



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA
CAMPUS I
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
CURSO DE LICENCIATURA PLENA EM FÍSICA**

FELIPE BARBOSA DE ANDRADE

***LASER: PRINCÍPIOS BÁSICOS E UMA PROPOSTA DE ATIVIDADE
EXPERIMENTAL PARA O ENSINO DE FÍSICA***

**CAMPINA GRANDE
2016**

FELIPE BARBOSA DE ANDRADE

***LASER*: PRINCÍPIOS BÁSICOS E UMA PROPOSTA DE ATIVIDADE
EXPERIMENTAL PARA O ENSINO DE FÍSICA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada ao Departamento de Física da Universidade Estadual da Paraíba, como requisito parcial à obtenção do título de Licenciatura Plena em Física.

Área de concentração: Laboratório IV.

Orientadora: Profa Dra Tâmara Pereira Ribeiro de Oliveira Lima e Silva.

**CAMPINA GRANDE
2016**

É expressamente proibida a comercialização deste documento, tanto na forma impressa como eletrônica. Sua reprodução total ou parcial é permitida exclusivamente para fins acadêmicos e científicos, desde que na reprodução figure a identificação do autor, título, instituição e ano da dissertação.

A553I Andrade, Felipe Barbosa de.

Laser [manuscrito] : princípios básicos e uma proposta de atividade experimental para o ensino de física / Felipe Barbosa de Andrade. - 2016.

42 p. : il. color.

Digitado.

Monografia (Graduação em Física) - Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, 2016.

"Orientação: Profa. Dra. Tâmara Pereira Ribeiro de Oliveira Lima e Silva, Departamento de Física".

1. Laser. 2. Difração. 3. Óptica. 4. Ensino de Física. I.
Título.

21. ed. CDD 535

FELIPE BARBOSA DE ANDRADE

**LASER: PRINCÍPIOS BÁSICOS E UMA PROPOSTA DE ATIVIDADE
EXPERIMENTAL PARA O ENSINO DE FÍSICA**

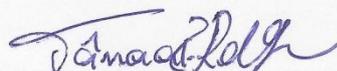
Trabalho de Conclusão de Curso apresentada ao Departamento de Física da Universidade Estadual da Paraíba, como requisito parcial à obtenção do título de Licenciatura Plena em Física.

Área de concentração: Laboratório IV.

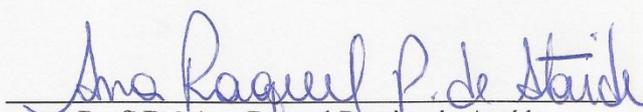
Orientadora: Prof^ª Dr^ª Tâmara Pereira Ribeiro de Oliveira Lima e Silva.

Aprovada em: 07/10/2016

BANCA EXAMINADORA



Prof^ª Dr^ª Tâmara Pereira Ribeiro de Oliveira Lima e Silva
(Orientadora)
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)



Prof^ª Dr^ª Ana Raquel Pereira de Ataíde
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)



Prof. Dr^ª Morgana Lígia de Farias Freire
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)

À minha esposa e filha pela dedicação e abnegação e aos meus pais, pela instrução, conselhos, companheirismo e amizade, DEDICO.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente ao meu Deus, pela saúde e sabedoria concedida no desenvolvimento deste trabalho, pois toda provisão de capacidade, de saúde, de entendimento, vem d'Ele.

À professora Dr^a Tâmara, minha orientadora, pela confiança, dedicação e orientação diligente e segura neste trabalho, buscando o maior suporte possível, mesmo em meio às dificuldades existentes, principalmente pela distância.

À minha querida esposa, Erika, pelo amor, dedicação, compreensão e companhia durante o desenvolvimento deste trabalho, abnegando até dos seus próprios interesses, a fim de me dar o melhor suporte possível. À minha amada princesa, menina escolhida por Deus pra fazer sorrir a minha vida, que fazem os meus dias serem primavera, pois é a flor mais bela que Deus plantou em meu jardim. “minha filha Débora Esther”.

Aos meus pais que, em tudo, me possibilitaram chegar até aqui, principalmente pela educação que me foi dada.

