

Desenvolvimento de Sensor Infravermelho para Detecção on-line de Gases Dissolvidos em Óleo Isolante de Transformadores

Jacyr M. Filho, Gerson A. C. Nonato, Edson T. Miyamoto, José. W. Scucuglia, Lauro. C. Cruz Júnior, Antonio. M. Reis, Moisés Suzuqui, Uender. C. Faria

Resumo - O presente trabalho tem como objetivo apresentar o desenvolvimento de um equipamento microcontrolado portátil para detecção on-line de gases dissolvidos em óleo de transformadores. O equipamento proposto é composto de um sistema eletrônico com capacidade de tomada de decisão e acoplado a um sistema de emissão e recepção de infravermelho, de forma a supervisionar e identificar os principais gases dissolvidos em óleos de transformadores (dióxido de carbono, metano, etileno e propano). Ao final da pesquisa foi obtido um dispositivo portátil e de fácil manuseio a ser acoplado na saída de esgotamento de óleo de transformadores de força, e que identifica automaticamente os referidos gases dissolvidos no óleo, assim que surgirem. O equipamento possui memória de massa para armazenamento dos eventos e sistema de comunicação via GPRS/GSM com a central de operação. Com o equipamento desenvolvido pretende-se promover agilidade na detecção desses gases dissolvidos em óleo de transformadores de força.

Palavras-chave – Detecção de Gases; Infravermelho, Transformadores de Força.

I.

INTRODUÇÃO

O presente artigo refere-se ao projeto intitulado: Desenvolvimento de Sensor Infravermelho para detecção on-line de gases dissolvidos em óleo isolante de transformadores – código ANEEL: 0404-002/2006¹; ‘ENERSUL’; ‘IPETEC, CESUP; ‘Ciclos 2005/2006 e 2006/2007’

Com a ampliação constante do sistema elétrico e o conseqüente aumento da complexidade de sua distribuição, a utilização de dispositivos de supervisão e controle, eficientes e de custos atrativos, cada vez mais se tornam importantes para melhoria da qualidade e continuidade do oferecimento dos serviços pelas concessionárias de energia elétrica.

Os transformadores de potência são os componentes mais críticos e caros de qualquer subestação, e seu desligamento, quase que inevitavelmente, causa dano à operação do sistema elétrico e à produção industrial.

Diversas áreas têm considerado a manutenção com base nas condições de operação do equipamento, a qual prevê o

monitoramento e o diagnóstico de forma contínua ou periódica de alguns parâmetros para se estimar as condições atuais e remanescentes da vida útil. Este tipo de manutenção proporciona uma integração entre as condições do material, desempenho do equipamento, taxa de degradação e ações preventivas.

Por muitos anos, os programas de manutenção preventiva em transformadores consistiram em inspeções, testes e ações periódicas em intervalos de tempo normalmente sugeridos pelo fabricante ou determinados através da experiência prática. Incluem-se nestes programas os testes de rotina e a execução de serviços como medição de perdas dielétricas; de resistência de isolamento e dos enrolamentos; análise físico-química e cromatográfica do óleo; monitoramento manual ou automático da temperatura e do carregamento; tratamento, troca ou a regeneração do óleo isolante; limpeza dos terminais; entre outros.

A condição de monitoramento é a técnica ou o processo de monitoramento das características de operação do equipamento que pode fornecer a necessidade ou não de manutenção preventiva, antes que ocorra séria deterioração, desligamentos; ou para estimar a "saúde" da máquina.

A manutenção baseada no tempo, analisando as máquinas desenergizadas de acordo com o agendamento ou horas de funcionamento, pode evitar muitas falhas, mas também pode causar desligamentos desnecessários, com desperdício de mão-de-obra, tempo e dinheiro.

A proposta desse projeto foi desenvolver um dispositivo microcontrolado com sistema de detecção de presença de moléculas de gases utilizando a técnica de absorção de radiação na região do espectro infravermelho, para detecção on-line de gases dissolvidos em óleo de transformadores. O equipamento proposto é composto de um sistema eletrônico com capacidade de tomada de decisão o qual é acoplado a uma câmera sensora com dispositivo de emissão e recepção de infravermelho, de forma a supervisionar e identificar os principais gases dissolvidos em óleos de transformadores (acetileno, etileno, metano, etano, monóxido de carbono e dióxido de carbono).

A interação da radiação infravermelha (IR) com gases é bem conhecida, podendo manifestar-se através de absorção, espalhamento e emissão de radiação. Isso porque a energia abrangida pela radiação IR pode corresponder à energia de vibração das moléculas em questão. A relação entre a energia luminosa (E) e o comprimento de onda da radiação é dado pela relação $E = v \cdot h$, em que h é a constante de Planck ($h = 6.62 \times 10^{-34}$ Js) e v é a frequência (em Hz) da radiação. Esta, por sua vez, está relacionada ao comprimento de onda da radiação por $c = v \cdot \lambda$, onde c é a velocidade da luz (3×10^8 m/s).

O sensor desenvolvido utiliza microncontroladores de alta performance e é instalado no transformador,

¹ Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica regulado pela ANEEL e consta dos Anais do V Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica (V CITENEL), realizado em Belém/PA, no período de 22 a 24 de junho de 2009.

Jacyr M. Filho, Gerson A. C. Nonato, Edson T. Miyamoto trabalham na ‘Enersul’ (e-mails: jacyr.muniz@enbr.com.br, gerson.nonato@enbr.com.br, edson.miyamoto@enbr.com.br).

