

Sys 1944233

Marcelo Silva Guimarães

Arranjo Óptico para a Visualização de Jatos Evaporativos de Líquidos Altamente Superaquecidos

**Trabalho de formatura apresentado ao Departamento
de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para conclusão da
disciplina PMC-581 Projeto Mecânico II.**

São Paulo, Dezembro/1999

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Engenharia Mecânica
Laboratório de Sistemas Energéticos Alternativos

Arranjo Óptico para a Visualização de Jatos Evaporativos de Líquidos Altamente Superaquecidos

**Trabalho de formatura apresentado ao Departamento
de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para conclusão da
disciplina PMC-581 Projeto Mecânico II.**

Área: Fenômenos de Transporte

Aluno: Marcelo Silva Guimarães

Orientador: Prof. Dr. José Roberto Simões Moreira

São Paulo, Dezembro/1999

Agradecimentos

Agradeço ao Professor José Roberto Simões Moreira, pela oportunidade de realização deste projeto em que aprendi muito.

Agradeço ao Marcelo Mendes Vieira, pelo seu auxílio constante, sem a qual não seria possível construir este equipamento.

Por fim agradeço aos meus pais, Vitor Ferreira Guimarães e Eliene Silva Guimarães, que sempre me estimularam a realizar os meus estudos.

Índice

Lista de Figuras	5
Resumo	7
1- Introdução	8
2- Resumo do plano inicial	9
3- Simples revisão teórica dos jatos evaporativos de líquidos altamente superaquecidos ...	10
3.1- Instalação experimental.....	11
3.2- Geometria do escoamento	13
4- Método schlieren	14
5- A aquisição de imagens	19
6- Filtragem da Imagem.....	23
7- Detalhamento das etapas cumpridas.....	26
7.1- Projeto e construção do equipamento óptico.....	26
7.2- Preparo do laboratório para ensaios, testes iniciais e calibração do equipamento	29
7.3- Projeto e construção do comando da fonte de luz	31
7.4- Instalação da fonte de luz e realização dos primeiros ensaios	32
7.5- Instalação da câmera CCD	34
7.6- Programa para mudança dos mapas de cores e primeiras aquisições	37
7.7- Sincronizar a aquisição de imagem com o sinal de disparo (porta serial)	40
7.8- Programa para temporizar o trigger (porta serial).....	42
7.9- Programa de Filtragem.....	42
7.10- Configuração do trigger da placa de aquisição de imagens	43
7.11- Realização de mais aquisições	45
7.12- Reestruturação do programa de processamento de imagem	48
7.13- Utilização de luz branca	51
8- Dificuldades surgidas	51
9- Últimos ensaios realizados	51
10- Conclusões.....	54
Anexo A	57
Anexo B	58
Anexo C	59
Anexo D	60
Anexo E	61
11- Referências bibliográficas	88

Lista de Figuras

figura 1:	a) processo A1-A2 no caso da água (não ocorre mudança de fase).	10
	b) processo A1-A2 no caso da dodecana (ocorre mudança de fase).	
figura 2:	Esquema da instalação para realização da experiência (Vieira, 1999).	12
	figura 3: Geometria do escoamento a ser estudado.	13
figura 4:	Desvio da luz devido a um gradiente de densidade no fluido.	15
figura 5:	Esquema do sistema schlieren.	18
figura 6:	Resposta das câmeras de vídeo à intensidade luminosa. Nota-se que para gama igual à 1 a resposta é linear. (Gráfico retirado de Russ, 1994)	20
figura 7:	Resposta das câmeras à intensidade luminosa, nota-se que a câmera de tubo de vácuo (vidicon) é linear apenas quando o brilho é alto. (Gráfico retirado do Russ, 1994)	20
figura 8:	Utilizando-se um mapa de cores é possível obter mais informações da imagem. (Detalhe de um jato de dodecana)	21
figura 9:	Mapeamento com pseudo-cores caminhando sobre as arestas do cubo das cores saturadas no espaço RGB. (Gráfico retirado do Niblack, 1986)	22
figura 10:	Imagem obtida onde pode se observar os anéis de Newton.	23
figura 11:	Estudo da influência da filtragem e dos mapas de cores na processamento de imagens: a) Imagem original. b) Imagem original com mapa de cores arcir. c) Imagem original com mapa de cores prism. d)) Imagem filtrada com mapa de cores arcir. e) Imagem filtrada com mapa de cores prism.	25
figura 12:	Geometria do feixe de luz ao passar pela lente.	27
figura 13:	Espelho parabólico utilizado para colimar o feixe de luz.	27
figura 14:	Montagem dos dispositivos ópticos na mesa.	28
figura 15:	Filtro espacial atualmente usado no sistema.	28
figura 16:	Montagem do sistema óptico e aparato experimental.	29
figura 17:	Mostra uma visão geral do equipamento.	30
figura 18:	Caneta laser, lente e espelhos utilizado no sistema.	30
figura 19:	Imagem da chama de um isqueiro. (Uma das primeiras imagens obtidas com o equipamento)	30
figura 20:	Sinais aquisitados e enviados pela placa de aquisição de dados.	31
figura 21:	Flash LS-1130 da EG&G.	32
figura 22:	Gradiente de densidade em um ferro de solda.	32
figura 23:	Escoamento da dodecana. Pode-se observar o núcleo líquido do escoamento, bem como manchas brancas no vidro devido ao respingo de gotículas.	33
figura 24:	Nesta imagem observa-se manchas devido ao embaçamento da janela.	33
figura 25:	Janela da câmera de injeção.	34
figura 26:	Esquema do sistema de aquisição de imagem.	35
figura 27:	Conector da câmera de vídeo. (Retirado do manual da câmera CV-M50)	35
figura 28:	Primeiro programa utilizado para realizar a aquisição de imagens.	36
figura 29:	Software de tratamento de imagens.	37
figura 30:	Montagem do laser e dos polarizadores.	38
figura 31:	Escoamento de um secador de cabelos doméstico.	38

figura 32: Escoamento de um secador de cabelos doméstico. (Visualização utilizando a técnica de pseudocores)	39
figura 33: Convecção de ar quente causada por uma chama de isqueiro.	39
figura 34: Esquema de aquisição de imagem utilizando a porta serial.	40
figura 35: Carta de tempo do sinal.	41
figura 36: Circuito atenuador do sinal.	41
figura 37: Programa que configura o tempo de aquisição.	42
figura 38: Programa para a filtragem da imagem.	43
figura 39: Esquema de aquisição de imagem.	44
figura 40: Carta de tempo. O injetor é acionado enquanto o sinal estiver em nível alto. A câmera faz a aquisição das imagens nas bordas de subida.	44
figura 41: Convecção natural devido ao aquecimento de um ferro de solda.	45
figura 42: Escoamento de ar comprimido ($P=7$ bar) na saída de uma mangueira.	45
figura 43: Escoamento de ar comprimido ($P=7$ bar) na saída de uma mangueira.	46
figura 44: Jato de ar no injetor (Pressão de Injeção = 7 bar).	46
figura 45: Injeção de dodecana: Pressão na câmara=10mbar . Pressão de injeção=7bar. Temperatura de injeção=150°C.	47
figura 46: Injeção de dodecana: Pressão na câmara=10mbar . Pressão de injeção=3bar. Temperatura de injeção=200°C.	47
figura 47: Arquitetura do programa final para processamento de imagem.	50
figura 48: Programa atual de processamento de imagem, pode-se observar o menu utilizado para realizar a mudança de mapas de cores.	50
figura 49: Evaporação completa do diesel (temperatura de injeção: 250°C; pressão de injeção: 500kPa; pressão na câmara=300Pa).	51
figura 50: Jato pulverizante de querosene (temperatura de injeção: 96°C; pressão de injeção: 350kPa; pressão na câmara=2100Pa).	52
figura 51: Jato pulverizante de querosene (temperatura de injeção=95°C; pressão de injeção=615kPa; pressão na câmara=12mbar).	52
figura 52: Evaporação completa do querosene (temperatura de injeção=220°C; pressão de injeção=650kPa; pressão na câmara=0,1mbar).	53
figura 53: Evaporação completa querosene (temperatura de injeção: 270 °C; pressão de injeção: 700kPa; pressão da câmara=120Pa).	53
figura 54: Jato de ar no injetor (na figura a) temperatura de injeção: 23.6°C; pressão de injeção: 642.7kPa; pressão da câmara=533.2mbar, na figura b) temperatura de injeção: 23.6°C; pressão de injeção: 622.2kPa; pressão da câmara=1200Pa).	54

Resumo

Este trabalho tem como objetivo a construção de um equipamento óptico baseado na técnica Schlieren, para o estudo do escoamento de líquidos altamente superaquecidos. Especialmente, os jatos evaporativos formados por esses líquidos ao serem injetados em uma câmara de vácuo. Com o intuito de observar as condições para a formação de ondas de choque. Também foi desenvolvido ferramentas de processamento de imagem para, facilitar a identificação, do escoamento e suas características.

1- Introdução

É sabido que o índice de refração de um sistema é proporcional a sua densidade (Merzkirch, 1987). Quando o feixe de luz passa através de um meio não homogêneo, o meio pode provocar o desvio e a mudança de fase do feixe luminoso. Como em escoamentos compressíveis ocorrem variações muito grande da densidade do fluido, foi desenvolvido técnicas de visualização que permitem tratar o problema sobre o ponto de vista da óptica geométrica. Neste projeto foi utilizado a técnica Schlieren, que se baseia em registrar o desvio de um feixe de luz que atravessa um meio e que possibilita a visualização qualitativa das variações de densidade desse meio em estudo. A técnica schlieren permite verificar gradientes da densidade do meio, como ocorre com as ondas de choque em jatos evaporativos.

Os métodos ópticos se caracterizam por não produzirem distúrbios no fluido e por não incluírem algum elemento intruso no sistema a ser estudado, sendo baseados na interação de ondas de luz com escoamento. A luz transmitida sobre o fenômeno a ser estudado é registrada (fotografia) para depois ser analisada.

Os métodos ópticos podem ser aplicados em:

- Escoamento compressíveis; situações de escoamento supersônico onde ocorre mudanças elevadas de densidade e ondas de choque.
- Transferência de calor por convecção; onde ocorre mudança de densidade em gases ou em líquidos em função da temperatura.
- Mistura de fluidos; quando se mistura dois fluidos ou mais, de densidades diferentes; a densidade da mistura varia de acordo com a concentração de cada componente.
- Combustão; que envolve as três situações discutidas acima.

2- Resumo do plano inicial

Este relatório se refere aos trabalhos desenvolvidos na realização do projeto do Arranjo Óptico para a Visualização de Jatos Evaporativos (Processo FAPESP nº: 97/01188-9).

O projeto teve como objetivo construir um equipamento óptico para auxiliar o estudo do escoamento de líquidos altamente superaquecidos. As seguintes etapas foram realizadas:

- Estudo e orientação sobre o assunto;
- Projeto e construção do equipamento óptico;
- Preparo do laboratório para ensaios;
- Testes iniciais e calibração do equipamento.
- Realização dos ensaios utilizando o equipamento;
- Projeto e construção do comando da fonte de luz;
- Instalação da fonte de luz;
- Instalação e calibração da máquina fotográfica;
- Realização dos ensaios;
- Análise dos resultados.
- Estudo e orientação sobre o processamento de imagens;
- Instalação da câmera CCD;
- Software de aquisição de imagem;
- Software de tratamento de imagens;
- Instalação da fonte de luz laser;
- Realização de ensaios.
- Sincronizar a aquisição de imagem com o sinal de trigger;
- Realizar ensaios com jatos evaporativos de dodecana;
- Instalação de luz branca;
- Atualização do software;
- Ensaio com jatos.

3- Simples revisão teórica dos jatos evaporativos de líquidos altamente superaquecidos

O conhecimento do comportamento termodinâmico de substâncias que possui uma estrutura molecular complexa tem sido alvo de estudos nos últimos anos. Em parte o estudo é motivado pelos diferentes aspectos que estas substâncias apresentam durante os processos evaporativo e de liquefação. Entre as diversas aplicações industriais, podemos citar o processo de injeção de combustível de óleos leves, tais como diesel.

Basicamente a diferença entre uma substância com um calor específico molar elevado e outra com um calor específico baixo é o número de graus de liberdade interno da molécula. Tais graus de liberdade indicam o número de acumuladores de energia em uma molécula, ou seja, sua habilidade para armazenar energia interna. Assim as moléculas com um número muito grande de graus de liberdade podem inclusive armazenar uma quantidade de energia interna maior do que o calor latente de evaporação. Isso permite a mudança de fase em uma escala molecular sem estar limitada pela transferência de calor. Tal processo é mais evidente em altas temperaturas, pois o calor específico molar diminui com o aumento da temperatura, enquanto a energia interna aumenta.

Portanto, substâncias com um alto calor específico molar podem sofrer uma completa mudança de fase por um processo puramente adiabático. Esta mudança de fase pode ser observada na figura 1b para uma substância de calor específico molar elevado e outra com um calor específico molar baixo (figura 1a).

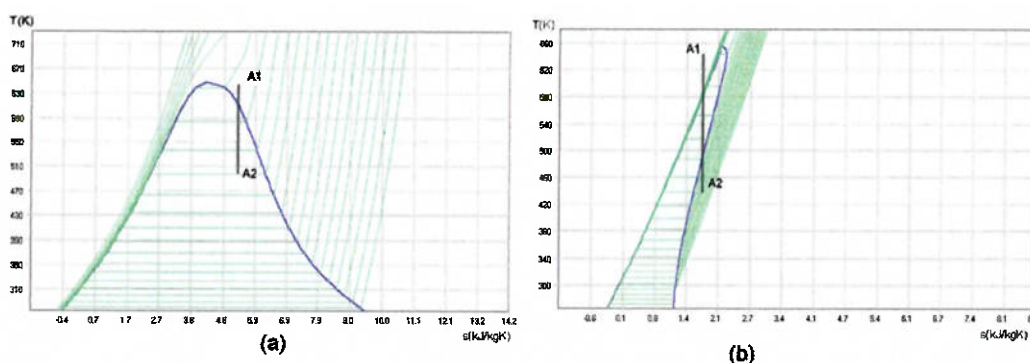


figura 1: a) processo A1-A2 no caso da água (não ocorre mudança de fase).
b) processo A1-A2 no caso da dodecana (ocorre mudança de fase).

A experiência realizada estudou a dinâmica da evaporação adiabática da dodecana ($C_{12}H_{24}$) em forma de jatos de expansão.

3.1- Instalação experimental

Na figura 2 pode-se observar a instalação, sendo esta constituída, por:

- Reservatório;
- Sistema de vácuo, capaz de despressurizar o reservatório até uma pressão de 50Pa ou menos;
- Sistema injeção, que permite injetar a dodecana no reservatório, desde uma pressão igual a atmosférica até uma pressão de 700 kPa;
- Sistema de aquecimento, possibilitando o controle da temperatura de injeção da dodecana, numa faixa desde da temperatura ambiente até a 573 K;
- Sistema de pressurização capaz de pressurizar a câmara até uma pressão de 700 kPa;
- Sistema óptico, baseado na técnica schlieren para visualização do escoamento;
- Sistema de aquisição de dados, para medição da temperatura e pressão de injeção da dodecana, além de comandar o acionamento da fonte de luz do sistema óptico e a injeção da dodecana.

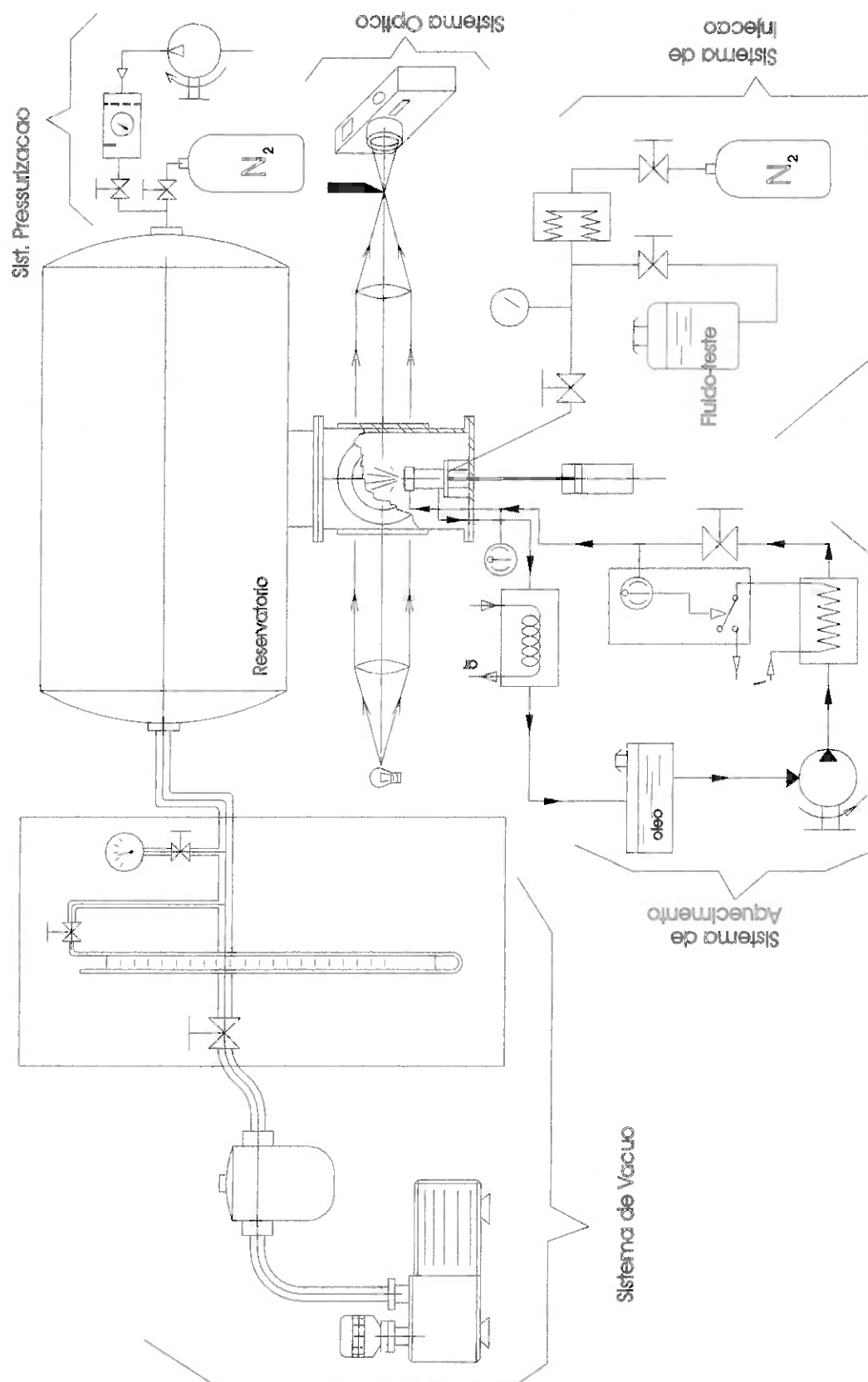


figura 2: Esquema da instalação para realização da experiência (Vieira, 1999).

3.2- Geometria do escoamento

O escoamento estudado pode ser modelado da seguinte forma: a injeção possui um núcleo líquido, na medida que o escoamento avança este núcleo sofre evaporação, pois o jato está ocorrendo em baixa pressão, gerando descontinuidades evaporativas. Devido a evaporação o fluido se expande predominantemente na direção radial. As características desta expansão dependem do grau de superaquecimento do fluido (Kurschat e outros, 1992), podendo formar uma onda de choque ajustando o fluido a pressão do reservatório. Na figura 3 pode-se observar um modelo do comportamento do escoamento.

Nosso objetivo é justamente analisar esta zona de expansão, procurando registrar de forma óptica os fenômenos dinâmicos associados com a brusca evaporação do líquido. Também será testada a hipótese de ondas evaporativas, como as que foram documentadas por Simões Moreira e Shepherd (1999).

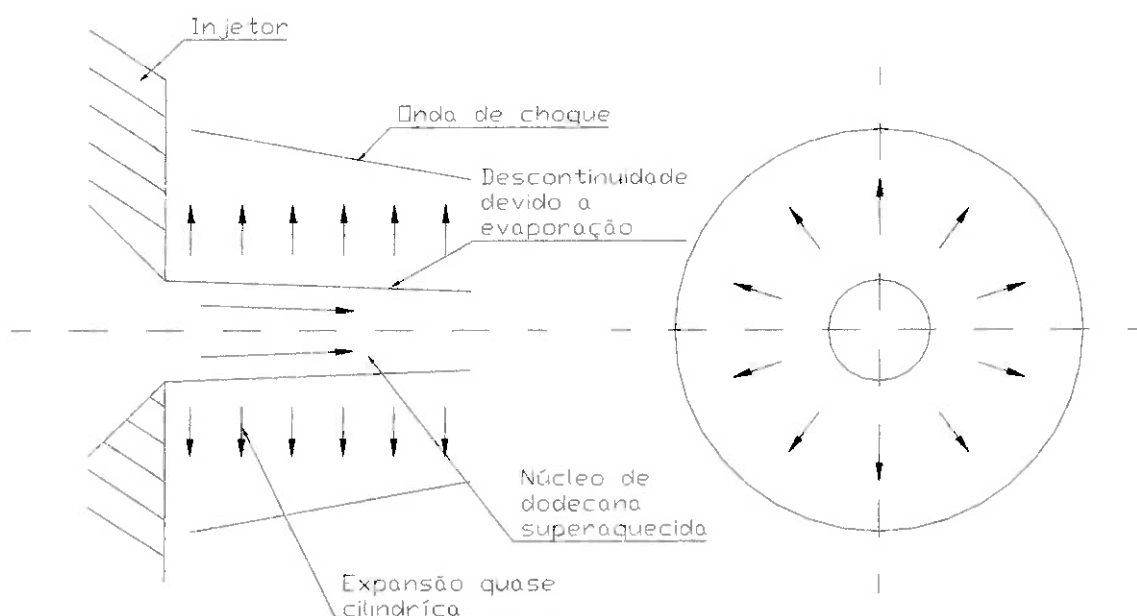


figura 3: Geometria do escoamento a ser estudado.

4- Método schlieren

Um fluido sem redes de dipolos elétricos, ao ser atravessado por um raio de luz sofre uma polarização elétrica. De acordo com a teoria de Lorentz (modelo do elétron oscilante harmônico induzido) este vetor polarização induzido esta relacionado com o campo eletromagnético da luz de tal maneira que onde a densidade é maior, a polarização é mais intensa. Sendo que o índice de refração do meio está associado a permissividade elétrica. Pela relação de Clausius-Mosotis (Merzkirch 1987), o índice de refração é crescente com o aumento da densidade:

$$\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} = \frac{\rho \ell e^2}{3\pi m_e M} \sum_i \frac{f_i}{v_i^2 + v^2} \quad (4.1)$$

Onde : n = índice de refração

ρ = densidade

ℓ = número de Loschmidt

e = carga do eletron

m_e = massa do eletron

M = massa molar do fluido

v = frequência da luz

v_i = frequência de ressonância de um eletron

f_i = índice de rigidez do oscilador harmonico induzido

Para gases devido a variação do índice de refração ser próximo de um, pode-se utilizar com uma boa precisão a seguinte expressão (Liepmann e Roshko, 1957):

$$n = 1 + \beta \frac{\rho}{\rho_s} \quad (4.2)$$

Onde ρ_s é uma densidade de referência para a determinação experimental do coeficiente β , ρ é a densidade do gás.

