

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E
INFORMÁTICA INDUSTRIAL**

GUILHERME DUTRA

**DETECÇÃO DE ESCOAMENTO ENVOLVENDO GÁS E PETRÓLEO
EMPREGANDO TÉCNICAS DE MONITORAMENTO BASEADAS EM
RADIAÇÃO INFRAVERMELHA**

DISSERTAÇÃO

CURITIBA

2013

GUILHERME DUTRA

**DETECÇÃO DE ESCOAMENTO ENVOLVENDO GÁS E PETRÓLEO
EMPREGANDO TÉCNICAS DE MONITORAMENTO BASEADAS EM
RADIAÇÃO INFRAVERMELHA**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Ciências, do Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Área de Concentração: Fotônica em Engenharia.

Orientador: Prof. Dr. Cicero Martelli

Co-orientador: Prof. Dr. Marco José da Silva

CURITIBA

2013

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

D978 Dutra, Guilherme
Detecção de escoamento envolvendo gás e petróleo empregando técnicas de monitoramento baseadas em radiação infravermelha / Guilherme Dutra. — 2013.
86 f. : il. ; 30 cm

Orientador: Cícero Martelli.

Co-orientador: Marco José da Silva.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Informática Industrial. Área de concentração: Fotônica em Engenharia. Curitiba, 2013.

Bibliografia: p. 76-80.

1. Tecnologia infravermelha. 2. Petróleo. 3. Dióxido de carbono. 4. Escoamento multifásico. 5. Engenharia elétrica – Dissertações. I. Martelli, Cícero, orient. II. Silva, Marco José da, co-orient. III Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial. IV. Título.

CDD (22. ed.) 621.3

Título da Dissertação Nº. 646

“Detecção de escoamento envolvendo gás e petróleo empregando técnicas de monitoramento baseadas em radiação infravermelha”

por

Guilherme Dutra

Orientador: Prof. Dr. Cicero Martelli

Coorientador: Prof. Dr. Marco José da Silva

Esta dissertação foi apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de MESTRE EM CIÊNCIAS – Área de Concentração: Fotônica em Engenharia do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial – CPGEI – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, às 9h30 do dia 11 de dezembro de 2013. O trabalho foi aprovado pela Banca Examinadora, composta pelos professores doutores:

Prof. Dr. Cicero Martelli
(Presidente – UTFPR)

Dr. Manoel Feliciano da Silva Junior Dr.
(Petrobras)

Prof. Dr. Flavio Neves Junior
(UTFPR)

Prof. Dr. Rigoberto Eleazar Melgarejo
Morales
(UTFPR)

Visto da coordenação:

Prof. Dr. Ricardo Lüders
(Coordenador do CPGEI)

Dedico este trabalho ao futuro que o
destino me reserva.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a infraestrutura oferecida pelo LASII – Laboratório de Sensores e Instrumentação Industrial, LACIT – Laboratório de Ciências Térmicas, Laboratório de Fotônica e Laboratório de Laser.

Ao apoio dos colegas Felipe Mezzadri, Rodolfo Patyk, Tiago Vendruscolo, Virginia H. V. Baroncini nas reuniões, discussões e conversas dentro e fora dos laboratórios. Aos sempre prestativos Reinaldo S. G. Justiniano e Drozak pela ajuda no desenvolvimento, fabricação e montagens das peças dos sistemas.

Aos meus amigos, Monique G. Holetz, Mario H. Voorluys, Rafaela Staszczak, André L. Soares, Alexandre R. Barcellos, Fernanda Santos, Franciele K. Alves, Rafaela Perez, sempre presentes e que entenderam minha ausência e meus momentos estressantes.

Aos companheiros de morada Felipe S. Leal e Lucas C. do Nascimento pelas pizzas de quinta-feira, pelos conselhos memoráveis e conversas entusiasmantes.

Agradeço aos meus pais Divonsir J. S. Dutra e Eliane Ranger, meu padrasto Luiz A. Ajuz, minha madrasta Jaqueline A. S. Dutra e as minhas irmãs Talita R. Ajuz e Rafaela N. Dutra, pela educação que me proporcionaram ao longo de toda a vida.

Obrigado Diangelis C. Theodorovski R. por aguentar todo esse ano de maluquices e permanecer ao meu lado. Também agradeço a Deus por ter me dado sabedoria e perseverança para não desistir perante os desafios.

Ao apoio financeiro da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – ANP – , da Financiadora de Estudos e Projetos – FINEP – e do Ministério da Ciência e Tecnologia – MCT – por meio do Programa de Recursos Humanos da ANP para o Setor Petróleo e Gás – PRH-ANP/MCT - PRH10-UTFPR.



É um novo mundo Haroldo,
vamos explorá-lo.
(Calvin e Haroldo)

RESUMO

DUTRA, Guilherme. **Detecção de escoamento envolvendo gás e petróleo empregando técnicas de monitoramento baseadas em radiação infravermelha.** 2013. 86 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica e Informática Industrial) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2012.

Na região do espectro visível o petróleo é opaco, porém na região do infravermelho o petróleo apresenta translucidez à radiação. Isto permite a detecção óptica e não intrusiva de fenômenos que ocorram com o petróleo e no interior do volume contendo petróleo. É então explorada a região de 8 a 12 μm mostrando resultados que comprovam o potencial da técnica. A detecção óptica baseia-se na Lei de Beer-Lambert: o espectro eletromagnético emitido por fonte óptica, ao atravessar meio absorvedor, sofre decaimento exponencial na intensidade correspondente ao caminho óptico percorrido, à concentração da substância e ao seu coeficiente de absorção. Porém, em certos casos, outros efeitos ópticos, como a reflexão e a refração predominam, gerando resultados que não são compreendidos somente pelo estudo da absorção. Para compreender tais resultados é implementado modelo matemático do escoamento de bolhas de ar em petróleo. Ao utilizar radiação infravermelha para detecção óptica trabalha-se no limiar entre o domínio óptico e o térmico. Para entendimento dos limites de cada efeito é realizado estudo da influência da variação de temperatura na detecção óptica do petróleo. Tendo todo o sistema óptico caracterizado, são realizados testes com o escoamento de bolhas de ar em petróleo e desenvolvido o circuito fechado para o escoamento bifásico envolvendo petróleo e ar. É observado o escoamento de bolhas em cuvetas com 12 mm de comprimento de interação. Como os resultados foram obtidos sem a utilização de materiais otimizados para o comprimento de onda de trabalho, conclui-se ser possível transmissão por caminhos mais longos. Como conclusão, é possível detectar de forma não intrusiva o escoamento bifásico envolvendo petróleo e ar empregando técnicas de monitoramento baseadas em radiação infravermelha. Os resultados são promissores e devem resultar no desenvolvimento de instrumentação com potencial para aplicação em campo para a caracterização de escoamento envolvendo petróleo e outras substâncias como água, CO_2 , H_2S , gás natural entre outros.

Palavras-chave: Infravermelho. Petróleo. CO_2 . Escoamento Multifásico.

ABSTRACT

DUTRA, Guilherme. **Detection of petroleum-air flow based on infrared radiation monitoring techniques**. 2013. 86 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica e Informática Industrial) - Federal Technology University - Parana. Curitiba, 2013.

Petroleum is opaque in the visible region of the electromagnetic spectrum and therefore is normally a common sense that optical techniques cannot be used as a noninvasive tool to monitor any physical or chemical phenomena through a petroleum volume. There is, however, a great opportunity when the infrared region of the petroleum optical absorption spectrum given that it is semitransparent and therefore radiation can propagate through a volume containing petroleum or mixture with petroleum. The optical detection is based on the Beer-Lambert Law: the electromagnetic spectrum emitted by an optical source, crossing through the absorber undergoes exponential decay in intensity corresponding to the optical path, the concentration of the substance and its absorption coefficient. However, in certain cases, other optical effects such as reflection and refraction predominate, leading to light attenuation that is not understood only by the study of absorption. To understand these results it is implemented a mathematical model of the air bubbles flowing inside a petroleum volume. It is worth pointing out that the IR region of the electromagnetic spectrum can be understood via optical as well as thermal phenomena. To understand the limits of each effect a study of the influence of the temperature variation on the optical detection of petroleum is performed. The flow of air bubbles in static petroleum is studied and a flow loop for air and oil is designed and tested and the flow is measured by the IR monitoring system. The flow of bubbles is observed through 12 mm length of petroleum. These results were obtained without using optimized components and it is concluded that transmission through longer paths is possible. In conclusion, it is possible to detect, by a non-intrusive technique, the two-phase flow involving the petroleum and air employing monitoring techniques based on infrared radiation. The results are promising and should result in the development of instrumentation for potential application in the field for characterizing flow involving petroleum and other substances such as water, CO₂, H₂S, natural gas and others.

Keywords: Infrared. Petroleum. CO₂. Multiphase Flow.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Espectros de transmissão do petróleo e de absorção do CO ₂ demonstrando áreas de opacidade e translucidez das substâncias	23
Figura 2 – Demonstração da Lei de Beer-Lambert. Ao atravessar meio absorvedor ocorre atenuação exponencial do sinal emitido em relação ao caminho óptico	24
Figura 3 – Emitâncias espectrais e emitâncias espectrais máximas (quadrados) calculadas a partir da Lei de Planck, Equação (3), para T = 3500, 4000 4500, 5000 e 5500 K, considerando fonte de corpo negro ($\epsilon = 1$)	26
Figura 4 – Exemplificação da conservação de energia, após incidência de radiação eletromagnética em meio absorvedor parte da radiação será refletida, parte será transmitida e outra parte será absorvida pelo meio.....	29
Figura 5 – Comparação da emissividade espacial para duas superfícies distintas. (a) não metálica, com emissividade alta até ângulo sólido de $\pm 70^\circ$ e tendendo a zero em ângulos superiores. (b) metal polido, com emissividade baixa até $\pm 70^\circ$ e alta em ângulos superiores	31
Figura 6 – Emitâncias espectrais e emitâncias espectrais máximas (quadrados) calculadas a partir da Lei de Planck, Equação (3), considerando fontes com diferentes emissividades	31
Figura 7 – Emitâncias espectrais para lâmpada halógena utilizada operando à temperatura de 2500 K. Neste caso 6% da radiação emitida está na região do visível (VIS < 0,8 μm), 34% na região do infravermelho próximo (0,8 < NIR < 1,4 μm), 50% no infravermelho médio (1,4 < MIR < 3 μm) e somente 10% no infravermelho distante (FIR > 3 μm)	32
Figura 8 – Esquemático demonstrando os componentes de um de sensor piroelétrico com elemento de compensação de temperatura e amplificador de sinal (FET) na saída	34
Figura 9 – Esquemático demonstrando válvula fotomultiplicadora. Fóton incidente atinge o fotocátodo e libera um elétron em direção ao primeiro dinodo. Quando o elétron atinge o dinodo acaba por liberar mais elétrons em direção ao próximo dinodo, estes elétrons são acelerados pela diferença de potencial de cada dinodo. Ao final os elétrons liberados atingem o ânodo onde a energia é captada	35
Figura 10 – Sensibilidade de fotomultiplicadores da Thorlabs. Modelos PMM01 e PMM02.....	35
Figura 11 – Esquema da termopilha. A radiação de entrada altera a temperatura dos termopares na camada ativa. A tensão medida é a soma das tensões da série de termopares da camada ativa em relação ao da camada de referência.....	36
Figura 12 – Gráfico da eficiência quântica em relação ao comprimento de onda de CCDs padrão retroiluminados e com iluminação frontal	37
Figura 13 – Esquema de montagem para teste de emissividade com a câmera de IR adquirindo dados simultâneos de duas superfícies com emissividades diferentes. ...	40
Figura 14 – Resultados para o teste de emissividade. (a) Os dois materiais em temperatura ambiente ($\sim 20^\circ\text{C}$) sendo observados no infravermelho. (b) Os dois materiais sendo observados na região do visível. (c) Materiais a aproximadamente 96°C sendo observados na região do infravermelho. À esquerda $\epsilon = 0,7$ e à direita	

$\varepsilon = 0,95$. (d) Indicação da faixa de cores adotada, sendo abaixo a menor intensidade e acima a maior	41
Figura 15 – Esquema base de montagem óptica que será utilizado nos testes. O controlador aciona a lâmpada halógena com uma potência que pode variar de 175 W a 100 W. A barreira busca não deixar com que o aquecimento do ar ao redor da lâmpada aqueça a área que se encontram os demais materiais. O tamanho da fenda pode ser regulado para que a lâmpada ilumine com uniformidade o objeto de medição. A lente auxilia a visualização da cuveta pela câmera de IR focando e aumentando a janela de visualização	42
Figura 16 – Cuveta para armazenamento da amostra de petróleo durante testes ópticos. Comprimento de iteração de 10 mm, 18x40 mm de secção transversal e janelas ópticas de borosilicato com 0,1 mm de espessura	43
Figura 17 – Resposta óptica da leitura da câmera de IR em relação ao aquecimento da amostra de petróleo devido a incidência da radiação da lâmpada halógena. Região A – Obturador fechado. Lâmpada ligada. Câmera ligada. Equalização das temperaturas. Região B' – Obturador aberto. Aquecimento do petróleo. Região B'' – Temperaturas equalizadas. Região C – Obturador fechado.	44
Figura 18 – Destaque dos efeitos ópticos e térmicos ocorridos na leitura da câmera de IR em relação ao aquecimento da amostra de petróleo	46
Figura 19 – Leitura óptica e temperatura interna da câmera de IR em relação ao aquecimento da amostra de petróleo. Em destaque a variação de temperatura e intensidade relacionando abertura do obturador com o final do experimento	47
Figura 20 – Cuveta para armazenamento da amostra de petróleo durante testes ópticos. Comprimento de iteração de 5 mm, 12x16 mm de secção transversal e janelas ópticas de borosilicato com 0,1 mm de espessura	48
Figura 21 – Levantamento do coeficiente de absorção relativo do petróleo, para a câmera de IR (5,776859 unid. arb./cm), utilizando os comprimentos de iteração de 2, 3, 4 e 5 mm	49
Figura 22 – Detalhe da cuveta com tubo para admissão de ar para injeção do escoamento de bolhas no interior do petróleo.....	50
Figura 23 – Esquema de montagem do sistema óptico para escoamento de bolhas de ar em petróleo	50
Figura 24 – Sistema óptico para escoamento de bolhas de ar em petróleo.....	51
Figura 25 – Esquema do circuito de escoamento bifásico envolvendo petróleo e ar	52
Figura 26 – Cuveta usinada em alumínio para circuito de circulação de petróleo. Comprimento de iteração de 14 mm e secção transversal de 13 x 40 mm.....	52
Figura 27 – Circuito de escoamento bifásico envolvendo petróleo e ar	53
Figura 28 – Caracterização óptica em transmissão por FTIR na região de 2,5-10 μm de amostras de água, petróleo, óleo sintético e heptano para observação das regiões de absorção das substâncias	54
Figura 29 – Fluxograma do modelo matemático para compreender os fenômenos de absorção, refração e reflexão presentes no escoamento bifásico considerando a radiação emitida como um feixe de raios de mesma origem.....	55
Figura 30 – Passo a passo do modelo matemático. Feixe de raios emitidos pelo emissor.....	56

Figura 31 – Passo a passo do modelo matemático. (a) Detector e bolha traçados. (b) Raio incidente traçado.....	56
Figura 32 – Passo a passo do modelo matemático. (a) Interseções do raio incidente com a bolha. (b) Como não existem interseções anteriores é selecionada a de menor comprimento óptico	57
Figura 33 – Passo a passo do modelo matemático. (a) Reta normal traçada. (b) Raio transmitido traçado.....	58
Figura 34 – Passo a passo do modelo matemático. (a) Interseções do raio transmitido com a bolha. (b) Como existe interseção anterior é selecionada a de maior <i>caminho óptico</i>	59
Figura 35 – Passo a passo do modelo matemático. (a) Reta normal para a segunda interseção. (b) Raio transmitido após segunda interseção.....	60
Figura 36 – escoamento de bolhas de ar em petróleo. (a) Cuveta somente preenchida com petróleo. (b) escoamento de bolhas pequenas de ar em petróleo. (c) escoamento de bolhas grandes de ar no petróleo. (d) Indicação da faixa de cores adotada, sendo abaixo a menor intensidade e acima a maior. Cuveta com secção transversal de 12x30 mm e 10 mm de comprimento de iteração. Lâmpada alimentada com 175 W.....	62
Figura 37 – escoamento, passo a passo, de bolha de ar em petróleo. Cuveta com secção transversal de 18x40 mm e 5 mm de comprimento de iteração. Lâmpada alimentada com 175 W.....	63
Figura 38 – escoamento, passo a passo, de bolha de ar em petróleo com maior viscosidade. Cuveta com secção transversal de 18x40 mm e 10 mm de comprimento de iteração. Lâmpada alimentada com 175 W	64
Figura 39 – Modelo matemático dos fenômenos de refração, reflexão e transmissão que ocorrem durante o escoamento de uma bolha com 1 mm de diâmetro em petróleo	66
Figura 40 – Modelo matemático dos fenômenos de refração, reflexão e transmissão que ocorrem durante o escoamento de uma bolha com 1 cm de diâmetro em petróleo	67
Figura 41 – escoamento de bolhas de ar em óleo sintético estático utilizando uma câmara operando na região do visível	69
Figura 42 – escoamento bifásico ar-óleo sintético utilizando uma câmara operando na região do visível	70
Figura 43 – escoamento bifásico ar-óleo sintético utilizando a câmara de IR	71
Figura 44 – escoamento envolvendo bolhas de ar e petróleo resfriado.....	72
Figura 45 – escoamento envolvendo bolhas de ar e petróleo com substâncias voláteis evaporadas	72
Figura 46 – Perfil transversal do escoamento envolvendo bolhas de ar e petróleo considerando a linha 20 da matriz da câmara de IR	73
Figura 47 – Caracterização óptica do CO ₂ em transmissão por FTIR na região de 2,5 - 20 μm	82
Figura 48 – Esquema de montagem do sistema óptico para detecção de CO ₂ . A câmara possui um arranjo para que se possa inserir pela mesma entrada CO ₂ e N ₂ . Na exaustão é instalado um manômetro para regular a pressão interna na câmara	83
Figura 49 – Sistema óptico para detecção de CO ₂	84

Figura 50 – Detecção pela câmera de IR de diferentes pressões de CO ₂ no interior da câmara de 100 cm com fonte Alimentada com 175 W	85
Figura 51 – Levantamento do coeficiente de absorção relativo do CO ₂ , a uma pressão de 20 psi, para a câmera de IR (0,07733 unid. arb./cm), utilizando os comprimentos de iteração de 18, 62 e 100 cm.....	86

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Frações típicas do petróleo de acordo com o ponto de ebulição	21
Tabela 2 – Qualidade dos hidrocarbonetos em relação aos subprodutos originados do petróleo	21
Tabela 3 – Comparação entre os valores calculados pela Lei de Planck e de Wien para as emitâncias espectrais máximas.....	27

LISTA DE SIGLAS

CCD	<i>Charge-Coupled Device</i> – Dispositivo de Carga Acoplada
FIR	<i>Far Infrared</i> – Infravermelho Distante
FTIR	<i>Fourier Transform Infrared Spectroscopy</i> – Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier
IR	<i>Infrared</i> – Infravermelho
LASII	Laboratório de Sensores e Instrumentação Industrial
LACIT	Laboratório de Ciências Térmicas
MIR	<i>Mid Infrared</i> – Infravermelho Médio
NIR	<i>Near Infrared</i> – Infravermelho Próximo
QAV	Querosene de aviação
TBP	<i>True Boiling Point</i> – Ponto de Ebulição Verdadeiro
TPA	<i>Thermopile Array</i> – Matriz de Termopilhas

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Absorbância (alc)
c	Velocidade da luz
C_1	$2\pi hc^2$
C_2	hc/k
CO_2	Gás carbônico, dióxido de carbono
h	Constante de Planck
H_2S	Sulfeto de hidrogênio
I_0	Intensidade da radiação incidente
I	Intensidade da radiação após atravessar o meio
I_{CO_2}	Intensidade da radiação ao atravessar o CO_2
I_d	Intensidade da radiação com a ação de fechamento do obturador
I_{Petro}	Intensidade da radiação ao atravessar o petróleo
I_s	Intensidade da radiação com a ação de fechamento do obturador
k	Constante de Boltzmann. Coeficiente de extinção
l, l_{CO_2}, l_{Petro}	Comprimento de iteração, Caminho óptico
n	Índice de refração
n_i	Índice de refração do meio incidente
n_t	Índice de refração do meio transmitido
n_{eff}	Índice de refração efetivo do núcleo da fibra
N_2	Nitrogênio
p	Coeficiente de polarização
r_{\parallel}	Coeficiente de reflexão para o caso paralelo
r_{\perp}	Coeficiente de reflexão para o caso perpendicular;
t	Tempo
t_{\parallel}	Coeficiente de transmissão para o caso paralelo
t_{\perp}	Coeficiente de transmissão para o caso perpendicular
T	Temperatura
V_G	Velocidade de escoamento do gás
V_L	Velocidade de escoamento do líquido
W_{λ}	Emitância espectral

α, α_λ	Absortividade, coeficiente de absorção
γ, γ_λ	Transmissividade, coeficiente de transmissão
ΔI	Varição da intensidade
ΔP	Varição de polarização
ΔT	Varição da temperatura
$\varepsilon, \varepsilon_\lambda$	Emissividade
θ_i	Ângulo de incidência
θ_r	Ângulo de reflexão
θ_t	Ângulo de transmissão
λ	Comprimento de onda
ν	Frequência da radiação
ρ, ρ_λ	Refletividade, coeficiente de reflexão
σ	Constante de Stefan-Boltzmann
Φ	Fluxo radiante

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
1.1 MOTIVAÇÃO	18
1.2 OBJETIVOS	18
1.2.1 Objetivo Geral	18
1.2.2 Objetivos Específicos	18
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO	18
2 PETRÓLEO E INFRAVERMELHO	20
2.1 PROPRIEDADES DE INTERESSE DO PETRÓLEO	20
2.1.1 Detecção Óptica do Petróleo	23
2.2 PROPRIEDADES DE INTERESSE DO INFRAVERMELHO	24
2.2.1 Lei de Planck	25
2.2.2 Lei de Wien	26
2.2.3 Lei de Stefan–Boltzmann	27
2.2.4 Lei de Kirchhoff da Radiação Térmica	28
2.2.5 Emissividade	30
3 TÉCNICAS DE DETECÇÃO ÓPTICA	33
3.1 SENSORES PIROELÉTRICOS	33
3.2 VÁLVULAS FOTOMULTIPLICADORAS	34
3.3 SENSORES BASEADOS EM TERMOPILHAS	36
3.4 DISPOSITIVO DE CARGA ACOPLADA	37
4 METODOLOGIA EXPERIMENTAL	39
4.1 ESTUDO EXPERIMENTAL DA EMISSIVIDADE	39
4.2 ESTUDO DA EMISSIVIDADE DO SISTEMA DE DETECÇÃO DE PETRÓLEO NO INFRAVERMELHO	41
4.3 ABSORÇÃO ÓPTICA RELATIVA DO PETRÓLEO	47
4.4 ESCOAMENTO DE AR EM PETRÓLEO	49
4.5 ESCOAMENTO BIFÁSICO PETRÓLEO-AR	51
4.6 MODELO MATEMÁTICO DE DETECÇÃO ÓPTICA DE BOLHAS	54
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	61
5.1 ESCOAMENTO DE AR EM PETRÓLEO	61
5.2 MODELO MATEMÁTICO DE DETECÇÃO ÓPTICA DE BOLHAS	65
5.3 ESCOAMENTO BIFÁSICO ENVOLVENDO PETRÓLEO E AR	68
6 CONCLUSÕES	74
6.1 TRABALHOS FUTUROS	75
REFERÊNCIAS	76
APÊNDICE A - Absorção Óptica Relativa do CO₂	81

1 INTRODUÇÃO

Na indústria petrolífera, a mistura envolvendo óleo e gás é encontrada em inúmeros cenários. Recentemente, a Petrobras descobriu novas reservas submarinas de petróleo nas regiões conhecidas como Pré-Sal que ampliaram significativamente o seu potencial produtivo. Os testes iniciais desses campos mostram que além do petróleo, o dióxido de carbono é também encontrado em abundância formando mistura bifásica. O escoamento dessa mistura dos poços, a aproximadamente cinco quilômetros de profundidade, até as plataformas na superfície é grande desafio de engenharia. A capacidade de monitorar, caracterizar e prever o comportamento do escoamento (AZZOPARDI, 2006; SHOHAM, 2006), da mistura e de seus componentes individuais (petróleo e CO₂, por exemplo) são fatores com relevante impacto na eficiência do processo produtivo, uma vez que o CO₂, por exemplo, além de possuir complicações ambientais e necessitar ser reinjetado no poço, não possui valor agregado.

Um número considerável de técnicas de medição é utilizado e desenvolvido para investigar fluxos multifásicos. Alguns exemplos de técnicas de medição são as sondas condutivas e capacitivas (AHMED, 2006), de Raios-X (HERVIEU; JOUET; DESBAT, 2002), transdutores de ultra-som (MURAI et al., 2010), sensor wire-mesh (DA SILVA et al., 2010) e métodos ópticos (BARONCINI et al., 2012; SCHLEICHER et al., 2008).

A confiabilidade na tecnologia de um sensor é um dos principais desafios na realização dos benefícios associados à implantação de um sistema permanente de monitoramento na indústria de óleo e gás (KERSEY, 2000). Outras características importantes para o sensor é não causar alterações no escoamento e não necessitar de grandes modificações de estrutura para ser instalado, ou seja, um detector não intrusivo. É necessário aplicar o conjunto de técnicas e ações que assegurem a integridade estrutural de equipamentos industriais, visando sua operação segura e confiável (SALES, 2010).

A presente dissertação tem por objetivo desenvolver detector, não intrusivo, de escoamento petróleo e ar, empregando técnicas ópticas de monitoramento baseadas em radiação infravermelha.

1.1 MOTIVAÇÃO

É interessante para o processo de extração que haja a possibilidade de observar o interior do volume de petróleo para se conseguir analisar fenômenos que ocorram em seu interior. No espectro visível o petróleo é opaco. Mesmo na sua variação de cor mais clara a visualização de qualquer substância no seu interior é praticamente impossível. Porém, o petróleo é transparente em certas regiões do espectro de radiação, mais precisamente em algumas regiões do infravermelho (IR). Portanto o presente trabalho utiliza essa região do espectro eletromagnético para o desenvolvimento de técnica óptica, não intrusiva, capaz de monitorar propriedades físicas e químicas do petróleo e de substâncias diluídas em seu interior, seja estático ou durante o escoamento.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Desenvolver técnica de detecção óptica, não intrusiva, empregando radiação na região do infravermelho, para monitoramento do escoamento bifásico envolvendo petróleo e ar.

1.2.2 Objetivos Específicos

A presente dissertação de mestrado tem como finalidade:

- Desenvolver técnica de detecção óptica não intrusiva;
- Estudar os fenômenos de detecção da radiação infravermelha aplicada na detecção de escoamento petróleo e ar;
- Aplicar a técnica no escoamento envolvendo petróleo e ar.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

A presente dissertação é dividida em seis capítulos. Sendo o primeiro, já apresentado, tratando sobre a introdução, objetivos e motivação do trabalho.

