

F809 - Instrumentação para o ensino

Relatório final de Atividades

**Controle de Equipamentos científicos via motor de passo:  
Aplicação a um espectrômetro óptico de duas grades**

Aluno: Marcos Antônio da Silva Eleotério RA: 009307  
meleoterio@lnls.br

Orientador: Prof. Dr.Eduardo Granado Monteiro da Silva  
granado@lnls.br

Instituto de Física "Gleb Wataghin" - UNICAMP

# 1 Resumo do projeto

O objetivo principal do presente projeto é acoplar um motor de passo a um espectrometro duplo (Marca Spex 1401), cuja óptica se encontra em perfeito estado de conservação.

## 2 O que são motores de passo?

Os motores de passo são usados numa infinidade de equipamentos modernos tais como: impressoras, scanners, drivers de disquetes em computadores, automatismos diversos, robótica e mecatrônica. Conhecer o funcionamento destes motores é de vital importância para qualquer profissional em nossos dias.

Podemos dizer que os motores de passo, assim como os motores comuns, são dispositivos que convertem energia elétrica em energia mecânica na forma de torque. No entanto os motores de passo possuem algumas características comuns, a saber:

- a) Os motores de passo funcionam como dispositivos posicionadores, pois podem parar numa posição perfeitamente controlada.
- b) Os motores de passo também podem funcionar como motores de velocidade perfeitamente controlada, sendo energizados numa determinada ordem.
- c) Eles podem ter seu eixo posicionado em um ângulo proporcional ao número de impulsos de entrada.
- d) Os erros que ocorrem no posicionamento de seu eixo são muito pequenos e não são cumulativos (tipicamente um motor de passo pode ser posicionado com uma precisão de 1 milésimo de radiano).
- e) O controle sem realimentação (open loop) é possível devido ao uso de sinais digitais para esta finalidade.
- f) As respostas à partida, à parada e à reversão são muito rápidas.

### 2.1 O motor de passo é parte de um sistema

O controle eficiente de um motor de passo requer um entendimento de todos os elementos de um motor de passo baseados em um sistema de controle de movimento [1]. Em sua grande maioria todos os motores de passo funcionam em um sistema chamado de ciclo aberto (ou "open loop") onde não há nenhum dispositivo para medir a aceleração, velocidade ou posição, ou seja nenhum dispositivo que tenha a intenção de nos dar uma resposta. O modo de ciclo aberto está bem representado na figura 1.



Figura 1: Estrutura do ciclo aberto

A carga ("LOAD") percebida pelo motor de passo, é tipicamente descrita como:

1. A inércia, expressa em  $Kg.m^2$  ou em  $Oz.in.sec^2$ .
2. Fricção Coloumbiana. Isso é um elemento do torque da carga que tem um valor constante, mas o sinal do torque é tal que para que o torque se oponha à direção de rotação, a unidade para torque são  $N.m$  ou  $Oz.in$ .
3. Atrito viscoso. Isso é um elemento do torque da carga que tem um valor que aumenta proporcionalmente com a velocidade, o sinal desse torque é tal que o torque se oporá à direção de rotação e as unidades são  $N.m/rad./sec$  ou  $Oz.in/rad./sec$ .
4. Um torque gravitacional pode estar presente, mas esse tipo de torque só está presente em situações onde o motor de passo tenha de levantar ou abaixar objetos contra a gravidade.

A tarefa ("Task") define o resultado desejado do processo de posicionamento, usando:

1. Comando de posicionamento informado em passos

2. Informações de velocidade tal como velocidade máxima ou um padrão específico de velocidade. Unidades básicas são passos por segundo, RPM ou radianos por segundo

Para complementar a tarefa com uma dada carga tipicamente precisamos de três elementos. Há uma seção de transformação de dados chamada chamada de lógica ("LOGIC") que toma a tarefa e converte em sinal temporal que podem controlar a corrente ou a voltagem do motor. Seguindo o diagrama da figura existe a força ("POWER") que dá ao motor a energia necessária em resposta as necessidades da parte lógica a conversão de energia elétrica (corrente voltagem) em energia mecânica cabe ao motor ("MOTOR"), que sua vez é a interface entre os mundos eletrônicos e mecânicos. Para desenvolvermos um sistema de controle razoável devemos estar familiarizados com o funcionamento do motor de passo. Começaremos então por esse importante item

