

**Ingrid de Miranda Esteves**

# **SISTEMA ÓPTICO PARA GERAÇÃO DE ESTÍMULOS VISUAIS PARA MOSCAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à  
Escola de Engenharia de São Carlos, da  
Universidade de São Paulo

Curso de Engenharia Elétrica com ênfase em  
Eletrônica.

ORIENTADOR: Prof. Doutor Jan Frans Willem Slaets

São Carlos  
2007



## **Agradecimentos**

Primeiro a Deus, por me ter permitido chegar onde estou neste momento, e aos meus pais, pelo seu amor incondicional e simplesmente porque a eles devo tudo o que me tornei hoje.

Agradeço ao Prof. Roland Köberle por ter me aceito na sua equipe e ao Prof. Jan Frans Willem Slaets por aceitar ser meu orientador neste trabalho.

A toda a equipe do laboratório, porque sem eles nada disso aqui seria possível.

Ao Lírio, por ter me incentivado, me fornecendo suporte e todas as condições necessárias para o andamento deste trabalho. Por ter acreditado neste projeto e em mim, sendo ele o grande responsável por todos os resultados obtidos.

A Ivanilda pela sua prestatividade e pela sua paciência de montar as moscas necessárias na hora que eu precisava pra realizar os experimentos.

Ao meu namorado, por estar sempre presente oferecendo seu ombro nos momentos mais difíceis e a todos meus amigos que sempre me apoiaram durante a minha graduação na faculdade e que direta ou indiretamente contribuíram para o bom andamento deste trabalho.



## RESUMO

Este trabalho apresenta uma revisão de experiências relacionada com duto óptico, realizando uma análise dos princípios experimentais de processamento de dados utilizando os sinais gerados pelo neurônio devido aos estímulos de visuais apresentados.

A parte inovadora consiste em elaborar um sistema óptico que seja capaz de registrar eletronicamente os trens de pulso gerados pelo neurônio visual H1 da mosca *Crysomya Megacephala* produzido por movimentos estímulos visuais.

A imagem obtida pelos sistemas geradores de estímulos existentes que utilizam monitores com tubo de raios catódicos (TRCs) possuem problemas no que se refere a taxa de quadros por segundo apresentada, além de possuir baixa resolução, brilho e contraste.

Devido à alta velocidade necessária para conseguir gerar uma imagem de forma contínua para moscas, o objetivo deste trabalho consiste em elaborar um sistema gerador de estímulo aonde a imagem é gerada pela projeção de um slide em um anteparo.

O estímulo visual deste sistema possui uma melhor resolução e sua luminância é muito maior que a das imagens geradas por monitores, além disso, por este sistema não possuir taxa de varredura vertical, ele deixa de ser um fator limitante.

Desta forma torna-se possível realizar experimentos com imagens que simule o habitat natural da mosca de uma forma nunca antes realizado no campo da neurociência, uma vez que a imagem é apresentada de forma contínua e não mais em um número de quadros por segundo.

Palavras-chave: Spike, estímulo, megacephala, neurônio, decodificação, codificação.

## ABSTRACT

This work presents a revision of optic flow experiments, analyzing experimental data processing concepts of the neural signal produced due the visual stimulus generated.

The innovation consists in developing an optical system that is able to measure the action potentials generated by the visual neuron H1 of the fly *Crysomya Megacephala* produced by the movements of an visual stimulus.

The images generated by the visual stimulus generators, that commonly use monitors with cathode ray tubes (CRTs), have limitations that arise from some factors like the frames rate, the low resolution, brightness and contrast.

Because of the high speed necessary to generate a continuous moving image, the goal of this work is to develop a visual stimulus generator where the image is generated by the projection of a slide into a screen.

The image generated by this system has a better resolution and its luminance is much greater than the images generated by systems with monitors; in addition, the frame rate is no more a limiting factor because it doesn't exist.

With this system it will be possible to perform experiments with images that simulate the natural habitat where the fly lives in a way that was never done before in neuroscience experiments because the image is generated on a continuous way rather than in frames per second.

Key-words: Spike, stimulus, megacephala, neuron, decoding, encoding.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.2.1. Registro de sinais eletrofisiológicos de células tangenciais .....	2
Figura 1.3.1. Display do VSGLmG.....	4
Figura 1.3.2. Diagrama em bloco do sistema para realizar os experimentos.....	4
Figura 1.3.3. Diagrama de blocos do Front End analógico.....	5
Figura 3.1.1. Imagem do olho composto das moscas.....	9
Figura 3.1.2. Esquemático das partes constituintes do sistema visual da mosca .....	9
Figura 3.2.1. Detector de Reichardt e suas variantes.....	11
Figura 3.3.1 Picasso.....	12
Figura 3.3.2. Fly-O-Vision.....	13
Figura 3.3.3 FliMax.....	14
Figura 3.3.4. Sistema de simulação de vôo livre.....	15
Figura 3.4.1. Cálculo da função de correlação resposta-estímulo.....	17
Figura 3.4.2. Sistema de comunicação de acordo com a teoria da informação.....	18
Figura 3.4.3. Processamento Analógico/Digital.....	20
Figura 4.1.1. Imagem vista no display.....	21
Figura 4.1.2. Sinal de estímulo utilizado nos experimentos.....	22
Figura 4.1.3. Sinal obtido na saída do head-stage e na saída do discriminador .....	22
Figura 4.1.4. Sistema Óptico de Geração de Estímulos Visuais.....	23
Figura 4.1.5. Sistema de iluminação.....	23
Figura 4.1.6. Esquemático do Dimer.....	24
Figura 4.1.7. Motor utilizado para realizar a deflexão do espelho.....	24
.....	25
Figura 4.1.8. Circuito amplificador para alimentação do motor .....	25
Figura 4.2.1. Esquema do experimento para obter os parâmetros dos motores.....	26
Figura 4.2.2. Tela capturada do osciloscópio para obter o intervalo de tempo $\Delta t$ .....	27
Figura 4.3.1. Foto transistor detectando a movimentação do estímulo nos dois sistemas....	28
Figura 4.3.2. Aquisição de dados realizados nos dois sistemas.....	28
Figura 5.1.1. Velocidade dos motores .....	29
Figura 5.1.2. Resposta em frequência dos motores .....	30
Figura 5.2.3. Gráficos do tipo rasters obtidos nos dois sistemas utilizando foto-transistor....	30
Figura 5.2.4. Comparação dos gráficos tipo rasters obtidos nos dois sistemas .....	31

Figura 5.2.5. Comparação da função correlação estímulo-resposta obtida nos dois sistemas

31

Figura 6. Imagens geradas pelos dois sistemas..... 32

## SUMÁRIO

Resumo.....	i
Lista de Figuras.....	iii
SUMÁRIO.....	iv
1.INTRODUÇÃO .....	1
1.1A Neurociência .....	1
1.2Experiências em Neurociência.....	2
1.3Experiências em Neurociência Realizado no Dipterlab-IFSC.....	3
1.4Motivação.....	7
2.OBJETIVOS .....	8
3.REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	9
3.1Características do Sistema Visual da Mosca.....	9
3.2Modelos Neurais.....	10
3.3Sistemas Geradores de Estímulos Visuais.....	12
3.4Processamento de Sinais Eletrofisiológicos.....	16
3.4.1Resposta Neural e Taxa de Disparo.....	16
3.4.2Função de Correlação.....	17
3.4.3Teoria da Informação.....	18
3.4.4Processamento de Sinal Neural e Algoritmos de Programação.....	19
MATERIAIS E METODOS.....	21
4.1Projeto e montagem do sistema óptico.....	21
4.1.1Módulo de Iluminação .....	23
4.1.2Módulo de Movimentação.....	24
4.2Metodologia Utilizada para Obter Parâmetros dos Motores.....	26
4.3Metodologia para validação do Sistema Óptico .....	27
5.RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	29
5.1 Especificações do Sistema Óptico.....	29
5.1.1Parâmetro de Operação dos Motores Lineares.....	29
5.2 Resposta Obtidas com o Novo Sistema.....	30
5.2.1Comparação do Sistema Óptico com o Sistema que utiliza o VSIImG.....	30



6.CONCLUSÕES .....	32
7.PROJETOS PARA TRABALHOS FUTUROS.....	33



# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1 A Neurociência

O cérebro é o órgão que realiza o processamento e o armazenamento das informações obtidas do meio externo e a neurociência tem como objetivo compreender o princípio de funcionamento dos circuitos neurais, que são as estruturas básicas do cérebro.

Para saber como o cérebro extrai a informação correta de uma quantidade grande de dados, é necessário realizar uma investigação exaustiva e detalhada do comportamento das células neurais.

O sinal das células neurais possui a vantagem de transmitir informação através de sinais elétricos que podem ser medidos, viabilizando pesquisas nesta área.

Para estudar a transmissão de informação entre neurônios, este trabalho utiliza como objeto de estudo o cérebro de mosca por ser mais simples e por apresentar um sistema visual adequado para se estudar detecção de movimentos.

O sistema visual da mosca tem sido utilizado como modelo para realizar pesquisas em neurociência pelo fato dele ser conhecido sob o ponto de vista biológico e por possuir vários neurônios já classificados (Hausen; Egelhaaf, 1989).

Além de ser insetos com um sistema visual muito eficiente, que permitem reprodução de experimentos in vivo em laboratório, eles também oferecem um melhor acesso aos sinais de neurônios relacionados com a detecção de movimentos por estarem situados em uma camada mais externa do cérebro.

Existem mais de 125000 diferentes espécies de moscas no mundo (Yeates; Wiegmann, 1999) e eles podem ser considerado um dos animais que obtiveram grande sucesso evolutivo na terra (Alvidrez, 2005).

O mecanismo de detecção de movimento biológico está se tornando cada vez mais um alvo de estudo a medida que estão surgindo sistemas eletrônicos que necessitam de mecanismo de detecção visual rápidos e precisos por estarem sujeitos a situações semelhantes aos que os sistemas biológicos estão sujeitos.

No ponto de vista da engenharia eles possuem características marcantes: Uma mosca pesando menos de 100mg consegue atingir uma velocidade angular de até 2000°/s consumindo uma potência menor que 10W, além disso, seu tempo de reação chega a ser menor que 30ms (Land; Collett, 1974; Wagner, 1986).

Os resultados obtidos em pesquisas nesta área indicam que, devido a sua simplicidade e robustez a ruídos, os melhores modelos de visão computacional poderão vir a ser inspirados nos sistemas visuais biológicos, motivando assim estudos nesta área.

## 1.2 Experimentos em Neurociência

O grande tamanho das células neurais das moscas (diâmetro superior a  $10\mu\text{m}$ ) facilita o registro de sinais eletrofisiológicos e os experimentos em neurociência, que fornecem grande parte das informações obtidas a respeito de como a detecção de movimento é realizada.

Neste trabalho são efetivadas medidas no neurônio H1, que é sensível a movimentos horizontais no sentido de trás pra frente e que responde através de potenciais de ação (*spikes*).

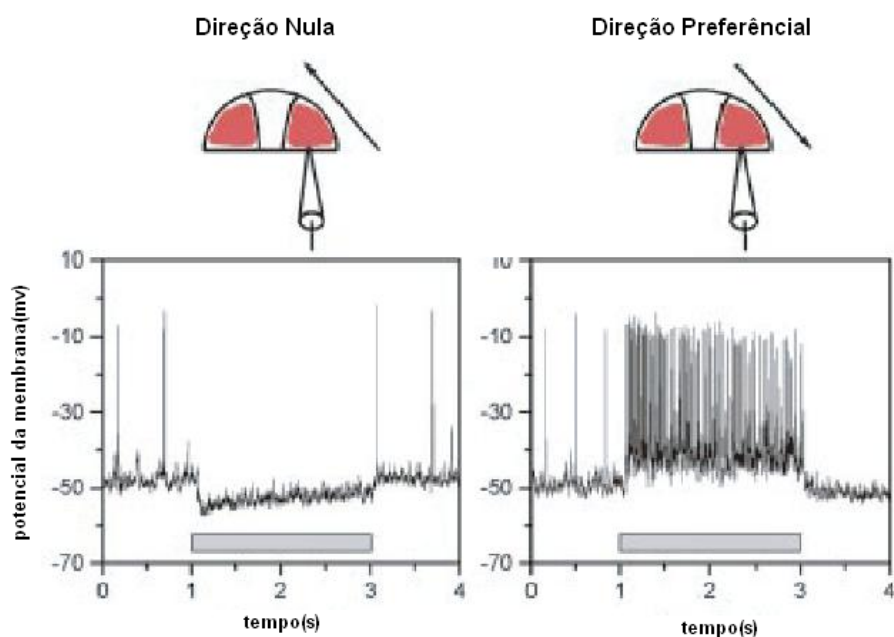


Figura 1.2.1. Registro de sinais eletrofisiológicos de células tangenciais

A figura 1.2.1 ilustra o comportamento da célula estudada: Quando o sistema visual está submetido a estímulos com movimentos horizontais na direção preferencial (de trás pra frente) o neurônio é polarizado e dispara uma seqüência de pulsos. No sentido contrário os disparos desta célula são inibidos (Alvarez, 2005).

