

*Hypolito José Kalinowski*

Depto. de Engenharia de Telecomunicações – UFF  
Niterói – RJ

*Nilson Marcos Dias Garcia*

Depto. de Física – CEFET – PR  
Curitiba – PR

### **Resumo**

*Descrevemos neste trabalho como produzir redes de difração com boa qualidade ótica para laboratórios de ensino, a partir de um “Compact Disk”.*

### **I. Introdução**

A ausência de materiais adequados para o desenvolvimento de atividades experimentais nos laboratórios de ensino de Física é uma triste realidade em nosso País. Este fato é particularmente sério na área de ótica pela sofisticação requerida para a observação ou mensuração de alguns fenômenos, que exigem componentes óticos específicos.

Um exemplo banal dessa situação é dado pelos temas ligados à dispersão espectral. Prismas dispersivos, apesar de produzidos por algumas empresas no Brasil, ainda têm baixo poder de resolução e são pouco difundidos. No tocante a redes de difração este problema é maior, uma vez que não existe produção no País e há uma dificuldade enorme na importação do produto. Para compras em pequenas quantidades, como seria o caso da maioria dos laboratórios didáticos, há o agravante adicional de que os fornecedores estrangeiros chegam mesmo a recusar o pedido, já que o baixo valor da ordem não compensa toda a burocracia exigida pela CACEX.

A substituição de redes de difração pode ser efetuada por técnicas fotográficas. Uma matriz conveniente de linhas claras e escuras pode ser fotografada à distância e

assim ser, no negativo, reduzida às proporções desejadas. Esta técnica foi utilizada por um dos autores em 1969<sup>(1)</sup>, produzindo redes com dimensões típicas de (5 x 10) mm com até 500 linhas/cm.

No entanto, no processo acima referido ocorre uma série de dificuldades.

Deve-se utilizar um filme de granulação extra-fina e reveladores compatíveis para que o tamanho do grão não deforme as linhas da rede, fato que elimina quase que praticamente a possibilidade de difusão deste método, limitado a grupos com acesso a produtos e laboratórios profissionais – de custo elevado. Além disso, os filmes apresentam uma alta atenuação ótica, exigindo fontes de luz intensas como um laser ou lâmpadas halógenas. Outro aspecto negativo é a grande perda de qualidade no processo de cópia, impedindo assim o uso de um original para a geração múltipla de amostras.

Uma solução alternativa pode ser encontrada, a baixo custo, no comércio local. Descrevemos, a seguir, a utilização de um “Compact Disk” (CD) ou “disco laser” como fonte para redes de difração com boa qualidade para o ensino de Física.

## II. A rede plana de difração

Uma rede de difração se constitui num conjunto de fendas paralelas equidistantes, confeccionadas através de gravação direta sobre metais ou vidros ou ainda por meio de técnicas holográficas<sup>(2)</sup>. Em aparelhos óticos, como monocromadores, as redes atualmente utilizadas podem ter suas fendas confeccionadas com um perfil particular, geralmente em “dente de serra”, de forma a aumentar a intensidade do espectro difratado em um dado comprimento de onda (redes “blazed”).

A partir de matrizes de boa qualidade, em metal ou vidro, podem ser obtidas réplicas através de prensagem contra uma base recoberta por epoxi ou pela deposição de um filme plástico, retirado após o processo de secagem. Este último processo é responsável por grande parte das redes de difração utilizadas em laboratórios de ensino, dado o seu baixo custo (tipicamente US\$ 10 por uma rede com 600 linhas/mm<sup>(3)</sup>).

Redes confeccionadas em substratos transparentes são utilizadas em transmissão, enquanto que redes usadas em reflexão são formadas em metais (ou por deposição de uma camada de alumínio sobre a estrutura).