Sabendo-se como se relaciona o índice de refração com a densidade do fluido é necessário compreender como a luz se comporta ao passar por um campo de índice de refração. É de conhecimento geral que a luz ao passar por um meio de índice de refração variável obedece as seguintes equações (Merzkirch 1987):

$$\begin{aligned}\frac{d^2 y}{dz^2} &= \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial y} \\ \frac{d^2 x}{dz^2} &= \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial x}\end{aligned}\quad (4.3)$$

Para solucionar as equações diferenciais é necessário dar as condições de contorno. Estas condições são as coordenadas x e y de entrada e de saída na região de ensaio, como indicado na figura 4. Portanto para se medir o ângulo de deflexão de raio de luz ao passar pela região de ensaio basta calcular:

$$\begin{aligned}\varepsilon_y &= \frac{dy}{dz} = \int_{\eta_1}^{\eta_2} \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial y} dz \\ \varepsilon_x &= \frac{dx}{dz} = \int_{\xi_1}^{\xi_2} \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial x} dz\end{aligned}\quad (4.4)$$

Onde ε_y é o desvio angular em relação ao plano y - z e ε_x é o desvio angular em relação ao plano x - z . Esta equação é importante para compreender como a técnica schlieren funciona e mostra que o desvio angular de um feixe de luz é proporcional ao gradiente de densidade.

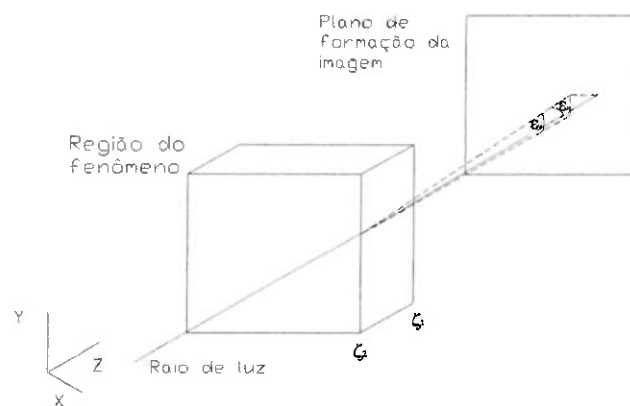


figura 4: Desvio da luz devido a um gradiente de densidade no fluido.

Agora, considere a figura 5a, onde a luz da fonte ab é colimada pela lente L_1 . Na sequência o feixe colimado passa pela seção de teste. Da seção de teste, o feixe encontra a lente L_2 que projeta imagem invertida da fonte no plano 2. Se for colocado uma lâmina (filtro espacial) próximo ao plano 2 (como indicado na figura 5b), a intensidade de luz que chega plano 3 será proporcional a área não interceptada pelo objeto. Se o feixe de luz sofrer um desvio devido a variação de densidade do meio fluido na seção de teste, então ocorrerá uma variação da intensidade de luz projetada em c'd' dado pela expressão:

$$\frac{\Delta I}{I} = \frac{\Delta y}{y_1} \quad (4.5)$$

Onde, I é a intensidade do feixe de luz que chega à lâmina, como indicado na figura 5a; ΔI é a porção da intensidade inicial que não é bloqueada pela lâmina; y_1 é proporcional à área do feixe óptico que chega à lâmina e Δy é proporcional à área do feixe óptico inicial que não é bloqueado pela lâmina

Sabe-se também que um pequeno desvio angular ε no plano 1 produzirá um deslocamento Δy dado pela seguinte expressão linearizada:

$$\Delta y = f_2 \varepsilon \quad (4.6)$$

Onde f_2 é a distância focal da lente L_2 .

Pelas equações (4.4), (4.5) e (4.6) pode-se concluir que:

$$\frac{\Delta I}{I} = \frac{f_2}{y_1} \int_{\eta_1}^{\eta_2} \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial y} dz \quad (4.7)$$

Portanto na imagem produzida pelo método schlieren é possível medir o gradiente de densidade do fluido.

Existem muitas variações do método schlieren, entre elas, a técnica schlieren colorida. Onde no lugar de um filtro espacial é utilizada um filtro colorido, onde a frequência a ser filtrada depende da posição do que a luz atinge o filme. Assim o desvio do raio de luz será proporcional a variação da matiz do filme.

Segundo estudos apresentados (Howes 1983) esta técnica é tão sensível quanto a interferometria, sendo que Greenberg (1995) utilizando de filtros gerados por computador e processamento de imagens obteve uma acurácia melhor do que a da técnica interferométrica. Em uma continuidade futura do presente trabalho, pretende-se investigar o método schlieren colorido.

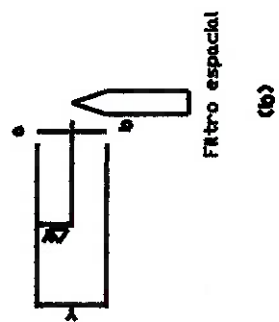
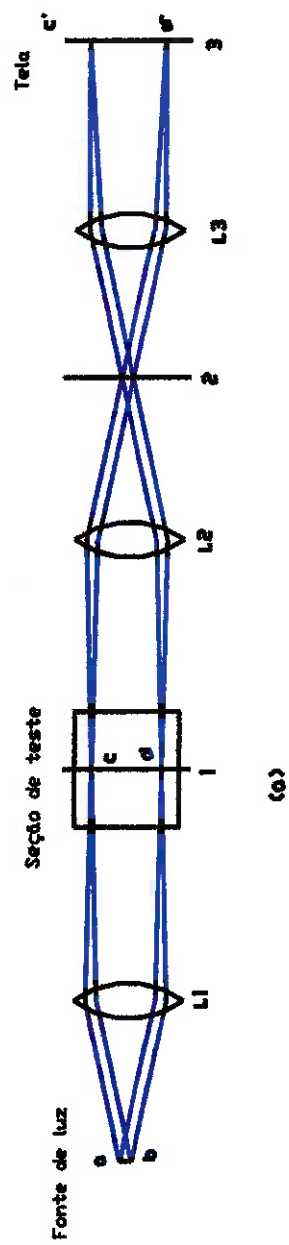


figura 5: Esquema do sistema schlieren.

5- A aquisição de imagens

Para a aquisição das imagens do arranjo óptico pode-se utilizar uma câmera fotográfica ou uma câmera de vídeo.

As câmeras de vídeo têm como vantagem, a possibilidade de se adquirir rapidamente uma sequência de imagens, já, a fotografia é necessário esperar que o filme seja revelado. Além disso, a escala de cinza formada em um filme fotográfico não está linearmente relacionada com a intensidade da luz a qual é exposto.

Dois tipos de câmera são muito comuns: a câmera CCD e a câmera de tubo de vácuo. A câmera de tubo de vácuo possui um material cuja resistência elétrica varia com intensidade da luz incidente. A imagem formada sobre este material, que fica próximo ao ânodo do tubo de vácuo, é varrida por um canhão de elétrons, gerando assim o sinal de vídeo pela detecção da variação da resistência elétrica do material. As câmeras de tubo de vácuo são muito sensíveis a distúrbios no seu campo magnético devido a interferência causada por outros equipamentos

O CCD é um “chip” com uma matriz de sensores luminosos (contador de fótons). Assim é feito um rastreamento onde é lido a tensão de cada sensor para se gerar o sinal de vídeo.

Uma característica importante nas câmeras de vídeo é o valor gama que indica a linearidade entre a intensidade luminosa e a tensão do sinal de vídeo. Como pode ser visto na figura 6, para um valor gama diferente de 1 a relação não é linear. Apesar de existir câmeras com tubo de vácuo com gama igual a 1, as mais comuns não são lineares e tem seu gama em função do brilho (ver figura 7).

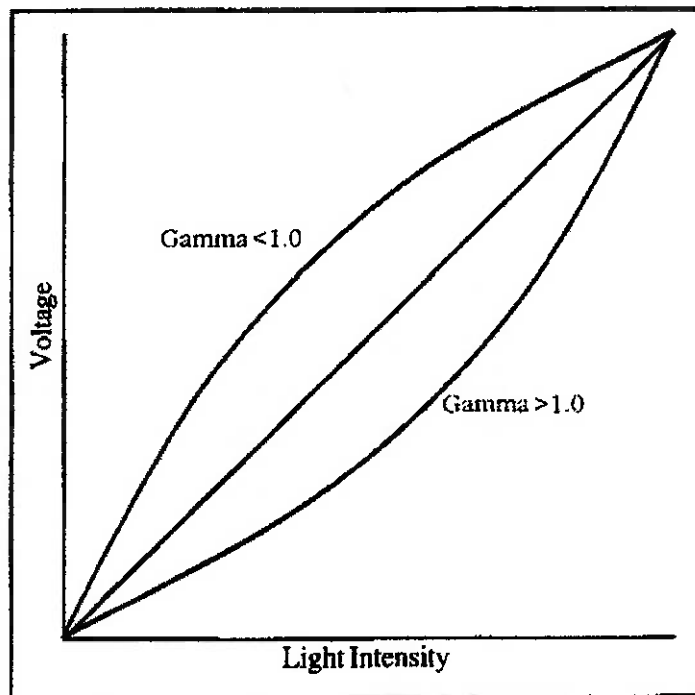


figura 6: Resposta das câmeras de vídeo à intensidade luminosa. Nota-se que para gama igual à 1 a resposta é linear. (Gráfico retirado de Russ, 1994)

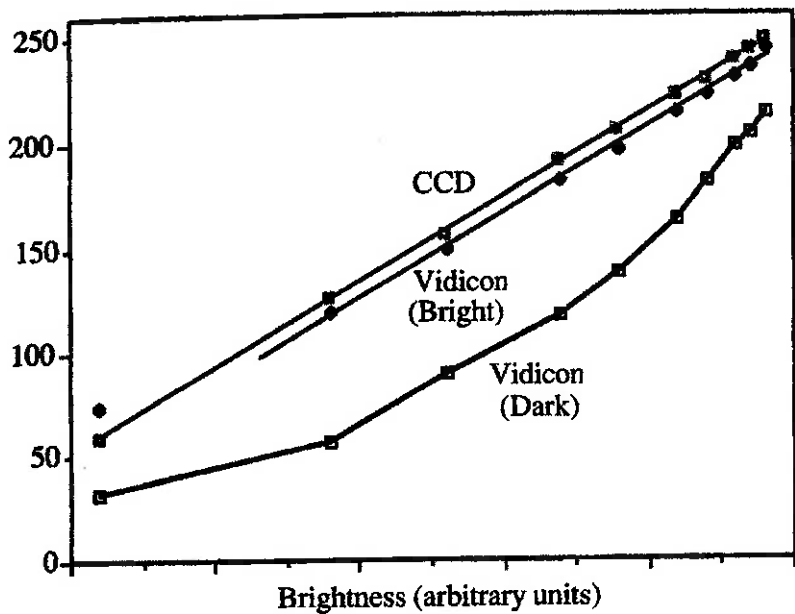


figura 7: Resposta das câmeras à intensidade luminosa, nota-se que a câmera de tubo de vácuo (vidicon) é linear apenas quando o brilho é alto. (Gráfico retirado do Russ, 1994)

As câmeras CCD são lineares, porém devido a dificuldade de se fabricar todos os sensores com o mesmo ganho, há uma geração de ruído no sinal. Contudo neste projeto pretende-se utilizar uma câmera CCD, devido a linearidade do sinal e a facilidade para a obtenção das imagens.

Após a aquisição de imagem é necessário visualiza-la, porém a visualização depende das características do observador. Algumas das características do olho humano dependem de suas propriedades fisiológicas e psicofísicas.

O olho humano consegue distinguir menos de 50 tons de cinza e consegue distinguir mais de 200 cores diferentes. Para se conseguir distinguir as variações de densidade ao se observar uma imagem é vantajoso utilizar uma escala de cores, como pode ser visto na figura 8.

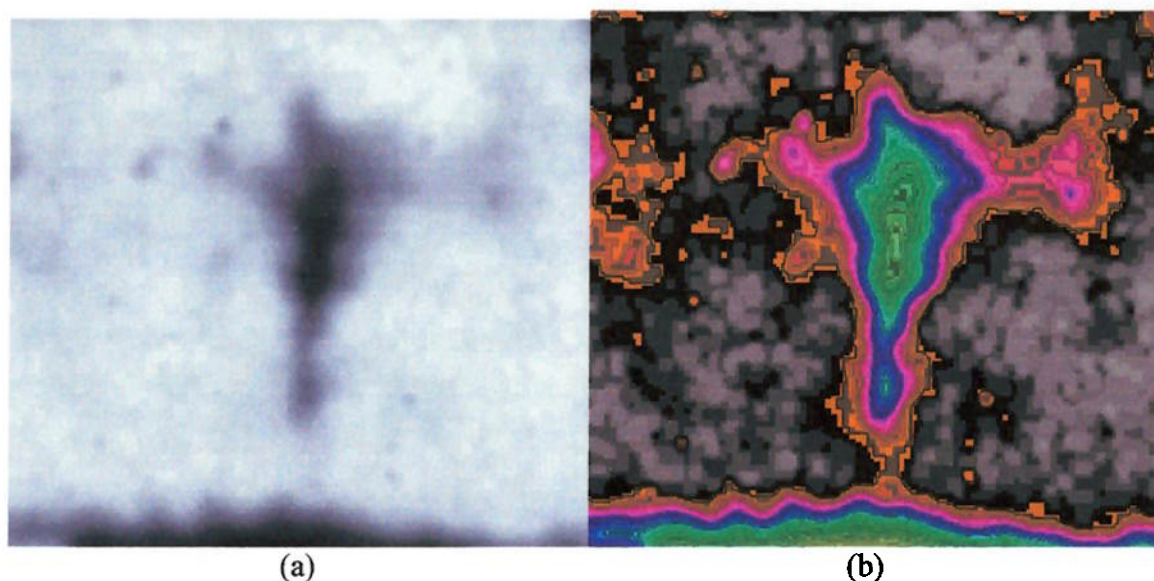


figura 8: Utilizando-se um mapa de cores é possível obter mais informações da imagem. (Detalhe de um jato de dodecana)

Para tanto é necessário escolher mapa de cores adequado. Um mapeamento que é linear, mas não é visualmente uniforme é dado por: (Niblack, 1986)

$R(i)$	$G(i)$	$B(i)$		(4.0)
1	$6i$	0	$0 \leq i \leq 1/6$	
$1 - 6(i - 1/6)$	1	0	$1/6 \leq i \leq 2/6$	
0	1	$6(i - 2/6)$	$2/6 \leq i \leq 3/6$	
0	$1 - 6(i - 3/6)$	1	$3/6 \leq i \leq 4/6$	
$6(i - 4/6)$	0	1	$4/6 \leq i \leq 5/6$	
1	0	$1 - 6(i - 5/6)$	$5/6 \leq i \leq 6/6$	

Este mapa pode ser descrito como um percurso nas arestas de um cubo no espaço RGB de cores, como indicado na figura 9. Porém para que os mapas tenham efeito é necessário ter sua cromaticidade calibrada. Muitas vezes é mais simples testar vários mapas até achar aquele que produz o efeito adequado.

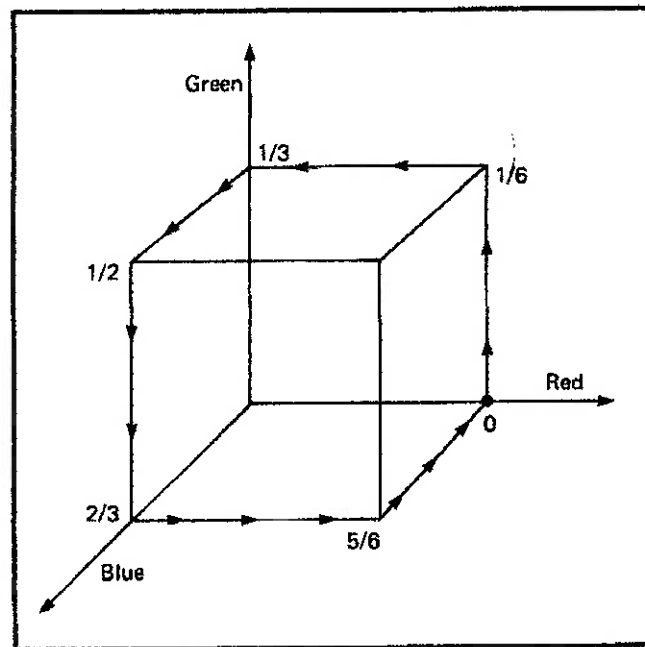


figura 9: Mapeamento com pseudo-cores caminhando sobre as arestas do cubo das cores saturadas no espaço RGB. (Gráfico retirado do Niblack, 1986)

6- Filtragem da Imagem

Na aquisição de imagens podem surgir ruídos devido a fatores como: instabilidade da fonte de luz, ruído térmico e interferências elétricas. No entanto um ruído que está presente na montagem deste sistema óptico é a formação de anéis de Newton devido a efeitos difrativos na luz laser, como pode ser observado na figura 10.

Estes anéis produzem uma luz de fundo heterogênea, ou seja, mesmo sem ocorrer o fenômeno físico a ser estudado, há a formação de uma imagem no arranjo óptico intrínseca a montagem do arranjo.

Para filtrar este ruído pode-se utilizar um filtro matemático (Russ, 1994), que basicamente evidenciaria as diferenças entre uma imagem do fenômeno e outra imagem padrão (onde aparece apenas a imagem da luz de fundo sem o fenômeno a ser estudado). Para um dispositivo de aquisição com resposta logarítmica à intensidade de luz, a filtragem consiste em se realizar a subtração pixel a pixel da imagem do fenômeno sobre a imagem padrão. Para um dispositivo de aquisição com resposta linear à intensidade de luz é realizado uma divisão pixel a pixel da imagem do fenômeno sobre a imagem padrão.

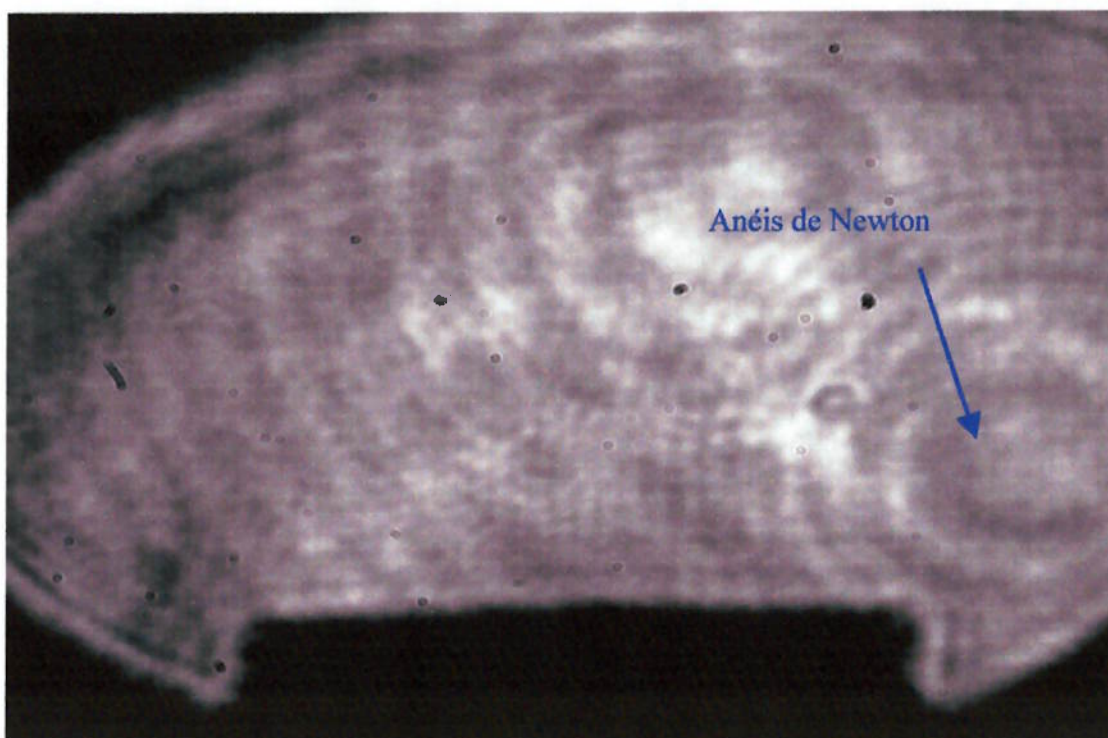


figura 10: Imagem obtida onde pode se observar os anéis de Newton.

Quando é realizado a subtração (ou divisão) sobre as imagens, a faixa de valores possíveis para os pixels muda. Por exemplo, no caso de uma imagem com um mapa com 256 cores (caso aplicado a este arranjo óptico) o faixa de valores permissíveis para os pixels vai de 0 a 255, submetido a uma subtração estes valores podem passar ser de -255 a 255. No caso de ser realizado uma divisão os valores, podem acabar ocupando uma região menor na faixa de 0 a 255, com muitos pixels assumindo valores não inteiros.

Para que os pixels voltem a ocupar a escala de valores de 0 a 255, é feito então um reescalamento da imagem, fazendo o pixel assumir um novo valor dado pela equação 5.0:

$$B = FAIXA \times \frac{(pixel - MINIMO)}{(MAXIMO - MINIMO)} \quad (5.0)$$

Onde: *pixel* = valor do pixel após a filtragem

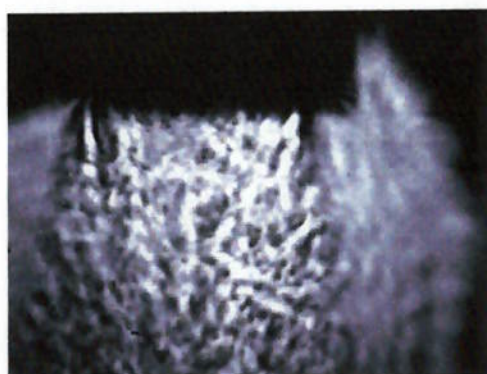
MINIMO = menor valor assumido pelo pixel na imagem filtrada

MAXIMO = maior valor assumido pelo pixel na imagem filtrada

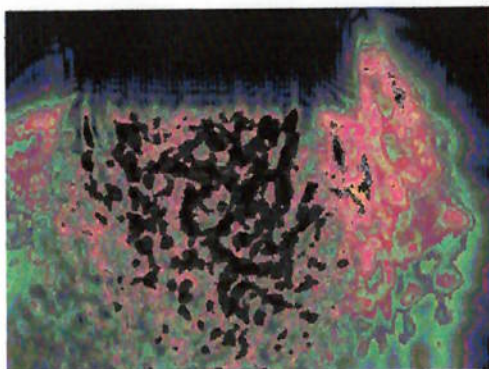
FAIXA = capacidade do mapa de cores (para 8 bits é 255)

No caso da divisão das imagens deve-se ainda, evitar a divisão por zero, isto é feito somando-se um aos pixels da imagem padrão.

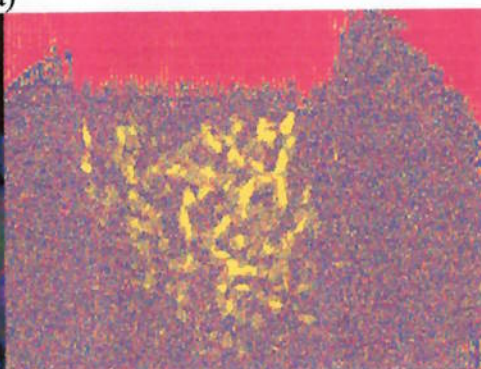
Na figura 11 pode ser observado a influência da filtragem e da utilização dos mapas de cores sobre as imagens.



