

**Desenvolvimento de um protótipo de sensor óptico para medição de parâmetros de óleos
para transformadores**

**Development of an optical sensor prototype for measuring oil parameters for
transformers**

**Desarrollo de un prototipo de sensor óptico para medir parámetros de aceite para
transformadores**

Recebido: 09/09/2020 | Revisado: 12/09/2020 | Aceito: 26/09/2020 | Publicado: 27/09/2020

David Martins Leite

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9505-2919>

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, Brasil

E-mail: davidmartinsleite@hotmail.com

Kilbert Amorim Maciel

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7374-2847>

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, Brasil

E-mail: kilbert.maciel@ifce.edu.br

José Wally Mendonça Menezes

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2605-8633>

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, Brasil

E-mail: wally@ifce.edu.br

Glendo de Freitas Guimarães

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1505-6619>

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, Brasil

E-mail: glendofreitas@ifce.edu.br

João Isaac Silva Miranda

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8895-9643>

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, Brasil

E-mail: isaac.miranda@ifce.edu.br

Guilherme Matias de Medeiros

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7546-3152>

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, Brasil

E-mail: guilherme.matias@ifce.edu.br

Robson dos Santos Sampaio

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5991-055X>

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, Brasil

E-mail: robsonsampaio90@gmail.com

Resumo

Este artigo consiste na construção de um protótipo de sensor óptico, para análise da qualidade físico-química do óleo utilizados em transformadores. Para tanto, utilizamos um leque de amostras de óleos, retiradas de diferentes transformadores, em diferentes condições, cujas informações foram armazenadas em um banco de dados que permitisse caracterizá-las de forma a criar um conjunto de amostras que retratam ao máximo as condições de contorno necessárias a possibilitar uma maior segurança no sensoriamento e utilização da optoeletrônica. Com o intuito de obter uma maior precisão, foram realizadas longas séries de medições, utilizando mais de 100 amostras de óleo mineral em pouco mais de 2.000 simulações, visando garantir ao protótipo o atendimento das métricas relacionadas à qualidade do óleo e maior acurácia ao estudo. A técnica óptica utilizada para o desenvolvimento do protótipo foi a fluorescência, varrendo as regiões UV, Visível e IR com o objetivo de encontrar o comprimento de luz ideal para uma medição precisa e que atendesse às normas técnicas e aos parâmetros já adotados e consolidados nesta indústria. Para efeito de análise dos resultados, foram empregadas as técnicas de FTIR, UV-VIS, fluorescência, métodos matemáticos como: coeficiente de determinação R², regressão parcial de mínimos quadrados, mínimos múltiplos e Savitzky-Golay. A pesquisa comprovou, através de simulações, medidas diversas e prototipagem dos circuitos de hardware e software, a aplicabilidade viável desta proposta de implementação, apresentando um protótipo de sensor óptico para medição de parâmetros de óleos para transformadores.

Palavras-chave: Fluorescência; Óptica; Espectro de onda; PLS; Óleo mineral; Protótipo.

Abstract

This article consists of the construction of an optical sensor prototype, for analysis of the physical-chemical quality of the oil used in transformers. For that, we used a range of oil samples, taken from different transformers, under different conditions, whose information was stored in a database that would allow them to be characterized in order to create a set of samples that portray the boundary conditions as much as possible. necessary to enable greater security in the sensing and use of optoelectronics. In order to obtain greater precision, long

series of measurements were carried out, using more than 100 samples of mineral oil in just over 2,000 simulations, aiming to ensure the prototype met the metrics related to oil quality and greater accuracy to the study. The optical technique used for the development of the prototype was flowering, scanning the UV, Visible and IR regions in order to find the ideal light length for an accurate measurement and that met the technical standards and parameters already adopted and consolidated in this industry . For the purpose of analyzing the results, the techniques of FTIR, UV-VIS, fluorescence, mathematical methods were used, such as: coefficient of determination R², partial regression of least squares, multiple minimums and Savitzky-Golay. The research proved, through simulations, different measures and prototyping of the hardware and software circuits, the feasible applicability of this implementation proposal, presenting a prototype of an optical sensor for measuring oil parameters for transformers.

Keywords: Fluorescence; Optics; Wave spectrum; PLS; Mineral oil; Prototype.

Resumen

Este artículo consiste en la construcción de un prototipo de sensor óptico, para el análisis de la calidad físico-química del aceite utilizado en transformadores. Para eso, utilizamos una gama de muestras de aceite, tomadas de diferentes transformadores, bajo diferentes condiciones, cuya información se almacenaba en una base de datos que permitiría caracterizarlas para crear un conjunto de muestras que retrataran las condiciones de contorno en la mayor medida posible. necesaria para permitir una mayor seguridad en la detección y uso de optoelectrónica. Con el fin de obtener una mayor precisión, se realizaron largas series de mediciones, utilizando más de 100 muestras de aceite mineral en poco más de 2.000 simulaciones, con el objetivo de asegurar que el prototipo cumpliera con las métricas relacionadas con la calidad del aceite y una mayor precisión al estudio. La técnica óptica utilizada para el desarrollo del prototipo fue la floración, escaneando las regiones UV, Visible e IR con el fin de encontrar la longitud de luz ideal para una medición precisa y que cumpliera con los estándares y parámetros técnicos ya adoptados y consolidados en esta industria. . Para el análisis de los resultados se utilizaron las técnicas de FTIR, UV-VIS, fluorescencia, métodos matemáticos, tales como: coeficiente de determinación R², regresión parcial de mínimos cuadrados, mínimos múltiples y Savitzky-Golay. La investigación demostró, mediante simulaciones, diversas medidas y prototipos de los circuitos hardware y software, la factible aplicabilidad de esta propuesta de implementación, presentando un prototipo de sensor óptico para medir parámetros de aceite para transformadores.

