



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE SALINÓPOLIS  
FACULDADE DE FÍSICA  
LICENCIATURA EM FÍSICA

**IAGO RAMOS CARDOSO**

**GRADES DE DIFRAÇÃO: PRINCIPAIS ASPECTOS TEÓRICOS E APLICAÇÕES  
NA ÓPTICA**

SALINÓPOLIS – PA

2023

**IAGO RAMOS CARDOSO**

**GRADES DE DIFRAÇÃO: PRINCIPAIS ASPECTOS TEÓRICOS E APLICAÇÕES  
NA ÓPTICA**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado para obtenção de grau de  
licenciado, Faculdade de Física, Campus  
Universitário de Salinópolis, Universidade  
Federal do Pará.

Orientador: Prof. Dr. Cledson S. L.  
Goncalves

SALINÓPOLIS – PA

2023

**IAGO RAMOS CARDOSO**

**GRADES DE DIFRAÇÃO: PRINCIPAIS ASPECTOS TEÓRICOS E  
APLICAÇÕES NA ÓPTICA**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado para obtenção de grau de  
licenciado, Faculdade de Física, Campus  
Universitário de Salinópolis, Universidade  
Federal do Pará.

Orientador: Prof. Dr. Cledson S. L.  
Goncalves

Data de Aprovação: \_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ .

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Cledson Santana Lopes Gonçalves (Orientador)

---

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Angela Costa Santa Brígida  
(Membro Externo/Campus Ananindeua/UFPA)

---

Tec. Ms. Rafael Lima de Moraes  
(Membro Interno/Campus Salinópolis/UFPA)

## **DEDICATORIA**

Aos meus pais, tios e família, pelo apoio incondicional. Aos professores, pela orientação valiosa. Este trabalho é dedicado a todos que fizeram parte dessa jornada.

Grato, Iago Ramos Cardoso

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD  
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará  
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a)  
autor(a)**

---

C268g Cardoso, Iago Ramos.  
Grades de Difração: Principais Aspectos Teóricos e  
aplicações na Óptica / Iago Ramos Cardoso. — 2023.  
30 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Cledson Santana Lopes Gonçalves  
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) -  
Universidade Federal do Pará, Campus Universitário de  
Salinópolis, Curso de Licenciatura em Física, Salinópolis,  
2023.

1. Grades de Difração. 2. Difração. 3. Óptica. I.  
Título.

CDD 535.2

---

## GRADES DE DIFRAÇÃO: PRINCIPAIS ASPECTOS TEÓRICOS E APLICAÇÕES NA ÓPTICA

*CARDOSO, Iago Ramos; GONÇALVES, Cledson S. L., Universidade Federal do Pará – UFPA; e-mail:iagoramoscaldoso923@gmail.com; cledsonslg@ufpa.br*

### RESUMO

Este artigo é uma revisão dos principais aspectos teóricos e aplicações de grades de difração na óptica e na Indústria com o objetivo de investigar e compreender a diversidade de categorias de grades de difração. Suas características singulares e os métodos empregados em sua fabricação. Além disso, busca ressaltar a importância do conhecimento sobre grades de difração no ensino de graduação, preparando os estudantes para desafios práticos e fomentando o desenvolvimento transformador das grades de difração, inspirando considerações mais amplas de implementações em diferentes contextos industriais e acadêmicos. Começando com uma introdução à difração e sua importância na óptica, na qual é explorado três tipos principais de grades de difração: grades regradas, echelle e holográficas. As grades regradas, com suas linhas finamente gravadas, são amplamente utilizadas na análise espectral, enquanto as grades holográficas de fase de volume representam uma inovação promissora, com alto potencial para aplicações que exigem eficiência de difração, dispersão e configurações de espectrógrafos aprimoradas. Já modelos que exigem uma alta dispersão em um espaço compacto o ideal seria grades echelle, pois desempenham um papel essencial em observações astronômicas, e outros tipos de fins que exigem resultados mais detalhados. Serão apresentados estudos que demonstram a relevância dessas grades em ambientes científicos e industriais, destacando como desempenham um papel crucial na obtenção de dados espectrais. Exemplos concretos serão apresentados para ilustrar como essas tecnologias contribuem significativamente para o avanço do conhecimento em óptica, bem como para aprimorar processos industriais, evidenciando sua importância tanto na pesquisa quanto na aplicação prática.

**Palavras-chave:** Difração, Grades de Difração, Óptica

### INTRODUÇÃO

As grades de difração são uma ferramenta fundamental na física e na óptica que nos permitem estudar e manipular a luz de maneiras incríveis. A história das grades de difração remonta ao final do século XVIII, quando o inventor de Filadélfia, David Rittenhouse, construiu a primeira grade de difração em 1785 (Bagbaya, 1973; American Physical Society, 2011)

No início do século XIX, o físico francês Augustin-Jean Fresnel começou a pesquisar a óptica e fez observações importantes sobre a difração da luz. Em 1818, ele apresentou grande parte de seu trabalho sobre difração em uma competição patrocinada pela Academia Francesa de Ciências (Davidson, 2010; Basdevant, 2019).

Pouco depois, o físico alemão Joseph von Fraunhofer construiu um dispositivo semelhante ao de Rittenhouse e o primeiro motor de gravação de grade. Seu modelo usava uma malha de arame como múltiplas fendas finas, e mover as fendas mais próximas dispersava ainda mais o espectro (Davidson, 2011; Harvey & Pfisterer, 2019; SpringerLink)

As grades de difração são usadas em uma variedade de aplicações científicas e industriais, desde a análise espectral até a fabricação de chips de computador. Elas são uma ferramenta poderosa para entender e manipular a luz, e continuamos a encontrar novas maneiras de usar grades de difração para avançar nossa compreensão do mundo ao nosso redor. Desempenham um papel crucial ao permitir a análise de estruturas microscópicas, a determinação de comprimentos de onda e a criação de imagens tridimensionais. Além disso, são amplamente utilizadas em áreas como espectroscopia, holografia, monocromadores e entre outros.

Grades de difração são componentes-chave de monocromadores usados, por exemplo, em imagens ópticas de comprimentos de onda específicos de amostras biológicas ou médicas. Uma grade de difração pode ser escolhida para analisar especificamente um comprimento de onda emitido por moléculas em células doentes em uma amostra de biópsia ou para ajudar a excitar moléculas estratégicas na amostra com um comprimento de onda de luz selecionado. (LING et al, 2021, p.156)

Ao longo deste trabalho, exploraremos os princípios de funcionamento dessas diferentes aplicações de grades de difração, suas propriedades e características únicas, bem como suas aplicações práticas em diversas áreas da ciência e da tecnologia.

Segundo (Clark; Castro, 2003 apud Costa; Costa 2011, p. 15) a pesquisa é como um processo de construção do conhecimento que tem como metas principais gerar novo conhecimento e/ou corroborar ou refutar algum conhecimento preexistente. É basicamente um processo de aprendizagem tanto do indivíduo que a realiza a pesquisa da sociedade na qual está se desenvolve.

Antes de explorarmos as grades de difração, é importante compreender o conceito teórico por trás delas. Ao adquirir esse conhecimento sobre as

propriedades e comportamentos ondulatórios da luz ao interagir com aberturas e obstáculos. Esse embasamento teórico é fundamental para uma compreensão mais aprofundada das grades de difração e suas aplicações práticas.

De acordo com (HALLIDAY, p.106), a difração ocorre quando a luz monocromática de uma fonte distante (ou de um laser) de comprimento  $\lambda$  passa por uma fenda estreita de largura  $a$  e é interceptada por uma tela de observação. Nesse processo, forma-se uma figura de difração na tela, composta por um máximo central largo e intenso, chamado de máximo principal, e uma série de máximos secundários ou laterais mais estreitos e menos intensos. Entre os máximos, há regiões de mínimos, onde as ondas luminosas se cancelam mutuamente.

Quando um conjunto de fendas iguais, com largura  $b$  e separação  $h$ , é aumentado para um número maior de fendas,  $N$ , temos o que chamamos de rede de difração ilustrado na Figura 1. Conforme descrito por (YOUNG E FREEDMAN, p.136), uma rede de difração é composta por múltiplas fendas paralelas, todas com a mesma largura  $a$  e a mesma distância  $d$  entre os centros das fendas consecutivas.