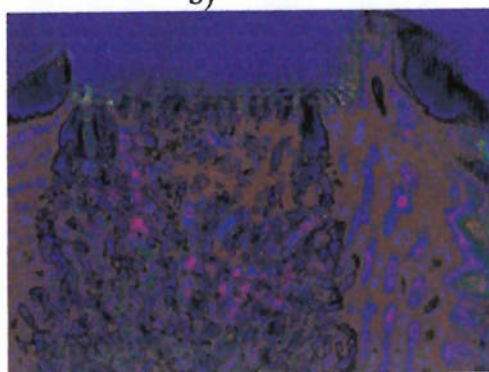
a)



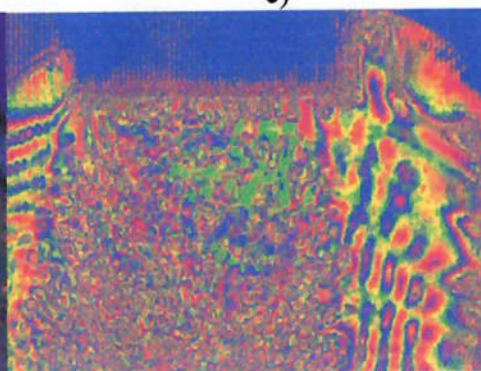
b)



c)



d)



e)

figura 11: Estudo da influência da filtragem e dos mapas de cores na processamento de imagens: a) Imagem original. b) Imagem original com mapa de cores arcir. c) Imagem original com mapa de cores prism. d)) Imagem filtrada com mapa de cores arcir. e) Imagem filtrada com mapa de cores prism.

7- Detalhamento das etapas cumpridas

7.1- Projeto e construção do equipamento óptico

O método óptico escolhido deve permitir a visualização, bem como a medição de características geométricas das ondas de choques, além de ter um baixo custo de montagem. A partir dos estudos, restringiu-se a escolha entre um dos métodos abaixo:

- “Shadowgraph”;
- Schlieren;
- Interferometria.

O método Schlieren foi escolhido, por apresentar um custo inferior ao da interferometria e por permitir uma visualização mais precisa do fenômeno que o “shadowgraph”.

Assim foi realizado um estudo para selecionar a fonte de luz a ser utilizada, as características dos elementos ópticos a montagem da estrutura e o local de montagem.

Inicialmente escolheu-se uma fonte de luz branca pulsante, bastante intensa da EG & G (modelo LS-1130).

Para se determinar as características dos elementos ópticos foi utilizado uma técnica chamada “ray tracing” (O'Shea 1985) que é baseada na óptica geométrica (lei da reflexão e lei da refração).

Através de construções geométricas, realizadas por CAD (computer aided design), foi possível analisar as implicações de várias configurações dos elementos ópticos no sistema.

Para o cálculo da distância focal das lentes, foi utilizado dados da geometria do feixe de luz quando sai da fonte e características que o feixe deve possuir após passar pela lente (obtido pelo desenho realizado por CAD):

Adotou-se uma lente com 47mm de distância focal. Foi escolhido para a lente o diâmetro de 50mm a fim de se ter liberdade para variar o diâmetro do feixe de luz paralelo (como se pode ver na figura 12).

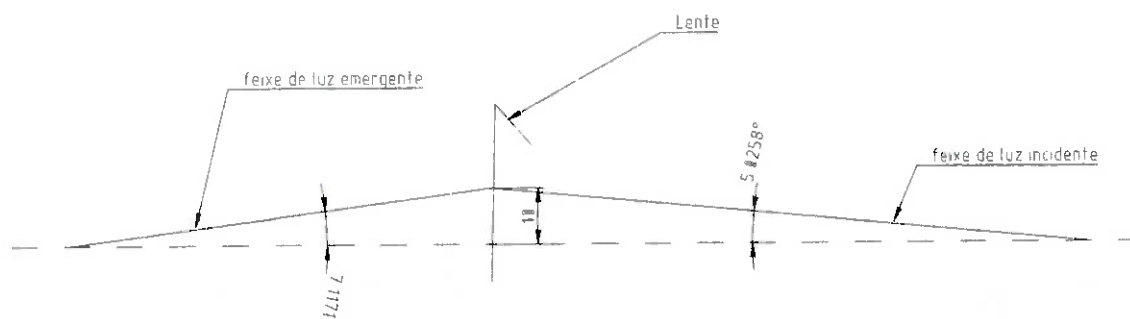


figura 12: Geometria do feixe de luz ao passar pela lente.

$$u_k = 7.1171^\circ = 12.42 \times 10^{-2} \text{ rad}$$

$$u_{k+1} = -5.0258^\circ = -8.77 \times 10^{-2} \text{ rad} \quad (5.1)$$

$$Y_{k+1} = 10 \text{ mm}$$

$$u_{k+1} = u_k - Y_{k+1} \cdot \theta_{k+1} \Rightarrow \theta_{k+1} = \frac{u_k - u_{k+1}}{Y_{k+1}} \quad (5.2)$$

$$\theta_{k+1} = 2.22 \times 10^{-2} \text{ mm}^{-1}$$

$$f = \frac{1}{\theta_{k+1}} = 47.19 \text{ mm} \quad d_{\min} = 20 \text{ mm} \quad (5.3)$$

Os espelhos planos, a lente e o orifício, foram montados sobre trilhos, para facilitar a realização dos ajustes. Os espelhos parabólicos, por ficarem a uma distância relativamente grande dos outros componentes, foram fixados sobre a mesa. A figura 13 mostra um dos espelhos parabólicos.



figura 13: Espelho parabólico utilizado para colimar o feixe de luz.

Os equipamentos foram dispostos em duas mesas. Entre as mesas, foi montado um conjunto de visores por onde passará o feixe de luz que incidirá sobre o fenômeno.

Para permitir absorver vibrações e permitir o nivelamento dos trilhos foi colocado sobre a mesa uma camada de borracha, fez-se um reforço lateral nos pés das mesas e colocou-se os pés das mesas dentro de caixas com areia. Na figura 14 observa-se a montagem do espelho e dos dispositivos opto-mecânicos na mesa localizada após o fenômeno.

Para construção do equipamento, decidiu-se encomendar a fabricação das lente, dos espelhos, dos dispositivos mecânicos de fixação e a compra da fonte de luz. No laboratório foi fabricada a mesa, o orifício (filtro espacial, figura 15), além de ter sido realizado a montagem do equipamento. Na figura 16 é mostrada uma visão geral da montagem do sistema óptico.

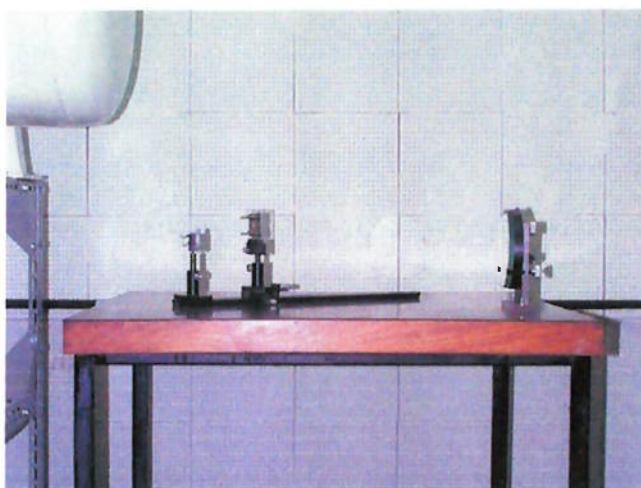


figura 14:Montagem dos dispositivos ópticos na mesa.



figura 15: Filtro espacial atualmente usado no sistema.



figura 16: Montagem do sistema óptico e aparato experimental.

7.2- Preparo do laboratório para ensaios, testes iniciais e calibração do equipamento

Para efetuar as experiências, reservou-se uma sala onde foi montado o sistema schlieren e todos os equipamentos do projeto Evaporação de Líquidos Altamente Superaquecidos (processo FAPESP: 96/04746-0). Na figura 17 pode se ter uma visão do reservatório e da janela para visualização do fenômeno.

Para o alinhamento dos componentes do sistema foi necessário comprar um laser de baixa potência (5 mW), conhecido como caneta laser. Posicionado no local da fonte luminosa foi possível alinhar os espelhos e focalizar a lente e o orifício. Utilizando a caneta laser como fonte de luz, foi colocado uma chama de isqueiro no sistema Schlieren. A figura 18 ilustra como foi disposta a caneta laser para se obter as primeiras imagens. Para tirar estas fotografias, (a figura 19 mostra uma das imagens) a máquina fotográfica focalizou uma imagem projetada em um anteparo.

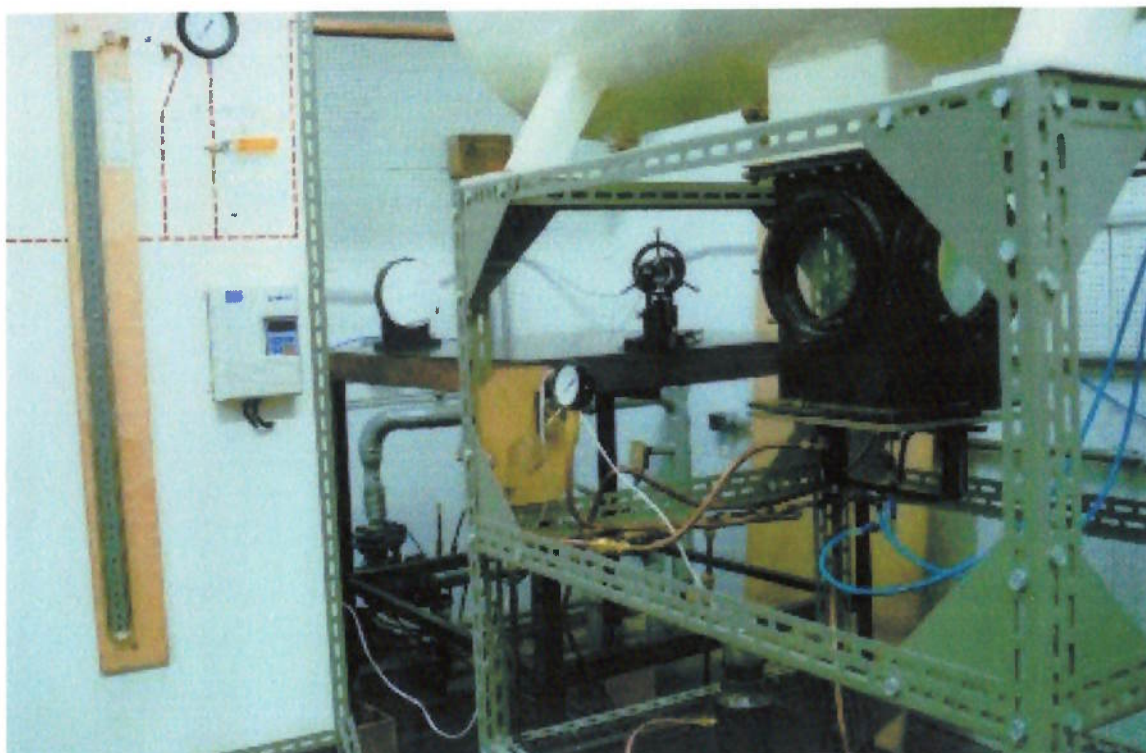


figura 17: Mostra uma visão geral do equipamento.

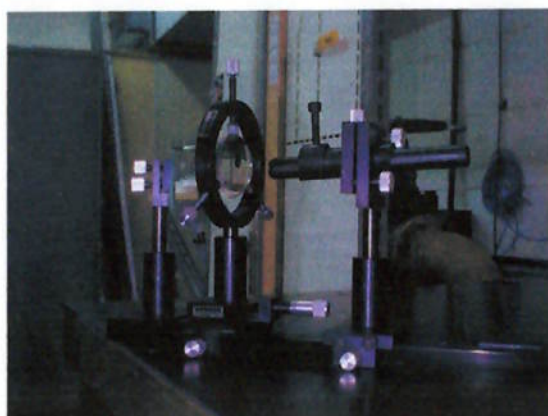


figura 18: Caneta laser, lente e espelhos utilizado no sistema.



figura 19: Imagem da chama de um isqueiro. (Uma das primeiras imagens obtidas com o equipamento)

7.3- Projeto e construção do comando da fonte de luz

Para a realização das experiências, alguns dados como pressão e temperatura de injeção da dodecana serão registrados através de uma placa de aquisição de dados. Esta placa também comandará a fonte de luz, enviando um sinal no instante que será registrada a imagem do fenômeno. Na figura 20 pode-se observar os sinais a serem aquisitados pela placa e os sinais para o comando da fonte de luz e do injetor.

Para permitir o acionamento da fonte de luz através da placa de aquisição de dados foi projetado um comando(ver Anexo A). Este comando também ajusta a intensidade da luz enviando para a fonte de luz uma tensão de referência. O comando também possui um oscilador que, gera uma onda quadrada realizando assim o acionamento intermitente da fonte.

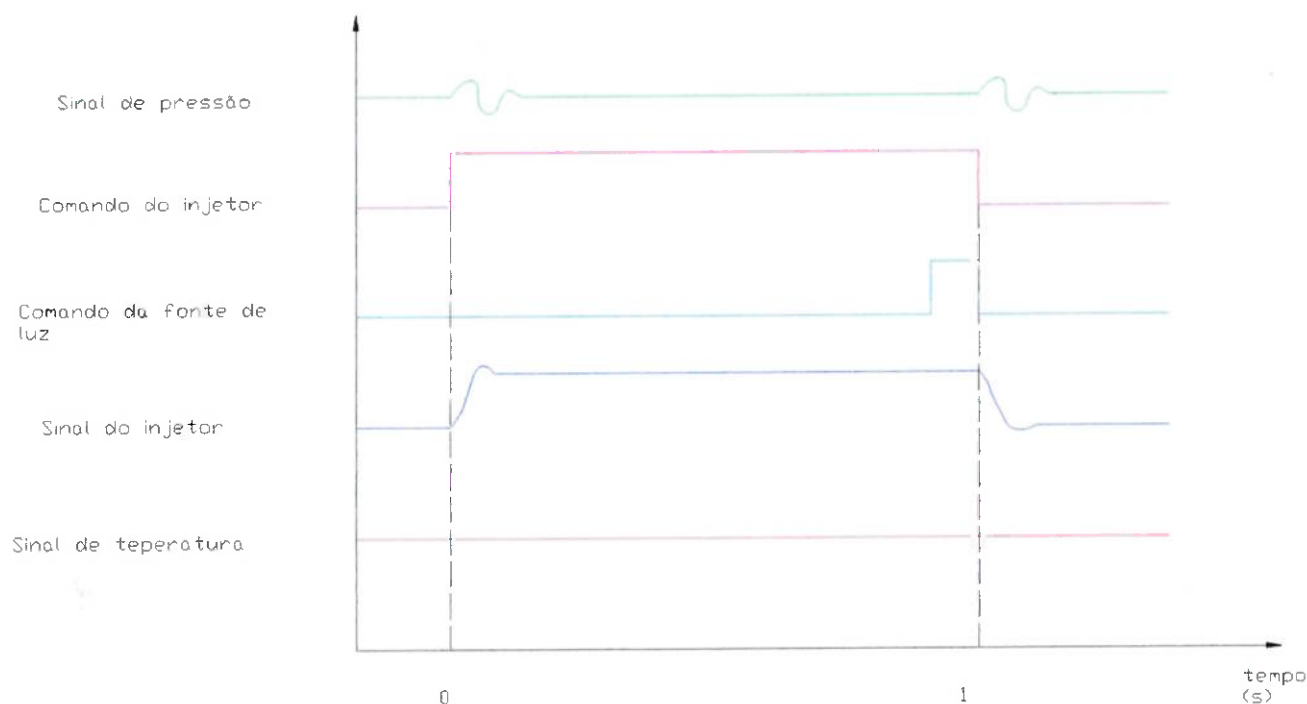


figura 20: Sinais aquisitados e enviados pela placa de aquisição de dados.

7.4- Instalação da fonte de luz e realização dos primeiros ensaios

Ao instalar a fonte de luz (figura 21) percebeu-se que a luz não possuía uma focalização tão boa quanto o laser. Quando se focaliza o feixe de luz na realidade está se projetando a imagem da fonte, como a fonte real não é pontual, então no foco a luz fica dispersada. Para solucionar este problema foi colocado um orifício próximo ao primeiro espelho plano para filtrar a luz, fazendo com que a focalização seja melhor.

Para a calibração da máquina fotográfica Nikon MF-10, foi realizado um ensaio. Concluiu-se a partir das fotos, que é melhor fotografar sem a utilização de lentes e que a intensidade da fonte não influencia muito nas imagens obtidas. A figura 22 mostra uma das fotos tiradas para a calibração.



figura 21: Flash LS-1130 da EG&G.

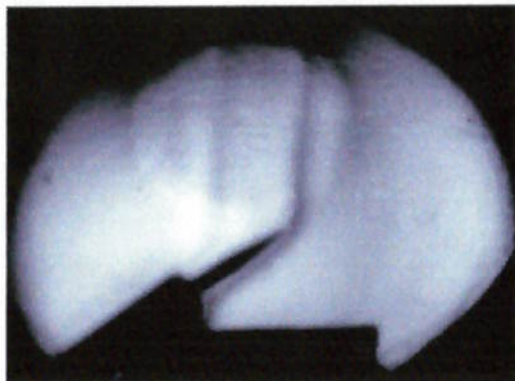


figura 22: Gradiente de densidade em um ferro de solda.

As figuras 23 mostram algumas imagens obtidas pelo equipamento para o escoamento com dodecana. No caso da figura 24 as condições de escoamento são:

- Pressão de injeção: $P=570$ kPa ;
- Temperatura da dodecana: 353K;
- Pressão da câmara: 14Pa;
- Pressão de saturação a 353K: 70Pa;
- Grau de superaquecimento: 5;

Devido ao baixo valor do grau de superaquecimento neste caso não ocorre onda de choque (Kurschat e outros, 1992). A imagem permite visualizar a região ocupada pelo núcleo líquido. Pode-se notar que a uma determinada altura o núcleo se evapora quase que por completo. A figura 25 mostra a janela por onde é possível visualizar os jatos dos ensaios.

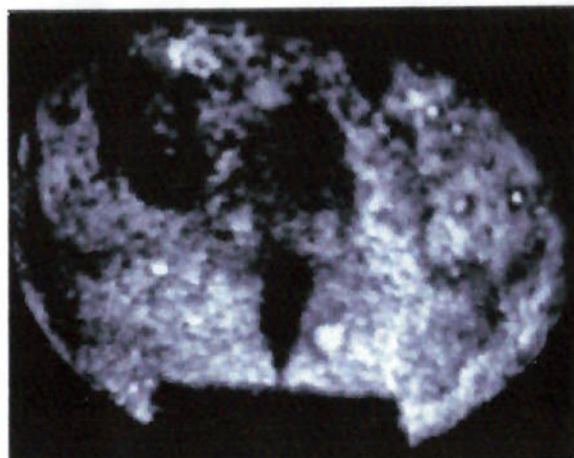


figura 23: Escoamento da dodecana. Pode-se observar o núcleo líquido do escoamento, bem como manchas brancas no vidro devido ao respingo de gotículas .

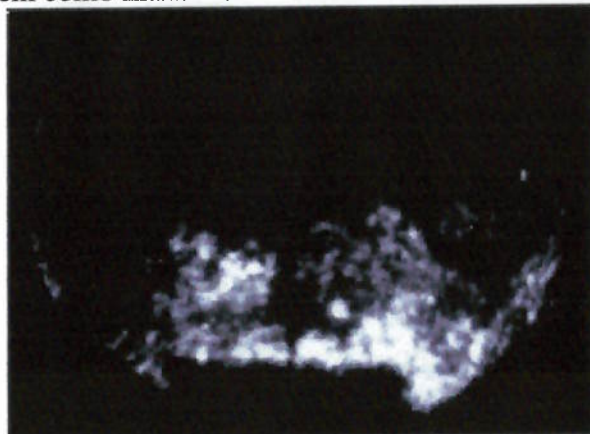


figura 24: Nesta imagem observa-se manchas devido ao embaçamento da janela.

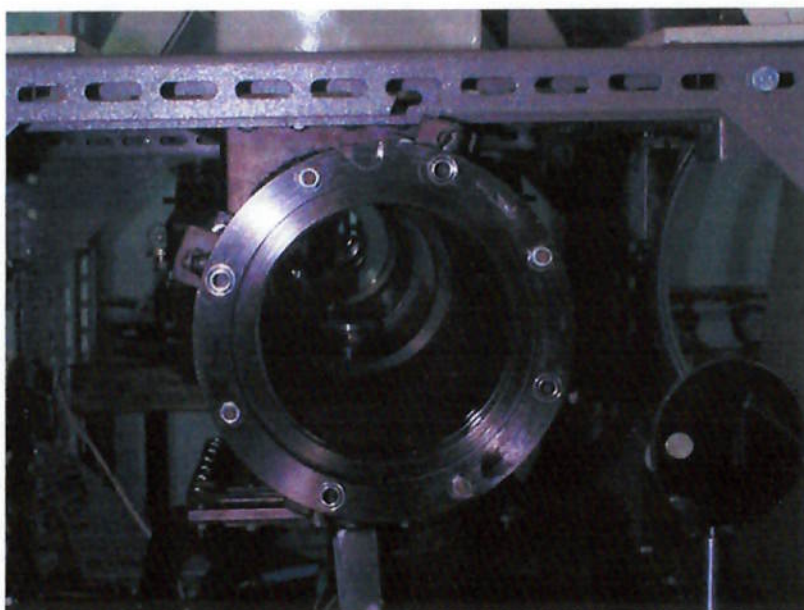


figura 25: Janela da câmera de injeção.

7.5- Instalação da câmera CCD

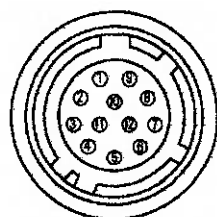
A partir dos estudos sobre processamento digital de imagens, com o objetivo de conhecer as características das câmeras CCD, se familiarizar com a termos empregados nesta área e para verificar a possibilidade de se utilizar algum tipo de processamento na análise das imagens adquiridas, iniciou-se a instalação do sistema de aquisição de imagens.

No sistema instalado, a câmera CCD está conectada ao computador através de uma placa de aquisição de imagens (ver figura 26). A placa de aquisição de imagens recebe o sinal de vídeo da câmera e converte para um sinal digital, que é transmitido diretamente para a memória RAM do computador, através de um acesso direto a memória DMA, por um barramento PCI. Transmitindo em uma taxa acima de 45Mbytes/s, o que permite uma transferência e uma visualização em tempo real das imagens. A placa de aquisição de imagens utilizada é DT3152 da Datatranslation, é uma placa de alta acurácia, programável e monocromática.



figura 26:Esquema do sistema de aquisição de imagem.

A câmera CCD utilizada é uma CV-M50, que é uma câmera monocromática, de alta resolução (752 x 482 pixels), com correção gamma ajustável (linear ou correção de 0,45). Fez-se um cabo que conecta a placa na câmera de vídeo e a câmera na fonte de alimentação, a pinagem dos cabos pode ser vista na figura 27.



