

Instrumentação de Acionamento e Medida Angular para Linha de Luz de Alta Resolução Espectral

por

Márcia Sirlene Zardin Graeff ✓

Orientador: Prof. Dr. Antônio Rubens Britto de Castro

Este exemplar corresponde à redação final da tese defendida pela aluna Márcia Sirlene Zardin Graeff e aprovada pela Comissão Julgadora.
Campinas 28 Jun 94 / A. Rubens B. de Castro

Tese apresentada ao Instituto de Física Gleb Wataghin da Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciências.

Campinas, 15 de junho de 1994.

Resumo

O Grupo de Ultra-violeta de Vácuo do Laboratório Nacional de Luz Síncrotron está construindo uma linha de luz de alta resolução espectral baseada em elementos óticos esféricos (SGM).

Este trabalho descreve a instrumentação desenvolvida para o acionamento da câmara do monocromador SGM e um sistema interferométrico para verificar a posição angular da mesma, com resolução da ordem de $1\mu\text{rad}$.

O sistema foi caracterizado no seu curso total, apresentando linearidade e confiabilidade, além de estabilidade ao longo do tempo.

Abstract

The VUV Instrumentation Group of the Laboratório Nacional de Luz Síncrotron is building a beamline of high spectral resolution, based on spherical optical elements.

We describe the instrumentation developed to drive the SGM monochromator chamber and an interferometric system to check its angular position. The resolution achieved was in the order of $1\mu\text{rad}$.

The instrument proved to be linear over its total range, and stable along the time.

Agradecimentos

Ao Prof. Dr. Antônio Rubens Britto de Castro, pela oportunidade de crescimento profissional, por sua orientação e apoio.

Aos meus colegas do Grupo de Ultra-violeta de Vácuo do LNLS, pelo apoio técnico e companheirismo nos momentos difíceis:

Paulo de Tarso Fonseca,

Guilherme Bueno Fraguas,

José Geraldo Pacheco,

Leandro Garcia de Souza.

À Oficina Mecânica do LNLS, pela qualidade dos serviços prestados.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

Ao meu marido e ao meu filho.

Índice

<i>I) Introdução</i>	<i>1</i>
<i>II) Interferometria</i>	<i>5</i>
<i>A) Interferência</i>	<i>5</i>
<i>B) Interferômetros</i>	<i>7</i>
<i>C) Aplicações</i>	<i>13</i>
<i>III) Descrição do Instrumento</i>	<i>18</i>
<i>A) Mecânica</i>	<i>18</i>
<i>B) Ótica</i>	<i>22</i>
<i>C) Eletrônica</i>	<i>26</i>
<i>IV) Resultados Obtidos</i>	<i>33</i>
<i>V) Perspectivas</i>	<i>38</i>
<i>VI) Conclusões</i>	<i>39</i>
<i>Referências</i>	<i>40</i>

Capítulo I - Introdução

A radiação síncrotron é, por definição, a radiação emitida por cargas relativísticas com trajetórias circulares [1]. Suas características principais são a alta intensidade e o espectro contínuo, que favorecem o seu uso em experiências de espectroscopia (tanto de raios-x quanto de ultra-violeta). Além disso, a radiação síncrotron pode ser utilizada para litografia, nas áreas de microeletrônica e micromecânica.

O Laboratório Nacional de Luz Síncrotron (LNLS) está construindo um anel de armazenamento de elétrons [2]. A maioria dos componentes utilizados é de fabricação nacional ou desenvolvidos pelo próprio LNLS, desde câmaras de vácuo até os instrumentos de controle e medidas.

O projeto prevê a instalação de 24 linhas de luz (Figura 1.1). Denomina-se linha de luz o conjunto de equipamentos necessários para conduzir a radiação síncrotron do anel de armazenamento até a câmara experimental, incluindo componentes óticos para monocromatizar e colimar o feixe, dispositivos de proteção radiológica e de vácuo.

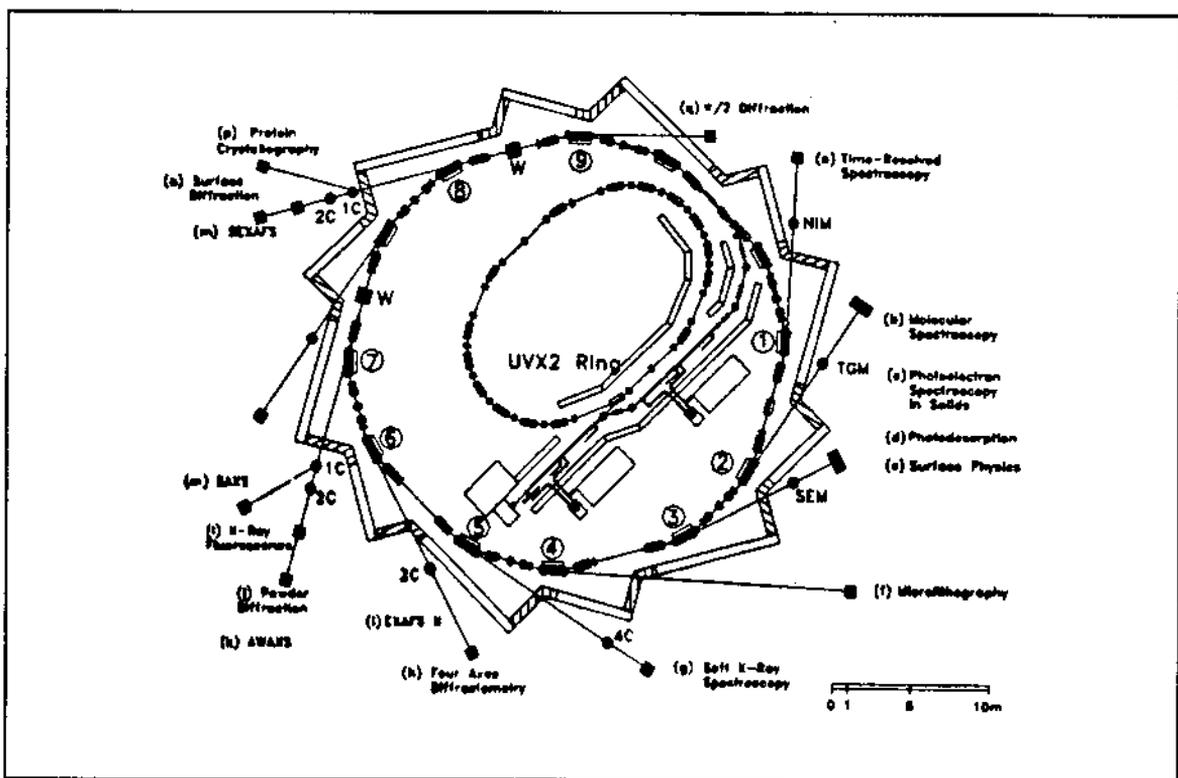


Figura 1.1 - Anel de Armazenamento de Elétrons que está sendo construído no LNLS.

Já foi desenvolvida, pelo Grupo de Instrumentação de Ultra-violeta de Vácuo, uma linha de luz TGM (de "Toroidal Grating Monochromator") para operar na faixa de 12 eV a 310 eV [3, 4, 5]. Esta linha de luz está em operação no anel síncrotron de CAMD/LSU [6] (Baton Rouge, USA), desde outubro de 1992.

Uma segunda linha de luz (SGM, de "Spherical Grating Monochromator") foi projetada para a faixa de 250 eV a 1000 eV, utilizando elementos óticos esféricos que permitem atingir um poder resolutivo (E/dE) superior a 3000 [7].

Nesta linha de luz (Figura 1.2), a luz branca proveniente do anel de armazenamento é colimada por dois espelhos focalizadores independentes, de modo que o fluxo de fótons na fenda de entrada do monocromador seja máximo (o perfil do feixe deve coincidir com a forma da fenda de entrada). O primeiro espelho (HFM, de "Horizontally Focussing Mirror") recebe toda a carga térmica da radiação síncrotron e sofre distorções indesejáveis. Este problema é contornado se o primeiro espelho focalizar o feixe na direção do comprimento da fenda (horizontal). Na direção vertical, que é mais crítica, o feixe é focalizado pelo segundo espelho (VFM, de "Vertically Focussing Mirror"), que está livre de distorções térmicas.

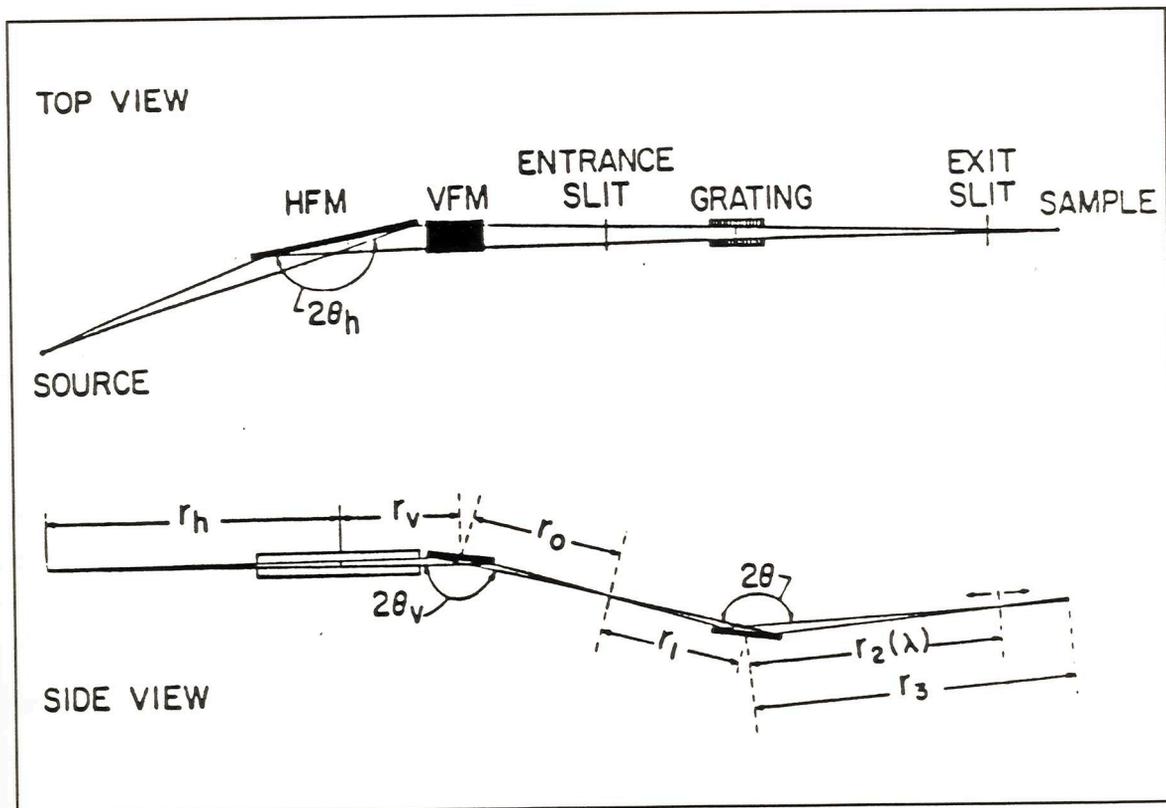


Figura 1.2 - Ótica da Linha de Luz SGM.

As grades de difração do monocromador são mantidas fixas dentro da câmara de ultra alto vácuo. O plano de dispersão das grades contém o eixo vertical do laboratório. Para selecionar o comprimento de onda, a câmara inteira é girada em torno de um eixo horizontal.

Torques devidos aos acoplamentos flexíveis de vácuo (entre outros fatores), podem causar flexões na haste de acionamento da câmara, e portanto, erros na determinação da posição angular da câmara. É necessário então um sistema de medida angular absoluto e independente do acionamento da câmara, que nos permita conhecer exatamente a posição angular das grades de difração, e conseqüentemente, o comprimento de onda obtido na fenda de saída.

A resolução necessária para as medidas angulares é de alguns microradianos, ou seja, da ordem da tolerância na qualidade da superfície esférica das grades de difração, o limitante no poder resolutivo atingível pelo monocromador.

Um método muito simples de medida angular usaria uma fonte de luz e um fotodetector, com uma roda dentada entre eles. O detector contaria o número de dentes que fazem sombra sobre ele ao deslocarmos a roda de um ângulo θ . Porém, supondo que cada dente tivesse 1mm, para atingirmos a resolução de $1\mu\text{rad}$, esta roda deveria ter 1Km de raio!

Outro método de medida angular, mais compacto, faria uso da técnica de Moiré. O efeito Moiré ocorre quando dois conjuntos de linhas paralelas são superpostos de forma que um conjunto possa ser visto através do outro, formando-se assim um padrão de faixas claras e escuras, conhecido como franjas de Moiré (Figura 1.3). Quando uma grade é girada em relação à outra, este padrão se desloca e é possível determinar o ângulo de rotação. Para utilizarmos o efeito Moiré, teríamos que recorrer à litografia para a fabricação destas grades, e infelizmente não temos acesso a esta técnica.

A interferometria ^[8] também pode ser usada para a determinação de pequenos ângulos. Nesta técnica, dois raios de luz provenientes de uma única fonte são recombinados depois de passarem por caminhos óticos diferentes, formando um padrão de interferência na região de superposição. A diferença de caminho ótico dos dois raios de luz guarda uma relação linear com a grandeza a ser medida. Esta foi a técnica que adotamos.