### 1.3 Experimentos em Neurociência Realizado no Dipteralab-IFSC

O sistema utilizado para estudar a transmissão de informações do duto neural no Dipteralab-IFSC possui módulos de captação, processamento e registro dos sinais neurais e mais um módulo de geração de estímulos visuais que são controlados por um computador hospedeiro.

Para realizar experimentos nesta área de forma satisfatória é necessária uma instrumentação eletrônica complexa para a geração de estímulos visuais e o registro da grande quantidade de dados neurais gerados nestes experimentos.

O sistema que realiza esta tarefa foi implementado pelo Grupo de Instrumentação e Informática (GII) do IFSC por ser de natureza específica e por não existir equipamentos comerciais que atendam as necessidades exigidas.

A geração de estímulos deve operar de forma integrada e sincronizada com o módulo de aquisição de dados neurais, por isso é necessária a compreensão do funcionamento da instrumentação utilizada nos experimentos como um todo.

O módulo de geração de imagens para estímulos visuais (*Visual Stimuli Image Generator*, VSImG) apresenta à mosca uma imagem gerada por monitor de deflexão eletrostática (Tektronix 608), cuja imagem é um bitmap constituído por conjuntos de barras verticais com diferentes níveis de contrastes, atualizado com a uma taxa de 500 quadros por segundo (Figura 1.3.1).

Estas imagens são movimentadas utilizando sinais analógicos sob especificação de *hard real-time*, para o computador hospedeiro, com tempos de respostas determinísticos e precisão no registro dos instantes de ocorrência de potenciais de ação (*timestamps*) da ordem de microsegundos (Almeida, 2006).

A imagem apresentada possui 256 níveis de cinza e uma resolução de 256x256 pixels e o controle do seu movimento horizontal é realizado analogicamente por um hardware dedicado que envia sinais equivalentes ao posicionamento da imagem, a cada *frame*, ao canal de varredura horizontal.

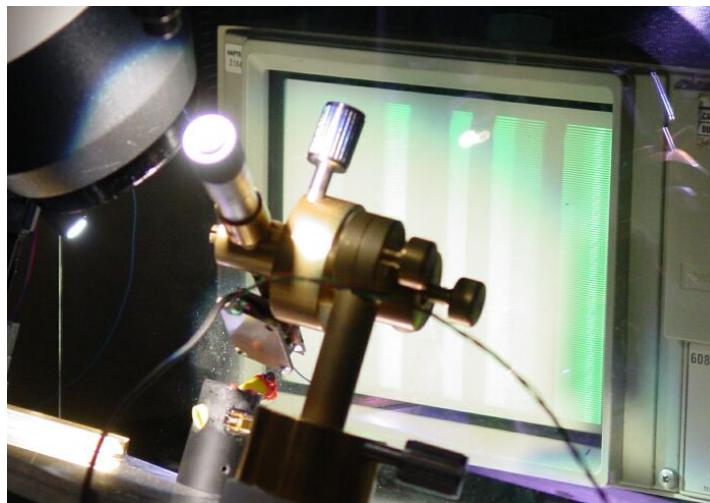


Figura 1.3.1. Display do VSGImG

A Figura 1.3.2 mostra o diagrama de blocos do sistema de instrumentação utilizado atualmente para realizar os experimentos do laboratório, eles são formados por dois blocos principais: o de aquisição de dados neurais e o de geração de estímulos visuais.

O bloco de aquisição de dados neurais é formado pelo *Front End* analógico, utilizado para a captação, amplificação, filtragem e discriminação do sinal do neurônio captado pelo método extracelular.

Este bloco também possui um hardware digital dedicado, controlado por um computador hospedeiro, que controla o sinal de estímulo (para o movimento da imagem), efetua o registro dos instantes em que ocorreram os spikes (timestamps) e o instante do sinal de sincronismo do gerador de imagens.

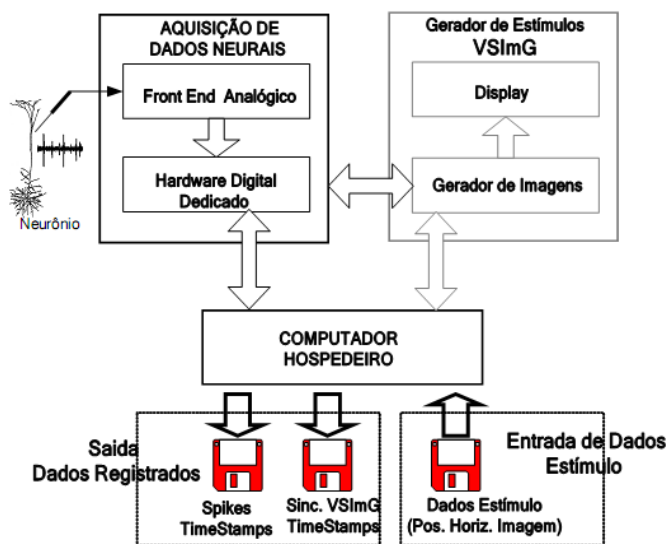


Figura 1.3.2. Diagrama em bloco do sistema para realizar os experimentos

Os sinais neurais captados pelo eletrodo variam de alguns micro volts a até aproximadamente  $50\mu\text{V}$ .

Devido à baixa amplitude e relação sinal ruído, este sinal necessita um processamento analógico adequado com estágios iniciais utilizando circuitos de alto ganho em tensão, baixo ruído, alta impedância de entrada, alta rejeição de ruído de modo comum e filtragem passa banda.

Os estágios iniciais de processamento analógico do sinal compõem a parte da instrumentação eletrônica do Front End analógico (Figura 1.3.3), sendo composto pelas seguintes partes:

- Micro-eletrodo de tungstênio e a interface com o meio extracelular.
- Amplificador AC diferencial para micro-eletrodo (head stage) com um ganho de 100
- Pré-amplificador com um ganho de 100
- Filtro Bessel passa-banda de quarta ordem.
- Monitor de áudio.
- Discriminador para registrar o sinal neural válido.

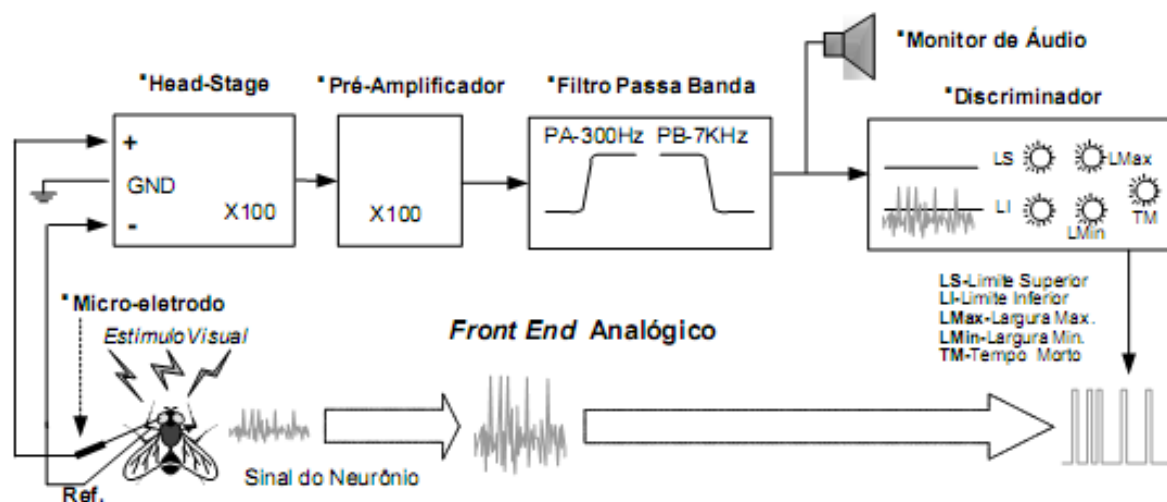


Figura 1.3.3. Digrama de blocos do *Front End* analógico

O micro-eletrodo está conectado à entrada diferencial do *head stage*, onde a tensão do sinal é amplificada 100 vezes utilizando um amplificador AC diferencial de instrumentação.

A saída do *head stage* é novamente amplificada 100 vezes e filtrada por filtros passa banda com frequência de corte entre 300Hz e 7KHz, para eliminar componentes de alta e baixa frequência indesejáveis que reduzem a relação sinal/ruído.

As saídas destes filtros levam o sinal neural ao discriminador analógico/digital, que dispara um pulso no padrão TTL sempre que receber um sinal válido e o envia para o hardware para ser registrado.

O sinal considerado válido pelo discriminador é previamente ajustado pelo usuário que define uma janela com limiar superior e inferior.

O hardware dedicado registra os instantes de ocorrência dos spikes e os envia ao computador hospedeiro através de interrupções geradas pelo próprio hardware dedicado.



## 1.4 Motivação

Um dos objetivos das pesquisas realizadas em neurociência consiste em compreender como é a resposta de neurônios sensoriais quando encontrados em ambientes naturais.

A maioria do conhecimento sobre processamento sensorial realizado nos seres vivos foi obtida através de experimentos utilizando estímulos simples, devido a dificuldade de se gerar estímulos visuais mais complexos para moscas com monitores de vídeo comum.

Um grande número de pesquisadores tem questionado se a realização de experimentos com estímulos visuais pobres (de baixa luminância e baixo contraste) consegue fornecer informações suficientes a respeito do processamento sensorial realizado pelos seres vivos e a conclusão que se chegou é que a utilização de estímulos naturalísticos é de extrema importância para que pesquisas nesta área continue avançando.

Por este motivo, a implementação de sistemas de geração de imagem para estímulos visuais que possibilite a apresentação de cenas naturais para moscas torna-se cada vez mais necessária, pois experimentos recentes mostram que a informação sobre o estímulo aumenta em ambientes com cenas naturalísticas e com maior luminância.

A utilização de cenas naturalísticas fornecerá uma relação sinal/ruído muito melhor que experimentos com cenas de barras verticais, que são as imagens mostradas em monitores de vídeo (Lewen, 2001).

Para se estudar a detecção de movimento é interessante que seja simulado situações próximas às encontradas no habitat natural destes insetos e isso gera uma grande demanda deste tipo de instrumentação para realizar experimentos em neurociência.

Existem várias limitações tecnológicas para criar sistemas de geração de estímulos visuais naturalísticos em laboratórios, pois para representar movimentos contínuos em pesquisas com moscas é necessário utilizar monitores que apresentem imagens a taxas maiores que 500 quadros por segundo (muito maior que os 30Hz suficientes para o sistema visual humano).

Para conseguir maiores avanços na pesquisa em neurobiofísica vários laboratórios têm aplicado grandes esforços para suprir esta necessidade por não existir equipamentos capazes de gerar imagens com velocidade de atualização de quadros compatível com o sistema visual de mosca.

Este fato nos tem motivado a projetar e a desenvolver um sistema que gere imagens de cenas naturais com velocidade suficiente para simular movimentos para moscas e sem o problema de resolução (*flicker*), *aliasing* e contraste, que existem nos sistemas de geração de estímulos atuais.

## 2. OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é inserir mais um módulo de geração de imagens no sistema utilizado para realizar experimentos em neurociência do laboratório Dipteralab-IFSC, procurando integrar o novo sistema de geração de imagens ao módulo de captação, de processamento e de registro já existente. Acrescentando no laboratório, com o mínimo de alterações, mais uma forma de se gerar estímulos visuais sem inviabilizar o sistema já existente.

Após desenvolver e validar o novo sistema de geração de estímulos naturalísticos pra moscas, foi possível realizar aquisições de dados de neurônios visuais utilizando estímulos mais próximos dos encontrados em ambientes naturais.

Com este sistema, será possível estudar regiões do espaço visual da mosca que estímulos artificiais (utilizados atualmente no laboratório) não permitem, devido às suas limitações no que diz respeito a luminância, ao contraste, a velocidade, a taxa de *refresh* vertical, a resolução das imagens e a abrangência do campo visual.

O sistema proposto irá suprir uma grande necessidade na neurociência, proporcionando condições para o estudo do sistema visual diante de imagens mais próximas daquelas encontradas em ambientes mais reais, viabilizando pesquisas inéditas no âmbito internacional.