Palabras clave: Fluorescencia; Óptica; Espectro de ondas; PLS; Aceite mineral; Prototipo.

1. Introdução

Transformadores de potência são os componentes mais críticos e caros no sistema de transmissão de energia. Falhas catastróficas destes componentes podem ocorrer sem aviso prévio, tais como ruptura dielétrica e descargas parciais, resultando em sérios derramamentos de óleo, incêndios, danos extensos a equipamentos adjacentes e grande perturbação no sistema elétrico. Tais situações podem gerar prejuízos da ordem de milhões de reais (Bechara, 2010).

A ruptura dielétrica é uma das principais causas de falhas de transformadores de energia e, muitas vezes, descargas parciais (DPs) estão envolvidas nessas avarias dielétricas, como também a degradação da propriedade de isolamento do óleo do transformador (Antonello, 2006).

Caso não haja a devida manutenção na troca do óleo dentro dos transformadores de potência, é possível que ocorra mau funcionamento destes, o qual varia de pequenos aquecimentos a falha total, o que, conseqüentemente, pode causar explosões graves. Já a troca muito antecipada, além de submeter a empresa a um gasto de tempo e esforço desnecessários, gera gastos com manutenção e impede o funcionamento do equipamento durante a troca de óleo, de modo que, na ausência de um equipamento reserva, a produção é comprometida (Godinho, 2014).

O equipamento apresentado tem a capacidade de medir a qualidade de óleos minerais de transformadores de forma rápida e prática. Essa medição pode ser feita em campo, devido a mobilidade do equipamento, possuindo uma interface que permite a interpretação da qualidade do óleo medido em tempo real.

Analisar diversos tipos de óleos minerais, que compõem os transformadores, com um intuito de desenvolver protótipo de sensor óptico para medição de parâmetros de óleos para transformadores, de maneira rápida e eficiente, quer em campo ou remotamente. Em se tratando de transformadores, existem diversos tipos de óleos que podem ser utilizados, sendo eles: óleo mineral e óleo vegetal. O óleo mineral está dividido em duas classes, naftênico e parafrênico. Neste estudo focaremos os óleos minerais por sua melhor e mais apropriada aplicação em transformadores de alta potência (Antonello, 2006).

Utilizaremos uma análise espectral, observando as diferenças em cada faixa do espectro de onda, mapeando os óleos em diferentes estados de qualidade, criando um banco

de dados que foi tratado de modo a permitir uma análise dos diversos parâmetros relacionados à qualidade do óleo. Foi ainda utilizado o método Partial Least Squares (PLS), para tratar os dados, classificá-los e montar um sistema baseado em variação espectral, visando identificar, de forma simples, novas análises de óleos em campo e permitir identificar se o mesmo continua apto, ou não, a utilização nos transformadores (Palou et al., 2017).

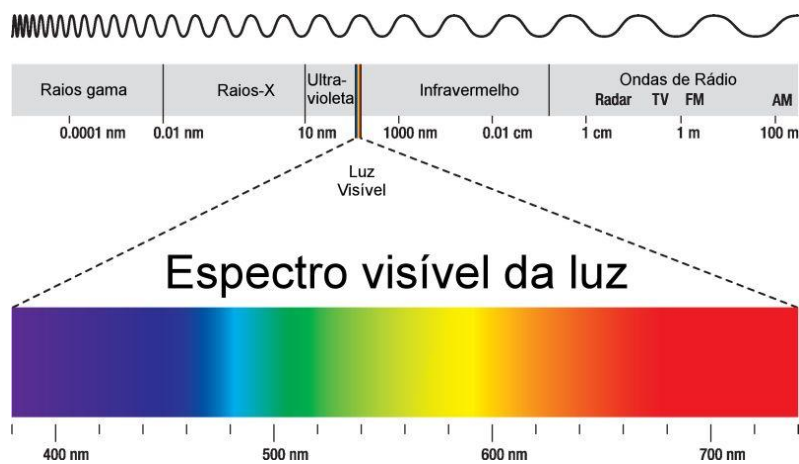
Com base nos estudos feitos por (Abbas et al., 2006), (Abu-siada et al., 2012), (Benounis et al., 2008), (Bruzzoniti et al., 2012), percebemos uma necessidade de criar um sistema de medição, o que nos motivou a definir e propor um protótipo que viesse a contribuir para medição de parâmetros de óleos para transformadores.

2. Metodologia

Pode-se definir espectro de luz como as séries de bandas de frequências dispersas e dispostas na ordem dos respectivos comprimentos de onda. O espectro de luz pode ser relacionado com a intensidade de qualquer radiação ou movimento exibido como uma função de frequência ou de comprimento de onda. Cada cor tem um comprimento de onda específico, por exemplo, a luz vermelha tem um comprimento de onda de 660 nm, enquanto que a luz verde tem um comprimento de onda de 520 nm. Assim, os diferentes componentes da luz são caracterizados por um comprimento de onda específico. A soma de todos os componentes, isto é, de todos os comprimentos de onda, é chamada espectro. Mais especificamente, um espectro representa uma distribuição de energia radiante. Por exemplo, o espectro eletromagnético da luz visível varia de aproximadamente 390 nm a aproximadamente 780 nm, como pode ser visto na Figura 1 (Roychoudhuri; Vandergriff, 2009).

De acordo com a faixa de frequência é possível trabalhar com espectro de luz visível ou não visível, com foco na melhor detecção dos espectros. Neste trabalho utilizaremos a luz visível, ultravioleta e infravermelho para realizar testes de medições e características específicas, os quais serão abordados no decorrer deste trabalho (Stedwell; Polfer, 2013).