O segundo capítulo faz levantamento literário sobre o petróleo e a radiação infravermelha. São apresentadas a constituição do petróleo e suas propriedades. Ainda sobre petróleo é mostrado a sua separação através do ponto de ebulição para cada grupo de cadeias de carbono. Finalizando é descrito sobre a absorção na detecção óptica e sobre o espectro do petróleo. Sobre a radiação infravermelha é apresentada a fundamentação técnica que leva ao entendimento do funcionamento do sistema desenvolvido e das características da fonte de radiação.

Técnicas de detecção óptica são abordadas no terceiro capítulo, incluindo sensores fotoelétricos, válvulas fotomultiplicadores, sensores baseados em termopilhas e CCDs. São explicados os princípios de funcionamento e a faixa do espectro da radiação eletromagnética que cada sensor possui sensibilidade, sendo ainda possível a adição de filtros ópticos para centrar a detecção em regiões mais específicas.

A metodologia experimental, quarto capítulo, é iniciada com estudos de emissividade, da resposta do petróleo à variação de temperatura nas medições e do coeficiente de absorção relativo do petróleo. Também são descritas as etapas no desenvolvimento da bancada de testes para os escoamentos e também para o desenvolvimento do programa computacional para modelamento matemático dos fenômenos que ocorrem na detecção óptica.

O capítulo cinco apresenta os resultados com bolhas de ar escoando em petróleo estático e os escoamentos bifásicos envolvendo óleo sintético e ar e petróleo e ar. Em determinadas situações os resultados destes testes anteriores não acontecem como o esperado. Para explicar tais resultados é apresentado modelo matemático dos fenômenos ópticos que ocorrem durante a detecção do escoamento.

Como conclusão é apresentado o máximo comprimento de petróleo que a radiação infravermelha consegue ser detectada. Também são mencionados os problemas acarretados pelo uso de materiais não otimizados para o comprimento de onda trabalhado e pelas baixas resolução e velocidade da câmera de IR. É apresentada a limitação da técnica, relativa ao limiar do domínio óptico e térmico, ao aumentar a potência da radiação, além do aquecimento, poderá acontecer a ignição do petróleo.

2 PETRÓLEO E INFRAVERMELHO

Este capítulo trás as principais propriedades de interesse envolvendo petróleo e a radiação infravermelha. O petróleo é formado por diversas e variadas cadeias de carbono sendo difícil a sua separação em produtos químicos puros. Portanto o petróleo é separado pelas faixas de ebulição de conjuntos de cadeias de carbono, as quais determinam as frações típicas do petróleo que gerarão seus subprodutos. Ainda existem outros elementos químicos que também podem ser encontrados no petróleo, entre eles o nitrogênio, enxofre, oxigênio e metais.

O espectro de transmissão do petróleo valida a região espectral do detector a ser utilizado e abre a abordagem das leis fundamentais que descrevem o comportamento na radiação eletromagnética em relação ao comprimento de onda e temperatura do corpo que a emite.

2.1 PROPRIEDADES DE INTERESSE DO PETRÓLEO

O termo petróleo significa literalmente óleo de rocha. É uma substância oleosa, inflamável, menos densa que a água, com odor característico e cor variando entre o castanho claro e o negro. Sua constituição é, basicamente, uma mistura de compostos químicos orgânicos, ou seja, diversos e diferentes tipos de hidrocarbonetos (THOMAS, 2001).

A constituição do petróleo é bastante complexa e sua separação em componentes químicos puros ou misturas de composições conhecidas é difícil (THOMAS, 2001). O petróleo, normalmente, é então separado em frações de acordo com a faixa de ebulição dos compostos. A Tabela 1 mostra as frações típicas que são obtidas do petróleo.

Análises elementares demonstram a porcentagem típica dos elementos químicos encontrados no petróleo:

- Hidrogênio – 11 a 14%;
- Carbono – 83 a 87%;
- Enxofre – 0,06 a 8%;
- Nitrogênio – 0,11 a 1,7%;
- Oxigênio – 0,1 – 2%;

- Metais – até 0,3%.

Tabela 1 – Frações típicas do petróleo de acordo com o ponto de ebulição

Fração	Temperatura de ebulição (°C)	Composição aproximada	Usos
Gás residual	–	C ₁ – C ₂	Gás combustível
Gás liquefeito de petróleo – GLP	Até 40	C ₃ – C ₄	Gás combustível engarrafado, uso doméstico e industrial
Gasolina	40 – 175	C ₅ – C ₁₀	Combustível de automóveis, solvente
Querosene	175 – 235	C ₁₁ – C ₁₂	Iluminação, combustível de aviões
Gasóleo leve	235 – 305	C ₁₃ – C ₁₇	Diesel, fornos
Gasóleo pesado	305 – 400	C ₁₈ – C ₂₅	Combustível, matéria-prima para lubrificantes
Lubrificantes	400 – 510	C ₂₆ – C ₃₈	Óleos lubrificantes
Resíduo	Acima de 510	C ₃₉ –	Asfalto, piche, impermeabilizante

Fonte: THOMAS (2001)

A alta concentração de carbono e hidrogênio demonstra que o petróleo é constituído principalmente por hidrocarbonetos. Os hidrocarbonetos são classificados, de acordo com a sua estrutura, em saturados, insaturados e aromáticos.

Os hidrocarbonetos saturados, também denominados parafinas ou alcanos, são aqueles cujos átomos de carbono são unidos somente por ligações simples e ao maior número possível de átomos de hidrogênios. Podem formar cadeias normais, ramificadas ou cíclicas. Os insaturados, também chamados de olefinas, apresentam ao menos uma dupla ou tripla ligação entre carbonos. Hidrocarbonetos aromáticos (arenos) apresentam pelo menos um anel de benzeno em sua estrutura. A Tabela 2 apresenta características dos hidrocarbonetos.

Tabela 2 – Qualidade dos hidrocarbonetos em relação aos subprodutos originados do petróleo

	Parafina normal	Parafina ramificada	Olefina	Naftênico	Aromático
Densidade	baixa	baixa	baixa	média	alta
Gasolina	ruim	boa	boa	média	muito boa
Diesel	bom	médio	médio	médio	ruim
Lubrificantes	ótimo	bom	médio	médio	ruim
Resistente à oxidação	boa	boa	má	boa	má

Fonte: THOMAS (2001)

A quantidade relativa de cada grupo de hidrocarbonetos varia entre as amostras de petróleo de diferentes localidades. Segundo estas quantidades serão as características de cada tipo de petróleo. A composição química de um petróleo típico (THOMAS, 2001) pode ser descrita em:

- Parafinas normais – 14%;
- Parafinas ramificadas – 16%;
- Parafinas cíclicas – 30%;
- Aromáticas – 30%;
- Resinas e asfaltenos – 10%.

A classificação do petróleo é interessante para se conhecer as frações que podem ser obtidas, sua composição e suas propriedades físicas. Para isso ele é dividido em classes:

- Classe parafínica ($\geq 75\%$ de parafinas);
- Classe parafínico-naftênica (50 – 75% de parafinas, $>20\%$ de naftênicos);
- Classe naftênica ($>70\%$ de naftênicos);
- Classe aromática intermediária ($>50\%$ de aromáticos);
- Classe aromático-naftênica ($>35\%$ de naftênicos);
- Classe aromático-asfáltica ($>35\%$ de asfaltenos e resinas).

Os óleos parafínicos são excelentes para produção de querosene de aviação (QAV), diesel, lubrificantes e parafinas. Os naftênicos produzem frações significativas de gasolina, nafta petroquímica, QAV e lubrificantes. Os aromáticos são mais indicados para produção de gasolina, solventes e asfalto.

A técnica mais utilizada para a classificação de petróleo é o TBP (*True Boiling Point* – Ponto de Ebulição Verdadeiro). Esta técnica está descrita nas normas ASTM D2893 e ASTM D5236. Esta técnica possui o contratempo de não poder ser utilizada em tempo real. É uma técnica de fracionamento que, além de demandar tempo, exige mão de obra especializada (SPEIGHT, 2006).

Historicamente, as propriedades físicas do petróleo como ponto de ebulição, densidade, odor e viscosidade têm sido utilizadas para descrever óleos. Petróleo também pode ser chamado de leve ou pesado em referência à quantidade de constituintes com baixo ponto de ebulição. A viscosidade indica a facilidade ou resistência ao escoamento (SPEIGHT, 2001).

2.1.1 Detecção Óptica do Petróleo

Um dos problemas ao se trabalhar com espectro de absorção do petróleo é a sobreposição de bandas de absorção e a saturação do sinal devido à alta absorbância do petróleo (HANNISDAL; HEMMINGSEN; SJÖBLOM, 2005). O petróleo é opaco na região do visível, porém apresenta translucidez em determinadas regiões do infravermelho. Ao observar-se o espectro de transmissão do petróleo, na Figura 1, verifica-se nas regiões A (< 1,2 μm), B (3,5 μm) e D (7 μm) que o petróleo possui baixa transmitância, ou seja, é opaco. Já nas regiões C (4 – 6,5 μm) e E (8 – 10 μm) o petróleo apresenta translucidez. Na presente dissertação a região de trabalho será de 8 a 12 μm .

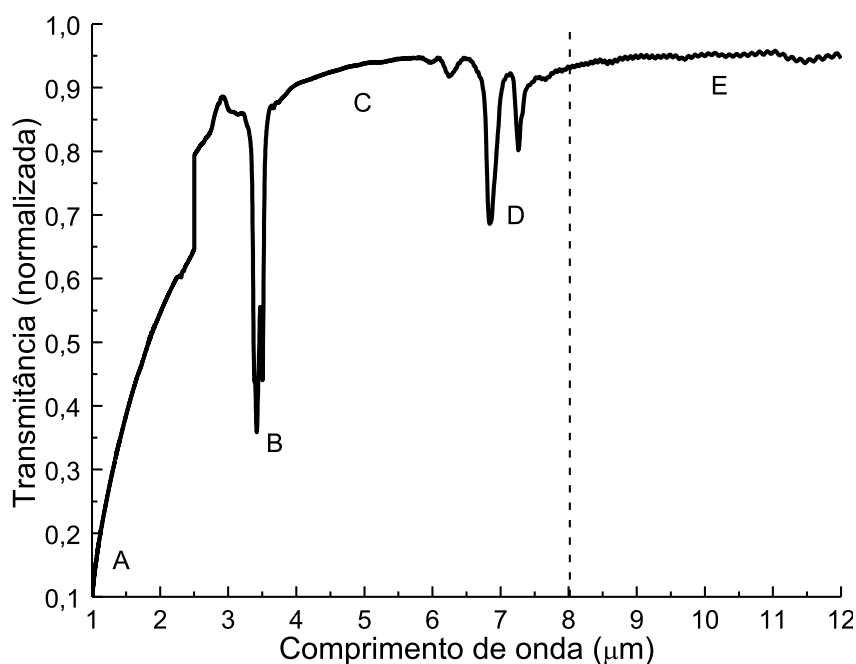


Figura 1 – Espectros de transmissão do petróleo e de absorção do CO₂ demonstrando áreas de opacidade e translucidez das substâncias
 Fonte: Rodolfo Patyk (2013)

A detecção óptica baseia-se na lei de Beer-Lambert, Equação (1). A radiação eletromagnética, ao atravessar meio absorvedor, sofre decaimento exponencial da intensidade de radiação, proporcional ao caminho óptico percorrido.

$$I = I_0 e^{-alc} \quad (1)$$

onde:

alc ou A = absorbância;

- α = coeficiente de absorção do meio;
 c = concentração de substância absorvente no meio;
 I = intensidade de radiação após atravessar o meio;
 I_0 = intensidade de radiação incidente;
 l = caminho óptico percorrido.

A Lei de Beer-Lambert pode ser melhor observada na Figura 2. O sistema de detecção óptica básico consiste em fonte de emissão de radiação, elemento detector e o meio a ser estudado.

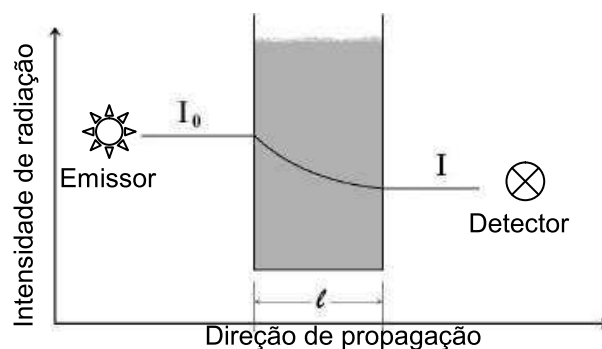


Figura 2 – Demonstração da Lei de Beer-Lambert. Ao atravessar meio absorvedor ocorre atenuação exponencial do sinal emitido em relação ao caminho óptico
 Fonte: Adaptado de Galo (2009)

O coeficiente de absorção do meio (α) possui dependência com o comprimento de onda da radiação emitida (λ), Equação (2). Onde k = coeficiente de extinção:

$$\alpha = \frac{4\pi k}{\lambda} \quad (2)$$

Alguns trabalhos buscam correlações entre os espectros de absorção e as propriedades físico-químicas do petróleo (CHUNG, 2007; FALLA et al., 2006). Outras técnicas para caracterização óptica de petróleo são empregadas com sucesso como fluorescência (RYDER, 2005) e espectroscopia de massa (MILLAN et al., 2005).

2.2 PROPRIEDADES DE INTERESSE DO INFRAVERMELHO

Em qualquer objeto todos os átomos existentes estão em movimento perpétuo. Quando o átomo se move acaba colidindo com outros átomos e transferindo parte de sua energia cinética. Após certo tempo o corpo alcança o

equilíbrio energético. Mesmo com o equilíbrio os átomos não vibram com a mesma intensidade, porém a intensidade total ainda pode ser descrita como a média da energia cinética de todos os átomos. Tal média de energia cinética é representada pela temperatura absoluta, medida em Kelvin.

De acordo com as leis da eletrodinâmica, uma carga elétrica em movimento está associada a um campo elétrico variável. O campo elétrico variável, por sua vez, produz um campo magnético variável. Também, um campo magnético variável produz um campo elétrico variável. Esta dependência gera o acoplamento entre os campos. Assim, uma partícula em movimento se torna uma fonte de campo eletromagnético que se propaga com a velocidade da luz. Este campo eletromagnético é chamado de radiação térmica (BISCUOLA; BÔAS; DOCA, 2007). Esta radiação é governada pelas leis da óptica, portanto ela pode ser refletida, refratada, filtrada, focada, entre outras (WEBSTER, 1999).

Ondas eletromagnéticas oriundas do movimento mecânico de partículas podem ser caracterizadas pela sua intensidade e comprimento de onda. Ambas as características são relacionadas com a temperatura do objeto. Quanto mais quente o objeto menor é o seu comprimento de onda. Exemplos desta comprovação serão apresentados na Figura 3 e Equação (5).

2.2.1 Lei de Planck

A lei de Planck, Equação (3), estabelece a emitância espectral (W_λ) radiante de um corpo negro em relação a determinado comprimento de onda (λ) e temperatura absoluta (T) (BUDZIER; GERLACH, 2011):

$$W_\lambda = \frac{\varepsilon(\lambda)C_1}{\pi\lambda^5 \left(e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1 \right)} \quad (3)$$

onde:

$\varepsilon(\lambda)$ = emissividade do objeto de medição;

$C_1 = 2\pi hc^2$;

$C_2 = hc/k$;

h = constante de Planck;

c = velocidade da luz;

k = constante de Boltzmann.

Resolvendo a Equação (3) para diferentes temperaturas são apresentadas as emitâncias espectrais na Figura 3.

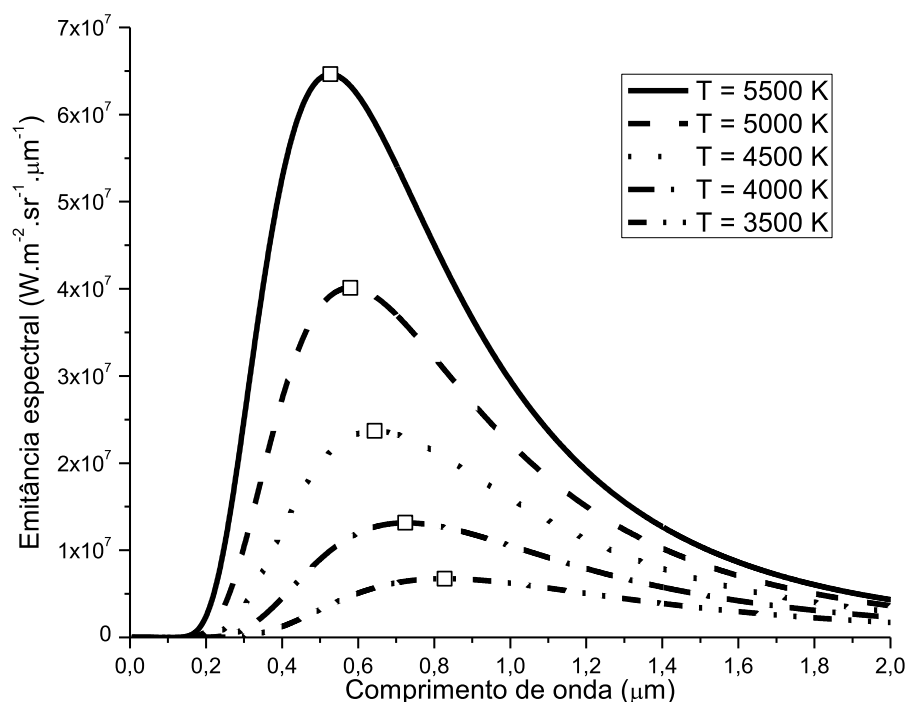


Figura 3 – Emitâncias espectrais e emitâncias espectrais máximas (quadrados) calculadas a partir da Lei de Planck, Equação (3), para $T = 3500, 4000, 4500, 5000$ e 5500 K, considerando fonte de corpo negro ($\epsilon = 1$)
Fonte: Autoria própria

Nota-se que os picos de emissão, marcados pelos quadrados no gráfico demonstram a teoria de que quanto maior a temperatura do objeto menor será o comprimento de onda da radiação térmica.

2.2.2 Lei de Wien

A Equação (3) possui uma difícil análise matemática, portanto é aproximada para uma versão simplificada, Equação (4), conhecida como Lei de Wien (WEBSTER, 1999):

$$W_{\lambda} = \frac{C_1}{\pi} \epsilon(\lambda) \lambda^{-5} e^{-\frac{C_2}{\lambda T}} \quad (4)$$

Como a temperatura é a representação estatística da energia cinética média ela determina a maior probabilidade das partículas vibrarem com frequência e comprimento de onda específicos. Este comprimento de onda mais provável segue da Lei de Wien igualando a zero a derivada parcial da Equação (4). O resultado do cálculo, Equação (5), é um comprimento de onda (λ_m) perto da qual a maior parte da energia radiante é concentrada:

$$\lambda_m = \frac{2,898 \cdot 10^{-3}}{T} \quad (5)$$

Analisando a Equação (5) observa-se, do mesmo modo que na Figura 3, que quanto maior a temperatura menor será o comprimento de onda. Para demonstrar a equivalência entre as Equações (3), (4) e (5) é elaborada a Tabela 3.

Tabela 3 – Comparação entre os valores calculados pela Lei de Planck e de Wien para as emitâncias espectrais máximas

Lei de Planck			Lei de Wien	
Temperatura (K)	Comprimento de onda (μm)	Emitância Espectral ($\text{Wm}^{-2}\mu\text{m}^{-1}$)	Comprimento de onda (μm)	Emitância Espectral ($\text{Wm}^{-2}\mu\text{m}^{-1}$)
5500	0,5272	$6,4614 \times 10^7$	0,5269	$6,4614 \times 10^7$
5000	0,5800	$4,0120 \times 10^7$	0,5796	$4,0120 \times 10^7$
4500	0,6444	$2,3691 \times 10^7$	0,6439	$2,3691 \times 10^7$
4000	0,7250	$1,3147 \times 10^7$	0,7244	$1,3147 \times 10^7$
3500	0,8285	$0,6743 \times 10^7$	0,8279	$0,6743 \times 10^7$

Fonte: Autoria própria

As intensidades máximas não apresentam diferenças, dentro da precisão utilizada. Os comprimentos de onda apresentam uma diferença entre 0,057% (5500 K) e 0,083% (4000 K).

2.2.3 Lei de Stefan–Boltzmann

Teoricamente, a largura de banda da radiação térmica é infinitamente larga. Tal fato é observado na Figura 3 cujo gráfico tende ao infinito. No entanto, a maior parte da energia emanada está situada dentro de largura de banda limitada. A fim de determinar a potência total irradiada limitada dentro de determinada largura de banda, a Equação (3) ou (4) deve ser integrada dentro dos limites de λ_1 para λ_2 . A

Equação (6) demonstra o fluxo radiante de energia (Φ) emitido por corpo negro à temperatura T .

$$\Phi = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} W_{\lambda} d\lambda = \frac{1}{\pi} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\varepsilon(\lambda) C_1 \lambda^{-5}}{e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1} d\lambda \quad (6)$$

Esta integral pode ser resolvida somente por aproximação ou método numérico. Para banda estreita a solução é aproximada pela Equação (7) (WEBSTER, 1999), onde $x = (1/\lambda_2)(1200/T)$.

$$\Phi = kT^x \quad (7)$$

Resolvendo a Equação (7), no espectro visível em $0,7 \mu\text{m}$ e com temperatura de aproximadamente 2000 K, a resposta será uma parábola de décima ordem. Resolvendo a Equação (6) para uma banda larga (λ_2 tendendo ao infinito) (RYBICKI; LIGHTMAN, 1985), tem-se a Equação (8), onde σ é a constante de Stefan-Boltzmann.

$$\Phi = \varepsilon \sigma T^4 \quad (8)$$

É visto que com o aumento da temperatura o fluxo radiante (Φ) aumenta em maior proporção devido à quarta potência da temperatura.

2.2.4 Lei de Kirchhoff da Radiação Térmica

Se a radiação atravessa de um meio para o outro ela pode ser absorvida, refletida ou transmitida pelo meio. Os coeficientes de absorção (α), reflexão (ρ) e transmissão (γ) do meio dependerão, entre outras coisas, da temperatura do corpo, composição química, características da superfície, bem como a polarização da radiação (BUDZIER; GERLACH, 2011). Do princípio da conservação de energia, tem-se a Equação (9).

$$\alpha_{\lambda} + \gamma_{\lambda} + \rho_{\lambda} = 1 \quad (9)$$

A Equação (9) pode ser exemplificada pela Figura 4.

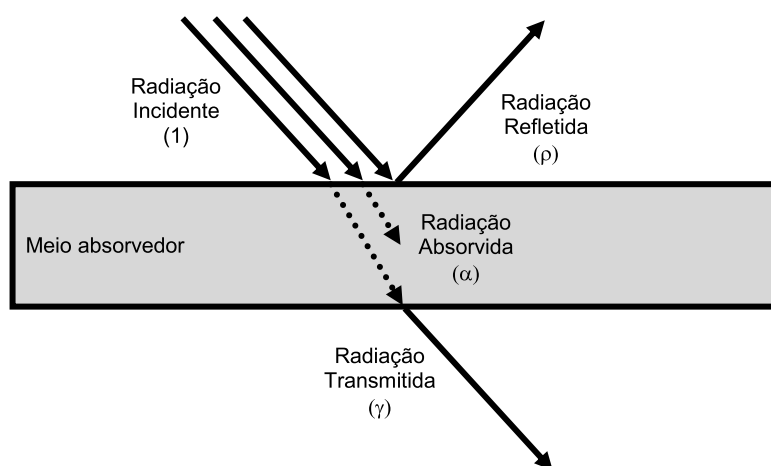


Figura 4 – Exemplificação da conservação de energia, após incidência de radiação eletromagnética em meio absorvedor parte da radiação será refletida, parte será transmitida e outra parte será absorvida pelo meio
Fonte: Autoria própria

Quando a radiação infravermelha incide sobre o meio e atinge o átomo/molécula, ela pode ser absorvida, fazendo com que o átomo/molécula vibre com maior intensidade ocasionando o aumento da temperatura do meio, este processo é chamado de absorção. Por sua vez o aumento da temperatura do meio, gerado pelo aumento da intensidade de vibração do átomo/molécula gera um campo eletromagnético que é emitido para o exterior do meio. Esse fenômeno é chamado de emissão. Todo corpo que esteja à temperatura diferente do zero absoluto emite radiação infravermelha (LIER, 2010).

Quando o corpo está sendo aquecido através da incidência de radiação pode-se dizer que este corpo está absorvendo mais do que emitindo. Já quando este corpo está resfriando ele passa a emitir mais do que absorver radiação. A lei de Kirchhoff da radiação, Equação (10), declara que, em equilíbrio térmico, a emissividade de corpo negro (*blackbody*) é igual à sua absorvidade, em determinado comprimento de onda, (EISBERG; RESNICK, 1994).

$$\alpha_{\lambda} = \varepsilon_{\lambda} \quad (10)$$

O corpo negro absorve toda a radiação térmica (em qualquer comprimento de onda) incidente sobre ele (EISBERG; RESNICK, 1994). Portanto, possui maior emissividade possível, em equilíbrio térmico, ($\varepsilon = 1$), é opaco ($\gamma = 0$) e não refletivo ($\rho = 0$), de acordo com a Equação (9). Tais fatos o tornam emissor e absorvedor ideal de radiação eletromagnética. O corpo negro trata-se de algo ideal, logo, não

existe na prática. Objetos reais com alta emissividade (0,99 ou maior) são chamados de corpo cinza (*greybody*).

Para reduzir as interferências causadas por radiações externas na câmera de IR, como a radiação térmica emitida pela iluminação do laboratório, por corpos alheios à medição e pelo encapsulamento da lâmpada, é importante que o objeto que está sendo medido seja posicionado em frente a plano de fundo que não reflita nem transmita radiações que nele incidam. Para alcançar este efeito são utilizados materiais que possuam alta absorção.

2.2.5 Emissividade

A emissividade do material está relacionada à sua constante dielétrica, consequentemente, está relacionado ao índice de refração (n). A emissividade é geralmente dependente do comprimento de onda. Por exemplo, uma folha de papel branco é muito reflexiva no espectro visível e, praticamente, não emite radiação visível. Já no infravermelho distante sua refletividade é baixa e sua emissividade alta (cerca de 0,92), ou seja, um bom emissor de radiação térmica. Para radiação do infravermelho distante, não polarizada e na direção normal a emissividade pode ser expressa pela Equação (11), (WEBSTER, 1999):

$$\varepsilon = \frac{4n}{(n + 1)^2} \quad (11)$$

Como regra geral materiais dielétricos possuem emissividade elevada e metais, baixa. Não metais possuem, geralmente, um ângulo sólido de $\pm 70^\circ$. Fora desta faixa a emissividade cai rapidamente à zero, Figura 5 (a). Em metais a emissividade possui grande dependência do acabamento da sua superfície. Metais polidos possuem baixa emissividade dentro do ângulo sólido de $\pm 70^\circ$, enquanto sua emissividade aumenta em ângulos maiores, Figura 5 (b).