### 3 Tipos de motor de motor de passo

#### 3.1 Motor V.R.

Existe um grande variedade de motores de passo. Vamos começar pelo mais simples de ser entendido, o motor V.R. (Variable Reluctance). Esse tipo de motor está na ativa por muito tempo, e atualmente está sendo designado para novas aplicações, como servo-motor de alta potência, assim como motor de tração. A figura 2

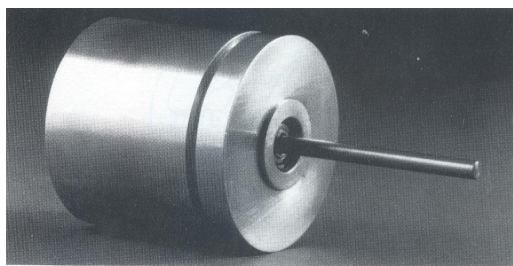


Figura 2: Um motor de relutância variável

mostra um típico motor V.R. sua seção transversal está representada na figura 3, a qual nos ajuda a interpretar as características desse aparelho. O rotor R gira livremente dentro da estrutura do estator S o qual é equipado com quatro enrolamentos A, B, C e D. Nenhum ímã permanente está presente na estrutura. Energizamos os enrolamentos A, A', com uma corrente DC. As pontas do estator tornam-se magnetizadas, causando o alinhamento do rotor com o estator como mostrado. As linhas pontilhadas mostram um possível caminho para o fluxo magnético, e o motor irá procurar a posição onde a resistência ou "relutância" ("reluctance") para o fluxo é mínima. Quando aplicamos um torque no motor ele sairá da posição de equilíbrio, por uma quantidade que é, ao menos inicialmente, proporcional ao torque aplicado, conforme consta na figura 3. A posição de equilíbrio com a fase B energizada esta representada na figura 3.

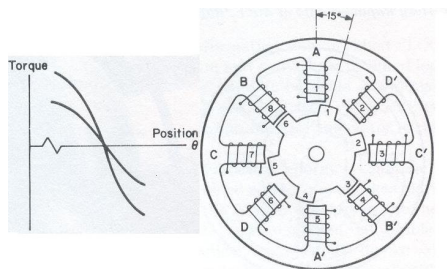


Figura 3: Torque estático versus a posição para dois níveis de correntes e posição do rotor com a fase B energizada

Como o dentes do rotor estão espaçados em 60 graus e os dentes do estator de 45 graus, o passo angular será

de 15 graus. Ao medirmos o torque do motor em função da posição para cada um dos 4 "estados" energizados, e plotarmos o resultado em um gráfico, teremos algo que se parece com figura 3. Agora fica claro que o motor energizado possui capacidade de posicionamento, se o motor não está posicionado onde ele não deveria estar, ele passará a estar desenvolvendo o torque para tal, tornando o motor de passo muito preciso.

### 3.2 O motor de imã permanente ou Canstack

Possui em termos gerais a mesma estrutura do motor tratado no item anterior porém, este motor possui em sua estrutura magnetos permanentes, e seu rotor não é mais uma estrutura dentada usinada com aço "mole", mas ao invés disso ele possui uma superfície lisa e magnetizada permanentemente. A estrutura do estator consiste de pedaços dentados de metal pressionados como mostrado na figura abaixo

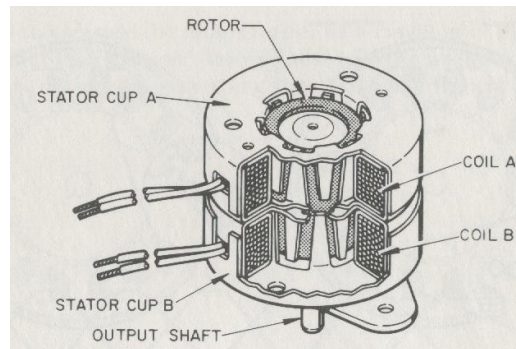


Figura 4: Componentes de um motor do tipo canstack.