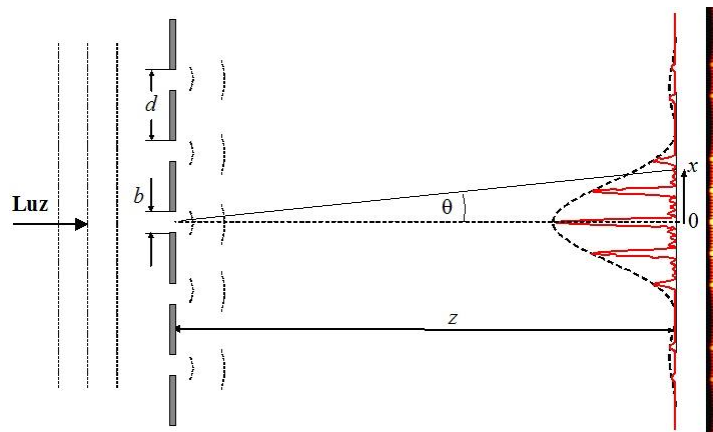


Figura 1: Padrão de difração por múltiplas fendas.

Fonte: OLIVEIRA, 2016.

A expressão angular que descreve os pontos nos quais ocorrem máximos de difração ao se analisar padrões resultantes da difração de luz em uma única fenda.

$$\gamma = n\pi \quad (n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots) \quad (1)$$

$\gamma = n\pi$  representa os ângulos nos quais ocorrem os máximos de intensidade na distribuição de interferência. Esses ângulos são determinados pela

condição de interferência construtiva entre as ondas provenientes de diferentes fendas e que correspondem às posições. No entanto, ao considerarmos uma grade de difração com  $N$  fendas, a equação é apresentada na equação 4.

$$\text{sen}(\theta) = n \frac{\lambda}{d} \quad (2)$$

Onde  $\theta$  é o ângulo de difração,  $n$  é a ordem do máximo,  $\lambda$  é o comprimento de onda da luz, e  $d$  representa a separação entre as fendas. Para determinar a posição angular dos máximos de difração em uma rede de difração usamos a equação 5.

$$y_n = nz\lambda/h = n \Lambda \quad (3)$$

Esta expressão é derivada da condição de difração construtiva. A difração construtiva ocorre quando a diferença de caminho óptico entre os raios difratados é um múltiplo inteiro do comprimento de onda da luz incidente. A equação relaciona a ordem do máximo ( $n$ ) à posição do máximo de difração ( $yn$ ), levando em consideração a distância entre as fendas ( $h$ ), a distância até a tela ( $z$ ), o comprimento de onda da luz ( $\lambda$ ), e o ângulo de difração ( $\theta$ ). Sendo  $\Lambda$  representando o espaçamento angular entre os máximos consecutivos de difração.

Conforme (PALMER, 2020, p.19), ao passar por uma tela opaca com múltiplas fendas equidistantes, a luz sofre interferência construtiva em direções específicas. Essas direções são determinadas pelo espaçamento entre as fendas e pelo comprimento de onda da luz incidente. Essa propriedade de difração possibilita em grades de difração um papel fundamental pois oferece oportunidades para manipular e controlar a propagação da luz.

## GRADES DE DIFRAÇÃO

Uma grade de difração consiste em uma superfície com múltiplas fendas e desempenha um papel fundamental na dispersão angular da luz. Ela é capaz de separar comprimentos de onda com base no ângulo em que emergem da grade.

Existem grades transmissivas, como a abertura multi-slit, e grades reflexivas, onde a superfície ranhurada é revestida com um material refletor, como o alumínio.

De acordo com (PALMER, 2020) a grade típica possui um grande número de sulcos paralelos, representando as fendas, com um espaçamento de sulco denominado  $dG$  (também conhecido como passo) como mostra a figura 2.

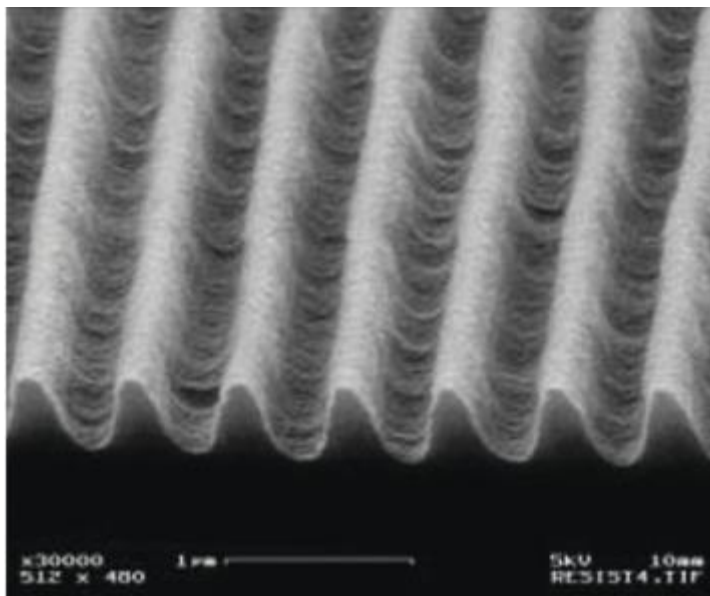


Figura 2: Estrutura de uma grade de difração.

Fonte: PALMER, 2020.

Esse espaçamento, mais comumente expresso como densidade de sulco ( $G$ ), determina os ângulos nos quais ocorre a interferência construtiva para formar as ordens difratadas. A densidade de sulco varia de 30 a 5.000 sulcos por mm em grades convencionais.

Além do espaçamento dos sulcos, o perfil da ranhura desempenha um papel crucial no desempenho da grade. A eficiência da difração, ou seja, a fração da luz difratada em cada ordem, é maximizada em um determinado pedido, geralmente o primeiro pedido, para garantir uma maior coleta de luz. Esse processo de otimização da eficiência para um único comprimento de onda é conhecido como "blazing". Envolve a modificação do perfil da ranhura, incluindo ângulos de faceta, formas e profundidades.

O comprimento de onda para o qual a grade é mais eficiente é chamado de comprimento de onda da chama. Através do uso de grades de difração com diferentes espaçamentos de sulco e perfis de ranhura, é possível direcionar e otimizar a dispersão da luz em aplicações específicas.

Uma grade de difração com um perfil de relevo de superfície assimétrico, conforme ilustrado nas Figuras 3a e 3b, apresenta características de eficiência que são influenciadas pela orientação da grade dentro do sistema óptico. Devido a essa peculiaridade, tais grades são denominadas grades "blazed". Para (PALMER, 2020, p.67) quando uma grade blazed é posicionada de forma a alcançar uma eficiência de utilização elevada, diz-se que ela está "em chama". A orientação ideal de uma grade blazed é indicada pela sua seta de blaze, conforme ilustrado na Figura 3c.

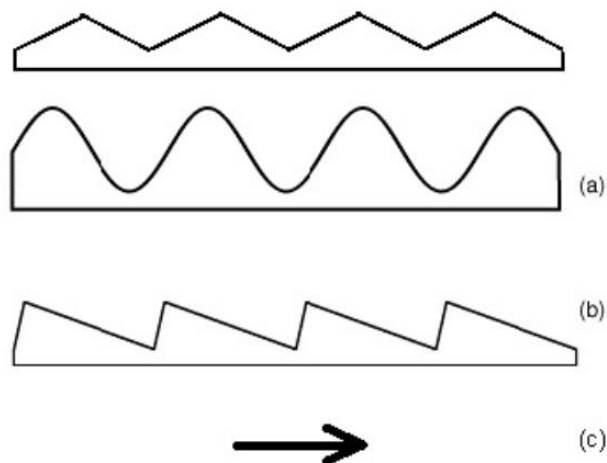


Figura 3: Estrutura de cada tipo de grade.

Fonte: PALMER, 2020.