Figura 1. Espectro eletromagnético.

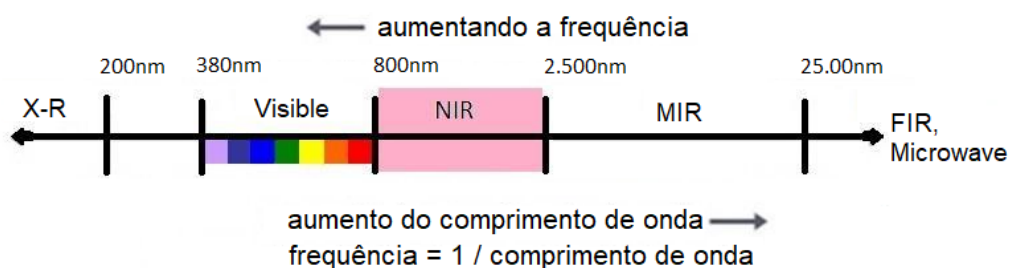


Fonte: Peter Hermes Furian.

A faixa do infravermelho ou IR (*InfraRed*) compreende comprimentos de 780 nm a 10.000 nm. No espectro IR, as bandas de absorção são caracterizadas por um número de onda, no qual ocorre a absorção (correspondente às ligações químicas) e a intensidade de absorção (proporcional à quantidade da substância da amostra), na Figura 1 são mostrados tipos de IR (NIR, MIR e FIR) (Stedwell; Polfer, 2013).

Das faixas de frequência utilizadas, a região do infravermelho é dividida em três faixas, conforme Figura 2: o infravermelho próximo ou NIR (*Near Infrared*), que é a região mais próxima da região visível, que tem um alcance de 770nm a 2500 nm; o infravermelho médio ou MIR (*Middle Infrared*), que tem um alcance de 2500 a 25.000 nm, e o infravermelho distante ou FIR (*Far Infrared*), que tem um alcance de 25.000 a 1.000.000 nm (Roychoudhuri; Vandergriff, 2009).

Figura 2. Faixa de frequência NIR, MIR e FIR



Fonte: Autores.

A luz ultravioleta é uma luz com comprimento de onda menor que ± 400 nm, o limite inferior da faixa visível de comprimento de onda. Definições diferentes são usadas para

distinguir diferentes regiões espectrais: A região espectral UV próximo varia de 400 nm a 300 nm. A região UV média varia de 300 a 200 nm, e comprimentos de onda mais curtos, de 200 nm a 10 nm, pertencem à região UV distante. Comprimentos de onda ainda mais curtos pertencem ao UV extremo (EUV) (Chen et al., 2016).

A luz UV encontra uma ampla gama de aplicações, incluindo desinfecção UV de água e ferramentas, cura UV de adesivos, controle de qualidade para muitos materiais e fluorescência interessante para fins analíticos (Chen et al., 2016; Tran et al., 2016).

A fluorescência molecular é amplamente utilizada nas ciências físicas, químicas, dos materiais, biológicas e médicas como uma ferramenta de detecção, análise, visualização, investigação de propriedades locais, diagnósticos e assim por diante. De fato, os compostos fluorescentes podem ser usados não apenas para mera visualização, mas também como sondas, indicadores, sensores e traçadores para fornecer informações sobre parâmetros físicos ou químicos locais: pressão, temperatura, viscosidade, polaridade, pH, concentrações de espécies iônicas ou neutras (Chen et al., 2015).

Entre os vários processos radiativos, a fotoluminescência é causada pela absorção óptica (fóton), ou seja, a fotoexcitação. Embora o termo fotoluminescência seja preferencialmente usado na ciência dos materiais e na física e tecnologia de estado sólido, fluorescência e fosforescência, que são tipos de fotoluminescência, são termos mais usados nos óleos da química, biociência e ciência médica, onde o material luminescente é frequentemente chamado material fluorescente. Além disso, a incorporação intencional de impurezas, como metais de transição, por exemplo, em materiais hospedeiros isolantes ou semi-isolantes os tornam centros de luminescência. Tais materiais são chamados de fósforos (An et al., 2015; Li et al., 2016).

Figura 3. Princípio de medição em espectroscopia UV / VIS.



Fonte: De Caro, (2015).

A espectrofotometria é um método utilizado para medir o quanto uma substância química absorve a luz, medindo a intensidade quando um feixe de luz passa através da solução da amostra. O princípio básico é que cada composto absorve ou transmite luz em uma certa amplitude de comprimento de onda. Assim, a medida também pode ser usada para medir a quantidade de uma substância química conhecida. A espectrofotometria é muito utilizada nas áreas de biologia, físico-química, indústria e em diversos laboratórios, incluindo de análises clínicas (Viñas et al., 1992). A Figura 3 se refere ao princípio de medição em espectroscopia UV/VIS.

A aferição da efetividade do protótipo na determinação da qualidade dos óleos dos transformadores é determinada por meio do uso dos métodos quantitativos, fazendo a coleta de dados quantitativos ou numéricos por meio do uso de medições de grandezas e obtêm-se por meio da metrologia, números com suas respectivas unidades. Estes métodos geram conjuntos ou massas de dados que podem ser analisados por meio de técnicas matemáticas como é o caso das porcentagens, estatísticas e probabilidades, métodos numéricos, métodos analíticos e geração de equações e/ou fórmulas matemáticas aplicáveis a algum processo (Pereira A.S. et al., 2018).