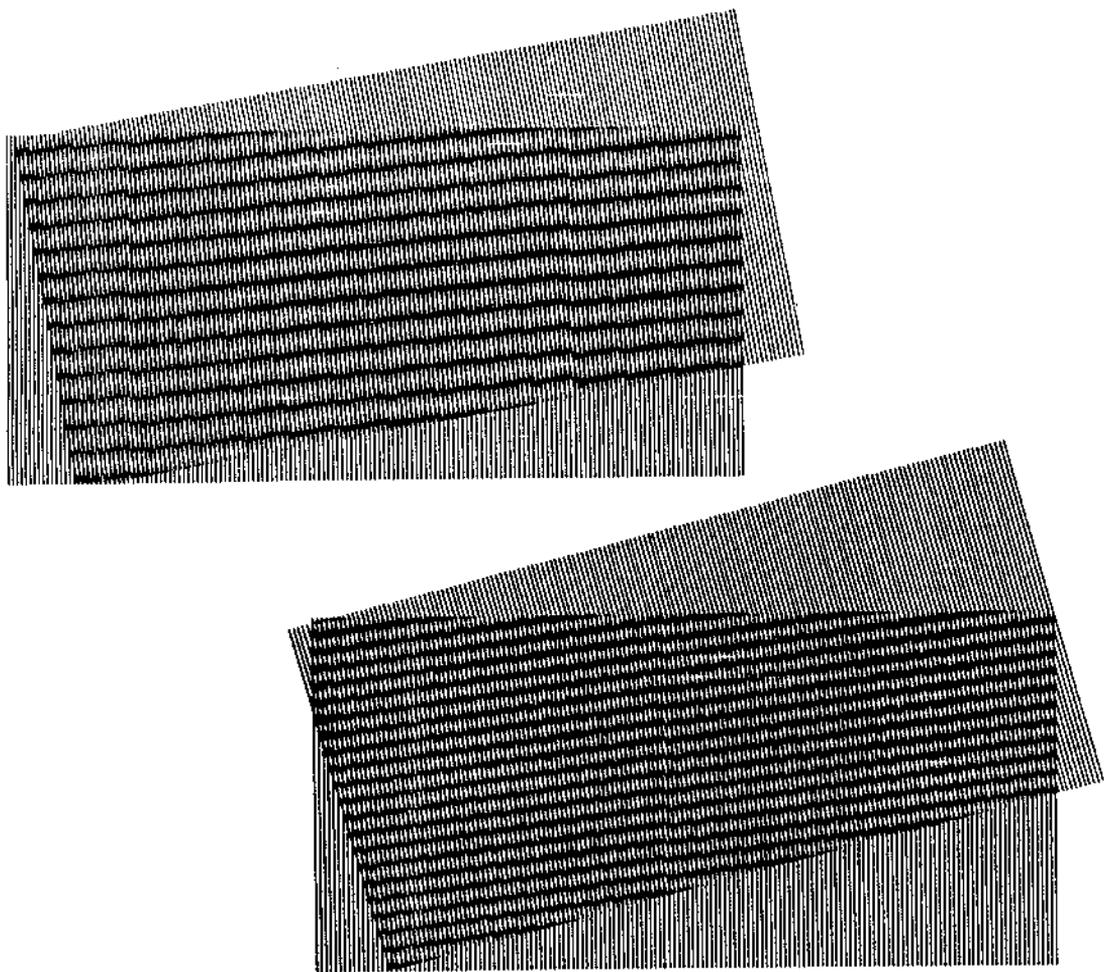


Figura 1.3 - Efeito Moiré. O deslocamento angular de uma grade em relação à outra desloca o padrão de franjas de Moiré.

Nesta tese, foi desenvolvida a instrumentação necessária para o acionamento angular da câmara do monocromador SGM, além de um sistema interferométrico de medidas angulares, incluindo a opto eletrônica para contagem das franjas e interface com um computador.

No capítulo 2, apresentamos de uma forma sucinta a técnica de interferometria e algumas aplicações.

No capítulo 3, descrevemos o instrumento que foi desenvolvido, analisando separadamente as partes: mecânica, ótica e eletrônica. O capítulo 4 apresenta os resultados obtidos.

As perspectivas de melhorias e conclusões são apresentadas nos capítulos seguintes (5 e 6).

II. A) Interferência

Quando a luz proveniente de uma fonte é dividida em dois feixes de luz, que são depois recombinados, a intensidade luminosa na região de superposição varia de um ponto a outro, com máximos que são superiores à soma das intensidades dos raios e mínimos que podem ser nulos. Esse fenômeno é conhecido como interferência [9].

No caso de uma onda plana linearmente polarizada propagando-se na direção z , em um meio cujo índice de refração é n , o campo elétrico em qualquer ponto pode ser representado por:

$$E = \text{Re} \left\{ a \cdot \exp \left[i 2 \pi \nu \left(t - \frac{z}{v} \right) \right] \right\}$$

onde a é a amplitude, ν a frequência, e v a velocidade de propagação da onda, dada por $v=c/n$.

Se considerarmos que todas as operações em E são lineares, é mais simples trabalhar com a função complexa e tirar a parte real no final dos cálculos. Assim, podemos reescrever a expressão para o campo elétrico:

$$E = A \cdot \exp(i 2 \pi \nu t)$$

onde

$$A = a \cdot \exp(-i \phi)$$

é a amplitude complexa da onda, e

$$\phi = \frac{2 \pi \nu z}{v} = \frac{2 \pi n z}{\lambda}$$

O produto $p=nz$ é o caminho ótico entre a origem e o ponto z , e ϕ a diferença de fase correspondente.

A intensidade luminosa é proporcional à média temporal do quadrado do campo elétrico, e é dada por:

$$I = a^2 = |A|^2$$

Se duas ondas monocromáticas que se propagam na mesma direção e polarizadas no mesmo plano são superpostas num ponto P , o campo elétrico total neste ponto é:

$$E = E_1 + E_2$$

onde E_1 e E_2 são os campos elétricos de cada onda. Se as duas ondas têm a mesma frequência, a intensidade no ponto P é:

$$I = |A_1 + A_2|^2$$

onde A_1 e A_2 são as amplitudes complexas das duas ondas.

Então:

$$I = I_1 + I_2 + 2(I_1 \cdot I_2)^{\frac{1}{2}} \cdot \cos \Delta\phi$$

I_1 e I_2 são as intensidades de cada onda e $\Delta\phi$ é a diferença de fase entre elas. O termo que depende de $\Delta\phi$ é chamado de termo de interferência. A intensidade apresenta um máximo quando $\Delta\phi=2m\pi$ e um mínimo para $\Delta\phi=(2m+1)\pi$, com m inteiro.

Para produzir interferência é necessário que as duas ondas tenham a mesma polarização e mesma frequência. Entretanto, sabemos que a radiação proveniente de uma fonte física real nunca é estritamente monocromática, apresentando flutuações na amplitude e na fase. Estas flutuações variam com uma taxa que depende essencialmente da largura efetiva $\Delta\nu$ do espectro da fonte.

Dois raios provenientes de uma mesma fonte apresentam flutuações correlacionadas, e os raios são chamados coerentes. Por outro lado, raios provenientes de fontes diferentes têm flutuações completamente independentes, e são chamados incoerentes.

A superposição de raios incoerentes não produz interferência; a intensidade de luz na região de superposição é simplesmente a soma das intensidades de cada raio. Na verdade, interferência e coerência são aspectos experimentais e teóricos do mesmo fenômeno.

II. B) Interferômetros

Em interferometria, os raios de luz coerentes são obtidos a partir de uma única fonte, e recombinados depois de passarem por caminhos óticos diferentes. Dois aspectos são analisados na classificação de interferômetros: o método utilizado para dividir a luz em raios distintos e o número de raios que interferem.

Quanto ao número de raios, um interferômetro pode ser de dois raios ou de múltiplos raios. O primeiro tipo apresenta franjas com uma variação senoidal de intensidade. No segundo tipo, cada par de raios contribui com uma componente de Fourier para o padrão de franjas, que, a princípio, pode ter qualquer perfil periódico.

Existem dois métodos para separar a luz em dois feixes. No método de divisão da frente de onda, a luz é dividida pela passagem por uma ou mais fendas, colocadas lado a lado. Este método só é útil para fontes suficientemente pequenas. O segundo método é o método de divisão de amplitude, no qual a luz é dividida em uma ou mais superfícies parcialmente refletoras. Nesse caso, fontes não pontuais podem ser usadas, com efeitos que podem ter intensidade maior que a obtida no método anterior.

Vejamos agora algumas configurações mais conhecidas de interferômetros.

O primeiro exemplo é o clássico experimento de Young, onde a luz de uma fonte pontual monocromática S passa por duas fendas que estão próximas entre si e equidistantes de S (Figura 2.1). As duas fendas atuam como fontes pontuais monocromáticas secundárias, de mesma fase, cujos raios se sobrepõem na região além do plano das fendas. Nesta região, um padrão de interferência é formado.

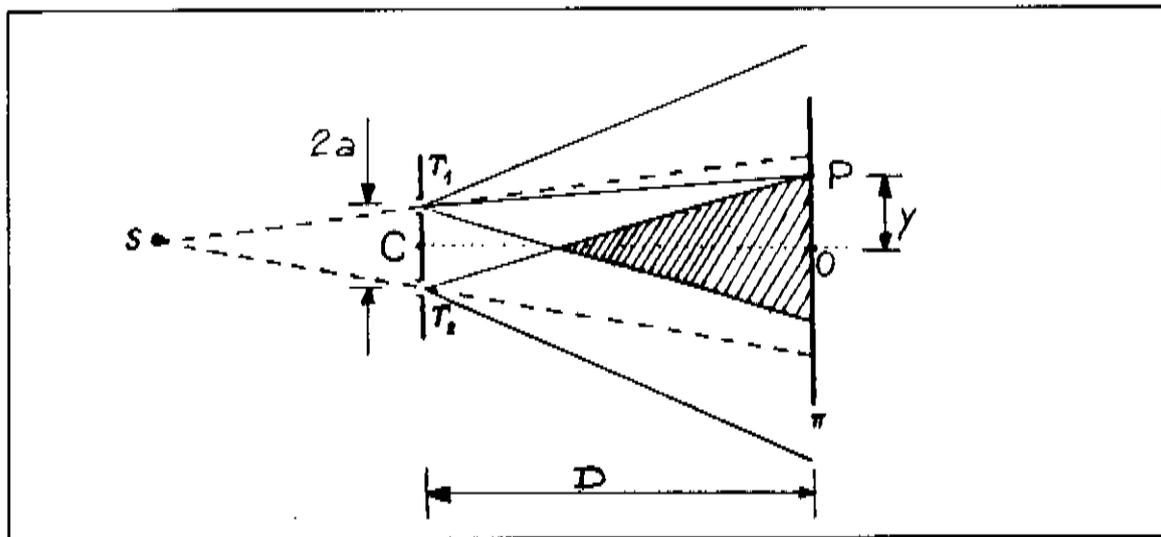


Figura 2.1 - Experimento de Young.

Num ponto qualquer P da tela π , a diferença de caminho Δp é :

$$\Delta p = T_2P - T_1P$$

Se $CO = D$,

$$OP = y,$$

$$T_1T_2 = 2a$$

Então podemos escrever:

$$\Delta p = [D^2 + (y+a)^2]^{\frac{1}{2}} - [D^2 + (y-a)^2]^{\frac{1}{2}}$$

Como observamos o fenômeno na vizinhança de O, e a distância $2a$ é pequena em relação a D , podemos aproximar o resultado para:

$$\Delta p = \frac{2ay}{D}$$

As franjas claras correspondem a $\Delta p = m\lambda$ (onde m é um número inteiro e λ é o comprimento de onda) e ocorrem em:

$$y = \frac{mD\lambda}{2a}$$

As franjas escuras ocorrem para:

$$\Delta p = \left(m + \frac{1}{2}\right) \cdot \lambda$$

ou seja,

$$y = \left(m + \frac{1}{2}\right) \cdot \frac{D\lambda}{2a}$$

A variação da intensidade luminosa no plano π , considerando as fendas idênticas, é dada por:

$$I = 4I_1 \cdot \cos^2 m\pi = 4I_1 \cdot \cos^2 \left(\frac{2\pi xy}{D\lambda}\right)$$

As franjas obtidas são linhas retas, paralelas e equidistantes.

Outro interferômetro simples pode ser construído com uma lâmina de vidro. Se uma lâmina transparente, com faces planas e paralelas, é iluminada por uma fonte monocromática, qualquer ponto P situado do mesmo lado da lâmina que a fonte é atingido por dois raios: um refletido na superfície superior da lâmina e outro refletido na superfície inferior da mesma (Figura 2.2). Por considerações de simetria, as franjas formadas num

plano paralelo à lâmina são circulares e centradas no ponto em que esse plano intercepta a normal da lâmina.

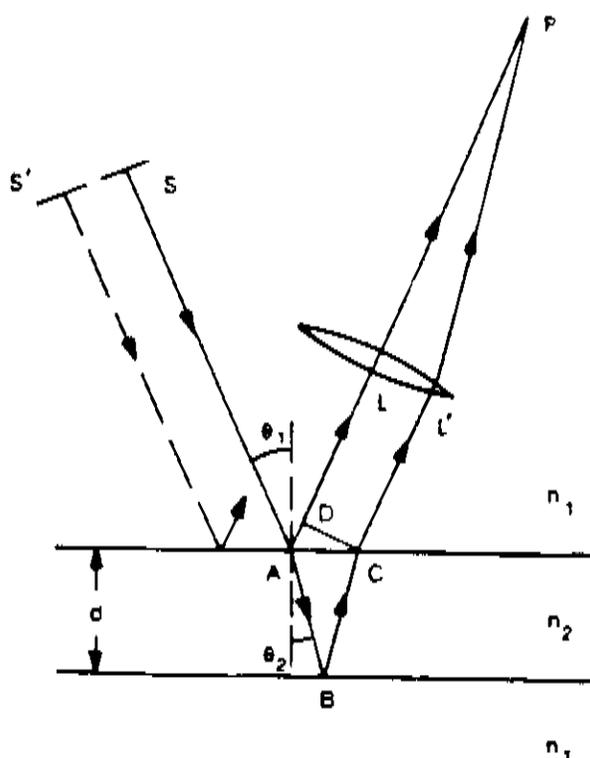


Figura 2.2 - Formação de franjas de mesma inclinação por reflexão numa lâmina de faces paralelas.

Se a fonte é não pontual, a visibilidade das franjas fica reduzida, exceto quando o plano de observação está no infinito, ou no plano focal de uma lente. Neste caso, os dois raios que interferem, AL e CL', são paralelos e provenientes do mesmo raio incidente. A lâmina tem largura d e índice de refração n_2 , enquanto o meio que envolve a lâmina tem índice de refração n_1 . Se θ_1 e θ_2 são, respectivamente, os ângulos de incidência e refração na superfície superior da lâmina, temos:

$$AB = BC = \frac{d}{\cos \theta_2}$$

$$AC = 2d \cdot \tan \theta_2$$

$$AD = AC \cdot \sin \theta_1 = 2d \cdot \tan \theta_2 \cdot \sin \theta_1$$

Desta forma, a diferença de caminho ótico entre os dois raios é:

$$\Delta p = n_2 \cdot (AB + BC) - n_1 \cdot AD$$

$$\Delta p = 2n_2 \cdot d \cdot \cos \theta_2$$

Mas também deve-se levar em conta a diferença de fase π introduzida pela reflexão em uma das superfícies, assim, temos:

$$\Delta p = 2n_2 \cdot d \cdot \cos \theta_2 \pm \frac{\lambda}{2}$$

Uma franja clara corresponde à condição:

$$2n_2 \cdot d \cdot \cos \theta_2 \pm \frac{\lambda}{2} = m\lambda$$

onde m é um inteiro, enquanto a condição

$$2n_2 \cdot d \cdot \cos \theta_2 \pm \frac{\lambda}{2} = (2m + 1) \cdot \frac{\lambda}{2}$$

é satisfeita para uma franja escura.