J. W. Scucuglia, Lauro. C. Cruz Júnior, Antonio. M. Reis, Moisés Suzuqui, Uender. C. Faria trabalham no IPETEC (e-mails: scucuglia@nastek.com.br, lauro@nastek.com.br, reis@nastek.com.br, moises.suzuqui@nastek.com.br, uendercf@nastek.com.br).

supervisionando a qualidade do óleo em tempo real. Ao surgimento de gases dissolvidos o sensor identifica os mesmos e disponibiliza, através de um protocolo de comunicação de dados específico, a informação para ser transmitida à central de controle.

Com esse dispositivo desejou-se obter uma ferramenta nacional com alta tecnologia agregada para monitorar em tempo real a qualidade do óleo de transformadores e subsidiar as realizações de manutenções preventivas.

II. PREPARAÇÃO DO TRABALHO

No desenvolvimento do equipamento proposto, foram seguidas as seguintes etapas:

A. Concepção e Definição da Topologia

O estudo teve 5 desdobramentos:

1) Estudo do sistema que iria ter a função de porta amostras (no caso, a composição de óleo + gás).

Este sistema deveria ser transparente à luz infravermelha e ter comprimento variável, até se obter o tamanho ideal para a obtenção de um sinal adequado para posterior processamento.

Em função das amostras serem líquidas também foi importante estabelecer uma espessura da célula, que não permitisse a eventual formação de bolhas de ar.

2) Possíveis emissores de luz infravermelha: lâmpadas, LED's e lasers.

Cada um destes sistemas tem suas vantagens e desvantagens, sendo necessário um estudo detalhado para a escolha adequada do emissor, em função dos gases a serem detectados e sua estimativa de concentração.

Temos duas regiões espectrais diferentes, uma entre 1 e 3 μm , na qual podem ser usados lâmpadas, LED's e lasers e outra entre 4 e 6 μm , na qual somente há lâmpadas e LED's disponíveis. No entanto, é importante notar que esta última região tem sido sugerida como mais sensível para o objetivo proposto.

3) Detectores de luz infravermelha.

Para detecção da luz infravermelha têm-se detectores fotoelétricos, os quais geram uma tensão (ou corrente) proporcional à quantidade de luz incidente; detectores eletroquímicos, os quais geram também sinal de tensão quando em contato com o gás a ser estudado; e finalmente detectores piroelétricos, os quais são sensíveis ao calor.

Neste caso, um parâmetro crítico na escolha do detector é a alta temperatura na qual o óleo a ser analisado se encontra. Alguns detectores tem sua performance dependente da temperatura externa, de tal forma que é necessário projetar um sensor de temperatura no sistema a ser desenvolvido.

4) Filtros.

Os filtros poderiam ser utilizados no caso de serem usadas fontes não monocromáticas, de forma a somente permitir a passagem de uma faixa espectral específica para o gás a ser detectado. Neste caso a técnica é conhecida como NDIR (Non dispersive infrared detection).

5) Fibras ópticas.

Também foi necessário estabelecer a possibilidade de transmissão da luz infravermelha via fibras ópticas, assim como utilizá-las para direcionar a luz transmitida pela amostra para o detector. Neste caso, investigamos a possibilidade de fibras monomodo ou multimodo, bem como seus diâmetros e perdas em função do comprimento, usualmente medidas em decibéis por km (dB/km).

O material da fibra é crítico, pois para dados comprimentos de onda as perdas são muito grandes mesmo a distâncias pequenas. O acoplamento da fibra com a fonte de luz e o detector também são elementos de estudo, pois hoje em dia é possível obter acoplamentos altos, da ordem de 80%. No entanto isso depende dos comprimentos de onda a serem utilizados.

Lei de Beer (Base teórica do equipamento).

A interação da radiação infravermelha (IR) com gases é bem conhecida, podendo manifestar-se através de absorção, espalhamento e emissão de radiação. Isso porque a energia abrangida pela radiação IR pode corresponder à energia de vibração das moléculas em questão. A relação entre a energia luminosa (E) e o comprimento de onda da radiação é dada pela relação $E = h\nu$, onde h é a constante de Planck ($h = 6.62 \times 10^{-34}$ Js) e ν é a frequência (em Hz) da radiação. Esta, por sua vez, está relacionada ao comprimento de onda λ da radiação por $c = \nu\lambda$, onde c é a velocidade da luz (3×10^8 m/s).

Em particular, a radiação infravermelha é usualmente dividida em três grandes regiões: NIR (*Near Infrared*), que abrange desde 700 ηm até aproximadamente 3000 ηm . A região acima de 3000 ηm até 10 μm é conhecida como *Mid Infrared* (MIR). Acima de 10 μm até 300 μm temos a região do Far Infrared. O interesse da técnica de espectroscopia infravermelha reside no fato de que cada material tem suas energias características de absorção, de tal forma que é possível associar a cada molécula um espectro que pode ser considerado sua digital espectral. Associado a isso temos o fato de que atualmente é possível encontrar fontes de radiação infravermelha dos mais variados tipos e tamanhos, como por exemplo, lasers, LED's e lâmpadas. No caso particular do laser, a região do NIR encontra atualmente um conjunto quase contínuo de fontes, com potências que podem variar desde 1 mW até 100W e comprimentos de onda desde 700 ηm até 2,5 μm . A vantagem destes lasers é que seu custo é hoje bastante reduzido e sua eficiência de consumo é muito satisfatória. Temos ainda lasers NIR que podem ter um considerável grau de sintonia (de pelo menos 10-50 ηm) em função de sua temperatura de operação.