### EQUAÇÃO DA GRADE

A equação fundamental da grade define as direções discretas nas quais a luz monocromática, com um comprimento de onda  $\lambda$  específico, sofre difração. Essa equação é representada na equação 6:

$$m\lambda = d(\text{sen}\alpha + \text{sen}\beta) \quad (4)$$

- $m$ : é um parâmetro que geralmente representa uma ordem de interferência ou um número inteiro associado a algum fenômeno ondulatório, como em padrões de interferência de ondas.
- $\lambda$ : é o comprimento de onda da onda em questão.
- $d$ : representa uma distância ou espaçamento entre as fontes de ondas.
- $\text{sen}\alpha$  e  $\text{sen}\beta$  são ângulos associados à direção das ondas.

A figura 4 ilustra como ocorre o efeito difrativo, onde a luz com comprimento de onda  $\lambda$  incide em ângulo  $\alpha$  sobre uma grade de espaçamento  $dG$ . A difração gera ângulos  $\beta_m$ , medidos em relação à normal da grade. A normal é perpendicular à superfície da grade no centro.  $\beta_m$  tem sinal invertido quando oposto à normal. A equação da grade possui  $m$  como ordem de difração inteira. Para  $m = 0$ ,  $\alpha$  e  $\beta_0$  são opostos, resultando em reflexão.  $m$  positivo indica difração à esquerda,  $m$  negativo à direita da ordem zero.

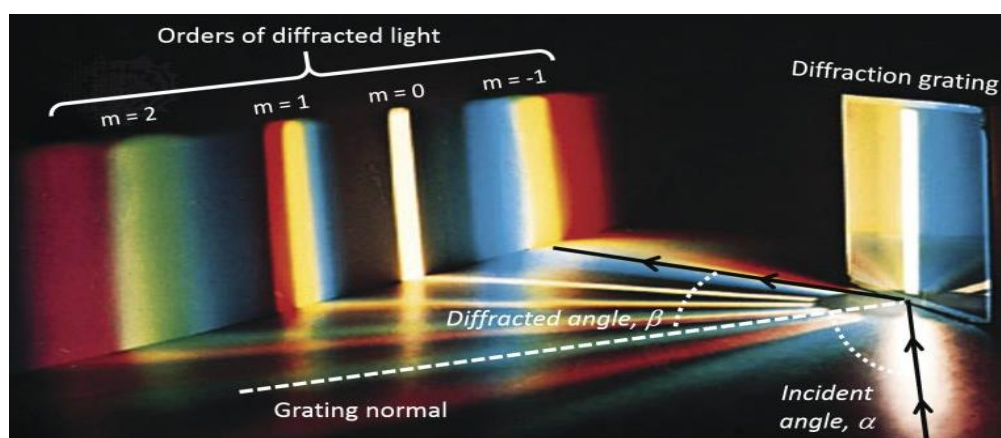


Figura 4: ilustração do efeito de difração

Fonte: PALMER, 2020

Conforme explicado pela (NEWPORT, 2023) feixes monocromáticos geram difrações para  $m = -2, -1, 0, 1, 2, 3$ . No caso de feixes policromáticos ocorrerá diferentes comprimentos de ondas em ângulos específicos desviados de acordo com a equação 4, isso ocorre devido à interferência construtiva e destrutiva entre as ondas difratadas, resultando em padrões de difração distintos para cada cor como ilustrado na figura 4. Geralmente, interessa a primeira ordem, bloqueando ordens superiores. Monocromadores usam montagem de desvio constante, ajustando o

comprimento de onda pela rotação da grade, mantendo o ângulo de desvio constante.

### DISPERSÃO, BANDPASS E RESOLUÇÃO

Ao fixar o ângulo de incidência  $\alpha$  na equação da grade e calcular a derivada em relação a  $\lambda$ , é possível determinar a dispersão angular ( $D$ ) pela equação 7, na qual representa a variação no ângulo de difração por unidade de comprimento de onda:

$$D = \frac{\partial \beta}{\partial \lambda} = \frac{m}{d_G \cos \beta_m} = \frac{Gm}{\cos \beta_m} \quad (5)$$

- $D$  é a dispersão angular.
- $m$  é a ordem de interferência.
- $d_G$  é a densidade das ranhuras da grade.
- $\beta_m$  é um ângulo associado à ordem de interferência  $m$ .

Para uma dada ordem  $m$ , a dispersão angular ( $D$ ) desempenha o papel de discernir entre sinais provenientes de diferentes comprimentos de onda, e essa capacidade aumenta proporcionalmente à densidade das ranhuras da grade ( $G$ ). De acordo com a afirmação da (NEWPORT, 2023) quando uma grade é integrada a um espectrômetro com uma distância focal efetiva ( $f$ , detalhes abaixo), a dispersão linear do sistema é obtida multiplicando-se  $D$  pelo valor de  $f$ . Na prática, é mais comum considerar a dispersão linear recíproca (às vezes chamada de fator de placa,  $P$ ), representada pela equação 8:

$$P = \frac{1}{Df} = \frac{d \cos \beta_m}{mf} = \frac{\cos \beta_m}{Gmf} \quad (6)$$

- $P$  Representa quantidade inversamente proporcional à dispersão angular  $D$  multiplicada pela distância focal efetiva  $f$ .
- $G$  é uma constante relacionada à densidade das ranhuras da grade.
- $f$  é a distância focal efetiva do espectrômetro.

$P$  quantifica a alteração do comprimento de onda (em nm) por unidade de distância lateral (em mm) e é uma métrica essencial para avaliar a passagem de banda e resolução de um espectrômetro. (NEWPORT, 2023) A largura da passagem de banda define o intervalo espectral transmitido por um espectrômetro quando iluminado por luz contínua. Em um monocromador, essa largura é obtida multiplicando  $P$  pela abertura da fenda.

Para atingir a resolução instrumental, segundo (NEWPORT, 2023) é viável reduzir a abertura da fenda até que um limite da largura da passagem de banda seja alcançado. A resolução, na análise espectral, reflete a capacidade do instrumento em discernir linhas espectrais próximas.

A figura 5 visualiza o efeito da diminuição da abertura da fenda na habilidade de distinguir claramente linhas espectrais de uma fonte luminosa.

No cenário do monocromador, a resolução também sofre influência de possíveis aberrações no sistema óptico e na qualidade da grade de difração. Mitigar essas influências garante que a resolução seja principalmente governada por  $P$  e pela abertura da fenda. Já em espectrógrafos, a largura da passagem de banda e a resolução são amplamente determinadas pelos parâmetros do detector.

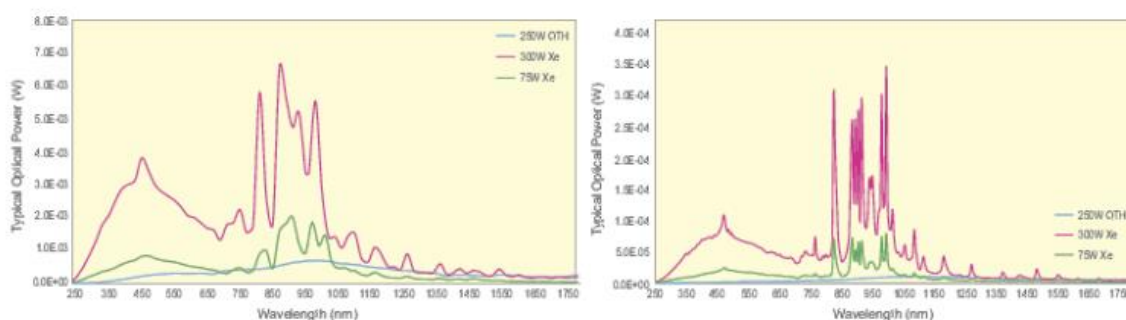


Figura 5: Visualização do efeito da diminuição da abertura da fenda para distinguir claramente linhas espectrais de uma fonte luminosa

Fonte: PALMER, 2020.

## TIPOS DE GRADES

Para explorar e utilizar o fenômeno de difração de maneira eficaz, as grades de difração desempenham um papel essencial. Para (NEWPORT, 2023) duas abordagens principais para a fabricação de grades de difração são as grades

regradas e as holográficas, cada uma com características distintas e aplicações específicas. Além disso, existe um tipo especial de grade, conhecida como grade Echelle, que oferece vantagens únicas em termos de dispersão e resolução em aplicações que demandam detalhamento espectral preciso.