Podem-se resumir os objetivos deste trabalho nos seguintes tópicos:

1–Desenvolvimento do sistema óptico para geração de estímulos visuais naturalísticos para moscas.

3–Validação do novo sistema através da comparação do sistema óptico com o sistema de geração de estímulo, já existente no laboratório, que utiliza display com deflexão eletrostática.

2–Aquisição, processamento digital e análise dos dados neurais obtidos nos experimentos.

O sistema proposto neste trabalho permitirá também a geração de estímulos complexos com múltiplas camadas (com controle independente) com a possibilidade de realizar o efeito de zoom, sendo sua luminância controlada eletronicamente.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Características do Sistema Visual da Mosca

Moscas em geral são conhecidas pela sua agilidade durante o voo e pela realização de manobras acrobáticas e têm sido realizados vários tipos de estudos com a finalidade de conhecer os princípios básicos da aerodinâmica de voo desses insetos.

Cada olho da mosca é formado por milhares de estruturas individuais chamadas de omatídeos, Figura 3.1.1.

Cada omatídeo possui oito fotodetectores, R1-R8, que são sensíveis a comprimentos de onda na região ultravioleta, azul e verde (Beersma et al., 1977).

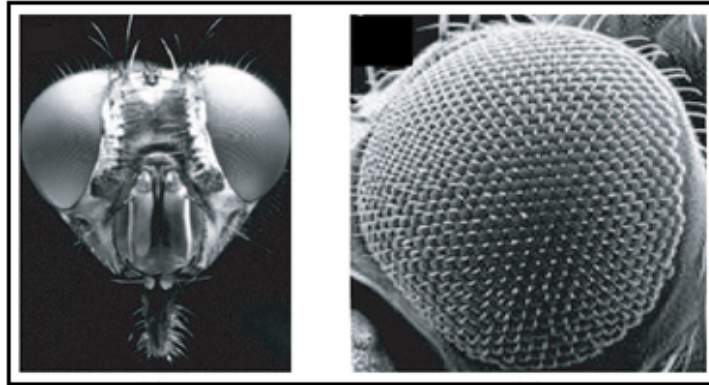


Figura 3.1.1. Imagem do olho composto das moscas

Quando a luz incide em um fotodetector é liberada uma quantidade de neurotransmissores que, através de alterações da condutividade da membrana celular, transformam os sinais visuais em sinais eletrofisiológicos.

Os sinais de cada fotodetector são transmitidos para ao cérebro passando pela lâmina, medula, lóbula e em seguida pela placa lobular (Figura 3.1.2).

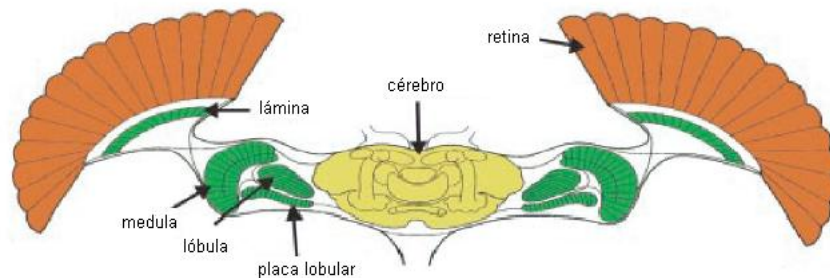


Figura 3.1.2. Esquemático das partes constituintes do sistema visual da mosca

Para realizar a detecção de movimento, as células (neurônio) da placa lobular são agrupadas em classes, de acordo com sua resposta, podendo ser sensíveis a movimentos horizontais ou verticais e responder através de potenciais de ação, aumento gradual do potencial da membrana ou uma mistura dos dois últimos, entre outros.

A detecção de movimento é a chave do processamento visual nos animais, nas moscas ela é realizada em alguns milissegundos (Poggio; Reichardt, 1976) e supera em muitos aspectos o sistema de locomoção e de detecção de movimentos realizados eletronicamente (Franceschini et al., 1992; Srinivasan et al., 1997).

Para ser possível estudar a influência do sistema visual no seu comportamento durante o voo é necessário utilizar métodos com alta resolução temporal, angular e espacial de forma a obter informações de como este processo é realizado.

Além disso, torna-se necessário o desenvolvimento de novos algoritmos e modelos para permitir o estudo da detecção de movimento biológico (Franceschini et al., 1992; Srinivasan et al., 1997).

O registro dos dados de neurônios sensíveis a movimentos fornece várias evidências da utilização de um modelo considerado tradicional (mencionado no próximo subitem) utilizado na detecção de movimento pelos sistemas biológicos.

### **3.2 Modelos Neurais**

Vários algoritmos e modelos para detecção de movimentos em sistemas biológicos foram propostos em literaturas, tanto de visão computacional quanto de biologia (Egelhaaf; Borst, 1989; Santen; Sperling, 1984).

No entanto, existem muitas evidências, obtidos de experimentos eletrofisiológicos e comportamentais que comprovam que o detector de Reichardt pode ser utilizado para modelar características dos neurônios que formam o sistema de detecção de movimento (Dror, 1998).

Este modelo possibilitou a construção de sistemas de visão artificial inspirados na detecção de movimento de sistemas visuais de insetos por pesquisadores em robótica.

Estes sistemas possuem um conjunto de circuitos analógicos e digitais (FPGAs) para estimar velocidade tendo normalmente o detector Reichardt como modelo (Andreou; Strohhahn, 1990; Sarpeshkar et al., 1993, 1996).

No caso de vertebrados, ainda existem algumas lacunas a respeito de como a detecção de movimentos é realizada, porém tem sido aplicado com sucesso variantes do detector de Reichardt e

modelos matemáticos equivalentes para realizar esta tarefa (Santen; Sperling, 1984, 1985; Adelson; Bergen, 1985).

O detector de Reichardt (Figura 3.2.1a) baseia-se fundamentalmente na multiplicação do sinal de dois fotodetectores vizinhos, sendo que o último é defasado através de um filtro passa-baixa.

A Figura 3.2.1b mostra variantes do detector de Reichardt, utilizando filtros passa-alta nas entradas para evitar a propagação de sinais CC, fazendo com que este sistema seja sensível a apenas variação de intensidade luminosa gerada por objetos em movimentos (Alvarez, 2005).

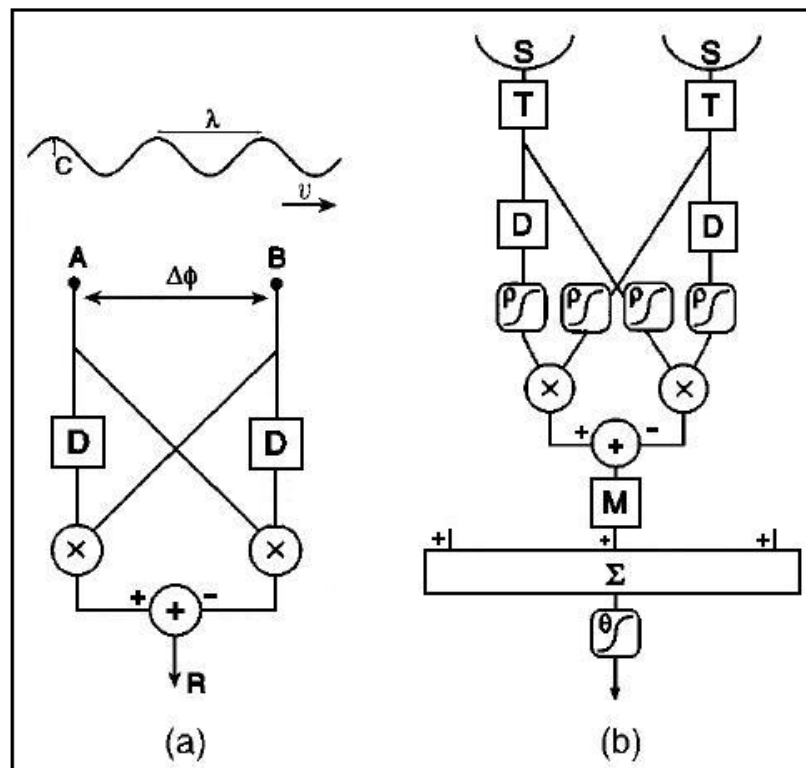


Figura 3.2.1. Detector de Reichardt e suas variantes

É importante observar que as imagens naturais são altamente previsíveis e sistemas visuais biológicos tiram proveito disso para detectar movimentos de forma precisa (Laughlin, 1983, 1994).

Estudos mostram que enquanto o contraste de cenas naturais varia em diferentes partes do espectro eletromagnético (Wilson, 1978), a distribuição das frequências espaciais praticamente não varia (Páragga et al., 1998).

Por isso, o estudo de sistemas sensoriais utilizando estímulos naturalístico controláveis em laboratório possibilitará novas investigações neste campo de pesquisa.

### 3.3 Sistemas Geradores de Estímulos Visuais

Devido à alta sensibilidade do sistema visual das moscas, existem várias limitações para se gerar imagens utilizando monitores de vídeo convencionais para estudar a informação contida no seu duto óptico.

Estas limitações fazem com que experimentos para o estudo do sistema visual sejam realizados utilizando estímulos visuais muito mais simples se comparado com os encontrados em condições naturais.

O efeito da persistência do fósforo dos monitores e a taxa de *refresh* vertical afetam a imagem apresentada pelo TRC quanto ao brilho e a resolução das imagens.

Apesar das dificuldades mencionadas anteriormente, TRCs com deflexão eletrostática conseguem apresentar imagens na taxa de varredura vertical até de 500Hz, adequada para moscas, e são muito utilizados para realizar pesquisas em neurociência atualmente.

Como exemplo de um sistema utilizando TRCs para geração de estímulos visuais pode-se citar o Picasso (Figura 3.3.1a), que é um sintetizador de imagens que utiliza tubo de raios catódicos com deflexão eletrostática para apresentar padrões de imagens a uma taxa de 500Hz.

A Figura 3.3.1b mostra uma imagem gerada por este sistema, apresentado em um monitor Tectronix 608, sendo largamente utilizado até hoje por laboratórios de pesquisa nesta área (Borst et al., 2003; Warzecha; Egelhaaf, 1998; Farrow; Borst, 2005).

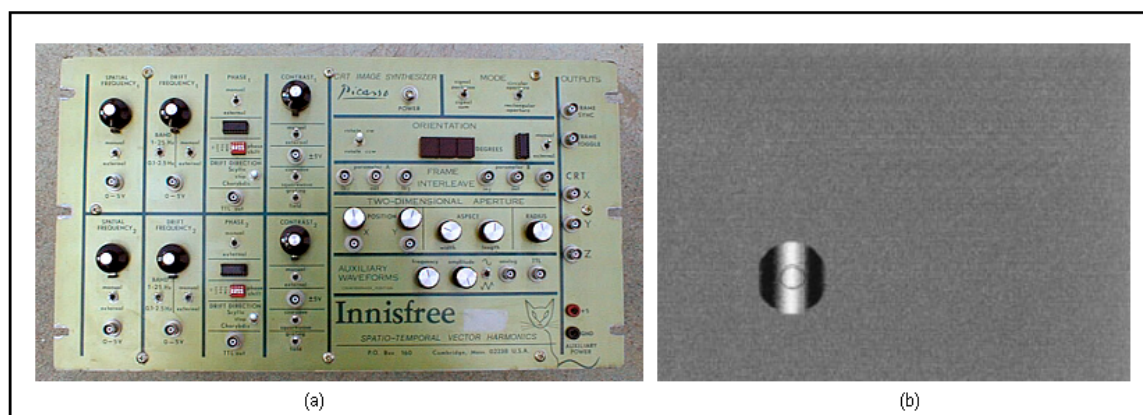


Figura 3.3.1 Picasso

A implementação de painéis de leds foi uma alternativa encontrada por vários pesquisadores para eliminar o problema da taxa de refrescamento, porém estas tecnologias possuem limitações específicas de cada projeto, que precisam ser levadas em conta ao realizar os experimentos in vivo (Zelev, 2005).

Nos laboratórios de M. Dickinson, CalTech , foi implementado o “*Fly-O-Vision*” que é um sistema que utiliza como display uma matriz de leds controlados por microcontroladores, que os acionam individualmente e controlando a intensidade luminosa de cada um deles. (Figura 3.3.2).

A taxa de atualização das imagens deste sistema depende do número de níveis de intensidade luminosa desejado dos leds. Com sete níveis de verde este sistema pode operar a uma taxa de até 570Hz, porém gera imagens com uma baixa resolução (Dickinson, 2007).