Uma dada franja é então caracterizada por um valor constante de θ_2 , e é formada pela luz incidente na lâmina em um ângulo particular. Por esse motivo, são chamadas "franjas de mesma inclinação".

Um terceiro exemplo de interferômetro usa a configuração conhecida como interferômetro de Michelson.

O interferômetro de Michelson (Figura 2.3) consiste de dois espelhos, M_1 e M_2 , e uma lâmina de vidro, G_1 , inclinada de 45° em relação às normais dos espelhos. Esta lâmina de vidro, semitransparente, tem a propriedade de refletir e transmitir a luz em iguais proporções.

Se usamos uma fonte pontual no foco da lente O_1 , o interferômetro é iluminado por um feixe de raios paralelos. Um raio, digamos, SA , é dividido em dois quando chega em A , na face semirefletora de G_1 . O raio AB_1 é refletido no ponto B_1 do espelho M_1 , retorna pelo mesmo caminho, atravessa G_1 e a lente O_2 . O outro raio atravessa G_1 , é refletido no ponto B_2 do espelho M_2 , volta e é refletido na face semirefletora A de G_1 , reatrasessa G_1 , e se superpõe ao primeiro raio na lente O_2 . O plano de observação fica abaixo da lente O_2 .

O primeiro raio atravessa G_1 apenas uma vez, enquanto o segundo raio o atravessa três vezes. Para que ambos os raios tenham trajetórias idênticas, usa-se um "compensador", G_2 , paralelo a G_1 , no primeiro raio. Esta lâmina deve ter a mesma

espessura e o mesmo índice de refração que G_1 . Pequenas diferenças de espessura entre as duas lâminas podem ser compensadas por uma pequena mudança de inclinação em G_2 .

O espelho M_2 tem, por reflexão na superfície semirefletora A do divisor de raios G_1 , uma imagem M_2' . O padrão de interferência observado pode ser considerado então como proveniente de uma lâmina de ar limitada pelo espelho M_1 e a imagem M_2' , se associarmos com a última uma mudança de fase ϕ igual à diferença entre as mudanças de fase correspondentes às reflexões internas e externas em A .

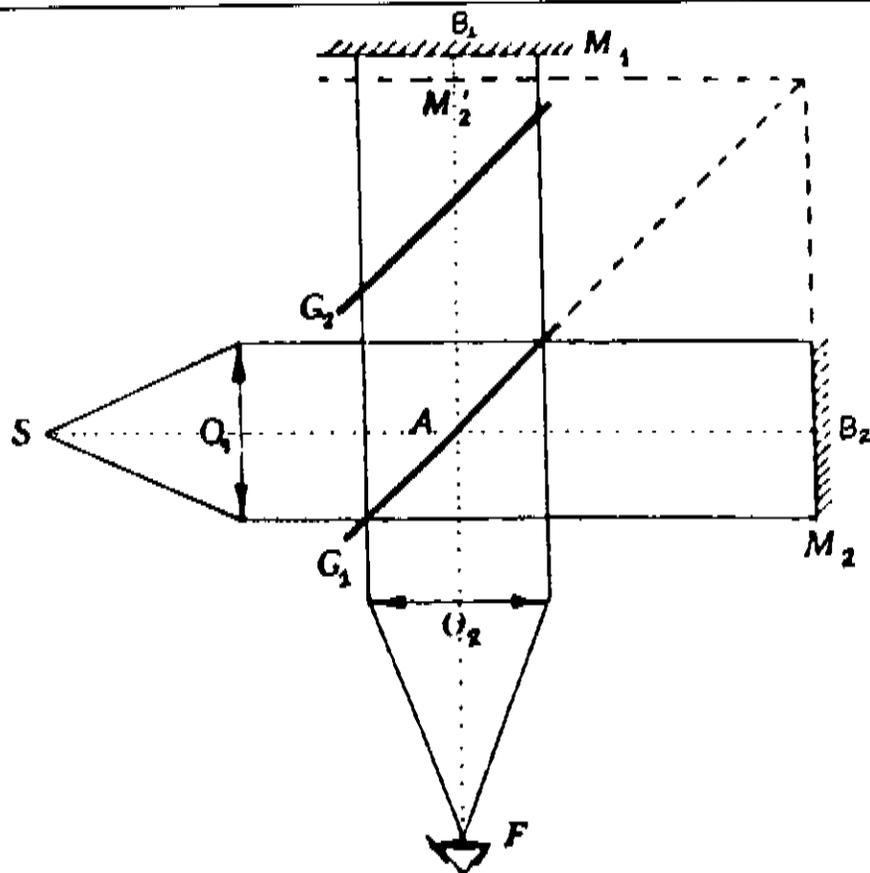


Figura 2.3 - Interferômetro de Michelson.

Quando M_1 e M_2' são paralelos, as franjas geradas são circulares e localizadas no infinito. Se movemos M_1 de modo a aproximá-lo de M_2' , as franjas se contraem em direção ao centro, e quando M_1 coincide com M_2' , a iluminação sobre o plano de observação é uniforme, num nível que depende de ϕ .

Quando M_1 e M_2' estão próximos entre si, mas inclinados um em relação ao outro, as franjas são linhas retas, paralelas e equidistantes. Isso ocorre somente se a distância entre M_1 e M_2' for suficientemente pequena. Caso contrário, à medida que aumentamos essa distância, a visibilidade das franjas diminui, e elas se tornam curvas.

De qualquer forma, estando M_1 e M_2' paralelos ou inclinados entre si, uma mudança de $\Delta m \cdot \lambda$ no caminho ótico em qualquer braço do instrumento resulta num deslocamento do padrão de interferência de Δm ordens.

II. C) Aplicações de Interferometria

Existem diversas aplicações de interferometria, como medidas de comprimento, rotações, índices de refração, além de espectroscopia, testes de elementos óticos e holografia. Os itens seguintes são alguns exemplos de aplicação desta técnica. Outros exemplos interessantes são apresentados por Françon^[10] e Klein^[11].

1) Medida do índice de refração de um gás

O aparato usado é o mesmo do experimento de Young. Duas câmaras C_1 e C_2 são colocadas na frente das fendas T_1 e T_2 (Figura 2.4). Para iniciar, as câmaras são evacuadas, e a franja central é posicionada em S' . O gás a ser estudado, de índice de refração n , é injetado em uma das câmaras.

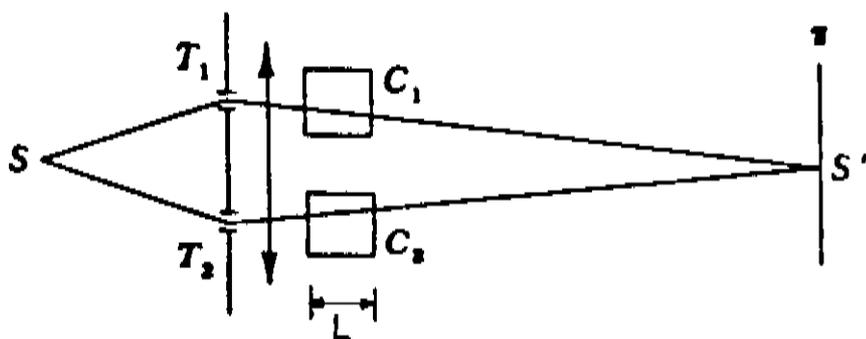


Figura 2.4- Interferômetro de Rayleigh para medição do índice de refração de um gás.

Seja L o comprimento das câmaras. A diferença de caminho ótico é:

$$\Delta p = \frac{2ay}{D} - (n-1)L$$

que é igual a zero em S' na ausência do gás, e igual a $(n-1)L$ se o gás está presente. As distâncias representadas por a , y e D são definidas de acordo com a figura 2.1.

Como a diferença de caminho ótico passa de zero a $(n-1)L$ em S' , temos a passagem de $m=(n-1)L/\lambda$ franjas pelo plano de observação. Se o gás é injetado na câmara lentamente, é fácil contar o número de franjas sem erro. Se o comprimento L é conhecido, pode-se deduzir o valor do índice n . Este método é conhecido como método de Rayleigh.

2) Testes de elementos óticos

Uma avaliação apropriada para lentes e prismas inclui um teste do caminho ótico através do elemento.

O interferômetro de Michelson pode ser alterado de modo a usar luz colimada para efetuar tal teste. Este instrumento, conhecido como interferômetro de Twyman-Green, é mostrado na figura 2.5. O raio de referência é refletido em I_2 , fornecendo uma onda plana que interfere com a frente de onda do raio de teste. O raio de teste deve passar através do elemento em estudo, em direção a um espelho (I_1) cuja distância focal coincide com a do elemento de teste (no caso de um prisma, usa-se um espelho plano). Se o elemento é perfeito, o raio refletido será novamente uma onda plana após passar através do elemento de teste pela segunda vez.

Os raios que se sobrepõem são coletados por uma lente e avaliados no ponto de observação, eletrônica ou fotograficamente. Um campo uniformemente iluminado é observado na imagem de um elemento de teste perfeito. Se existe uma imperfeição, o comprimento de caminho ótico dos raios que passam por esta região do elemento causa franjas na imagem, que representam contornos com comprimento de caminho ótico constantes.

Para saber se os contornos delimitam uma região óticamente espessa ou fina, o espelho esférico do raio de teste pode ser movido ligeiramente de forma a aumentar o comprimento de caminho ótico daquele raio. Os contornos se afastarão das regiões na imagem associadas com o retardado maior no elemento de teste. Se os contornos se abrem, então a região delimitada é óticamente mais densa que as regiões vizinhas.

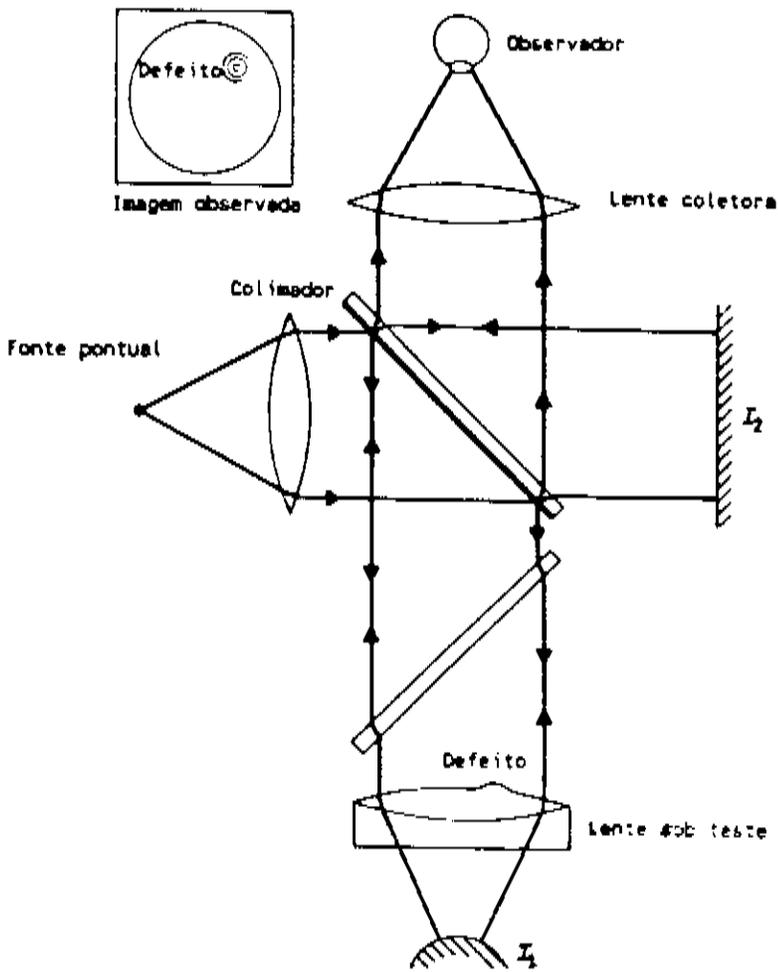


Figura 2.5 - Interferômetro de Twyman-Green.

A figura 2.6 mostra alguns defeitos que podem ser detectados no teste de uma lente.



Figura 2.6 - Padrões de interferência de Twyman-Green observados em lentes com aberrações primárias.

3) Medida de pequenos ângulos de rotação

A configuração usada para medidas angulares é o interferômetro de Michelson, modificado de forma a apresentar maior estabilidade mecânica. Dois exemplos foram descritos recentemente por Pan Shi e Stijns [12] e Mertz [13].

Vamos descrever o dispositivo de Pan Shi e Stijns, onde os espelhos do interferômetro de Michelson são substituídos por prismas retos (Figura 2.7). A rotação destes prismas desloca o padrão das franjas de interferência. Este deslocamento tem uma relação linear com o ângulo de rotação, que pode então ser calculado.

Ao passar pelo separador BS, o raio laser é dividido em dois raios, que são enviados à base giratória e refletidos pelos prismas, voltando ao separador BS exatamente pelo mesmo caminho. Se os dois prismas são iguais, de lado a, separados por uma distância L , a diferença de caminho ótico quando a base é girada de um ângulo θ , é:

$$\Delta p = 2(\sqrt{2} \cdot a + L) \cdot \text{sen} \theta$$

Esta relação não depende da posição do eixo de rotação. Devido à simetria, esta configuração apresenta grande sensibilidade.

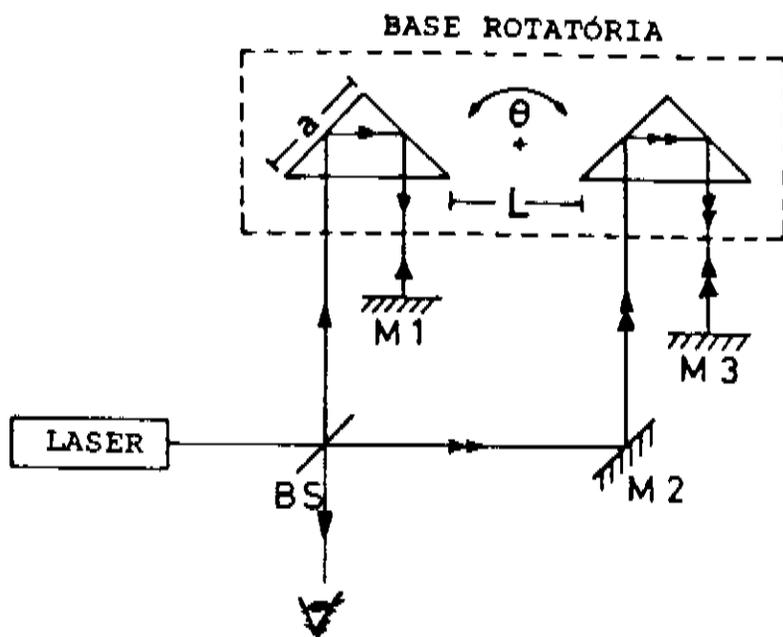


Figura 2.7 - Interferômetro de Michelson modificado para efetuar medidas de pequenos ângulos de rotação.