### 3.3 O motor de passo híbrido

O motor híbrido combina características do motor V.R. com as do motor de passo P.M. O rotor no motor de passo híbrido é construído de aço mole que conduz um fluxo de imã permanente pelo o gap com ar entre o rotor e o estator. O copo do rotor possui dentes na superfície para guiar esse fluxo magnético para localizações preferenciais dentro desse gap de ar. Para cada magneto os copos dos rotores associados estão comumente afastados por  $1/2$  "dente". A figura abaixo mostra um típico rotor de um motor de passo híbrido de dois eixos e tamanho 34.

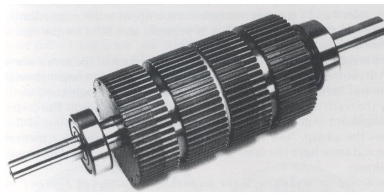


Figura 5: rotor de um motor de passo híbrido

Para nos acostumarmos com o mecanismo de torque desse motor de passo iremos olhar para a sua seção transversal, uma para um copo do rotor magnetizado para o norte e outra para o copo do rotor magnetizado para o sul. O estator usado neste exemplo é virtualmente idêntico aquele usado para ilustrar o motor V.R. As únicas diferenças é fato dos polos do estator 1,3,5 e 7 combinarem para formarem uma fase A, e o polos do estator 2,4,6 e 8 são combinados como fase B

Para cada condição de energização nos podemos medir um torque versus o deslocamento, mesmo sabendo que os caminhos de fluxo das fases A e B são misturados, podemos distingui-los uma vez que existe bem pouca interação entre eles. Como o torque de cada fase é independente do outro, duas fases podem ser energizadas

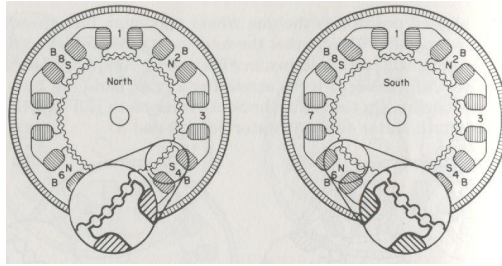


Figura 6: rotor de um motor de passo híbrido

simultaneamente, resultando em um conjunto de oito curvas de torque. As curvas de torque estático para um típico motor de passo híbrido estão mostradas na figura abaixo

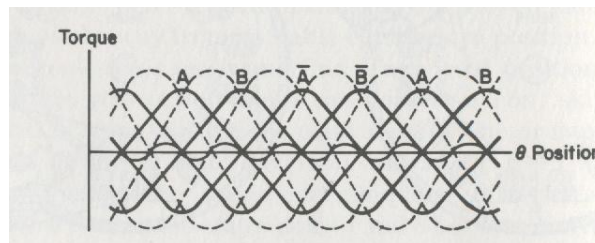


Figura 7: rotor de um motor de passo híbrido

## 4 Introdução sobre técnicas de interface

### 4.1 Interface

Em ciência da computação uma Interface é um 'contrato' que determina a forma de comunicação entre componentes de software. Para os usuários comuns de computadores, uma Interface é a forma de apresentação de programas ou sistemas. Com o avanço na capacidade de processamento das máquinas, aconteceu uma mudança profunda na interfaces dos programas e sistemas.

A tela (geralmente) preta e baseada em texto, foi trocada por janelas, botões, abas, caixas de texto ou de checagem, ícones, etc. Esta nova apresentação gráfica, também conhecida como "ambiente gráfico", tornou o uso do computador mais amigável.

Entretanto, a forma da interface (seja gráfica ou baseada em texto) não pode ser responsabilizada pela facilidade ou dificuldade de interação com um sistema ou programa. Uma interface está diretamente ligada a funcionalidade ou comportamento do sistema. Uma mesma tela, com os mesmos componentes e imagens, pode ter um comportamento diferente sob os mesmos "estímulos" do usuário, ou seja um apertado de botão, um arrastar e soltar.

Para o nosso caso de necessitamos de um meio para nos comunicarmos com o meio externo e de uma modo para fazê-lo, o meio encontrado foi através da porta paralela, pois através desta poderemos enviar e receber sinais[2]. Talvez a parte mais complicada seja o modo de realizarmos esse interfaceamento, dentre muitas linguagens de programação disponíveis tais como Delphi, C++, Fortran,...etc escolhemos aquela fosse mais robusta e essa escolha recaiu sobre o programa Labview[3, 4] pois este permite rápido acesso a funções que em outras linguagens seriam extremamente complicadas.