Por outro lado, temos diversos detectores para o NIR como, por exemplo, de PbS, InGaAs e Ge. Sua sensibilidade está ligada ao seu tamanho e métodos de processamento e amplificação eletrônica dos sinais. Os detectores mencionados tem faixa de sensibilidade desde 800 ηm até 1800 ηm (InGaAs e Ge) e 2700 ηm para o caso do Pbs. Todos estes detectores podem operar no modo fotovoltaico, gerando tensões proporcionais à luz incidente, ou no modo fotocondutivo, onde a informação é obtida através da medida de correntes.

Os gases de interesse neste projeto são: (1) Acetileno, (2) etileno, (3) metano, (4) etano, (5) monóxido de carbono, (6)

dióxido de carbono. A tabela I abaixo mostra as regiões de absorção destes componentes:

Tabela I: Expectativa de sensibilidade (em ppb) para cada comprimento de onda λ (nm)

Molécula		Infravermelho distante		Infravermelho próximo	
		ppb	λ (nm)	ppb	λ (nm)
água	H ₂ O	2.0	5940	60	1390
Dióxido de carbono	CO ₂	0.13	4230	3000	1960
Monóxido de carbono	CO	0.75	4600	30000	1570
Metano	CH ₄	1.7	3260	600	1650
Acetileno	C ₂ H ₂	3.5	7400	80	1520
Etano	(C ₂ H ₆)	-	3300-3500	-	-
Etileno	(H ₂ CCH ₂)	-	-	-	1610-1630

* Absorbância de $1e^{-5}$, 1 Hz de modulação da fonte de infravermelho e 1 m de amostra

É importante notar que os gases N₂ e H₂ não podem ser detectados por absorção infravermelha uma vez que, ao vibrarem, não geram radiação do tipo dipolo elétrico, a qual é necessária para ocorrer a absorção.

A idéia é associar um determinado comprimento de onda a cada um dos componentes acima. A radiação absorvida será monitorada pelo detector, utilizando como princípio básico a bem conhecida Lei de Beer da absorção:

$$I = I_0 \exp(-\alpha L)$$

Onde I é a intensidade incidente no gás, I₀ é a radiação que atravessa a espessura L do gás e α é o coeficiente de absorção, característico do gás. A grandeza normalmente utilizada para obter a quantidade de gás é chamada densidade óptica D:

$D = \text{Log}(I_0/I) = \alpha L \cdot \log(e)$, onde α é proporcional à quantidade do gás analisado. Note que L e log(e) são conhecidos. Estas informações devem ser processadas eletronicamente com software apropriado, para gerar a informação desejada, seja em ppm, ppb, ou mol.

A proposta para detecção destes gases consiste basicamente de 5 elementos, conforme mostra a figura 1.

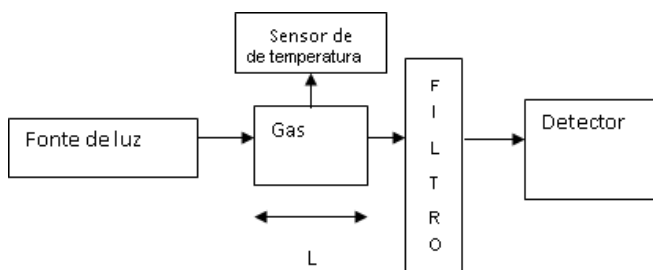


Figura 1. Diagrama esquemático para a detecção de gases por espectroscopia IR.

Fonte de luz: foram pesquisadas a eficiência e potência de diversos lasers e LED's na faixa de interesse mostrada na tabela 1.

A tabela II mostra alguns lasers conhecidos na faixa de interesse deste projeto:

Tabela II. Lasers na faixa de interesse do projeto

Material	Faixa espectral (nm)	Temperatura de operação	custo	potência
AlGaAs	750-1000	ambiente	baixo	10 mW
Vertical Cavity lasers	650-1680 Sintonizáveis	ambiente	Baixo	-
InGaAsP	1200-2000	ambiente	médio	10mW
Laser de Antimonio	2000-4000	ambiente ou refrigerados	médio	1 mW
Laser de Cascata Quântica (quantum Cascade)	4000 - 12000	refrigerados	alto	>100 mW
Sais de chumbo	3000-30000	refrigerados	alto	< 1mW

Filtros: estes filtros são chamados passa banda e tem como função selecionar a radiação a ser detectada pelo detector. Cada filtro tem seus limites de transparência e transmissão máxima.

Detector: devem ser estudados detectores para o NIR e para o MIR. Para a região do MIR são mais indicadas as termo-pilhas ou detectores piroelétricos. A sensibilidade destes detectores depende de seu tamanho, normalmente podendo variar de 1 mm² até 2 cm². Isto vai depender da quantidade de gás disponível para a medida. Basicamente a grandeza em questão é a espessura L (figura 1) de material gasoso disponível.

A espessura L também é importante, pois quanto maior L, maior a quantidade de gás disponível e, portanto, maior o sinal gerado no detector.

A temperatura ambiente deve ser monitorada, pois irá influenciar a calibração do equipamento.

A luz pode também ser guiada entre a fonte de luz e o gás, assim como da saída do filtro até o detector, via fibra óptica. Dessa forma, tanto a fonte de luz quanto o detector poderiam estar fora da célula de detecção, esta sim no interior do óleo de transformador.

Outra alternativa é que todo o sistema seja parte da célula de detecção e os sinais sejam enviados a um processador de forma remota.

Foi estabelecida a região de trabalho no infravermelho e os LED's a serem utilizados. Além disso, testes em equipamento comercial de absorção infravermelha foram realizados em dois conjuntos de amostras de óleo: o primeiro conjunto é novo e o segundo já indica a presença de gases acetileno e CO₂.