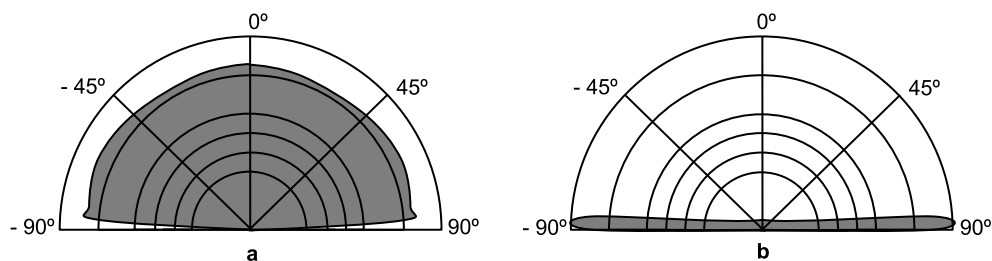


Figura 5 – Comparação da emissividade espacial para duas superfícies distintas. (a) não metálica, com emissividade alta até ângulo sólido de $\pm 70^\circ$ e tendendo a zero em ângulos superiores. (b) metal polido, com emissividade baixa até $\pm 70^\circ$ e alta em ângulos superiores
Fonte: WEBSTER (1999)

Aplicando a Equação (3) para $T = 5500$ K e atribuindo diferentes valores de emissividade (ε) obtêm-se as curvas da Figura 6.

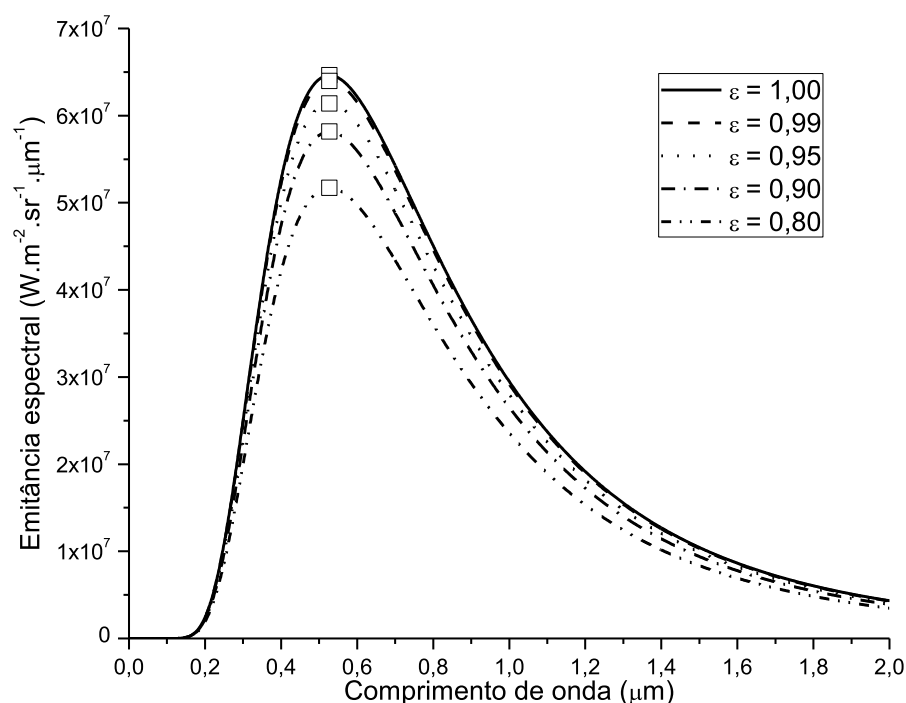


Figura 6 – Emitâncias espectrais e emitâncias espectrais máximas (quadrados) calculadas a partir da Lei de Planck, Equação (3), considerando fontes com diferentes emissividades
Fonte: Autoria própria

Observa-se que somente a intensidade da emitância espectral é alterada. O comprimento de onda de intensidade máxima para todas as emissividades permanece o mesmo.

Aplicando a lei de Planck, Equação (3), para a fonte de radiação utilizada e admitindo, segundo fabricante, temperatura de operação de 2500 K é gerado o gráfico da Figura 7.

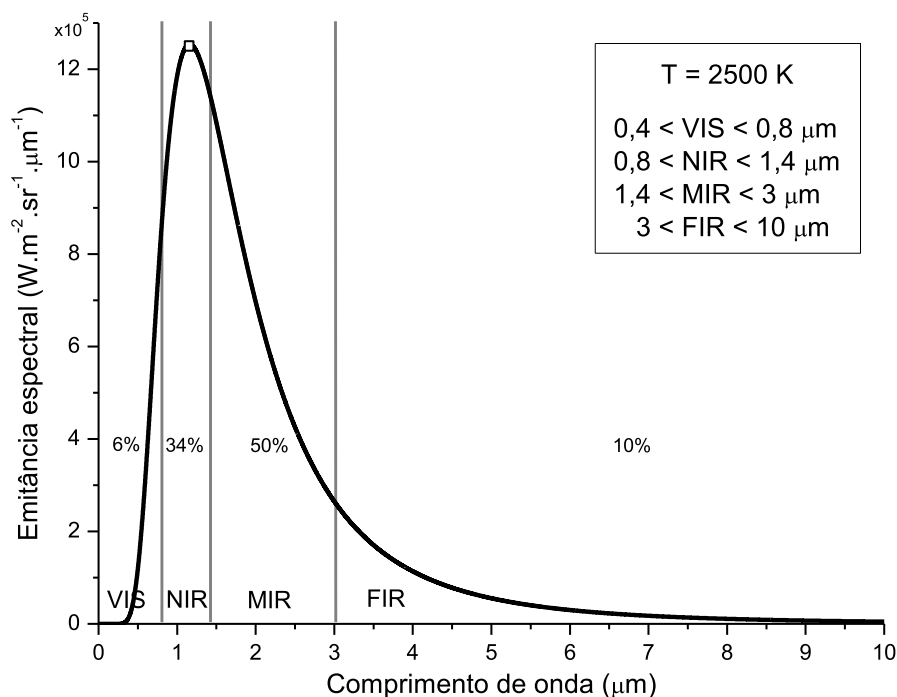


Figura 7 – Emitâncias espectrais para lâmpada halógena utilizada operando à temperatura de 2500 K. Neste caso 6% da radiação emitida está na região do visível ($\text{VIS} < 0,8 \text{ } \mu\text{m}$), 34% na região do infravermelho próximo ($0,8 < \text{NIR} < 1,4 \text{ } \mu\text{m}$), 50% no infravermelho médio ($1,4 < \text{MIR} < 3 \text{ } \mu\text{m}$) e somente 10% no infravermelho distante ($\text{FIR} > 3 \text{ } \mu\text{m}$)
Fonte: Autoria própria

Aplicado a Lei de Wien, Equação, encontra-se o pico máximo de emitância espectral de $12,54 \cdot 10^5 \text{ Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$ no comprimento de onda de $1,16 \text{ } \mu\text{m}$. Por mais que a lâmpada halógena utilizada possua potência elevada somente 10% da radiação emitida pela lâmpada encontra-se acima de $3 \text{ } \mu\text{m}$ (AKARI, 2013). Metade da radiação emitida concentra-se no infravermelho médio, de $1,4$ a $3 \text{ } \mu\text{m}$. Para o infravermelho próximo, $0,8$ a $1,4 \text{ } \mu\text{m}$ tem-se 34% da emissão e somente 6% está no espectro visível, $0,4$ a $0,8 \text{ } \mu\text{m}$.

Conhecendo-se o espectro de emissão da fonte é interessante verificar o funcionamento e a região espectral da sensibilidade de alguns detectores ópticos, que é abordado no capítulo a seguir.

3 TÉCNICAS DE DETECÇÃO ÓPTICA

Neste capítulo são apresentados sensores baseados na detecção de radiação eletromagnética que operam desde a região do ultravioleta até a região do infravermelho.

Os sensores piroelétricos, as válvulas fotomultiplicadoras os sensores baseados em termopilhas e os dispositivos de carga acoplada operam com princípio básico de transformação da radiação eletromagnética que neles incidem em uma corrente elétrica que possa ser amplificada e medida.

3.1 SENSORES PIROELÉTRICOS

Piroeletricidade é definida como a manifestação da dependência da temperatura da polarização espontânea de alguns sólidos anisotrópicos. Se a temperatura do material piroelétrico é alterada, seja ela aumentada ou diminuída, cargas elétricas irão aparecer em certas superfícies do sólido e tensões poderão ser medidas entre estas superfícies (COLBROOK; ROBERTS, 1989; ZHU et al., 1993).

O material piroelétrico exibe polarização espontânea dependente da temperatura na ausência de campo elétrico. Se a variação na polarização é ΔP para variação de temperatura ΔT , tem-se:

$$\Delta P = p\Delta T \quad (12)$$

onde p é o coeficiente piroelétrico do material. A polarização espontânea é resultado dos momentos dipolares de cada célula unitária de arranjo cristalino (LANG; DAS-GUPTA, 2001). O esquema do sensor piroelétrico é mostrado na Figura 8.

Os sensores piroelétricos possuem como vantagem responder a grande largura de banda espectral, 1 a 15 μm (MURATA, 2002), não necessitar de resfriamento, baixa potencia de alimentação, resposta rápida e, geralmente, baixo custo.

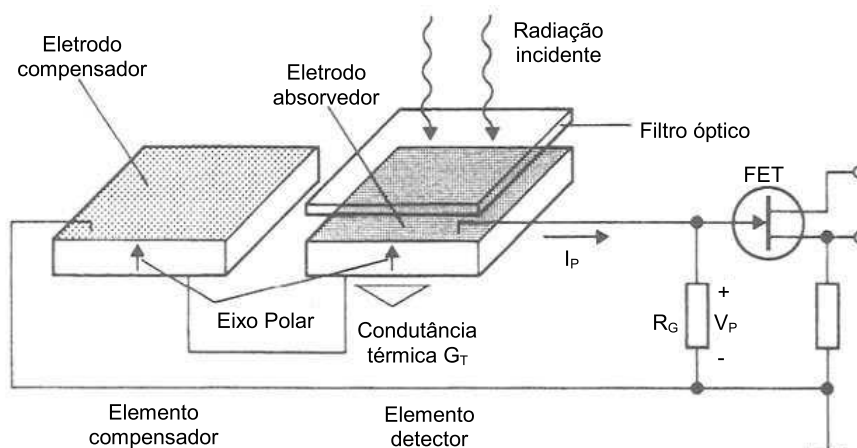


Figura 8 – Esquemático demonstrando os componentes de um de sensor piroelétrico com elemento de compensação de temperatura e amplificador de sinal (FET) na saída
Fonte: Adaptado de Verlag (1993 apud Lang; Das-Gupta, 2001)

Sensores piroelétricos possuem aplicações na detecção de presença, em ar condicionados, aparelhos eletrônicos, interruptores automáticos para equipamento de iluminação, monitores LCD, purificadores de ar, ventilação, entre outras (MURATA, 2002).

3.2 VÁLVULAS FOTOMULTIPLICADORAS

São detectores de radiação ultravioleta, visível e infravermelho próximo. Funciona pela multiplicação da corrente gerada pela radiação incidente por alguns milhares de vezes permitindo, por exemplo, a detecção de fótons individuais incidentes de fluxo de radiação muito baixo (KOVALTCHOUK et al., 2005; ZHONG, 2012).

A radiação atravessa o fotocátodo que está presente em fina camada depositada na janela de entrada do tubo do fotomultiplicador. Elétrons são tirados de suas órbitas e acelerados em direção aos eletrodos, chamados dinodos. Como os elétrons se movem em direção ao primeiro dinodo, eles são acelerados por diferença de campo elétrico e chegam com maior energia. Após atingir o primeiro dinodo, os elétrons de mais baixa energia são emitidos, esses elétrons, por sua vez, são acelerados em direção ao segundo dinodo. A geometria da cadeia de dinodos é tal que ocorre uma cascata de um número cada vez maior de elétrons produzidos em cada fase. Quando os elétrons atingem o ânodo do fotomultiplicador formam

uma corrente elétrica detectável (ENGSTROM, 1980; MARMONIER; FLYCKT, 2002).

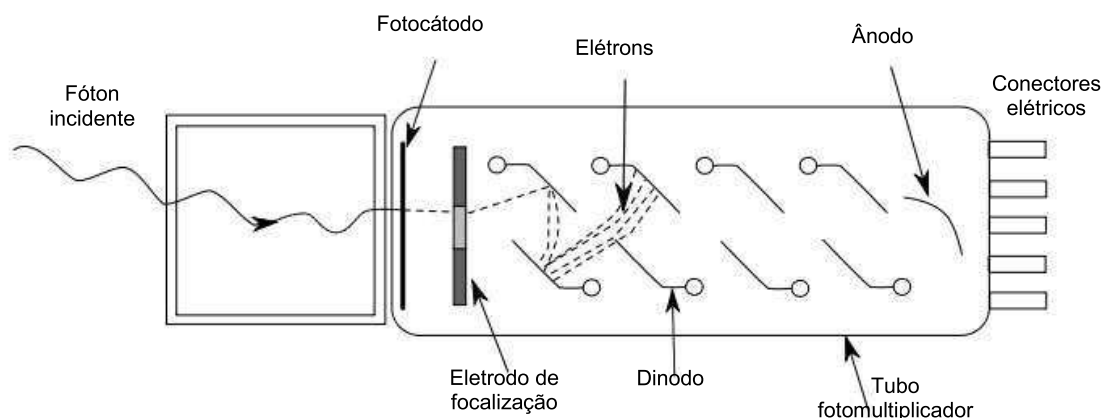


Figura 9 – Esquemático demonstrando válvula fotomultiplicadora. Fóton incidente atinge o fotocátodo e libera um elétron em direção ao primeiro dinodo. Quando o elétron atinge o dinodo acaba por liberar mais elétrons em direção ao próximo dinodo, estes elétrons são acelerados pela diferença de potencial de cada dinodo. Ao final os elétrons liberados atingem o ânodo onde a energia é captada
Fonte: Adaptado de Eberhardt (2006)

Os fotomultiplicadores são utilizados quando se pretende detectar e medir radiações de baixa intensidade. Sua sensibilidade pode ir de 300 a 900 nm (THORLABS, 2012) como observado na Figura 10.

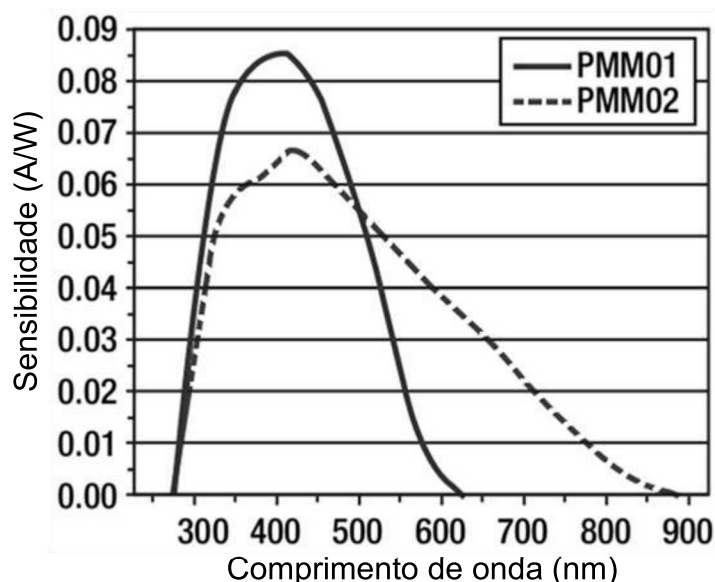


Figura 10 – Sensibilidade de fotomultiplicadores da Thorlabs. Modelos PMM01 e PMM02
Fonte: Adaptado de Thorlabs (2012)

A sua aplicação em astronomia é fundamental em medidas fotométricas do brilho das estrelas, sendo mesmo possível detectar fótons individuais provenientes de estrelas com brilho muito reduzido. Também utilizado em imageamento médico nuclear (AZEVEDO et al., 2013) e reator de neutrinos (ZHONG, 2012).

3.3 SENSORES BASEADOS EM TERMOPILHAS

A termopilha é constituída de vários termopares ligados, geralmente, em série (KUPHALDT, 2000). O termopar consiste na junção de dois materiais com coeficientes termoelétricos diferentes, Figura 11. Quando as duas junções estão a diferentes temperaturas, é gerada corrente proporcional à diferença de temperatura entre as duas junções. Esta corrente deve-se às diferenças no nível de Fermi nos metais. O nível de Fermi possui dependência com a temperatura (RYER, 1997).

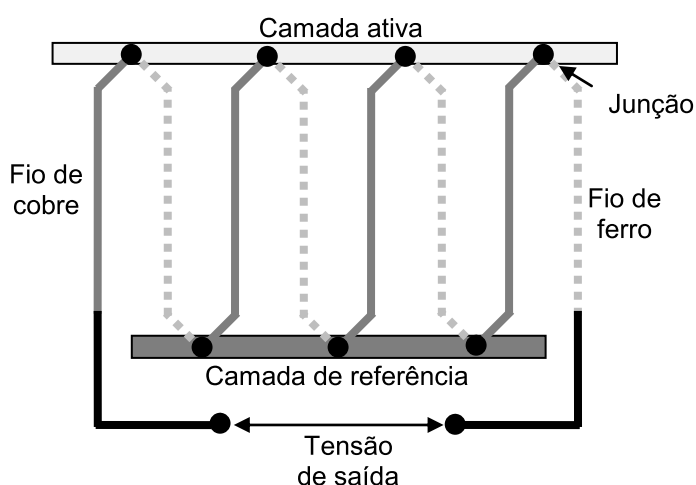


Figura 11 – Esquema da termopilha. A radiação de entrada altera a temperatura dos termopares na camada ativa. A tensão medida é a soma das tensões da série de termopares da camada ativa em relação ao da camada de referência
Fonte: autoria própria

Termopilhas possuem várias propriedades atrativas em comparação com os outros sensores, que são frequentemente utilizadas para a medição de diferença de temperatura. A termopilha é baseada no efeito de autogeração de Seebeck, no qual o sinal de entrada fornece a energia para o sinal de saída (HERWAARDEN et al., 1989). Isto assegura que:

- Ausência de interferência de quaisquer sinais físicos ou químicos, exceto radiação eletromagnética (que pode ser facilmente atenuada);
- Ausência de qualquer polarização;
- Leitura simples, necessitando somente um voltímetro;
- Ausência de interferência causada pelo fornecimento de energia.

As termopilhas conseguem operar até mesmo com baixos coeficientes de temperatura (SCHIEFERDECKER et al., 1995) e são fabricadas por deposição de filmes finos de metal (NIEVELD, 1982). Possuem sensibilidade na região de 0,3 a

14,5 μm (COHERENT, 2013; MELEXIS, 2013; NEWPORT, 2013). Possuem aplicação em controles de temperatura residencial, industrial e automotivo, instrumentação biomédica, controle de processos industriais e detecção de movimento (MELEXIS, 2013).

3.4 DISPOSITIVO DE CARGA ACOPLADA

Um dispositivo de carga acoplada (CCD) funciona convertendo a radiação eletromagnética em padrão de cargas eletrônicas em chip de silício através do efeito fotoelétrico. Quando o fóton atinge o átomo ele pode ser absorvido, gerando elétrons livres e lacunas (cargas positivas). Na ausência de campo elétrico externo essas cargas se recombinam rapidamente. No CCD o campo elétrico é inserido para evitar a recombinação. Cada elemento sensor é chamado de *pixel* (SPECTRAL INSTRUMENTS INC., 2013).

CCDs possuem melhor eficiência quando se trata do espectro visível da radiação eletromagnética, aproximadamente entre 400 e 700 nm, Figura 12. Porém ele pode chegar até o infravermelho próximo, aproximadamente 1100 μm (HAMAMATSU, 2012). Devido a sua faixa chegar somente até o infravermelho próximo o CCD não é utilizado para leituras térmicas, mas sim para visão noturna (YOUNG, 2012) e fotografias comuns e astronômicas (MACKAY, 1986; RÉ, 2008).

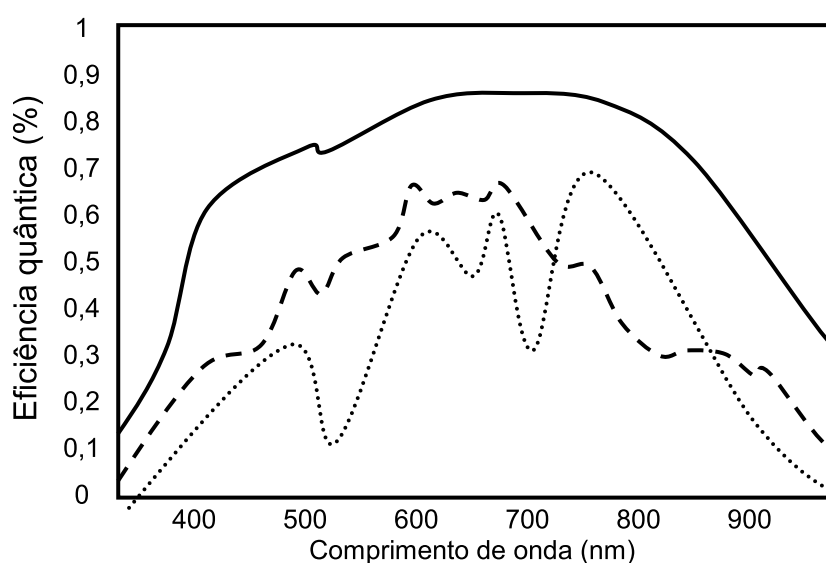


Figura 12 – Gráfico da eficiência quântica em relação ao comprimento de onda de CCDs padrão retroiluminados e com iluminação frontal
Fonte: adaptado de Berry e Burnell (2000)

Os CCDs utilizam processo especial de manufatura para criar a habilidade de transportar cargas (elétrons) através do chip sem distorção. Este processo permite alta qualidade do sensor em termos de fidelidade e sensibilidade à radiação.

Os dispositivos anteriormente citados: sensores piroelétricos, válvulas fotomultiplicadoras, sensores baseados em termopilha e CCDs ainda podem conter filtro óptico. Este filtro poderá selecionar região mais específica do espectro do que a sensibilidade do sensor.

4 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Para conceber a montagem da bancada e de seus componentes é feito teste para observar o comportamento da câmera ao medir objetos com temperaturas iguais e emissividades diferentes. Com estes resultados é possível decidir quais matérias serão usados, devido as suas propriedades de reflexão, transmissão, absorção e emissão, para diminuir a ação de radiações eletromagnéticas alheias a medição.

Antes de realizar o teste com o escoamento de petróleo e ar é feito o ensaio com o petróleo estático e o ar escoando. Desta maneira é utilizado volume pequeno de petróleo e também a velocidade da bolha de ar não é incrementada pela velocidade do fluxo. A velocidade da bolha é fator importante na detecção pela câmera de IR aplicada devido a sua baixa velocidade de aquisição.

Para poder comparar os resultados da câmera de IR com uma câmera CCD comum, que funciona no visível, é realizada a detecção do escoamento de óleo sintético e ar. O óleo sintético, ao contrário do petróleo, pode ser visualizado no espectro visível. O que possibilita comparação entre as medições realizadas entre a câmera de IR e a câmera CCD no visível.

Ao se realizar os testes de escoamento de ar em petróleo estático é observada diferença no comportamento óptico esperado. Analisando a Lei de Beer-Lambert, Equação (1), quando existe a presença da bolha de ar, com absorção menor que o petróleo, a intensidade de radiação que chega ao detector é maior do que quando somente há petróleo. Quando existe o escoamento de bolhas grandes de ar este comportamento se mantém, porém com o escoamento de bolhas pequenas de ar este comportamento se inverte, gerando intensidade menor no detector. Para explicar e verificar os efeitos causados pelos outros fenômenos ópticos que ocorrem com a radiação é desenvolvido modelo matemático.

4.1 ESTUDO EXPERIMENTAL DA EMISSIVIDADE

Grandeza importante ao se trabalhar com técnicas de IR é a emissividade. Ao contrário do corpo negro, corpos reais possuem emissividade variada para diferentes comprimentos de onda. Dois materiais distintos possuindo emissividades

diferentes, mesmo estando com a mesma temperatura superficial, emitirão intensidades de radiação diferentes, como já demonstrado na Figura 6, portanto a câmera de IR detectará duas intensidades diferentes.

Para averiguar tal teoria é montado sistema utilizando lata de alumínio, onde metade de sua superfície é recoberta por fita adesiva preta e outra metade permanece somente com a própria tinta da lata, Figura 13. Os dois materiais da superfície possuem emissividades (ϵ) diferentes, aproximadamente 0,95 para a fita preta e 0,7 para a superfície da própria lata (FLIR, 2010). A superfície da lata será aquecida inserindo em seu interior água a 96 °C, tornando a lata fonte de emissão de radiação infravermelha.

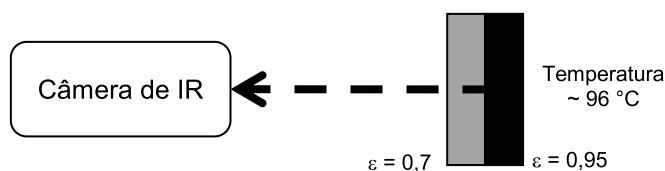


Figura 13 – Esquema de montagem para teste de emissividade com a câmera de IR adquirindo dados simultâneos de duas superfícies com emissividades diferentes.
Fonte: Autoria própria

É empregado como detector de IR matriz de termopilhas (TPA – *Thermopile Array*) operando na região do infravermelho entre 8 e 12 μm , encapsulada em módulo de metal, com taxa de aquisição de 10 quadros por segundo e 992 *pixels* de resolução (31 x 32 *pixels*). A câmera possui como saída de dados os formato de figura (png), vídeo (avi), texto (txt) e binário (bds) (HEIMANN SENSOR, 2012).

A aquisição de dados pela câmera de IR é iniciada com as duas superfícies a temperatura ambiente. Então a lata é preenchida com água a aproximadamente 96 °C.

Na Figura 14 b as superfícies são observadas com câmera CCD operando no espectro visível. Analisando a Figura 14 a, adquirida com câmera de IR, à temperatura ambiente (~ 20 °C), é observada a alta refletividade do lado sem a fita preta. A mancha mais clara é resultado de reflexão de fontes de radiações externas alheias ao experimento. Recorrendo a Equações (9), sobre conservação de energia, para se possuir grande refletividade o material possui baixas transmissão e absorção. E se tratando de equilíbrio térmico, a emissão é igual a absorção, Equação (10).