HA10A-10P-12S Hirose

Pin no	External sync mode (factory set)	Asynchronous reset mode	Internal sync mode
1	GND	GND	GND
2	DC+12V input	DC+12V input	DC+12V input
3	GND	GND	GND
4	Video output	Video output	Video output
5	GND	GND	GND
6	Ext HD input (75 Ω)	HD in or No input	HD output
7	Ext VD input (75 Ω)	WEM output : need to modify	VD output
8	GND	GND	GND
9	NC		NC
10	GND	GND	GND
11	DC+12V input	DC+12V input	DC+12V input
12	GND	GND	GND

figura 27: Conector da câmera de vídeo. (Retirado do manual da câmera CV-M50)

Para a aquisição da imagem é preciso utilizar um software. Então utilizou-se uma biblioteca (Frame Graber SDK), que foi adquirida junto com a placa, esta biblioteca consiste em um conjunto de funções em C (compatível apenas com Visual C++) que permite realizar o controle da placa de aquisição de imagem. Junto com a biblioteca há alguns programas exemplos. Inicialmente realizou-se modificações em um dos programas exemplos para que este adquirisse uma sequência de 10 imagens. Na figura 28 pode-se observar a tela do software.

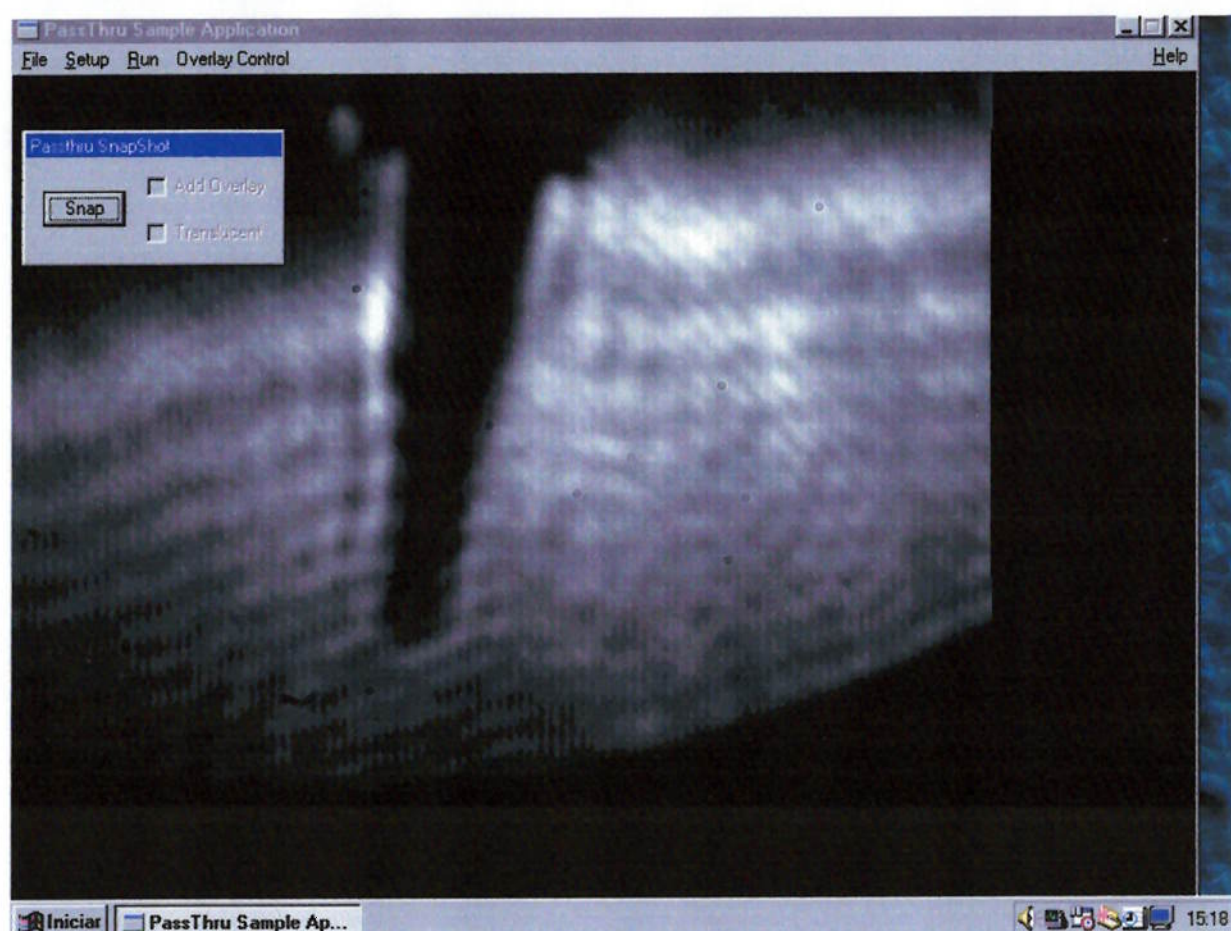


figura 28: Primeiro programa utilizado para realizar a aquisição de imagens.

7.6- Programa para mudança dos mapas de cores e primeiras aquisições

Para realizar o tratamento nas imagens obtidas foi feito um programa para Matlab que permite mudar o mapa de cores, a sua tela é apresentada na figura 29.

A câmera CCD utilizada tem uma limitação de velocidade, para realizar aquisição de um quadro é necessário no mínimo 1/10000 segundos de exposição. Como a duração do flash é menor, ocorre uma falta de sincronização entre a câmera CCD e o flash (figura 21), impossibilitando a utilização deste tipo de fonte de luz. Para solucionar este problema está se utilizando um laser He-Ne da Melles-Griot como fonte de luz, além disso foram instalados um par de polarizadores para se controlar a intensidade da fonte de luz. Na figura 30 pode se ver a montagem do laser e dos polarizadores.

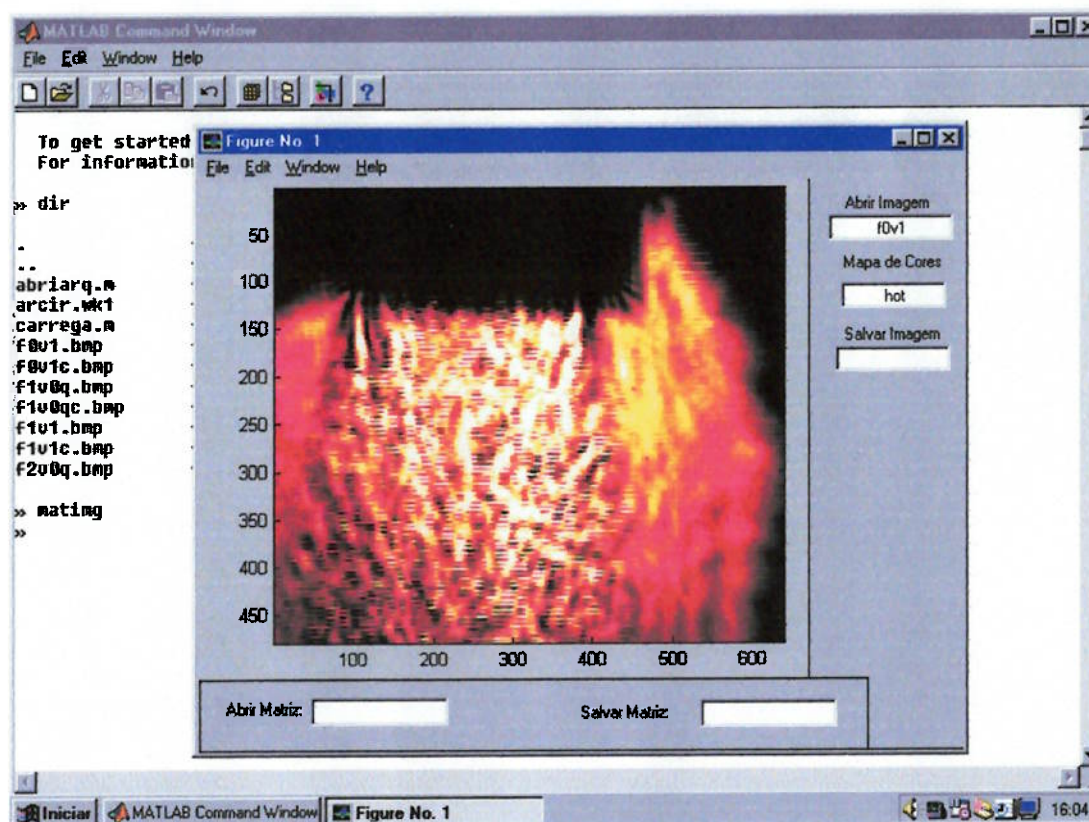


figura 29: Software de tratamento de imagens.

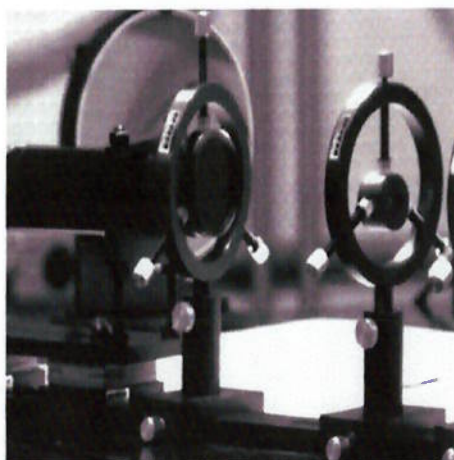


figura 30: Montagem do laser e dos polarizadores.

Foram realizados alguns ensaios com um secador de cabelo, visualizando o seu escoamento quando em funcionamento, as imagens foram obtidas com a câmera CCD (figura 31 e 32).

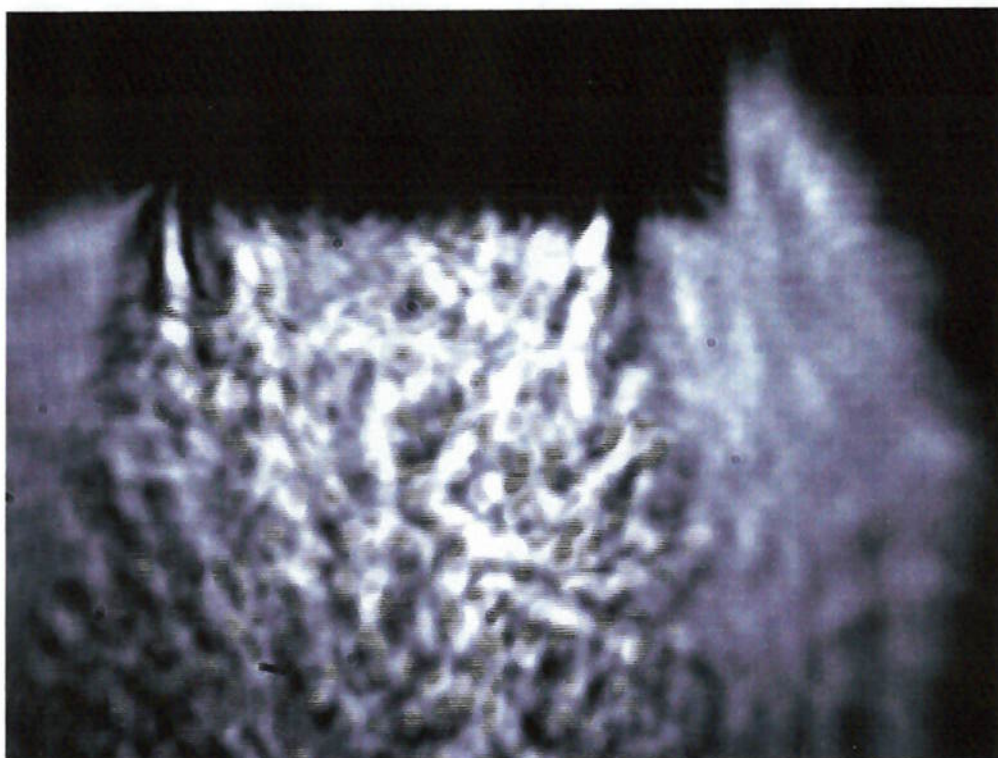


figura 31: Escoamento de um secador de cabelos doméstico.

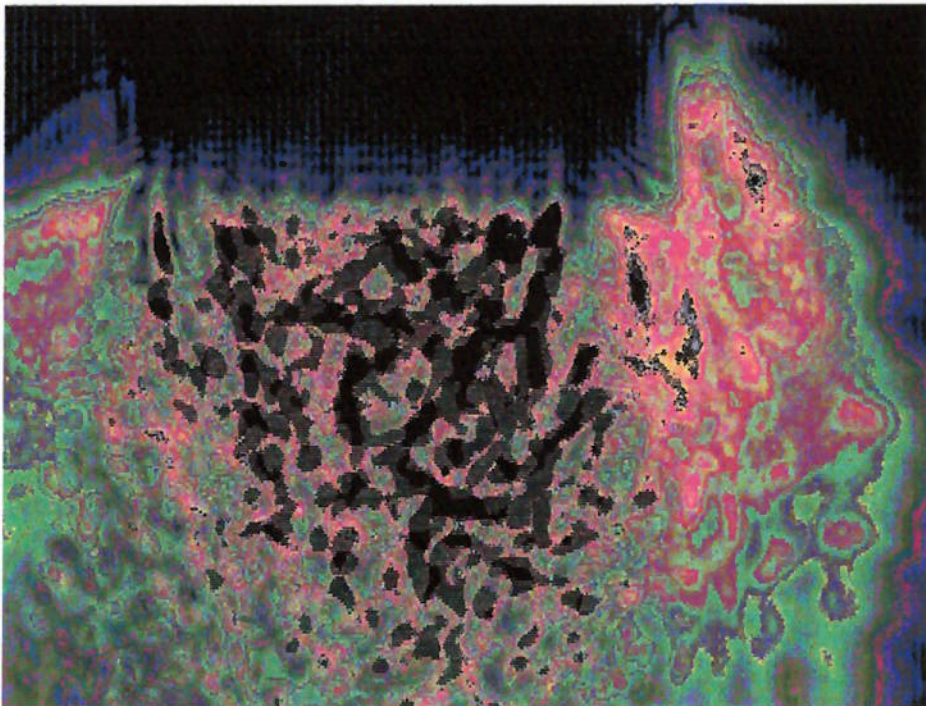


figura 32: Escoamento de um secador de cabelos doméstico. (Visualização utilizando a técnica de pseudocores)

Também foi tirada uma imagem de uma corrente de ar quente, acima da chama de um isqueiro (figura 33).

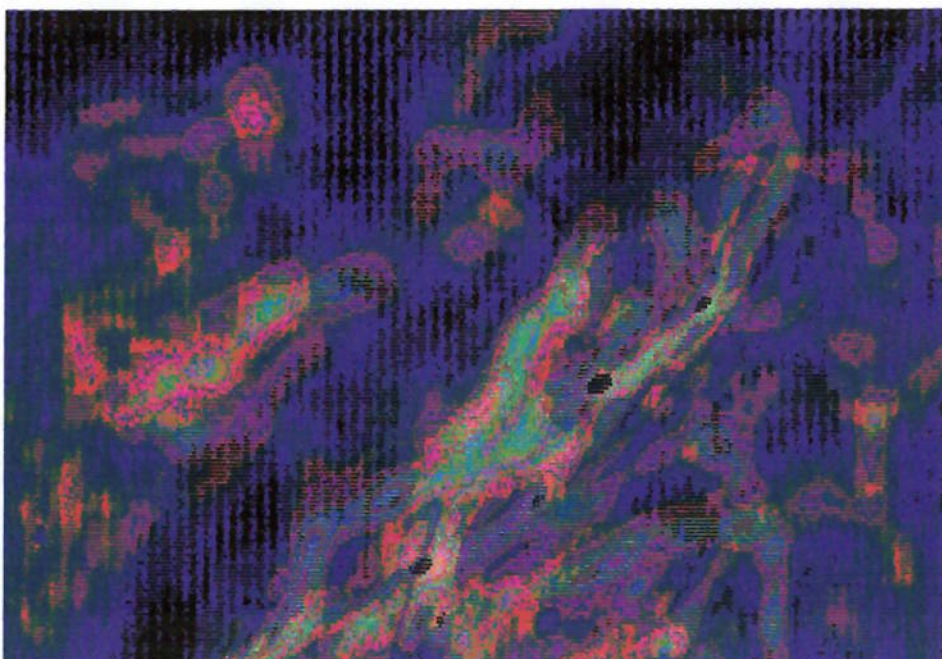


figura 33: Convecção de ar quente causada por uma chama de isqueiro.

7.7- Sincronizar a aquisição de imagem com o sinal de disparo (porta serial)

O ensaio de jatos evaporativos consiste no acionamento de um injetor contendo dodecana (em condições de temperatura e pressão bem definidas) em uma câmara de vácuo, porém este ensaio ocorre em apenas um segundo. Para que seja possível obter a imagem do jato é necessário um sinal de disparo da aquisição de imagem.

Inicialmente, a idéia seria utilizar o recurso de trigger existente na placa de aquisição de dados (CAD12/36), porém devido a erros no manual da placa e a indisposição da assistência técnica, não foi possível inicialmente utilizar este recurso.

Para contornar este problema então decidiu-se utilizar a porta serial para enviar o sinal de trigger. Na figura 34 mostra o esquema para aquisição de imagens proposto.

A aquisição consiste em capturar a imagem padrão e depois enviar um sinal do computador A pela porta serial para a placa de aquisição de dados. A placa de aquisição de dados envia o sinal para o acionamento do injetor, após um determinado tempo é capturado a imagem do fenômeno. O injetor é fechado terminando o ensaio. Na figura 35 uma carta de tempo dos sinais.

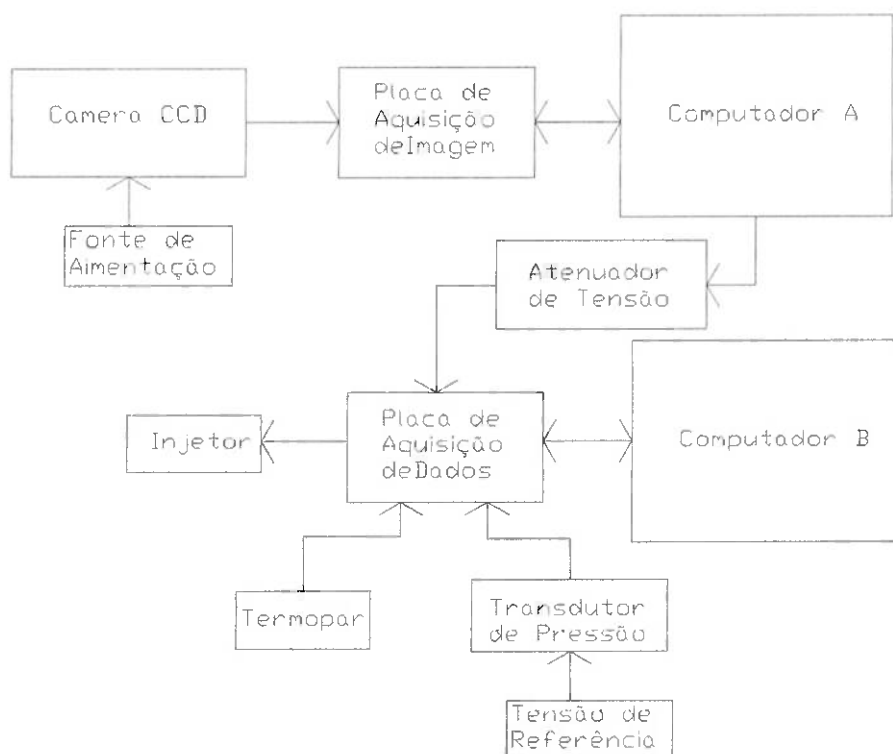


figura 34: Esquema de aquisição de imagem utilizando a porta serial.

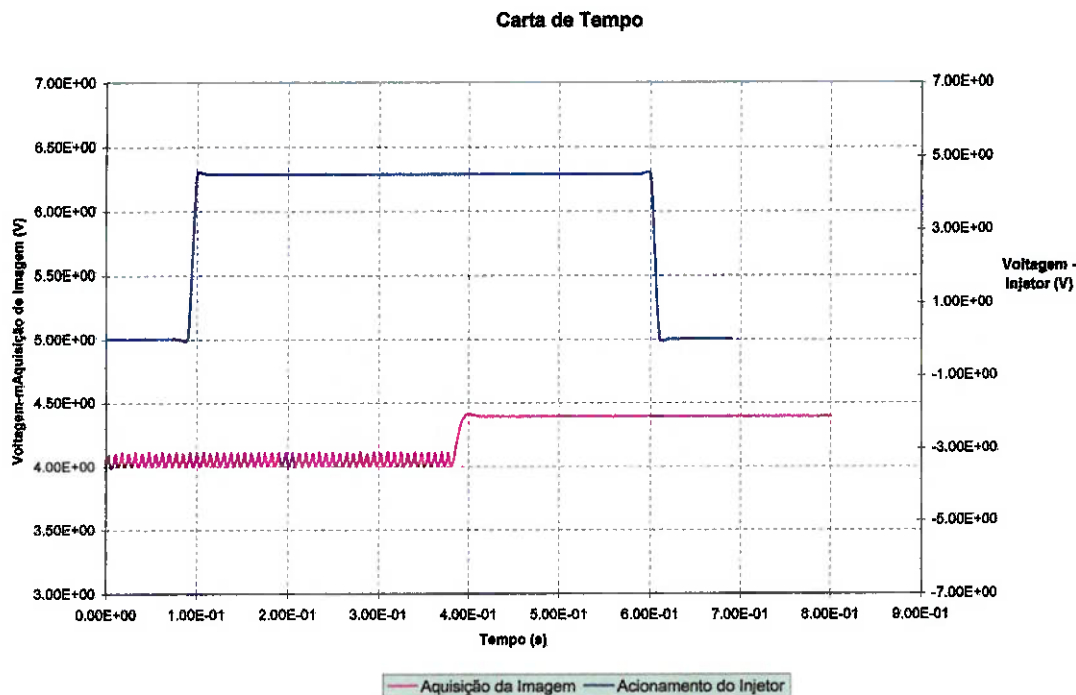


figura 35: Carta de tempo do sinal.

O injetor é acionado quando o nível do sinal está alto. O ensaio é iniciado quando o sinal de aquisição de imagem está no nível 4V, a segunda imagem é adquirida quando o sinal de aquisição de imagem passa a ser 4,5V.

Para disparar a placa de aquisição de dados é necessário um sinal de entrada de no máximo 10V. Como a saída da porta serial gera um sinal entre -12V e 12V, foi preciso construir um circuito eletrônico para atenuar a tensão. O circuito está na figura 36. A placa de aquisição de dados foi programada para ser disparada quando o sinal fosse inferior a 4V.

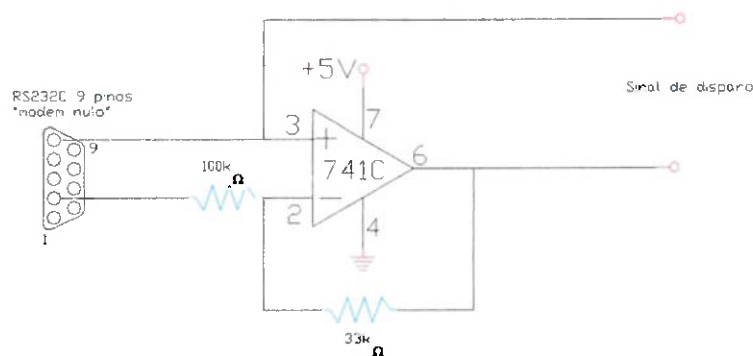


figura 36: Circuito atenuador do sinal.

7.8- Programa para temporizar o trigger (porta serial)

Como pode ser visto, depois de ser enviado o sinal d trigger a placa de aquisição de dados acionará o injetor, e após um determinado intervalo de tempo é capturado a imagem do escoamento. Para configurar este tempo para captura de imagem existe um arquivo que guarda tais informações que é lido pelo programa de aquisição de imagens.