Em relação às amostras de óleo enviadas para testes:

1) Medidas de absorção na faixa de 3000 a 8000 cm⁻¹ (que corresponde a 1250 nm a 3300 nm), para verificar a absorção do óleo nessa região. Foi adaptado um equipamento disponível no Departamento de Física da Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), para dar início às medidas. Este equipamento utiliza uma lâmpada infravermelha como fonte de excitação e detecção síncrona com lock-in e detector de PbS (Sulfeto de Chumbo).

2) Foi confeccionada uma lista de material, com levantamento de custos e das empresas no exterior que podem fornecer os itens a serem comprados para montar o protótipo.

O esquema do protótipo foi definido da seguinte forma:

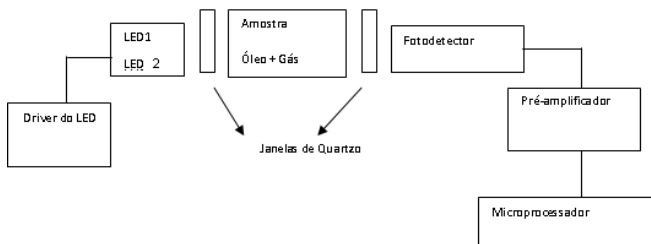


Figura 2. Esquema do protótipo pretendido.

Neste esquema, a luz infravermelha emitida pelo LED é absorvida pela amostra e o fotodetector acusa uma diminuição de sua intensidade. O driver é a alimentação do LED, que neste caso é pulsada. O fotodetector transforma o sinal luminoso que atravessa a amostra em um sinal elétrico (usualmente na faixa de $1\mu\text{V}$ a 50 mV), o qual é amplificado pelo pré-amplificador para posterior processamento. O LED1 emite luz num comprimento de onda que não é absorvido pelo gás contido na amostra. Este sinal será a referência (chamado de I_0). Já o LED2 é ressonante com absorção do gás em questão. Assim, na presença desse gás, o sinal elétrico convertido pelo fotodetector (chamado de I) será menor que o sinal elétrico gerado pela referência. A diferença entre I_0 e I dá a informação a respeito da concentração do gás na amostra.

Na próxima etapa foi dada continuidade aos testes de absorção infravermelha das amostras de óleo disponíveis, especialmente no que diz respeito ao estudo da quantidade de material (especificamente a espessura da amostra, ou seja, o caminho que será percorrido pela luz infravermelha para atravessar a amostra) necessária para a obtenção de sinais elétricos compatíveis com os equipamentos utilizados no laboratório. É importante ressaltar que quanto maior a espessura, maior será a absorção e mais sensível será o equipamento.

B. Desenvolvimento do Protótipo

Essa etapa consistiu na promoção de testes com a emissão do infravermelho e no desenvolvimento do protótipo do sensor pretendido com base em óleos novos e já utilizados.

No desenvolvimento realizou-se:

- i) Obtenção de espectros de absorção (absorbância) na faixa de 3000 a 6200 cm^{-1} (que corresponde a 1300 a 3500 nm), para verificar a absorção do óleo nessa região;
- ii) Determinação do comprimento de onda de referência (no qual não há absorção do óleo), na faixa de 1300 nm .

Foram realizadas medidas comparativas de dois tipos de óleo: o primeiro sem uso (chamado de óleo novo) e o segundo já utilizado e com coloração amarela (chamado de óleo usado). Os espectros foram obtidos no laboratório de espectroscopia da UFJF, num aparelho (espectrômetro ou monocromador infravermelho) com as seguintes especificações:

- Nome: SPECORD NIR 61
- Faixa de operação: 3000 a 13000 cm^{-1} .
- Passo: 5.6 cm^{-1} .
- Número de médias por ponto: 1500
- Detector: PbS.

O sinal foi amplificado por um detector síncrono Lock-In SRS540, na escala de 20 mV (para a referência e 10 mV

para o sinal do óleo). O chopper foi utilizado em 14 Hz , e para a conversão analógica digital um conversor ADC modelo ADS7822 de 12 bits. A fonte luminosa consiste de uma lâmpada de tungstênio (Fonte IR) de 30 W (6 V , 5 A) gerando um espectro contínuo.

A figura 3 a seguir mostra um esquema da montagem:

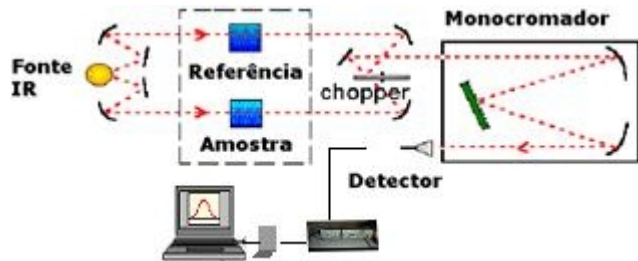


Figura 3. Esquema do aparato experimental utilizado para a realização de medidas de absorção infravermelha no Departamento de Física da UFJF. O sinal foi amplificado por um detector síncrono Lock-In SRS540, na escala de 20 mV (para a referência e 10 mV para o sinal do óleo). O chopper foi utilizado em 14 Hz , e para a conversão analógica digital um conversor ADC.

A figura 4 mostra o comportamento da absorção do óleo na faixa do infravermelho próximo.



Figura 4. Espectros de absorção obtidos no laboratório de espectroscopia da UFJF, de acordo com o aparato experimental da Fig.1. A faixa espectral utilizada foi de 1300 a 3500 nm , o que corresponde a 2700 até 7200 cm^{-1} , aproximadamente.