Agradeço aos amigos de curso de licenciatura em Física, não vou citar os nomes, para não incorrer no equívoco de esquecer alguns, pelo apoio, pelas sugestões e companheirismo demonstrados ao longo do trabalho, ao apoio nas dificuldades inerentes ao meu trabalho fora da Universidade. Agradeço aos demais professores decorrentes da graduação, que direta-indiretamente contribuíram para o desenvolvimento do meu conhecimento, em especial àqueles que se firmou alguma amizade, como o prof^o Jean Spinelly, a prof^a Morgana, ao prof^o Alessandro, ao prof^o Alex, ao prof^o Mará, ao prof^o Aldo, a prof^a Maria Amélia, a prof^a Maria Angela, a prof^a Ana Raquel, ao prof^o Marcelo Germano e outros. Àqueles profissionais que atuam no bom andamento do serviço administrativo desta Universidade, por exemplo, funcionário das coordenações, da biblioteca, das copiadoras, o qual firmamos um certa amizade também no dia-a-dia, aos auxiliares de laboratório, o qual preparam-no para as atividades de aula, inclusive, para a realização dos experimentos aqui citados.

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

Amém!

RESUMO

Este Trabalho de Conclusão de Curso aborda os princípios básicos do *laser*, o que inclui suas propriedades (como monocromaticidade, coerência e polarização), sua classificação quanto à emissão do feixe (pulsado ou contínuo) e uma discussão sobre *lasers* de estado sólido e a gás. Esta abordagem teórica inicial visa conectar os conceitos acima citados a uma aplicação didática, realizada neste trabalho, que pode ser usada em sala de aula para se discutir, de modo qualitativo e quantitativo, o fenômeno de difração. Para tanto utilizamos a técnica de difração de fenda simples, associada ao princípio de Babinet, para medir o diâmetro de um fio de cabelo fazendo uso de um laser de He-Ne (laser a gás de hélio-neônio) emitindo, na região do espectro visível, nos comprimentos de onda do verde ($\lambda = 532 \text{ nm}$) e do vermelho ($\lambda = 665 \text{ nm}$). Foram realizados dois experimentos que mostraram a possibilidade de explorá-los em sala de aula, pois utilizamos fundamentos de óptica geométrica e relacionamos a uma aplicação tecnológica – medida da dimensão de um objeto - como foi o caso, aqui, decorrente da análise e da quantificação do fenômeno da difração do feixe *laser*.

Palavras-chaves: Laser em sala de aula. Difração. Óptica.

ABSTRACT

This work examines the basic principles of laser, what includes its properties (such as monochromaticity, coherence and polarization), classification due to the form of emission of the laser beam (pulsed or continuous) and a discussion about solid state laser and gas laser. This initial theoretical approach aims to connect the concepts described above to a didactic application, performed in this work, which can be used in Physics Education in order to teach about the diffraction phenomena in a qualitative and quantitative way. Thus we used the diffraction technique through a simple slit, associated with Babinet principle, so as to measure the diameter of an one hair. For this, we used a He-Ne laser (a gas laser of helium-neonium) emitting in the visible, in the wavelengths $\lambda = 532 \text{ nm}$ (green) and $\lambda = 665 \text{ nm}$ (red). The experiments carried out in this work showed that it is possible to explore, in classroom, fundamentals of geometric optics and relate them to a technological application – measurement of an object's dimension – as it has been the case, here, resulting from the analysis and quantification of the diffraction phenomena of a laser beam.

Keywords: Laser in classroom. Diffraction. Optics.

SUMÁRIO

	INTRODUÇÃO	08
1	A INVENÇÃO DO LASER: UM BREVE HISTÓRICO.....	09
2	FUNDAMENTOS DO LASER.....	15
2.1	PROPRIEDADES.....	15
2.1.1	MONOCROMATICIDADE.....	15
2.1.2	COERÊNCIA.....	16
2.1.3	DIRECIONALIDADE OU POLARIZAÇÃO.....	17
2.1.4	ALTA INTENSIDADE.....	17
2.1.5	PULSOS ULTRA CURTOS.....	18
2.2	TIPOS DE LASER.....	18
		8
2.2.1	LASER PULSADO DE ESTADO SÓLIDO.....	20
2.2.2	LASER CONTÍNUO A GÁS.....	22
3	A DIFRAÇÃO E UMA APLICAÇÃO PARA SALA DE AULA COM LASER.....	25
3.1	O FENÔMENO DA DIFRAÇÃO.....	25
3.2	MEDINDO O DIÂMETRO DE UM FIO DE CABELO.....	27
3.2.1	EXPERIMENTO I.....	27
3.2.2	EXPERIMENTO II.....	33
4	CONCLUSÕES.....	39
	REFERÊNCIAS.....	40

INTRODUÇÃO

A Física está presente à nossa volta. Ainda que não observada minuciosamente por alguns, e devido a ser a ciência de estudo a fundo de alguns fenômenos naturais, se torna necessária a sua inserção no currículo do ensino regular.