Com o objetivo de facilitar ao usuário a configuração deste tempo para aquisição da imagem fez-se um programa, com uma interface gráfica, como pode ser visto na figura 37.

7.9- Programa de Filtragem

Para eliminar os anéis de Newton e eventuais heterogeneidades intrínsecas ao sistema óptico fez-se um programa para MATLAB, que realiza a filtragem matemática da imagem. Como o dispositivo utilizado é linear, o filtro realiza uma operação de divisão entre a imagem a ser filtrada e a imagem padrão. Na figura 38 se observa o aspecto do programa.

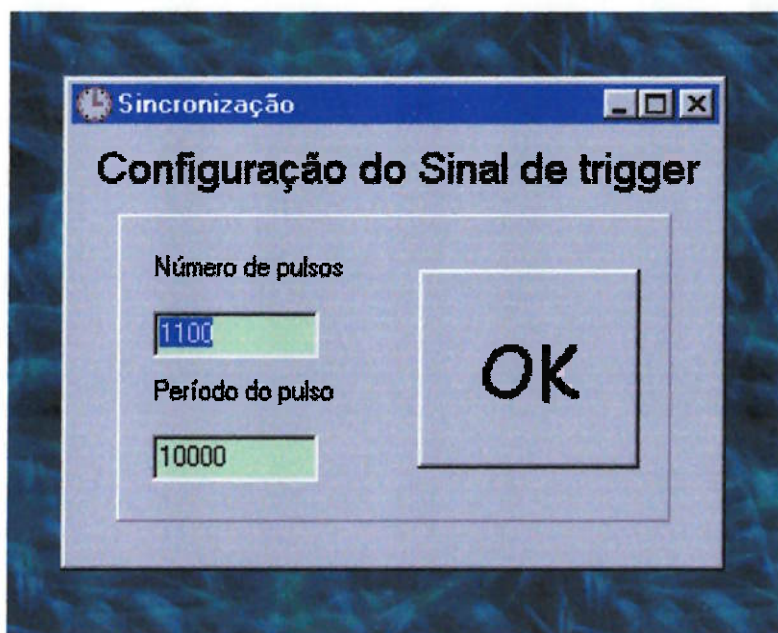


figura 37: Programa que configura o tempo de aquisição.

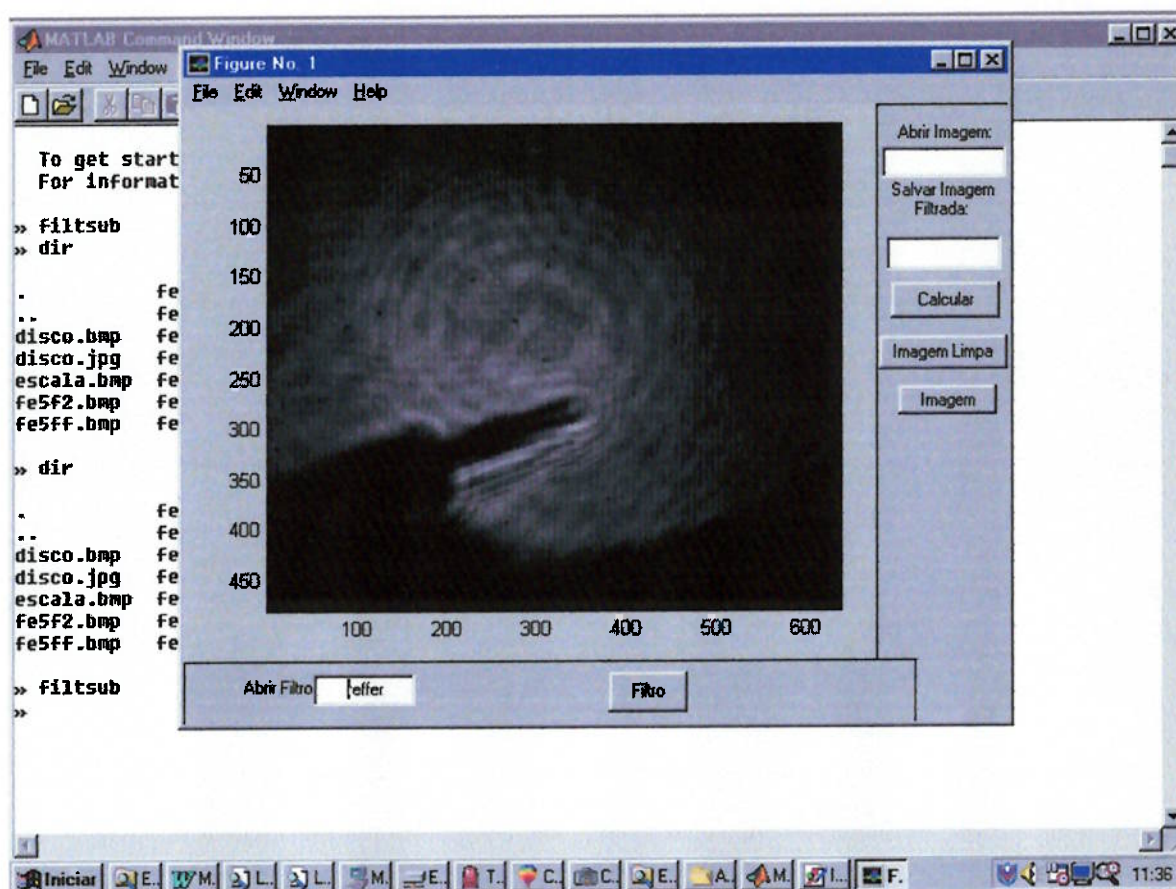


figura 38: Programa para a filtragem da imagem.

7.10- Configuração do trigger da placa de aquisição de imagens

Após conseguir, informações com a assistência técnica, de como configurar o trigger. Desta maneira a aquisição consiste em receber um sinal da placa de aquisição de dados, nos instantes previstos. O esquema do sistema está na figura 39 e a carta de tempo estão na figura 40. Neste programa de computador são capturadas 5 imagens, uma antes da injeção (imagem padrão), três durante a injeção e uma no final da injeção. Com estas imagens é possível verificar o fenômeno e se o líquido injetado está embaçando as janelas.

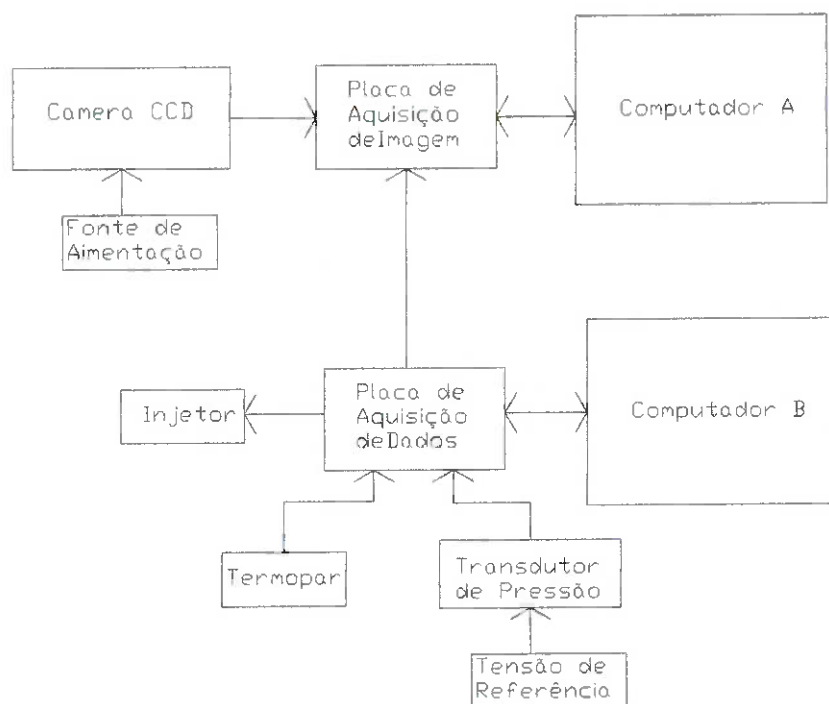


figura 39: Esquema de aquisição de imagem.

Carta de Tempo

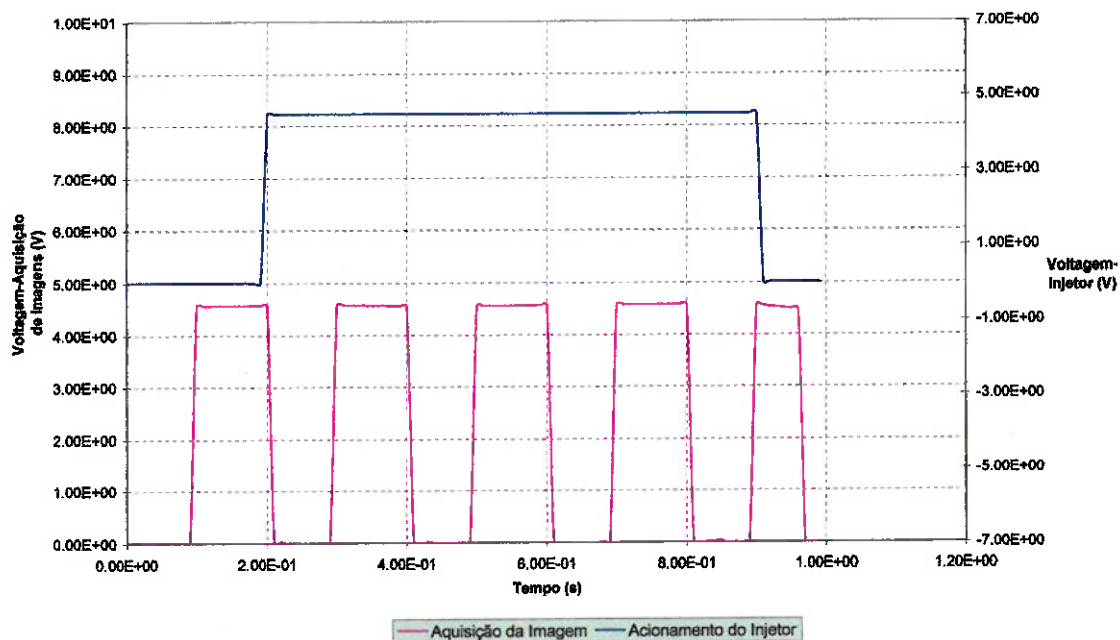


figura 40: Carta de tempo. O injetor é acionado enquanto o sinal estiver em nível alto. A câmera faz a aquisição das imagens nas bordas de subida.

7.11- Realização de mais aquisições

Nas figuras 41, 42, 43, 44, 45 e 46 estão algumas imagens obtidas com o sistema óptico. As pressões indicadas nestas figuras são todas absolutas.

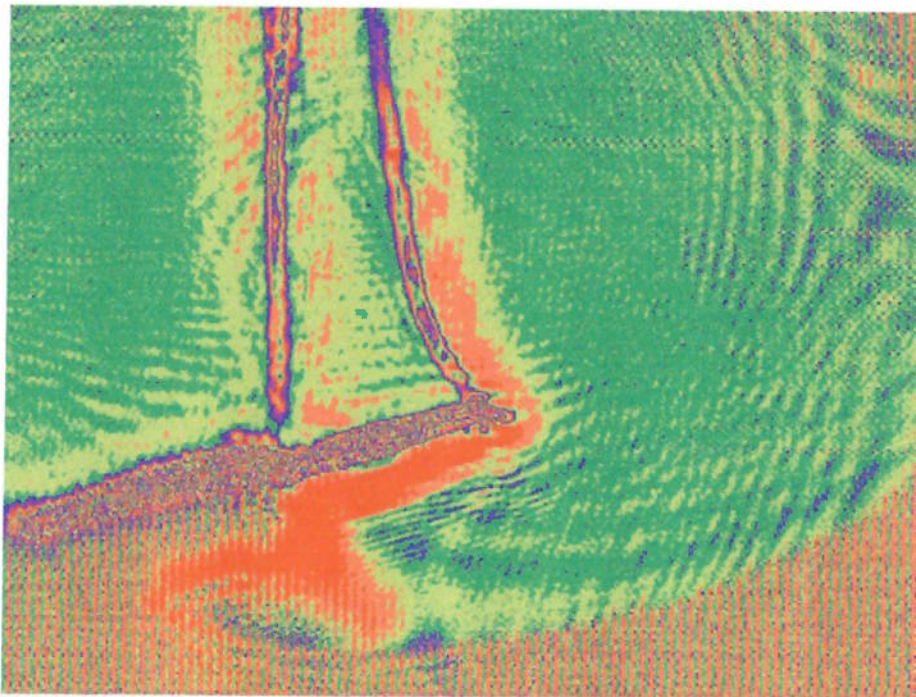


figura 41: Convecção natural devido ao aquecimento de um ferro de solda.

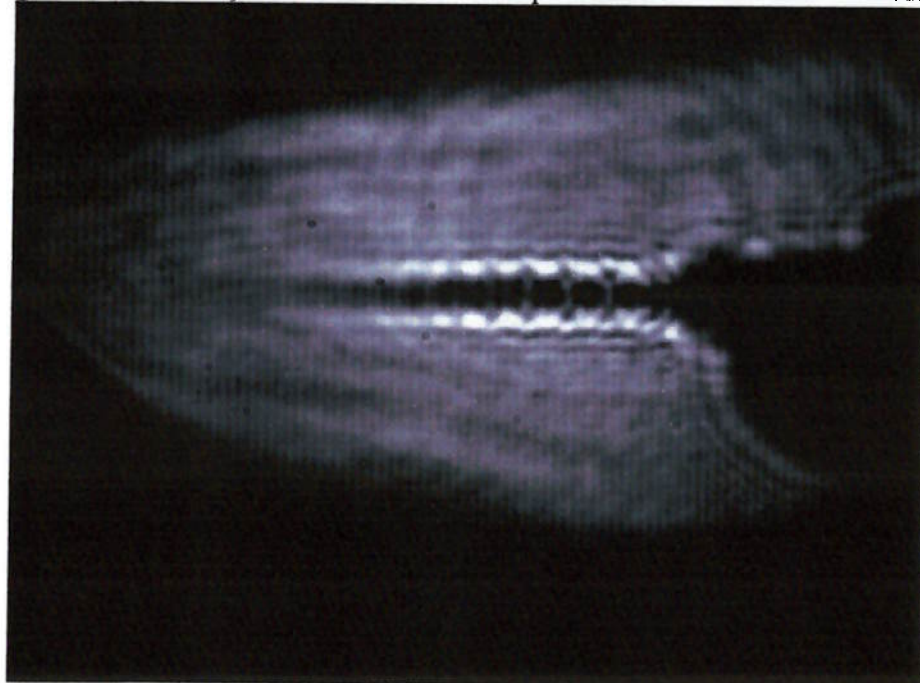


figura 42: Escoamento de ar comprimido ($P=7$ bar) na saída de uma mangueira.

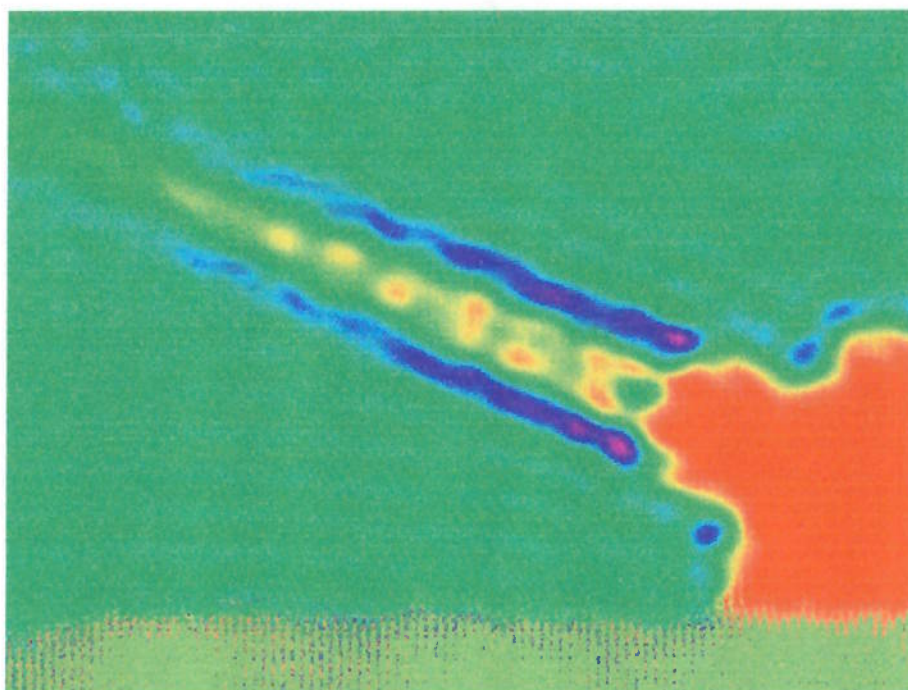


figura 43: Escoamento de ar comprimido ($P=7$ bar) na saída de uma mangueira.

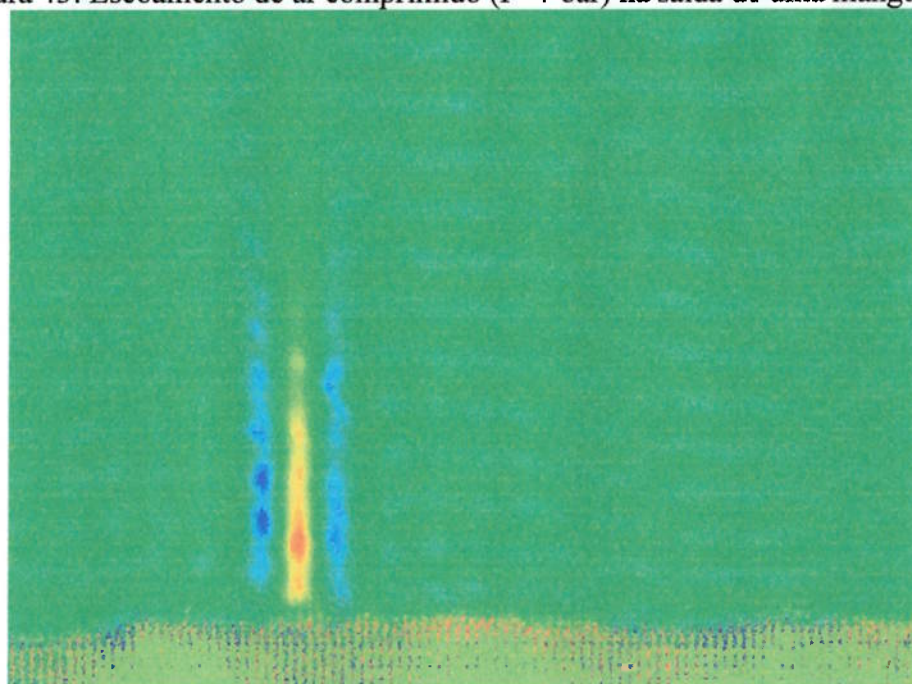


figura 44: Jato de ar no injetor (Pressão de Injeção = 7 bar).

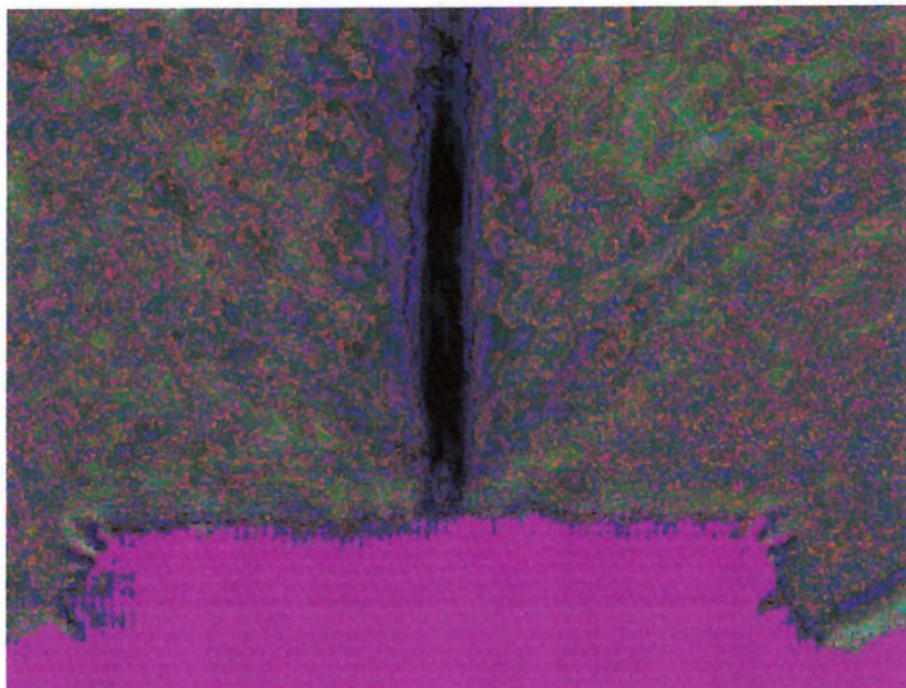


figura 45: Injeção de dodecana: Pressão na câmara=10mbar . Pressão de injeção=7bar.
Temperatura de injeção=150°C.

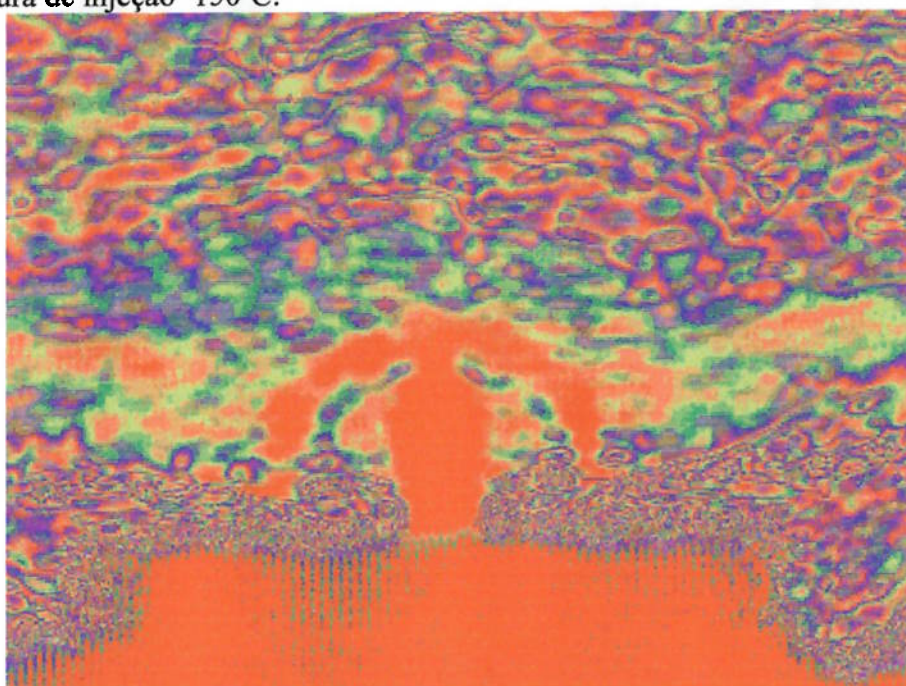


figura 46: Injeção de dodecana: Pressão na câmara=10mbar . Pressão de injeção=3bar.
Temperatura de injeção=200°C.