O espectro em vermelho corresponde ao óleo sem uso, enquanto que o espectro azul mostra a absorção do óleo em uso. A espessura de óleo utilizada em ambos os casos foi de 1 cm . Claramente os espectros são diferentes, indicando que há mudanças estruturais na composição do óleo. As duas principais bandas de absorção estão centradas em 1700 nm e 2300 nm .

Os espectros obtidos estão em boa concordância com os reportados na literatura e nos permitem atribuir as referidas bandas a ligações C-H do óleo.

Posteriormente foi realizado um estudo da distância (previsão teórica) de colimação dos LED's. Esta distância depende do sistema de refletores dos LED's e do comprimento de onda, conforme detalham os datasheets dos fabricantes.

1) Estudo da divergência do feixe luminoso: A divergência do feixe luminoso dos LED's deve ser limitada a no máximo uma abertura angular de 15°. Isto é necessário para que não haja perda de intensidade luminosa e, portanto, queda no sinal elétrico do fotodiodo utilizado. Assim, o estudo da região colimada é importante, pois limita a região de interação entre a luz e a amostra. Considerando um feixe luminoso com perfil transversal gaussiano de intensidade (em primeira aproximação), estimou-se que a região de interação será da ordem de 5 cm. Esta região poderá ser ampliada com o uso de sistemas de lentes.

A figura 5 mostra a região (em azul) onde a luz do LED estará colimada e, portanto, adequada à realização de medidas. A figura indica claramente que os LED's com refletores são mais adequados e dispersam menos luz.

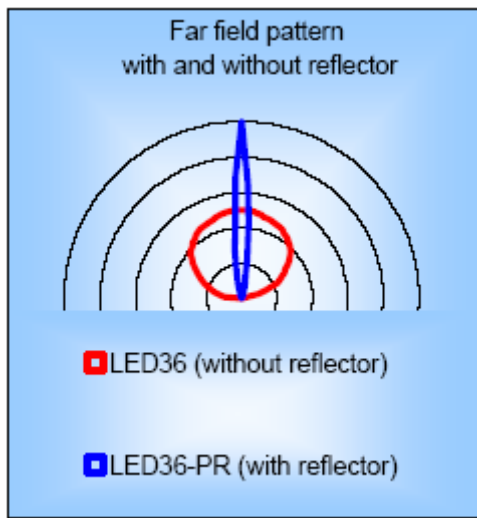


Figura 5. Região de emissão dos LED's.

Foram adequadas as cubetas (onde serão colocadas as amostras) para que se encaixem nesta região azul colimada.

Foi realizado um estudo do valor da seção de choque de absorção dos gases, especialmente do metano. Esta etapa permitiu a determinação quantitativa do gás, em unidade de moléculas/cm³. O procedimento é análogo para os outros gases de interesse.

O estudo da seção de choque de absorção do metano baseou-se em dois artigos científicos recentes: CHAUDHARY, K; KUMBHAKAR¹ e G. C. GILLET, B., HARDALUPAS, Y., KAVOUNIDES, C. A. M. K. P.²

O metano vem sendo estudado já há pelo menos 50 anos e, no entanto seu espectro de absorção ainda não é bem conhecido em função da temperatura. Somente recentemente foram estabelecidos parâmetros empíricos que funcionam muito bem para ajustar a dependência com a pressão e a temperatura a até 600°K. A expressão para o coeficiente de absorção (k_v) é a seguinte:

$$k_v(T, P) = k_{vo} \frac{T}{T_0} \left(\frac{P_0}{P} \right) \left[C_1(T) + C_2(T) \left(\frac{P}{P_0} - 1 \right) \right]$$

onde k_{vo} é , $C_1(T)$ é dada por:

$$C_1(T) = -0.1131 + 1.1875(T_0/T)$$

e,

$$C_2(T) = 0.712 - 1.536 e^{-2.118(T_0/T)}.$$

P é a pressão do gás e P_0 é a pressão atmosférica.

A relação entre o coeficiente de absorção e a seção de choque de absorção é a seguinte:

$$\sigma = N k_v$$

Onde, N é o número de moléculas por cm³. O uso da equação acima juntamente com a dependência de k_v com a pressão e a temperatura permitem, em princípio, a obtenção de N .

A figura 6 mostra σ em função do comprimento de onda:

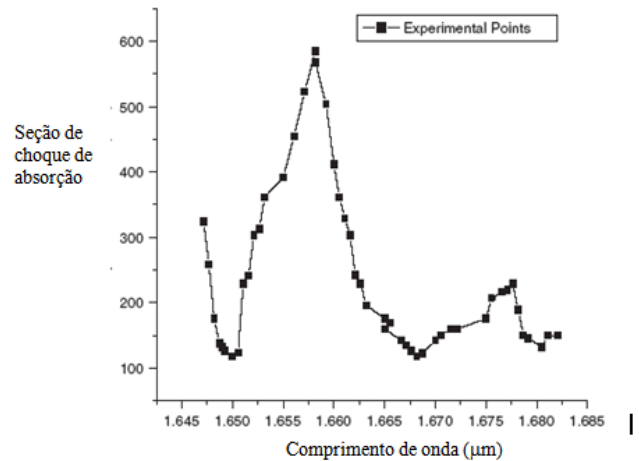


Figura 6. Seção de choque de absorção em função do comprimento de onda.

Após o recebimento dos LED's e fotodetectores, juntamente com seus respectivos drivers e amplificador, o passo inicial consistiu no teste individual de cada uma das partes adquiridas e a adequação das peças à montagem experimental de teste.

