // inclui 2 zeros
else if (sensorValue < 100)
    Serial.print("00"); // inclui 1 zero
else if (sensorValue < 1000)
    Serial.print("0"); // inclui 1 zero
```

```
Serial.print(sensorValue);
```

```
Serial.print(" ");
```

```
Serial.print(lrms);
```

```
Serial.println();  
  
}  
  
if(var=='z')  
{  
    ligatrafo();  
}  
  
if(var=='x')  
{  
    digitalWrite(12, LOW);  
}  
  
if(var=='m')  
{  
    while(1)  
    {  
        myStepper.step(2000);  
        if(Serial.available())  
        {  
            var=Serial.read();  
            if(var=='n')  
            {  
                break;  
            }  
        }  
    }  
}  
  
if(var=='e') //loop de ensaio de óleo, ao iniciar o ensaio
```

```
{  
  while(1)  
  {  
    myStepper.step(-2048);  
    double Irms = emon1.calcIrms(1480);  
    passos = passos +1;  
    if (analogRead(A0) > 0) // se é detectada corrente  
    {  
      while (1) // loop que avisa para o labview parar  
      {  
        Serial.println('s');  
        delay(50);  
        if(Serial.available())  
        {  
          var=Serial.read();  
          if(var=='f')  
          {  
            break;  
          }  
        }  
      }  
    }  
    while (1) // enviando o numero de passos  
    {  
      if(Serial.available())  
      {  
        var=Serial.read();
```

```
if(var=='a')
{
while (1)//laço que envia o valor final intermitantemente
{
Serial.println(passos);
if(Serial.available())
{
var=Serial.read();
if(var=='j')
{
break;
}
}
}
passos = 1;
aux = 1; // variavel para quebrar o laço while anterior
break;
}
}
}
if (aux == 1)
{
aux = 0;
break;
}
```

```
if(Serial.available())
{
  var=Serial.read();
  if(var=='n')
  {
    passos = 1;
    break;
  }
  if(var=='r')
  {
    Serial.println(passos);
    delay(100);
  }
}
}
} // fim do loop de ensaio de oleo
}
```