Capítulo III - Descrição do Instrumento

O instrumento desenvolvido neste trabalho pode ser dividido em três partes: mecânica, ótica e eletrônica. Na parte mecânica, veremos como foi feita a montagem do monocromador SGM, o tipo de estrutura utilizada e como é feito o acionamento angular. A parte ótica se refere ao interferômetro em si, seus componentes e sua geometria. A parte eletrônica descreve a detecção e contagem das franjas de interferência, além da interface com o computador.

III. A) Mecânica

A montagem do monocromador SGM foi feita conforme a figura 3.1. As grades de difração (número 1 da figura) do monocromador são mantidas fixas dentro da câmara de ultra alto vácuo, que é sustentada por pivôs flexíveis (2) e gira em torno de um eixo horizontal (y). A radiação síncrotron se propaga na direção x, e incide de maneira rasante sobre a grade. Na saída da câmara temos a luz monocromatizada, com um comprimento de onda definido pelo ângulo de inclinação da grade em relação ao eixo x.

O suporte da montagem é uma estrutura metálica com base hexagonal para melhor apoio. O sistema foi montado sobre 4 deslocadores verticais lineares que permitem o ajuste das alturas, de modo que o sistema fique nivelado.

O acionamento angular do sistema é feito através de uma haste (3) presa ao suporte do monocromador. Esta haste é empurrada por um acionador linear, que por sua vez está acoplado a um motor de passo.

Como a resolução que se pretende atingir é muito fina, cuidados especiais foram tomados para evitar vibrações. Para isolar a vibração inerente ao motor de passo, este foi montado sobre uma base independente do resto do sistema, e isolada do chão por uma manta de borracha.

O acoplamento do eixo do motor com o micrômetro do acionador linear foi feito através de duas correias dentadas, que absorvem parte da vibração. Além disso, utiliza-se um acoplamento flexível de aço inox entre o acionador linear e a haste da câmara.

O piso sobre o qual o sistema foi montado é isolado do resto do laboratório e feito de concreto especial.

O acionador linear utilizado é um modelo comercial, fornecido pela Micro-Controlle [14], com resolução de 10 μ m. O curso total é de 20mm.

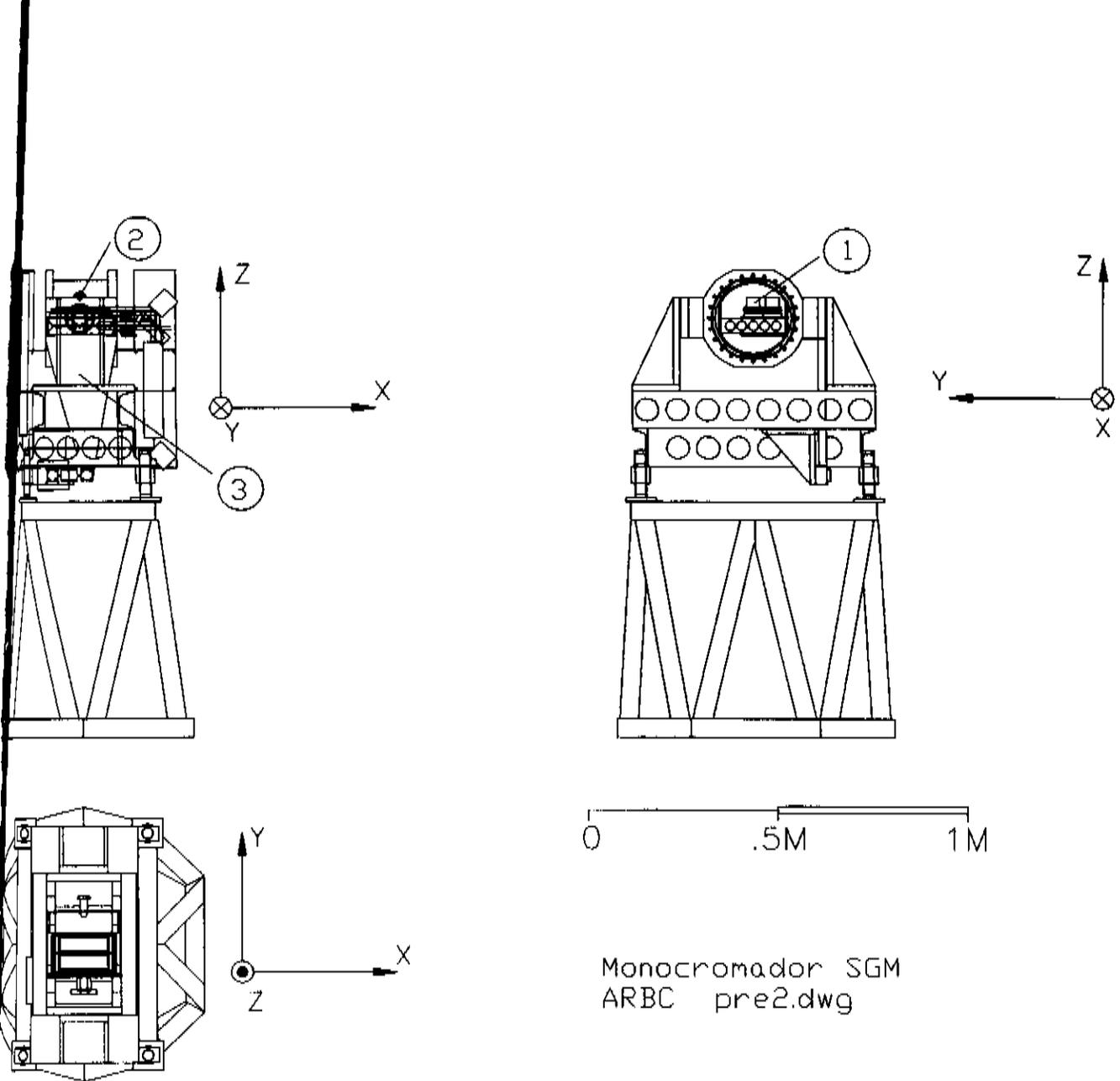


Figura 3.1 - Montagem do Monocromador SGM.

O motor de passo usado na montagem é de cinco fases, tipo híbrido. Neste tipo de motor, o rotor tem superfície dentada e é dividido em duas partes que são permanentemente magnetizadas, uma com polaridade norte e a outra sul (Figura 3.2). Quando um enrolamento é energizado, o polo do estator correspondente fica magnetizado, e o rotor se alinha com o estator de modo que a relutância para o fluxo magnético seja mínima. Esta posição é estável enquanto o enrolamento estiver energizado [15].

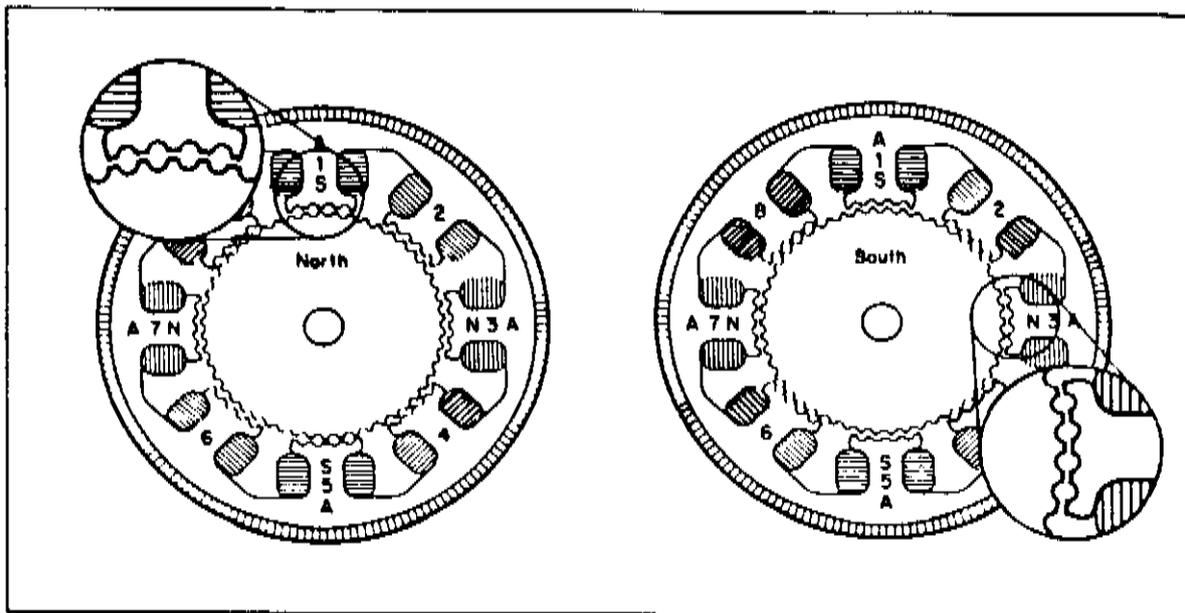


Figura 3.2 - Construção de um motor de passo tipo híbrido.

A polaridade do polo do estator depende da direção da corrente elétrica aplicada no enrolamento. Desta forma, cada enrolamento define duas posições diferentes e estáveis. Cada enrolamento vizinho, quando energizado, faz com que o motor se mova numa direção de rotação. Cada passo do motor é $1/4$ do período dos dentes do rotor.

O papel do driver do motor de passo é definir qual será o próximo enrolamento a ser energizado e a direção da corrente utilizada. O driver que utilizamos foi desenvolvido no LNLS para uso geral, e é do tipo "chopper" bipolar em dois quadrantes [16].

A tensão aplicada nos enrolamentos é maior que a tensão nominal, e a corrente é monitorada. Quando a corrente ultrapassa o valor desejado, desliga-se a bobina até que a corrente caia abaixo do valor estipulado, e então aplica-se novamente tensão na bobina. Com este procedimento, a performance do motor em termos de torque é otimizada, principalmente a altas velocidades.

O seqüenciamento das fases é feito no modo meio-passo, o que nos permite 1000 passos a cada volta do motor. O driver para motor de passo pode ser controlado manualmente ou por computador.

As polias utilizadas para acoplar o motor ao micrômetro através das correias dentadas têm tamanhos diversos, e estabelecem uma relação de quase onze voltas do motor para uma volta do micrômetro. Mais precisamente, são necessários 10909 passos do motor para 1 volta do micrômetro.

Cada divisão do micrômetro corresponde a um avanço linear de $10\mu\text{m}$. A distância entre o ponto de atuação do micrômetro e o eixo em torno do qual a câmara gira é de 480mm. Então, cada divisão do micrômetro corresponde a um deslocamento angular de :

$$\Delta\theta = \frac{10 \cdot 10^{-4} \text{ m}}{480 \cdot 10^{-3} \text{ m}} = 20.8 \mu\text{rad} / \text{divisão}$$

III. B) Ótica

O interferômetro que construímos é do tipo Michelson, onde os espelhos planos de cada braço foram substituídos por prismas retos. A configuração utilizada foi descrita por Pan Shi e Stijns (12).

A montagem foi feita sobre uma mesa ótica vertical, conforme a figura 3.3. Os dois prismas ficam presos ao suporte da câmara do monocromador, que gira em torno de um eixo horizontal.

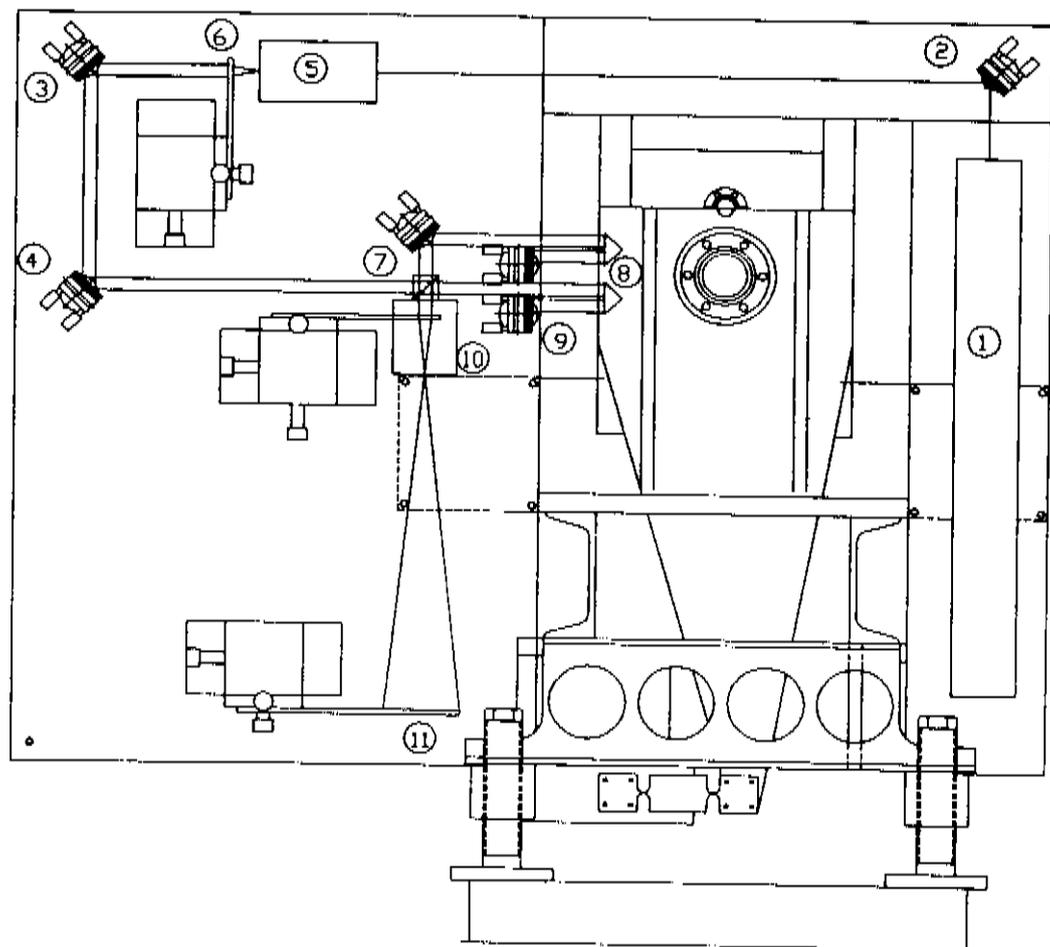


Figura 3.3 - Montagem do interferômetro para medidas angulares.