3. Resultados e discussão

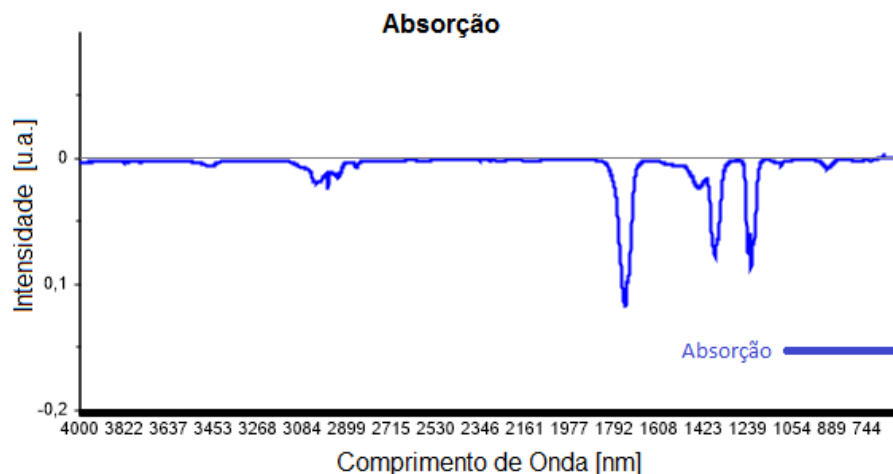
3.1. Introdução

A necessidade de desenvolver um protótipo capaz de verificar a qualidade de óleos de transformadores foi o fato motivador para esta dissertação. Uma série de equipamentos que realizam estas análises existe, porém o diferencial desta proposta está na aplicação da técnica de sensoriamento óptico. Ao longo do capítulo apresentaremos os resultados da pesquisa bem como as técnicas utilizadas para fabricação do protótipo.

3.2. Coleta de resultados iniciais

Inicialmente foram produzidos os espectros de absorção no infravermelho próximo (NIR) e médio (MIR), nas faixas 600nm a 4000nm, dos 20 óleos comprados da LIQUITEC.

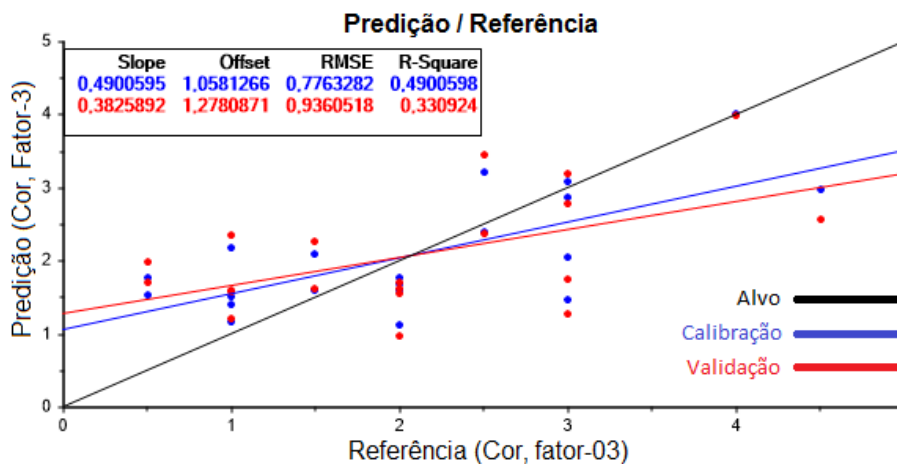
Figura 4. FTIR parâmetros de cor, absorção.



Fonte: Autores.

Na Figura 4 são mostradas as análises PLS realizadas com os espectros NIR e MIR dos óleos 20 óleos. A figura de *absorção* sempre irá vir acompanhada da figura de predição e referência.

Figura 5. FTIR parâmetros de cor, predição.



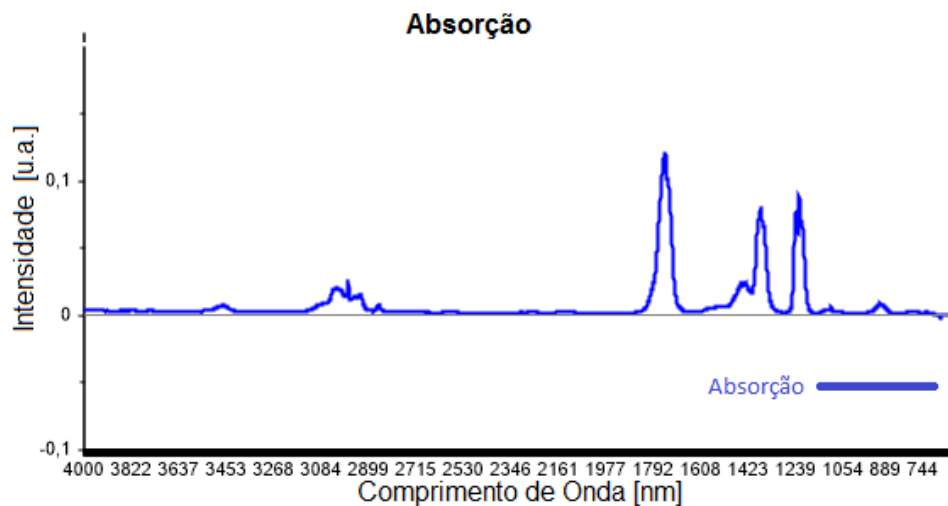
Fonte: Autores.

Em todas as figuras de predição vamos encontrar o *R-Square*, ele é o R^2 , essa variável representa a aproximação que o PLS conseguiu chegar mais próximo de um resultado ideal dos testes que foram realizados, no caso pela LIQUITEC, então essa aproximação se refere a aproximação dos teste feitos em laboratório.