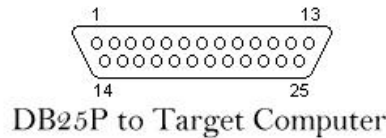
## 4.2 A porta paralela

### 4.2.1 Características

- possui 8 bits de saída e 5 de entrada e outros quatro que podem operar como entrada e como saída.
- 3 registradores endereçados seqüencialmente. Geralmente em hexadecimal, o endereço base (o endereço do primeiro registrador) é o 378h (ou 278h dependendo do computador).
- O registro é a posição do mapa de memória em que a CPU escreve o dado. Assim ao escrevermos algo no registro, o hardware controlador da porta paralela trata de enviar estes dados para os respectivos pinos do conector DB-25(conector padrão da porta paralela).

Endereço(1)	Endereço(2)	Registro de	Número de Bits	Direção	Lê/Escreve
378h	278h	Dados	8	saída	Le/ Escreve
379h	279h	Estado	5	Entrada	Lê
7Ah	27Ah	Controle	4	Entrada/Saída	Lê/ Escreve

- Os sinais obedecem a níveis de tensão TTL(Transistor-Transistor Logic, os circuitos digitais TTL tem como principal característica a utilização de sinais de 5 volts para níveis lógico altos.), mas a capacidade de fornecer/drenar corrente varia, dependendo do tipo de circuito lógico que foi adotado na implementação do circuito da porta (atualmente esse valor está por volta de 12mA).



Name	36-Cen	25-DSub	Name
Data Bit 0	2	15	Error
Data Bit 1	3	13	Select
Data Bit 2	4	12	Paper Out
Data Bit 3	5	10	Acknowledge
Data Bit 4	6	11	Busy
Acknowledge	10	5	Data Bit 3
Busy	11	6	Data Bit 4
Paper Out	12	4	Data Bit 2
Select	13	3	Data Bit 1
Error	32	2	Data Bit 0
Reset	16	16	Reset
Select	17	17	Select
Signal Ground	19-30+33	18-25	Signal Ground

Figura 8: "pinagem" da porta paralela

## → Registros

- Data register: Escrever em 1bit dele resulta em um nível TTL alto na saída. Como este registrador é uma Latch, pode-se ler o seu conteúdo, e a leitura resulta no último dado escrito (Latch  $\neq$  bidirecional)
- State register: A entrada do bit 5 é invertida, isto é, um sinal alto é lido '0' e um nível baixo '1'.

## → Controladores de Registros

- Os pinos que externam o conteúdo deste registro são circuitos TTL/open collector (o que torna possível utiliza-los como entrada ou saída) tais pinos são dotados de resistores de pull-up internos de  $4,7K\Omega$ .
- Para a entrada deve se ter um nível alto nos 4 pinos o que significa nível baixo nos bits C0, C1, C3 e alto no C2 uma vez que as saídas são invertidas.
- Ao trabalhar como saída estes pinos apresentam retardo nas transições de nível baixo para o alto devido ao circuito ser open collector.

## 4.3 Acessando a porta paralela

Na porta paralela temos 8 linhas de sinais que podem ser usadas para emitir sinais de controle para dispositivos externos por meio de uma interface. Elas se baseiam no fato de que as saídas da porta paralela permaneçam no nível baixo (0 volts) na ausência ou quando o sinal lógico é zero e apresentam uma tensão de 5 V quando o nível lógico é alto ou 1. Desse modo interfaces como o Labview trabalham.