Teste dos LED's 16, 19, 33, 34, 43 e 46;

Teste dos fotodiodos PD25, 36;

Teste do driver D31;

Teste do amplificador AM-07.

- Foram projetados e confeccionados suportes de Teflon para os LED's na oficina mecânica da UFJF. Estes suportes foram acoplados a suportes ajustáveis fixos numa plataforma metálica previamente adquirida no projeto;

- Foram confeccionados suportes para os fotodiodos (figura 7), também acoplados a suportes ajustáveis.

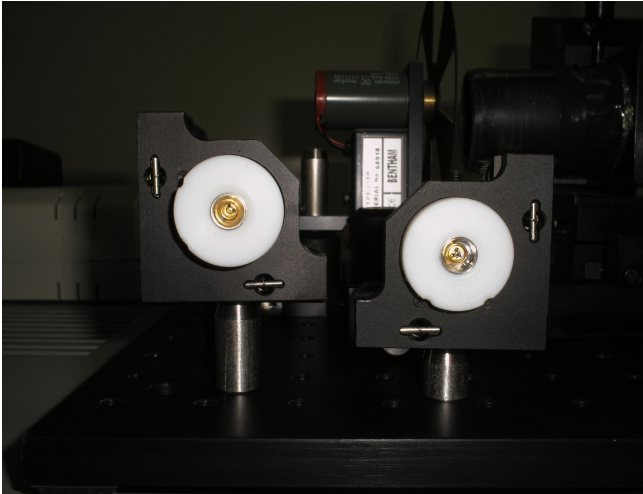


Figura 7: Suportes ajustáveis para LED's e fotodiodos

- Os cabos de conexão (Synchro) e extensão para o amplificador e driver tiveram que ser confeccionados no laboratório, uma vez que os mesmos não são de padrão encontrado usualmente no Brasil, muito embora sejam de fácil construção;

- Foi montado um trilho para facilitar o movimento unidimensional das peças (LED's e fotodiodo) de forma a testar tanto o driver quanto o amplificador.

Os resultados observados foram os seguintes:

1) O driver funciona adequadamente, tanto no modo pulsado como no modo quase contínuo (QCW). Estes testes foram feitos com osciloscópio. Foram verificadas as frequências de repetição (0.5, 2, 8 e 16 kHz) e as larguras dos pulsos (de 0.6 a 20 μ s). No entanto, o ajuste de largura de pulso apresenta resultados incompatíveis com o datasheet, nas posições 8 e 9.

Este teste foi realizado com auxílio de osciloscópio e indicou largura de pulso de 0.5 μ s para ambas as posições, enquanto que o datasheet indica 1.8 e 2.0 μ s, respectivamente. O sinal de sincronismo funciona adequadamente, gerando sinais elétricos de acordo com o datasheet. No entanto, o formato não é uma onda quadrada, o que impossibilita seu uso em outros sistemas de detecção mais sensíveis, como a detecção síncrona (lock-in).

2) O amplificador funciona adequadamente quando se medem sinais luminosos altos, como por exemplo, de LED's visíveis (no caso, utilizamos um LED verde). Observou-se coerência entre o sinal de saída (output), que é uma tensão alternada (com amplitude proporcional ao sinal luminoso) e os parâmetros do driver (corrente, largura de pulso e taxa de repetição).

Os fatores de ganho (x1, x10 e x100) também funcionam adequadamente. No entanto, ao utilizar-se os LED's infravermelhos adquiridos no projeto, observou-se que é necessário usar a amplificação máxima (x100) para se ter uma resposta. Contudo, neste grau de amplificação o fotodetector indica sensibilidade a ruído térmico ambiente e também sensibilidade à carga estática. Aparentemente o ruído térmico é alto comparado com o sinal do LED.

Para verificar se isso é uma falha do amplificador, conectou-se o LED infravermelho LED16 no driver e o detectou-se com um sistema de detecção síncrono com lock-in e chopper. O detector usado foi outro, de InGaAs, com tempo de resposta compatível com o dos pulsos do driver.

Com estes sistema de detecção foi possível observar a emissão luminosa do LED e a detecção de sinais de intensidade de 10 mV a uma distância de 5 cm entre o LED e o fotodetector. É importante notar que o sinal de fundo térmico neste caso foi de apenas 0.6 mV. Isso nos faz crer que pode haver alguma falha no funcionamento do amplificador AM-07.

Na próxima etapa foi dada continuidade aos testes, inclusive de reprodutibilidade das medidas e flutuações de sinais em função de parâmetros externos como temperatura, luz ambiente e cargas estáticas. Além disso, foi dado início a construção do protótipo, com propostas já bem definidas.



Figura 8: Montagem experimental de teste dos LED's e fotodiodos.

Na seqüência do desenvolvimento foram realizados testes específicos em relação ao desempenho dos itens importados para a detecção de gases.

Foram escolhidas combinações apropriadas de pares de LED's e fotodetectores, de forma a verificar sua eficiência na detecção dos gases de interesse. Teve-se especial cuidado na observação das condições adequadas de uso e eventuais problemas de operação.

As combinações possíveis são as seguintes:

- LED's 16 e 19 com detector PD25;
- LED's 31, 33 e 34 com o detector PD36;
- LED's 43 e 46 com detector PD42.

Foram escolhidos os seguintes pares de LED's e fotodiodos:

- 1) LED16 e PD25, sensível ao etano.
- 2) LED33 e PD36, para detecção de etano.
- 3) LED31 e PD36, como combinação de referência para o etano.

No primeiro par foram verificadas as escalas mais indicadas de funcionamento do LED (ganho, largura de pulso, corrente, modo de operação, distância entre LED e PD), disponíveis no DRIVER D31 (do LED) e no AMPLIFICADOR AM07 (do detector PD25).