### **Grades Ruling (Regradas):**

As grades ruling são produzidas por um processo mecânico que envolve cortar ou polir ranhuras em uma superfície como é representado na figura 6. Essas ranhuras agem como elementos de difração, dispersando a luz incidente em ângulos específicos de acordo com a equação da grade. Esse processo é altamente preciso e pode ser ajustado para trabalhar com comprimentos de onda específicos. As grades ruling são conhecidas por sua alta eficiência e são frequentemente usadas em aplicações que exigem alta resolução, como em espectroscopia de alta precisão.

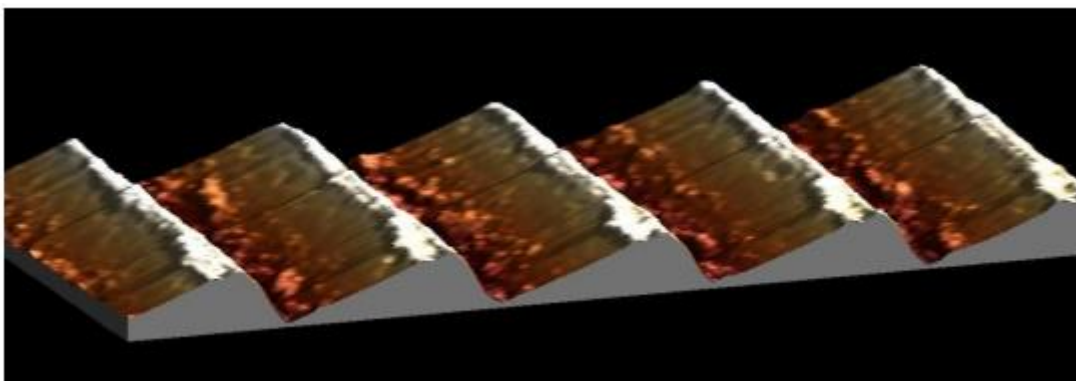


Figura 6: Grade Regrada vista de um microscópio.

Fonte: PALMER, 2020.

### **Grades Holográficas:**

As grades holográficas são fabricadas de maneira diferente. Um padrão de interferência de ondas de luz é utilizado para criar um padrão de difração em um material, como vidro (NEWPORT, 2023) como representado na figura 7. Esse padrão é gravado como um holograma no material. Quando a luz incide na grade holográfica, o padrão holográfico causa a difração, resultando em áreas de alta e baixa intensidade de difração. As grades holográficas possuem menor dispersão em

comparação com as regradadas, mas são projetadas para minimizar aberrações. Elas podem ser altamente eficientes para um único plano de polarização, sendo especialmente úteis em situações onde a qualidade espectral é uma prioridade.

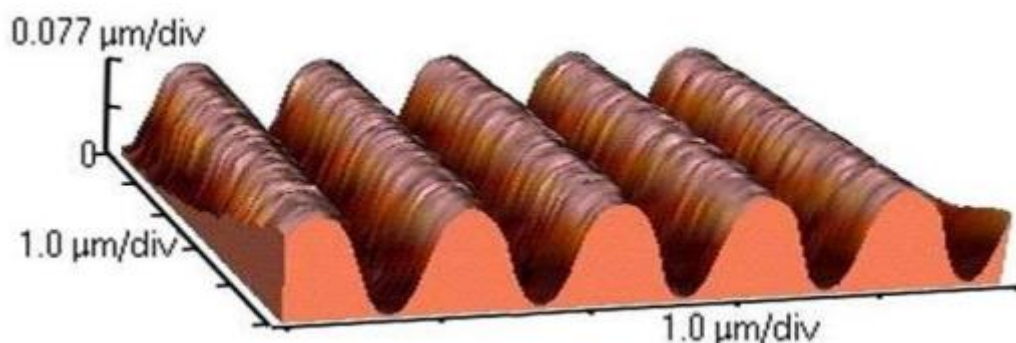


Figura 7: Grade Holográfica vista de um microscópico.

Fonte: PALMER, 2020.

### Grades Echelle

As grades Echelle são um tipo especial de grades de difração que possuem características únicas. Elas são projetadas com uma estrutura de ranhuras "grosseiras", com uma baixa densidade de ranhuras em relação a outras grades de difração (NEWPORT, 2023). Isso permite que trabalhem com ordens de difração altas, o que significa que a difração ocorre em ângulos elevados, como ilustrado na figura 8. Isso resulta em uma maior dispersão angular para as diferentes cores da luz, permitindo uma separação mais precisa.

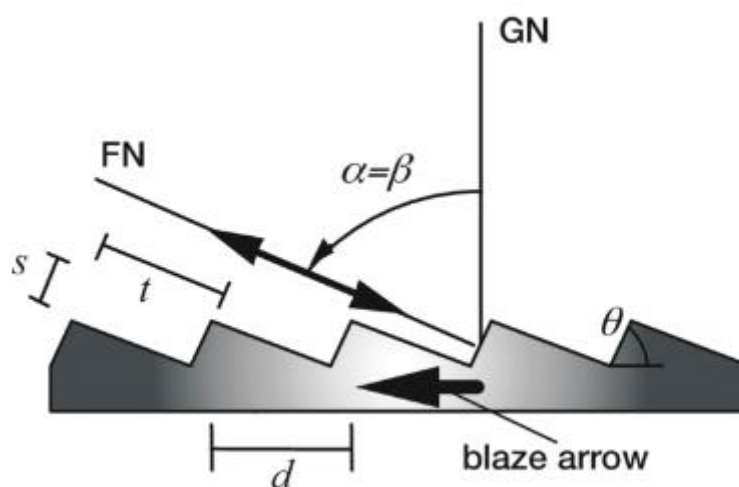


Figura 8: Representação ilustrativa da grade Echelle.

Fonte: PALMER, 2020.

Em resumo, as grades ruling são criadas por um processo mecânico de criação direta de ranhuras, as grades holográficas são produzidas através de interferência de ondas de luz gravadas em materiais, como o vidro, e as grades Echelle têm uma estrutura única que permite alta dispersão e resolução em ordens de difração altas.

Além disso as grades de difração podem ser categorizadas como reflexivas ou transmissivas, dependendo de como interagem com a luz. Assim também como sua superfície pode assumir a forma plana ou côncava, acrescentando ainda mais variações às suas propriedades ópticas.

## **METODOLOGIA**

Este trabalho, será apresentado selecionando um grupo de artigos voltados ao estudo sobre grades de difração, focando em sua importância, aplicações e potencial para despertar o interesse acadêmico.

Será realizado uma busca abrangente de literatura relacionada a grades de difração com bases em artigos científicos, livros e recursos online relevantes que abordam os fundamentos teóricos, aplicações práticas e avanços recentes nessa área.

Através da revisão de literatura, será analisado criticamente os conceitos-chave relacionados a grades de difração. Explorando os princípios físicos por trás da difração de luz, os tipos de grades de difração, suas características e os métodos de fabricação. Além disso, identificando-o as aplicações mais relevantes em diversos campos.

Ao compreender a relevância das grades de difração, percebe-se como essa área pode motivar futuros cientistas e engenheiros a explorar novas fronteiras da ciência e da tecnologia. Destacando-o o potencial de contribuição para a pesquisa e inovação.

Será apresentado uma série de artigos para esta revisão bibliográfica afim de explorar a importância e as aplicações das grades de difração. A revisão de literatura e a discussão expandida sobre o tema servem como base para a compreensão aprofundada dessa área da ciência e da tecnologia

## **RESULTADOS E DISCURSÕES**

Os resultados deste estudo são fundamentados em uma abordagem qualitativa e exploratória, baseada na análise e contextualização de estudos pré-existentes na literatura científica. O caráter bibliográfico desta pesquisa teve como objetivo principal investigar e compreender a diversidade de categorias de grades de difração, suas características singulares e os métodos empregados em sua fabricação.