A luz do laser (número 1 da figura) é dirigida ao interferômetro por três espelhos planos (2, 3 e 4). O laser utilizado é de HeNe, com potência de 5mW. Todos os espelhos planos utilizados na montagem são de primeira superfície, aluminizados, com planicidade $\lambda/10$. Os suportes dos espelhos têm parafusos para ajustar a inclinação da superfície dos espelhos em relação ao feixe incidente.

Após o primeiro espelho, utilizamos um filtro espacial (5) com o objetivo de eliminar as flutuações do perfil gaussiano ideal do laser. Este filtro consiste de um "pinhole" de 20 μ m e uma objetiva de microscópio. Este elemento é fornecido pela Newport Research [17]. Sem as flutuações espaciais do laser, temos um contraste melhor nas franjas de interferência.

Uma lente biconvexa (6) é utilizada depois do filtro espacial para obtermos um feixe de raios paralelos. Esta lente tem revestimento anti-refletor nas duas superfícies.

O beamsplitter (7) utilizado para dividir a luz do laser é do tipo cubo, feito por dois prismas de ângulo reto. As faces hipotenusas são justapostas, com um dielétrico entre elas de forma que a luz seja refletida e transmitida em iguais proporções. As faces externas do beamsplitter têm recobrimento anti-refletor. Todos os elementos óticos, exceto o filtro espacial, são fornecidos pela Edmund Scientific [18].

Os dois raios obtidos após o beamsplitter (o raio transmitido e o raio refletido) são enviados aos prismas (8), sofrem duas reflexões nas superfícies internas de cada prisma, e são refletidos por espelhos planos (9), retornando ao beamsplitter pelo mesmo caminho. Após o beamsplitter estes raios são superpostos, formando um padrão de interferência.

Uma segunda lente biconvexa (10), idêntica à primeira, é utilizada após o beamsplitter para ampliar a imagem do padrão de interferência sobre os detetores (11).

Os detetores e as lentes são montados sobre mesas que permitem o ajuste de suas posições nos eixos x, y e z. O filtro espacial também pode ter sua posição ajustada nas três direções.

Os espelhos planos (9) que refletem a luz de volta para os prismas merecem atenção especial. Os dois parafusos de cada espelho permitem o ajuste do período e da inclinação das franjas de interferência.

Pela geometria da ótica, com dois prismas idênticos, a diferença de caminho ótico entre os dois raios quando rodamos o sistema de um ângulo θ é:

$$\Delta P = 2.(\sqrt{2}.a + L).sen\theta$$

onde a é o lado dos prismas e L a distância entre eles.

O número de franjas que se deslocam é dado por:

$$\Delta N = \frac{2 \cdot \Delta P}{\lambda}$$

onde λ é o comprimento de onda da luz utilizada. Como os ângulos a serem medidos são pequenos, podemos usar a seguinte aproximação:

$$\text{sen}\theta \approx \theta$$

Esta aproximação, derivada da série de Taylor para a função seno:

$$\text{sen}\theta = \theta - \frac{\theta^3}{3!} + \dots$$

é válida, com erro menor que 1/10.000, para ângulos menores que:

$$\frac{\theta^3}{6} \leq \frac{1}{10000} \Rightarrow \theta^3 \leq 6 \cdot 10^{-4} \Rightarrow \theta = 0,08 \text{rad}$$

Ou seja, aproximadamente $4,5^\circ$. O curso total do nosso instrumento é de apenas $2,5^\circ$, portanto, esperamos um comportamento linear em todo o curso disponível.

Na montagem, temos:

$$a = 19 \text{mm};$$

$$L = 13 \text{mm, e}$$

$$\lambda = 6328 \text{ \AA}$$

Então o número de franjas por radiano é:

$$\frac{dN}{d\theta} = \frac{4 \cdot (\sqrt{2} \cdot a + L)}{\lambda} = 2,52 \cdot 10^5 \text{ franjas/radiano}$$

ou, de modo inverso, cada franja corresponde a um deslocamento angular de:

$$\frac{d\theta}{dN} = 3,95 \mu\text{rad} / \text{franja}$$

Observação: Definimos como uma franja cada período do padrão de interferência, ou seja, uma região iluminada mais uma região escura.

A tabela abaixo resume as relações entre motor, micrômetro, deslocamento angular e número de franjas. Como vimos na seção anterior, uma divisão do micrômetro usado na montagem corresponde a um deslocamento angular de $20,8\mu\text{rad}$ ou, usando a relação geométrica da ótica, ao deslocamento de 5,26 franjas. Ora, uma volta do micrômetro tem 50 divisões (263 franjas) e corresponde a 10.909 passos do motor. Assim obtemos uma relação teórica de 41,5 passos do motor para cada franja ou, de outra forma, cada 1000 passos do motor deslocam 24,1 franjas. Usaremos esta relação para a análise dos dados obtidos com o instrumento.

Passos do Motor	Micrômetro (μm)	Ângulo (μrad)	Número de Franjas
10.909	500	1.040	263
218,2	10	20,8	5,26
41,5	1,9	3,95	1

Tabela 3.1 - Relações mecânicas.

III. C) Eletrônica

A eletrônica para detecção e contagem das franjas pode ser entendida com a ajuda do diagrama de blocos da figura 3.4.

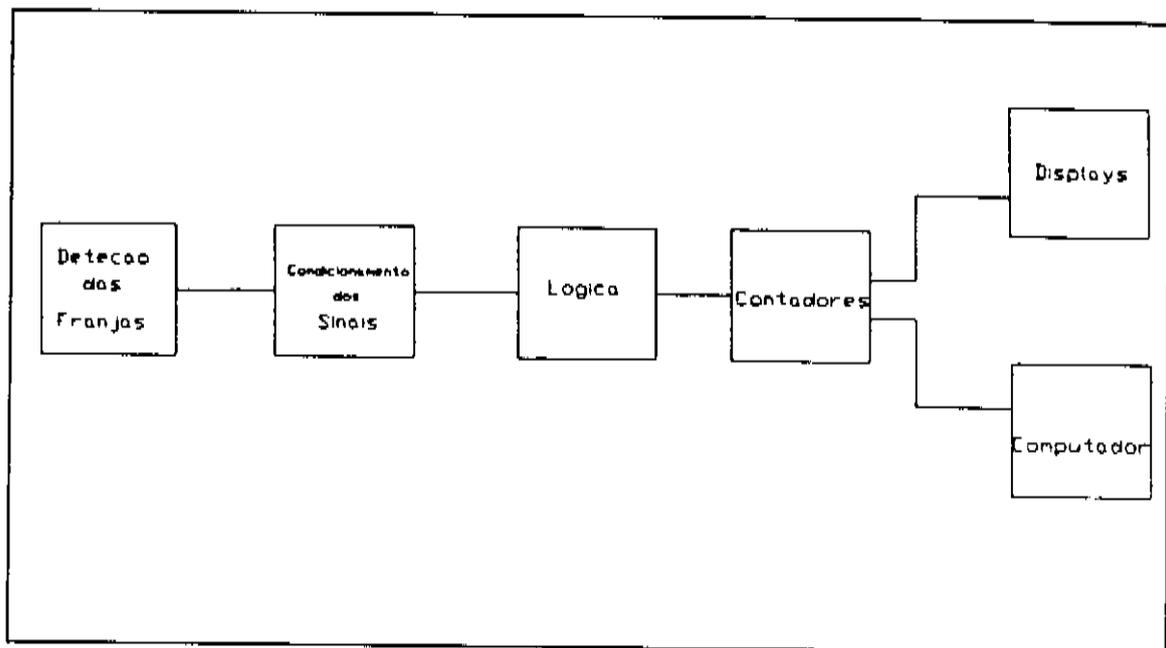


Figura 3.4 - Diagrama de blocos da eletrônica para contagem das franjas.

A detecção das franjas é feita através de dois fototransistores de fabricação nacional, que são polarizados de forma a permanecerem na região linear. Como a variação da intensidade luminosa do padrão de franjas é senoidal, durante o deslocamento das franjas os sinais analógicos na saída dos detetores são senoidais.

O condicionamento dos sinais é feito com o uso de "Schmitt triggers". Estes dispositivos definem uma janela de histerese, de forma que a saída só passa para o nível lógico alto quando o sinal na entrada for superior a um determinado nível de tensão, e a transição para o nível lógico baixo ocorre somente quando a entrada for inferior a outro nível de tensão pré-estabelecido e inferior ao primeiro. Os sinais obtidos são ondas quadradas, com bordas de subida e descida bem definidas.

O próximo estágio é um circuito lógico que gera os sinais de acionamento do conjunto de contadores. Estes sinais habilitam a contagem e definem um sentido para a mesma. Os contadores são bidirecionais, com saídas BCD, conectados em cascata.

O resultado da contagem é passado para o computador e mostrado também em displays de sete segmentos. A interface com o computador é feita através de um sistema de controle desenvolvido no LNLS para uso geral (LOCO (19)). Este sistema de controle é baseado no microprocessador Z80, e a interface com o computador é serial, tipo RS232. Este mesmo sistema controla também o driver para motor de passo.

O período do padrão de interferência é ajustado como mostra a figura 3.5. O espaçamento entre os dois detetores corresponde a $1/4$ do período das franjas. Desta forma, os sinais nas saídas dos detetores estarão defasados de 90° .

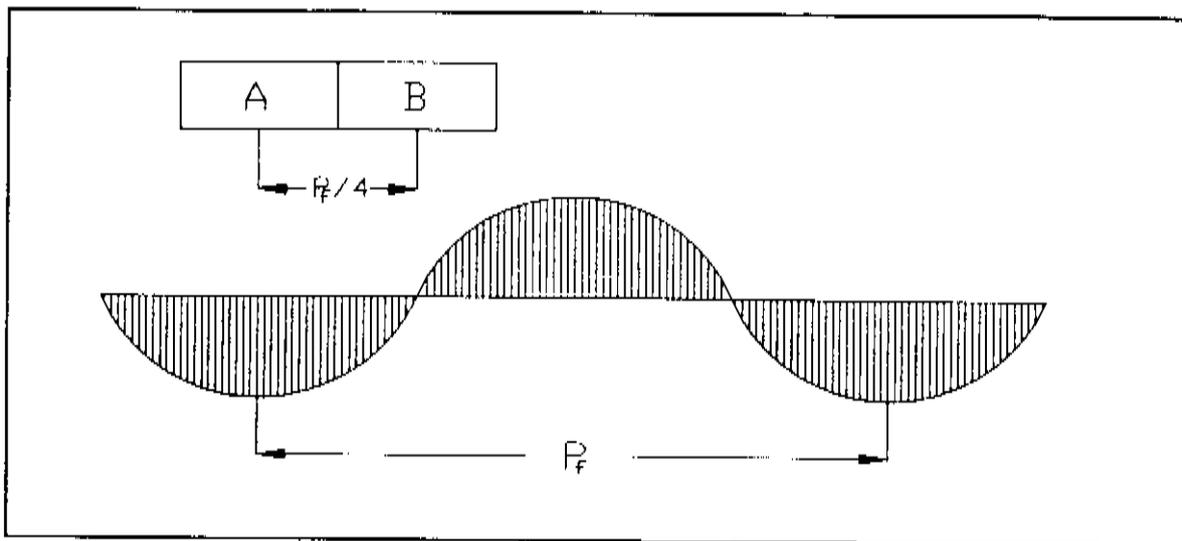


Figura 3.5 - Ajuste do período das franjas.

Para verificar o período das franjas e ajustar a polarização dos fototransistores, fizemos uso, no osciloscópio, de uma figura de Lissajous. Os dois sinais senoidais, quando estão com a mesma amplitude de pico a pico, e defasados de 90° exatamente, descrevem um círculo na tela do osciloscópio.

Para ajustar a amplitude dos sinais dos detetores, variamos o ganho dos mesmos através de trimpots. É desejável que a diferença entre as tensões de saída nos estados iluminado e não iluminado seja máxima, e que os picos sejam simétricos em relação à metade da tensão de alimentação.

Feitos os ajustes apropriados, as saídas dos detetores, $V(A)$ e $V(B)$, já condicionadas, se apresentam conforme mostram os diagramas temporais nas figuras 3.6 e 3.7.

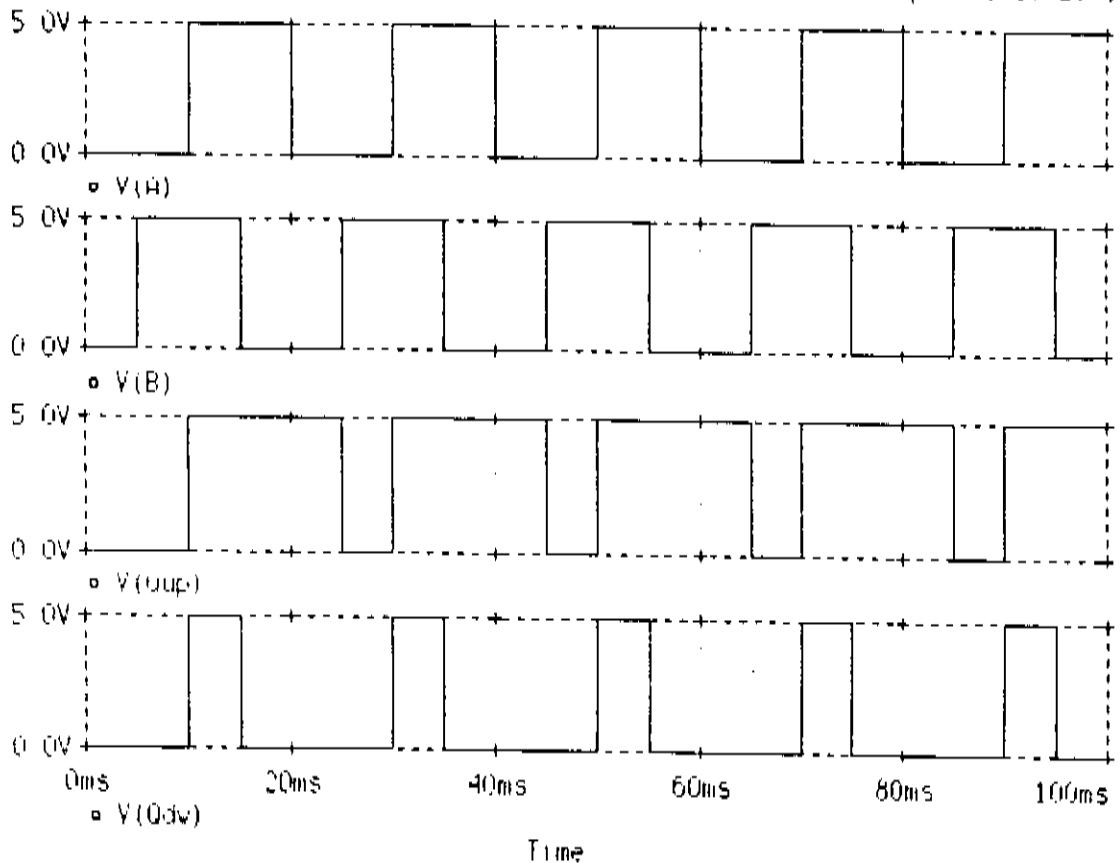


Figura 3.6 - Diagrama temporal para o sentido UP.