7.12- Reestruturação do programa de processamento de imagem

Com o objetivo de tornar mais prático o processamento de imagem, desenvolveu-se no MATLAB a partir do programa de mudança de mapas de cores e filtragem, um outro que integrasse as duas funções. As funções que fazem parte do programa e indicadas em sua arquitetura são (figura 47):

imgfmc	Descrição: Esta é a função principal a partir da qual se inicia o programa.
confini	Saída: a – identificador da figura onde será aberta a janela. Descrição: Realiza as configurações iniciais da figura onde será iniciado o programa.
confarq	Entrada: a – identificador da figura onde será aberta a janela. Descrição: Esta função faz a manipulação dos arquivos, permitindo carregar e salvar a imagem processada, bem como carregar a imagem filtro.
confbot	Entrada: a – identificador da figura onde será aberta a janela. Descrição: Esta função faz a filtragem e exibe a imagem filtrada, a imagem original e a imagem filtro.
confselr	Entrada: a – identificador da figura onde será aberta a janela. Descrição: Realiza seleção da região da imagem a ser processada.
menucor	Descrição: Esta função executa a mudança do mapa de cor da imagem sendo possível utilizar os seguintes mapas de cores: Gray, Hsv, Hot, Pink, Cool, Bone, Jet, Copper, Flag, Prism, Arcir. Além de permitir a geração de um mapa de cores aleatório, alterar a luminosidade e permutar as cores nos mapas.
carrega	Descrição: Carrega as imagens.
salva2	Descrição: Salva a imagem filtrada.
salva3	Descrição: Salva a imagem sem filtrar.
implot	Entrada: nome – identificador da imagem a ser desenhada. Descrição: Esta função desenha as imagens na região disponível para o gráfico.

- CalcFlt** Entrada: **nomeMat** – identificador da imagem a ser filtrada.
 NomeMat – identificador da imagem filtro.
 Descrição: Realiza a filtragem matemática da imagem através da divisão dos pixels da imagem a ser processada pelos pixels da imagem filtro (pixel a pixel), sendo feito em seguida um reescalonamento.
- ajustimg** Descrição: Seleciona uma determinada região das imagens na qual será realizado o processamento.
- atuamap** Descrição: Captura a matriz do mapa de cores da imagem que está sendo visualizada de modo a permitir salvá-lo com a imagem.
- loadbmp** Entrada: **bmpfile** – vetor de caracteres com o nome do arquivo a ser aberto.
 Saída: **X** – matriz com a descrição da imagem.
 Map – matriz com mapa de cores.
 Descrição: Converte um arquivo do formato BMP em uma matriz no MATLAB (Sucher, 1993).
- savebmp** Entrada: **bmpfile** – vetor de caracteres com o nome do arquivo a ser aberto.
 X – matriz com a descrição da imagem.
 Map – matriz com mapa de cores.
 Descrição: Converte uma matriz do MATLAB em um arquivo do formato BMP (Sucher, 1993).

Com este novo programa a mudança de mapas de cores é feita através de um menu, tornando esta operação mais cômoda para o usuário. É possível selecionar a região que será feita a filtragem, melhorando a qualidade da filtragem (pois pontos de ruídos com valores próximo aos extremos da escalas de cores, podem acabar influenciando no reescalonamento da imagem, diminuindo o contraste). Em anexo está o código fonte deste programa, na figura 48 é possível visualizar o aspecto de sua interface gráfica.

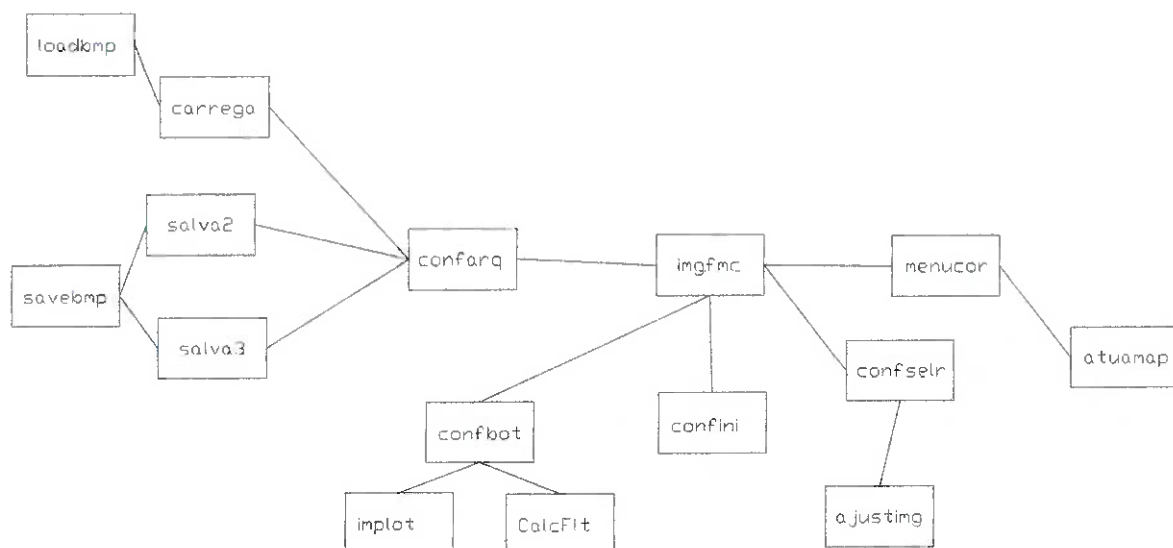


figura 47: Arquitetura do programa final para processamento de imagem.

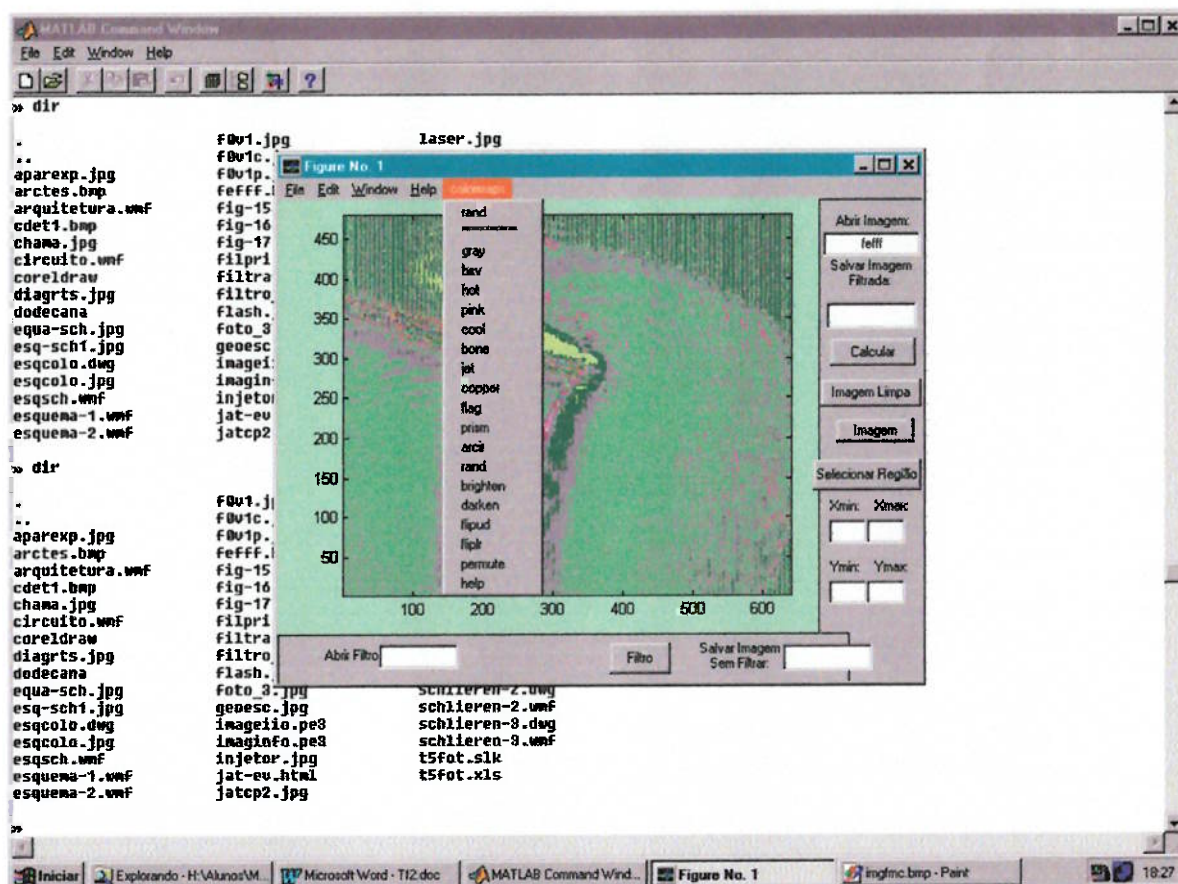


figura 48: Programa atual de processamento de imagem, pode-se observar o menu utilizado para realizar a mudança de mapas de cores.

7.13- Utilização de luz branca

Devido aos ruídos provocados pela difração do laser (figura-10), decidiu-se realizar alguns testes com a luz branca. Para isto foi utilizando uma lâmpada halógena.

Para que a luz branca produzisse imagens límpidas e definidas, foi necessário focaliza-la em um filtro espacial (com um diâmetro de 0.3mm), antes de incidi-la no primeiro espelho parabólico. Este filtro possibilitou aquisição de imagens de boa qualidade apesar da perda de sensibilidade do sistema.

8- Dificuldades surgidas

A principal dificuldade é a falta de fornecedores no mercado nacional de equipamentos opto-mecânicos. Isto faz com que grande parte dos produtos comprados sejam feitos por encomenda e que tenham prazos de entrega relativamente grandes.

Houve dificuldades com a assistência técnica da câmera, que demorou para responder. Somente após vários meses que informou erros no manual da biblioteca de funções, permitindo desta maneira a programação do disparo da câmera pela placa de aquisição de dados.

9- Últimos ensaios realizados

Utilizando o aparato experimental foi realizado ensaios de jatos de querosene, diesel e ar. As figuras 49 a 54 ilustram algumas imagens destes ensaios.

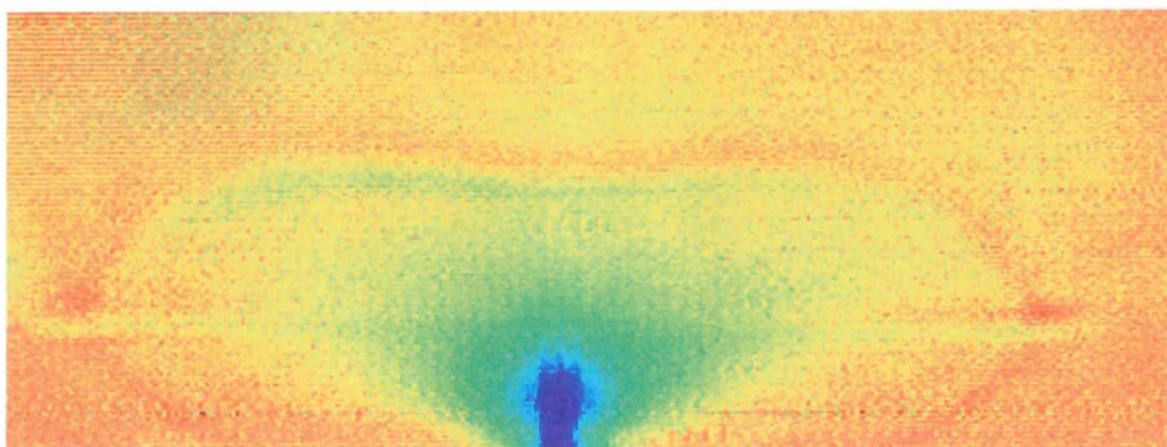


figura 49: Evaporação completa do diesel (temperatura de injeção: 250°C; pressão de injeção: 500kPa; pressão na câmara=300Pa).

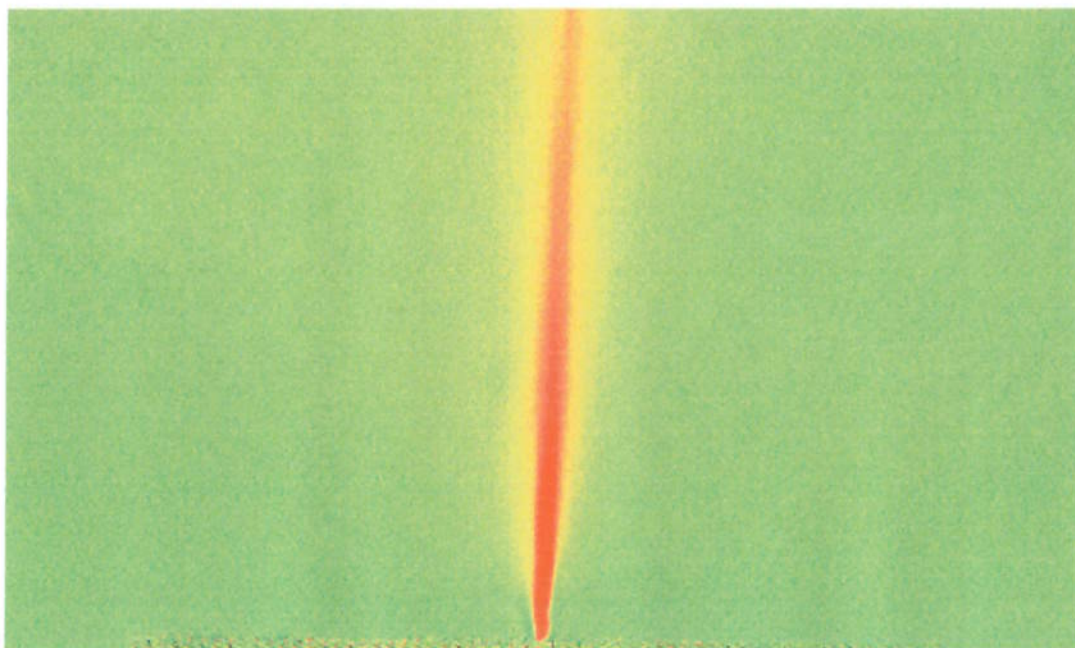


figura 50: Jato pulverizante de querosene (temperatura de injeção: 96°C; pressão de injeção: 350kPa; pressão na câmara=2100Pa).

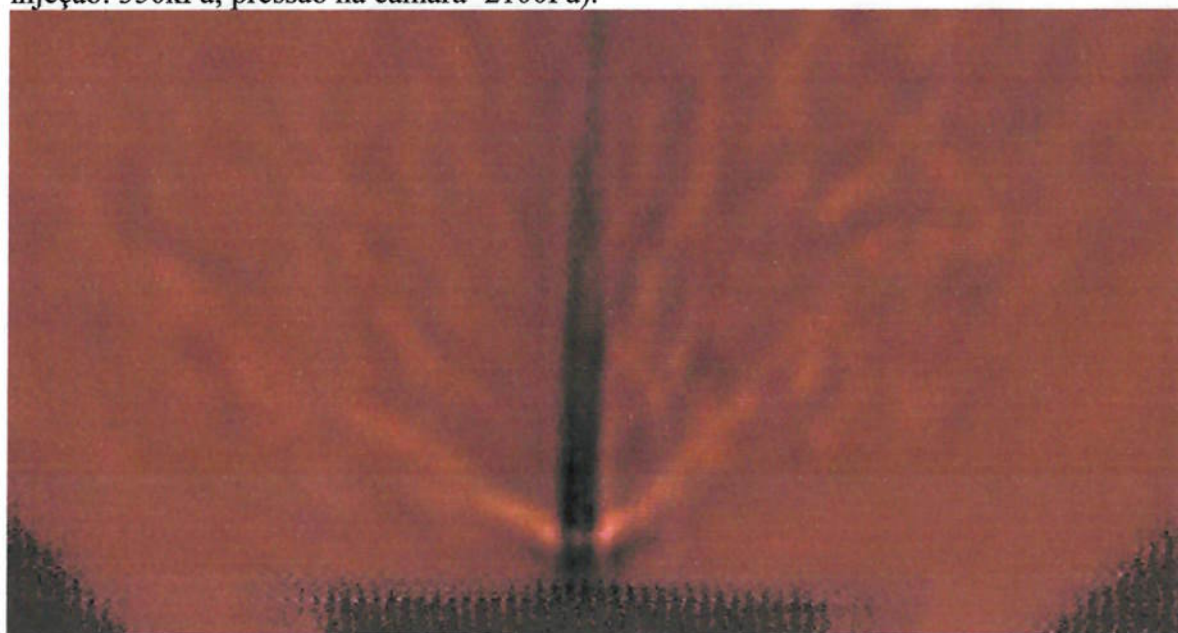


figura 51: Jato pulverizante de querosene (temperatura de injeção=95°C; pressão de injeção=615kPa; pressão na câmara=12mbar).



figura 52: Evaporação completa do querosene (temperatura de injeção=220°C; pressão de injeção=650kPa; pressão na câmara=0,1mbar).

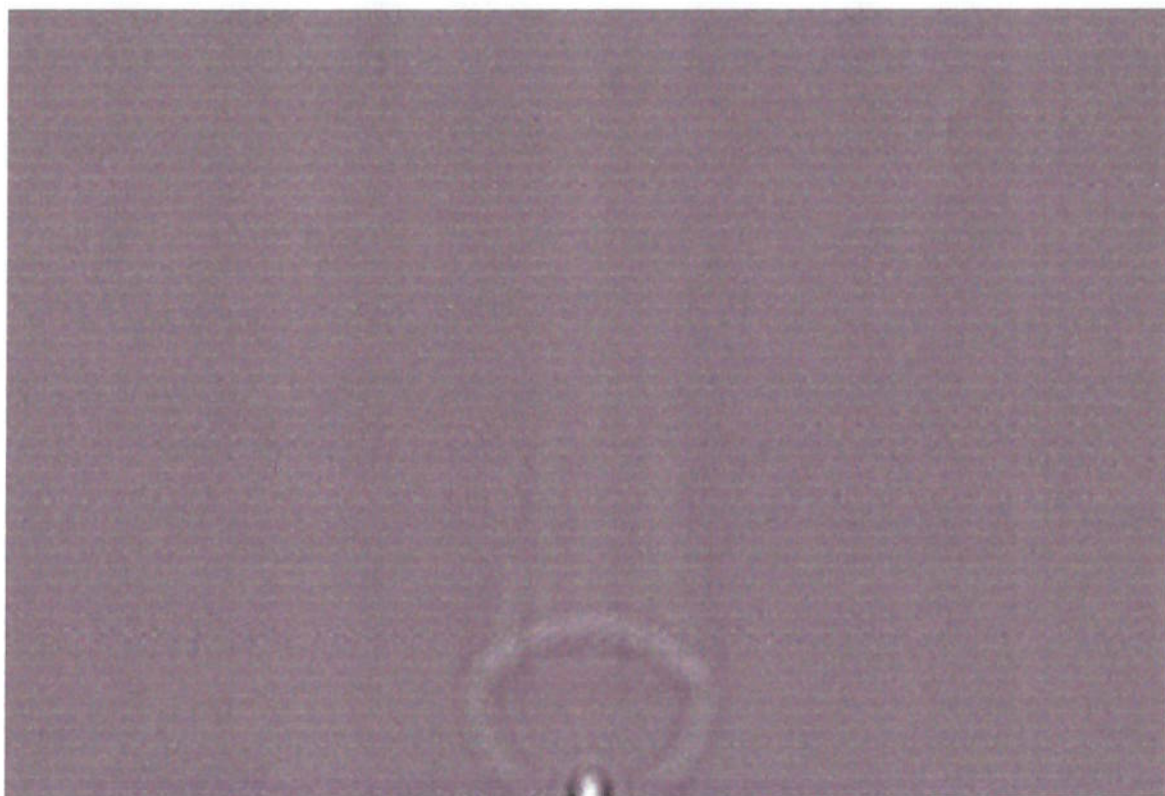


figura 53: Evaporação completa querosene (temperatura de injeção: 270 °C; pressão de injeção: 700kPa; pressão da câmara=120Pa).

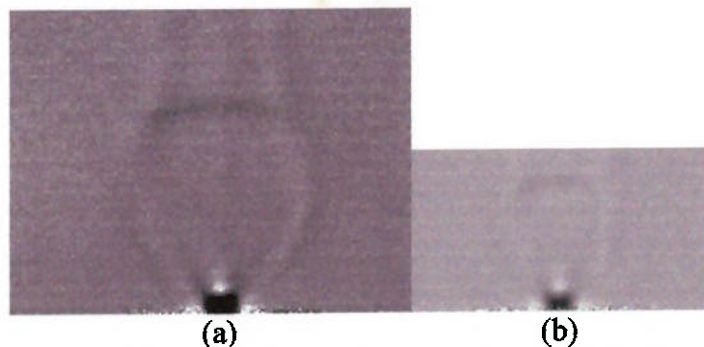


figura 54: Jato de ar no injetor (na figura a) temperatura de injeção: 23.6°C; pressão de injeção: 642.7kPa; pressão da câmara=533.2mbar, na figura b) temperatura de injeção: 23.6°C; pressão de injeção: 622.2kPa; pressão da câmara=1200Pa).

10- Conclusões

O sistema óptico foi montado, com capacidade de ser utilizado no estudo de escoamentos, compressíveis como pode ser observado nas imagens adquiridas. O equipamento permite a utilização de várias configurações:

1. Schlieren utilizando laser, câmera CCD, trigger pela placa de aquisição de imagem, com filtro espacial: Esta configuração se caracteriza por apresentar uma boa versatilidade para aquisição dos dados, pois o usuário pode adquirir 5 imagens, a partir da programação do trigger nos instantes convenientes durante o ensaio. Pode processar facilmente as imagens, pois elas já são adquiridas eletronicamente. A desvantagem é baixa resolução da câmera CCD 640x480 pixels e o número limitados de cores (256 cores). O Anexo B apresenta um esquema desta configuração.
2. Schlieren utilizando flash, câmera fotográfica, trigger pela placa de aquisição de dados, com filtro espacial: Esta configuração, apresenta uma versatilidade muito baixa, pois é necessário revelar o filme para se observar a imagem, é de difícil processamento da imagem, pois a foto precisa ser convertida em imagem eletrônica. Tem como vantagem a produção de imagens com alta resolução. O Anexo C apresenta um esquema desta configuração.
3. Schlieren utilizando lâmpada halôgena, câmera CCD, trigger pela placa de aquisição de dados, com filtro espacial: Esta configuração, apresenta uma

versatilidade muito boa, tendo características muito semelhantes com a primeira configuração, mas não apresenta ruídos devido aos anéis de Newton.

A fonte de luz utilizada produz uma grande influência na qualidade da imagem, como pode ser observado pelas fotos adquiridas. Deve-se utilizar um filtro próximo a fonte de luz para que o feixe paralelo produzido pelo primeiro espelho parabólico, seja homogêneo e consiga manter um bom paralelismo.

A utilização do processamento de imagem amplia a capacidade de obtenção de informações do sistema óptico. Pois realizando a filtragem do sinal é possível evidenciar detalhes nas imagens, que não seriam vistos na imagem adquirida ou exigiriam um alinhamento e um ajuste do sistema óptico mais rigoroso para ser observado.