A exemplo disso está no artigo “Design and Testing of a Compact Optical Prism Module for Multi-Degree-of-Freedom Grating Interferometry Application” aborda a importância da medição precisa em sistemas de controle numérico computadorizado (CNC) de múltiplos eixos e os desafios associados a essa medição. Para resolver esses desafios, os autores propõem o uso de réguas de grade MDOF, que são capazes de medir não apenas movimentos de translação, mas também pequenos erros de rotação em sistemas de múltiplos eixos.

Um exemplo prático de aplicação de réguas de grade bidimensionais (2D) como descritas no artigo seria em uma CNC de alta precisão utilizada na indústria aeroespacial. Suponha que uma empresa esteja fabricando peças complexas para aeronaves que exigem tolerâncias extremamente apertadas. Nesse cenário, a CNC de múltiplos eixos é fundamental para a usinagem precisa dessas peças.

Segundo (LI et al., 2018) a instalação de réguas de grade MDOF em cada eixo da CNC, como sugerido no artigo, permitiria medir com precisão não apenas os movimentos de translação, mas também pequenos erros de rotação em cada eixo além de possibilitar a produção em massa e a prototipagem de engenharia (LI et al., 2018) como mostra a figura (9).

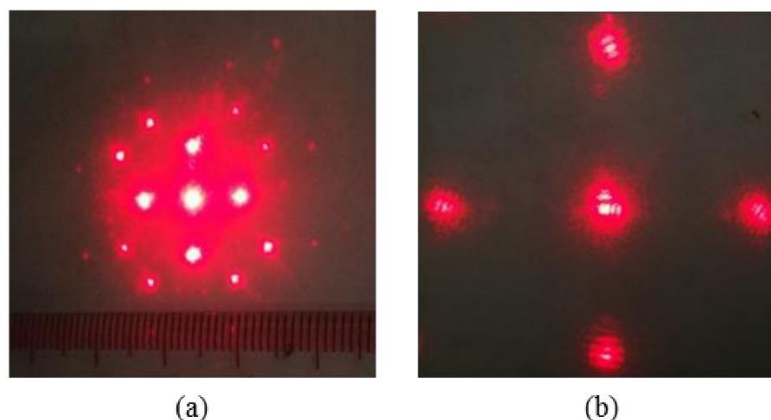


Figura 9: **a)** Os pontos dos feixes de difração no ecrã de observação; **b)** A franja de interferência no ecrã de observação.

Fonte: LI, 2018

Os resultados da Figura (9)a demonstram a precisão na manipulação dos feixes de difração, enquanto a Figura (9)b revela que a abordagem proposta é eficaz na obtenção de um sinal de interferência consistente e uniforme em todos os pontos de medição (LI et al., 2018). Isso reforça a utilidade da pirâmide truncada quadrangular como um módulo de lente eficiente para sistemas de medição baseados em régua de grade MDOF

Isso é crucial para garantir que as peças sejam usinadas com a máxima precisão, evitando erros de montagem posterior. Além disso, a capacidade de medir em seis graus de liberdade (6-DOF) é essencial para garantir que as peças finais atendam aos rigorosos padrões de qualidade da indústria aeroespacial.

Em resumo, as régua de grade MDOF podem desempenhar um papel fundamental na melhoria da precisão e confiabilidade da usinagem em sistemas CNC de múltiplos eixos, especialmente em setores onde a tolerância precisa é crítica, como a indústria aeroespacial.

Outro uso das grades regradas são máquinas-ferramenta CNC, a tecnologia de grade ruling é essencial, no artigo “Design and application of accelerated life test of grating ruler based on step stress loading” as régua de grade internas frequentemente enfrentam falhas e baixa confiabilidade, desafiando a indústria. Para melhorar isso, testes de vida acelerados foram cruciais, expondo rapidamente fraquezas sob variações extremas. Um dispositivo específico foi projetado para

esses testes, usando cargas de tensão degrau. De acordo com (WANG et al., 2021, p. 8) resultados experimentais mostraram que o dispositivo replica condições operacionais extremas e oferece insights valiosos sobre a confiabilidade. Com base nos dados, um modelo de análise de vida acelerada é estabelecido, avaliando a vida útil das réguas de grade como mostrado na figura (10).

Fault number	Specimen number	Stress level	Fault time (h)	Fault mode
1	1	S <sub>4</sub>	3681.9	Accuracy overrun
2	2	S <sub>3</sub>	2797.1	Seal damage
3	2	S <sub>4</sub>	4006.5	Crack
4	3	S <sub>2</sub>	1920.3	Component failure
5	3	S <sub>4</sub>	3522.0	Bearing stuck
6	3	S <sub>4</sub>	4365.1	Accuracy overrun
7	4	S <sub>3</sub>	2887.9	Grating condensation
8	4	S <sub>4</sub>	4423.8	Spring loosening
9	5	S <sub>4</sub>	3606.0	Component failure
10	5	S <sub>4</sub>	4289.7	Component failure
11	6	S <sub>4</sub>	3614.5	Seal damage
12	6	S <sub>4</sub>	3984.8	Grating condensation

Figura 10: Informações de falha do teste de vida de aceleração da régua de grade

Fonte: WANG, 2021.

Durante o teste, a régua de grade em avaliação apresentou um total de 12 falhas, com detalhes específicos dessas falhas sendo registrados na Figura (10). Notavelmente, dentre as réguas de grade testadas, duas delas tiveram que ser descartadas devido a ultrapassarem o limite máximo de precisão permitido. No entanto, é importante destacar que as outras quatro réguas de grade testadas demonstraram uma durabilidade excepcional, operando de forma consistente até o término do teste.

Além disso, a abordagem é aplicada ao ensino prático, capacitando alunos a compreender e aplicar a tecnologia de grade ruling. Isso estimula a inovação e melhora as habilidades práticas dos alunos. A aplicação da tecnologia e dos testes acelerados fortalece a indústria e contribui para a formação de profissionais competentes no campo da engenharia.

Quando se trata de experimentos que requerem altos níveis de eficiência de difração, dispersão precisa e configurações flexíveis, a escolha da grade holográfica se torna crucial. Isso se deve às vantagens significativas que as grades holográficas oferecem, como maior eficiência de difração, dispersão ajustável e versatilidade na configuração experimental. O artigo "Volume-phase holographic gratings and their potential for astronomical applications" aborda a aplicação de grades holográficas de fase de volume em espectrógrafos astronômicos. Segundo (Barden et al., 1998, p. 1) elas podem melhorar a eficiência espectral, oferecendo eficiências de difração mais altas e, conseqüentemente, permitindo a obtenção de espectros mais detalhados e precisos. Além disso, a capacidade de personalização das grades de fase de volume possibilita a criação de estruturas mais complexas, simplificando o design dos espectrógrafos e resultando em dispositivos mais eficientes e compactos.

Uma característica interessante é a redução do número de elementos ópticos nos espectrógrafos, graças à capacidade de criar estruturas de grade complexas. Isso não apenas simplifica o design, mas também aumenta a eficiência geral do sistema como mostrado na figura 11, aonde há uma comparação com outro tipo de grade.

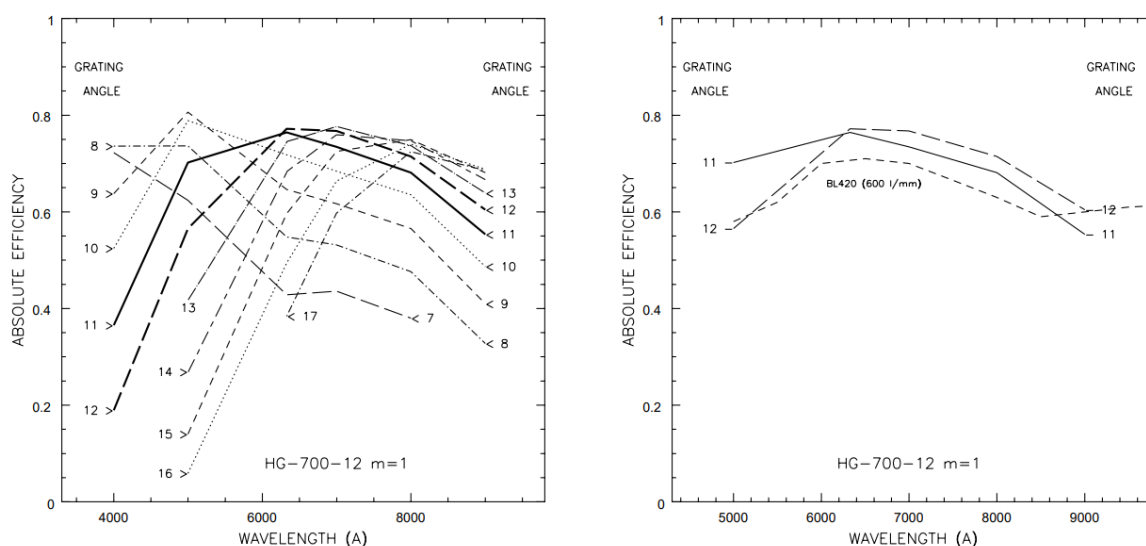


Figura 11: Comparação da eficiência do envelope da grade holográfica fase de volume de 600 l/mm com inclinações de 11 e 12 graus com uma grade de reflexão governada por diamante otimizada em 800 nm.