Numa abordagem clássica do fenômeno da difração em uma rede, considerando-se incidência normal<sup>1</sup>, tem-se:

---

<sup>1</sup> Para incidência oblíqua essa equação se escreve na forma:  $h(\sin \theta_n - \sin \theta_i) = n\lambda$ , onde  $\theta_i$  mede agora o ângulo de incidência em relação à normal e os outros símbolos têm o mesmo signifi-

$$h \operatorname{sen}(\theta_n) = n\lambda,$$

onde  $h$  é o espaçamento entre os traços da rede,  $\theta_n$  é o ângulo do  $n$ -ésimo feixe difratado e  $\lambda$  o comprimento de onda da radiação luminosa.

Assim, uma rede plana com 600 linhas/mm difrata – em 1º ordem – a radiação de um laser HeNe ( $\lambda = 633$  nm) de um ângulo de 22,3º em relação à direção do feixe incidente.

### III. O compact disk (CD)

Graças à sua penetração comercial, os CD's podem ser encontrados na maioria das lojas comercializadoras de discos, fitas cassete ou aparelhagens de som. A observação dos CD's nas vitrines atrai imediatamente a atenção pelas sucessivas faixas multicores observadas e pela movimentação das mesmas com a mudança de posição do observador (efeitos resultantes da dispersão da luz na superfície do CD).

O CD tem 12 cm de diâmetro, 1,2 mm de espessura e as informações nele contidas estão depositadas em sulcos microscópicos com 0,1  $\mu\text{m}$  de profundidade e 3,3  $\mu\text{m}$  de comprimento, denominados – no jargão – “pits”. Esses “pits” são alinhados em espiral numa base de plástico especial, o policarbonato, formando sulcos afastados por 1,6  $\mu\text{m}$ <sup>(4)</sup>. Um corte radial revela, então, cerca de 625 linhas/mm num compact disk.

Após a moldagem plástica o CD recebe uma fina camada de alumínio de alto brilho. Penetrando nos sulcos o alumínio acompanha, microscopicamente, o relevo impresso no policarbonato. Apesar disto, a superfície apresenta-se, a olho desarmado, plana e brilhante.

Um acabamento final é dado sobre o alumínio por uma camada de laca especial e, em discos comerciais, sobre ela é realizada a impressão do título e outras informações sobre a produção musical, na face oposta àquela utilizada na reprodução musical.

O custo de um compact disk no mercado nacional oscila de acordo com a qualidade da produção artística, realce do(s) músico(s), ofertas. Atualmente podem ser encontrados com preços entre US\$ 6 e US\$ 15.

O ponto que nos interessa nesse dispositivo é, entretanto, a existência de sulcos alinhados e com afastamento semelhante àquele observado em redes de difração.

---

cado da equação anterior. O feixe de ordem 0 (zero) – sem decomposição espectral – é desviado por um ângulo  $\theta_i$  como uma reflexão especular.

#### IV. Paralelo entre a rede plana de difração e o compact disk.

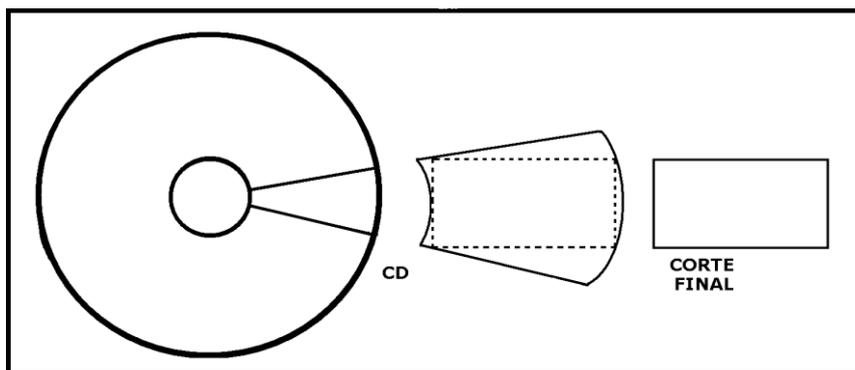
Como se observa no texto das duas seções anteriores, tanto uma rede de difração como um CD possuem aspecto construtivo semelhante no que diz respeito à existência de um número similar de sulcos por unidade de comprimento (600 linhas/mm), apesar da primeira os possuir de forma paralela enquanto os CD apresentam sulcos em espiral. No entanto a observação do espectro de difração que mencionamos acima permite intuir uma semelhança funcional satisfatória entre os dois dispositivos, embora deva ser mencionado que a maioria das redes de difração utilizadas em laboratórios de ensino opera no modo transmissivo, enquanto os CD provocam a dispersão da luz no modo refletivo.