Na Figura da predição (Figura 5) podemos observar os pontos de calibração (em azul) e validação (em vermelho). Os pontos em vermelho tem uma relevância importante para o

teste, validando a indicação de qual comprimento de onda deve ser aplicado em determinado parâmetro. Resumindo, é a excitação de onda ideal comum a todos os óleos.

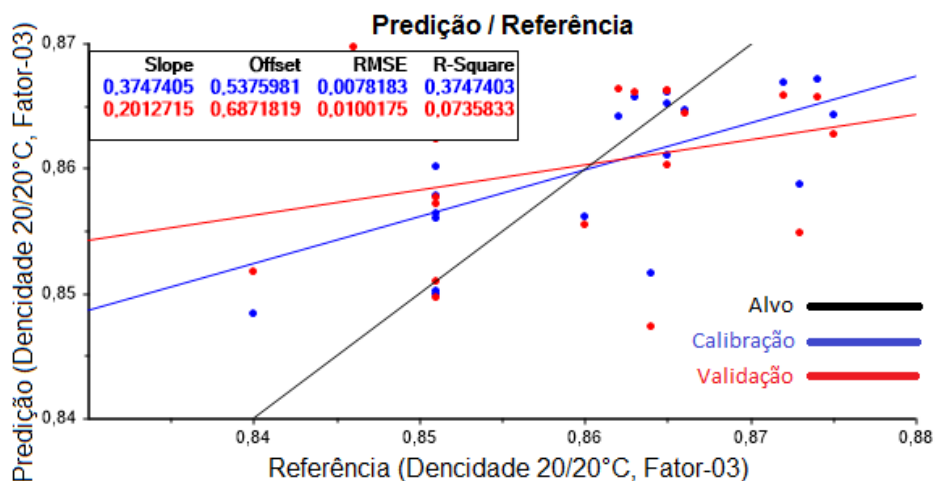
Figura 6. FTIR parâmetros de densidade, absorção.



Fonte: Autores.

A Figura 6 mostra a absorção do infravermelho com transformada de Fourier, tendo 3 picos de absorção aproximadamente em 1.795nm, 1.430nm e 1.245nm.

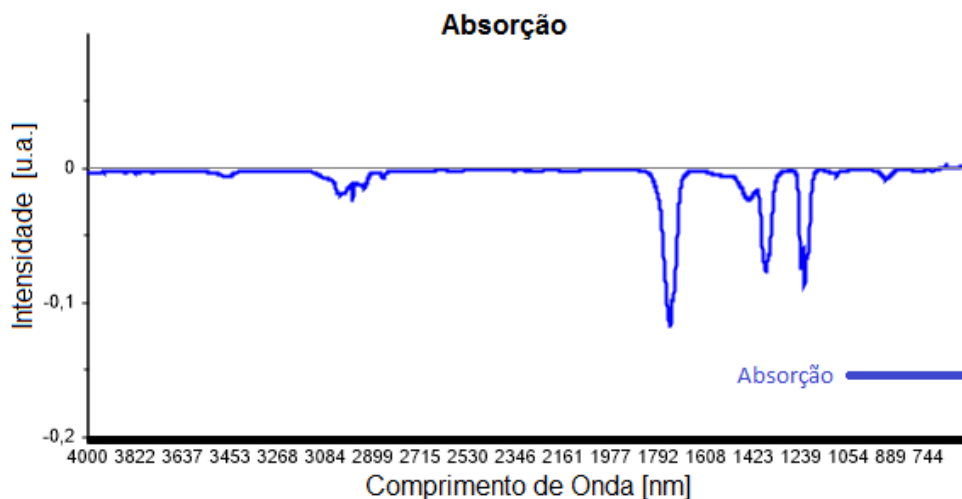
Figura 7. FTIR parâmetros de densidade, predição.



Fonte: Autores.

Caso possua uma validação relevante (*R-Square* próximo a um), conforme vemos na Figura 7, são feitos novos testes focados nestes 3 picos para localizar o melhor espectro a fim de ser utilizado para o protótipo.

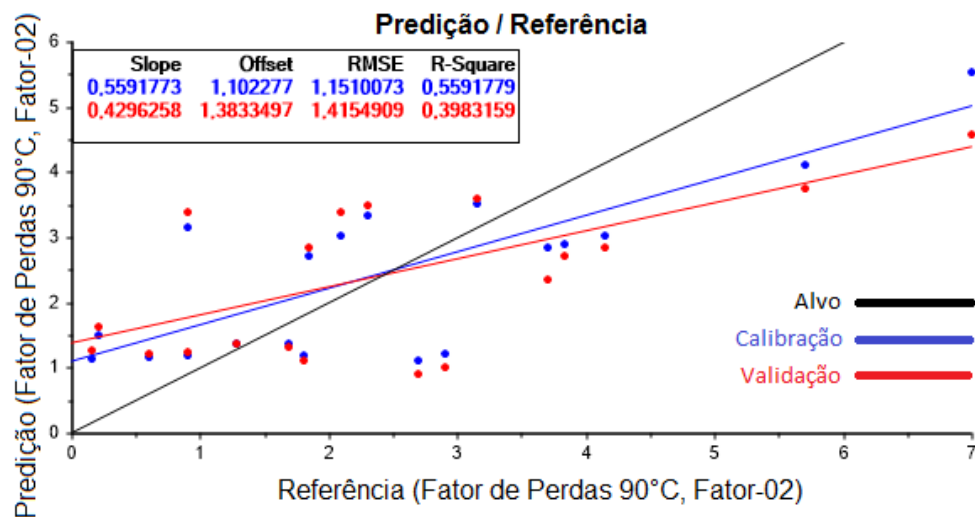
Figura 8. FTIR parâmetros de fator de perdas, absorção.