Fonte: BARDEN, 1998.

O potencial das grades holográficas de fase de volume vai além do aprimoramento dos sistemas existentes. Com sua eficiência e versatilidade aprimoradas, elas podem eventualmente substituir as grades convencionais nos espectrógrafos astronômicos, oferecendo um desempenho ainda mais avançado.

Outro uso de grades holográficas de volume (VHG) está na estabilização de lasers que começou na década de 1980 e ganhou destaque com lasers semicondutores (STECKMAN et al. 2007. p.6). A Accuwave Corporation aplicou feedback óptico para lasers de 670 a 840 nm, mas a limitação dos materiais impediu sua adoção. Avanços em materiais de vidro impulsionaram a comercialização das VHG, permitindo feedback seletivo de comprimento de onda em diodos a laser. Isso reduz a sensibilidade térmica, estreita o espectro e equilibra emissores individuais.

A figura 12 mostra um gráfico aonde está mostrando como a temperatura afeta o comprimento de onda da luz emitida por dois tipos diferentes de diodos laser: um que é estabilizado (por um Volume Holographic Grating ou similar) e um que não é. Isso é importante porque os diodos laser são frequentemente usados em aplicações onde é crucial manter um comprimento de onda específico, e a temperatura pode ter um grande efeito sobre isso.

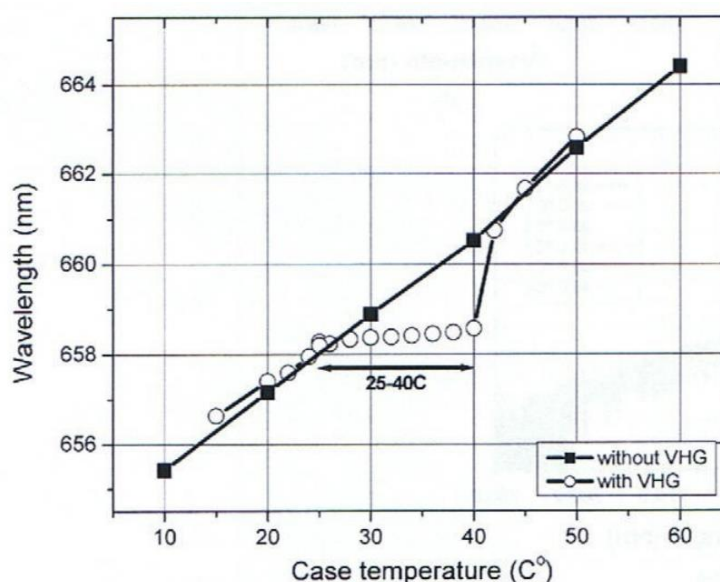


Figura 12: Variação do comprimento de onda em função da temperatura para um diodo laser estabilizado e não estabilizado operando a 658 nm.

Fonte: STECKMAN, 2007

Com isso notamos que Volume Holographic Grating (VHG) é um excelente estabilizador para diodos laser. Ele funciona refletindo uma parte específica do espectro de luz emitido pelo diodo laser de volta para a cavidade do laser. Isso cria uma realimentação seletiva em comprimento de onda que estabiliza o comprimento de onda do laser e reduz a largura de linha.

Com lasers de alta potência, eficientes e potentes, VHGs têm diversas aplicações, como bombeamento a laser e processamento de materiais. O artigo "Volume Holographic Grating Wavelength Stabilized Laser Diodes" explora as VHGs como estabilizadores de comprimento de onda, discutindo configurações de travamento testadas e uma abordagem inovadora.

Enquanto as grades holográficas oferecem vantagens impressionantes em termos de eficiência de difração e dispersão, quando mudamos nosso foco para experimentos com configurações mais complexas e aplicações aeroespaciais, as grades echelle se destacam como uma escolha promissora. Um exemplo notável é o artigo "Echelle Diffractive Grating Based Wavelength Interrogator for Potential Aerospace Applications" tendo o seu objetivo de introduzir um interrogador baseado em um dispositivo de grade difrativa Echelle (EDG), para "melhorar o custo-eficácia operacional e reduzir o custo de manutenção" (GUO et al., 2013, p.7). O artigo concluiu que melhorias foram destacadas em relação ao trabalho anterior: o uso de todos os 32 canais EDG para melhorar a faixa de ajuste de temperatura, velocidade e repetibilidade, e a introdução de dois modos de operação - o modo de varredura e o modo estacionado. No modo de varredura, o espectro EDG foi sintonizado pela mudança de temperatura, adequado para monitoramento de carga operacional. No modo estacionado, dois ou três canais EDG foram usados como um filtro óptico dependente do comprimento de onda para detecção de ondas acústicas.

A Figura 13 apresenta os resultados da interrogação de um sensor FBG sob cinco diferentes tensões aplicadas por um motor piezo. As tensões são 0, 600, 1500, 2300 e 3000. A figura é composta por seis subfiguras, rotuladas de (a) a (f). As subfiguras de (a) a (e) mostram a potência da luz em relação à temperatura do EDG dos canais designados do EDG. A subfigura (f) mostra o comprimento de onda de Bragg interrogado como função da tensão aplicada.

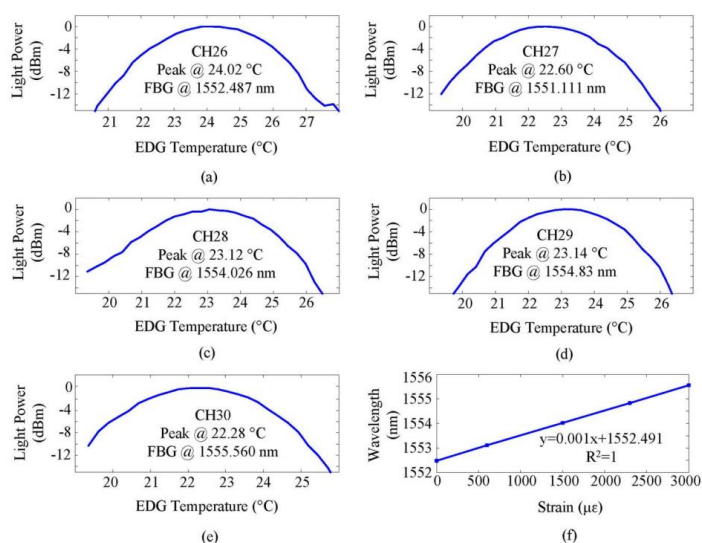


Figura 13: Resultados da interrogação do sensor FBG sob cinco cepas diferentes. (a) – (e) Potência luminosa em relação à temperatura EDG do EDG designado canais. (f) Comprimento de onda de Bragg interrogado em função da deformação aplicada.

Fonte: GUO, 2013.

A figura 13 ilustra como o sistema de interrogação proposto funciona no modo de varredura, no qual a temperatura do EDG é ajustada para varrer o comprimento de onda de transmissão de cada canal EDG. Ao monitorar a potência da luz e registrar a temperatura do EDG, o comprimento de onda de Bragg do sensor FBG pode ser interrogado com precisão.