Se as franjas se deslocam no sentido que definimos como UP, o sinal V(A) está defasado em relação ao sinal V(B) de 90°. Caso contrário, com as franjas se movendo no sentido DOWN, teremos V(B) defasado em relação a V(A). A frequência dos sinais depende da velocidade com que as franjas se deslocam. O diagrama apresentado é meramente ilustrativo.

Os contadores que utilizamos têm duas entradas de controle: o CLOCK, cujas bordas de subida são contadas, e UP/DOWN, que define em que sentido será a contagem. A saída do contador é incrementada (+1) quando a borda de subida do CLOCK ocorre enquanto o sinal de UP/DOWN estiver alto. Se a borda de subida do CLOCK ocorrer enquanto o UP/DOWN estiver baixo, a saída do contador é decrementada (-1).

Observando o diagrama temporal, parece óbvio e simples usar o sinal V(A) como CLOCK e V(B) como UP/DOWN para os contadores, já que, no sentido UP, as bordas

de subida de $V(A)$ só ocorrem quando $V(B)$ está alto; e no sentido DOWN, as bordas de subida de $V(A)$ só ocorrem com $V(B)$ baixo.

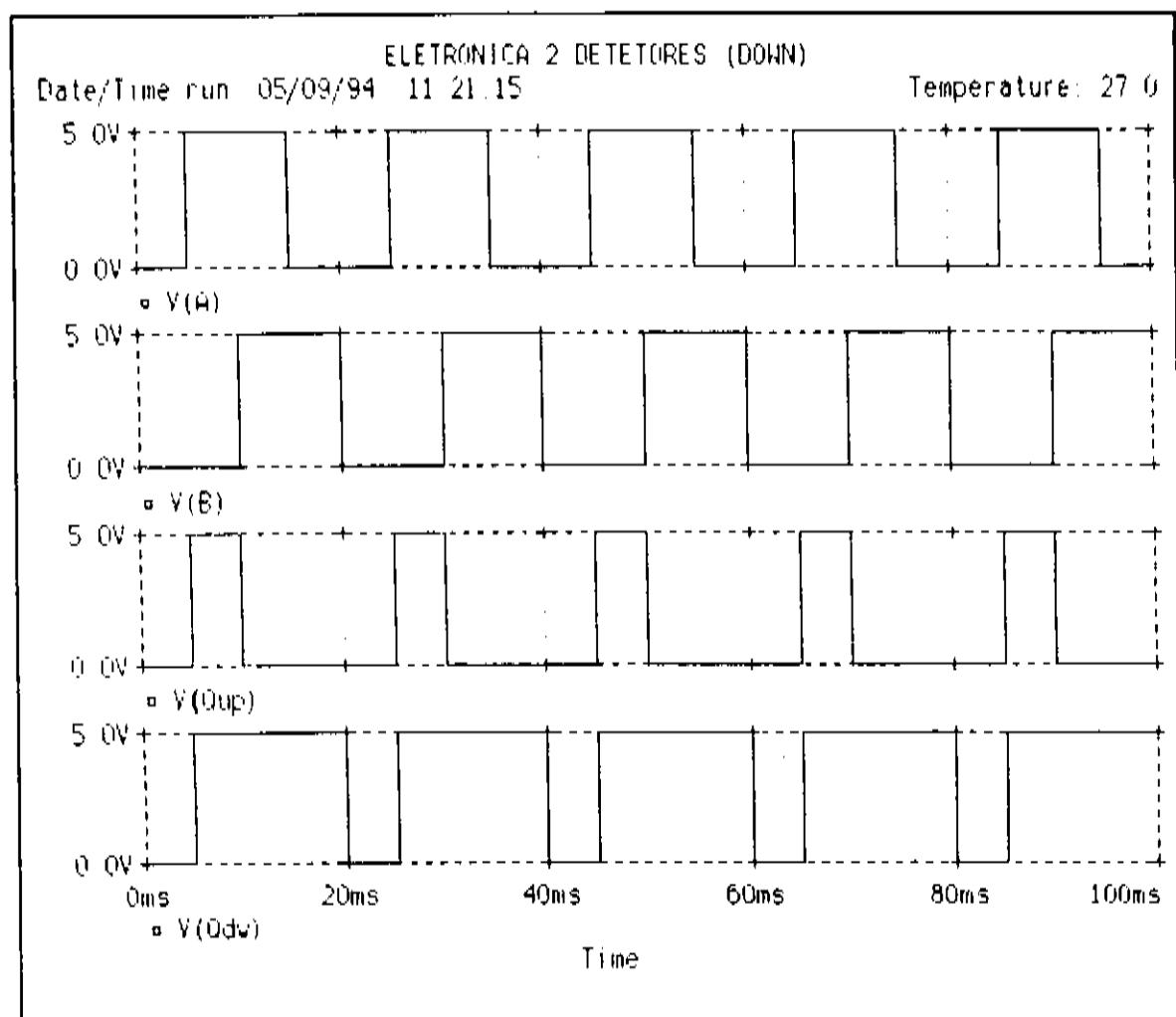


Figura 3.7 - Diagrama temporal para o sentido DOWN.

Esta seria uma solução insatisfatória, pois se houver uma pequena oscilação das franjas em torno do ponto em que ocorre a borda de subida de $V(A)$, a contagem seria falsa, sempre no mesmo sentido. Para evitar este problema, introduzimos uma histerese no sistema de 1/2 franja, ou seja 180° . Isto foi implementado com três monoestáveis e dois flip-flops.

O primeiro monoestável captura a borda de subida de $V(A)$, outro a borda de subida de $V(B)$, e o terceiro captura a borda de descida de $V(B)$. Na saída dos monoestáveis temos pulsos positivos de curta duração ($10\mu s$).

Os flip-flops são usados no modo set-reset. Um pulso positivo na entrada SET do flip-flop força a saída para o estado alto, enquanto um pulso na entrada RESET força a saída para o nível lógico baixo.

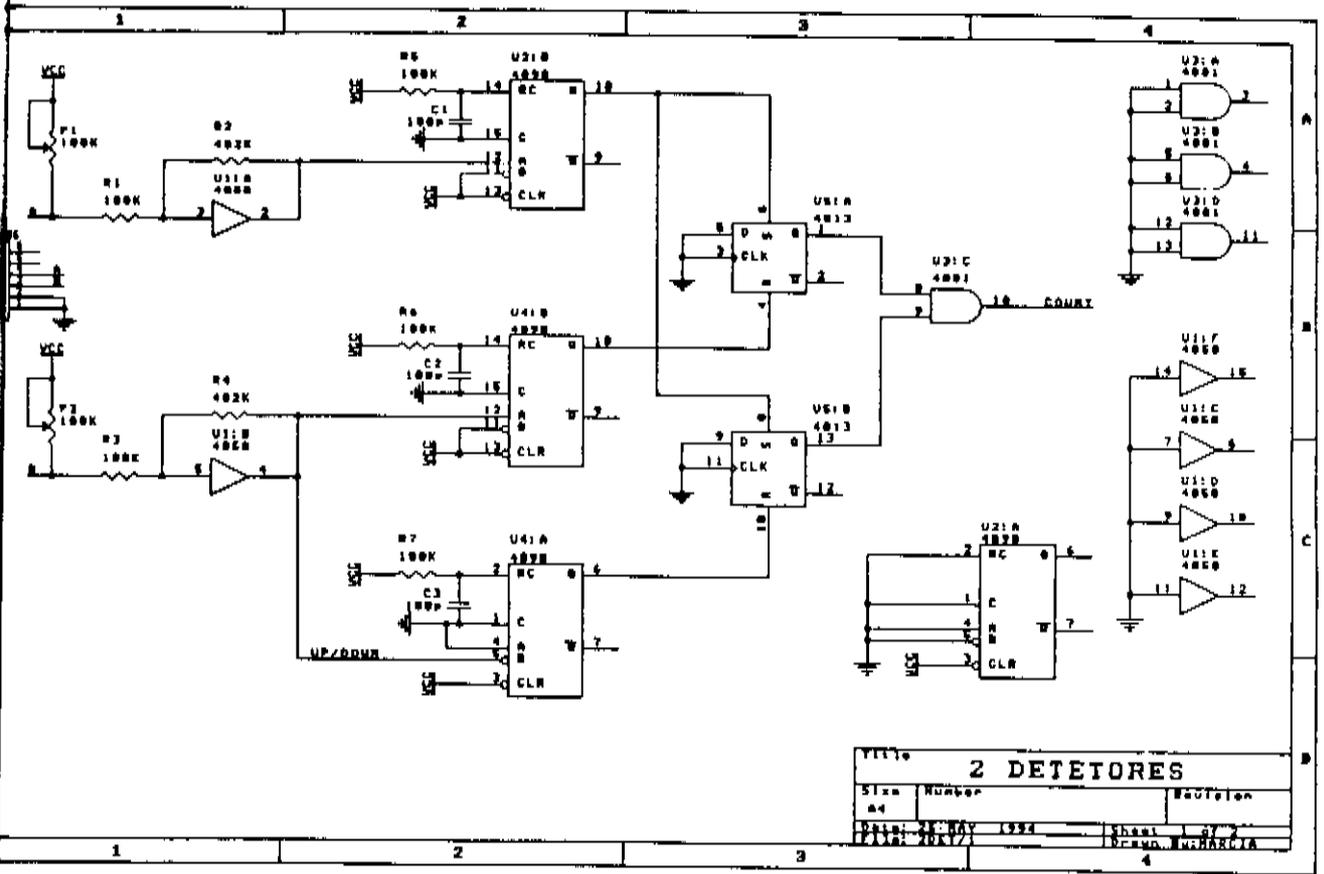
É importante dizer que, quando o flip-flop já está setado, a ocorrência de novos pulsos de SET é ignorada. O mesmo é válido para a entrada RESET. Se a saída do flip-flop já estiver baixa, a ocorrência de novos pulsos de RESET é ignorada.

Os dois flip-flops são setados pela borda de subida de V(A). Um flip-flop, cuja saída é V(Qup), mostrada no diagrama, é resetado pela borda de subida de V(B) e o outro, cuja saída é V(Qdw), é resetado pela borda de descida de V(B).

O sinal V(B) é usado como UP/DOWN para os contadores, enquanto o CLOCK é resultado de um AND das saídas dos flip-flops {V(Qup) e V(Qdw)}. Ou seja, apenas quando os dois flip-flops são setados é que efetua-se uma alteração na contagem. E enquanto um flip-flop estiver resetado (ou ambos), a contagem é desabilitada.

Desta forma, a ocorrência de pequenas oscilações nas franjas é desprezada, e quando estas oscilações forem maiores que 1/2 franja, o sentido da contagem é invertido de modo apropriado.

A montagem da eletrônica foi feita como mostra o diagrama esquemático das figuras 3.8 e 3.9. O circuito foi implementado usando circuitos integrados CMOS alimentados com 5V DC, para que as saídas fossem compatíveis com o sistema LOCO, que passa o resultado da contagem para o computador.



Título		
2 DETETORES		
Sheet	Number	Revision
04		
Proj:	Des:	Sheet
1001/77	1994	01/2
Desenho:		Execução:
M. H. R. C. A.		

Figura 3.8 - Diagrama esquemático da eletrônica para contagem das franjas.

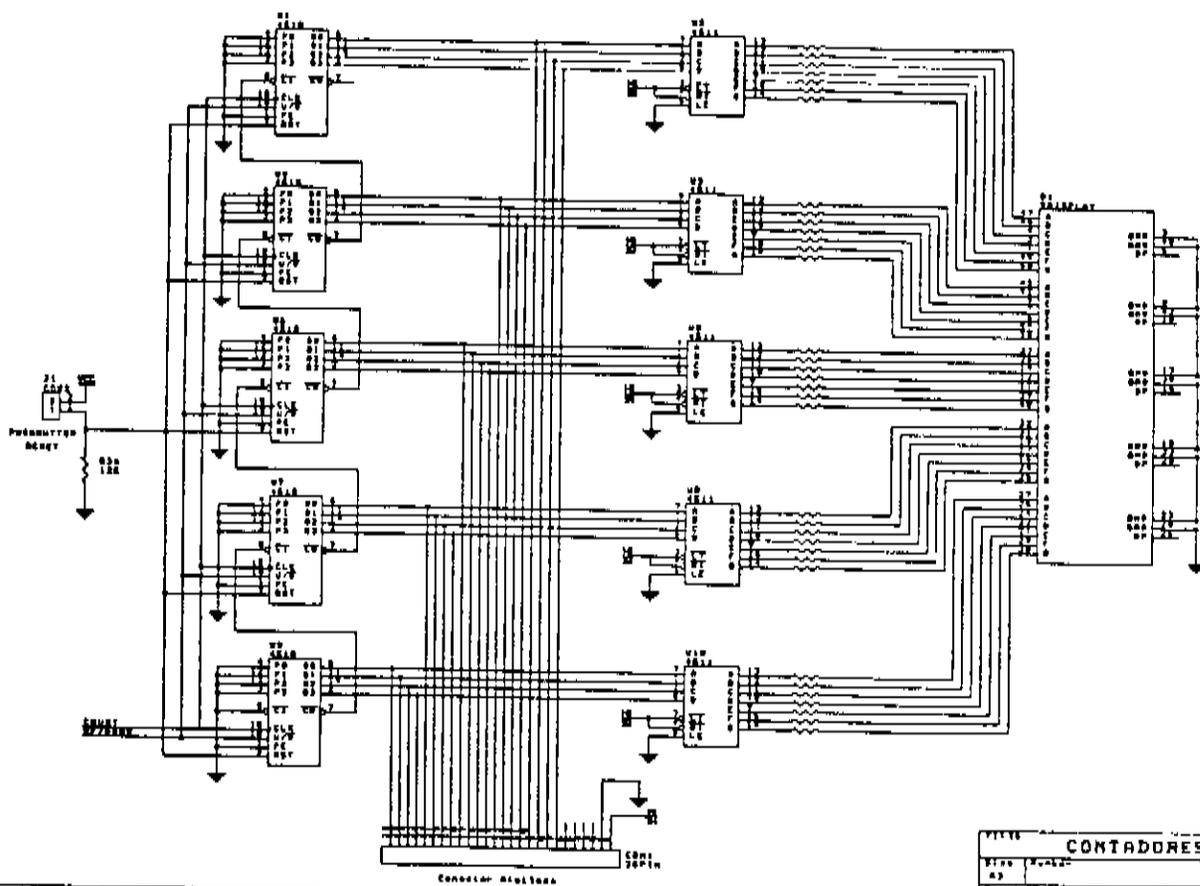


Figura 3.9 - Diagrama esquemático da eletrônica para contagem das franjas (parte 2).