Fonte: Autores.

O fator de perdas (Figura 8) já mostra uma melhoria considerável, mas com um adendo, o RMSE (*root-mean-square error*), desvio da raiz quadrada média tem que possuir um valor baixo, esse valor deve ser abaixo de um, quanto maior for o valor mais afastado da linha do alvo (Figura 9) os pontos vão estar.

Figura 9. FTIR parâmetros de fator de perdas, predição.



Fonte: Autores.

Nas figuras até o momento analisadas é possível observar nos parâmetros curvas de predição e a validação para relações encontradas entre os espectros e os valores dos laudos.

Com a análise dos resultados do PLS foi possível verificar resultados relevantes para os seguintes parâmetros, conforme Quadro 1.

Quadro 1. Resultado do R^2 de parâmetros.

Parâmetro	Coeficiente de determinação (R^2)	
	Calibração	Validação
Cor	0,49	0,33
Tensão Interfacial	0,52	0,42
Fator de perdas	0,55	0,39

Fonte: Autores.

Até o momento foram apresentados 20 óleos que apresentam as relações entre os espectros de absorção das amostras e os parâmetros físico-químicos discriminados pelos laudos fornecidos pela LIQUITEC. Os parâmetros analisados foram: Cor, densidade, índice de neutralização, rigidez dielétrica. Neste ponto vinte amostras de óleo não são suficientes para um resultado, conforme o número de amostras é elevado o PLS montado pode apresentar um resultado mais positivo.

Observamos uma melhoria considerável na calibração e validação das amostras, tanto pelo cuidado de escolher com mais critério os parâmetros, quanto por ter mais amostras melhorando o PLS. É fácil notar que com a retirada de determinadas amostras o coeficiente de determinação aumenta consideravelmente.

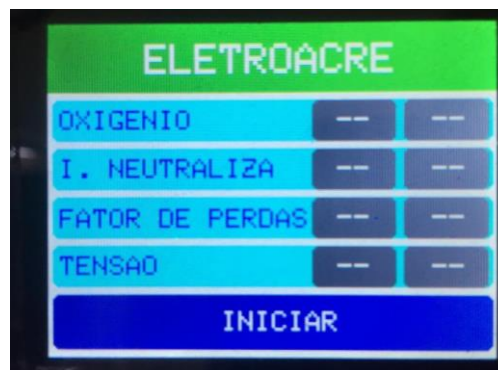
3.3. O protótipo

A proposta do protótipo é de fazer os testes da forma simplificada, logo a construção do mesmo foi feita com vários componentes já existentes no mercado, tendo em vista que o funcionamento básico seria o mais importante nesse ponto, já que o equipamento ainda pode passar por diversas mudanças até chegar ao seu estado final. O protótipo foi projetado para ser de fácil operação, com a amostra em mãos basta inserir a cubeta de quartzo que os resultados já são mostrados imediatamente, ganhando tempo para uma possível troca do óleo caso seja necessário.

Sendo construído com componentes eletrônicos fáceis de serem encontrados, como Arduino, tela LCD (conforme Figura 10) e a criação simples de uma placa eletrônica para

gerenciar os sensores, que por sua vez, é o item de maior dificuldade para adquirir por conta de sua especificidade, ainda nessas circunstâncias um equipamento relativamente simples, comparado com os já existentes em laboratórios de análise, seu diferencial está na sua pré-calibragem, que permite os resultados imediatos.

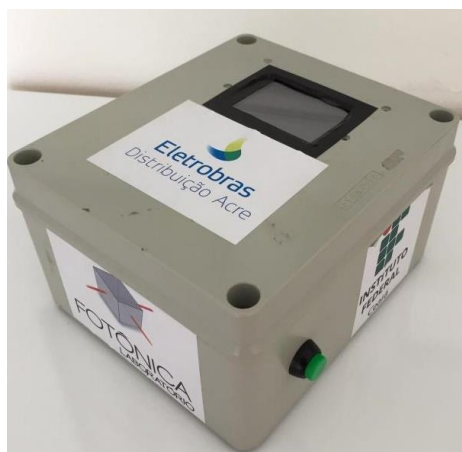
Figura 10. Tela LCD com interface do programa.



Fonte: Autores.

Como podemos observar na Figura 11 o protótipo já está construído e operacional, precisando de pequenos ajustes para evitar problemas futuros, tal como mal contato de alguns fios, isso é levando em consideração que estamos descrevendo um protótipo. Mas o principal ponto ainda a ser trabalhado são os ajustes dos LEDs para medição, de modo que pequenos ajustes possam melhorar ainda mais a qualidade de precisão das análises feitas.

Figura 11. Case do Protótipo.



Fonte: Autores.

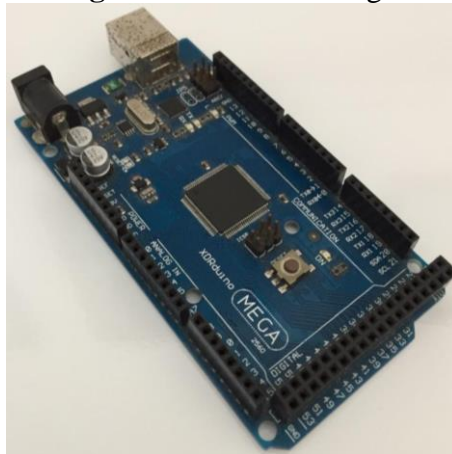
Com a proposta nesta dissertação, foram analisados diversos espectros de absorção do primeiro conjunto de óleos recebidos que foram os 1º e 2º lotes de óleos da *Eletroacre* e 1º lote de óleos da LIQUITEC. Foi verificada melhoria nos resultados das análises, maior

aproximação com os dados obtidos na literatura e definida a nova estratégia para discussão dos resultados.