A figura 13 demonstra que o comprimento de onda de Bragg aumenta com a tensão a uma taxa de 1 pm/, que é típica para sensores FBG trabalhando em torno de 1550 nm. Também é mostrado que o sistema de interrogação proposto tem uma repetibilidade melhor que 10 pm.

Além desses avanços, o estudo delineou o potencial empacotamento desse sistema de interrogação em um dispositivo compacto do tamanho da palma da mão, com capacidade de alimentação autônoma. Essa característica o torna uma solução ideal para aplicações aeroespaciais, onde o monitoramento de saúde estrutural é crítico para melhorar a eficiência operacional e reduzir os custos de manutenção. Em síntese, o trabalho representa um progresso significativo no desenvolvimento de

técnicas de monitoramento avançado, contribuindo para avanços na segurança e desempenho das operações aeroespaciais.

Uma outra aplicação das grades de Echelle ocorre no âmbito dos demultiplexadores de comprimento de onda em sistemas de multiplexação por divisão de comprimento de onda (WDM). Nesse cenário, em que diversos sinais ópticos são transmitidos simultaneamente em diferentes comprimentos de onda, a tarefa de separar esses sinais para uma leitura precisa e eficaz é crucial. As grades de Echelle, devido às suas características distintas, desempenham um papel fundamental nesse processo. Um exemplo ilustrativo é um estudo que propôs e demonstrou um demultiplexador de grade de Echelle compacto e de baixo crosstalk na plataforma SOI de 3  $\mu\text{m}$  como mostrado na figura 14.

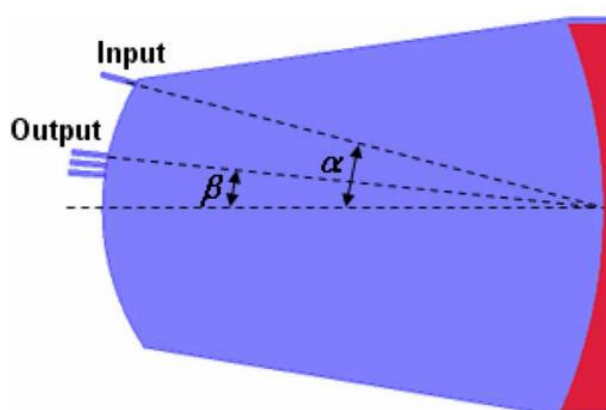


Figura 14: Esquema do demultiplexador baseado em rede Echelle.

Fonte: FENG, 2011.

Segundo (FENG et al., 2011, p. 284) o composto por 12 canais, esse demultiplexador exibe notáveis perdas no chip, tão baixas quanto 1,7 dB, e um crosstalk adjacente superior a 25 dB. Um aspecto notável é a insensibilidade do crosstalk e das perdas ao ângulo vertical da faceta da grade, conseguida ao alinhar as guias de ondas receptoras ao ângulo de difração de zero grau da grade.

Essa aplicação da tecnologia de grade de Echelle na separação eficiente de comprimentos de onda tem implicações profundas para sistemas de comunicação de alta capacidade. Ao oferecer uma maneira econômica e precisa de dividir os sinais ópticos, a tecnologia de grade de Echelle desempenha um papel crítico na expansão da capacidade das redes de telecomunicações. Sua capacidade de

otimizar o espectro óptico disponível e a flexibilidade proporcionada pela plataforma SOI podem catalisar avanços significativos em sistemas de comunicação mais eficientes e de maior capacidade.

Outra aplicação está no artigo "Determination of blood species using echelle Raman spectrometer and surface enhanced Raman spectroscopy" aonde aborda a aplicação da espectroscopia Raman aprimorada de superfície (SERS) para a identificação de espécies sanguíneas. O estudo explora a importância dessa identificação para fins forenses, inspeções alfandegárias, ciência veterinária, preservação da vida selvagem e indústria alimentícia.

Na pesquisa foi utilizada um espectrômetro Raman baseado no espectrômetro de Echelle seguindo essa estrutura mostrada na figura 15.

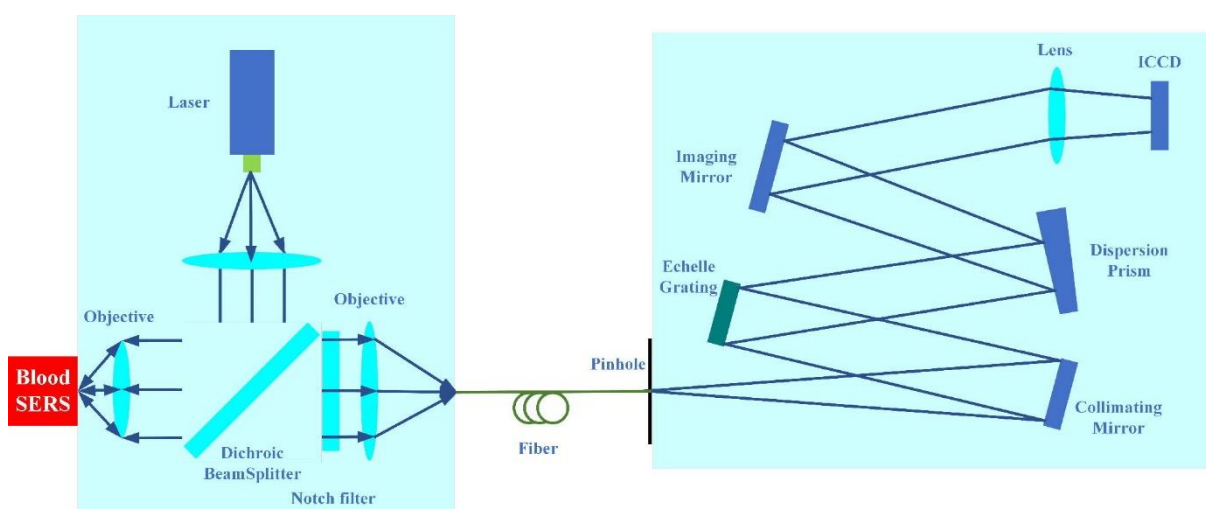


Figura 15: Diagrama esquemático do sistema proposto para identificar espécies de sangue usando um espectrômetro Raman de echelle combinado com a espectroscopia Raman de superfície aumentada (SERS).

Fonte: WANG, 2022.

Segundo (WANG et al., 2022) uso dessa tecnologia permitiu a obtenção de uma ampla faixa espectral e alta resolução simultaneamente, sem a necessidade de girar a grade, o que é obtido pelo emprego de múltiplas ordens de difração como mostrada na figura 15 o esquema.

O SERS foi empregado para fornecer assinaturas vibracionais intensificadas e específicas das substâncias Raman ativas presentes nas amostras de sangue. Essa

técnica permitiu a distinção entre manchas de sangue humano e não humano, contribuindo para a identificação de espécies sanguíneas.

Esse artigo apresenta um exemplo de aplicação da tecnologia de espectrômetro de Echelle em conjunto com a espectroscopia Raman aprimorada de superfície para a identificação de espécies sanguíneas, destacando sua relevância para diversas áreas, incluindo forense, inspeções alfandegárias e ciência veterinária.

Ao explorar a literatura científica, identificamos as distintas categorias de grades de difração e suas propriedades específicas. Examinamos os princípios físicos subjacentes à difração de luz, compreendendo como diferentes tipos de grades influenciam o comportamento da luz incidente. A investigação abordou também os métodos utilizados na fabricação dessas grades, abrangendo desde abordagens tradicionais até técnicas mais avançadas.

Um aspecto central de nosso estudo foi a identificação das aplicações mais notáveis das grades de difração. Essas aplicações transcenderam fronteiras disciplinares, abrangendo campos que vão desde a física e a química até a medicina e a engenharia. Ao contextualizar a relevância de cada aplicação, destacamos como as grades de difração contribuem para avanços tecnológicos e científicos em áreas diversas.

Em resumo, nossa abordagem bibliográfica proporcionou uma análise abrangente e contextualizada das grades de difração. Os resultados destacam a importância desses dispositivos como blocos fundamentais na exploração do comportamento da luz e sua aplicação em uma ampla gama de domínios. Ao conectar estudos pré-existentes, este estudo fornece uma base sólida para aqueles que desejam compreender, explorar e inovar no campo das grades de difração, incentivando um olhar atento sobre suas complexidades e potencialidades.