### 4.3.1 Exemplo prático de acesso

Trabalhando com o Labview podemos construir algoritmos, do mesmo modo que em qualquer outra linguagem de programação. Porém no Labview programa-se de maneira mais "gráfica", um exemplo disso é a figura 10, onde todo o esquema é montado em funções que alteram o sinal da maneira que o programador desejar. Para acessarmos a porta paralela basta utilizar a função outport, identificada na figura com a letra A. Esta função recebe dois valores, o endereço base da porta paralela, e o valor que queremos escrever (ou seja, em qual bit queremos escrever), no nosso caso o endereço base é 378. Na mesma figura a letra B indica uma "flat structure" que funciona como uma função temporal, ou seja, ela ordena os eventos no tempo, no nosso caso ela realizará todos os eventos que estiverem à esquerda para depois realizar os eventos que estão à direita. A letra C nos indica um sequência de interação, sequência está que irá ser executada até que uma dada condição seja satisfeita. Na figura tal condição está representada no círculo D (onde a pergunta: valor é maior do que 7? será "respondida"). Enquanto que o círculo E nos mostra uma função de soma, que irá incrementar o valor inicial (no caso do loop à esquerda o valor inicial é 3 e no caso do loop à direita o valor é 7) em 1, e a cada incremento a função irá checar se a condição D está sendo satisfeita. Por exemplo, para o valor inicial 3 iremos somar 1, a condição D será satisfeita (uma vez que 4 é menor que 7), então o valor 4 irá para a função no círculo F. A função em questão é a função  $x2^n$ , temos um valor fixo que é  $x = 1$ , então temos que o valor de n irá variar de 4 até 7 então os valores que teremos serão  $2^4 = 16$ ,  $2^5 = 32$ ,  $2^6 = 64$ ,  $2^7 = 128$  estes serão os bits acessados. Porém estes acessos não iram ocorrer simultaneamente, eles iram ocorrer com o tempo, que o usuário determinar através da função "delay time" especificada pela letra G. Sendo assim ao realizar-se todas as interações especificadas no loop C de acordo com a sequência temporal iniciar-se a o próximo passo que será parecido com o inicial, porém em sentido contrário, os bits serão acessados nessa ordem:  $2^7 = 128$ ,  $2^6 = 64$ ,  $2^5 = 32$ ,  $2^4 = 16$ . E a sequência como um todo volta a se repetir.