Logo após encontrar os determinados parâmetros e seus respectivos espectros de onda, a seleção dos LEDs e fotodiodos a serem utilizadas podem ser feita, juntamente com o *hardware* e criação de *software*.

No *hardware*, foi utilizado foi um Arduino MEGA (Figura 12) para gerenciar as informações obtidas pelos fotodiodos e mostrar a qualidade dos testes em uma tela LCD *touchscreen*, todo o sistema é alimentado por bateria que possibilita a mobilidade do protótipo, e todo o equipamento é protegido por uma case de material plástico que também possui a função de bloquear os raios solares para o teste ser feito sem influência de luz externa alguma.

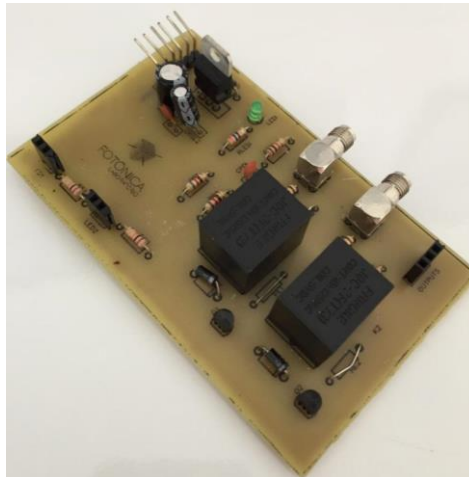
Figura 12. Arduino Mega.



Fonte: Autores.

Foi criada uma placa para o chaveamento das luzes aplicadas nos óleos, por conta que o equipamento faz uma sequência de testes com diferentes espectros de onda, a placa foi confeccionada do zero para comunicação com o Arduino, LEDs e fotodiodos, a Figura 13 mostra a placa de chaveamento.

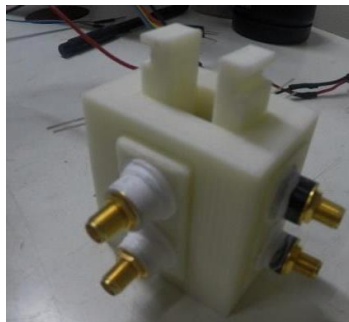
Figura 13. Placa de seleção das LEDs.



Fonte: Autores.

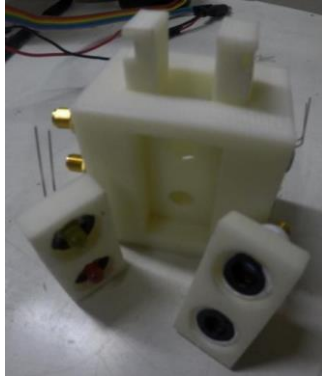
Para que o sistema óptico também possa funcionar da maneira mais eficiente possível foi desenvolvido, em uma impressora 3D, o suporte para os sensores e o suporte da cubeta de quartzo, que por sua vez precisa ter as quatro faces polidas a fim de não ter alteração alguma na transição do sinal de luz. As Figuras 14 e 15 mostram como ficou o resultado da montagem dos sensores no suporte de cubeta.

Figura 14. Detalhe do sensor óptico.



Fonte: Autores.

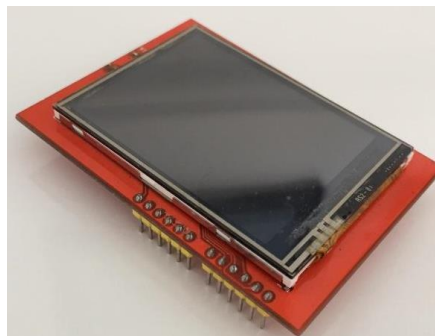
Figura 15. Sensores expostos.



Fonte: Autores.

Um dos maiores cuidados que tivemos foi com a seleção dos LED com NM bem específicos, a fim de ter uma leitura dos parâmetros específicos validando o equipamento para uso prático. O *software* a bastante específico totalmente estruturado em linguagem C para compatibilidade do Arduino, também foram utilizadas bibliotecas de programa para utilizar de forma amigável a LCD e o sistema *touchscreen* (Figura 16).

Figura 16. Tela LCD touchscreen.



Fonte: Autores.

O protótipo possui um sistema de bateria bastante eficiente não necessitando de recarga por dias de uso, a alimentação é fornecida por um *powerbank* (Figura 17) que foi adaptado para funcionar com os componentes eletrônicos.

Figura 17. Powerbank.



Fonte: Autores.

4. Considerações Finais

Neste artigo podemos concluir que, realizado de acordo com objetivo geral e objetivos específicos propostos, tanto a análise do que venha a ser o PLS, como a definição de método de calibragem para medição de óleos em transformadores, foi bem-sucedida.

O protótipo apresentado está sujeito a melhorias. Contudo, como visto no Capítulo 4, ficou comprovado vantagens em sua utilização. Sua funcionalidade apresentou um ganho real no que se refere a medições de óleos, por fazer análises específicas nos pontos que são sensíveis a variação dos materiais que se encontram nas amostras analisadas, essas análises específicas foram obtidas com as amostras de óleos que já foram caracterizadas, podendo montar um sistema preciso nos pontos mais sensíveis.

Foi possível concluir que o protótipo é um equipamento muito prático de ser utilizado, o operador não tem dificuldades ao manusear o equipamento como já explicado durante os capítulos anteriores, o protótipo é barato tendo sua estrutura baseada em um micro controlador (Arduino Mega) de baixo custo, e o restante dos componentes também são baratos tendo apenas a dificuldade de encontrar as LEDs que produzem o espectro específico.