Como diz (BONATTO, 2012), a interdisciplinaridade é um elo entre o entendimento das disciplinas nas suas mais variadas formas, com a sua ampliação através de recursos inovadores e dinâmicos.

Dentre as disciplinas mais tradicionais até as mais atuais, a Física destaca-se pelas possibilidades de aplicação interdisciplinar, principalmente devido à sua conexão com o cotidiano através conhecimento científico-tecnológico que o rodeia. A inclusão da Física no currículo do Ensino Médio dá aos estudantes a oportunidade de entenderem melhor a natureza e sua ligação com o mundo moderno em que vivem.

Neste Trabalho de Conclusão de Curso, inclusive exercendo a interdisciplinaridade, abordaremos de início um breve resgate histórico das teorias ao desenvolvimento do primeiro laser, incluindo a apresentação de suas características que o distinguem da luz comum. Traremos a lume o conceito de difração e, em seguida, discutimos dois experimentos que fazem uso do *laser* e da difração de um fio de cabelo propondo a mostrar, em particular aos alunos em sala de aula, que é fundamental para a aceitação de uma teoria científica que esta seja consistente com evidências experimentais. Além disso, com os experimentos desenvolvidos neste trabalho é possível permitir-lhes fazer sua própria avaliação sobre o tema aqui desenvolvido. Queremos mostrar ainda a possibilidade de utilizar material de baixo custo com objetivo de motivar os alunos pela busca do aprendizado aliando conhecimento e criatividade; pois a técnica abordada aqui possibilita, através da exploração das propriedades de um *laser* contínuo a gás de He-Ne, identificar informações quantitativas e qualitativas de parâmetros físicos de materiais que em outros tempos eram desconhecidos ou difíceis de serem obtidos e analisados, e que hoje nos podem abrir janelas para o desenvolvimento de novas tecnologias.

CAPÍTULO 1: A INVENÇÃO DO LASER: UM BREVE HISTÓRICO

Antes da invenção do *laser*, a óptica se preocupava bastante com o desenvolvimento de ferramentas que possibilitassem produzir feixes de luz concentrados e que se propagassem por longas distâncias sem se dispersarem. Neste capítulo abordaremos um pouco dessa história, desde o surgimento do seu precursor (o *maser*) até a invenção do primeiro *laser*.

Sem dúvida, um dos grandes avanços na área tecnológica, no século XX, foi o desenvolvimento dos aparelhos a *laser*. A aplicação dos diferentes tipos de *laser* implementou os procedimentos médicos e odontológicos, proporcionando uma grande redução no tempo de duração das cirurgias, no tempo de recuperação dos pacientes, nas complicações pós-operatórias (agilizando o processo de cicatrização, por exemplo). O *laser* possibilitou, ainda, avanços na manipulação industrial, na área do comércio (através do uso de aparelhos de leitura óptica), etc. (BARTZ, 2011).

Laser é uma abreviação do inglês para *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, ou seja, amplificação da luz por emissão estimulada de radiação.

Os estudos da radiação eletromagnética tiveram grande apogeu no final do século passado, com a utilização dos raios catódicos, raios x, radioisótopos, ondas de rádio e luz incandescente (PÉCORA, 1999).

A teoria de Einstein (Figura 1) sobre a emissão estimulada da luz (1915-1916) (EINSTEIN, 1917), teve como base a teoria quântica proposta por Planck (BAGNATO, 2001). Essa teoria analisava as relações entre a quantidade de energia envolvida nos processos atômicos por meio da equação $E=h\nu$, onde h é a constante de Planck e ν é a frequência associada a um comprimento de onda λ que se relacionam através da equação $\nu=c/\lambda$. Assim, Einstein discorreu sobre a interação de átomos, íons e moléculas com a radiação eletromagnética em termos de absorção e emissão espontânea de radiação (Figura 2) e concluiu que um terceiro processo de interação, a emissão estimulada, poderia existir e, nela, a radiação eletromagnética deveria ser produzida por um processo atômico.