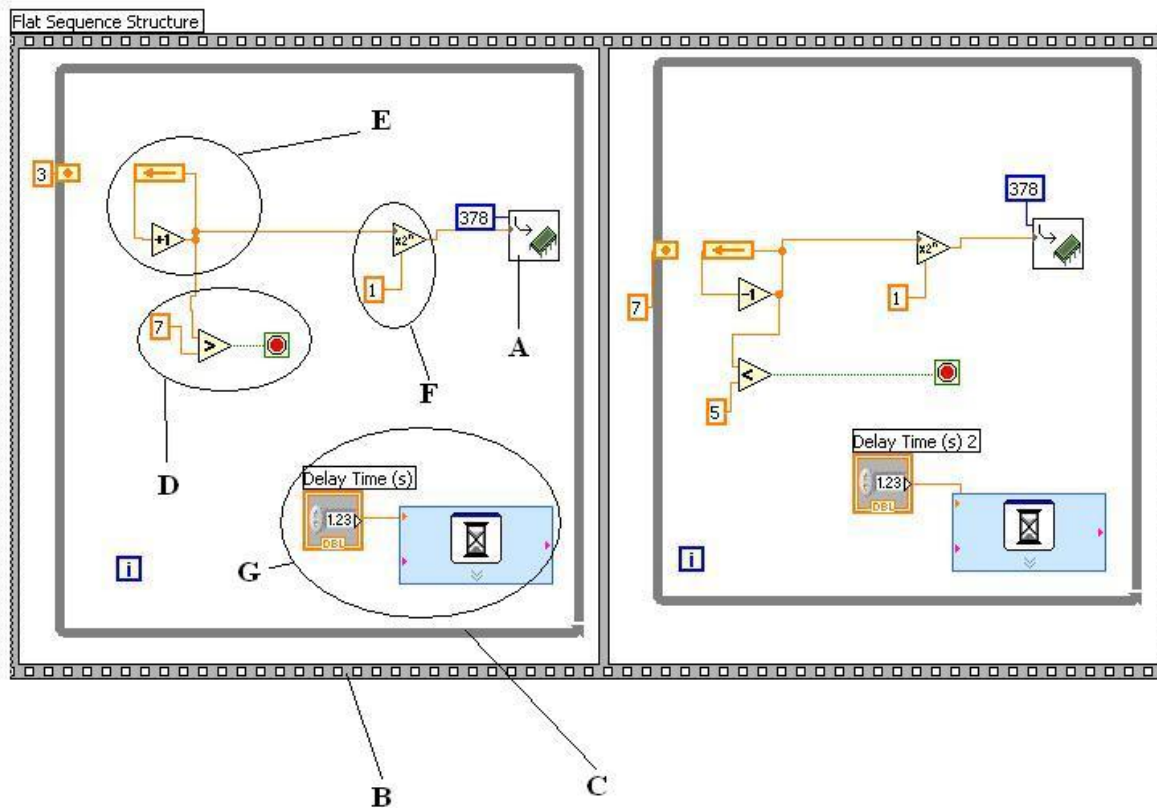


Figura 9: esquema básico de programação no labview onde temos, A: função out port, B: seqüência temporal, C: loop interativo, D: condição para a realização do loop interativo, E: incremento, F: função que irá ditar qual bit será acessado e G: nos permite controlar os tempos de acesso

## 5 Montagem experimental

Para realizarmos comunicação com o motor de passo, precisamos antes de mais nada caracterizar o funcionamento da porta paralela a ser utilizada, para tal fizemos uso de um protoboard, oito leds e oito resistências de cerca de  $100K\Omega$ , conforme podemos observar na figura 11. Seguindo o esquema da figura 8 podemos ligar cada pino da porta paralela no seu respectivo terra passando antes, pelo conjunto resistor-led, cada um dos 8 pinos. conforme a figura 10, a função do driver é simplesmente a de energizar as bobinas corretas drenando da fonte a quantidade de corrente necessária para realizar a tarefa. Então para tal o driver precisa de três sinais de entrada, são eles o clock (sinal pulsado com largura mínima de  $3\mu$  segundos), libera (sinal contínuo, que funciona como um liga/desliga do motor) e o inverte (como o nome diz ele inverte o sentido do motor). Para termos gerado esse conjunto de sinais fez-se então o uso dos leds, da seguinte maneira: escolheu-se um sinal pulsado com um tempo tal que fosse possível fazer funcionar o motor. Para inverter o motor é preciso desligá-lo primeiro, ou seja é preciso enviar um sinal para a entrada LIBERA do driver, com isso o motor para, para invertermos o sentido devemos mandar um outro sinal contínuo para a entrada inverte do driver e ao mesmo tempo desligar o sinal do liberar (ao desligar o sinal do libera o clock volta a estar ligado), com isso o motor tem as suas bobinas energizadas no sentido contrário fazendo com ele gire no sentido oposto. Deste modo poderemos controlar as grades de difração.



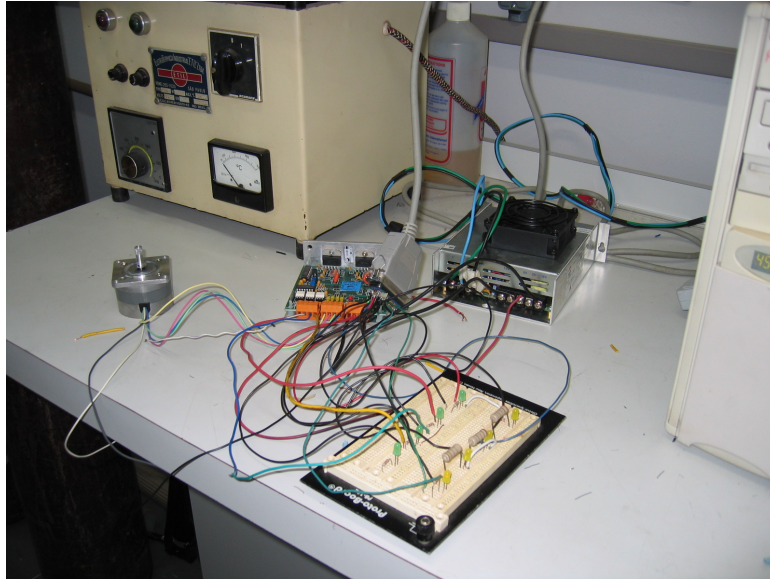


Figura 10: montagem experimental usada para testar o esquema de controle do motor, podemos então visualizar a fonte utilizada juntamente com o driver controlador e o motor de passo

## 6 Espectrometro de duas grades

A medida de linhas fracas de Raman na presença de forte radiação de Rayleigh (vide seção 7) foi um constante problema na espectroscopia Raman. Uma solução primeiramente utilizada por Rasetti [6] foi utilizar uma linha de absorção atômica para excitar o efeito Raman e reabsorver a frequência não deslocada, antes da luz total espalhada entrar no espectrômetro. Esse método funcionou muito bem para determinadas linhas (a do mercúrio por exemplo a  $2537\text{\AA}$ ), no entanto o espalhamento interno do próprio espectrômetro contribuiu para o aparecimento de frequências espúrias, principalmente quando o deslocamento na frequência é muito pequeno.