Foram variados todos estes parâmetros, colocados na tabela III a seguir:

Tabela III – Parâmetros para funcionamento do LED

DRIVER D31			AMPLIFICADOR AM07		
Corrente Posição	Freq (kHz)	Largura do pulso (μs)	Ganho	Sinal do amplificador	Dist. (cm)
0	16	8	x10	110	5
1	16	8	x10	111	5
2	16	8	x10	127	5
3	16	8	x10	918/987	5
3	16	8	x10	1023/1036	5
3	16	8	x10	1098	5
3	8	6	x10	680	5
3	2	6	x10	618	5
3	0,5	6	x10	602	5
3	16	6	x10	411	10
3	16	6	x10	400	10

O dado essencial nesta tabela é o sinal do amplificador, pois é através dele que serão determinadas as concentrações dos gases de interesse. Este sinal deve ter as seguintes características:

- 1) gerar alto sinal quando apenas a emissão luminosa do LED está sendo medida (que é o caso da tabela acima);
- 2) gerar um sinal menor que o do item 1, quando for colocada a cubeta de quartzo, entre o LED e o detector. A diferença entre estes sinais (item 1 e 2) deve ser pequena, sinalizando que a cubeta em si, não esteja absorvendo luz do LED;
- 3) gerar um sinal ainda menor quando a cubeta for preenchida com o óleo não usado;
- 4) gerar um sinal menor que o do item 3, quando a cubeta for preenchida com óleo usado. A diferença de sinal entre os itens 3 e 4 deve ser a maior possível, pois isso dará a sensibilidade do equipamento;

Analisando a tabela acima verificou-se que a melhor combinação de variáveis é com corrente na posição 3, largura do pulso de 8 μs, frequência de repetição do pulso de 16 kHz, ganho do amplificador em x10, e distância entre o LED e o detector de 5 cm. No entanto, admitiu-se a extensão dessa distância até 10 cm, a qual faz aumentar a sensibilidade do sistema à presença de gás. O custo é a diminuição do sinal do amplificador para 411 mV, o que está ainda numa escala totalmente satisfatória. Neste caso a presença da cubeta de quartzo resultou numa diminuição do sinal para 400 mV.

C. Validação do Sistema

No decorrer da execução do trabalho observou-se que a sensibilidade do sistema para a mistura gás-óleo não é adequada. Isso porque o sistema mostrou-se eficiente para detectar gás puro (realizado em cubeta de 7,5 cm de comprimento). Já na mistura óleo-gás, o comprimento da cubeta não pode ser superior a 1 cm, uma vez que o óleo diminui a intensidade luminosa transmitida de forma excessiva. Assim, partiu-se para a separação prévia do óleo e do gás.

Posteriormente realizou-se um melhoramento do procedimento, seguindo a norma técnica ABNT NBR 7070, a qual trata da amostragem de gases e óleo mineral isolante de equipamentos elétricos e análise dos gases livres e dissolvidos. Essa nova configuração é mostrada na figura 9.

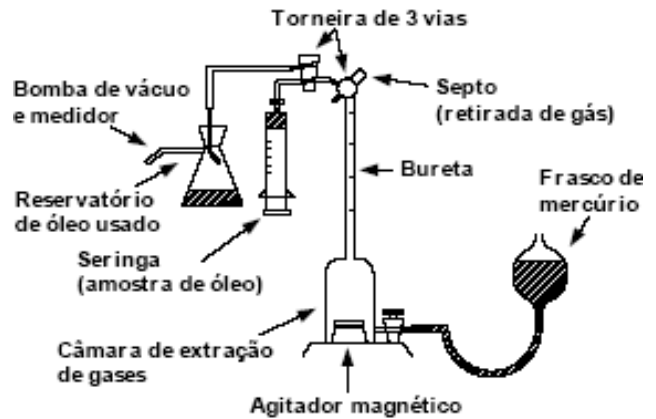


Figura 9. Sistema proposto na norma técnica ABNT 7070.

A proposta consistiu na separação das fases via aquecimento do óleo usado até a temperatura de 60°C, em um Erlenmeyer de 250 ml, com filtro de PTFE. O sistema está conectado à cubeta de 7,5 cm e o gás é dirigido para a mesma através do uso de uma bomba de vácuo manual.

O sistema é mostrado na figura 10.

Após os primeiros testes, verificou-se que:

- O sistema de fato tornou-se muito mais sensível; a quantidade de óleo utilizado foi de 30 ml;
- O sinal elétrico no detector, na ausência de gases foi em média de 400 mV, utilizando como LED de excitação o LED34 e como detector o PD36;
- Ao iniciar o aquecimento do óleo, foi possível observar visualmente o desprendimento de gases;
- O sinal no detector passou em média de 400 mV para 370 mV o que mostra um grande aumento de sensibilidade em relação às medidas diretas feitas na mistura óleo-gás. Esta variação de tensão é suficiente para tornar o aparelho funcional.

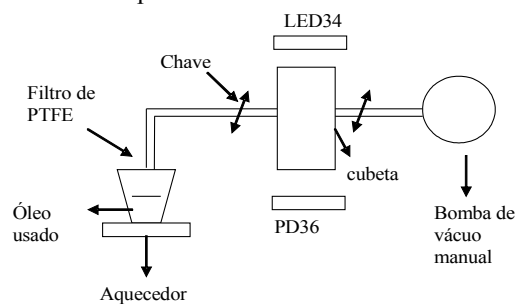


Figura 10. Primeiro sistema de teste.