Estes fatos nos levaram a abordar a questão da utilidade de um compact disk como fonte de redes de difração para o ensino de Física.

#### V. Materiais e métodos

Uma amostra de um disco de propaganda foi obtido junto à Breno Rossi Ltda (Loja do Plaza Shopping – Niterói), enquanto outras amostras, gravadas ou não, foram cedidas pela MicroService, empresa que efetua a prensagem de CD's no Brasil.

Conforme indicado na Fig.1, retiramos um setor circular do CD, cortando cuidadosamente o disco com uma tesoura afiada. Um acabamento final foi efetuado com outros dois cortes para obter um retângulo final com (10 x 20) mm, e que pode ser montado numa moldura de diapositivos. Usando inteiramente o anel circular poder-se-ia produzir de 10 a 15 redes similares, dependendo da qualidade dos cortes efetuados.



*Fig.1*

As redes assim produzidas podem ser utilizadas com um feixe de luz colimado, seja originário de um laser HeNe ou de lâmpada adequada. Deve-se salientar que a montagem a ser utilizada, como na Fig.2, permite a observação dos espectros difratados por reflexão.

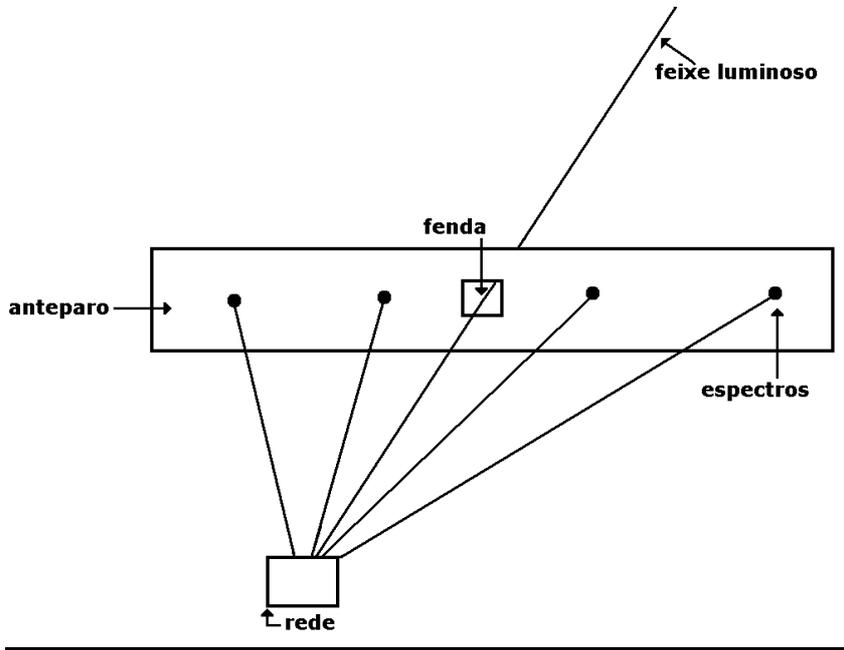


Fig.2

## VI. Resultados e conclusões

Pode-se facilmente observar espectros até a segunda ordem, sendo que eles se apresentam ligeiramente curvos em relação ao plano de incidência e com aberturas angulares diferentes para espectros simétricos. Observa-se também pouca deformação em função do raio do setor circular tomado, resultado esperado uma vez que o fenômeno depende do espaçamento entre os sulcos, constante no CD. Obviamente essa afirmação não leva em conta o fato de que as fendas nesta rede são curvas e não são também concêntricas, mas tais fatos provocam apenas as pequenas distorções mencionadas anterior-

mente, pois o feixe utilizado é colimado e assim incide apenas sobre uma reduzida área da rede.