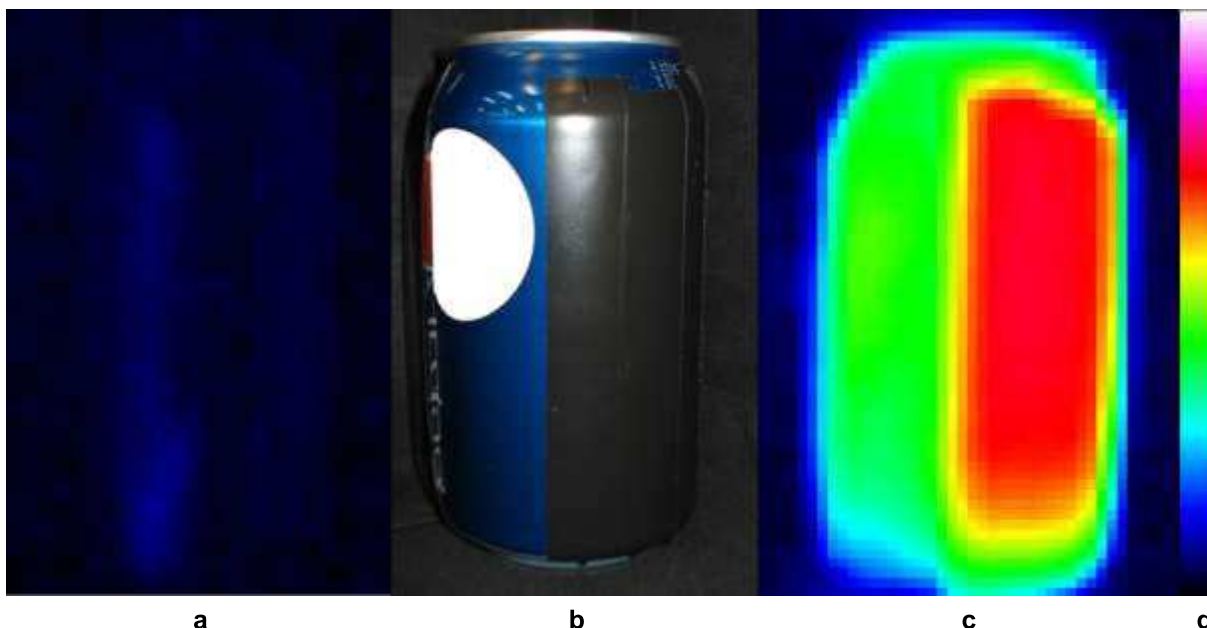


Figura 14 – Resultados para o teste de emissividade. (a) Os dois materiais em temperatura ambiente ($\sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$) sendo observados no infravermelho. (b) Os dois materiais sendo observados na região do visível. (c) Materiais a aproximadamente $96\text{ }^{\circ}\text{C}$ sendo observados na região do infravermelho. À esquerda $\varepsilon = 0,7$ e à direita $\varepsilon = 0,95$. (d) Indicação da faixa de cores adotada, sendo abaixo a menor intensidade e acima a maior
Fonte: Autoria própria

Após o preenchimento da lata com água a aproximadamente $96\text{ }^{\circ}\text{C}$ é adquirida, com câmera de IR, a Figura 14 c. Percebe-se claramente a diferença de detecção das intensidades de radiação emitidas pelos dois lados da lata. Devido à radiação em corpos não metálicos se assemelharem a emissão pontual de objeto isotrópico observa-se no inferior da Figura 14 c aparente diferença no tamanho da lata. Ainda observando a Figura 14 c é notada diminuição da intensidade da emissividade na extremidade direita da lata. Este efeito ocorre devido à geometria da lata. Sua extremidade é observada pela câmera com ângulo próximo de 90° em relação à normal da superfície. Recorrendo a Figura 5 a é observado que em materiais não metálicos a emissividade em ângulos próximos de 90° é baixa.

4.2 ESTUDO DA EMISSIVIDADE DO SISTEMA DE DETECÇÃO DE PETRÓLEO NO INFRAVERMELHO

Este trabalho está no limiar entre o domínio óptico e o térmico. Ao utilizar a radiação infravermelha, sua interação com os objetos resultará no aquecimento de todo o sistema.

Como fonte é utilizada a radiação infravermelha emitida por lâmpada halógena, encapsulada em módulo Newport, a fim de direcionar e colimar a radiação, e acionada pelo controlador Newport 69935. O controlador pode variar a potência entregue à lâmpada de 175 a 1000 W. A lâmpada halógena em questão possui emissão no espectro visível e como efeito secundário, devido ao seu aquecimento, também possui emissão no infravermelho, com intensidade máxima centrada em $1,2 \mu\text{m}$. Devido à alta potência da radiação infravermelha gerada pela lâmpada o seu encapsulamento aquece e, conseqüentemente, o ambiente ao seu redor.

A montagem óptica para todos os experimentos possui a mesma configuração básica, sendo somente substituída a cuveta para as diferentes medições, Figura 15.

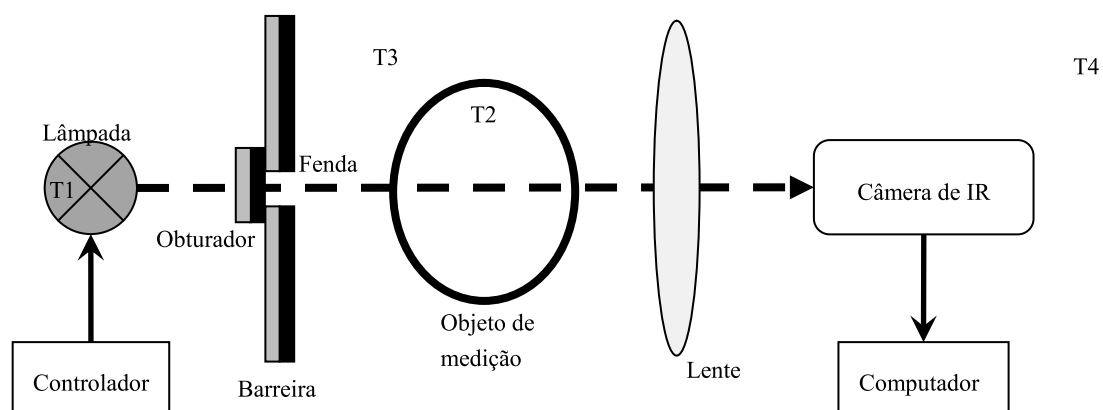


Figura 15 – Esquema base de montagem óptica que será utilizado nos testes. O controlador aciona a lâmpada halógena com uma potência que pode variar de 175 W a 100 W. A barreira busca não deixar com que o aquecimento do ar ao redor da lâmpada aqueça a área que se encontram os demais materiais. O tamanho da fenda pode ser regulado para que a lâmpada ilumine com uniformidade o objeto de medição. A lente auxilia a visualização da cuveta pela câmera de IR focando e aumentando a janela de visualização

Fonte: Autoria própria

Para diminuir os efeitos do aquecimento da lâmpada todos os lados dos anteparos voltados para a lâmpada são revestidos com papel alumínio. É utilizado o papel alumínio para se conseguir alta reflexão e baixas transmissão e absorção, conforme a Equação (9). Deste modo a radiação térmica gerada pelo aquecimento da lâmpada será refletida e terá menor influência na câmera de IR. Já o lado voltado para a câmera de IR é forrado com papel camurça preto, para que refletividade e transmissão sejam mínimas. Deste modo não ocorreram múltiplas reflexões da radiação no lado da detecção. O forro também torna o plano de fundo uniforme, colaborando para as medições.

A temperatura do laboratório é controlada (21 °C) possuindo variação de temperatura de no máximo ± 2 °C. A fenda, que permite a passagem da radiação, é elaborada de tal modo que possa ser mudada sua área de abertura com a adição de anteparos. Deste modo é possível ser controlada a área a ser atingida pela radiação (BUDZIER; GERLACH, 2011).

Entre a cuveta e o sensor existe lente de vidro para atenuar parte da radiação e também para ajustes de focalização. Os dados do detector são adquiridos por computador via ethernet. A cuveta é confeccionada com secção transversal interna de 18x40 mm e 10 mm de espessura, Figura 16. Como janelas ópticas são utilizadas lamínulas de borosilicato com 0,15 mm de espessura. A cuveta preenchida com petróleo é inserida no local da medição

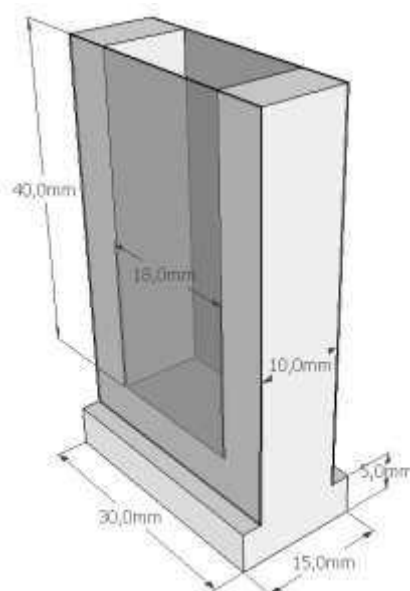


Figura 16 – Cuveta para armazenamento da amostra de petróleo durante testes ópticos. Comprimento de iteração de 10 mm, 18x40 mm de secção transversal e janelas ópticas de borosilicato com 0,1 mm de espessura

Fonte: Autoria própria

Quatro termopares são posicionados como mostrado na Figura 15: na lâmpada (T1), no interior da amostra de petróleo (T2), próximo à amostra (T3) e na bancada (T4).

No início do experimento a fenda está bloqueada, impedindo a interação direta da fonte com a cuveta. Os dados da câmera de IR e dos termopares são adquiridos no mesmo instante que a lâmpada é ligada, em $t = 0$ s. Após aguardar 2,5 h para a estabilização térmica do sistema, verificada através de T1 (temperatura da lâmpada), o obturador é aberto permitindo a passagem da radiação da lâmpada

através da cuveta. O fechamento do obturador é realizado três horas após sua abertura. Destas três horas, uma hora é meia é para a estabilização térmica do sistema. Os dados continuam a ser adquiridos por mais 1 h, até a estabilização das temperaturas, e então todos os dispositivos são desligados.

Para o tratamento dos dados é desenvolvida rotina de programação utilizando os dados numéricos de intensidade da câmera de IR. Os dados são adquiridos na forma de uma matriz 31x32. Como geralmente o objeto de medição não ocupa toda a área da matriz é selecionada manualmente no programa a área a ser trabalhada. Dentro desta área delimitada é feita a média dos valores dos *pixels* e como erro é utilizado a diferença entre o valor máximo e mínimo desse intervalo.

Os efeitos térmico e óptico que ocorrem com o sistema ao ser submetido à radiação da fonte são observados na Figura 17.

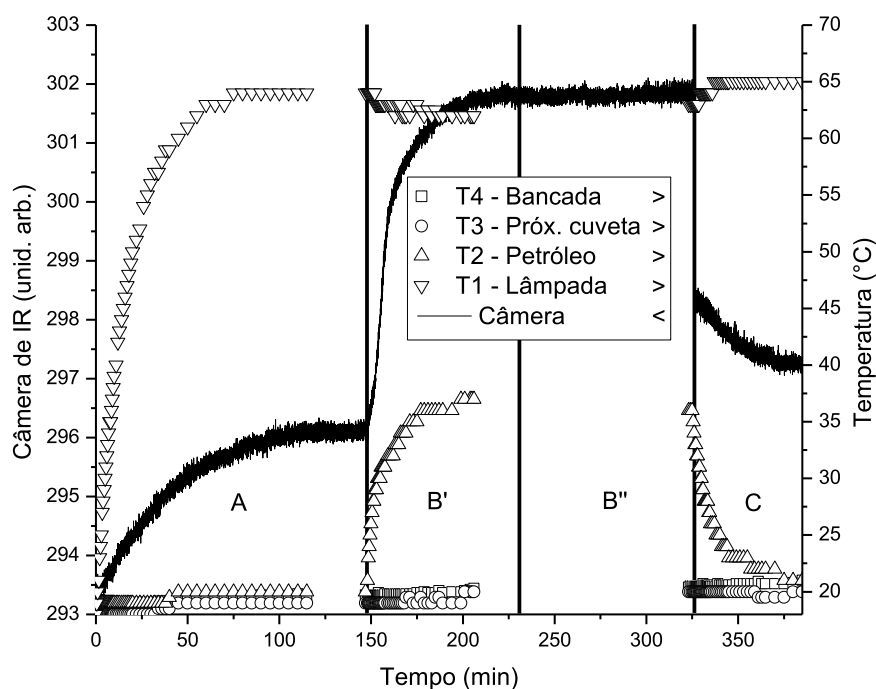


Figura 17 – Resposta óptica da leitura da câmera de IR em relação ao aquecimento da amostra de petróleo devido a incidência da radiação da lâmpada halógena. Região A – Obturador fechado. Lâmpada ligada. Câmera ligada. Equalização das temperaturas. Região B' – Obturador aberto. Aquecimento do petróleo. Região B'' – Temperaturas equalizadas. Região C – Obturador fechado.

Fonte: Autoria própria

Na região A ocorre a estabilização da temperatura da lâmpada e da ambiente. Em B' o obturador é aberto, neste momento a radiação atravessa a amostra e ocorre uma nova equalização de temperaturas. Já em B'' o sistema encontra-se em equilíbrio onde a absorção é igual a emissão, (10). O fechamento do obturador delimita a região C. Com o bloqueio da radiação que era transmitida

através do petróleo o sinal de intensidade cai radicalmente. Os dados de temperatura externa, interna, cuveta e lâmpada correspondem ao eixo direito, o da câmera de IR ao eixo esquerdo.

Na curva utilizando T1, referente à temperatura da lâmpada, nota-se o instante em que ela é ligada ($t = 0$ min) e seu ponto de estabilização ($t \approx 75$ min). É observada uma diminuição da temperatura no instante em que o obturador é aberto, isto porque o obturador reflete parte do calor para o termômetro, que se encontra próximo a ele.

Nas temperaturas externa (T4) e interna (T3) existe uma variação de aproximadamente $2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Em verde é vista a temperatura dentro da cuveta. Percebe-se o aumento da temperatura em A com o aquecimento da temperatura ambiente. Em B' ocorre um aumento abrupto da temperatura causada pela incidência direta da radiação da lâmpada. Nota-se, na curva da câmera de IR, que ao ser ligada a lâmpada ($t = 0$ min) a intensidade aumenta. O aumento na intensidade é resultado do aquecimento das barreiras por causa da radiação direta da fonte que elas bloqueiam.

Destacando somente a curva da câmera de IR na Figura 18 são ressaltados os efeitos ópticos e térmicos. Na região A assemelha-se o comportamento do sistema a objeto opaco, pois a transmissão da radiação emitida pela fonte é bloqueada já que o obturador encontra-se fechado. Deste modo a radiação que ainda consegue atravessar os anteparos é absorvida pelo petróleo e pela cuveta gerando um aquecimento do conjunto.

Devido ao aquecimento, o conjunto passa a emitir radiação IR. Quando o obturador é aberto além do comportamento já descrito passa a ocorrer a transmissão da radiação. Neste momento a câmera de IR passa a captar tanto a radiação que o petróleo emite quanto a radiação que por ele atravessa. Estes efeitos combinados geram a inclinação observada como efeito óptico de abertura.

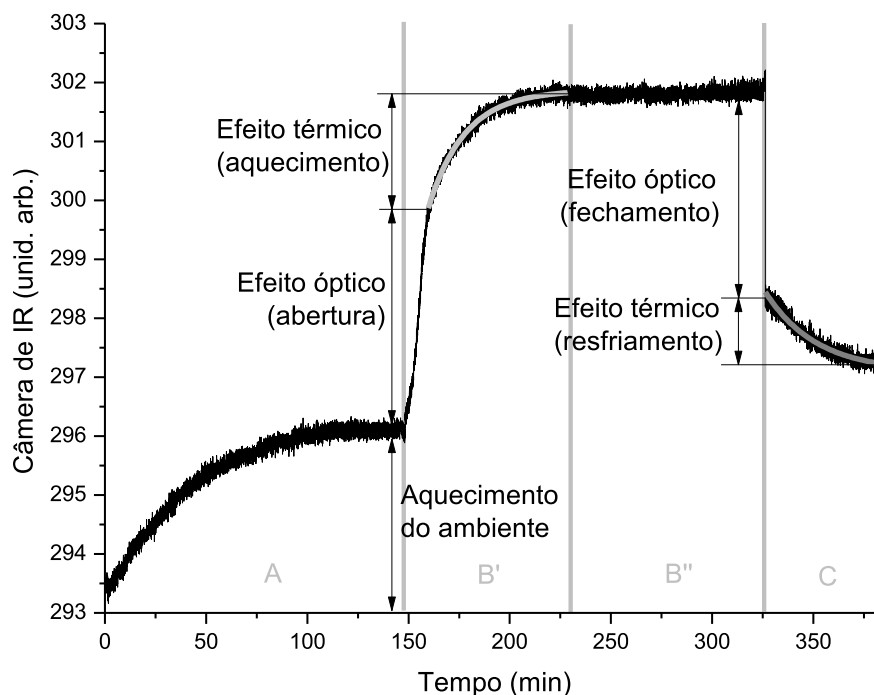


Figura 18 – Destaque dos efeitos ópticos e térmicos ocorridos na leitura da câmera de IR em relação ao aquecimento da amostra de petróleo
Fonte: Autoria própria

Realizando um ajuste exponencial nas curvas do efeito térmico de subida e descida tem-se as equações (13) e (14), respectivamente.

$$y_s = -12839,1 e^{-\frac{t}{18,2}} + 301,8 \quad (13)$$

$$y_d = 629157,8 e^{-\frac{t}{25}} + 297,1 \quad (14)$$

Analisando os coeficientes exponenciais percebe-se que o efeito de subida aumenta rapidamente. Já o efeito de descida é mais demorado se aproximando de uma reta. Estas afirmações são comprovadas com os coeficientes exponenciais das equações onde o da Equação (13) é menor que o da Equação (14).

Ao comparar a intensidade final da medição da câmera de IR ($t = 385$ min) com a temperatura de equilíbrio logo antes do obturador ser aberto ($t \approx 150$ min) constata-se uma variação (ΔI) neste valor, Figura 19.

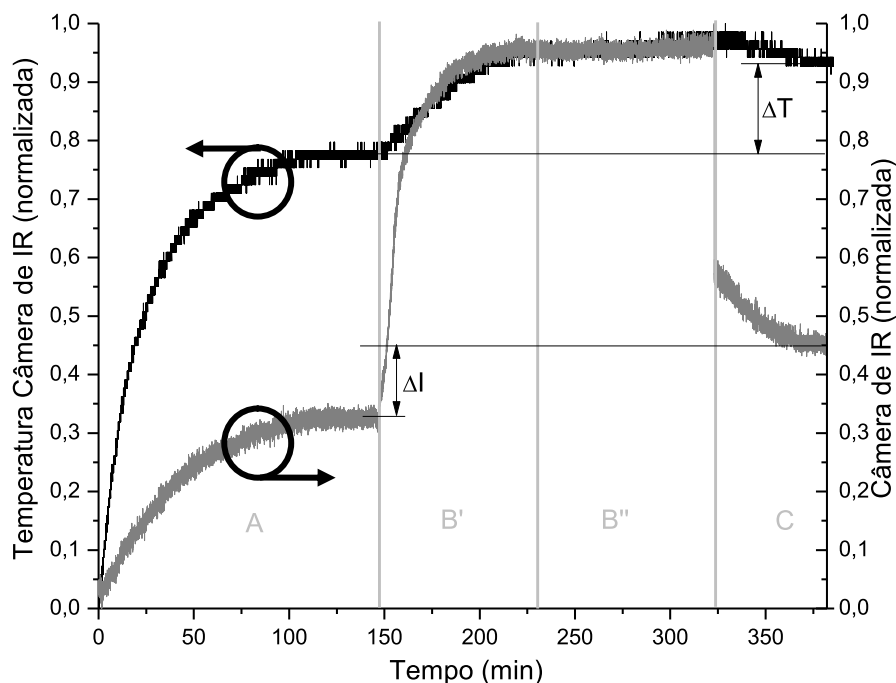


Figura 19 – Leitura óptica e temperatura interna da câmera de IR em relação ao aquecimento da amostra de petróleo. Em destaque a variação de temperatura e intensidade relacionando abertura do obturador com o final do experimento

Fonte: Autoria própria

O esperado era que estas intensidades fossem iguais, dado que o sistema volta para a mesma condição inicial. Essa diferença de valores ocorre por causa do aumento da temperatura interna da câmera de IR (ΔT) devido à incidência da radiação da lâmpada que atravessa o petróleo.

4.3 ABSORÇÃO ÓPTICA RELATIVA DO PETRÓLEO

Em peças de alumínio são confeccionadas quatro cuvetas com medidas internas de 12x16 mm de secção transversal e 2, 3, 4 e 5 mm de espessura, como pode ser observado na Figura 20. Como janelas ópticas são utilizadas lamínulas de microscópio de borosilicato com 0,15 mm de espessura. Novamente seguindo o item 4.2 e utilizando o sistema óptico da Figura 15 as cuvetas contendo petróleo são posicionadas uma a uma no local de medição.

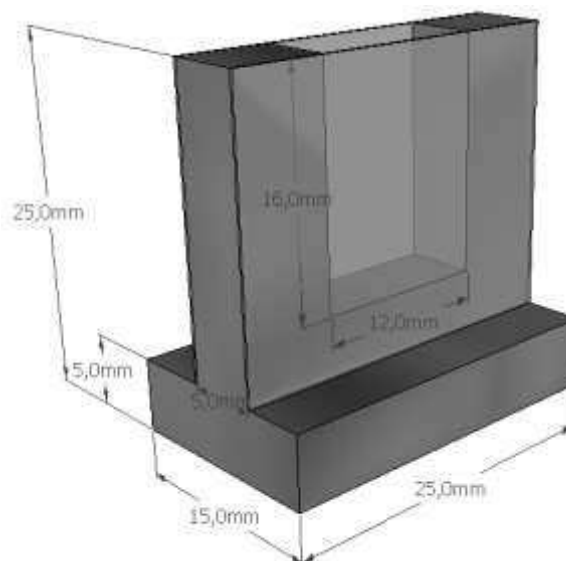


Figura 20 – Cuveta para armazenamento da amostra de petróleo durante testes ópticos. Comprimento de iteração de 5 mm, 12x16 mm de seção transversal e janelas ópticas de borossilicato com 0,1 mm de espessura
Fonte: Autoria própria

A lâmpada é regulada com potência de alimentação de 175 W. Com o obturador fechado a câmera de IR grava por 10 min os dados que servirão de referência para a medida. Após o tempo de estabilização da lâmpada o obturador é aberto e são gravados os dados da intensidade de radiação que atravessa a amostra de petróleo por 10 min. O experimento é repetido para cada uma das 4 cuvetas.

Após leitura da intensidade da radiação que atravessa cada uma das quatro cuvetas de petróleo os dados são tratados através de rotina computacional. Na rotina é selecionada na matriz que a câmara de IR gera como resposta a área coposta pelos pixels correspondentes a janela óptica da cuvette. Destes dados é gerada a média da intensidade e criado o gráfico da Figura 21.

Fazendo a regressão linear, Equação (15), é possível encontrar o coeficiente de absorção relativo de 5,76859 unidades arbitrárias por milímetro.

$$I_{Petro} = -5,76859 l_{Petro} + 32,7252 \quad (15)$$

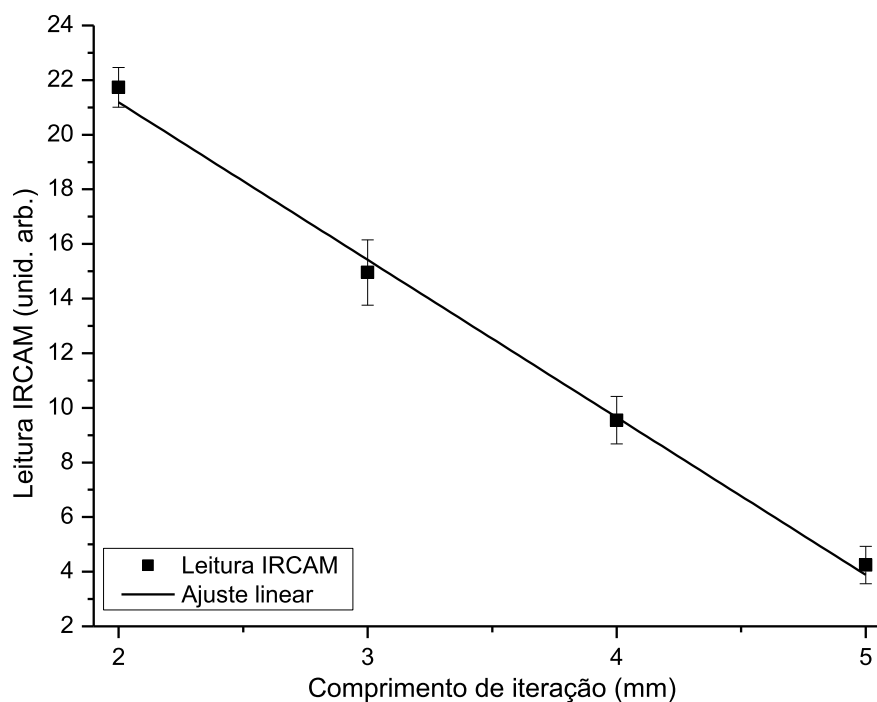


Figura 21 – Levantamento do coeficiente de absorção relativo do petróleo, para a câmera de IR (5,776859 unid. arb./cm), utilizando os comprimentos de iteração de 2, 3, 4 e 5 mm
Fonte: Autoria própria

De modo semelhante é realizado experimento para determinar o coeficiente de absorção relativo do CO₂ sendo este apresentado no Apêndice A.

4.4 ESCOAMENTO DE AR EM PETRÓLEO

Como o escoamento de petróleo envolve a utilização de grande volume da substância e dada a pouca disponibilidade de amostras de petróleo é estudado o funcionamento do detector com o escoamento de bolhas de ar em amostras de petróleo estático. Outra vantagem ao se utilizar o petróleo estático é na velocidade das bolhas. Com o fluxo de petróleo a velocidade com que as bolhas escoam acaba aumentando, porém a câmera de IR disponível possui baixa velocidade, o que impossibilita medições com fluxos de velocidade elevada.

Para armazenar o petróleo durante as medições são confeccionadas três cuvetas semelhantes as da Figura 16, uma com secção transversal interna de 12x30 mm e 5 mm de espessura e outras duas com 18x40 mm de secção transversal com 5 e 10mm de comprimento de iteração. Na parte inferior de cada cuveta é inserido um tubo para a injeção de gás. Para realizar a injeção controlada

de ar é acoplada uma seringa ao tubo, Figura 22. A cuveta de 5 mm é posicionada como mostrado na Figura 23 e na Figura 24.