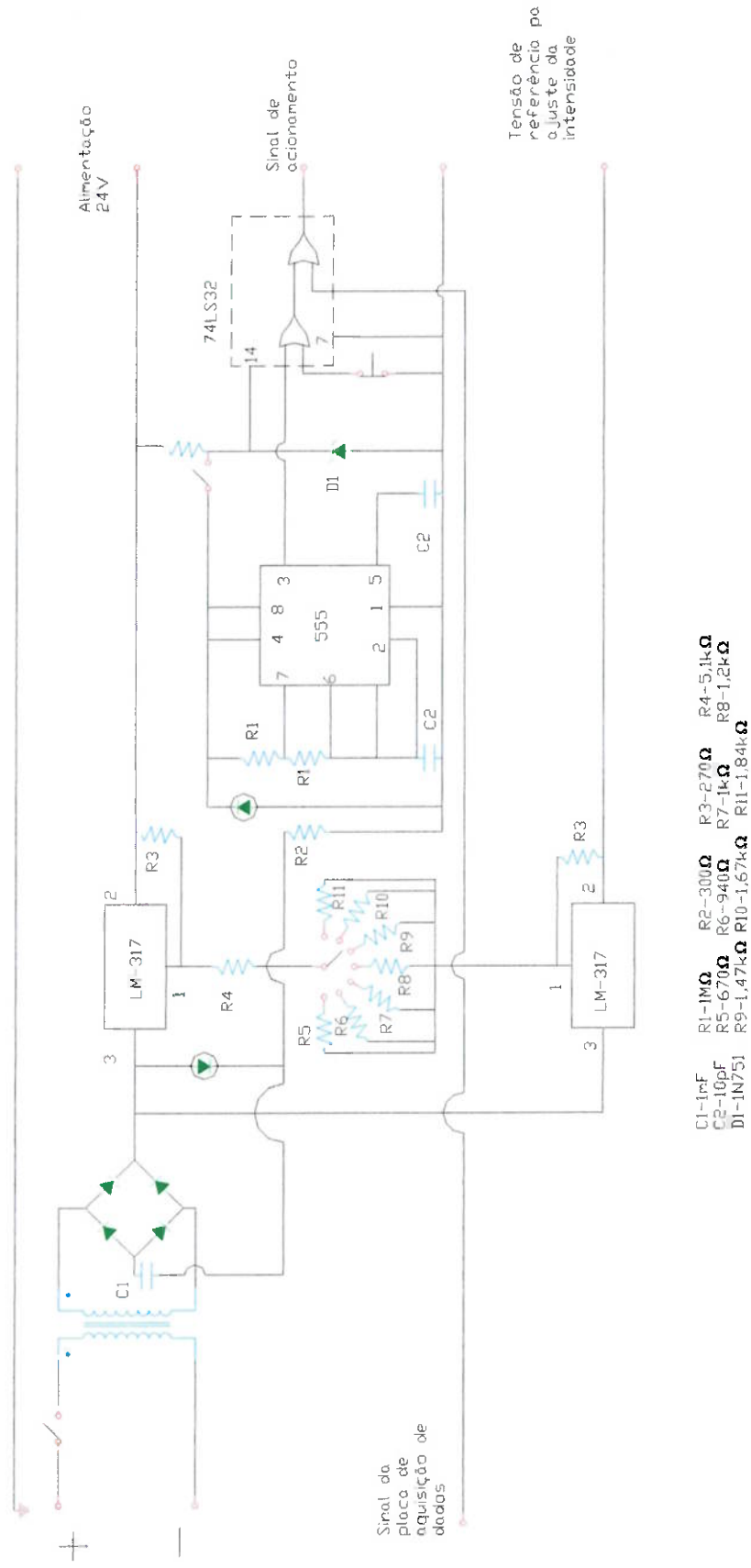
A aquisição de imagens com a câmera CCD permite uma maior velocidade na aquisição de dados. Isto permitiu uma interação mais rápida para calibrar o arranjo e a aquisição de um número maior de imagens por ensaio, aumentando a quantidade de informações a serem analisadas.

Apesar de ser possível montar o sistema schlieren colorido (anexo D), este não foi montado, pois com os dados obtidos foi possível concluir o trabalho de mestrado “Arranjo Experimental para o Estudo de Jatos de Líquidos Superaquecidos” (Vieira, 1999) para qual este instrumento foi construído.

Por fim, o instrumento atingiu o objetivo de permitir a visualização de ondas de choques de jatos evaporativos.

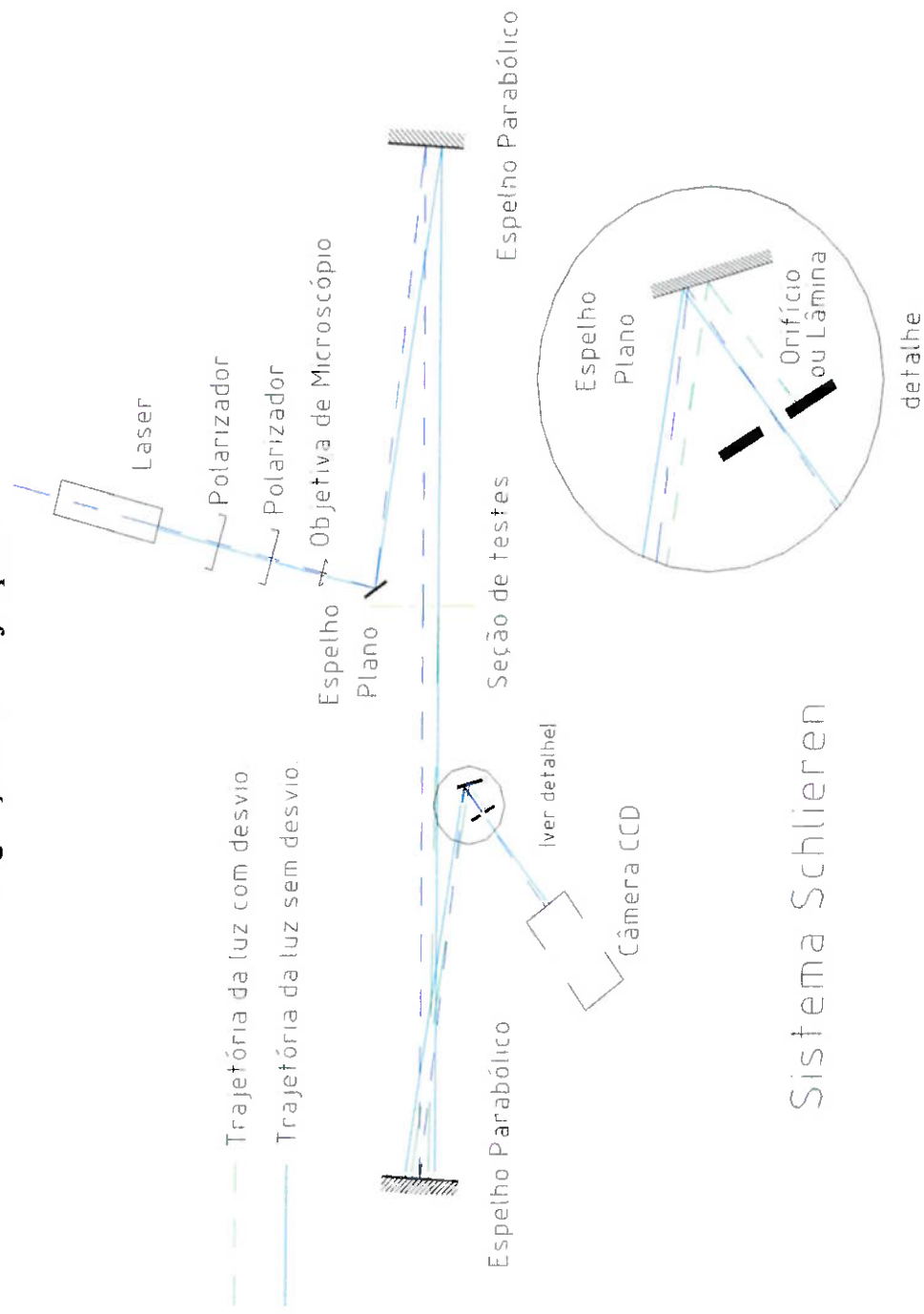
Anexo A

Circuito do comando da fonte de luz



Anexo B

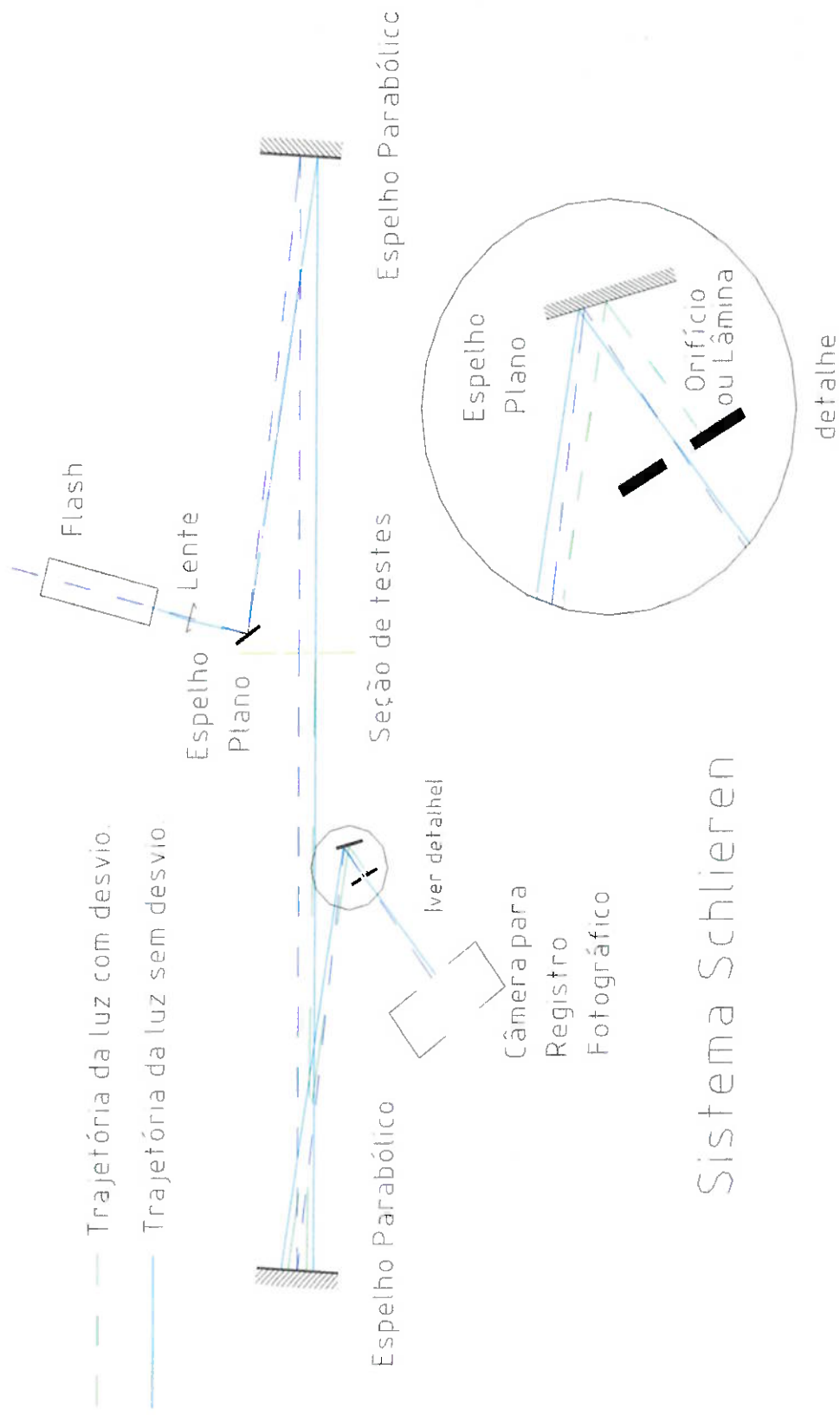
Configuração 1 do arranjo óptico



Sistema Schlieren

Anexo C

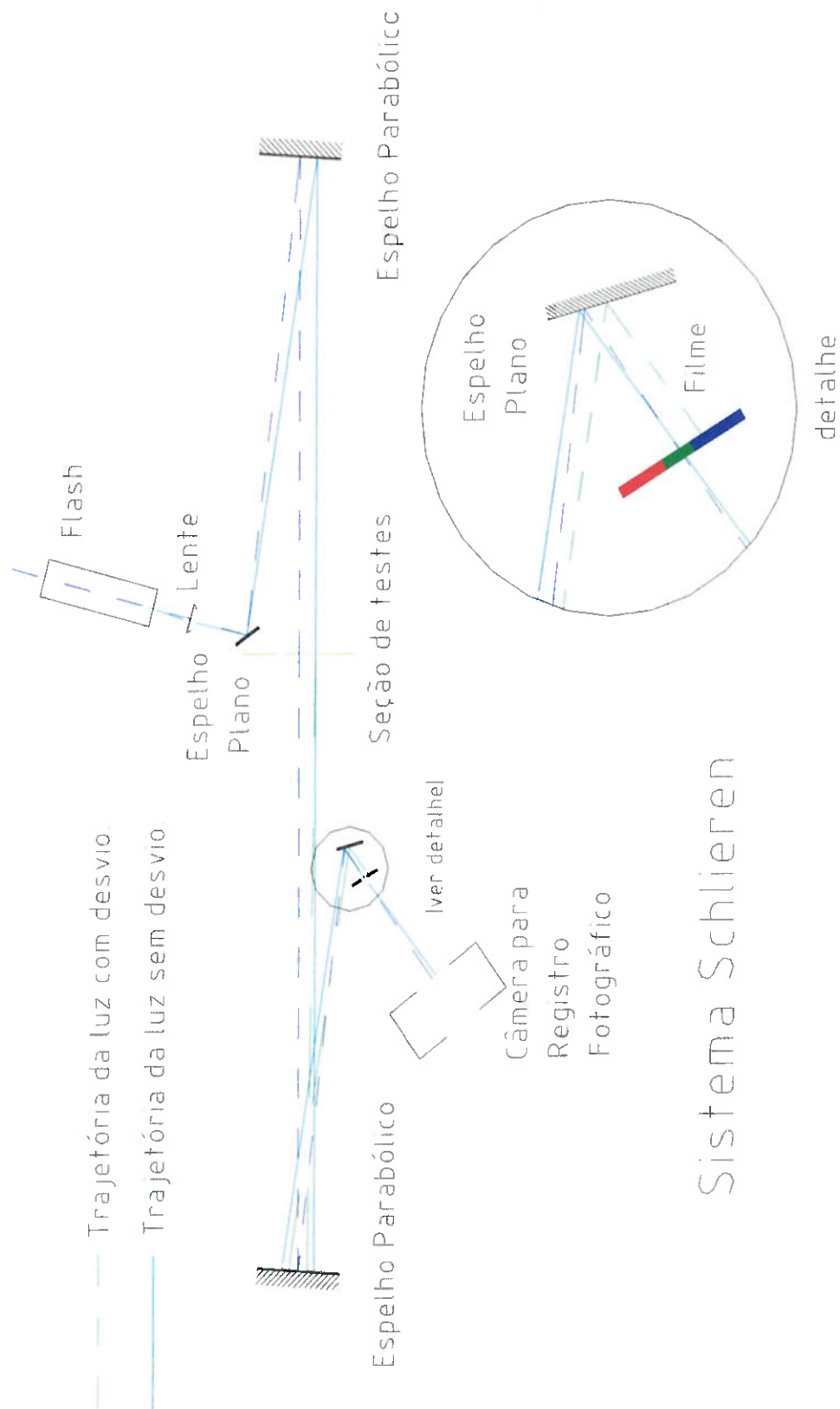
Configuração 2 do arranjo óptico



Sistema Schlieren

Anexo D

Configuração 3 do arranjo óptico



Sistema Schlieren

Anexo E

IMGFMC **Programa de Processamento de Imagem** **(Código Fonte para MATLAB)**

```

function imgfmc();
% imgfmc() Programa para processamento de imagens com recursos
% de filtragem matemática (divisão de uma imagem pela outra)
% e mudança de mapas de cores.
%
% funções utilizadas por este programa:
%     confini() - configurações iniciais
%     confarq() - configurações dos recursos de manipulação de
arquivo
%     confbot() - configurações dos recursos de visualização de
imagem e filtragem
%     confselr() - configurações dos recursos de edição de imagem
%     menucor - configurações dos recursos de mapa de cores
%     Feito em 1999 por
%
%     Marcelo Silva Guimarães
%     Laboratório de Sistemas Energéticos Alternativos
%     Dept. de Engenharia Mecânica
%     Escola Politécnica de da Universidade de São Paulo
%     Av. Prof. Mello Moraes, 2231
%     CEP 05508-900
%     São Paulo, SP
%     BRASIL
%
%     E-mail: marcsg@usp.br

```

```

a=confini;

confarq(a);

confbot(a);

confselr(a);

menucor;

```

```

function a=confini();
% a=confini() função para a configuração de parâmetros iniciais do
programa imgfmc
%
%      Parâmetro de saída:
%      a - figura onde se construirá a janela
%
%      Feito em 1999 por
%
%      Marcelo Silva Guimarães
%      Laboratório de Sistemas Energéticos Alternativos
%      Dept. de Engenharia Mecânica
%      Escola Politécnica de da Universidade de São Paulo
%      Av. Prof. Mello Moraes, 2231
%      CEP 05508-900
%      São Paulo, SP
%      BRASIL
%
%      E-mail: marcsg@usp.br

a=figure;
mat2=[ 0 0 0;0 0 1;0 .5 0;0 1 .5; .5 0 0;.5 0 .2; .3 .2 0; .1 .5 .3];
%Região onde será plotada as imagens
b = axes('Parent',a, ...
    'Units','points', ...
    'CameraUpVector',[0 1 0], ...
    'Color',[1 1 1], ...
    'ColorOrder',mat2, ...
    'Position',[42 56.25 294 249.75], ...
    'Tag','Axes1', ...
    'XColor',[0 0 0], ...
    'YColor',[0 0 0], ...
    'ZColor',[0 0 0]);
%textos da janela
c = text('Parent',b, ...
    'Color',[0 0 0], ...
    'HandleVisibility','callback', ...
    'HorizontalAlignment','center', ...
    'Position',[0.498721 -0.0722892 0], ...
    'Tag','Axes1Text4', ...
    'VerticalAlignment','cap');
set(get(c,'Parent'),'XLabel',c);
c = text('Parent',b, ...
    'Color',[0 0 0], ...
    'HandleVisibility','callback', ...
    'HorizontalAlignment','center', ...
    'Position',[-0.0741688 0.496988 0], ...
    'Rotation',90, ...
    'Tag','Axes1Text3', ...
    'VerticalAlignment','baseline');
set(get(c,'Parent'),'YLabel',c);
c = text('Parent',b, ...
    'Color',[0 0 0], ...
    'HandleVisibility','callback', ...

```

```

        'HorizontalAlignment','right', ...
        'Position',[-0.14578 1.03313 0], ...
        'Tag','Axes1Text2', ...
        'Visible','off');
set(get(c,'Parent'),'ZLabel',c);
c = text('Parent',b, ...
        'Color',[0 0 0], ...
        'HandleVisibility','callback', ...
        'HorizontalAlignment','center', ...
        'Position',[0.498721 1.02108 0], ...
        'Tag','Axes1Text1', ...
        'VerticalAlignment','bottom');
set(get(c,'Parent'),'Title',c);
%quadros na janela
b = uicontrol('Parent',a, ...
        'Units','points', ...
        'BackgroundColor',[0.752941 0.752941 0.752941], ...
        'Position',[353.25 -1.5 86.25 316.5], ...
        'Style','frame', ...
        'Tag','Frame1');
b = uicontrol('Parent',a, ...
        'Units','points', ...
        'BackgroundColor',[0.752941 0.752941 0.752941], ...
        'Position',[0 -3 373.5 34.5], ...
        'Style','frame', ...
        'Tag','Frame2');

```



```

function confarq(a);
% confarq(a) função para a configuração dos recursos de manipulação de
arquivo
% do programa imgfmc
%
% Parâmetros de entrada:
%     a - figura onde será construída a janela
%
% Funções utilizadas:
%     carrega;
%     salva2;
%         salva3;
%
%
%     Feito em 1999 por
%
%     Marcelo Silva Guimarães
%     Laboratório de Sistemas Energéticos Alternativos
%     Dept. de Engenharia Mecânica
%     Escola Politécnica de da Universidade de São Paulo
%     Av. Prof. Mello Moraes, 2231
%     CEP 05508-900
%     São Paulo, SP
%     BRASIL
%
%     E-mail: marcsg@usp.br

```

```

%Abrir imagem
b = uicontrol('Parent',a, ...
    'Units','points', ...
    'BackgroundColor',[0.752941 0.752941 0.752941], ...
    'Position',[357 292.5 63 13.5], ...
    'String','Abrir Imagem:', ...
    'Style','text', ...
    'Tag','StaticText1');

```

```

% função chamada: carrega;
b = uicontrol('Parent',a, ...
    'Units','points', ...
    'BackgroundColor',[1 1 1], ...
    'Callback','carrega;', ...
    'Position',[356.25 277.5 63 15.75], ...
    'Style','edit', ...
    'Tag','abriMat');

```

```

%Salvar imagem filtrada
b = uicontrol('Parent',a, ...
    'Units','points', ...
    'Position',[360 256.5 54 20], ...
    'String','Salvar Imagem Filtrada:', ...
    'Style','text', ...
    'Tag','StaticText2');

```

```

% função chamada: salva2;
b = uicontrol('Parent',a, ...
    'Units','points', ...
    'BackgroundColor',[1 1 1], ...
    'Callback','salva2;', ...
    'Position',[358.5 230 58.5 17.25], ...
    'Style','edit', ...
    'Tag','salvMat');

%Abrir Filtro
b = uicontrol('Parent',a, ...
    'Units','points', ...
    'Position',[25.5 6.75 48 16.5], ...
    'String','Abrir Filtro:', ...
    'Style','text', ...
    'Tag','StaticText3');

% função chamada: carrega;
b = uicontrol('Parent',a, ...
    'Units','points', ...
    'BackgroundColor',[1 1 1], ...
    'Callback','carrega;', ...
    'Position',[66 9 51.75 15.75], ...
    'Style','edit', ...
    'Tag','AbriFilt');

%Salvar imagem sem filtrar
b = uicontrol('Parent',a, ...
    'Units','points', ...
    'Position',[275 6.75 54 20], ...
    'String','Salvar Imagem Sem Filtrar:', ...
    'Style','text', ...
    'Tag','StaticText2');

% função chamada: salva3;
b = uicontrol('Parent',a, ...
    'Units','points', ...
    'BackgroundColor',[1 1 1], ...
    'Callback','salva3;', ...
    'Position',[330 6.75 58.5 17.25], ...
    'Style','edit', ...
    'Tag','salvMat');

```

```

function confbot(a);
% confarq(a) configurações dos recursos de visualização de imagem e
% filtragem
%
% Parâmetros de entrada:
%     a - figura onde será construída a janela
%
% Funções utilizadas:
%     implot;
%     CalcFilt;
%
%     Feito em 1999 por
%
%     Marcelo Silva Guimarães
%     Laboratório de Sistemas Energéticos Alternativos
%     Dept. de Engenharia Mecânica
%     Escola Politécnica de da Universidade de São Paulo
%     Av. Prof. Mello Moraes, 2231
%     CEP 05508-900
%     São Paulo, SP
%     BRASIL
%
%     E-mail: marcsg@usp.br

```

```

%Faz a filtragem
% função chamada: CalcFilt;
b = uicontrol('Parent',a, ...
    'Units','points', ...
    'Position',[360.75 206.25 55.5 18], ...
    'Callback','CalcFilt(''abriMat'', ''AbriFilt'');', ...
    'String','Calcular', ...
    'Tag','calcfilt');