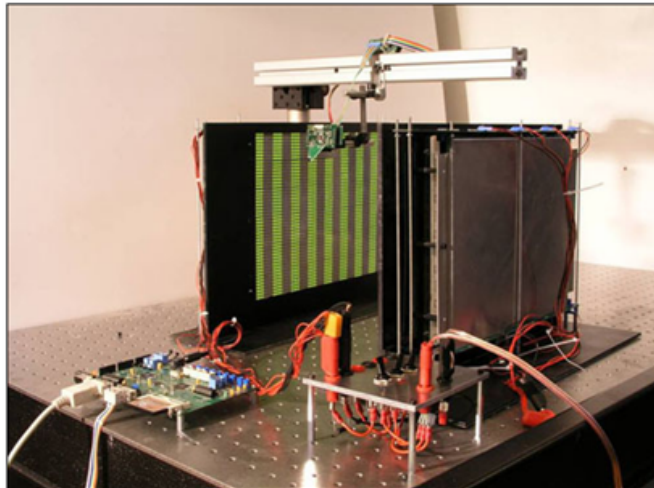


Figura 3.3.2. Fly-O-Vision

FliMax (Figura 3.3.3) é outro sistema de geração de estímulo visual da Universidade de Groningen (Lindemann, 2003), que possui um display com 7000 leds.

Este sistema utiliza circuitos *sample-and-hold* para converter o sinal de uma placa VGA que controla o painel de leds.

A vantagem do FliMax é que, ao contrário dos TRCs, a apresentação de uma imagem constante não depende da taxa de *refresh*, a taxa de atualização da imagem apresentada chega a 370Hz e a imagem gerada por ele abrange um campo visual maior com frequências na faixa do verde.

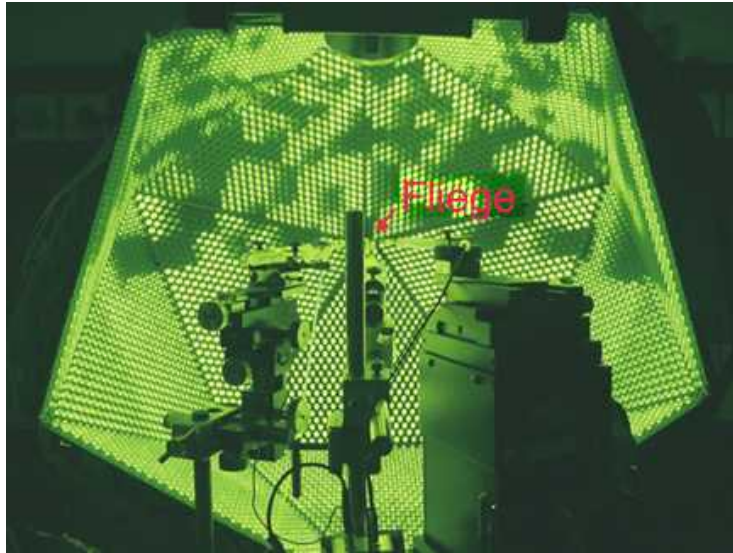


Figura 3.3.3 FliMax

Os sistemas mencionados anteriormente ainda não conseguem gerar estímulos visuais complexos e naturalísticos, por este motivo os laboratórios de neurociência têm procurado obter meios que possibilitem a análise do sistema visual utilizando estímulos que se aproximem aos que os seres vivos estão submetidos durante o seu movimento na natureza.

Apesar da dificuldade em registrar sinais eletrofisiológico em animais se movendo livremente a uma velocidade alta, a NEC Research Institute, em Princeton, criou um sistema que realiza o movimento da mosca simulando as oscilações que ela teria se estivesse em vôo livre para obter experimentos com estímulos naturais (Lewen; Bialek; Steveninck, 2001).

Neste sistema é inserido um eletrodo na região da placa lobular da cabeça da mosca e ela é colocada em um suporte acoplado a motor de passo que a movimenta em um ambiente externo (Figura 3.3.4).

Este sistema viabiliza o estudo do processamento dos sinais sensoriais do cérebro em função de estímulos visuais muito mais próximos de situações reais.



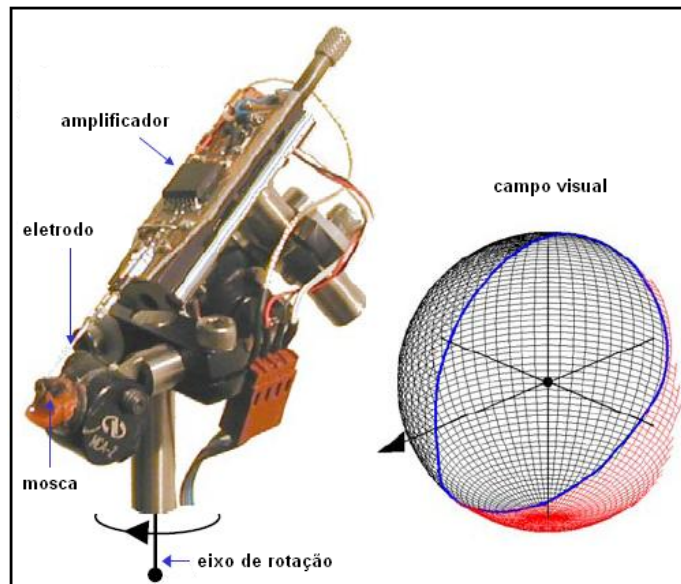


Figura 3.3.4. Sistema de simulação de vôo livre

Apesar de ser um sistema inovador, este sistema não leva em consideração o movimento de translação e com ele não é possível repetir mais de uma vez o mesmo experimento, pois o estímulo depende de fatores não controlados (como nuvens, ventos e sol) já que é realizado em ambiente externo ao laboratório.

### 3.4 Processamento de Sinais Eletrofisiológicos

O interesse da neurociência não está apenas em descobrir qual modelo melhor descreve o sistema de detecção e sim como a codificação e a decodificação neural ocorre.

A codificação consiste em relacionar as seqüências de *spikes* com o estímulo sensorial, e a decodificação consiste em conseguir reconstruir o estímulo a partir da informação temporal contida nos pulsos (Strong, 1998).

#### 3.4.1 Resposta Neural e Taxa de Disparo

Existem vários métodos numéricos utilizados para realizar a análise dos dados neurais com o objetivo de investigar o processo de codificação e decodificação.

Durante um experimento, a resposta neural pode ser caracterizada como uma seqüência de instantes de tempo  $t_i$  que ocorrem os disparos de uma quantidade  $n$  de *spikes*, onde  $i$  representa a ocorrência de cada *spike* ( $i = 1, 2, \dots, n$ ).

A função da resposta neural dos  $n$  *spikes* ocorrido em um experimento de duração  $T$  pode ser dada como sendo a soma de funções impulsos,  $\delta$ , nos instantes  $t_i$ .

$$\rho(t) = \sum_{i=1}^n \delta(t - t_i)$$

Como um mesmo estímulo visual normalmente produz respostas neurais levemente diferentes, o mesmo experimento é repetido várias vezes para se utilizar a média da resposta neural,  $\langle \rho(t) \rangle$ , com as várias repetições realizada.

Com a resposta neural média pode-se calcular a probabilidade,  $r(t)$ , de um *spike* ocorrer em um intervalo de tempo entre  $t$  e  $t + \Delta t$ , sendo que  $\Delta t$  é o instante de tempo que pode ocorrer apenas um *spike*.

$$r(t)\Delta t = \int_t^{t+\Delta t} \langle \rho(t) \rangle d\tau$$

Estas equações conseguem fornecer uma idéia da taxa de disparo de um neurônio em função de um dado estímulo, fornecendo indícios de como analisar como o neurônio realiza a codificação.

### 3.4.2 Função de Correlação

Para analisar o procedimento complementar, o da decodificação, é necessário caracterizar uma função que relacione a velocidade do estímulo  $s(t)$  com a seqüência de *spikes*.

Esta relação,  $C(\tau)$ , pode ser obtida calculando-se a média do valor do estímulo em um intervalo de tempo  $\tau$  antes do neurônio disparar, a Figura 3.4.1 ilustra os procedimentos computacionais para realizar estes cálculos (Rieke, 1997).

Para cada spike ocorrido o valor da velocidade do estímulo,  $s(t)$ , durante um intervalo de tempo  $\tau$  que precede esse disparo é registrado.

Estes valores obtidos são somados e divididos pelo número de *spikes*,  $n$ , que ocorreram durante o experimento, fornecendo uma idéia de como deve comportar um estímulo para que um *spike* seja disparado.

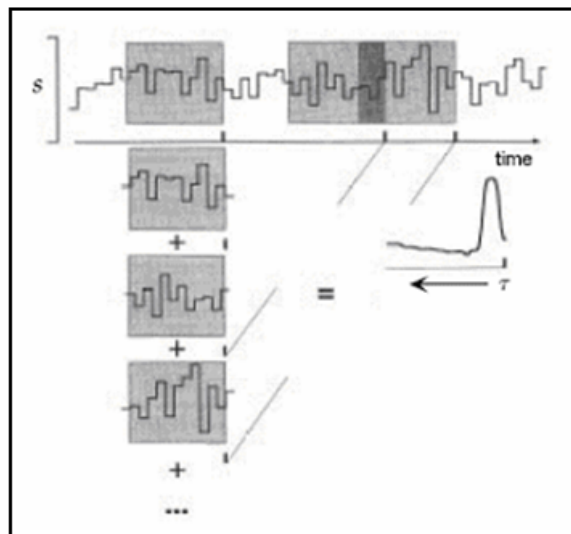


Figura 3.4.1. Cálculo da função de correlação resposta-estímulo

A equação que fornece  $C(\tau)$  mostra que existe uma correlação entre a resposta neural,  $r(t)$ , e o estímulo,  $s(t)$ , ou também entre a probabilidade de ocorrer o spike,  $r(t)$ , e o estímulo.

$$C(\tau) = \left\langle \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n s(t_i - \tau) \right\rangle = \frac{1}{\langle n \rangle} \int_0^T \langle r(t) \rangle s(t - \tau) dt = \frac{1}{\langle n \rangle} \int_0^T r(t) s(t - \tau) dt$$

A função de correlação é bastante útil para avaliar como duas quantidades que variam em função do tempo estão relacionadas entre si (Dayan, 2001).

Esta forma de analisar os dados possibilita estimar diretamente o comportamento do estímulo a partir de uma seqüência de spikes, porém ela não consegue quantificar qual a fração dos dados neurais está relacionada ao sinal e qual está relacionada a ruídos inerentes ao sistema biológico.

### 3.4.3 Teoria da Informação

A teoria da informação, apesar de ter surgido da necessidade em solucionar problemas na transmissão de sinais em sistemas de comunicação (Shannon, 1948), pode ser utilizada para calcular a informação contida no duto neural (Brenner et al., 2000; Steveninck et al., 1997).

Um sistema de comunicação (Figura 3.4.2) é composto por uma fonte de informação, um transmissor, um canal, um receptor e um destinatário.

A fonte produz a informação que será comunicada ao emissor. O emissor codifica esta informação para que seja transmitida pelo canal que o leva até o receptor e este último realiza a decodificação do sinal para fornecer a informação ao destino.

A mensagem recebida pelo destinatário não é idêntica à mensagem inicial, porque no decorrer deste processo ocorrem distorções ou adições ao sinal que são chamadas de ruído.

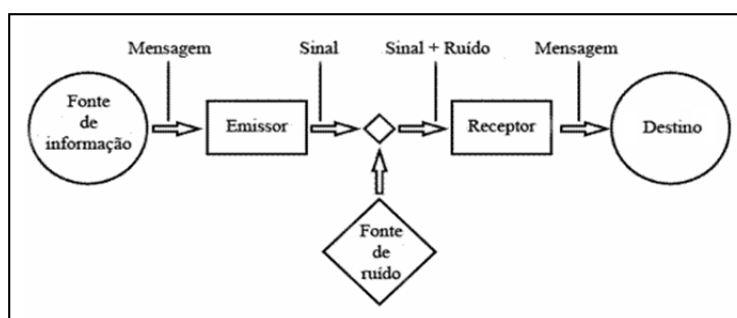


Figura 3.4.2. Sistema de comunicação de acordo com a teoria da informação

Nos experimentos em neurociência este modelo é utilizado fazendo-se a seguinte analogia:

A informação que será transmitida é a velocidade da imagem, a seqüência de pulsos produzida pelo neurônio é a mensagem codificada.

O cérebro da mosca é ao mesmo tempo o que realiza a decodificação do sinal transmitido e o destinatário da mensagem. Além disso, existe o ruído intrínseco de todo sistema biológico, do micro eletrodo, interferência devido à atividade de neurônios vizinhos e a alta impedância da fonte do sinal que faz com que um mesmo estímulo gere seqüências de pulsos diferentes.