Subseqüentemente adequou-se o sistema utilizado para a separação de gás-óleo no protótipo já construído, de forma simples. Neste caso não foi necessário aquecer o óleo, uma vez que o mesmo já se encontra em temperaturas suficientemente elevadas. Outros filtros com diferentes porosidades foram testados para assegurar que não haverá passagem de óleo para a cubeta de gás.

O Protótipo foi implementado em laboratório, como mostra a figura 11.

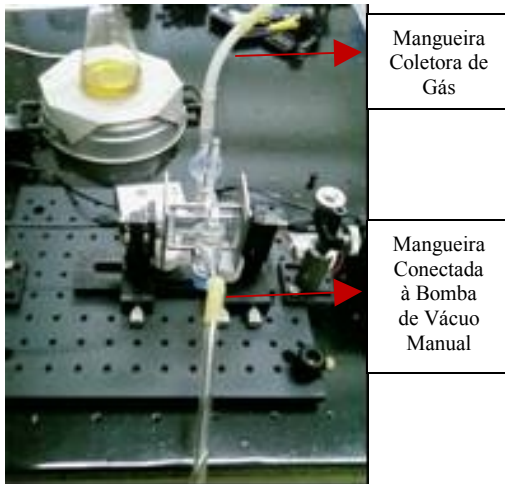


Figura 11. Implementação do Protótipo em laboratório.

Após a validação do sistema foi construído um dispositivo mecânico que atendesse as especificações do modelo determinado, como mostra a figura 12.



Figura 12. Protótipo piloto do sistema proposto.

III. METODOLOGIA

Após a realização de uma revisão bibliográfica sobre detectores de gases dissolvidos em óleo de transformadores, iniciou-se a definição das características operacionais do sistema.

Através de reuniões com a área técnica da Enersul e com base nas necessidades operacionais de aplicação do sistema, foram definidas as funcionalidades do equipamento a ser desenvolvido, de forma a atender as necessidades propostas.

Após a definição das características operacionais do sistema, definiu-se a topologia do equipamento a ser desenvolvido.

- Foi realizada uma pesquisa Site Survey (levantamento de todas as condições e variáveis relevantes ao desenvolvimento do equipamento), contrapondo com avaliações técnicas e econômicas para a definição da melhor topologia de construção.

- Através de ensaios experimentais e especificações técnicas definiu-se as características espectroscópicas do sensor.

Nessa etapa foram estudadas as características de transmissão e absorção de infravermelho para os gases (1) Acetileno, (2) etileno, (3) metano, (4) etano, (5) monóxido

de carbono, (6) nitrogênio e (7) hidrogênio. Foram definidas as regiões de emissão e os filtros adequados para implementação do hardware.

- Desenvolvimento do Hardware:

Com base na topologia estabelecida, foram selecionados, adquiridos e comissionados os componentes necessários para a implementação do hardware. Primeiramente foram projetados e implementados em "Proto Board" os circuitos eletrônicos do sensor, do módulo de processamento e gerenciador de dados. Após testes de funcionamento os circuitos foram implementados em placas de circuito impresso, gerando protótipo e, após avaliação e ajustes, um produto piloto. O equipamento piloto obtido detecta a presença de 04 tipos de gases (dióxido de carbono, metano, etileno e propano).

- Desenvolvimento do software para programação de parâmetros de hardware:

Foi desenvolvido software para programação de parâmetros de hardware, como por exemplo, alertas, tolerâncias, etc..., e software em linguagem de alto nível para visualização dos dados.

- Realização de testes e ajustes dos sistemas para validação do equipamento piloto:

Após a implementação do hardware e software foram realizados testes de performance em laboratório e campo nas condições operacionais reais para validação do equipamento piloto desenvolvido.

IV. RESULTADOS

Foi obtido um equipamento piloto para detecção de gases dissolvido em óleo de transformadores de força (dióxido de carbono, metano, etileno e propano). O equipamento é portátil e é instalado no registro de drenagem do óleo. Através de avaliações de emissão e recepção de irradiações na região do infravermelho, o dispositivo desenvolvido detecta e informa o surgimento dos gases supracitados, como mostra a figura 13.



Figura 13. Equipamento piloto com sistema de processamento dos dados.

V.

Com o desenvolvimento da pesquisa foi adquirida tecnologia em detecção de gases específicos utilizando a emissão em infravermelho. Toda a metodologia de detecção dos gases propostos dissolvidos em óleo foi obtida no decorrer do desenvolvimento dos trabalhos. Foi verificado que é necessário separar o gás do óleo através de membranas específicas para que se pudesse obter sensibilidade satisfatória na detecção. O modelo tecnológico para execução dos procedimentos definidos na metodologia foi obtido de forma satisfatória. O protótipo foi validado em laboratório e testes em campo. Testes continuarão sendo realizados para avaliação da performance do equipamento desenvolvido. A pesquisa poderá servir de base para a construção de um futuro equipamento cabeça de série.

VI. BIBLIOGRAFIA

- [1] [1] CHAUDHARY, K; KUMBHAKAR, G. C. . Generation of tunable infrared radiation in rubidium titanyl phosphate crystal for the optical measurement of number density, absorption cross section of methane gas. *Journal of Quantitative Spectroscopy&Radiate Transfer* 98 (2006) 157-166.
- [2] [2] GILLET, B., HARDALUPAS, Y., KAVOUNIDES, C. A. M. K. P. Taylor, Infrared absorption for measurement of hydrocarbon concentration in fuel/air mixtures (MAST-B-LIQUID). *Applied Thermal Engineering* 24 (2004) 1633-1653.