```

```

%Plota a imagem da imagem filtrada
% função chamada: implot;
b = uicontrol('Parent',a, ...
    'Units','points', ...
    'Position',[355 180 65 17], ...
    'Callback','implot(''calcfilt'');', ...
    'String','Imagem Limpa', ...
    'Tag','filtMat');

```

```

%Plota a imagem sem filtrar
% função chamada: implot;
b = uicontrol('Parent',a, ...
    'Units','points', ...
    'Position',[364.5 156.75 50.25 15], ...
    'Callback','implot(''abriMat'');', ...
    'String','Imagem', ...
    'Tag','imaMat');

```

```

%Plota a imagem do filtro

```

```
% função chamada: implot;  
b = uicontrol('Parent',a, ...  
    'Units','points', ...  
    'Position',[216.75 5 40 20], ...  
    'Callback','implot('AbriFilt');', ...  
    'String','Filtro', ...  
    'Tag','filting');
```

```

function confselr(a);
% confselr(a) dos recursos de edição de imagem
%
% Parâmetros de entrada:
%     a - figura onde será construída a janela
%
% Funções utilizadas:
%     ajustimg;
%
%     Feito em 1999 por
%
%     Marcelo Silva Guimarães
%     Laboratório de Sistemas Energéticos Alternativos
%     Dept. de Engenharia Mecânica
%     Escola Politécnica de da Universidade de São Paulo
%     Av. Prof. Mello Moraes, 2231
%     CEP 05508-900
%     São Paulo, SP
%     BRASIL
%
%     E-mail: marcsg@usp.br

% Recortar a imagem e o seu filtro em uma determinada região
% função chamada: ajustimg;
b = uicontrol('Parent',a, ...
    'Units','points', ...
    'Position',[350 125 70 20], ...
    'Callback','ajustimg;',...
    'String','Selecionar Região', ...
    'Tag','Selreg');

% Xmax e Xmin
b = uicontrol('Parent',a, ...
    'Units','points', ...
    'Position',[360 100 54 20], ...
    'String','Xmin:  Xmax:', ...
    'Style','text', ...
    'Tag','Selreg2');
%Xmin
b = uicontrol('Parent',a, ...
    'Units','points', ...
    'BackgroundColor',[1 1 1], ...
    'Position',[360 90 25 15.75], ...
    'Style','edit', ...
    'Tag','Selredit2');
%Xmax
b = uicontrol('Parent',a, ...
    'Units','points', ...
    'BackgroundColor',[1 1 1], ...
    'Position',[385 90 25 15.75], ...
    'Style','edit', ...
    'Tag','Selredit');

```

```

%Ymin e Ymax
b = uicontrol('Parent',a, ...
    'Units','points', ...
    'Position',[360 60 54 20], ...
    'String','Ymin:  Ymax:', ...
    'Style','text', ...
    'Tag','Selreg3');
%Ymin
b = uicontrol('Parent',a, ...
    'Units','points', ...
    'BackgroundColor',[1 1 1], ...
    'Position',[360 50 25 15.75], ...
    'Style','edit', ...
    'Tag','Selredity2');
%Ymax
b = uicontrol('Parent',a, ...
    'Units','points', ...
    'BackgroundColor',[1 1 1], ...
    'Position',[385 50 25 15.75], ...
    'Style','edit', ...
    'Tag','Selredity');

```

```

%menucor
%
% adaptação da subrotina colormenu do Matlab para realizar a mudança nos
% mapas de cores
% também está incluso o mapa de cores arcir
%
% funções utilizadas por este programa:
%     atuamap; - atualiza mapa de cores
%
%
%     Marcelo Silva Guimarães
%     Laboratório de Sistemas Energéticos Alternativos
%     Dept. de Engenharia Mecânica
%     Escola Politécnica de da Universidade de São Paulo
%     Av. Prof. Mello Moraes, 2231
%     CEP 05508-900
%     São Paulo, SP
%     BRASIL
%
%     E-mail: marcsg@usp.br

stackofmaps = colormap;
lengthofmap = size(stackofmaps,1);

colormenuh = uimenu(gcf,'label','colormaps','Tag','mcor');

uimenu(colormenuh,'label','*****','Tag','atual');
uimenu(colormenuh,'label','*****');
%gray
uimenu(colormenuh,'label','gray','callback','mapcor=gray(256); atuamap;
');
%hsv
uimenu(colormenuh,'label','hsv','callback','mapcor=hsv(256); atuamap; ');
%hot
uimenu(colormenuh,'label','hot','callback','mapcor=hot(256); atuamap; ');
%pink
uimenu(colormenuh,'label','pink','callback','mapcor=pink(256); atuamap;
');
%cool
uimenu(colormenuh,'label','cool','callback','mapcor=cool(256); atuamap;
');
%bone
uimenu(colormenuh,'label','bone','callback','mapcor=bone(256); atuamap;
');
%jet
uimenu(colormenuh,'label','jet','callback','mapcor=jet(256); atuamap; ');
%copper
uimenu(colormenuh,'label','copper','callback','mapcor=copper(256);
atuamap; ');
%flag
uimenu(colormenuh,'label','flag','callback','mapcor=flag(256); atuamap;
');
%prism

```



```

uimenu(colormenuh,'label','prism','callback','mapcor=prism(256); atuamap;');
%arcir
uimenu(colormenuh,'label','arcir','callback','mapcor=wk1read(''arcir'');
atuamap;');
%rand
uimenu(colormenuh,'label','rand','callback','mapcor=rand(256,3);
atuamap;');
%brighten
uimenu(colormenuh,'label','brighten','callback','mapcor=brighten(.25);
atuamap;');
%dark
uimenu(colormenuh,'label','darken','callback','mapcor=brighten(-.25);
atuamap;');
%flipud
uimenu(colormenuh,'label','flipud','callback','mapcor=flipud(colormap);
atuamap;');
%fliplr
uimenu(colormenuh,'label','fliplr','callback','mapcor=fliplr(colormap);
atuamap;');
%permute
uimenu(colormenuh,'label','permute','callback','c = colormap;
mapcor=c(:,[2 3 1]); atuamap;');

%help
uimenu(colormenuh,'label','help','callback','help colormenu');

EditText3= 'maps';

```

```

function carrega();
% carrega() função para definir a imagem e map de cores a serem
carregados e carrega-los
%
%
%
% Funções utilizadas:
%     loadbmp;
%
%
%
%     Feito em 1998 por
%
%     Marcelo Silva Guimarães
%     Laboratório de Sistemas Energéticos Alternativos
%     Dept. de Engenharia Mecânica
%     Escola Politécnica de da Universidade de São Paulo
%     Av. Prof. Mello Moraes, 2231
%     CEP 05508-900
%     São Paulo, SP
%     BRASIL
%
%     E-mail: marcsg@usp.br

%Lê o nome do arquivo a ser carregado
arq=get(gcbo, 'String');
%Carrega-o
[Im, mapcor]=loadbmp(arq);
%Ajusta mapa de cores
colormap(mapcor);
H=findobj(gcf,'Tag','mcor');
set(H,'UserData',mapcor);
%Visualiza-o na figura
image(Im);
%Guarda a imagem
set(gcbo,'UserData',Im);

axis xy;

```

```

function salva2();
% salva2() função para definir a imagem e mapa de cores a serem salvos e
salva-los
%
%
%
% Funções utilizadas:
%     savebmp;
%
%
%
%     Feito em 1998 por
%
%     Marcelo Silva Guimarães
%     Laboratório de Sistemas Energéticos Alternativos
%     Dept. de Engenharia Mecânica
%     Escola Politécnica de da Universidade de São Paulo
%     Av. Prof. Mello Moraes, 2231
%     CEP 05508-900
%     São Paulo, SP
%     BRASIL
%
%     E-mail: marcsg@usp.br

%seleciona a imagem que está sendo visualizada no gráfico
H=findobj(gcf,'Tag','calcfilt');

%Lê o nome do arquivo em que se deve salvar a imagem
arq=get(gcbo,'String');
%carrega a imagem a ser salva
Im=get(H,'UserData');
%carrega mapa de cores que se deve salvar a imagem
HC=findobj(gcf,'Tag','mcor');
colorm=get(HC,'UserData');
%salva a imagem
savebmp(arq,Im,colorm);

```

```

function salva3();
% salva3() função para definir a imagem e mapa de cores a serem salvos e
salva-los
%
%
%
% Funções utilizadas:
%     savebmp;
%
%
%
%     Feito em 1998 por
%
%     Marcelo Silva Guimarães
%     Laboratório de Sistemas Energéticos Alternativos
%     Dept. de Engenharia Mecânica
%     Escola Politécnica de da Universidade de São Paulo
%     Av. Prof. Mello Moraes, 2231
%     CEP 05508-900
%     São Paulo, SP
%     BRASIL
%
%     E-mail: marcsg@usp.br

%seleciona a imagem
H=findobj(gcf,'Tag','abriMat');

%Lê o nome do arquivo em que se deve salvar a imagem
arq=get(gcbo,'String');
%carrega a imagem a ser salva
Im=get(H,'UserData');
%carrega mapa de cores que se deve salvar a imagem
HC=findobj(gcf,'Tag','mcor');
colorm=get(HC,'UserData');
%salva a imagem
savebmp(arq,Im,colorm);

```

```

function implot(nome);
% implot(nome) desenha a imagem na região do gráfico
%
% Parâmetros de entrada:
%     nome - da imagem a ser desenhada
%
%
%     Feito em 1999 por
%
%     Marcelo Silva Guimarães
%     Laboratório de Sistemas Energéticos Alternativos
%     Dept. de Engenharia Mecânica
%     Escola Politécnica de da Universidade de São Paulo
%     Av. Prof. Mello Moraes, 2231
%     CEP 05508-900
%     São Paulo, SP
%     BRASIL
%
%     E-mail: marcsg@usp.br

H=findobj(gcf,'Tag',nome);
tab=get(H,'UserData');
grid off;
image(tab);
axis xy;

```

```

function CalcFilt(nomeMat,nomeFilt);
% CalcFilt(nomeMat,nomeFilt) filtra a imagem com um filtro matemático de
divisão
%
% Parâmetros de entrada:
%     nomeMat - nome da imagem a ser filtrada
%     nomeFilt - nome da imagem filtro
%
%
%     Feito em 1999 por
%
%     Marcelo Silva Guimarães
%     Laboratório de Sistemas Energéticos Alternativos
%     Dept. de Engenharia Mecânica
%     Escola Politécnica de da Universidade de São Paulo
%     Av. Prof. Mello Moraes, 2231
%     CEP 05508-900
%     São Paulo, SP
%     BRASIL
%
%     E-mail: marcsg@usp.br

% Abre a imagem
Math=findobj(gcf,'Tag',nomeMat);
tabMat=get(Math,'UserData');

%Abre o filtro
FiltH=findobj(gcf,'Tag',nomeFilt);
tabFilt=get(FiltH,'UserData');

%elimina zeros do filtro
[m,n]=size(tabFilt);
umtab=ones(m,n);
umtab=0.000001*umtab;
tabF=tabFilt+umtab;

%filtra
tabMat=tabMat./tabF;

%normaliza o mapa de cores
max1=max(tabMat);
max2=max(max1);

min1=min(tabMat);
min2=min(min1);
d=max2-min2;
if d==0
    d=min2;
end

tabMat=((255/(max2-min2))*tabMat);

set(gcf,'UserData',tabMat);
image(tabMat);

```

axis xy;

```

function ajustimg()
% ajustimg() ajusta o tamanho da imagem a ser processada
%
%
%
%      Feito em 1999 por
%
%      Marcelo Silva Guimarães
%      Laboratório de Sistemas Energéticos Alternativos
%      Dept. de Engenharia Mecânica
%      Escola Politécnica de da Universidade de São Paulo
%      Av. Prof. Mello Moraes, 2231
%      CEP 05508-900
%      São Paulo, SP
%      BRASIL
%
%      E-mail: marcsg@usp.br

%Abre o filtro
H1=findobj(gcf,'Tag','AbriFilt');
fimg=get(H1,'UserData');

% Abre a imagem
H2=findobj(gcf,'Tag','abriMat');
img=get(H2,'UserData');

%Corta a imagem
H3=findobj(gcf,'Tag','Selredit');
X1=get(H3,'String');
X1=str2num(X1);

H4=findobj(gcf,'Tag','Selredity');
Y1=get(H4,'String');
Y1=str2num(Y1);

H5=findobj(gcf,'Tag','Selredit2');
X2=get(H5,'String');
X2=str2num(X2);

H6=findobj(gcf,'Tag','Selredity2');
Y2=get(H6,'String');
Y2=str2num(Y2);

img=img(Y2:Y1,X2:X1);
fimg=fimg(Y2:Y1,X2:X1);

set(H2,'UserData',img);
set(H1,'UserData',fimg);

```



```
image(img);  
axis xy;
```

```
% atuamap; atualiza o mapa de cor utilizado nas imagens
%
%
%
%      Marcelo Silva Guimarães
%      Laboratório de Sistemas Energéticos Alternativos
%      Dept. de Engenharia Mecânica
%      Escola Politécnica de da Universidade de São Paulo
%      Av. Prof. Mello Moraes, 2231
%      CEP 05508-900
%      São Paulo, SP
%      BRASIL
%
%      E-mail: marcsg@usp.br
```

```
colormap(mapcor);
H=findobj(gcf,'Tag','mcor');
set(H,'Userdata',mapcor);
```

```
%destaca o mapa de cor escolhido no menu
```

```
Dt=findobj(gcf,'Tag','atual');
tex=get(gcbo,'label');
set(Dt,'label',tex);
```

```

function [X,map]=loadbmp(bmpfile)
% LOADBMP Load Microsoft Windows 3.x .BMP format image files.
%
% [X,map]=LOADBMP(bmpfile) loads a .BMP format file specified by
% "bmpfile", returning the image data in variable "X" and the
% colormap in variable "map". The .BMP extension in the filename
% is optional.
%
% Note: LOADBMP currently supports only uncompressed .BMP files
% with at most 256 colors.
%
% See also SAVEBMP.
%
% Copyright (c) 1993 by
%
% Ralph Sucher
% Dept. of Communications Engineering
% Technical University of Vienna
% Gusshausstrasse 25/389
% A-1040 Vienna
% AUSTRIA
%
% Phone: +431-58801/3518
% Fax: +431-5870583
% Email: rsucher@email.tuwien.ac.at

if nargin~=1
    error('LOADBMP takes one argument, which is the name of the .BMP
file.');
```

end

```

if isempty(findstr(bmpfile, '.'))==1
    bmpfile=[bmpfile, '.bmp'];
end

fid=fopen(bmpfile, 'rb', 'ieee-le');
```

if fid==-1

```

    error('Can''t open .BMP file for input!');
end

% ----- BMP HEADER -----
---
```

```

% read file identifier

% bfType=fread(fid,1,'ushort');
% if bfType~=19778
%     fclose(fid);
%     error('Not a valid .BMP file!');
% end
bfType=fread(fid,2,'char');
if ~all(bfType == 'BM')
    fclose(fid);
error('Not a valid .BMP file!');
end
```

```

% read file length (bytes)
status=fseek(fid,0,'eof');
bfSize=ftell(fid);
status=fseek(fid,6,'bof');

% read bytes reserved for later extensions
dummy=fread(fid,1,'long');

% read offset from beginning of file to first data byte
bfOffs=fread(fid,1,'long');

% ----- BMP INFO-BLOCK -----
---

% *** bitmap information header ***

% read length of bitmap information header
biSize=fread(fid,1,'long');

% read width of bitmap
biWidth=fread(fid,1,'long');

% read height of bitmap
biHeight=fread(fid,1,'long');

% read number of color planes
biPlanes=fread(fid,1,'ushort');

% read number of bits per pixel
biBitCnt=fread(fid,1,'ushort');
nCol=2^biBitCnt;

% read type of data compression
biCompr=fread(fid,1,'long');
if biCompr~=0
    fclose(fid);
    error('LOADBMP currently supports only uncompressed .BMP files!');
end

% read size of compressed image
biSizeIm=fread(fid,1,'long');

% read horizontal resolution (pixels/meter)
biXPelsPerMeter=fread(fid,1,'long');

% read vertical resolution (pixels/meter)
biYPelsPerMeter=fread(fid,1,'long');

% read number of used colors
biClrUsed=fread(fid,1,'long');

% read number of important colors
biClrImportant=fread(fid,1,'long');

% *** colormap ***

```

```

MapLength=(bfOffs-54)/4;

% read colormap
map=zeros(4,MapLength);
map(:)=fread(fid,MapLength*4,'uchar');
map=map(3:-1:1,:)/255;

% ----- BITMAP DATA -----
---

ndata=bfSize-bfOffs;
Width=(ndata*8/biBitCnt)/biHeight;
X=zeros(Width,biHeight);
Xsize=Width*biHeight;

data=fread(fid,ndata,'uchar');
fclose(fid);

if biBitCnt==1
    x=zeros(1,ndata);
    for i=1:8
        X(i:8:Xsize)=fix((data'-x)/2^(8-i));
        x=x+X(i:8:Xsize)*2^(8-i);
    end
elseif biBitCnt==4
    X(1:2:Xsize)=fix(data/16);
    X(2:2:Xsize)=round(data'-X(1:2:Xsize)*16);
elseif biBitCnt==8
    X(:)=data;
elseif biBitCnt==24
    error('LOADBMP supports only images with at most 256 colors.');
```

```

else
    error('This is not a valid .BMP file!');
end

X=X(1:biWidth,biHeight:-1:1)'+1;

```

```

function savebmp(bmpfile,X,map)
% SAVEBMP Save Microsoft Windows 3.x .BMP format image files.
%
% SAVEBMP(bmpfile,X,map) saves a .BMP format file specified by
% "bmpfile". The .BMP extension in the filename is optional.
%
% The input arguments for SAVEBMP are as follows:
%
% bmpfile A string containing the name of the .BMP file to
create
% X The image data to save (8 bit max)
% map The colormap of the image
%
% Note: SAVEBMP currently supports only uncompressed .BMP files
% with at most 256 colors.
%
% See also LOADBMP.
%
% Copyright (c) 1993 by
%
% Ralph Sucher
% Dept. of Communications Engineering
% Technical University of Vienna
% Gusshausstrasse 25/389
% A-1040 Vienna
% AUSTRIA
%
% Phone: +431-58801/3518
% Fax: +431-5870583
% Email: rsucher@email.tuwien.ac.at

if nargin~=3
    error('Wrong number of input arguments! Type HELP SAVEBMP for info.');
```

end

```

if isempty(findstr(bmpfile, '.'))==1
    bmpfile=[bmpfile, '.bmp'];
end

fid=fopen(bmpfile, 'rb');
if fid==-1
    fclose(fid);
    error('File already exists! Please choose another filename.');
```

end

```

[nCol, rgb]=size(map);
if nCol>256
    error('SAVEBMP supports only images with at most 256 colors.');
```

end

```

if rgb~=3
    error('The colormap must have 3 columns: [R,G,B].');
```

end

```

if min(map(:))<0 | max(map(:))>1
    error('The colormap must have values in [0,1].');
```

end

```

% determine number of bits per pixel
if nCol<=2
    biBitCnt=1;
elseif nCol<=16
    biBitCnt=4;
else
    biBitCnt=8;
end

% truncate image data
X=round(X);
xmin=find(X<1);
xmax=find(X>nCol);
X(xmin)=ones(1,length(xmin));
X(xmax)=nCol*ones(1,length(xmax));

% determine image size
[biHeight,biWidth]=size(X);
Width=ceil(biWidth*biBitCnt/32)*32/biBitCnt;
ndata=Width*biHeight*biBitCnt/8;
X=[X(biHeight:-1:1,:)-1 zeros(biHeight,Width-biWidth)]';
Xsize=Width*biHeight;

fid=fopen(bmpfile,'wb');

% ----- BMP HEADER -----
---

% write file identifier
fwrite(fid,'BM','uchar');

% write file length (bytes)
bfSize=54+4*nCol+ndata;
fwrite(fid,bfSize,'long');

% set bytes reserved for later extensions to zero
fwrite(fid,0,'long');

% write offset from beginning of file to first data byte
bfOffs=54+4*nCol;
fwrite(fid,bfOffs,'long');

% ----- BMP INFO-BLOCK -----
---

% *** bitmap information header ***

% write length of bitmap information header
fwrite(fid,40,'long');

% write width of bitmap
fwrite(fid,biWidth,'long');

% write height of bitmap
fwrite(fid,biHeight,'long');

```



```

% write number of color planes
fwrite(fid,1,'ushort');

% write number of bits per pixel
fwrite(fid,biBitCnt,'ushort');

% write type of data compression
fwrite(fid,0,'long');

% write size of compressed image
fwrite(fid,0,'long');

% write horizontal resolution
fwrite(fid,0,'long');

% write vertical resolution
fwrite(fid,0,'long');

% write number of used colors
fwrite(fid,0,'long');

% write number of important colors
fwrite(fid,0,'long');

% *** colormap ***

map=[fix(255*map(:,3:-1:1)) zeros(nCol,1)]';
fwrite(fid,map,'uchar');

% ----- BITMAP DATA -----
---

if biBitCnt==1
    x=zeros(1,ndata);
    for i=1:8
        x=x+2^(8-i)*X(i:8:Xsize);
    end
    fwrite(fid,x,'uchar');
elseif biBitCnt==4
    x=16*X(1:2:Xsize)+X(2:2:Xsize);
    fwrite(fid,x,'uchar');
else
    fwrite(fid,X,'uchar');
end

fclose(fid);

```

11- Referências bibliográficas

- Bunchele Donald R. e outros, "Compact color schlieren optical system," Applied Optics, Vol.32, N 22,1993.
- Greenberg,Paul S. e outros, "Quantitative rainbow schlieren deflectometry," Applied Optics, Vol.34, N 19,1995.
- Holman, J. P.,1989, Experimental Methods for Engineers, 5º edição, MacGraw-Hill.
- Howes, Walton L., "Rainbow schlieren and its applications," Applied Optics, Vol.23, N 14,1984.
- Howes, Walton L., "Rainbow schlieren vs Mach-Zehnder interferometer," Applied Optics, Vol.24, N 6,1985.
- Liepmann, H. W., Roshko,A., 1976, Elements of Gasdynamics, New York - John Wiley & Sons.
- Merzkirch, W., 1987, Flow Visualization 2º edição, Orlando - Academic Press, Inc.
- Niblack, W.,1986, An Introduction to Digital Image Processing, 2º edição , Prentice Hall International.
- O'Shea, Donald C., 1985, Elements of Modern Optical Design, New York - John Wiley & Sons.
- Vieira, Marcelo M., 1999, Arranjo Experimental para o Estudo de Jatos de Líquidos Superaquecidos, Dissertação de mestrado apresentado à Escola Politécnica de São Paulo.
- Russ, J. C.,1995, The Image Processing Handbook, 2º edição, CRC Press.
- Settles, G. S., "Color-coding schlieren techniques for the optical study of heat and fluid flow," Int. J. Heat et Fluid Flow, Vol.23, N 14,1984.

Simões Moreira, J. R. e Shepherd, J., 1999, Evaporations Waves in Superheated Dodecane, Journal of Fluid Mechanics, v. 382, p.p. 63-86.

Sucher, Ralph, 1993, funções para MATLAB, loadbmp.m e savebmp.m, <http://www.mathworks.com/support/ftp/imageessv4.shtml> .

Th.Kurschat e outros, "Complete adiabatic evaporation of highly superheated liquid jets," Journal of Fluid Mechanic, Vol.236, 1992.