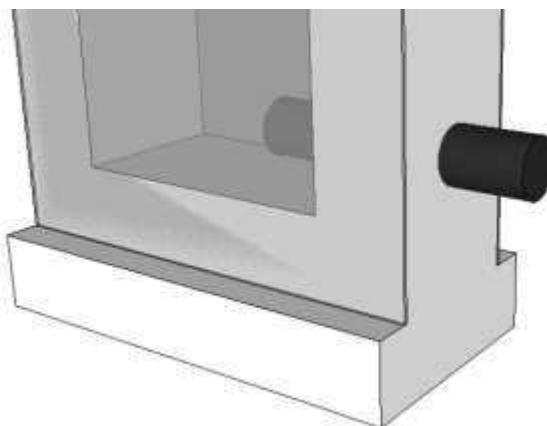


Figura 22 – Detalhe da cuveta com tubo para admissão de ar para injeção do escoamento de bolhas no interior do petróleo
Fonte: Autoria própria

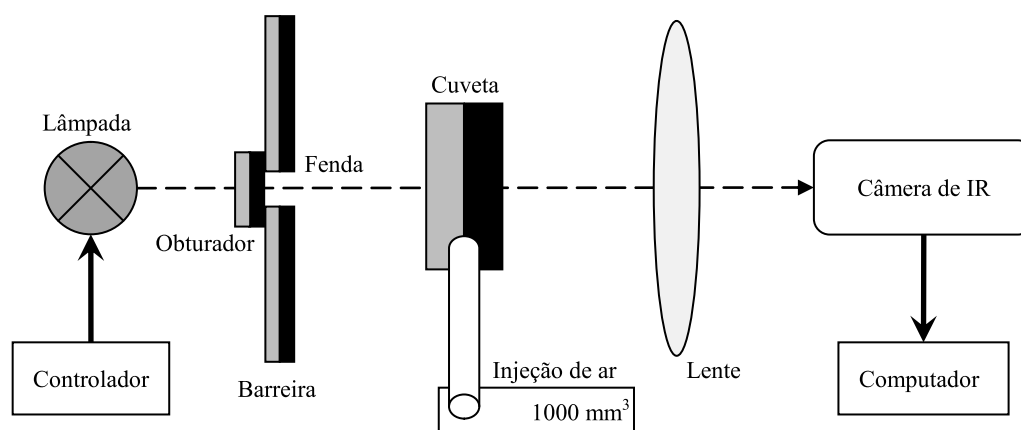


Figura 23 – Esquema de montagem do sistema óptico para escoamento de bolhas de ar em petróleo
Fonte: Autoria própria

A potência de alimentação da lâmpada é ajustada para 175 W e é aguardada a sua estabilização antes de iniciar o procedimento. O obturador é aberto e é aguardada a estabilização da temperatura do sistema. Então é iniciada a captura de imagens pela câmera de IR. Bolhas são inseridas na cuveta através da seringa. É repetido o mesmo procedimento com todas as cuvetas.

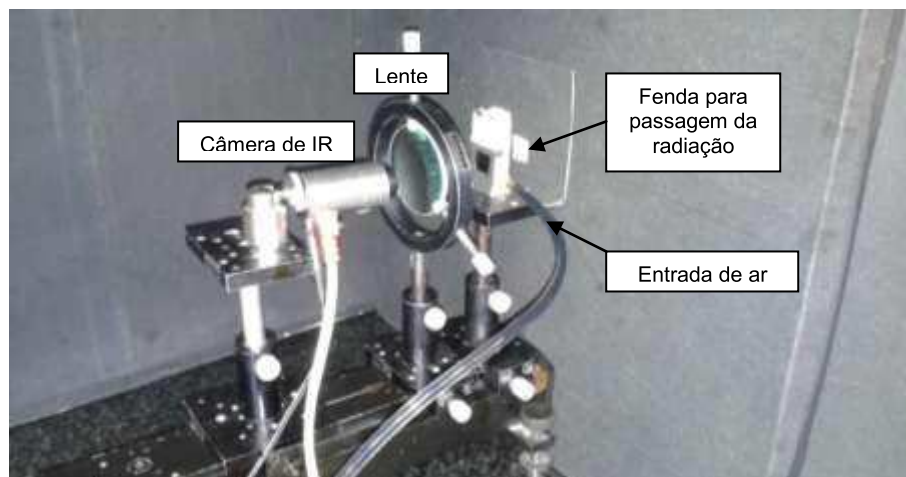


Figura 24 – Sistema óptico para escoamento de bolhas de ar em petróleo
Fonte: Autoria própria

4.5 ESCOAMENTO BIFÁSICO PETRÓLEO-AR

A planta de escoamento existente no Laboratório de Ciências Térmicas – LACIT foi desenvolvida para o escoamento bifásico envolvendo ar e água. Inserir qualquer tipo de óleo ao invés de água geraria grande transtorno na tentativa de limpar além de poder estragar equipamentos e contaminar os posteriores ensaios envolvendo o escoamento de água. Para gerar o escoamento do petróleo se faz necessário o desenvolvimento de bancada de pequeno porte para realizar os testes.

Para gerar o escoamento do petróleo é desenvolvido, o circuito fechado para circulação, Figura 25. O bombeio do óleo é gerado por bomba acionada através de motor monofásico controlado por inversor de frequência. Na parte superior da bomba é acoplado o reservatório com capacidade máxima de 400 ml. As tubulações que chegam até a cuveta e saem da cuveta para o reservatório são de cobre com 12 mm de diâmetro.

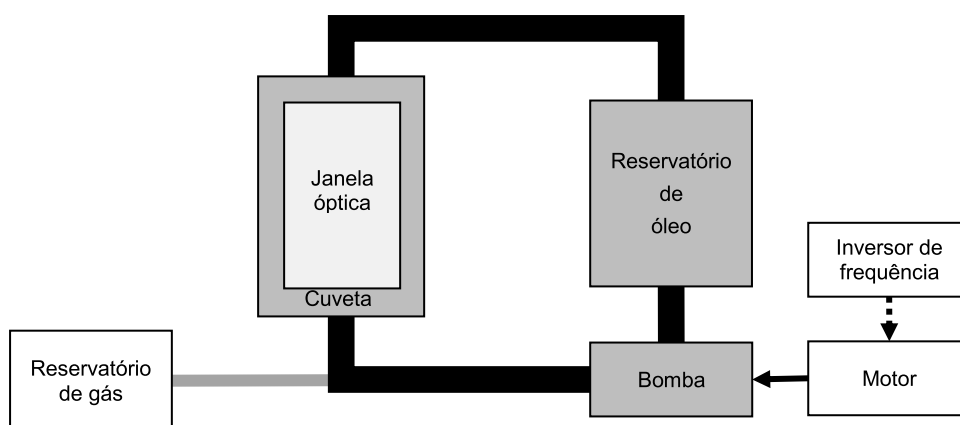


Figura 25 – Esquema do circuito de escoamento bifásico envolvendo petróleo e ar
Fonte: Autoria própria

A cuveta é usinada em alumínio, Figura 26, com comprimento de iteração de 12 mm, secção transversal de 13 x 40 mm e como janelas ópticas são utilizadas lamínulas.

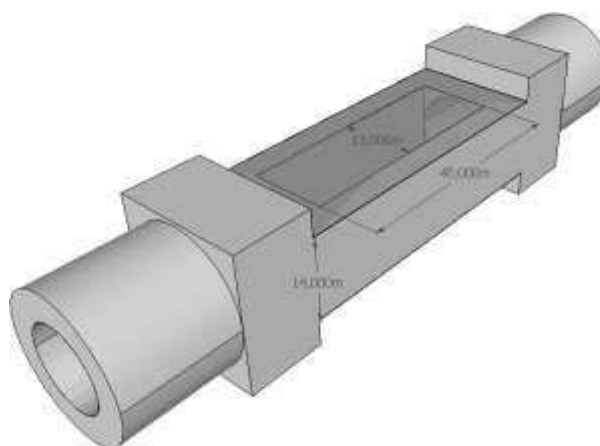


Figura 26 – Cuveta usinada em alumínio para circuito de circulação de petróleo. Comprimento de iteração de 14 mm e secção transversal de 13 x 40 mm
Fonte: Autoria própria

A injeção de gás se dá tanto de forma automática como de forma manual e encontra-se 75 mm abaixo da janela óptica. Uma seringa pode ser acoplada a uma das entradas de gás podendo ser gerado volume determinado de gás a ser inserido no sistema. De forma automática o sistema é ligado a linha de ar comprimido, podendo ser controlada a vazão de ar através de válvula agulha. O circuito é observado na Figura 27.

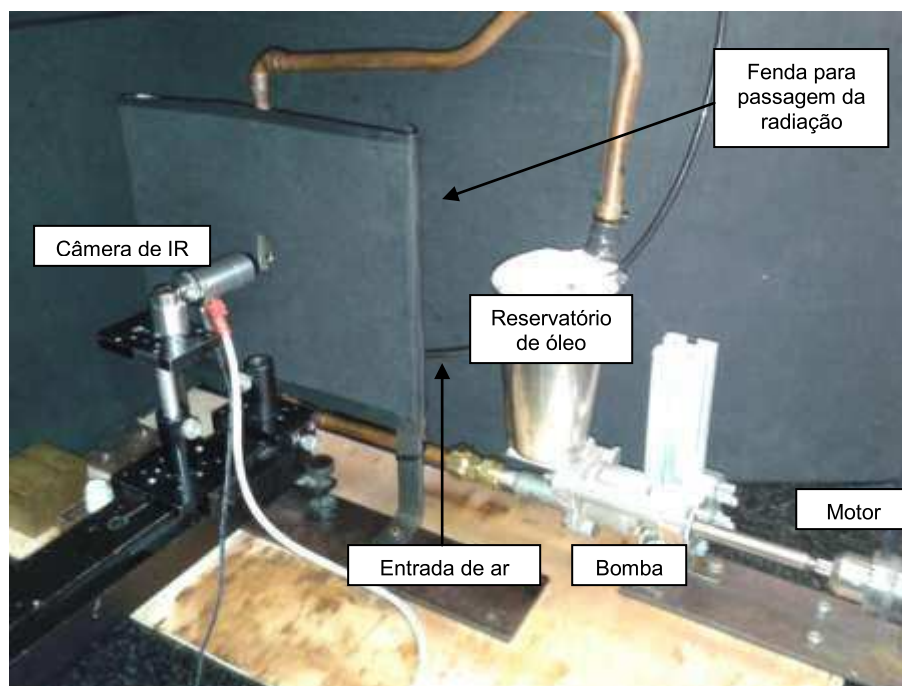


Figura 27 – Circuito de escoamento bifásico envolvendo petróleo e ar
Fonte: Autoria própria

Como o petróleo é opaco para o espectro visível é realizado teste com óleo sintético automotivo. Assim é possível observar o padrão de bolhas tanto no visível como no infravermelho.

No gráfico da Figura 28 é possível observar o espectro de transmissão da água, de duas amostras de petróleo, do óleo sintético e de heptano. Focando nas amostras de petróleo e óleo é possível observar a semelhanças na transmissão em todo o espectro de medição.

É possível observar nos pontos B ($\sim 3,5 \mu\text{m}$), D ($\sim 7 \mu\text{m}$) e E ($\sim 7,5 \mu\text{m}$) vales onde o petróleo possui menor transparência, ou seja, o petróleo torna-se opaco nesses comprimentos de onda. Já nas regiões A, C e F o petróleo possui grande transmitância.

Analisando a região F na qual a câmera de IR opera ($8 - 12 \mu\text{m}$) encontra-se semelhança nas transmissões do petróleo e do óleo. Com esse resultado o petróleo é substituído pelo óleo para o teste de cada procedimento. Sendo assim o petróleo só é utilizado nos testes finais de cada sistema. Deste modo não há desperdício de petróleo em montagens não definitivas.

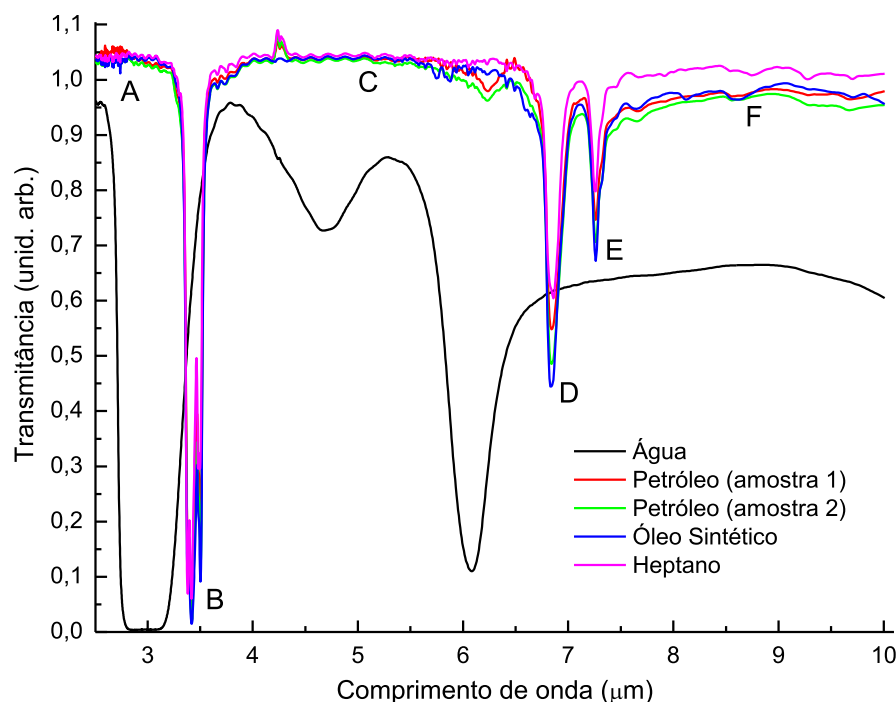


Figura 28 – Caracterização óptica em transmissão por FTIR na região de 2,5-10 μm de amostras de água, petróleo, óleo sintético e heptano para observação das regiões de absorção das substâncias
Fonte: PATYK (2013)

O circuito é posicionado de forma que a cuveta fique na posição de medição de acordo com a Figura 15. A lâmpada é previamente ligada e alimentada com 175 W. Após estabilização da lâmpada a bomba é acionada, o obturador é aberto e a câmera de IR é ligada. A bomba é acionada com a menor velocidade possível devido à baixa taxa de aquisição da câmera de IR.

4.6 MODELO MATEMÁTICO DE DETECÇÃO ÓPTICA DE BOLHAS

Para auxiliar na análise dos resultados obtidos com as montagens que envolvem o escoamento de diferentes tamanhos de bolhas de ar em petróleo é elaborado modelo matemático dos efeitos ocorridos com a bolha de gás ao escoar em outro meio. O modelo, conforme apresentando na Figura 29, leva em consideração os efeitos de reflexão, refração e absorção, equacionados pelas leis de Snell, Fresnel e Beer-Lambert (HEICHT, 2002).

Para conhecer a intensidade de radiação que chegará ao sensor é necessário o conhecimento prévio das seguintes grandezas:

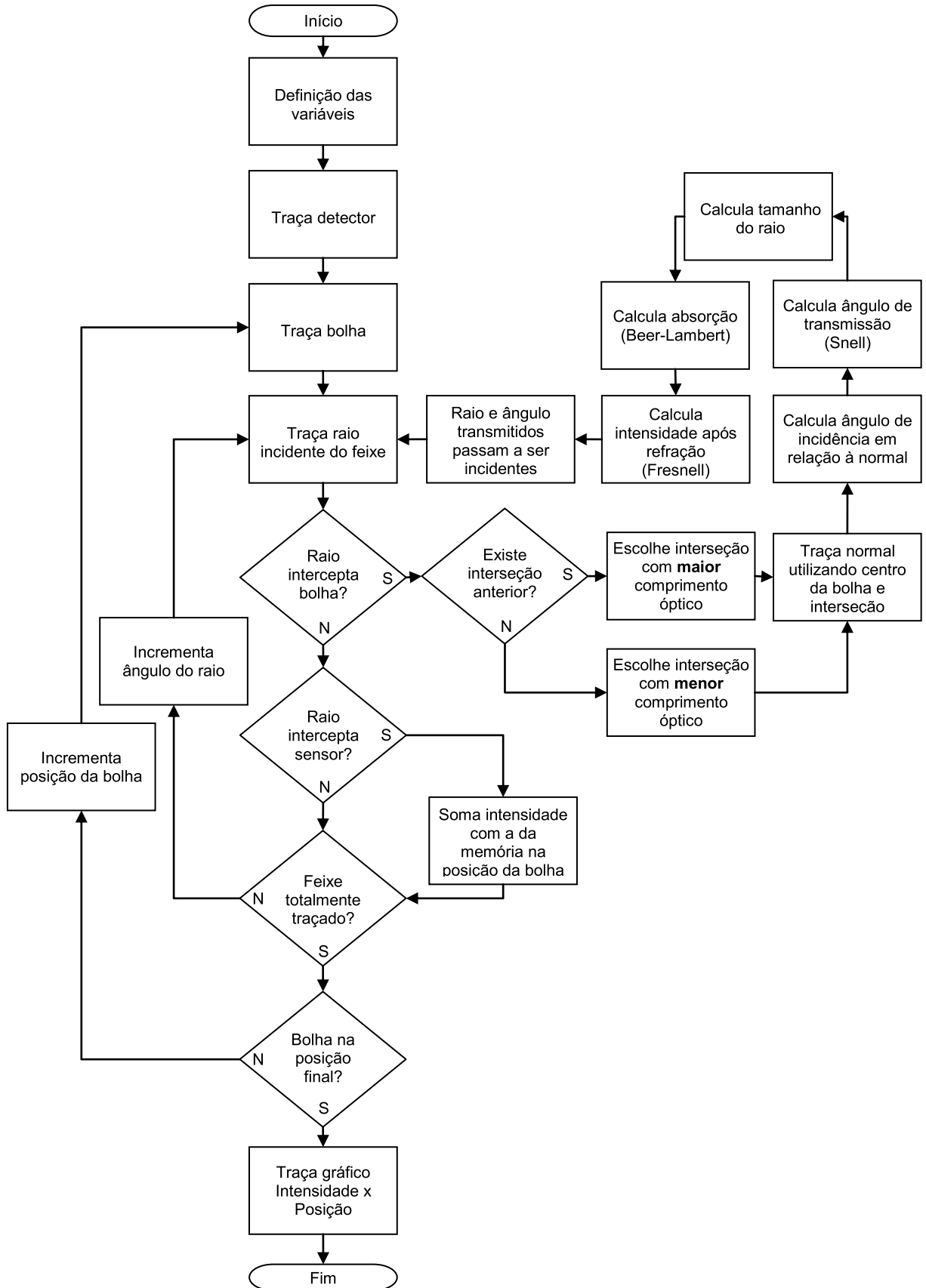


Figura 29 – Fluxograma do modelo matemático para compreender os fenômenos de absorção, refração e reflexão presentes no escoamento bifásico considerando a radiação emitida como um feixe de raios de mesma origem

Fonte: Autoria própria

- Coeficientes de absorção e índices de refração das duas substâncias no comprimento de onda de interesse;
- Distância entre o elemento emissor e detector;
- Abertura numérica do emissor e do detector;
- Diâmetro e posição da bolha;
- Resolução desejada para o modelamento.

O espectro eletromagnético emitido pela fonte é considerado como um feixe de raios com a mesma origem (emissor), Figura 30

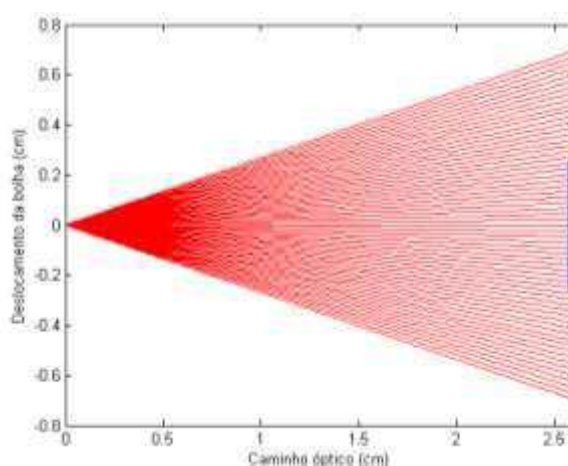


Figura 30 – Passo a passo do modelo matemático. Feixe de raios emitidos pelo emissor
Fonte: Autoria própria

Cada raio é considerado com intensidade unitária. A intensidade total da radiação emitida é feita através da soma de todos os raios do feixe. É traçado o detector (azul), a bolha na posição inicial (azul), Figura 31 a. Então é traçado o raio no ângulo de abertura negativo (vermelho), Figura 31 b.

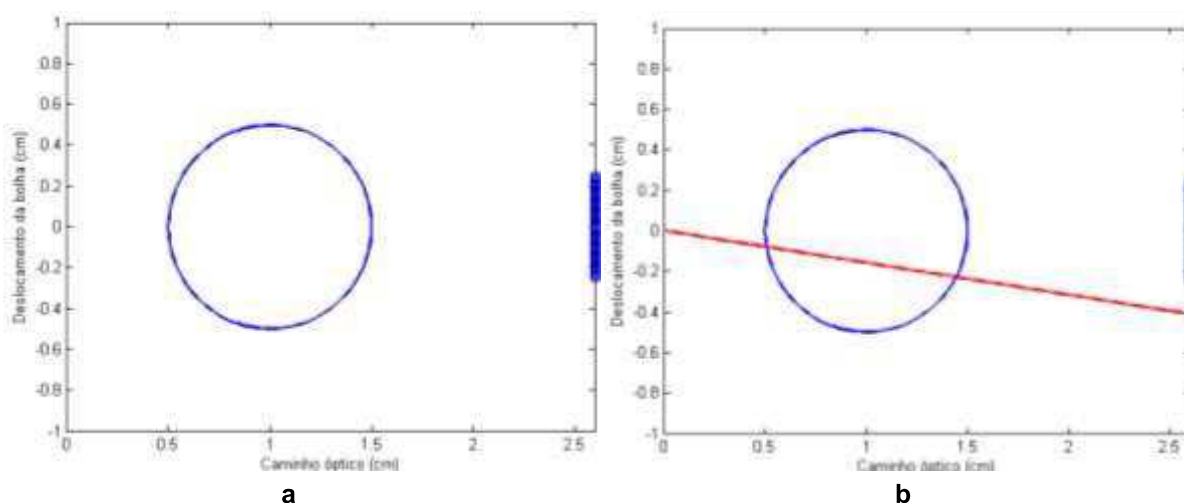


Figura 31 – Passo a passo do modelo matemático. (a) Detector e bolha traçados. (b) Raio incidente traçado
Fonte: Autoria própria

É calculada a interseção entre o raio e a bolha (verde), Figura 32 a. Ocorrendo mais de uma interseção e não havendo anteriores é adotada a coordenada que possui o menor caminho óptico, no caso da Figura 32, o eixo horizontal, e traçado novamente o raio delimitado pela bolha (vermelho), Figura 32 b.

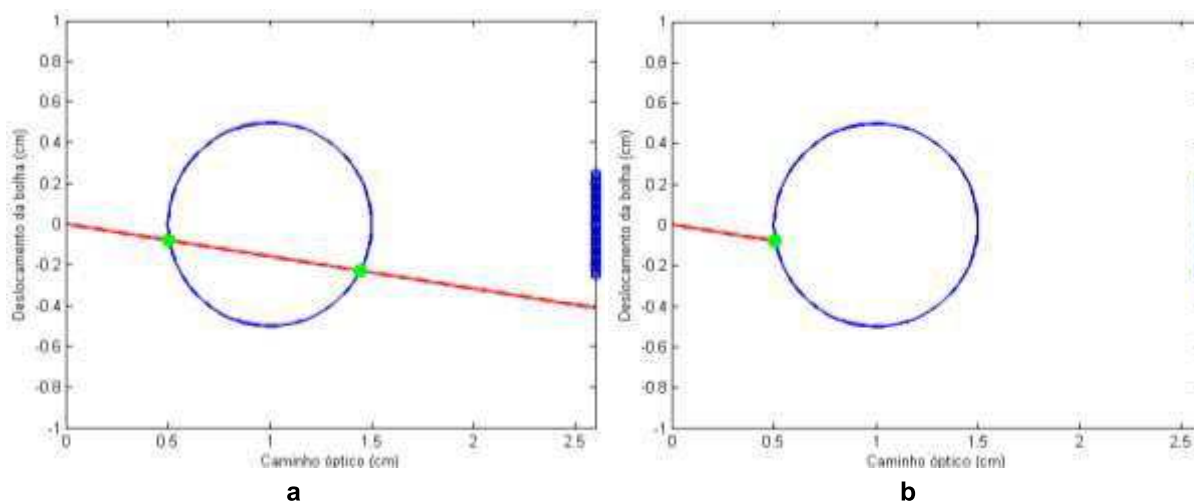


Figura 32 – Passo a passo do modelo matemático. (a) Interseções do raio incidente com a bolha. (b) Como não existem interseções anteriores é selecionada a de menor comprimento óptico

Fonte: Autoria própria

É traçada a reta normal (tracejada) utilizando o ponto de interseção e o centro da bolha, Figura 33 a. O ângulo de incidência é recalculado em relação à normal. O programa recalcula a nova trajetória (azul claro) através da lei de Snell, Figura 33 b. Com Equação (16), é calculado o ângulo de transmissão (θ_t), o ângulo de reflexão (θ_r) é igual ao de incidência (θ_i).

$$n_i \sin \theta_i = n_t \sin \theta_t \quad (16)$$

onde:

n_i = índice de refração do meio de incidência;

n_t = índice de refração do meio de transmissão;

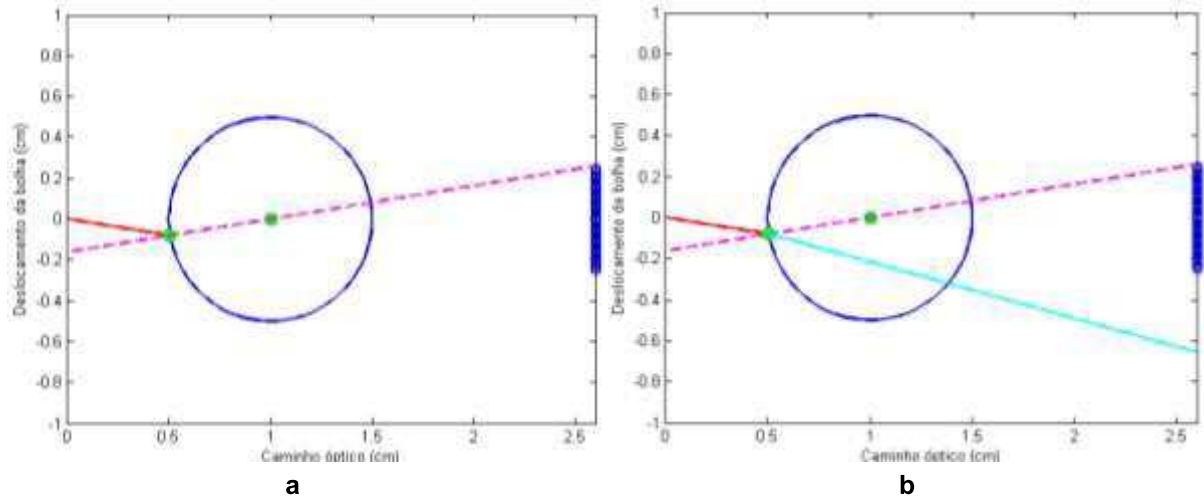


Figura 33 – Passo a passo do modelo matemático. (a) Reta normal traçada. (b) Raio transmitido traçado
Fonte: Autoria própria

Com as coordenadas da interseção é calculado o comprimento do raio incidente e com o conhecimento prévio do coeficiente de absorção do meio (α) é calculada a atenuação do raio devido ao caminho percorrido (l) através da Lei de Beer-Lambert, Equação (1).