Capítulo IV - Resultados Obtidos

Para avaliar o funcionamento do instrumento desenvolvido, montamos um sistema de teste como mostra a figura 4.1. O programa de teste foi desenvolvido em linguagem Pascal. Em primeiro lugar, o computador envia instruções para que o LOCO leia o estado atual da contagem das franjas na saída dos contadores. A seguir, passa instruções para o acionamento do motor de passo. Quando acionado, o motor desloca o padrão de franjas, alterando a contagem. Ao fim da operação, o computador envia novamente ao LOCO instruções para a leitura do número de franjas.

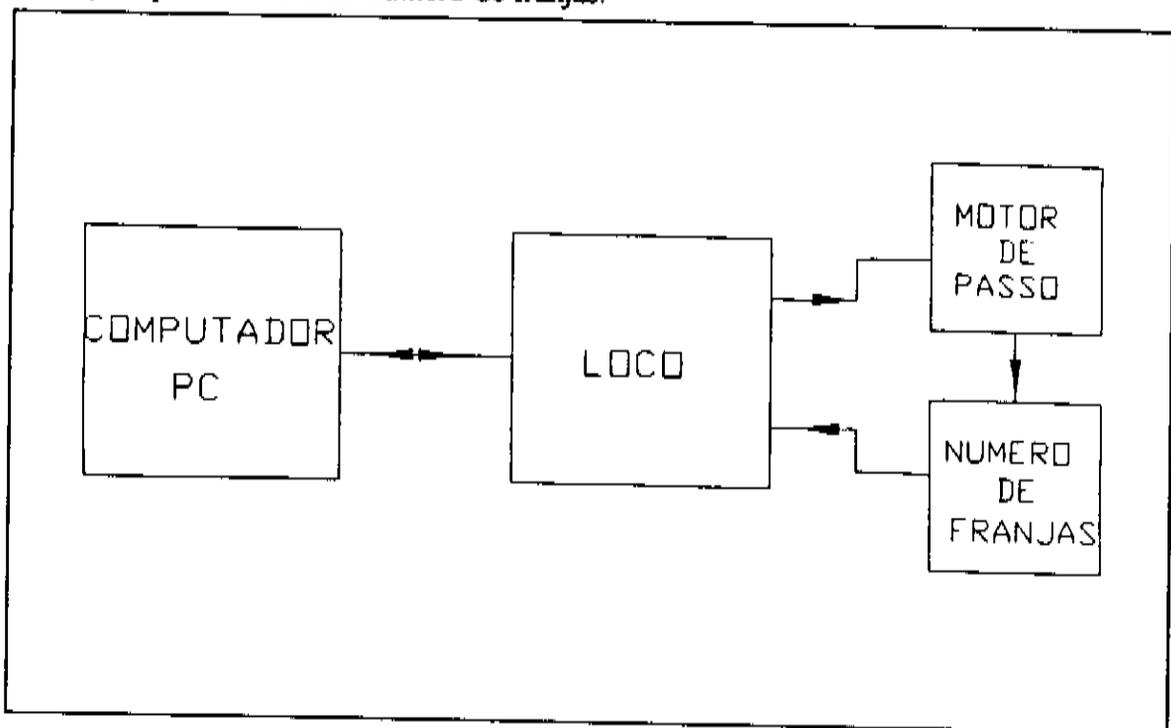


Figura 4.1 - Montagem para teste do instrumento.

O gráfico mostrado na figura 4.2 foi obtido com este programa de teste. O número de franjas foi amostrado a cada 1000 passos do motor. Foi feita uma regressão linear com os dados obtidos. O gráfico mostra os dados experimentais e a reta obtida com a regressão linear. Nota-se que a resposta do sistema é bem linear. A declividade da reta calculada foi de 24,37 franjas a cada 1000 passos. O valor teórico esperado (item III.B) era de 24,1. Portanto, os resultados obtidos são satisfatórios.

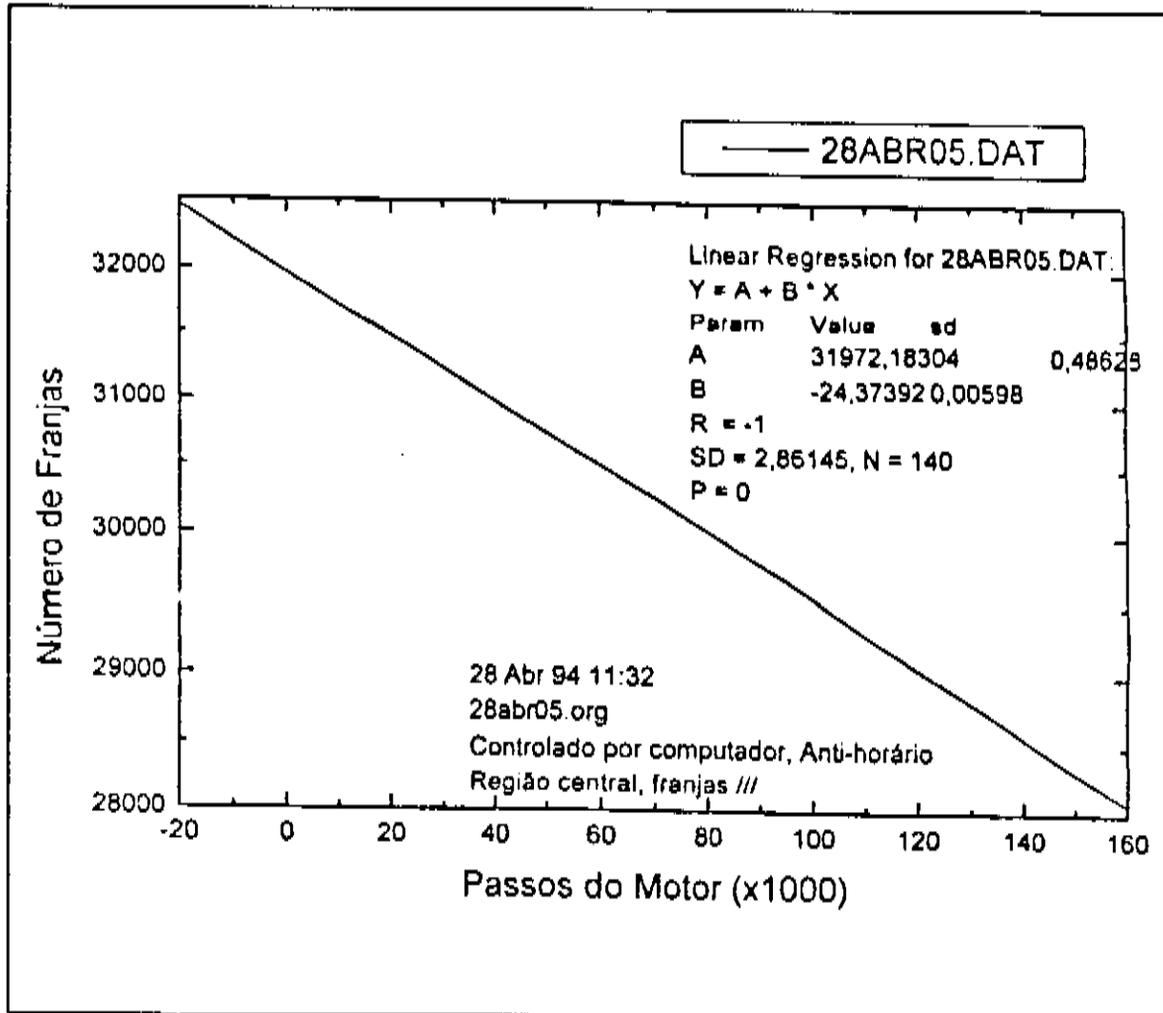


Figura 4.2 - Teste da linearidade do sistema.

Para avaliar melhor o desempenho do sistema, subtraímos a reta calculada dos dados experimentais. O resultado é mostrado na figura 4.3. Observa-se que o erro tem um comportamento oscilatório, com período em torno de 11.000 passos do motor, que corresponde exatamente a uma volta do micrômetro.

A precisão do parafuso micrométrico é de meia divisão. Cada divisão do micrômetro, como vimos no item III.B, corresponde a 5,26 franjas, portanto, o erro esperado é de 2,63 franjas. O erro quadrático médio que foi calculado, baseado nos dados experimentais (SD = 2,86 franjas), é da ordem do erro esperado, de onde concluímos que o erro observado é devido ao parafuso micrométrico, e este resultado é o melhor que se pode obter na montagem realizada.

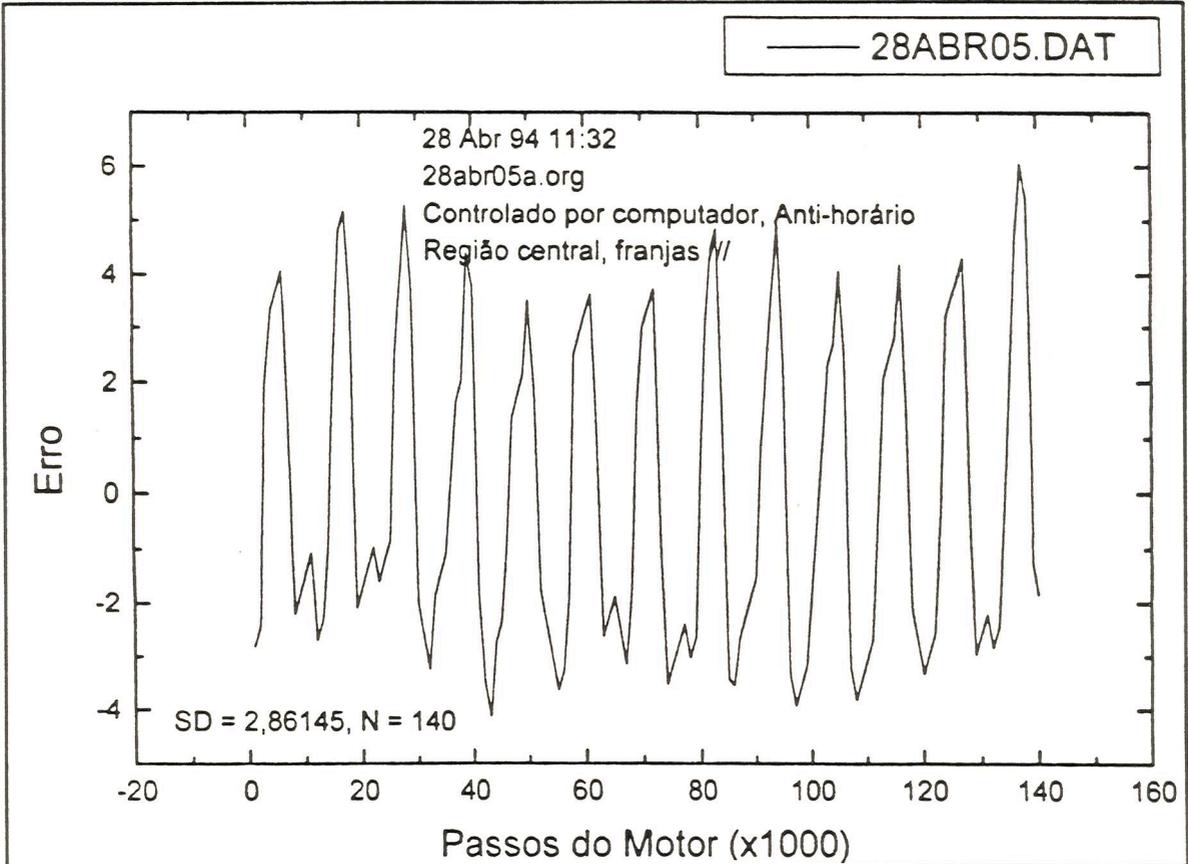


Figura 4.3 - Erro do sistema (região central).

Estes dados foram obtidos na região central do curso do acionador linear, longe dos extremos, correspondendo a um terço do curso total disponível. Foram tomados 140 pontos, que correspondem a 140 voltas do motor. Para avaliarmos o comportamento do instrumento em todo o curso, efetuamos o mesmo tipo de teste com 420 voltas do motor. As figuras 4.4 e 4.5 mostram os erros obtidos no curso total com o motor girando no sentido anti-horário e horário, respectivamente.

A periodicidade no erro associada ao micrômetro está presente, e o erro quadrático médio obtido no sentido anti-horário foi de 2,80 franjas, enquanto que no sentido horário foi de 3.33. Aparecem ainda outras oscilações, não periódicas, devidas a problemas mecânicos, provavelmente deslizos dos pivôs flexíveis que sustentam a câmara do monocromador.