Este processo normalmente é estocástico e, portanto, a relação entre a mensagem produzida pela fonte e a recebida pelo destinatário é governada por uma distribuição de probabilidade.

Para realizar a análise dos dados na neurobiofísica utilizando a teoria da informação se calcula a informação mútua, ou seja, a correlação entre a velocidade do estímulo utilizado e a seqüência de spikes emitida pelo neurônio no mesmo instante (Steveninck et al., 1997).

O método para se calcular a informação mútua é descrito a seguir:

A resposta neural é discretizada em janelas de 2ms, chamados de bins, e se representa a ocorrência de um spike em um bin com o número “1” e a não ocorrência com o número “0”. Esta seqüência binária é dividida em “palavras” compostas por T bins para se calcular as distribuições de probabilidade de cada uma,  $P(R)$ , e as distribuições das palavras dado o estímulo,  $P(R|E)$ .

Com estas distribuições podem-se obter três relações de acordo com a teoria da informação de Shannon:

- A entropia total,  $H(R)$ , quantifica a variabilidade do trem de pulsos ao longo do tempo e determina a capacidade do trem de pulsos de transmitir informação.

$$H(R) = - \sum_i P(R_i) \log_2 P(R_i)$$

- A entropia do ruído,  $H(R|E)$ , que mede a reprodutibilidade da resposta

$$H(R|E) = - \sum_i \sum_j P(R_i, E_j) \log_2 P(R_i|E_j)$$

- A informação mútua,  $I(R;E)$ , é a diferença entre a entropia total e a do ruído

$$I(R; E) = \sum_i \sum_j P(R_i, E_j) \log_2 \frac{P(R_i, E_j)}{P(R_i)P(E_j)} = H(R) - H(R|E)$$

Finalmente, a eficiência da codificação do trem de pulsos é a fração da entropia total que é utilizada para fornecer informação (Lewen et al., 2001; Strong et al., 1998).

$$\xi = \frac{I_T(R, E)}{H(R)}$$

A eficiência fornece um valor da fração da resposta neural que está relacionada ao sinal.

Dados experimentais mostram que quando se utiliza estímulos naturais a eficiência é consideravelmente maior, indicando que o neurônio responde de uma forma mais confiável (Reike, 1997), fornecendo uma maior repetibilidade nos experimentos realizados nos laboratórios.

### 3.4.4 Processamento de Sinal Neural e Algoritmos de Programação

O tratamento do sinal utilizando algoritmos de programação associados com transformadas do sinal são as principais ferramentas para se realizar o processamento analógico digital requerido em pesquisas em neurobiofísica, sendo fundamental o domínio destas técnicas.

Segue abaixo um esquema típico de como ocorre a aquisição e o processamento analógico/digital na biofísica está mostrada na Figura 3.4.3.

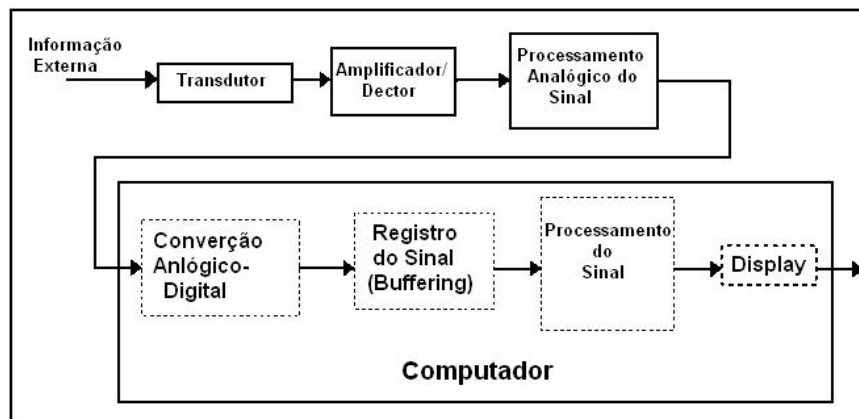


Figura 3.4.3. Processamento Analógico/Digital

Esta técnica de processamento pode possuir vários níveis de sofisticação, porém ela basicamente consiste em conseguir registrar uma cópia digital do sinal analógico obtido do meio externo para ser analisado.

Para a digitalização do sinal analógico é necessário realizar a amostragem do sinal levando em conta o espectro de frequência do sinal original e obedecer ao Teorema da Amostragem de Nyquist para ser possível recuperar o sinal sem distorção.

Depois de digitalizado, grande parte da análise do sinal não é realizado em tempo real, utilizando funções que irão modificar os dados de forma conveniente, como exemplo os filtros, ou funções, como a Transformada de *Fourier*, utilizadas para analisar o espectro de frequência do sinal.

As transformadas podem ser tratadas como funções que re-mapeiam os dados originais de forma a se obter mais informações sobre a natureza do sinal e normalmente estas transformadas permitem realizar a correlação do sinal analisado com um outro tipo de função de interesse.

Se, por exemplo, esta função for a função impulso se obterá a Convolução do sinal, indicando como o sistema responde tendo como entrada uma forma de onda infinitamente pequena.

A Convolução é um conceito importante na análise de sistemas, podendo ser considerada no domínio do tempo equivalente à Função de Transferência no domínio da frequência e é utilizada para calcular a resposta de um sistema em função da entrada.

Para implementar as funções mencionadas anteriormente armazena-se os dados em vetores, facilitando a utilização de ferramentas computacionais para realizar a análise ou a modificação dos dados.

A utilização de softwares como MATLAB em conjunto com seus *toolboxes* tem sido uma ferramenta essencial e amplamente utilizada para se realizar os algoritmos de programação e para realizar as funções que viabilizam a análise dos dados mencionados neste item.

## MATERIAIS E METODOS

O item a seguir mostra como foi realizado a montagem e a validação de todas as partes que constitui o sistema de geração de estímulos visuais naturalísticos.

Foi necessário montar um módulo de iluminação, com um dimer pra controlar a sua luminosidade, adaptar um motor pra movimentar a imagem do sistema, em conjunto com um amplificador de potência pra receber o sinal do hardware dedicado do sistema já existente no laboratório para que depois disso fosse possível montar o sistema por completo.

### 4.1 Projeto e montagem do sistema óptico

O sistema atualmente em uso no Dipterlab-IFSC movimenta os estímulos visuais apresentados por um monitor de deflexão eletrostática (Figura 4.1.1) em função um determinado sinal de controle (Figura 4.1.2), que são sinais analógicos fornecidos pelo hardware dedicado.

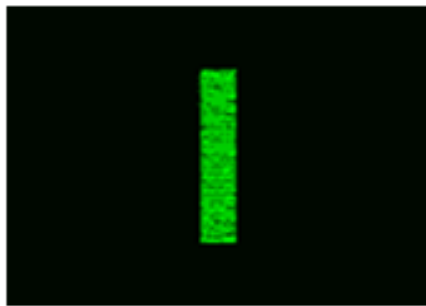


Figura 4.1.1. Imagem vista no display

O resultado é um estímulo com imagens de baixa resolução, 256x256 pixels, usualmente um conjunto de barras verticais paralelas de baixo contraste.

O sinal de estímulo utilizado (Figura 4.1.2) é composto de segmentos de dados correspondentes a um intervalo de tempo de 20s. Sendo que os primeiros 10s fornecem posições repetidas e os últimos 10s fornecem posições aleatórias para evitar que ocorra acomodação visual por parte da mosca.

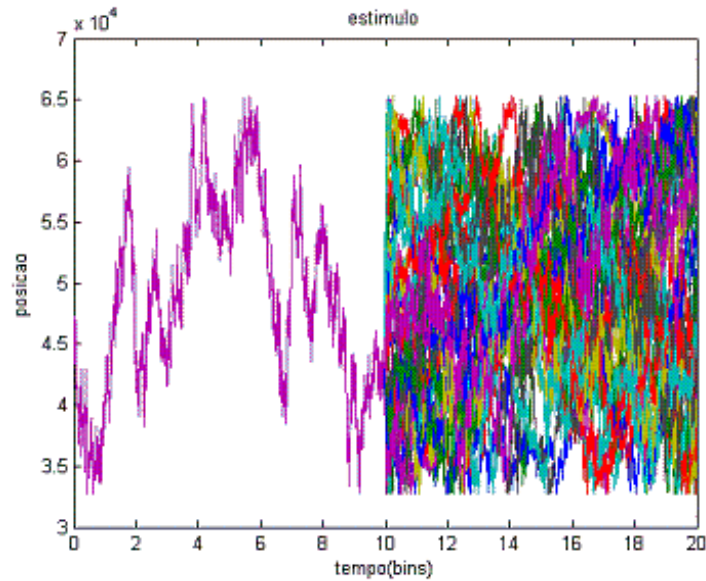


Figura 4.1.2. Sinal de estímulo utilizado nos experimentos

Sinais neurais típicos, capturado pelo microeletrodo e a saída do discriminador do sistema são mostrados na Figura 4.1.3.

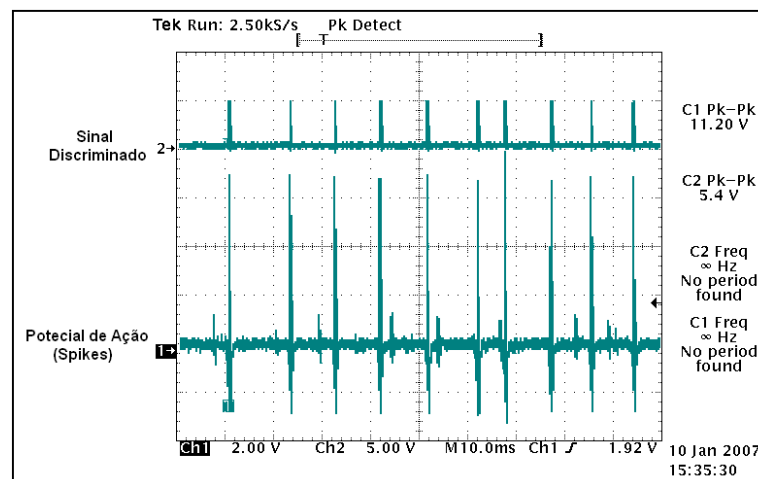


Figura 4.1.3. Sinal obtido na saída do head-stage e na saída do discriminador

No sistema óptico de geração de estímulos, desenvolvido neste trabalho (Figura 4.1.4), o monitor e o sistema de vídeo foram substituídos por um sistema de projeção de slides, um conjunto de lentes, espelhos e um motor do tipo linear.



A imagem no slide é iluminada pelo projetor, passa pelas lentes e pelos espelhos, que se movimentam através dos motores e é projetada em um anteparo translúcido, que exerce a função do display.

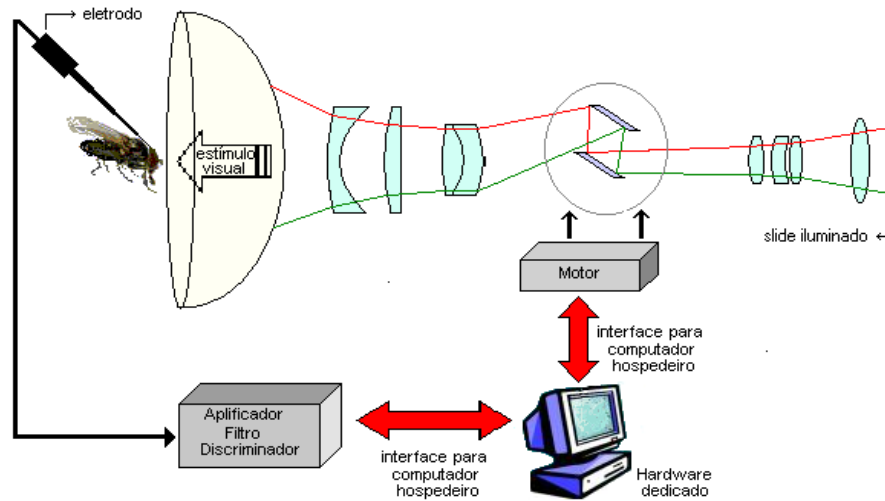


Figura 4.1.4. Sistema Óptico de Geração de Estímulos Visuais

O mesmo sinal de estímulo utilizado pelo sistema de vídeo no monitor é enviado ao motor por um circuito amplificador de potência para movimentar a imagem projetada.

#### 4.1.1 Módulo de Iluminação

O módulo de iluminação consiste basicamente em uma caixa com uma lâmpada de 600W e duas lentes condensadores (Figura 4.1.5).