Após sofrer atenuação causada por percorrer o meio o raio refratado sofre nova atenuação, ao atravessar a interface, calculada pelos coeficientes de Fresnel, Equações (17) a (22).

$$r_{\perp} = \left(\frac{E_{0r}}{E_{0i}} \right)_{\perp} = \frac{n_i \cos \theta_i - n_t \cos \theta_t}{n_i \cos \theta_i + n_t \cos \theta_t} = -\frac{\sin(\theta_i - \theta_t)}{\sin(\theta_i + \theta_t)} \quad (17)$$

$$t_{\perp} = \left(\frac{E_{0t}}{E_{0i}} \right)_{\perp} = \frac{2 n_i \cos \theta_i}{n_i \cos \theta_i + n_t \cos \theta_t} = +\frac{2 \sin \theta_t \cos \theta_i}{\sin(\theta_i + \theta_t)} \quad (18)$$

$$r_{\parallel} = \left(\frac{E_{0r}}{E_{0i}} \right)_{\parallel} = \frac{n_t \cos \theta_i - n_i \cos \theta_t}{n_i \cos \theta_t + n_t \cos \theta_i} = +\frac{\tan(\theta_i - \theta_t)}{\tan(\theta_i + \theta_t)} \quad (19)$$

$$t_{\parallel} = \left(\frac{E_{0t}}{E_{0i}} \right)_{\parallel} = \frac{2 n_i \cos \theta_i}{n_i \cos \theta_t + n_t \cos \theta_i} = +\frac{2 \sin \theta_t \cos \theta_i}{\sin(\theta_i + \theta_t) \cos(\theta_i - \theta_t)} \quad (20)$$

onde:

r_{\perp} = coeficiente de reflexão para o caso perpendicular;

r_{\parallel} = coeficiente de reflexão para o caso paralelo;

t_{\perp} = coeficiente de transmissão para o caso perpendicular;

t_{\parallel} = coeficiente de transmissão para o caso paralelo.

Como os coeficientes de reflexão e transmissão são parcelas do raio incidente a sua soma deve resultar em um:

$$t_{\perp} + (-r_{\perp}) = 1 \quad (21)$$

$$t_{\parallel} + r_{\parallel} = 1 \quad (22)$$

O raio que antes era considerado como transmitido agora é considerado como incidente. Novamente é calculada a interseção (verde), Figura 34 a, desta vez é utilizada a coordenada que possui o maior comprimento óptico por já existir uma interseção anterior, Figura 34 b.

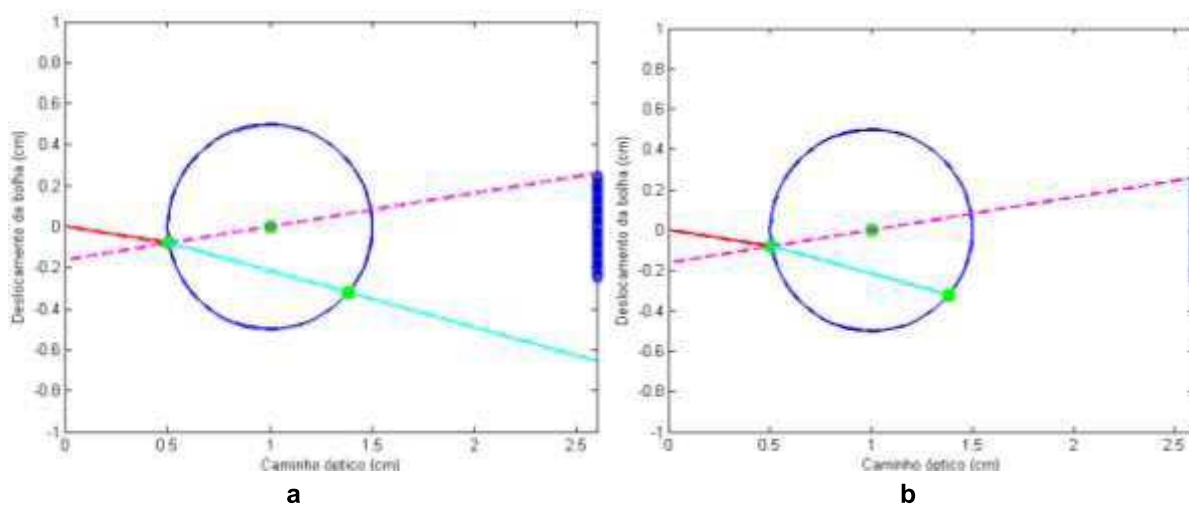


Figura 34 – Passo a passo do modelo matemático. (a) Interseções do raio transmitido com a bolha. (b) Como existe interseção anterior é selecionada a de maior *caminho óptico*
Fonte: Autoria própria

O procedimento da primeira interseção é então repetido, traçando a normal (tracejado), Figura 35 a, modificando o ângulo de incidência em relação a normal e traçando o raio transmitido (verde), Figura 35 b.

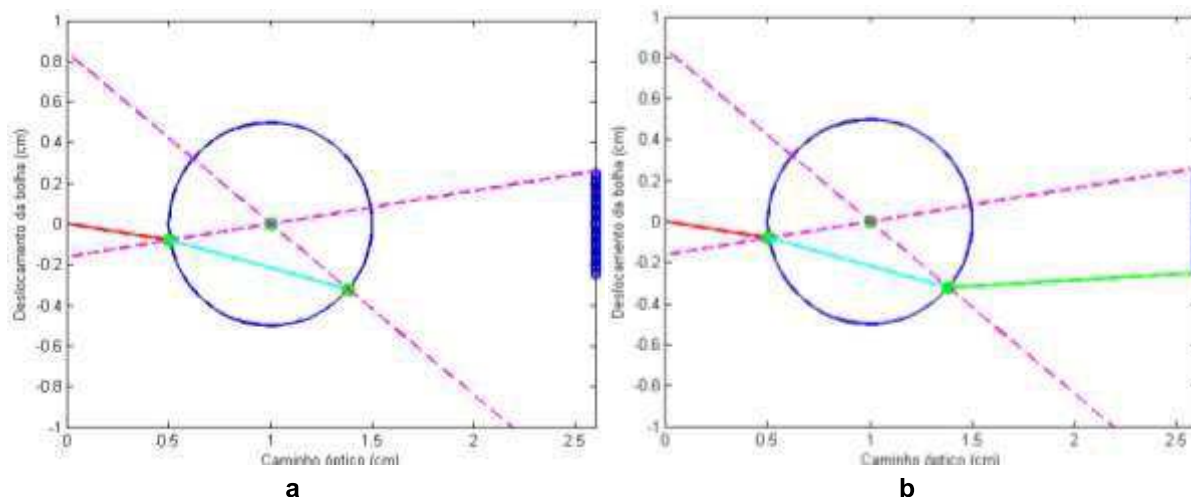


Figura 35 – Passo a passo do modelo matemático. (a) Reta normal para a segunda interseção. (b) Raio transmitido após segunda interseção
Fonte: Autoria própria

Caso este raio transmitido (verde) intercepte o detector a intensidade é então armazenada na memória. O ângulo do raio emitido pelo emissor é então incrementado e o processo é repetido até chegar ao ângulo de abertura numérica positivo. A intensidade total no sensor é dada pela soma da intensidade de todos os raios que chegam nele em relação à intensidade inicial de todos os raios somada. Esse procedimento é repetido para cada posição que a bolha assume ao fluir pelo duto. Com os resultados é gerado um gráfico posição x intensidade.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Devido à baixa quantidade de petróleo disponível são realizados testes com o petróleo estático armazenado na cuveta e com o escoamento de bolhas de ar no seu interior. Os resultados obtidos nesta primeira sessão são então explicados através de modelo matemático dos fenômenos ópticos que ocorrem durante a detecção óptica do escoamento.

Mesmo após a obtenção de 400 ml de petróleo os cuidados com o desperdício de amostras continuam. Para isso os primeiros testes na bancada para circulação de óleo e ar são feitos com óleo sintético. Somente após constatação de que não existiam vazamentos e da verificação do funcionamento da detecção pela câmera de IR comparando-a com câmera operando no visível é que o reservatório é preenchido com petróleo e são realizadas as medições.

5.1 ESCOAMENTO DE AR EM PETRÓLEO

Os primeiros testes foram realizados na cuveta de menor secção transversal (12x30 mm) e com 10 mm de espessura, Figura 36. Existem duas limitações ao se fazer imagens com a câmera de IR disponível: baixa resolução, apenas 31x32 *pixels* e baixa taxa de aquisição, 10 quadros por segundo. Por causa da baixa velocidade de aquisição é difícil a observação das bolhas que possuem velocidade superior a de aquisição. A Figura 36 foi retirada de um vídeo gerado pela câmera de IR. No caso da bolha grande, à direita, a passagem foi capturada em apenas um *frame* do vídeo.

Partindo da lei de Beer-Lambert, Equação (1), o esperado na passagem da bolha é que sempre ocorresse um aumento da intensidade captada pela câmera de IR. Isto porque o ar é mais transparente nesta região do que o petróleo. Com os resultados da Figura 36 nota-se que este comportamento ocorre na passagem de bolhas grandes, porém no escoamento de bolhas pequenas acontece o inverso. Ao invés de um aumento na intensidade do sinal tem-se a sua atenuação.

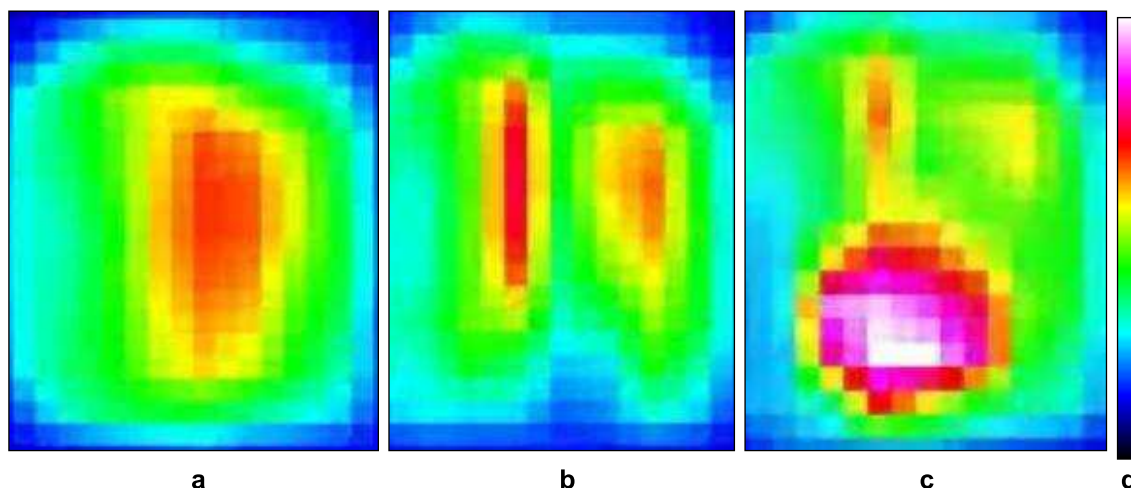


Figura 36 – escoamento de bolhas de ar em petróleo. (a) Cuveta somente preenchida com petróleo. (b) escoamento de bolhas pequenas de ar em petróleo. (c) escoamento de bolhas grandes de ar no petróleo. (d) Indicação da faixa de cores adotada, sendo abaixo a menor intensidade e acima a maior. Cuveta com secção transversal de 12x30 mm e 10 mm de comprimento de iteração. Lâmpada alimentada com 175 W
Fonte: Autoria própria

Para explicar as diferentes intensidades detectadas é elaborado o modelo matemático, apresentada no item 5.2, que aborda os efeitos de reflexão, refração e absorção presentes na detecção óptica do escoamento bifásico.

Visando melhorar os resultados novas cuvetas foram confeccionadas com a largura da secção transversal maiores, agora de 18x40 mm, com 5 e 10 mm de comprimento de iteração. Para a captura utilizando o próprio programa da câmera de IR são fixados valores manualmente de intensidade mínima e máxima para melhorar o contraste da imagem. Novos resultados são gerados para o escoamento de bolhas pequenas, Figura 37. A imagem é mais nítida do que o resultado anterior apresentado na Figura 36, porém a taxa de aquisição da câmera de IR ainda prejudica a visualização da evolução da bolha de ar. O comportamento de atenuação do sinal é mantido conforme resultado anterior.

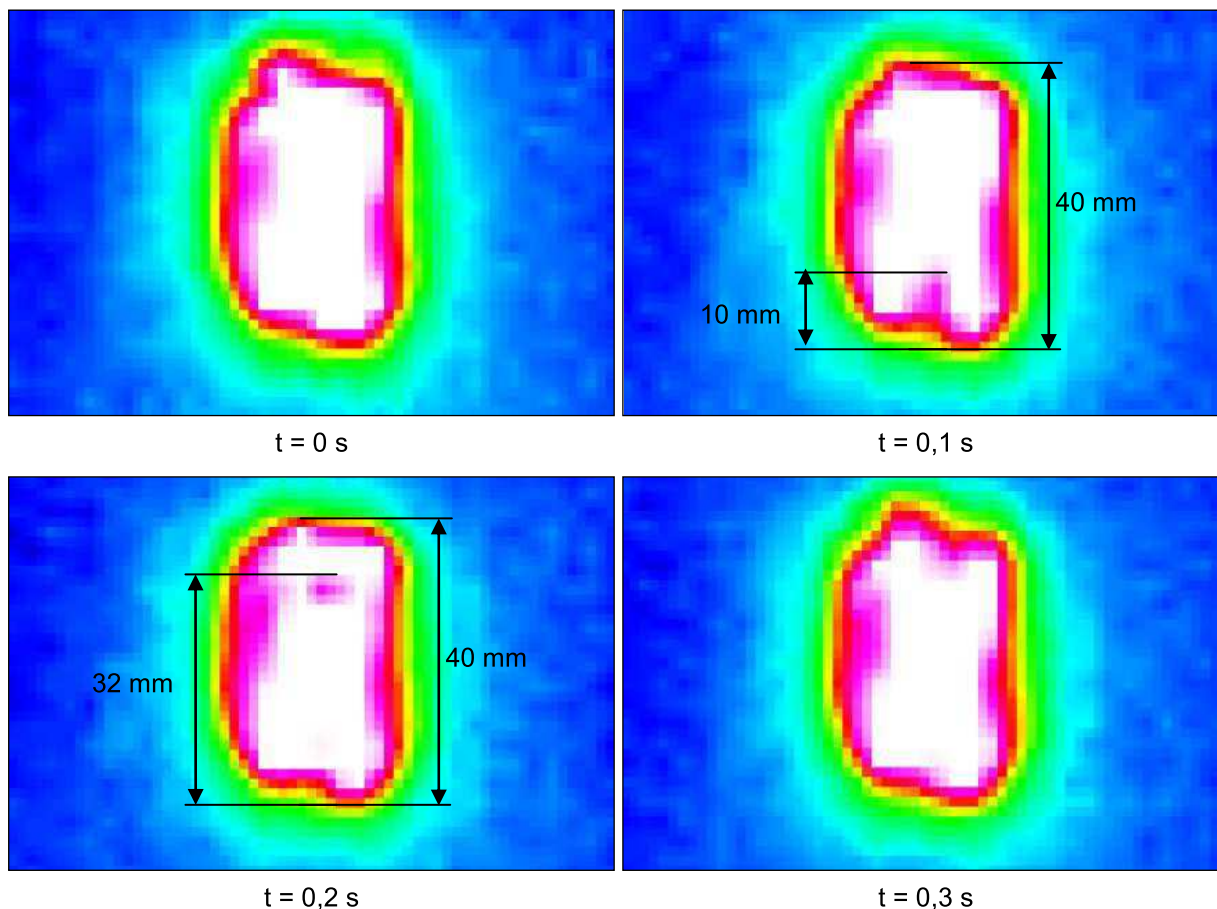


Figura 37 – escoamento, passo a passo, de bolha de ar em petróleo. Cuveta com secção transversal de 18x40 mm e 5 mm de comprimento de iteração. Lâmpada alimentada com 175 W
Fonte: Autoria própria

Analisando a Figura 37 podem existir duas situações. A primeira seria que a bolha que aparece em $t = 0,1 \text{ s}$ seja a mesma que aparece em $t = 0,2 \text{ s}$. Para este caso calcula-se velocidade $V_G = 220 \text{ mm/s}$. Na outra situação a bolha em $t = 0,2 \text{ s}$ não é a mesma que no *frame* anterior, portanto aproxima-se velocidade $V_G = 320 \text{ mm/s}$, considerando que a bolha não aparece no *frame* anterior e no seguinte já esteja com deslocamento de 32 mm. Esta dúvida existe devido a baixa velocidade de aquisição da câmera de IR. Se existe um quadro intermediário, por exemplo, em $t = 0,15 \text{ s}$ poderia ser afirmado qual das duas situações descritas ocorre.

Após uma semana com o petróleo armazenado na própria cuveta aberta, partes dos componentes voláteis evaporam-se, tornando a amostra mais viscosa. O resultado é visualizado na Figura 38.

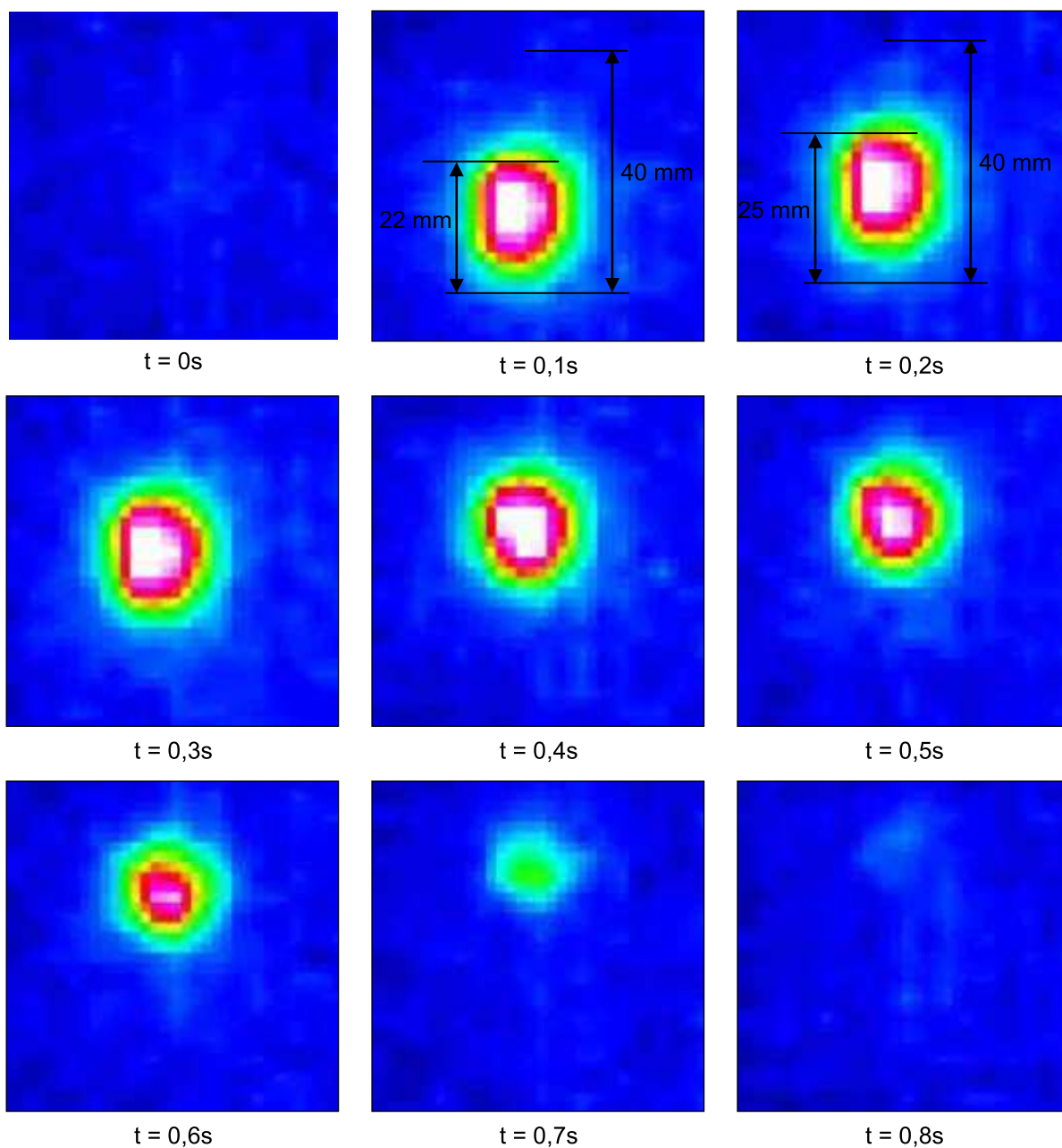


Figura 38 – Escoamento, passo a passo, de bolha de ar em petróleo com maior viscosidade. Cuveta com secção transversal de 18x40 mm e 10 mm de comprimento de iteração. Lâmpada alimentada com 175 W
Fonte: Autoria própria

Essa maior viscosidade proporcionou uma melhor visualização da passagem da bolha, que escoar, portanto, com velocidade menor. Na Figura 38 é observada a evolução do escoamento da bolha de ar dentro da cuveta de petróleo. Nota-se a clara diferença nas velocidades de escoamento do gás entre a Figura 36 e a Figura 38. Na Figura 36 as imagens contendo a bolha se restringiam a somente um *frame* da captura. Já na Figura 38 a bolha é observada durante sete *frames*.

Diferente da Figura 37, da Figura 38 pode-se afirmar que se trata da mesma bolha escoando em todos os quadros. Como a bolha percorre aproximadamente 3 mm em 0,1 s, possui velocidade de escoamento $V_G = 30$ mm/s. Considerando as velocidades do escoamento anterior, no petróleo viscoso teremos uma diminuição da velocidade de escoamento de 7 a 10 vezes (calculada utilizando a velocidade mínima e máxima, respectivamente, do caso anterior).

5.2 MODELO MATEMÁTICO DE DETECÇÃO ÓPTICA DE BOLHAS

Os resultados contidos na Figura 36, Figura 37 e Figura 38 demonstraram um comportamento diferente do esperado ao se analisar simplesmente a relação de Beer-Lambert, Equação (1). Entretanto já é conhecido que não ocorre somente este efeito.

É considerada uma bolha de ar escoando pelo petróleo, ou seja, uma bolha com menores índice de refração e coeficiente de absorção do que o fluido que ela escoar. Observa-se, quando se trata de bolha pequena, que a bolha funciona como uma lente divergente, desviando os raios para fora do sensor. Isto ocasiona atenuação do sinal quando a bolha está no centro do eixo óptico, como é observado no gráfico de detecção do quadro 6 da Figura 39.

Ao analisar-se o comportamento de uma bolha grande, vê-se que ela concentra os raios no sensor, gerando uma maior intensidade na leitura Figura 40. No decorrer do escoamento de bolha grande é observado que ao se aproximar do feixe de radiação a bolha gera decaimento na intensidade detectada, quadro 3. Quando a bolha aproxima-se do eixo óptico a intensidade detectada aumenta até o máximo quando a bolha encontra-se com seu centro sobre o eixo óptico.

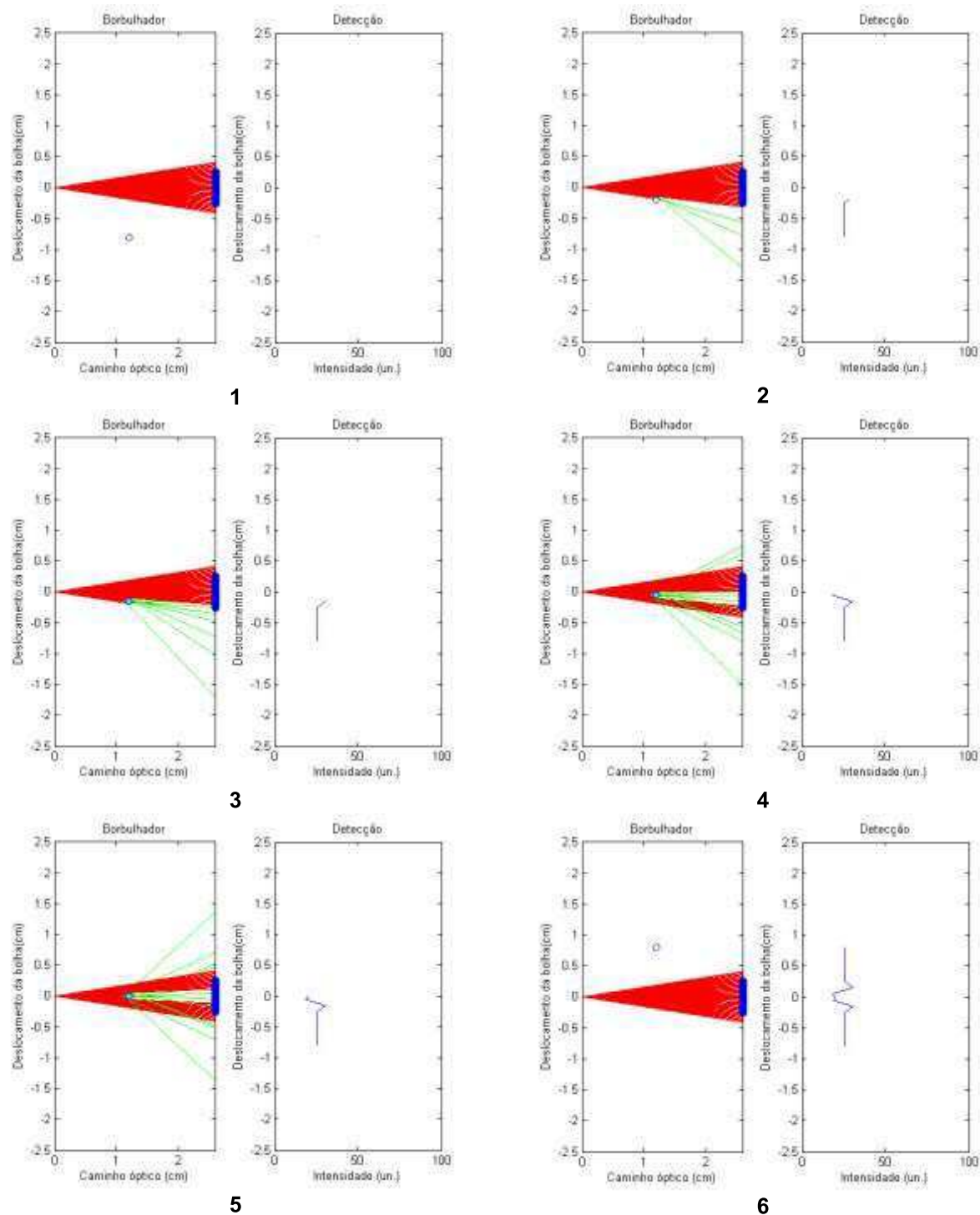


Figura 39 – Modelo matemático dos fenômenos de refração, reflexão e transmissão que ocorrem durante o escoamento de uma bolha com 1 mm de diâmetro em petróleo
Fonte: Autoria própria