Dentro das dificuldades encontradas na realização dessa dissertação podemos destacar que, realizar a definição de qual LED é o ideal para o funcionamento do protótipo. Como foi visto essa situação criou a necessidade de se utilizar o The Unscrambler, programa para criação de sistemas matemáticos e por meio deste foi possível saber os LEDs que mais se aproximam das ideais para detecção de mudanças.

Durante o período de pesquisa e montagem desta dissertação o tratamento dos dados foi feito com todos os óleos sendo mais de 2000 simulações matemáticas, para os quatro resultados de LED encontrados. Devido o grande fluxo de dados gerados optamos por realizar durante esse trabalho apenas quatro simulações como foi visto.

O método de otimização para a melhoria das análises foi implementado através de um procedimento encontrado no decorrer do estudo, que melhorou o R^2 , sem prejudicar a aproximação real do espectro. Podemos concluir que nossa proposta apresentada efetivamente funciona bem como redução de custos e aplicações em campo.

Tendo em vista que o sistema apresentado ainda pode evoluir e dar origem a melhores equipamentos de medição. No decorrer desses estudos podemos dar origem a novas linhas de pesquisa, artigos, e dissertações, baseadas em novas formas de simulação ou mesmo a utilização de diferentes tipos de óleos.

O sistema utilizado no equipamento também poderia passar por melhorias, tendo em vista o armazenamento dos dados e transferidos para um pendrive facilitando comparações com outros dados também coletados, e podendo ser criado tabelas para comparações ainda mais amplas.

Quanto às sugestões para trabalhos futuros, os pontos que precisam de mais atenção são novos LEDs para medição, melhorando a precisão do equipamento. A expansão de mais leituras, mais parâmetros a serem analisados, tornar o equipamento aplicável para outras áreas que trabalham com o mesmo princípio do protótipo proposto.

Referências

Abbas, O. et al.(2006). Application of chemometric methods to synchronous UV fluorescence spectra of petroleum oils. *Fuel*, 85(17/18), 2653–2661.

Abu-siada, A., Lai, S. P., Islam, S. M. (2012). A Novel Fuzzy-Logic Approach for Furan Estimation in Transformer Oil. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 27(2), 469–474.

An, Z., et al.(2015). Stabilizing triplet excited states for ultralong organic phosphorescence. *Nature Materials*, 14(7), 685–690.

Antonello, I.(2006). *Determinação De Ascarel Em Óleo Mineral Isolante De Transformador*. [s.l.] Universidade Federal de Santa Catarina.

Bechara, R.(2010). *Análise de falhas de transformadores de potência*. Dissertação (Mestrado) [s.l.] Escola Politécnica da Universidade De São Paulo.

Benounis, M. et al. (2008). NIR and optical fiber sensor for gases detection produced by transformation oil degradation. *Sensors and Actuators, A: Physical*, 141(1), 76–83.

Bruzzoniti, M. C., et al. (2012). Determination of copper in liquid and solid insulation for large electrical equipment by ICP-OES. Application to copper contamination assessment in power transformers. *Talanta*, 99, 703–711.

Chen, H. et al. (2015). New concept ultraviolet photodetectors. *Materials Today*, 18(9), 493–502.

Chen, H. et al. (2016). Nanostructured Photodetectors: From Ultraviolet to Terahertz. *Advanced Materials*, 28(3), 403–433..

De Caro, C. (2015). UV / VIS Spectrophotometry. *Mettler-Toledo International*, n. September 2015, 4–14.

Godinho, M. D. S. (2014). *Avaliação da Degradação de Óleos Isolantes usando Análise de Imagens e Técnicas Espectroscópicas Combinadas com Métodos de Calibração Multivariada e Resolução de Curvas*. [s.l.] Universidade Federal de Goiás.

Li, X., Yan, H., Zhao, Q. (2016). Carboranes as a Tool to Tune Phosphorescence. *Chemistry - A European Journal*, 22(6), 1888–1898.

Palou, A. et al. (2017). Calibration sets selection strategy for the construction of robust PLS models for prediction of biodiesel/diesel blends physico-chemical properties using NIR spectroscopy. *Spectrochimica Acta - Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, v. 180, p. 119–126.

Pereira, A. S., et al. (2018). *Metodologia da pesquisa científica*. [e-book]. Santa Maria. Ed. UAB/NTE/UFSM. Recuperado de https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/15824/Lic_Computacao_Metodologia-Pesquisa-Cientifica.pdf?sequence=1.

Roychoudhuri, C.; Vandergriff, L. (2009). Nature and Properties of Light. *Fundamentals of Photonics*, 1–38.

Stedwell, C. N., Polfer, N. C. (2013). *Laser Photodissociation and Spectroscopy of Mass-separated Biomolecular Ions*. Cham: Springer International Publishing, v. 83.

Tran, T. T. et al. (2016). Deep Ultraviolet Nonlinear Optical Materials. *Chemistry of Materials*, 28(15), 5238–5258.

Viñas, M. H. et al. (1992). Spectroscopic Sensor as a Mineral Oil Indicator. *Laser Chemistry*, 12(1–2), 65–73.

Porcentagem de contribuição de cada autor no manuscrito

David Martins Leite – 45%

Kilbert Amorim Maciel – 20%

José Wally Mendonça Menezes – 10%

Glendo de Freitas Guimarães – 10%

João Isaac Silva Miranda – 05%

Guilherme Matias de Medeiros – 05%

Robson dos Santos Sampaio – 05%