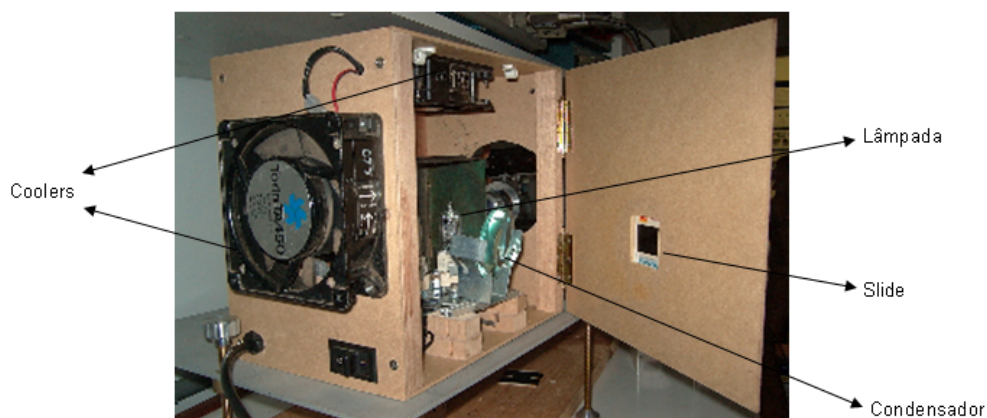


Figura 4.1.5. Sistema de iluminação.

Além disso, o sistema está equipado com um sistema de ventilação constituído por dois *coolers* e um termostato para que os ventiladores continuem funcionando mesmo depois que a lâmpada é desligada.

A luminância da imagem é um parâmetro muito importante nos experimentos em neurociência, por este motivo foi projetado um dimer conforme o circuito da Figura 4.1.6 para realizar o controle da potência fornecida à lâmpada que ilumina o slide, permitindo o ajuste da luminância para cada experimento.

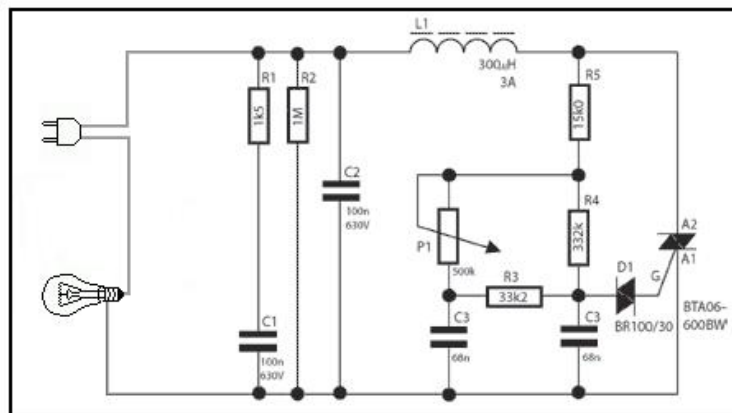


Figura 4.1.6. Esquemático do Dimer

O projeto e a confecção das lentes foram executados pela oficina de ótica do IFSC após ter sido realizado o levantamento das especificações necessárias ao projeto.

#### 4.1.2 Módulo de Movimentação

Para realizar o movimento horizontal da imagem foi utilizado motor linear ou *voice coil*, que posiciona o cabeçote magnético nos discos rígidos utilizados em microcomputadores atualmente.

A Figura 4.1.7 mostra como este motor foi adaptado de forma que seu braço, em conjunto com um espelho possa ser utilizado para realizar a deflexão do espelho no sistema.

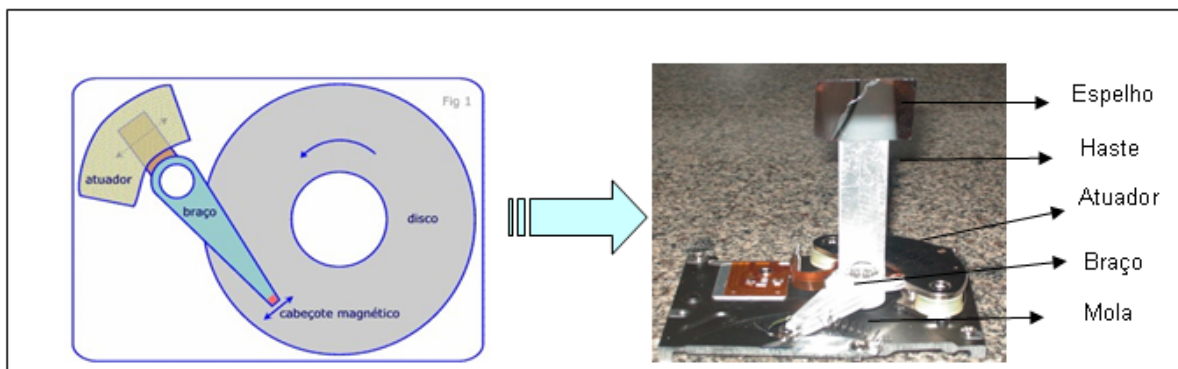


Figura 4.1.7. Motor utilizado para realizar a deflexão do espelho

A mola permite que o espelho gire em torno do seu próprio eixo, em função da tensão aplicada à entrada do motor, fazendo que o movimento da imagem que incide neste espelho seja controlado por um sinal elétrico.

A Figura 4.1.8 mostra o esquema do circuito amplificador utilizado para alimentar e controlar o movimento do motor .

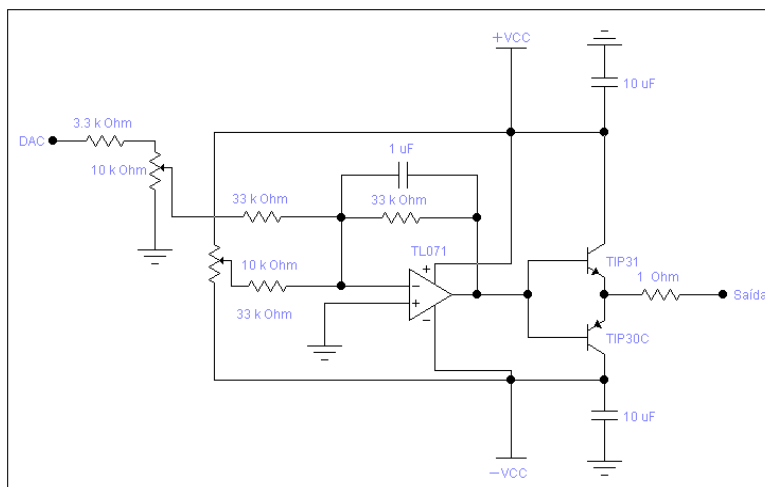


Figura 4.1.8. Circuito amplificador para alimentação do motor .

Este circuito possui a função de amplificar o sinal de estímulo, enviado pelo hardware dedicado, ajustando a tensão de offset (que determina a posição de repouso do espelho) e a amplitude do sinal (que determina a excursão do espelho).

Mesmo tendo um grande consumo de corrente, este circuito amplificador de potência mostrou ser o mais indicado para controlar o motor neste sistema por ser um circuito robusto e estável.

Se, por exemplo, o motor fosse controlado por pwm, estaria sendo inserido no sistema uma fonte indesejável de ruído, devido ao chaveamento em alta frequência existente nesse tipo de controle e devido a sua proximidade ao experimento.

Para se obter estímulos naturalísticos mais complexos, com o movimento de objetos controlados de maneira independente, foi realizada a montagem de mais um conjunto motor-espelho-driver com o objetivo de se obter no anteparo duas camadas de projeção de imagens com movimentos independentes entre si.

Uma das camadas terá a projeção de cenas encontradas no meio externo e a outra será constituída por projeção de hologramas utilizando laser verde, que poderá excursionar ao longo de toda a imagem projetada, segundo o sinal de controle do estímulo.

A motivação inicial para a implementação de uma segunda camada de projeção será conseguir simular, por exemplo, a aproximação de predadores ou também simular o movimento realizado em vôos de machos perseguindo fêmeas.

## 4.2 Metodologia Utilizada para Obter Parâmetros dos Motores

Foi realizada a adaptação de dois motores retirados de discos rígidos SEAGATE mod-ST33240A e foram medidas a resposta em frequência e a velocidade do sistema mecânico composto por esta montagem.

O procedimento para medir os parâmetros dos motores está esquematizado na Figura 4.2.1.

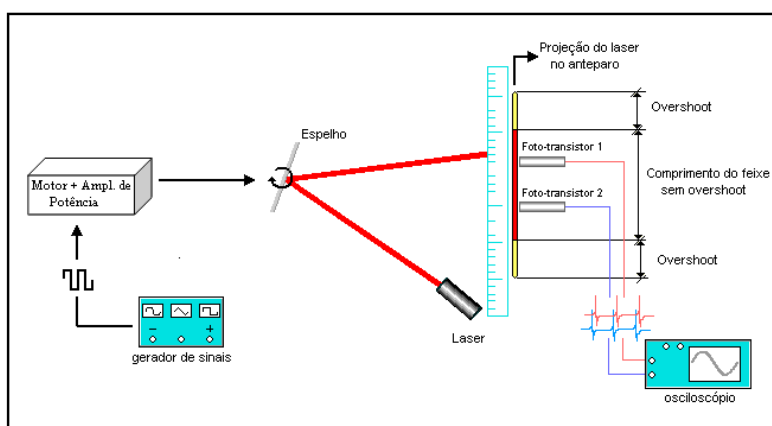


Figura 4.2.1. Esquema do experimento para obter os parâmetros dos motores

Para obter a resposta em frequência dos motores, um feixe de laser foi projetado no espelho fixado nos motores e refletido para um anteparo.

Utilizando um gerador de sinais (Tektronix CFG253) foi aplicado um sinal senoidal no circuito amplificador e a extensão da varredura da faixa luminosa,  $L$ , projetado pelo laser no anteparo foi medida para diferentes frequências.

Os cálculos das velocidades foram realizados colocando na entrada do circuito amplificador um sinal de onda quadrada e fazendo com que o feixe de laser passasse por dois fotodetectores mostrados na Figura 4.2.1

Através do osciloscópio TektronixTDS524A, foi obtido o intervalo de tempo que o laser leva para passar entre pelos dois fotodetectores (Figura 4.2.2) e com esses dados é possível calcular a resposta do sistema dada pela velocidade angular máxima em função da excursão do motor.

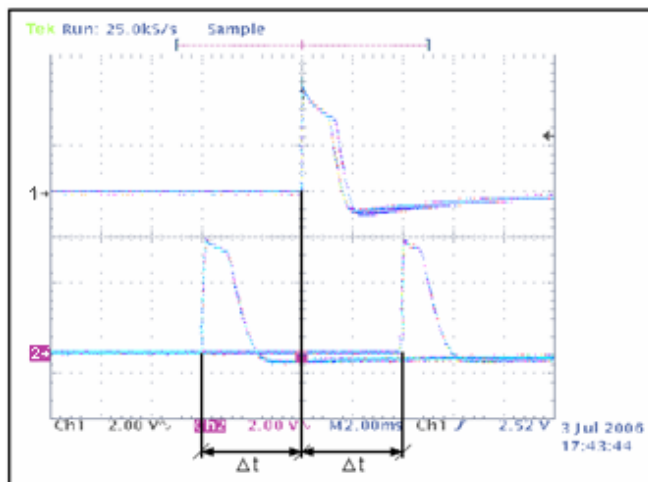


Figura 4.2.2. Tela capturada do osciloscópio para obter o intervalo de tempo  $\Delta t$

Na figura acima, o canal 1 e 2 mostram o sinal de saída de cada circuito fotodetector, com o trigger do osciloscópio no canal 1.

O primeiro pulso do canal 2 corresponde ao instante em que o sinal de onda quadrada está na subida e o segundo pulso corresponde ao instante em que acontece a descida.

### 4.3 Metodologia para validação do Sistema Óptico

A validação do novo sistema foi realizada tendo como parâmetro o gerador de estímulos visuais utilizado atualmente pelo laboratório do IFSC-Dipteralab (o VSGImG que utiliza como display um monitor Tektronix 608).

Para comparar a resposta dos dois sistemas, a mesma imagem colocada na tela do monitor foi impressa num slide e projetada no anteparo do sistema óptico.

Um sinal de estímulo (constituído por ondas quadradas e dente de serra) foi gerado e colocado na entrada dos dois sistemas a fim de que ambos os sistemas mostrem a mesma imagem e a movimento de forma idêntica.

A imagem movimentada passa por um fotodetector, associado a um circuito diferencial nos dois sistemas (Figura 4.3.1).