Tal problema foi resolvido por Landon e Porto [7] acoplando dois espectrômetros, de tal modo que a saída de um coincidissem com a entrada do outro, conforme explicitado na figura 12.



Figura 11: Foto mostrando A as duas grades de difração, B a parte mecânica do espectrometro, com indicação da posição do motor

Tais medidas pioneiras dos autores citados acima, fez com que tenhamos hoje espectrometros de até 3 grades de difração.

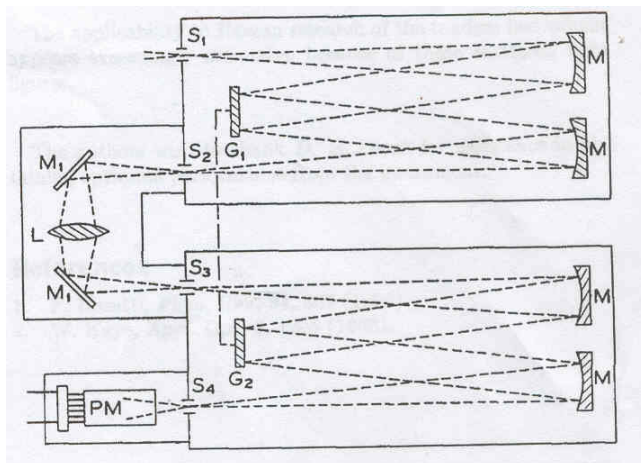


Figura 12: Dois espectrometrôs conectados pela saída, onde as letras M indicam os espelhos a letra G indica grade de difração, L é a lente e por fim PM seria uma fotomultiplicadora ou seja o detector

## 7 Apêndice

### 7.1 Teoria do espalhamento Raman

O espalhamento Raman é uma forma fundamental da espectroscopia molecular. Junto com absorção infravermelha, O espalhamento Raman é usado para obter informação sobre a estrutura e propriedades das moléculas através de suas vibrações transicionais. A teoria do espalhamento Raman é mais complexa que a teoria da absorção infravermelha, mas existe muitos casos parecidos entre eles. Como é sabido, a absorção infravermelha provem da ressonância direta entre a frequência da radiação infravermelha e da frequência de vibração de um particular modo normal de vibração. A propriedade da molécula envolvida na interação ressonante é mudada na momento de dipolo da molécula com respeito aos modos normais de vibração. A absorção infravermelha é um fenômeno de um fóton. O fóton da radiação infravermelha encontra a molécula, o fóton desaparece, e a molécula tem o seu nível de energia vibracional aumentado pela energia de um fóton na frequência da ressonância vibracional. Em contraste ao explicitado a cima, o espalhamento Raman é um evento de dois fótons. Nesse caso, a propriedade envolvida é a mudança na polarizabilidade da molécula com respeito ao seu movimento vibracional. A interação da polarizabilidade com a radiação incidente cria um momento de dipolo induzido na molécula, e a radiação emitida por esse momento de dipolo induzido contém o espalhamento Raman observado. A luz espalhada pelo momento de dipolo induzido consiste em espalhamento Rayleigh e Raman. O espalhamento Rayleigh consiste em uma radiação emitida com a mesma frequência da radiação incidente, por outro lado a radiação Raman tem a sua frequência deslocada, e portanto a energia, da frequência da radiação incidente pela energia vibracional que é ganha ou perdida pela molécula. A polarizabilidade é então expressa por um tensor com duas coordenada cartesianas; uma associada ao fóton incidente e outra ao fóton espalhado. Esses dois fóton são ligados por um único processo quântico, um evento coerente, que faz com que o espalhamento Rayleigh e Raman sejam diferentes de eventos que envolvem a absorção de dois fótons seguido da emissão.