## **CONSIDERAÇÕES FINAIS**

As grades holográficas, echelle e regradadas representam avanços significativos no campo da óptica e da espectroscopia, cada uma com suas próprias vantagens e aplicações específicas. As grades holográficas oferecem uma flexibilidade excepcional na manipulação da luz, permitindo um alto grau de personalização e

versatilidade em sistemas espectroscópicos. Elas têm demonstrado um grande potencial em aplicações astronômicas, oferecendo melhorias na eficiência de difração e na configuração de espectrômetros.

As grades echelle, por outro lado, são conhecidas por sua eficiência de difração excepcional, tornando-as ideais para experimentos que exigem alta resolução espectral. Seu uso em aplicações aeroespaciais destaca sua importância em cenários onde a precisão é fundamental.

Além disso, não devemos esquecer das grades regradadas, que têm sido fundamentais em uma ampla gama de aplicações industriais e científicas, proporcionando uma maneira confiável de medir e manipular a luz.

A importância do estudo e das aplicações de grades em geral não pode ser subestimada. Essas tecnologias desempenham papéis essenciais em campos que vão desde a astronomia até a indústria, da pesquisa fundamental à aplicação prática. À medida que a tecnologia continua a avançar, é provável que vejamos uma evolução constante dessas grades e uma expansão de suas aplicações em diversas áreas.

Portanto, à medida que exploramos os benefícios dessas tecnologias inovadoras, é essencial continuar a pesquisa e o desenvolvimento para aproveitar ao máximo seu potencial. O estudo das grades não apenas nos permite expandir nosso conhecimento fundamental da luz e da espectroscopia, mas também impulsiona a inovação em uma ampla gama de indústrias, contribuindo para o progresso da ciência e da tecnologia como um todo.

## REFERÊNCIA

LI, Xinghui et al. **Design and Testing of a Compact Optical Prism Module for Multi-Degree-of-Freedom Grating Interferometry Application**. Applied Sciences. p.12. dez. 2018. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2076-3417/8/12/2495>>. Acesso em: [15 de maio de 2023].

STECKMAN, G. J., Liu, W., Platz, R., Schroeder, D., Moser, C., & Havermeier, F. (2007). **Volume Holographic Grating Wavelength Stabilized Laser Diode**. Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, v.13, n.13 p.672-678, jun. 2007 Disponível em: <[https://www.researchgate.net/publication/3410388\\_Volume\\_Holographic\\_Grating\\_Wavelength\\_Stabilized\\_Laser\\_Diodes](https://www.researchgate.net/publication/3410388_Volume_Holographic_Grating_Wavelength_Stabilized_Laser_Diodes)>. Acesso em: [1 de junho de 2023].

GUO, Honglei et al. **Echelle Diffractive Grating Based Wavelength Interrogator for Potential Aerospace Applications**. Journal of Lightwave Technology, v. 31, n. 14, p. 2467-2473, jul. 2013. Disponível em: <<https://www.site.uottawa.ca/~jpyao/mprg/reprints/JLT-Echelle-Grating-July2013.pdf>>. Acesso em: [15 de junho de 2023].

OPENSTAX CNX. **University Physics III Optics & Modern Physics**. University Physics III - Optics and Modern Physics. Disponível em: <[https://phys.libretexts.org/Bookshelves/University\\_Physics/Book%3A\\_University\\_Physics\\_\(OpenStax\)/University\\_Physics\\_III\\_-\\_Optics\\_and\\_Modern\\_Physics\\_\(OpenStax\)/04%3A\\_Diffraction/4.05%3A\\_Diffraction\\_Gratings](https://phys.libretexts.org/Bookshelves/University_Physics/Book%3A_University_Physics_(OpenStax)/University_Physics_III_-_Optics_and_Modern_Physics_(OpenStax)/04%3A_Diffraction/4.05%3A_Diffraction_Gratings)>. Acesso em: [20 de maio de 2023].

CLARK, Otávio Augusto Câmara; CASTRO, Aldemar Araujo. **A pesquisa**. Pesquisa Odontológica Brasileira, p. 3 -, 2003. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/pob/a/Y7Zwy8rNNvf6TS6Sv78v6SN/>>. Acesso em: [15 de maio de 2023].

FENG, Dazeng et al. **Fabrication Insensitive Echelle Grating in Silicon-on-Insulator Platform**. IEEE Photonics Technology Letters, vol. 26, nº 5, pp. 284-286, 2011. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/profile/Dazeng-Feng/publication/228879455\\_Fabrication\\_Insensitive\\_Echelle\\_Grating\\_in\\_Silicon-on-Insulator\\_Platform/links/55fe380c08aeafc8ac742ffb/Fabrication-Insensitive-Echelle-Grating-in-Silicon-on-Insulator-Platform.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Dazeng-Feng/publication/228879455_Fabrication_Insensitive_Echelle_Grating_in_Silicon-on-Insulator_Platform/links/55fe380c08aeafc8ac742ffb/Fabrication-Insensitive-Echelle-Grating-in-Silicon-on-Insulator-Platform.pdf)>. Acesso em: [16 de junho de 2023].

PALMER, C. **Diffraction Grating Handbook**. Newport. p. 266, 6ª ed, 2004. Disponível em: <<http://www.newport.com/>>. Acesso em: [20 de abril de 2023].

WANG, Peng et al. **Determination of blood species using echelle Raman spectrometer and surface enhanced Raman spectroscopy**. Journal of Molecular Structure, v. 281, 2022. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1386142522007892>>. Acesso em: [15 de julho de 2022].

BARDEN, Samuel Charles et al. **Volume-phase holographic gratings and their potential for astronomical applications**. Optical Astronomical Instrumentation. 1998. Disponível em: <<https://doi.org/10.1117/12.316806>>. Acesso em: [19 de julho de 2023].

WANG, Jili et al. **Design and application of accelerated life test of grating ruler based on step stress loading**. MATEC Web Conf., vol.336, 2021. Disponível em: <[https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/abs/2021/05/mateconf\\_cscns20\\_02027/mateconf\\_cscns20\\_02027.html](https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/abs/2021/05/mateconf_cscns20_02027/mateconf_cscns20_02027.html)>. Acesso em: [5 de agosto de 2023].

OLIVEIRA, Ivanildo Fabricio De. **Raio X no Ensino Médio via Acesso Remoto na Perspectiva da Aprendizagem Significativa**. Universidade Estadual de Maringá. Nov de 2016. Disponível

em:<http://repositorio.uem.br:8080/jspui/bitstream/1/3862/1/000224951.pdf>. Acesso em: [12 de junho de 2023]

HALLIDAY, David; et al. **Fundamentos de Física - Óptica e Física Moderna - Volume 4**. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

YOUNG, H. D.; FREEDMAN, R. A. **Física III: Eletromagnetismo**. 12a. ed. São Paulo: Pearson, 2009.

NEWPORT. **Diffraction Grating Physics**. Disponível em: <https://www.newport.com/n/diffraction-grating-physics>. Acesso em: [16 set. 2023]

BAGBAYA, A. (1973). **David Rittenhouse and the Diffraction Grating**. American Journal of Physics, 41(10), 1233-1234.

AMERICAN PHYSICAL SOCIETY. (2011). **This Month in Physics History: June 16, 1801: Rittenhouse's Diffraction Grating**. APS News, 20(6).

DAVIDSON, M. (2010). **Augustin-Jean Fresnel**. Molecular Expressions: Science, Optics and You - Timeline.

BASDEVANT, J. (2019). **Augustin Fresnel (1788–1827): A Determined Life for Diffraction and Polarization**. European Physical Journal H, 44, 37–68.

DAVIDSON, M. (2011). **Joseph von Fraunhofer**. Molecular Expressions: Science, Optics and You - Timeline.

HARVEY, A.; PFISTERER, R. (2019). **Joseph von Fraunhofer: The Discovery of Fraunhofer Lines**. Optics & Photonics News, 30(6), 26-33.

SPRINGERLINK. **Joseph von Fraunhofer**. SpringerLink.