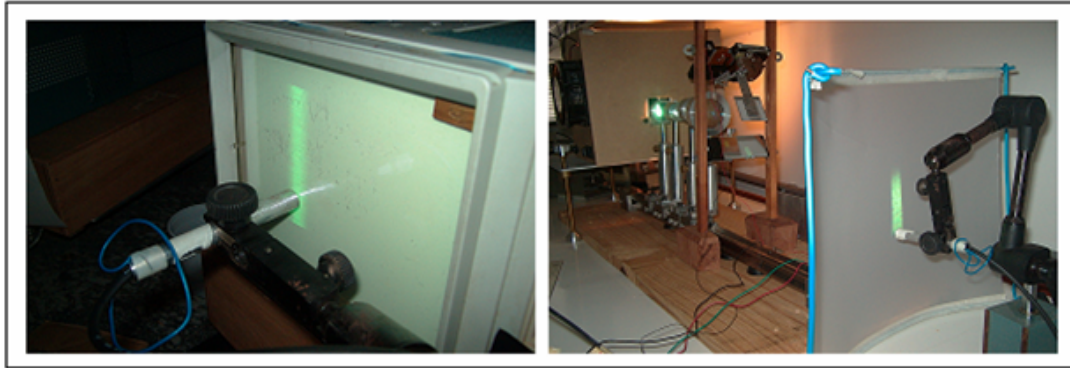


Figura 4.3.1. Foto transistor detectando a movimentação do estímulo nos dois sistemas

Sempre que houver qualquer variação de intensidade de luz incidindo no fotodetector, o circuito dispara um pulso que é registrado pelo módulo de aquisição de dados.

A saída do circuito é monitorada também em tempo real através de um osciloscópio digital Tektronix TDS430A.

A próxima etapa foi substituir o fotodetector pela mosca e foram realizadas aquisições de dados neurais estimulando a mosca visualmente (Figura 4.3.2).

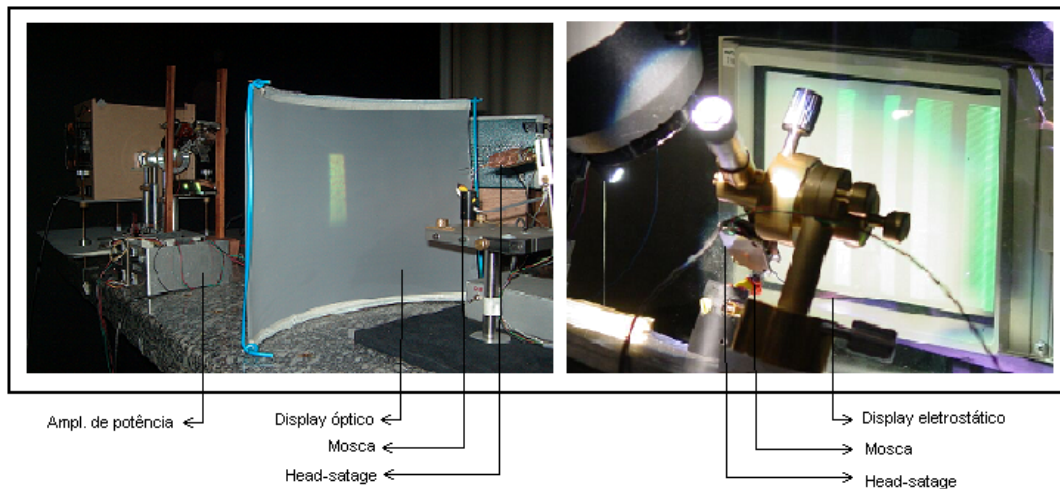


Figura 4.3.2. Aquisição de dados realizados nos dois sistemas

Nestes testes ainda foi utilizada a mesma imagem em ambos os sistemas de geração de estímulo, permitindo assim, a averiguação dos sistemas utilizando dados neurais.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Especificações do Sistema Óptico

#### 5.1.1 Parâmetro de Operação dos Motores Lineares

Foram medidas as distâncias entre os dois fotodetectores e a distância entre o espelho e o anteparo para poder calcular o movimento angular que o espelho sofre quando o laser passa pelos dois fotodetectores.

Os valores obtidos seguem abaixo:

$D = 50\text{cm}$  (distância entre o espelho e o anteparo)

$d = 5\text{ cm}$  (distâncias entre os dois foto transistores)

$\Theta = 2 \arctan[(d/2)/D] = 5,72^\circ$  (movimento angular máximo do espelho)

A Figura 5.1.1 mostra o gráfico da velocidade angular dos dois motores em função da frequência de um sinal senoidal.

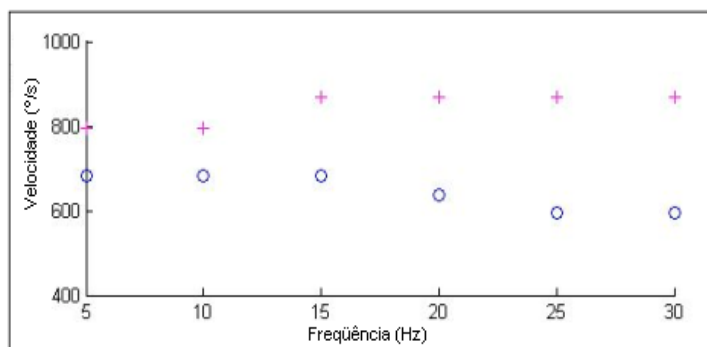


Figura 5.1.1. Velocidade dos motores

Os resultados obtidos com estes testes mostraram que com estes motores será possível estimular a mosca a uma velocidade de até aproximadamente 1000 °/s, que pode ser considerado uma faixa de velocidade adequada para gerar estímulos.

A Figura 5.1.2 mostra a resposta em frequência dos motores, que é o resultado do comprimento da faixa (L) medido ao variar a frequência do sinal que os movimenta.

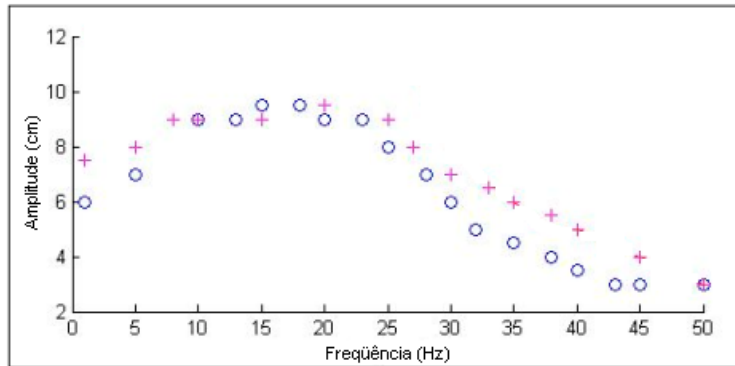


Figura 5.1.2. Resposta em frequência dos motores

Com estes dados pode-se considerar que o sistema responde de uma forma satisfatória. Até uma frequência em torno de 30Hz pode-se considerar que os motores possuem uma resposta linear.

## 5.2 Resposta Obtidas com o Novo Sistema

### 5.2.1 Comparação do Sistema Óptico com o Sistema que utiliza o VSIImG

Para realizar uma análise mais detalhada, utilizando um algoritmo (escrito em Matlab) gerou-se um gráfico do tipo *raster* (Figura 5.2.3), para que seja possível fazer uma análise gráfica durante todo o período em que os sistemas ficaram sujeitos ao estímulo (6 minutos em média).

No *raster*, o spike detectado pelo sistema de aquisição é representado por um ponto azul. A abscissa do *raster* representa o intervalo de tempo de duração do estímulo (20s) e a ordenada representam a quantidade de vezes que este estímulo foi repetido

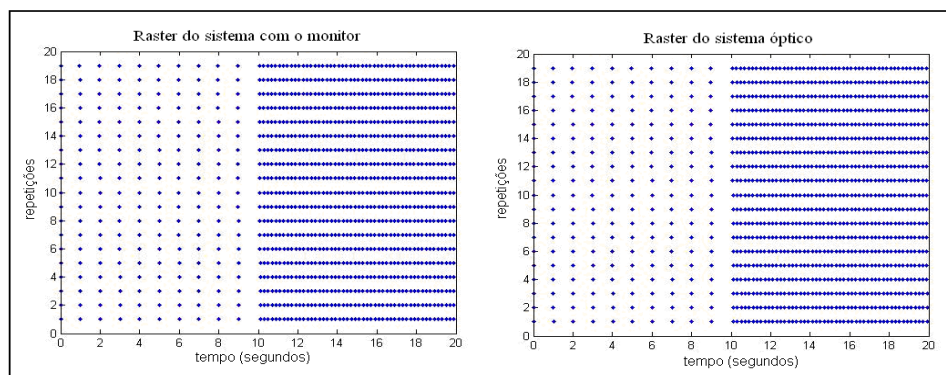


Figura 5.2.3. Gráficos do tipo *rasters* obtidos nos dois sistemas utilizando foto-transistor



A igualdade das respostas geradas pelos dois sistemas, observada nos gráficos do tipo *raster*, mostra que o sistema óptico possui a repetibilidade necessária a todo sistema de geração de estímulos visuais.

Os próximos resultados mostram a comparação dos dois sistemas utilizando dados neurais do neurônio H1 de uma mesma mosca submetida aos dois geradores de estímulos.

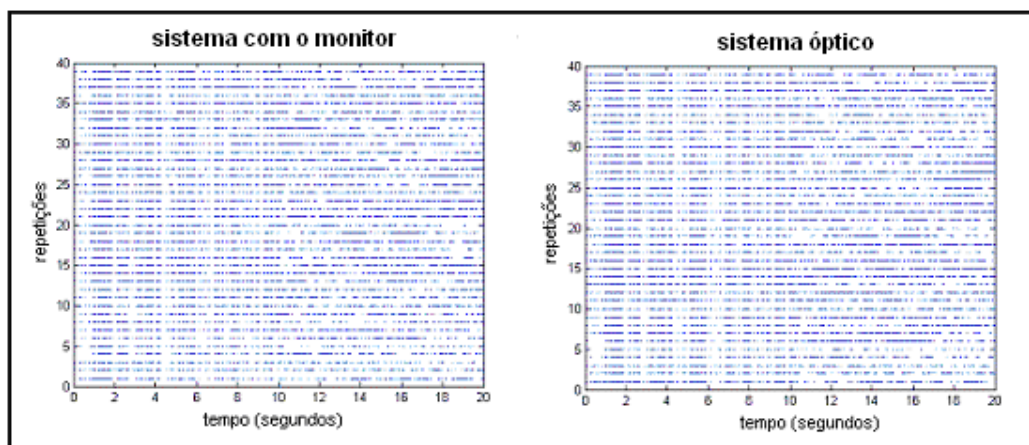


Figura 5.2.4. Comparação dos gráficos tipo *rasters* obtidos nos dois sistemas

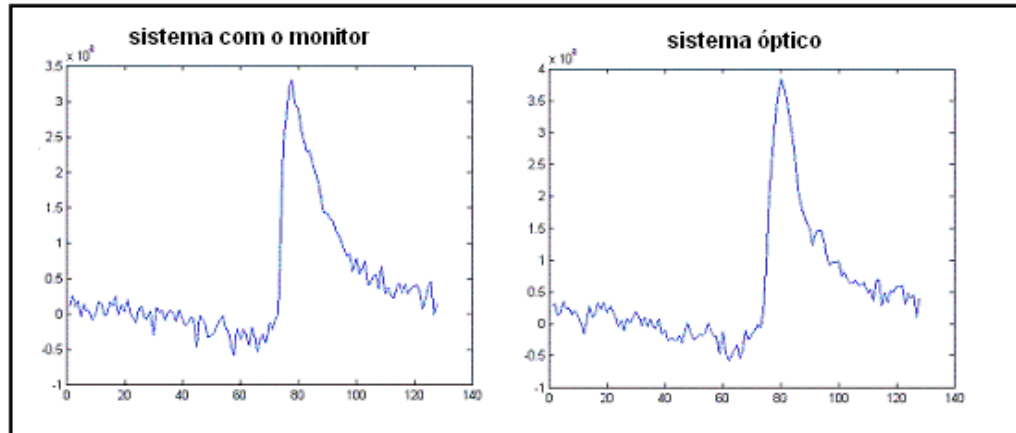


Figura 5.2.5. Comparação da função correlação estímulo-resposta obtida nos dois sistemas

O gráfico do tipo *raster* (Figura 5.2.4) mostra uma coerência nos disparos de spikes nos primeiros 10s (que se repetem durante o experimento), observado pelo alinhamento das colunas em ambos os sistemas e a função de correlação estímulo-resposta, obtido com os dois sistemas (Figura 5.2.5), mostra a semelhança do comportamento do estímulo para que ocorra o disparo de um spike.