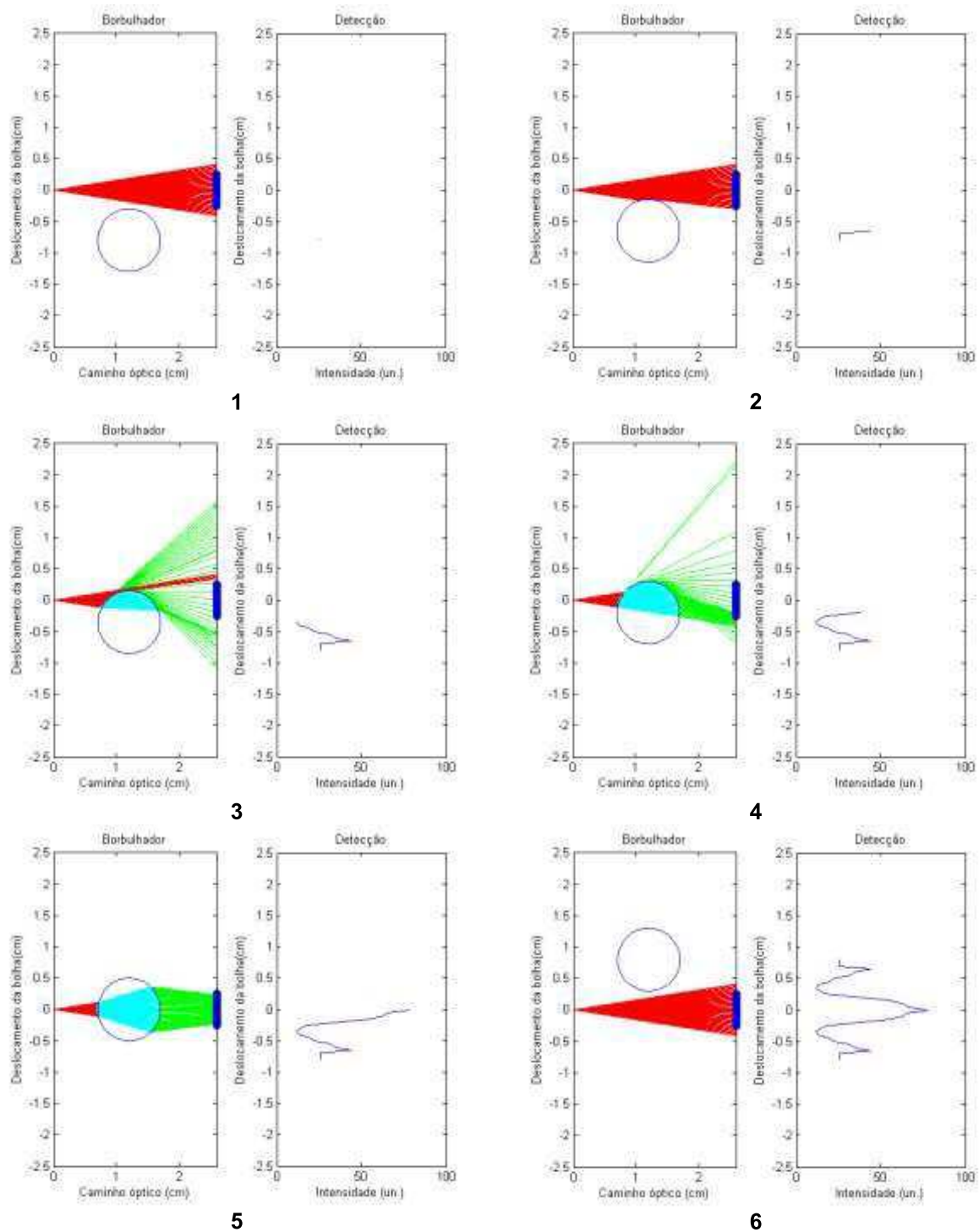


Figura 40 – Modelo matemático dos fenômenos de refração, reflexão e transmissão que ocorrem durante o escoamento de uma bolha com 1 cm de diâmetro em petróleo
Fonte: Autoria própria

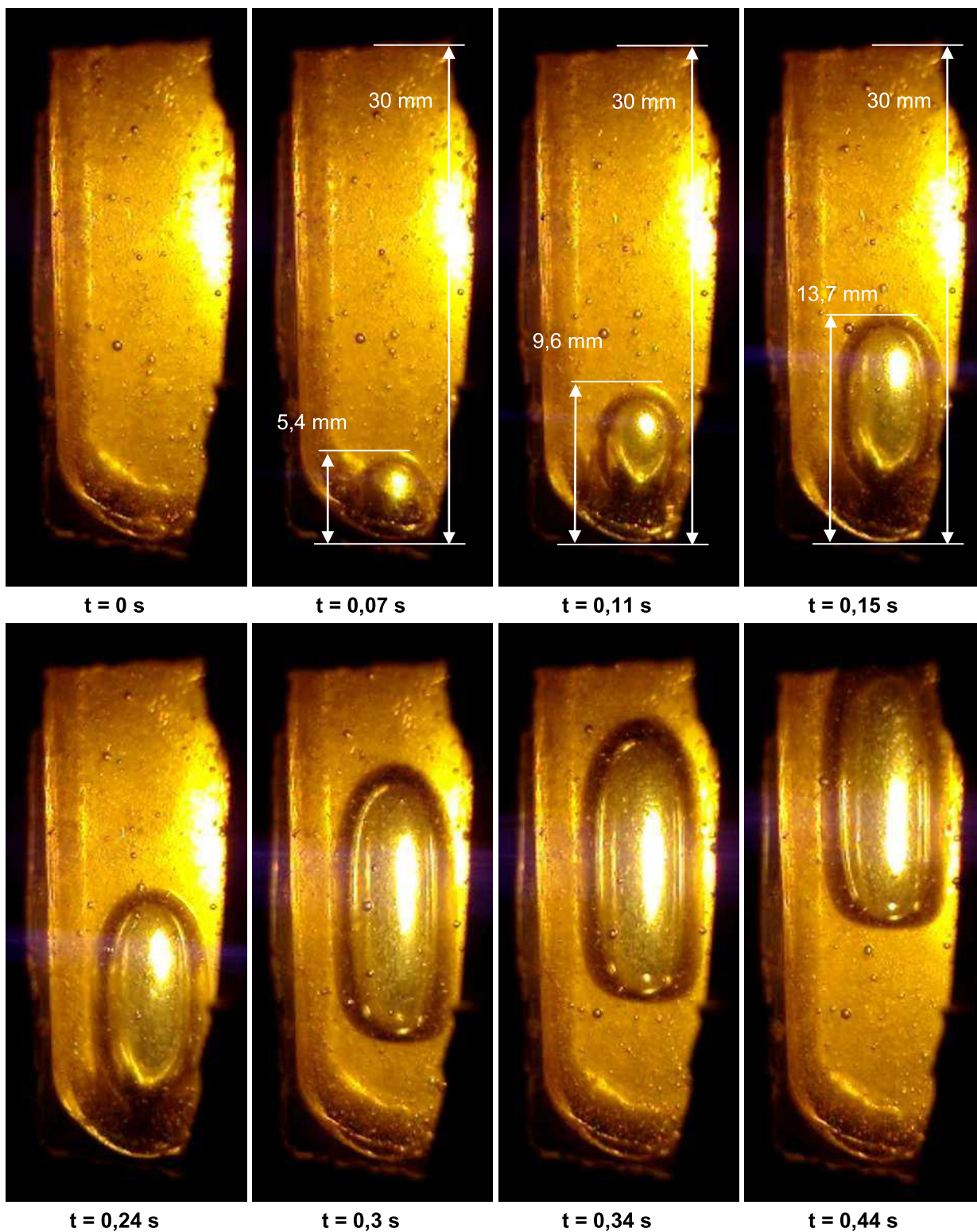
5.3 ESCOAMENTO BIFÁSICO ENVOLVENDO PETRÓLEO E AR

Como o objeto de estudo é o escoamento, além do gás, de petróleo, foi desenvolvido a bancada de testes para estudo do escoamento envolvendo estas duas substâncias. Os primeiros testes foram feitos com óleo sintético que apresenta transparência na região do visível. Assim é possível observar as bolhas tanto com uma câmera convencional quanto com a câmera infravermelha. Na Figura 41 observa-se, no espectro visível o escoamento de bolhas de ar em óleo sintético.

Considerando a bolha em $t = 0,07$ s e $0,11$ s é visualizado que a bolha percorre aproximadamente $4,2$ mm em $0,04$ s, portanto com uma velocidade $V_G = 105$ mm/s. Se também for analisado a bolha em $t = 0,11$ s e $0,15$ s tem-se um deslocamento de $4,1$ mm em $0,04$ s, resultando em $V_G = 102,5$ mm/s.

O circuito com o óleo em movimento é observado na Figura 42. O motor é acionado com a frequência de 5 Hz. Este valor foi escolhido para que a velocidade do líquido seja a menor possível, abaixo deste valor o motor não possui torque para acionar a bomba. Ao ser acionado com 5 Hz a bomba produz uma vazão de $10,53$ ml/s. A vazão foi calculada preenchendo um recipiente graduado de 100 ml em um tempo de $9,5$ s. Considerando a seção transversal da cuveta de 182 mm² (13×14 mm) tem-se a velocidade de escoamento do líquido $V_L = 57,84$ mm/s.

Na Figura 43 são mostrados quadros contendo o escoamento bifásico envolvendo óleo sintético e ar agora utilizando a câmera de IR para o escoamento. Os parâmetros de escoamento são os mesmos da Figura 42. No primeiro quadro é visto somente o óleo escoando e nos demais existe também o escoamento de bolhas de ar. Os quadros foram retirados de pontos distintos de um vídeo, portanto, não constitui um exemplo de evolução do escoamento da bolha.



$t = 0,24$ s $t = 0,3$ s $t = 0,34$ s $t = 0,44$ s
 Figura 41 – Escoamento de bolhas de ar em óleo sintético estático utilizando uma câmera operando na região do visível
 Fonte: Autoria própria

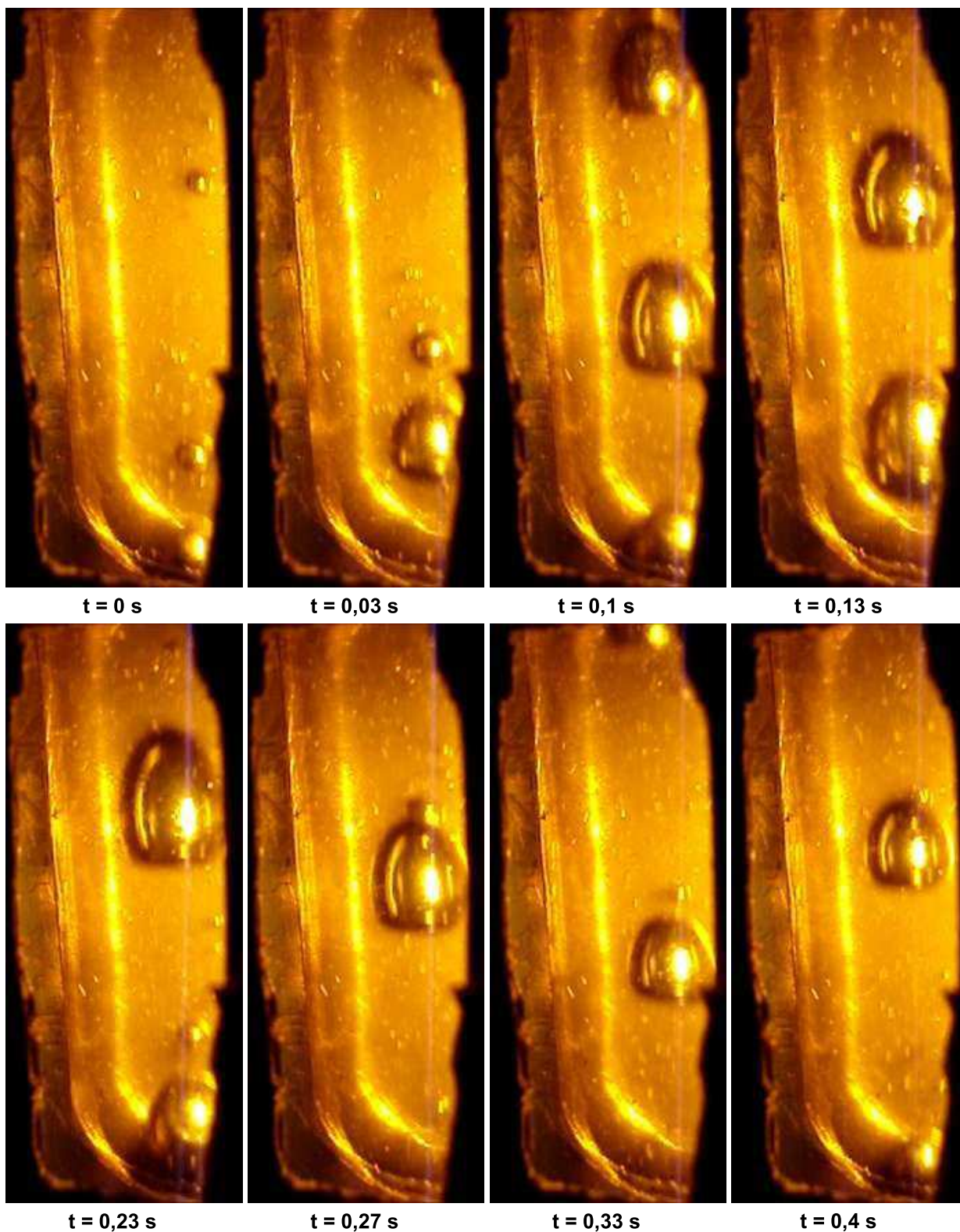


Figura 42 – escoamento bifásico ar-óleo sintético utilizando uma câmera operando na região do visível

Fonte: Autoria própria

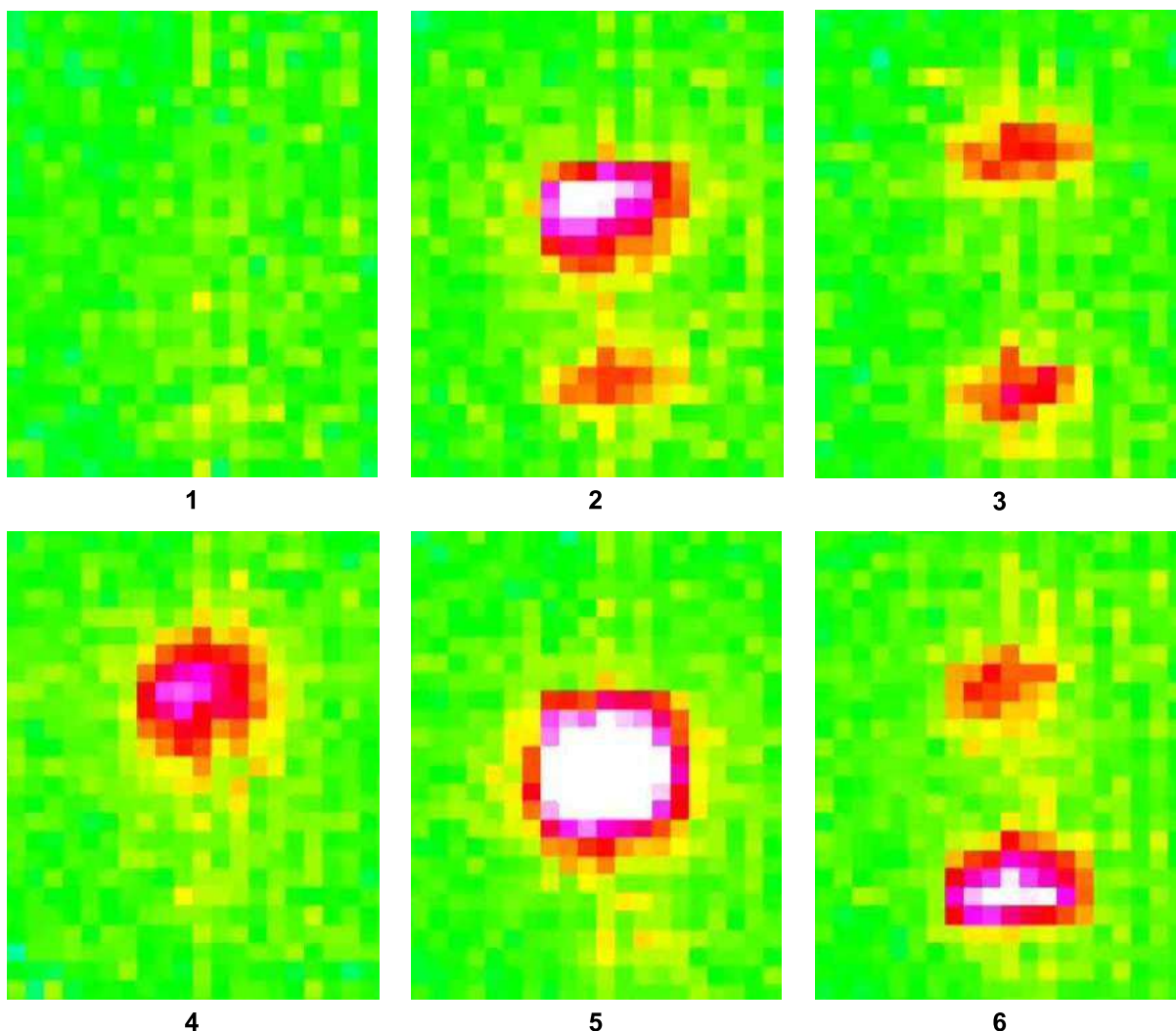


Figura 43 – escoamento bifásico ar-óleo sintético utilizando a câmera de IR
Fonte: Autoria própria

Tendo averiguado o funcionamento de todo o sistema com óleo sintético, tanto na parte mecânica como na óptica, o circuito é então esgotado. Para se retirar todo o óleo que ainda permanece nas paredes é escoado benzina em seu interior. A benzina é a substância utilizada em todas as limpezas envolvendo óleo ou petróleo nos ensaios. Após completamente limpo o reservatório é então preenchido com 200 ml de petróleo. Tal quantidade de petróleo só foi obtida para este último teste.

O procedimento adotado para as medições com petróleo repete os mesmos parâmetros dos realizados com óleo sintético, com exceção da visualização da câmera na região do visível.

Como já mostrado na Figura 43, devido à baixa velocidade de aquisição da câmera de IR é difícil conseguir observar a evolução da bolha durante o escoamento. Para tentar diminuir a velocidade de escoamento da bolha resfria-se o petróleo no reservatório. Deste modo ocorre cristalização do petróleo aumentando a

sua viscosidade. Com o petróleo mais viscoso a velocidade de escoamento da bolha diminui, possibilitando a visualização da medição. Na Figura 44 é estimada uma velocidade $V_G = 54,17 \text{ mm/s}$.

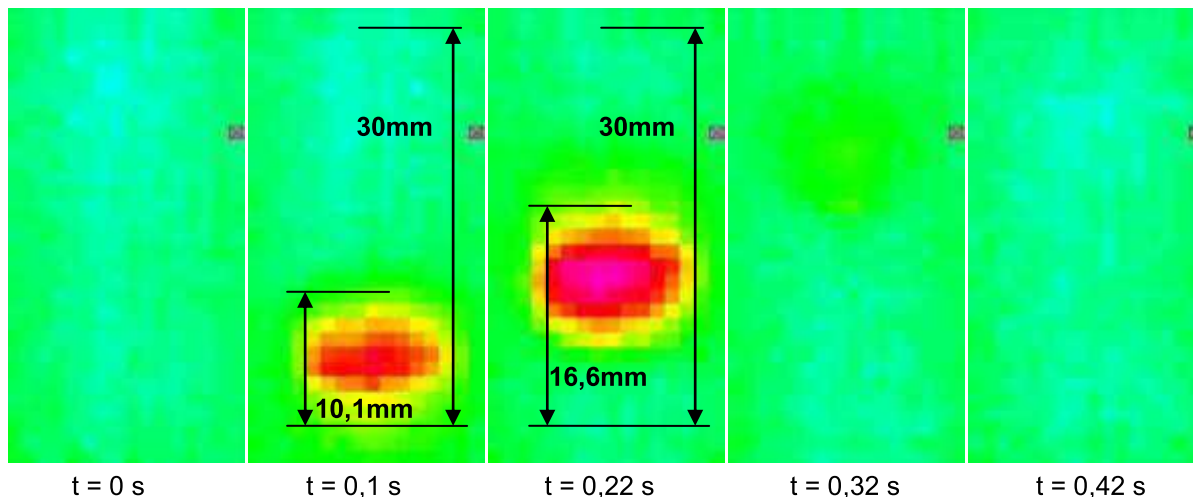


Figura 44 – Escoamento envolvendo bolhas de ar e petróleo resfriado
Fonte: Autoria própria

Na tentativa de diminuir novamente a velocidade da bolha a amostra é armazenada no próprio reservatório durante uma semana permitindo que partes das substâncias voláteis que compõe o petróleo evaporem. Isto resulta em um petróleo com maior viscosidade. É observada uma redução de velocidade de escoamento da bolha, que passa a ser $V_G = 46 \text{ mm/s}$, considerando o deslocamento da bolha 4,6 mm em um tempo de 0,1 s, Figura 45.

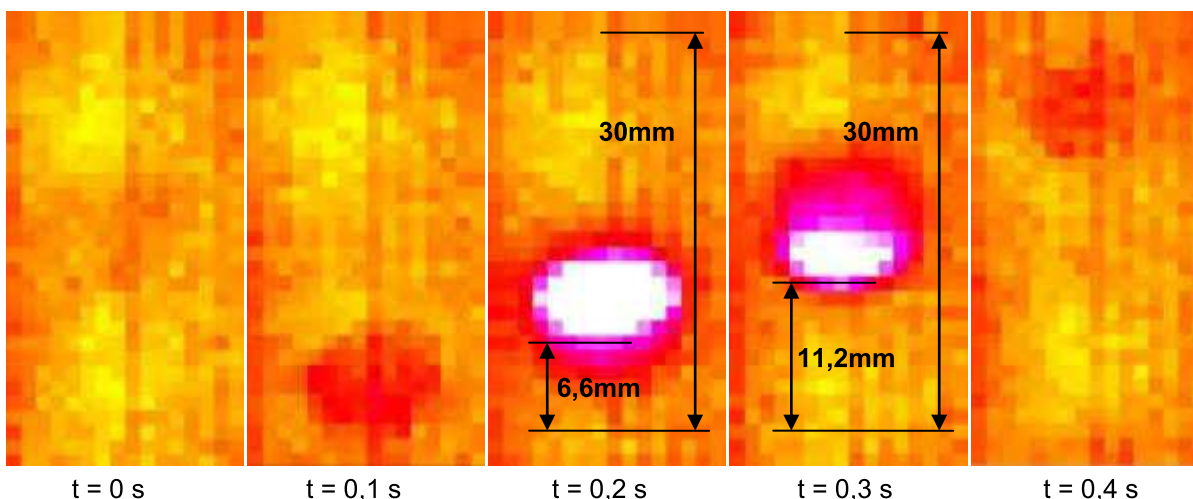


Figura 45 – Escoamento envolvendo bolhas de ar e petróleo com substâncias voláteis evaporadas
Fonte: Autoria própria

Outro tratamento dado aos resultados encontra-se na Figura 46. Ela apresenta o perfil transversal da bolha visto pela linha 20 da matriz gerada pela

câmera de IR. Cada ponto alto é uma bolha que passa pela frente do detector. As diferenças de amplitude correspondem a diferentes tamanhos de bolhas que escoam no eixo óptico do detector.

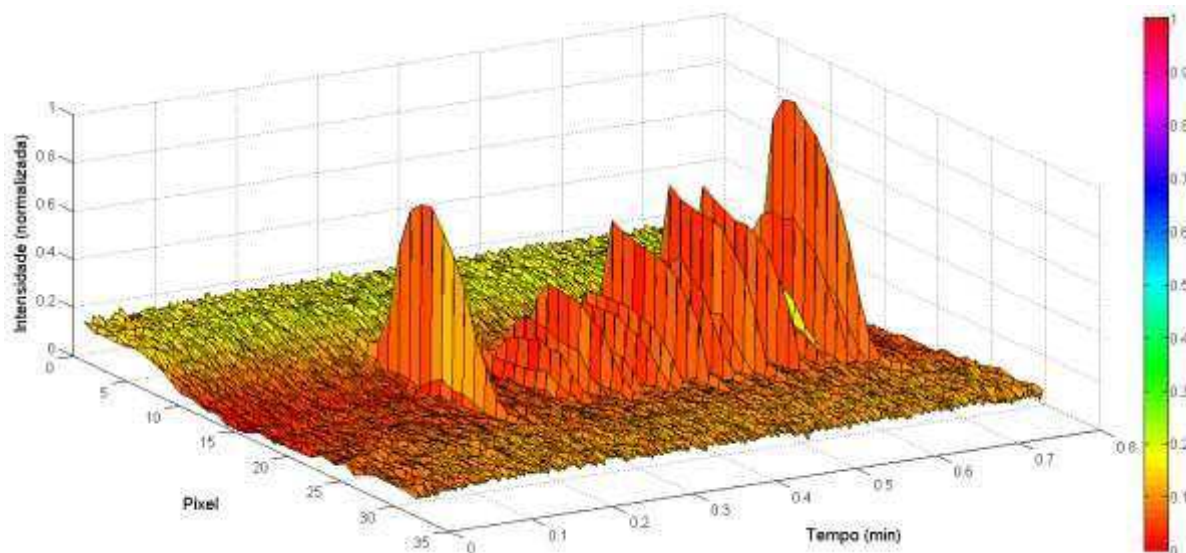


Figura 46 – Perfil transversal do escoamento envolvendo bolhas de ar e petróleo considerando a linha 20 da matriz da câmera de IR
Fonte: Autoria própria

Futuramente com aquisição de câmera de IR de maior velocidade ao se traçar gráfico semelhante a esse poderá ser visualizado com clareza o formato de cada bolha. Também poderá ser analisado se a bolha muda de forma ao passar pela frente do detector comparando o perfil transversal visto por todas as linhas.

6 CONCLUSÕES

Destaca-se como principal resultado a possibilidade de detectar de forma não intrusiva o escoamento bifásico envolvendo petróleo e ar. No comprimento de onda do detector utilizado, 8 – 12 μm , até o momento, foi realizada a detecção através da espessura de 12 mm de petróleo. Este comprimento foi alcançado utilizando a menor potência da lâmpada, 175 W. Potências superiores a esta não foram possíveis devido à saturação da câmera de IR e por gerarem grande aquecimento da amostra. As janelas ópticas e lentes nos ensaios não são otimizadas para o comprimento de onda utilizado, absorvendo grande parte da radiação infravermelha que por ela atravessa. Acredita-se que utilizando janelas ópticas de seleneto de zinco (ZnSe) e utilizando uma câmera de IR com maior resolução e velocidade seja possível observar o comportamento do escoamento em comprimentos cada vez maiores e com maior nitidez.

Os dados de reconstrução de bolha futuramente auxiliarão a reconstrução do padrão de escoamento a partir da leitura da câmera de IR. O modelo desenvolvido já possui alguma automação para poder ser utilizado com qualquer combinação de fluidos, configurando escoamento de bolhas, somente sendo necessário o prévio conhecimento dos coeficientes de absorção e índices de refração das duas substâncias no comprimento de onda de interesse. Outras variáveis referentes ao sistema óptico também são necessárias como: comprimento do caminho óptico entre o elemento emissor e sensor, abertura numérica do emissor e sensor, diâmetro e posição estimada da bolha e a resolução desejada para o modelamento.

A limitação da técnica, além da otimização dos componentes ópticos, consiste em aumentar a potência da fonte de modo que o aumento da temperatura do petróleo não seja um problema para a medição. Por ser uma substância inflamável se faz necessário o controle do aquecimento do petróleo para que não ocorra nenhuma ignição.

6.1 TRABALHOS FUTUROS

Com a comprovação do funcionamento da técnica de detecção óptica pela presente dissertação pretende-se dar continuidade aos estudos e desenvolver a instrumentação e o tratamento de dados e imagens necessários para caracterização do escoamento bifásico envolvendo petróleo e ar.