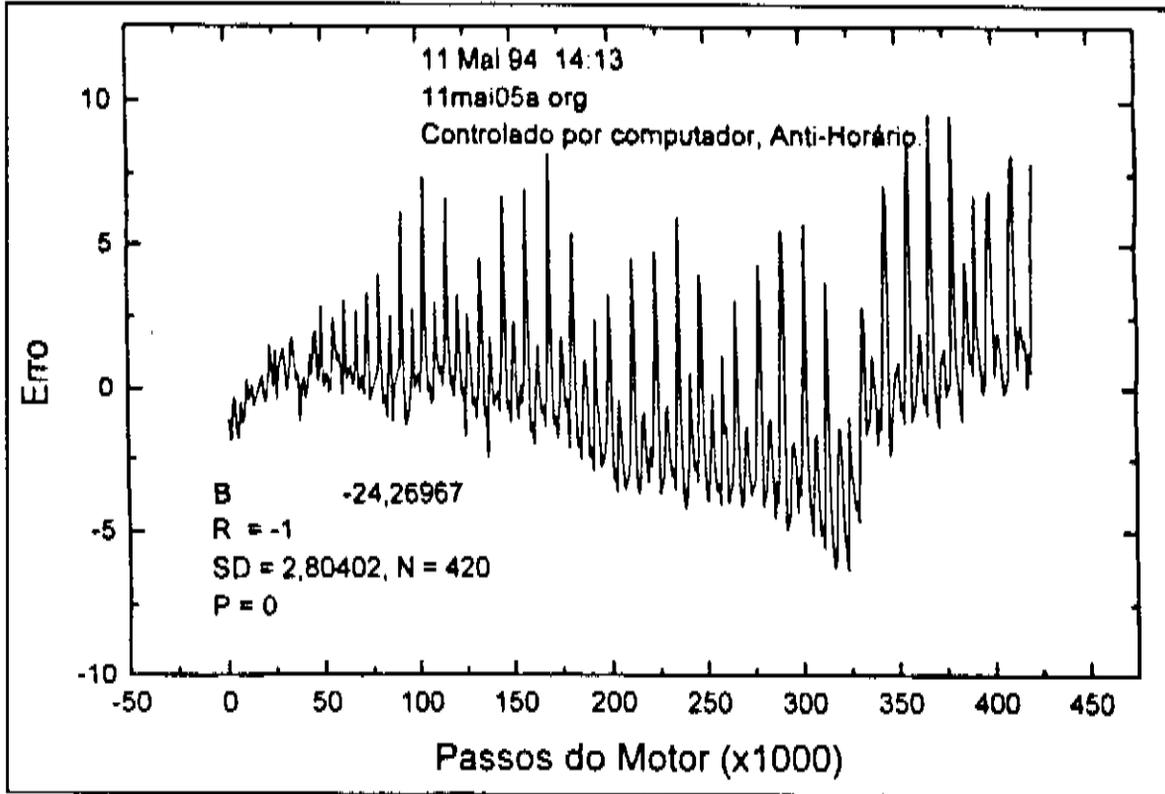


Figura 4.4 - Erro do sistema (curso total, sentido anti-horário).

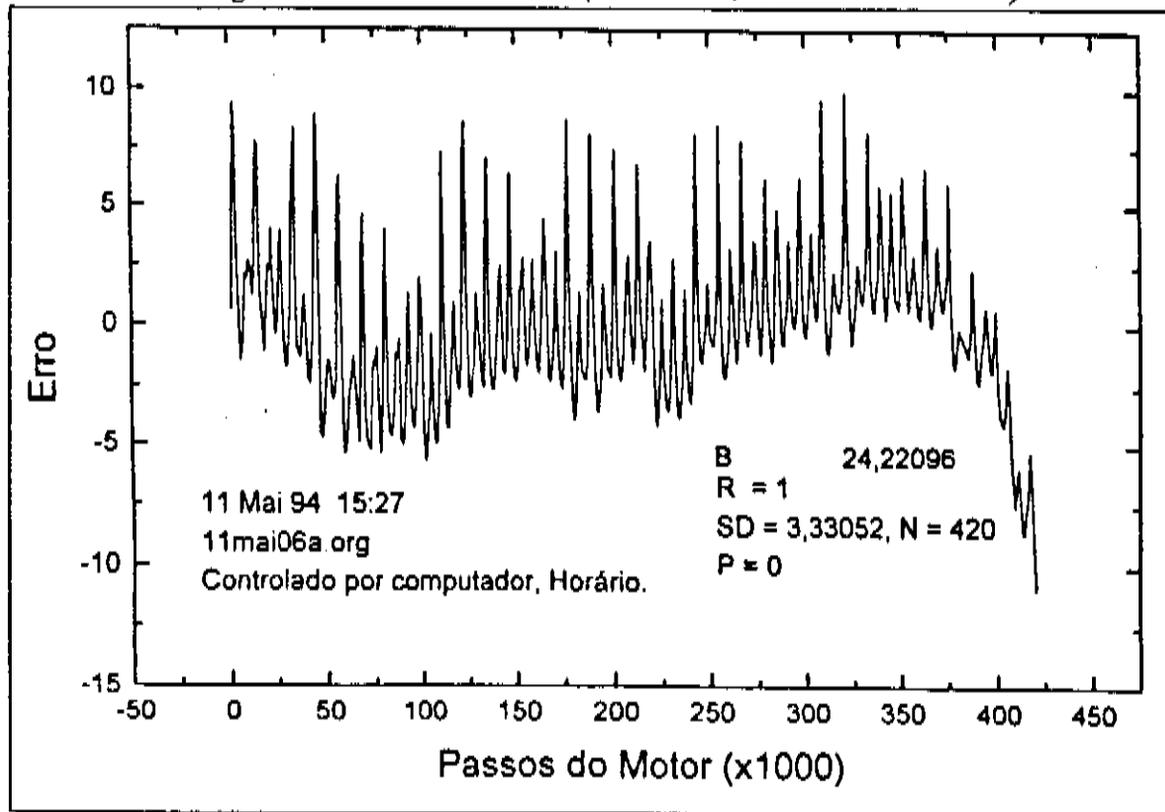


Figura 4.5 - Erro do sistema (curso total, sentido horário).

Apesar disso, obtivemos novamente uma resposta linear, e a declividade das retas obtidas nos dois conjuntos de dados (24,26 e 24,22 franjas a cada 1000 passos do motor) está dentro do esperado.

O erro absoluto observado no curso total é de 5 franjas, que equivalem a uma parte em 2.630. Esperamos diminuir este erro para uma parte em 10.000 com as alterações mecânicas descritas no capítulo V.

Outro tipo de teste realizado foi verificar a estabilidade do sistema. Para isso, acompanhamos a variação do número de franjas ao longo do tempo, com o motor parado. O resultado obtido é mostrado no gráfico da figura 4.6. A contagem oscilou de apenas uma franja por mais de dezesseis horas de amostragem. O experimento foi efetuado durante a noite.

Todos os resultados apresentados foram obtidos com o sistema de ar condicionado desligado, pois o mesmo provoca turbulências no ar, que alteram o caminho ótico dos raios de luz que interferem. O padrão de franjas fica oscilante quando o ar condicionado está ligado, dificultando a contagem.

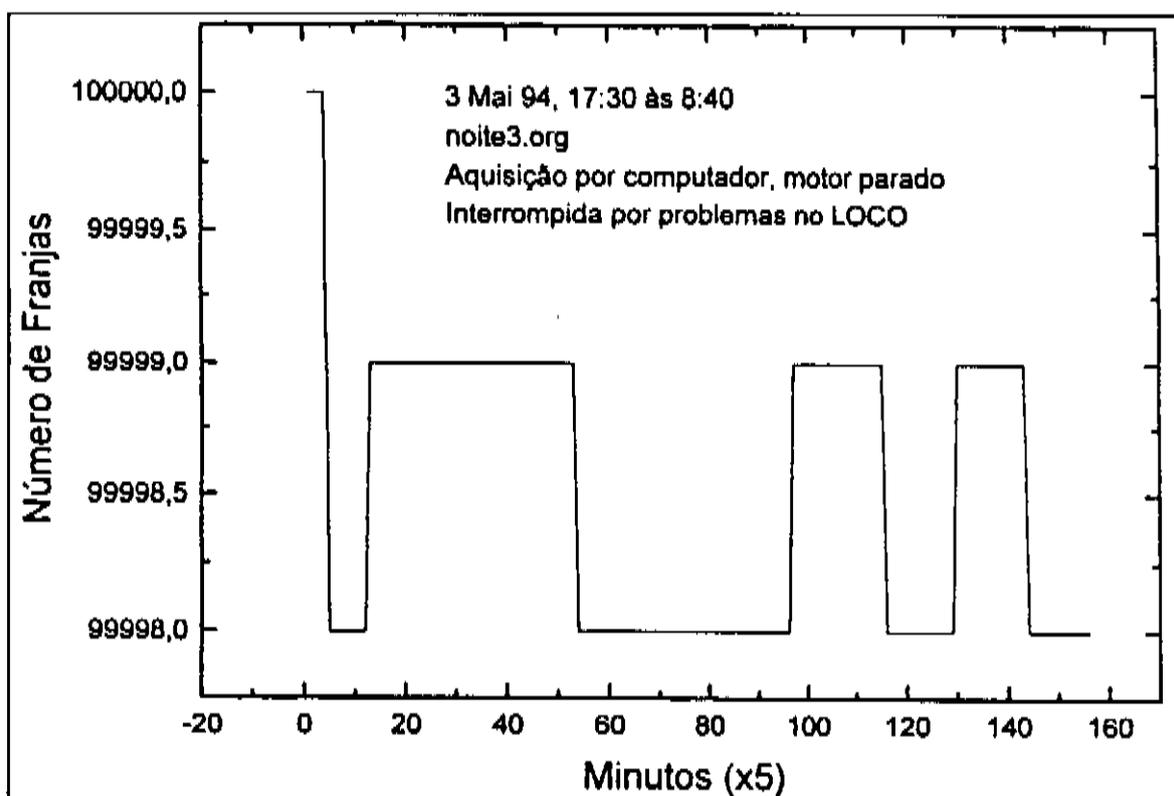


Figura 4.6 - Teste da estabilidade ao longo do tempo.

Capítulo V - Perspectivas

Apesar dos cuidados tomados na montagem do instrumento (item III.A), o sistema ainda é bastante sensível a vibrações mecânicas. Para minimizar este problema, já estão sendo providenciadas melhorias na estrutura da montagem.

A base metálica sobre a qual o instrumento foi montado será substituída por um bloco de concreto, e uma mesa ótica de alumínio maciço, mais estável, será usada para a montagem do interferômetro.

O acionamento do sistema, que compreende o motor de passo, correias dentadas e micrômetro, será substituído por um transladador linear comercial, fornecido pela Microcontrole. Este transladador linear tem um parafuso micrométrico mais preciso que o usado na montagem. Com isso, esperamos diminuir o erro associado ao micrômetro que observamos no capítulo anterior.

Quanto à resolução angular do sistema, que na montagem atual é de $3,95\mu\text{rad}$, esta pode ser melhorada com o uso de uma eletrônica mais elaborada, com três fotodetetores. Isto nos possibilitaria a contagem de $1/6$ de franja, ou seja, 660nrad com a ótica já implementada. Esta eletrônica tem ajuste mais delicado, o que não foi possível conseguir com os problemas mecânicos atuais.

Capítulo VI - Conclusões

Foi desenvolvida e caracterizada a instrumentação de acionamento e medida angular a ser usada na linha de luz SGM, que está sendo construída no Laboratório Nacional de Luz Síncrotron.

O instrumento desenvolvido aciona a câmara do monocromador de grades esféricas sobre um curso angular total de $2,5^\circ$ para selecionar o comprimento de onda desejado. Um sistema interferométrico de medidas angulares verifica de forma absoluta a posição angular das grades de difração. A resolução angular obtida foi de $3,95\mu\text{rad}$.

O sistema é linear em todo o curso, e os resultados obtidos são repetitivos e compatíveis com os cálculos teóricos, tanto da parte ótica quanto da parte mecânica do instrumento.

Pode-se observar que o sistema é muito sensível a vibrações mecânicas, e também à turbulência do ar provocada pelo ar condicionado.

Referências

- [1] S. Krinsky, M.L. Perlman and R.E. Watson, "Characteristics of Synchrotron Radiation and of its Sources". Handbook of Synchrotron Radiation, v.1A, E.E. Koch, (1983).
- [2] C.E.T. Gonçalves da Silva, "Brief History and Objectives of the Laboratório Nacional de Luz Síncrotron", in Proceedings of the Workshop Synchrotron Light: Applications and Related Instrumentation, Singapore: World Scientific, p. 255-258, (1989).
- [3] A.R.B. de Castro, P.T. Fonseca, J.G. Pacheco, J.E. Verdugo, M.S.Z. Graeff, G.B. Fraguas, "Design and Applications of a Toroidal Grating Beamline", Brazilian Journal of Physics, v.23, nr.1, p. 53-65, Mar, (1993).
- [4] A.R.B. de Castro, "Surveying and Alignment of the TGM Beamline", Comunicação Interna, LNLS, Jun, (1992).
- [5] P.T. Fonseca, G.B. Fraguas, A.R.B. de Castro and E. Morikawa, "Commissioning of the LNLS/CAMD Toroidal Grating Monochromator Beamline", Revista de Física Aplicada e Instrumentação, v.8 (2), p.59-67, (1993).
- [6] R.L. Stockbauer, E.D. Poliakoff, P. Ajmera, B.C. Craft and V. Saile, "Center for Advanced Microstructures and Devices (CAMD) at Louisiana State University", Physica Scripta, v.41, p.788-792, (1990).
- [7] A.R.B. de Castro, "Conceptual Project of a Soft X-Ray Beamline for High Resolution Spectroscopy", LNLS, CT-09/91, (1991).
- [8] M.S.Z. Graeff, "Interferometria: Aspectos Gerais", EQM apresentado em 8 de setembro de 1993, IFGW, UNICAMP.
- [9] M. Born and E. Wolf. "Principles of Optics", Pergamon Press, Oxford, (1980).
- [10] M. Françon, " Optical Interferometry ", Academic Press, New York, (1966).
- [11] M.V. Klein and T.E. Furtak, " Optics ", John Wiley & Sons, Inc., (1986).
- [12] Pan Shi, E. Stijns, Appl.Opt.27, p.4342- 4344, (1988).
- [13] L.N.Mertz, Rev.Sci.Instrum.62, p.1356- 1360, (1991).
- [14] Micro-Contrôle, P.A. de Saint Guénault, rue Jean Mermoz, B.P. 144 - 91006 EVRY Cedex - France.
- [15] A.C. Leenhouts, "The Art and Practice of Step Motor Control", Intertec Communication Inc., (1987).
- [16] M.S.Z. Graeff, J.E.A. Verdugo, "Five-Phase Step Motor Driver", LNLS, MT02/92, (1992).

[17] Newport Research Corporation, 18235 Mt. Baldy Circle, Fountain Valley, Calif. 92708, U.S.A.

[18] Edmund Scientific, 101 E. Gloucester Pike, Barrington, NJ, U.S.A., 08007-1380.

[19] J.G.R.S. Franco, "LOCO: Sistema de Controle e Aquisição de Dados", LNLS, CT-02/90, (1990).