Estes resultados indicam que o neurônio fornece o mesmo padrão de resposta quando a mosca é estimulada visualmente de forma idêntica pelos dois sistemas.

## 6. CONCLUSÕES

A comparação das respostas dos dois sistemas possibilitou validar o sistema óptico, permitindo realizar com confiabilidade diversos experimentos com estímulos visuais com uma complexidade bem maior do que os utilizados atualmente nesses tipos de experimentos.

Neste trabalho foi possível mostrar a semelhança entre as respostas de um sistema óptico criado para geração de estímulos visuais naturalísticos com um sistema que utiliza como estímulo visual barras verticais de baixo contraste mostradas em displays que utiliza TRC (largamente utilizado em laboratórios para pesquisa em neurobiofísica).

Os resultados obtidos pela comparação das respostas do sistema visual da mosca, foram praticamente idênticos, validando o protótipo construído e permitiu o início dos experimentos utilizando slides com imagens mais naturais.

Este novo sistema permitiu aquisição das respostas neurais e a sua análise, já em andamento, dos dados obtidos utilizando estímulos mais naturais e complexos de forma inovadora em experimentos de neurobiofísica.

Uma característica muito importante obtida com o sistema óptico é que, além de se obter estímulos visuais de cenas naturais, a imagem gerada pode atingir em média uma luminância dez vezes maior que o sistema que utiliza o TRC (Figura 6).

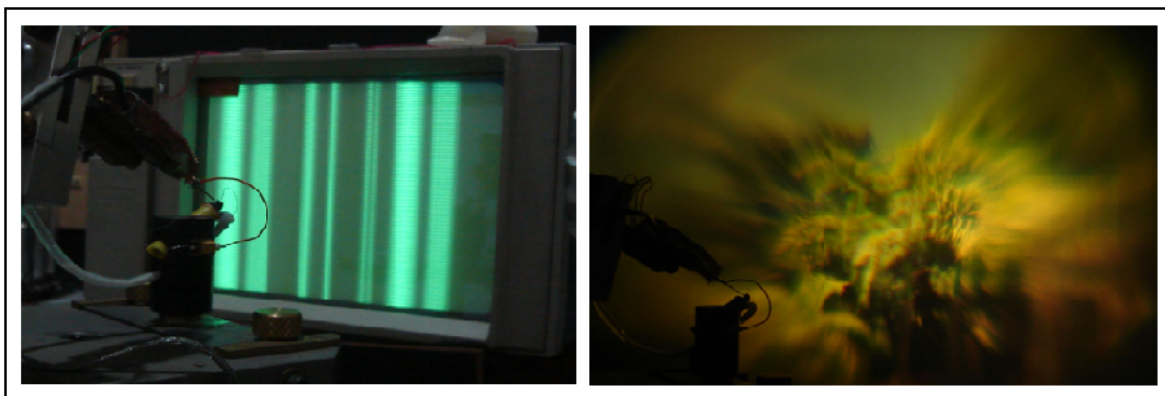


Figura 6. Imagens geradas pelos dois sistemas

Outra característica única neste sistema é a possibilidade de se controlar, durante experimentos in vivo em laboratório, diversos parâmetros tanto do estímulo como do ambiente, tais como luminância das cenas, nível de ruído externo, campo magnético ou qualquer outro elemento distrator.

Com este sistema será possível realizar experimentos só obtidos até então em ambiente externo, com a vantagem de que fatores externos não controlados (como vento e variações de temperatura, que não permitem que os experimentos ao ar livre sejam reproduzíveis) não irão interferir nos resultados obtidos.

Por este motivo, este projeto proporcionará a pesquisa em neurobiofísica possibilidades de experimentos até agora inviáveis pela inexistência de geradores de estímulos visuais com estas características.

## **7. PROJETOS PARA TRABALHOS FUTUROS**

-Inserção de várias layers de projeção com movimentos independente para produzir estímulos naturalísticos mais complexos, compondo cenas com a movimentação de partes de seu conteúdo de maneira independente.

- Produzir sinais de controle multiplexado com o sinal de controle do motor, aproveitando a banda de resposta em frequência do conversor analógico digital, para ampliar a capacidade de geração de sinais a serem utilizados no controle de da intensidade de luz das cenas projetadas e dos lasers que produzirão as novas camadas para a formação de cenas mais aproximadas de um ambiente natural.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, L. O. B. **Desenvolvimento de instrumentação eletrônica para estudos de codificações neurais no duto óptico em moscas.** Dissertação de mestrado, Universidade de São Paulo, Instituto de Física de São Carlos, 2006.
- ADELSON, E. H.; BERGEN, J. R. **Spatiotemporal energy models for the perception of motion.** J. Opt. Soc. Am. A, 2:284, 1985. 99 p.
- ANDREOU, A.; STROHBEHN, K. **Analog VLSI implementation of Hassenstein-Reichardt-Poggio models for vision computation.** Proc. IEEE Symp. Syst., ManCybern, 1990. 707-717 p.
- ALVIDREZ Z. R. **Computational Modeling of Neurons Involved in Fly Motion Detection.** 68f. Master's thesis. Department of Electrical and Computer Engineering. Arizona, 2005.
- BEERSMA et al. **Retinal lattice, visual field, and binocularities in flies.** J. Comp. Physiology, 1977. 207-220 p.
- BORST, A. et al. **Adaptation without parameter change: Dynamic gain control in motion detection.** University of California, Berkeley, CA, 2005
- BORST, A. **Noise, not stimulus entropy, determines neural information rate,** Journal of Computational Neuroscience 14, 2003. 23-31p.
- BRENNER, N.; STRONG, S. P.; KOBERLE, R.; STEVENINCK, R. R.; BIALEK, W.; **Synergy in a neural code.** Neural Comp. 12, 1531-1552, 2000.
- DAYAN, P.; ABBOT, L. **Theoretical Neuroscience.** MIT Press, Cambridge. 2001.
- DICKINSON LAB. Disponível em: < <http://dickinson.caltech.edu/Research/Fly-O-Vision> >. Último acesso em: 30 nov. 2007
- DROR, R. O. **Accuracy of velocity estimation by Reichardt correlators.** 102f. Master's thesis. Churchill College, University of Cambridge, 1998.
- ECKERT, H.; DVORAK, D. R. **The centrifugal horizontal cells in the lobula plate of the blowfly phaenicia sericata.** J. Insect Physiology, 1983. 547-560 p.
- EGELHAAF, M.; BORST, A.; REICHARDT, W. **Computational structure of a biological motion-detection system as revealed by local detector analysis in the fly's nervous system.** J. Opt. Soc. Am. A, 6:1070, 1989. 87 p.
- FARROW K, BORST A, HAAG, J. **Sharing receptive fields with your neighbors: tuning the vertical system cells to wide field motion.** J Neurosci 25:3985-3993, 2005
- FRANCESCHINI, N. et al. **From insect vision to robot vision.** Phil. Trans. Roy. Soc. Lon. B, 1992. 283p.
- FRANCESCHINI, N. et al. **Directionally selective motion detection by insect neurons.** In Stavenga, D. G. and R. C. Hardie, editors, Facets of Vision, pp. 360-390. Springer, Berlin, Heidelberg, 1989, 360-390 p.

- GARCÍA, M. A.; PELI, E. **Luminance artifacts of cathode-ray tube displays for vision research.** *Spatial Vision*, Vol. 14, No. 2, 2001. 201–215p.
- HATEREN, V et al. **Function and Coding in the Blowfly H1 Neuron during Naturalistic Optic Flow.** *J. Neuroscience* 4343, 2005.
- HENGSTENBERG, R. **Common visual response properties of giant vertical cells in the lobula plate of the blowfly calliphora.** *J. Comp. Physiology*, 1983. 179-193 p.
- HENGSTENBERG, R. **Stabilizing head/eye movements in the blowfly Calliphora erythrocephala.** In *The Head–Neck Sensory Motor System*. Oxford: Oxford University Press, 1992. 49-55 p.
- HAUSEN, K. **Motion sensitive interneurons in the optomotor system of the fly. I. The horizontal cells: structure and signals.** *Biological Cybernetics*, 1982. 143-156 p.
- HAUSEN, K.; EGELHAAF, M. **Neural mechanisms of visual course control in insects.** In D. G. Stavenga and R. C. Hardie, editors, *Facets of Vision*. Springer-Verlag, Heidelberg, 1989. 391-424 p.
- LAND, M.F.; COLLETT, T.S. **Chasing behavior of house flies (Fannia canicularis).** *J. Comp. Physiology*, 1974. 331-357p.
- LAUGHLIN, S. B. **Matching coding to scenes to enhance efficiency.** In O. J. Braddick and A. C. Sleight, editors, *Physical and Biological Processing of Images*. Springer, Berlin, 1983. 45-52 p.
- LAUGHLIN, S. B. **Matching coding, circuits, cells and molecules to signals: general principles of retinal design in the fly's eye.** *Prog. Ret. Eye Res.*, 1994. 95 p.
- LEWEN, G. D.; BIALEK W.; STEVENINCK, R. **Neural coding of naturalistic motion stimuli.** NEC Research Institute, 4 Independence Way, Princeton, 2001.
- LINDEMANN, J. P. et al. **FliMax, a novel stimulus device for panoramic and high speed presentation of behaviourally generated optic flow.** *Vision Research* 43 779–791, 2003
- POGGIO, T.; REICHARDT, W. **Visual control of orientation behaviour in the fly. Part II. Towards the underlying neural interactions.** *Quarterly Reviews of Biophysics*, 1976. 377-438 p.
- PÁRAGGA, C. A. et al. **Color and luminance information in natural scenes.** *J. Opt. Soc. Am.*, 1998. 563 p.
- RIEKE et al 1997. **Spikes: Exploring the Neural Code.** MIT Press, Cambridge, Mass., 1997.
- SARPESHKAR, R.; BAIR, W.; KOCH, C. **An analog VLSI chip for local velocity estimation based on Reichardt's motion algorithm.** *Advances in Neural Information Processing Systems*, volume 5. Morgan Kaufman, San Mateo, 1993. pages 781-789 p.
- SANTEN, J. P. H.; SPERLING, G. **Temporal covariance model of human motion perception.** *J. Opt. Soc. Am. A*, 1:451, 1984. 73 p.

SARPESHKAR, R. et al. **Analog VLSI architectures for motion processing from fundamental limits to system applications.** Proceedings of the IEEE, 1996. 86-101 p.

SHANNON, C. E. **A mathematical theory of communication.** The Bell system technical journal, 27, 379-423, 1948.

SPAVIERI Junior, D. **Codificação neural e integração dendrítica no sistema visual da mosca,** Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, Instituto de Física de São Carlos, 2004.

SRINIVASAN, M. V. et al. **Embodying natural vision into machines.** In M. V. Srinivasan and S. Venkatesh, editors, From Living Eyes to Seeing Machines. Oxford University Press, Oxford, 1997.

SRINIVASAN, M. V. AND BERNARD, G. D. **The effect of motion during active head rotation.** Vision Res. 15, 1978. 515–525 p.

STEVENINCK, R. R.; LEWEN G. D.; STRONG, S. P.; KOBERLE, R.; BIALEK, W. **Reproducibility and variability in neural spike trains.** Science 275, 1805-1808, 1997.

STRONG, S. P.; KOBERLE, R.; STEVENINCK, R. R.; BIALEK, W. **Entropy and information in neural spike trains.** Phys. Rev. Lett. 80 197–200, 1998.

STEVENINCK, R. R.; BIALEK, W. **Timing and Counting Precision in the Blowfly Visual System.** xxx:physics/0202014 v1, 2002.

WAGNER, H. **Flight performance and visual control of flight of the free-flying housefly (*Musca domestica* L.).** II. Pursuit of targets. Phil. Trans. Roy. Soc. Lon. B, 1986. 79p.

WARZECHA, A.; EGELHAAF, M. **On the performance of biological movement detectors and ideal velocity sensors in the context of optomotor course stabilization.** Visual Neuroscience 15, 1998. 113-122 p.

WILSON, M. **The functional organisation of locust ocelli.** *J. Comp. Physiol.*, 124, 1978. 297-316p.

YEATES, D. K.; WIEGMANN, D. M. **Congruence and controversy: toward a higher-level phylogeny of diptera.** Annual Review of Entomology, 1999. 397-428 p.

ZELE, A. J.; VINGRYS A. J. **Cathode-ray-tube monitor artefacts in neurophysiology.**

Department of Optometry and Vision Sciences, The University of Melbourne, Parkville, Vic. 3010, Australia, 2004 Journal of Neuroscience Methods 141, 2005. 1–7p