Pretende-se também caracterizar o escoamento envolvendo outras substâncias como água, CO₂, H₂S, gás natural entre outros. Para isso já está em andamento a aquisição de nova câmera de IR, com maiores resolução e velocidade. Tendo desenvolvido o estudo e validado o funcionamento do protótipo comparando sua resposta com demais sensores de escoamento acredita ser possível desenvolver ferramenta funcional para aplicação em campo.

O desenvolvimento de tomógrafo óptico na região de 8 a 12 μm será capaz de fornecer informações com mais precisão sobre o escoamento. Estudos realizados já resultaram em tomógrafo óptico operando na região de 950 nm realizando a detecção óptica do escoamento bifásico envolvendo água e ar. O próximo passo consiste no desenvolvimento do tomógrafo para a região de 2,5 – 4,8 μm para a detecção do escoamento envolvendo petróleo e ar.

A otimização do sistema com a aquisição de janelas ópticas de seleneto de zinco proporcionará a possibilidade de se atravessar a radiação infravermelha por comprimentos maiores. Utilizando a região de 2,5 – 4,8 μm foi realizada a passagem de radiação infravermelha através de 60 mm de petróleo.

Outra aplicação prevista para o detector de infravermelho desenvolvido é a caracterização de chamas. Pretende-se observar distribuição de temperatura na chama e os gases liberados pela queima.

REFERÊNCIAS

- AHMED, W. H. Capacitance Sensors for Void-Fraction Measurements and Flow-Pattern Identification in Air – Oil Two-Phase Flow. **IEEE Sensors Journal**, v. 6, n. 5, p. 1153–1163, 2006.
- AKARI. **Princípios Infravermelho**. Disponível em: <<http://www.akarilampadas.com.br/aplicacoes/principios-infravermelho.php>>. Acesso em: 19 set. 2013.
- AZEVEDO, C. D. R. et al. A Gaseous Compton Camera using a 2D-sensitive gaseous photomultiplier for Nuclear Medical Imaging. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment**, p. 1–5, maio. 2013.
- AZZOPARDI, B. J. **Gas-liquid flows**. New York: Begell House, 2006. p. 331
- BARONCINI, V. H. V. et al. **Sensor Óptico para Monitoramento do Escoamento Bifásico: Modelagem Numérica e Implementação**. MOMAG 2012 – 15° SBMO – Simpósio Brasileiro de Micro-ondas e Optoeletrônica e o 10° CBMag – Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo. **Anais...** João Pessoa: 2012
- BISCUOLA, G. J.; BÔAS, N. V.; DOCA, R. H. **Tópicos de física 3**. 4. ed. São Paulo: Saraiva, 2007. v. 3p. 450
- BUDZIER, H.; GERLACH, G. **Thermal infrared sensors : theory, optimisation and practice**. Dresden: Wiley, 2011.
- CHUNG, H. Applications of near-infrared spectroscopy in refineries and important issues to address. **Applied Spectroscopy Reviews**, v. 42, p. 251–285, 2007.
- COHERENT. **High-Sensitivity Thermopile Sensors to 2W (RoHS)**. Disponível em: <<http://www.coherent.com/products/?705/High-Sensitivity-Thermopile-Sensors-to-2W-RoHS>>. Acesso em: 20 nov. 2013.
- COLATI, K. A. P. et al. Construção de uma célula de gás de baixo custo para análise no infravermelho. **Química Nova**, v. 34, n. 5, p. 864–867, 2011.

COLBROOK, R.; ROBERTS, G. G. Physical mechanisms of pyroelectricity in langmuir-blodgett films. **Thin Solid Films**, v. 179, p. 335–341, 1989.

DA SILVA, M. J. et al. High-resolution gas–oil two-phase flow visualization with a capacitance wire-mesh sensor. **Flow Measurement and Instrumentation**, v. 21, n. 3, p. 191–197, set. 2010.

EISBERG, R.; RESNICK, R. **Física Quântica**. 8. ed. Rio de Janeiro: Campus, 1994. p. 928

ENGSTROM, R. W. **Photomultiplier handbook**. [s.l.] RCA/Burle, 1980. p. 180

FALLA, F. S. et al. Characterization of crude petroleum by NIR. **Journal of Petroleum Science Engineering**, v. 51, p. 127–137, 2006.

FLIR. **User's manual: FLIR Exx series**. Disponível em: <<http://www.omega.com/manuals/manualpdf/M5162.pdf>>. Acesso em: 15 set. 2013.

HAMAMATSU. **IR-enhanced CCD image sensors**. Disponível em: <http://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/s11510_series_kmpd1126e04.pdf>. Acesso em: 11 nov. 2013.

HANNISDAL, A.; HEMMINGSEN, P. V; SJÖBLOM, J. Group-Type Analysis of Heavy Crude Oils Using Vibrational Spectroscopy in Combination with Multivariate Analysis. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 44, p. 1349–1357, 2005.

HEICHT, E. **Optics**. San Francisco: Addison Wesley, 2002.

HEIMANN SENSOR. **Thermopile arrays and imaging**. Disponível em: <http://www.heimannsensor.com/products_imaging.php>. Acesso em: 20 ago. 2012.

HERVIEU, E.; JOUET, E.; DESBAT, L. Development and Validation of an X-ray Tomograph for Two-Phase Flow. **ANNALS NEW YORK ACADEMY OF SCIENCES**, v. 972, p. 87–94, 2002.

HERWAARDEN, A. W. VAN et al. Integrated Thermopile Sensors. **Sensors & Actuators**, v. 23, p. 621–630, 1989.

KERSEY, A. D. Optical fiber sensors for permanent downwell monitoring applications in the oil and gas industry. **IEICE Trans. Electron**, v. E83-C, n. 3, p. 400–404, 2000.

KOVALTCHOUK, V. D. et al. Comparison of a silicon photomultiplier to a traditional vacuum photomultiplier. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment**, v. 538, n. 1-3, p. 408–415, fev. 2005.

KUPHALDT, T. R. **Lessons in electric circuits**. Disponível em: <http://www.eng.cam.ac.uk/DesignOffice/mdp/electric_web/DC/index.html>. Acesso em: 11 out. 2013.

LANG, F. S. B.; DAS-GUPTA, D. K. Pyroelectricity: fundamentals and applications. In: NALVA, H. S. (Ed.). **Handbook of advanced electronic and photonic materials and devices**. v. 4. London: Academic Press, 2001.

LIER, Q. DE J. VAN. **Física do Solo**. São Paulo: SBCS, 2010. p. 298

MACKAY, C. D. Charge-Coupled Devices in Astronomy. **Annual Review of Astronomy and Astrophysics**, v. 24, n. 1, p. 255–283, set. 1986.

MARMONIER, C.; FLYCKT, S. O. **Photomultiplier tubes: principles & applications**. Brive, France: Philips Photonics, 2002.

MELEXIS. **Thermopile infrared sensor**. Disponível em: <<http://www.melexis.com/Asset/Flyer-MLX90247-DownloadLink-5077.aspx>>. Acesso em: 20 nov. 2013.

MILLAN, M. et al. Characterizing high mass materials in heavy oil fractions by size exclusions chromatography and MALDI-mass spectrometry. **Catalysis Today**, v. 109, p. 154–161, 2005.

MURAI, Y. et al. Ultrasonic detection of moving interfaces in gas – liquid two-phase flow. **Flow Measurement and Instrumentation**, v. 21, n. 3, p. 356–366, 2010.

MURATA. **Pyroelectric Infrared Sensors**, 2002.

NEWPORT. **High Sensitivity Thermopile Sensors, Newport Compatible.** Disponível em: <<http://www.newport.com/High-Sensitivity-Thermopile-Sensors-Newport-Compa/856189/1033/info.aspx>>. Acesso em: 20 nov. 2013.

NIEVELD, G. D. Thermopiles fabricated using silicon planar technology. **Sensors & Actuators**, v. 3, p. 179–183, 1982.

RÉ, P. **O ABC das câmeras CCD.** Disponível em: <http://www.astrosurf.com/re/abc_camaras_ccd_pre.pdf>. Acesso em: 11 nov. 2013.

RYBICKI, G.; LIGHTMAN, A. P. **Radiative Processes in Astrophysics.** New York: Wiley-VCH, 1985. p. 400

RYDER, A. G. Analysis of crude petroleum oils using fluorescence spectrometry. **Reviews in Fluorescence**, v. 2, p. 169–198, 2005.

RYER, A. **The light measurement handbook.** Peabody, MA: International Light Technologies, 1997.

SALES, A. A. **Inspeção não intrusiva na petroquímica - INI**, 2010.

SCHIEFERDECKER, J. et al. Infrared thermopile sensors with high sensitivity and very low temperature coefficient. **Sensors & Actuators: A. Physical**, v. 46-47, p. 422–427, 1995.

SCHLEICHER, E. et al. Design of an optical tomograph for the investigation of single- and two-phase pipe flows. **Measurement Science and Technology**, v. 19, n. 9, p. 094006, 1 set. 2008.

SHOHAM, O. **Mechanistic modeling of gas-liquid two-phase flow in pipes.** Texas: Richardson, 2006. p. 408

SPECTRAL INSTRUMENTS INC. **What is a CCD?** Disponível em: <http://www.specinst.com/What_Is_A_CCD.html>. Acesso em: 2 nov. 2013.

SPEIGHT, J. G. **Handbook of petroleum analysis.** New York: Wiley-Interscience, 2001. p. 512

SPEIGHT, J. G. **The chemistry and technology of petroleum**. 4. ed. New York: Taylor & Francis, LLC, 2006.

THOMAS, J. E. (ED.). **Fundamentos de engenharia de petróleo**. Rio de Janeiro: Intersciência: PETROBRAS, 2001. p. 278

THORLABS. **Amplified Photomultiplier**. Disponível em: <<http://www.thorlabs.com/thorcat/17400/PMM01-SpecSheet.pdf>>. Acesso em: 20 nov. 2013.

WEBSTER, J. G. **The measurement, instrumentation, and sensors handbook**. 2. ed. Boca Raton: CRC Press/IEEE Press, 1999.

YOUNG, D. **The infrared CCD sensor**. Disponível em: <<http://www.ccdsensor.com/2012/02/infrared-ccd-sensor/>>. Acesso em: 11 nov. 2013.

ZHONG, W. Photomultiplier Tube System for the Daya Bay Experiment. **Nuclear Physics B - Proceedings Supplements**, v. 229-232, p. 438, ago. 2012.

ZHU, J. et al. Evidence for pyroelectricity in single variant spontaneously ordered GaInP₂. **Solid State Communications**, v. 88, n. 5, p. 341–344, 1993.

APÊNDICE A - Absorção Óptica Relativa do CO₂

ABSORÇÃO ÓPTICA RELATIVA DO CO₂

Para futura aplicação na detecção de escoamento bifásico envolvendo petróleo e CO₂ é estudado o espectro de transmissão do CO₂ (COLATI et al., 2011) observado na Figura 47. Para melhorar o entendimento e a comparação com a Figura 28 a escala no eixo horizontal foi convertida de número de onda para comprimento de onda. São observadas diversas regiões onde o CO₂ é opaco, sendo que os vales que mais se destacam estão identificados de **A** a **D**. Na região de operação da câmera infravermelha, compreendida entre as linhas tracejadas, tem-se uma alta transmissão. Se compararmos esta região de 8 – 10 μm percebe-se que o petróleo possui uma transmissão menor que o CO₂, portanto seria possível a detecção das duas substâncias. Outras regiões interessantes para trabalhar são em torno de 4,5 μm onde o CO₂ possui grande absorção e o petróleo boa transmissão e em torno de 3,5 μm onde o petróleo possui grande absorção e o CO₂ grande transmissão.

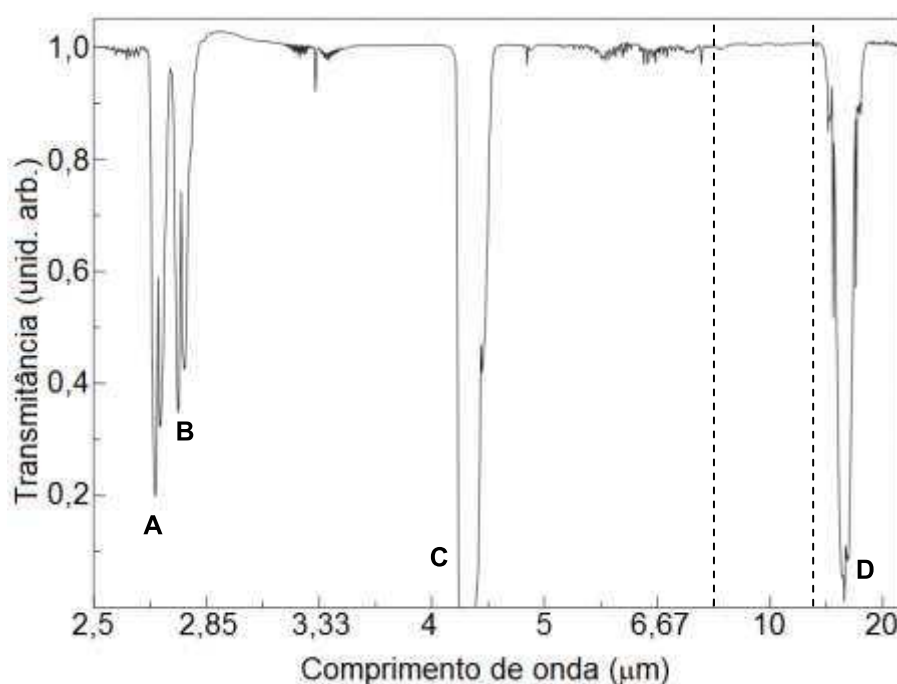


Figura 47 – Caracterização óptica do CO₂ em transmissão por FTIR na região de 2,5 - 20 μm
Fonte: adaptado de COLATI et al. (2011)

Para prever o funcionamento da câmera de IR com a variação do comprimento de CO₂ que a radiação atravessará é necessário teste que trará como resposta o coeficiente de absorção óptico. Porém, antes de investigar sobre a absorção óptica relativa do petróleo é preciso verificar a sensibilidade do sistema a

variação de concentração do CO_2 , já que como descrito na lei de Beer-Lambert, Equação (1), a concentração também influencia na absorção da substância.

Para isso são confeccionadas três câmaras para injeção de gás a fim de calcular o coeficiente de absorção do gás em seu interior. A montagem segue o esquema da Figura 48.

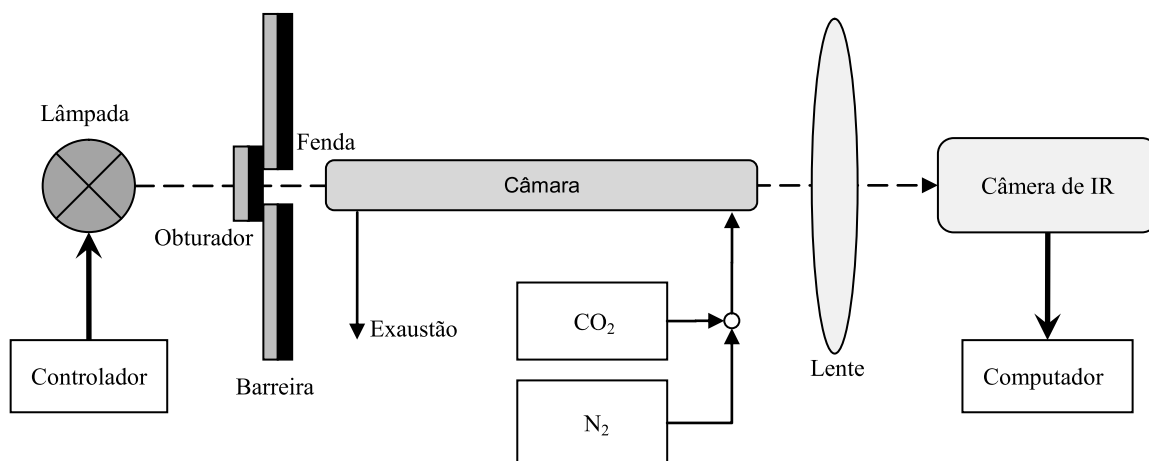


Figura 48 – Esquema de montagem do sistema óptico para detecção de CO_2 . A câmara possui um arranjo para que se possa inserir pela mesma entrada CO_2 e N_2 . Na exaustão é instalado um manômetro para regular a pressão interna na câmara
Fonte: Autoria própria

As câmaras são confeccionadas em tubos de PVC com três diferentes comprimentos: 20, 60 e 100 cm. Os tubos possuem 32 mm de diâmetro externo e 26 mm de diâmetro interno. Como janelas ópticas são utilizadas lâminas para microscópio de borossilicato, com 1 mm de espessura, cortadas de forma que o diâmetro de abertura seja de 20 mm ($314,16 \text{ mm}^2$). Cada câmara possui dois orifícios: um para admissão do gás e outro para exaustão, deste modo é possível fazer a purga da câmara com um pequeno fluxo de gás. A admissão de gás tem entrada para dois gases: um transparente ao comprimento de onda trabalhado que é utilizado como referência e outro absorvedor, ou seja, o gás a ser estudado. Na exaustão de gás está presente um manômetro para verificação da pressão interna da câmara. Os fluxos de gás de entrada e saída são controlados por válvulas agulha. O controle das pressões é manual. O arranjo de montagem é observado na Figura 49.

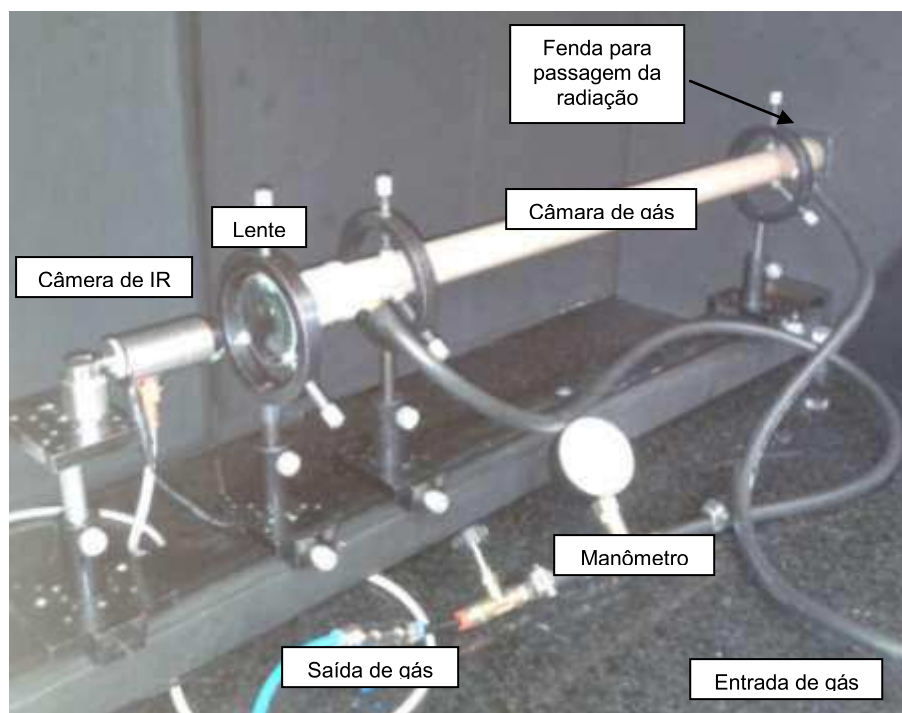


Figura 49 – Sistema óptico para detecção de CO₂
Fonte: Autoria própria

O primeiro teste visa constatar a capacidade de detecção da presença de CO₂ no interior da câmara pela câmera de IR, bem como obter uma resposta diferente e proporcional para diferentes pressões, conseqüentemente, diferentes concentrações.

Com o sistema montado e com a lâmpada acionada com 175 W e já estabilizada, é realizada a purga da câmara com um fluxo de N₂. Após purga a câmara é preenchida somente com N₂ a 20 psi. Com 1 min é aberta a válvula para sair o N₂ e a válvula para a entrada de CO₂.

Para que todo o N₂ saia e a câmara seja preenchida somente com CO₂ a válvula de saída permanece aberta e mantendo a pressão interna em 4 psi. Aos 3 min a válvula de saída é fechada e a pressão interna alterada para 6 psi. Com 4,5 min a pressão é alterada para 8 psi, aos 6 min para 10 psi, aos 7 min para 20 psi. Por fim aos 9 min a válvula de saída é aberta para liberar o CO₂ e a de entrada é aberta para nova purga com N₂. Os dados são adquiridos durante o tempo de 12 min.

O primeiro resultado utilizando a câmara de CO₂ comprova que a câmera de IR consegue detectar a diferença de concentração do gás no seu interior, Figura 50. Para esta medição é utilizada a rotina de programação que utiliza dados matriciais da câmera de IR armazenados em arquivo de texto. Desta matriz é realizada a

média das intensidades dos *pixels* em determinada área. Neste caso a área é delimitada pela janela óptica da câmara de gás.

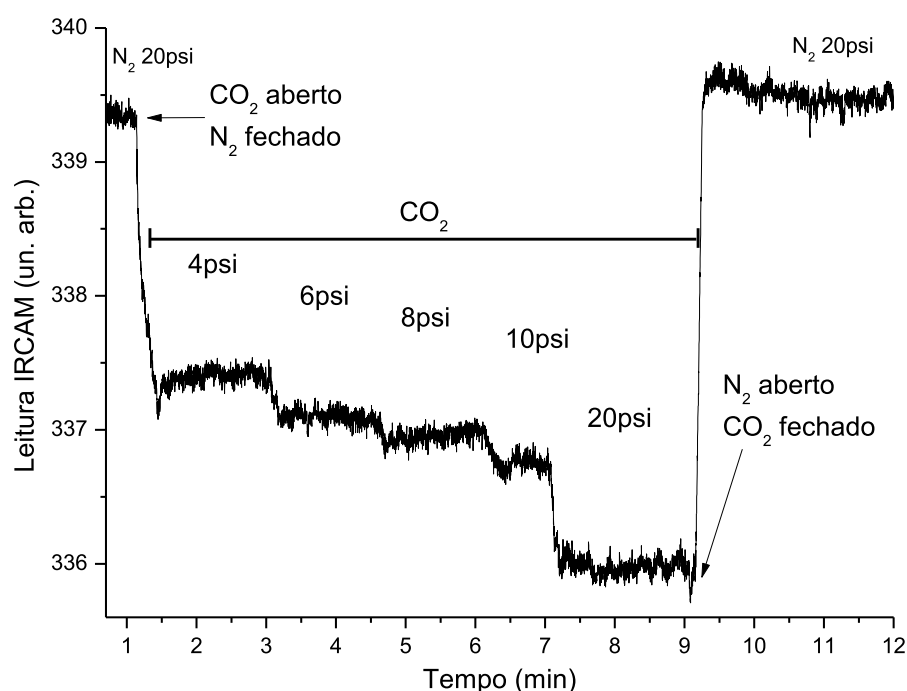


Figura 50 – Detecção pela câmara de IR de diferentes pressões de CO₂ no interior da câmara de 100 cm com fonte Alimentada com 175 W
Fonte: Autoria própria

Os dois patamares altos são resultados de quando a câmara estava cheia de N₂ a 20 psi. O nitrogênio é transparente neste comprimento de onda, portanto não sofre atenuação do sinal. Quando o CO₂ é inserido no sistema é percebida a queda no sinal, resultante da absorção do gás nesta faixa de comprimento de onda. Ao se aumentar a pressão, aumenta-se a concentração do gás, conseqüentemente aumentando a absorção e assim diminuindo a intensidade do sinal.

Para se obter a absorção óptica relatada do CO₂ um fluxo pequeno do gás é injetado no interior da câmara de 100 cm para que após fechamento da válvula se obtenha somente CO₂ a 20 psi no seu interior. A fonte é alimentada com 175 W, ligada e aguardando o tempo de 1,5 h para estabilização térmica. Com o obturador fechado os dados são adquiridos por 10 min como referência. Após o obturador é aberto e é realizada a aquisição dos dados por outros 10 min. O mesmo procedimento é repetido para as câmaras de 62 cm e 18 cm.

Para o teste de absorção relativa foi utilizado o mesmo método para aquisição dos dados anteriores. Como esperado, quanto maior o caminho óptico,

menor é a intensidade que chega ao detector, Figura 51. Como barra de erro são utilizados os valores mínimos e máximos de cada medição.

Utilizando regressão linear do gráfico, Equação (23), é possível descobrir o coeficiente de absorção relativo do CO₂, ou seja, 0,07733 unidades arbitrárias por centímetro.

$$I_{CO_2} = -0,07733 l_{CO_2} + 11,93208 \quad (23)$$

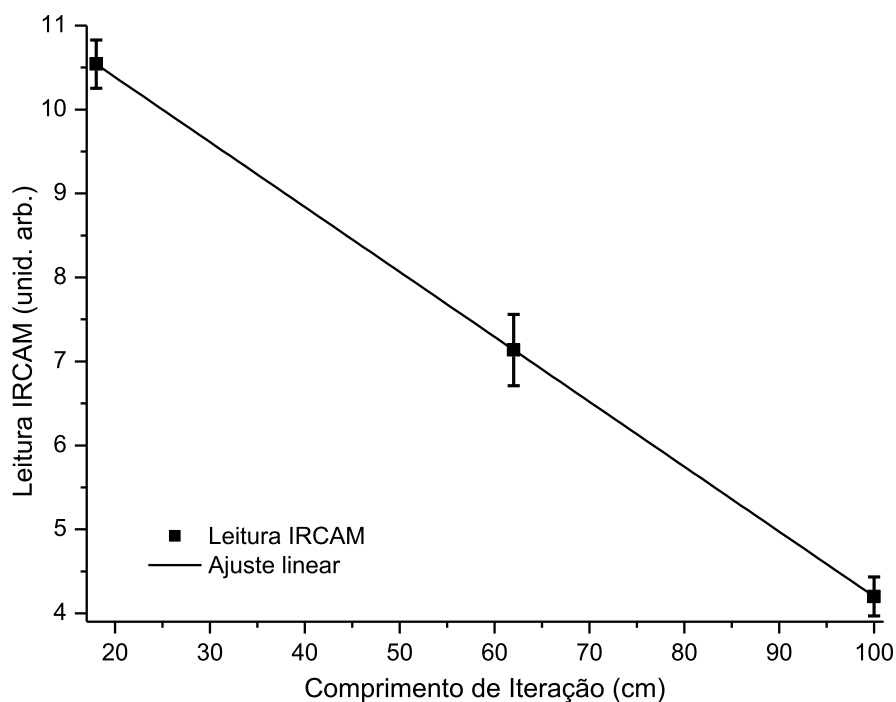


Figura 51 – Levantamento do coeficiente de absorção relativo do CO₂, a uma pressão de 20 psi, para a câmara de IR (0,07733 unid. arb./cm), utilizando os comprimentos de iteração de 18, 62 e 100 cm
Fonte: Autoria própria

Neste sistema são utilizadas janelas ópticas que não são otimizadas para a faixa de comprimento de onda de trabalho (8 – 12 μm), portanto possuem grande absorção. Também existe a possibilidade de aumentar a potência de alimentação da lâmpada até 1000 W, quase seis vezes a mais que a utilizada no momento.