Utilizou-se esta rede para uma atividade clássica que é a determinação do comprimento de onda de uma componente espectral da luz.

A partir da montagem abaixo esquematizada, utilizando-se como fonte de luz um laser HeNe de 1 mW da Opto Eletrônica São Carlos e fazendo apenas medidas de comprimentos, obteve-se os seguintes valores de  $\lambda$ , para diversos afastamentos da rede ao anteparo <sup>2</sup>.

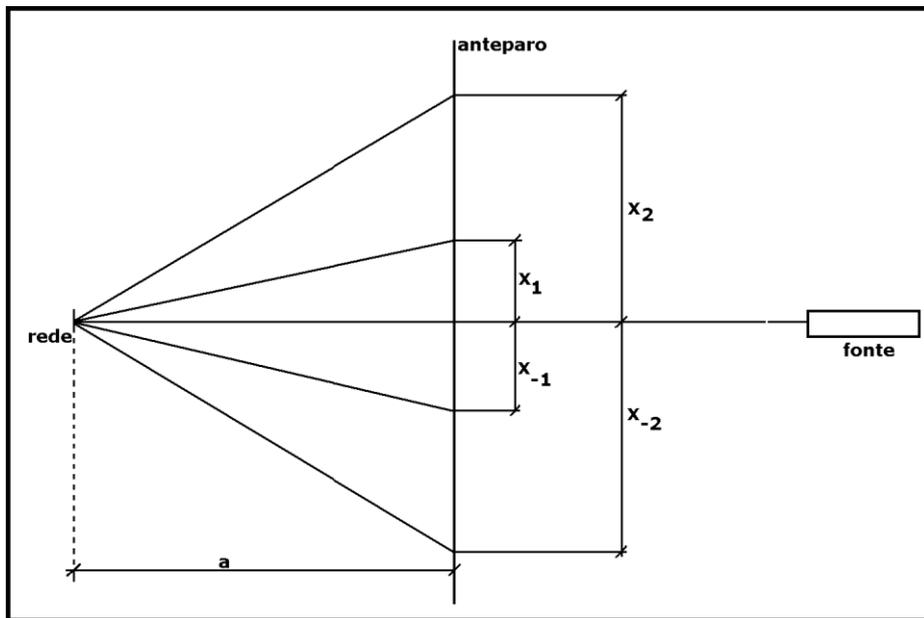


Fig.3

<sup>2</sup> O cálculo de  $\lambda$  utilizando medidas métricas conforme sugere o esquema da fig.3 é feito através da equação:

$$n\lambda = \frac{hx}{\sqrt{a^2 + x^2}},$$

onde h = afastamento entre os traços da rede e n = n° de ordem do feixe difratado.

a (m)	x <sub>1</sub> (m)	λ (nm)	x <sub>-1</sub> (m)	λ (nm)	x <sub>2</sub> (m)	λ (nm)	x <sub>-2</sub> (m)	λ (nm)
0,700	0,308	644	0,300	630	0,948	644	0,927	638
0,800	0,354	647	0,343	630	1,111	649	1,078	642
0,900	0,394	641	0,389	635	1,234	646	1,216	643
1,000	0,438	642	0,434	637	1,366	646	1,363	645

$$\lambda_{\text{médio}} = (641,2 \pm 5,5) \text{ nm.}$$

Com a mesma montagem e utilizando lâmpadas espectrais de vapores metálicos, os resultados foram os seguintes:

### Lâmpada de vapor de sódio (raia amarela)

a (m)	x <sub>1</sub> (m)	λ (nm)	x <sub>-1</sub> (m)	λ (nm)	x <sub>2</sub> (m)	λ (nm)	x <sub>-2</sub> (m)	λ (nm)
0,194	0,0800	610	0,0760	584	0,230	611	0,210	588
0,216	0,0769	537	0,0840	580	0,229	582	0,250	605

$$\lambda_{\text{médio}} = (587,1 \pm 22,4) \text{ nm.}$$

### Lâmpada de vapor de mercúrio

VERDE					VIOLETA			
a (m)	x <sub>1</sub> (m)	λ (nm)	x <sub>-1</sub> (m)	λ (nm)	x <sub>1</sub> (m)	λ (nm)	x <sub>-1</sub> (m)	λ (nm)
0,216	0,0780	543	0,0810	561	0,0555	398	0,0557	400

$$\lambda_{\text{médio}} = (552 \pm 9) \text{ nm.}$$

$$\lambda_{\text{médio}} = (399 \pm 1) \text{ nm.}$$

Esses resultados indicam a boa qualidade destas redes para o ensino da dispersão ótica, haja vista que os mesmos foram obtidos numa montagem didática clássica e com instrumentos de medidas extremamente simples (régua), possível de ser repetida em qualquer laboratório didático.

Uma segunda particularidade aparece nos espectros difratados, visível de forma melhor quando a incidência não é normal e utilizando-se uma fonte de luz monocromática. O feixe difratado apresenta uma modulação na sua intensidade, observando-se

zonas claras e escuras quando atinge o anteparo. A origem deste fenômeno é quase certamente a interferência na fina película que recobre o CD atravessada pela radiação luminosa. Dessa forma, o uso de redes como a que descrevemos serve também para a introdução desse assunto e observação do fenômeno.

Um estudo matemático está sendo desenvolvido com o fim de apresentar analiticamente a forma dos espectros de difração, considerando-se as características geométricas da rede utilizada e a existência do mencionado efeito de interferência. Esses resultados serão publicados oportunamente.

Do ponto de vista econômico podemos afirmar que as redes assim produzidas apresentam um desempenho muito bom em relação ao seu custo. Assumindo o número de redes mencionado na seção 5, seu custo unitário estaria entre US\$ 0,5 e US\$ 1. O número de linhas por unidade de comprimento (625 linhas/mm) excede em muito a resolução que pode ser obtida através de técnicas fotográficas em filmes comerciais (1000 linhas/cm) como a usada na ref. 1. Uma vantagem adicional das redes obtidas em CD sobre aquelas em película fotográfica vem do fato de que sua utilização se faz por reflexão. Desta forma bons espectros podem ser observados mesmo com fontes de luz de baixa intensidade luminosa.

Com respeito ao processo de produção também existem nítidas vantagens para as redes CD no confronto com aquelas fotográficas. O processo fotográfico se divide em várias etapas: confecção da matriz, sessão de fotos, revelação, seleção e montagem, podendo estender-se por vários dias (principalmente pelo tedioso trabalho de confeccionar a matriz de linhas).

Já o processo descrito neste trabalho permite a qualquer laboratório ou professor a produção de um número razoável de redes para atender a seus alunos com a aquisição de apenas **um** compact disk – em um período de tempo de poucas horas. A substituição de componentes danificados pode ser também realizada rapidamente, sem prejuízo para o desenvolvimento das atividades letivas.

## **Agradecimentos**

Os autores agradecem às lojas Breno Rossi e à MicroService pelo fornecimento das amostras utilizadas neste trabalho. Um dos autores (HJK) agradece o apoio financeiro recebido do CNPq e da FAPERJ.

## **Referências Bibliográficas**

1. KALINOWSKI, H. J.; DUMMER, O. S.; GIFFORN, E. (or.). **Redes de difração fotográficas**. Curitiba, 1969. (trabalho apresentado na Feira de Ciências do Paraná, dez. 1969.)
2. HECHT, E.; ZAJAC, A. **Optics**. [s.1.]: Addison Wesley, 1969.
3. EDMUND Scientific Co. Catálogo geral. 1989.
4. MOURA, L. Boa música aprimora tecnologia de injeção. **Plástico Moderno**, p. 8-18, jun. 1988.