### 7.2 Monocromadores

Em um único monocromador, a luz extra que acaba encobrendo o fraco sinal de Raman. Isso é causado principalmente pela luz não espalhada da face das grades; tal luz pode ser reduzida consideravelmente colocando dois espectrometros em "série" de modo que a saída de um seja purificada pelo segundo. Então isso da inicio à construção de um duplo monocromador (um triplo monocromador eliminaria ainda mais essa luz incipiente e

permitiria a observação das bandas Ramans localizadas muito próximas das linhas de Rayleigh). Para uma análise do poder de concentração das lentes determinamos o número  $F$  dado por :  $F = \frac{f}{D}$  onde  $f$  é a distância focal e  $D$  é o diâmetro. Quanto menor  $F$  maior será o poder de concentração (gathering) da luz. Para Raman temos que  $F$  será a distância focal do espelho do colimador, e  $D$  é usualmente calculado por (fórmula), onde  $L$  é o comprimento lateral da grade quadrada. Para fazermos  $F$  pequeno,  $f$  deverá ser pequeno e  $D$  grande. Entretanto a resolução diminui a medida que  $f$  torna-se menor. Para manter uma boa resolução, então,  $D$ , precisa ser grande, e isso exige uma grade maior e mais cara. Por essa razão a maioria dos espectrometros Raman têm valores de  $F$  entre 5 e 10 por ex. o modelo 1403/4 com duplo monocromador ( $f=0,85m$ ) tem um valor de  $F=7,8$  com grades  $110 \times 110mm$ . Grades determinam a resolução de um espectrômetro. Quanto mais sulcos por milímetro melhor será a dispersão e maior a resolução. A perda de sinal causada por um aumento na resolução pode ser compensada por um aumento da largura da grade, usando uma de 1800sulcos/milímetro, o modelo Spex 1403 de duplo monocromador pode cobrir um intervalo de 31000 até 11000 $cm^{-1}$ , num sistema de guia de cossecante. Entretanto esse intervalo pode diminuir para grades de maior densidade de sulcos (2400–3600) A largura da fenda e a velocidade de avanço do monocromador são importantes para obter resolução máxima.

### 7.3 Câmera CCD

#### Charge-Coupled Device Detection

A CCD tornou-se, nos últimos anos, muito usada em espectroscopia Raman. O CCD é um detector constituído por fileiras de material baseado em um óxido metálico de Silício, como mostrado na figura 13. O CCD consiste de duas fileiras bidimensionais  $> 10^6$  pixels, cada pixel vai de 6 a 30micrometros. O maior avanço do CCD em relação aos outros métodos de detecção são os baixos níveis de ruídos, que faz com que a intensificação óptica seja desnecessária e alta eficiência e resolução no comprimento de onda

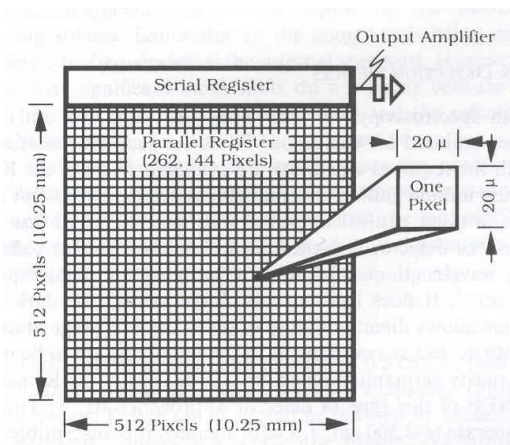


Figura 13: Camada de óxido, formando o detector

## Referências

- [1] The Art and Praticce of Step MOtor Control, Leenhouts, A. Intertec Comuncations Inc. Ventura, Ca, 93003, USA
- [2] Técnicas de Interface, Campbel, J. 1990
- [3] Learning with LabVIEW 7 express Robert H. Bishop, Upper Saddle River, NJ : Pearson/Prentice Hall, 2004.
- [4] LabVIEW graphical programming : practical applications in instrumentation and control / Gary W. Johnson, Richard Jennings. New York : McGraw-Hill, c2001.
- [5] Introductory to Raman Spectroscopy; John R. Ferraro, Kazuo Nakamoto, Academic Press, 1922
- [6] F.Rasetti, Phys. Rev. 34, 367 (1929).
- [7] D. London and S.P.S. Porto; Applied Optics/ vol.4, No. 6/ june 1965