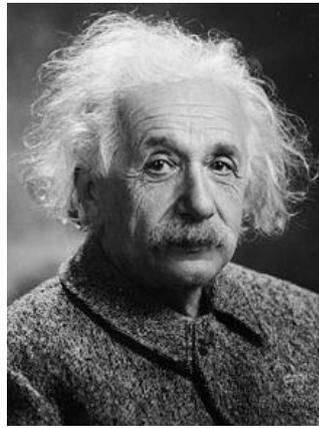
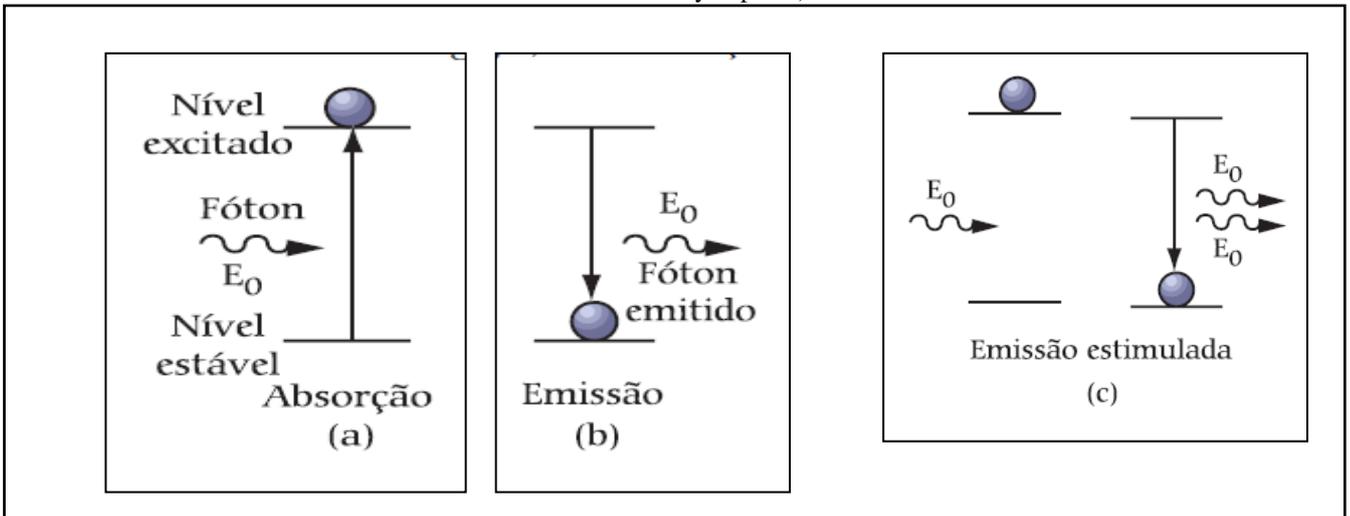


Figura 1 - Albert Einstein (1879 - 1955) (Wikipedia, the free encyclopedia)



processos de absorção (a) e emissão (b) espontâneas, em que o elétron absorve um fóton para “saltar” para um estado excitado e reemite o mesmo fóton para voltar ao estado original, mais estável (de mais baixa energia); e o processo de emissão estimulada (c), em que um elétron, no estado excitado, ao receber radiação numa determinada frequência ν_0 , decai para o estado original reemitando este fóton de frequência ν_0 e mais outro, de frequência equivalente. E_0 é a energia associada ao fóton (ATO, 2001)

Na primeira metade do século XX muitas pesquisas sobre emissão estimulada foram desenvolvidas e, em 1953, Charles Townes (Figura 3), juntamente com colegas da Universidade de Colúmbia (EUA), apresentou o *maser*, *Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, ou seja, amplificação de microondas por emissão estimulada de radiação, cujo princípio de funcionamento era o seguinte: usando moléculas de amônia como meio ativo estas, ao serem excitadas por uma fonte luminosa externa, vibravam em determinada frequência de microondas e, a partir daí, um processo de emissão estimulada em cascata gerava um feixe coerente de microondas (GARWIN, 2003,).



Figura 3 - Charles Townes (1915 – 2015) (Wikipedia, the free encyclopedia)

Logo que o *maser* foi demonstrado começou a busca por um *maser* óptico, isto é, um dispositivo que emitisse um feixe coerente com frequência na região de luz visível. Townes e Arthur Schawlow (Figura 4), que era seu cunhado, propuseram um arranjo com uma cavidade contendo o meio ativo e dois espelhos, um que refletia 100% da radiação incidente e outro semitransparente, que deixava passar uma fração da radiação emitida pelas moléculas do meio ativo. Tal configuração ficou conhecida como cavidade *Fabry-Pérot* (Figura 5). Por esse trabalho Townes ganhou o Prêmio Nobel de Física em 1964, juntamente com Aleksandr Prokhorov (Figura 6) e Nicolay Basov (Figura 7), que desenvolveram o mesmo trabalho independentemente.



Figura 4 - Arthur Schawlow (1921 – 1999) (Wikipedia, the free encyclopedia)

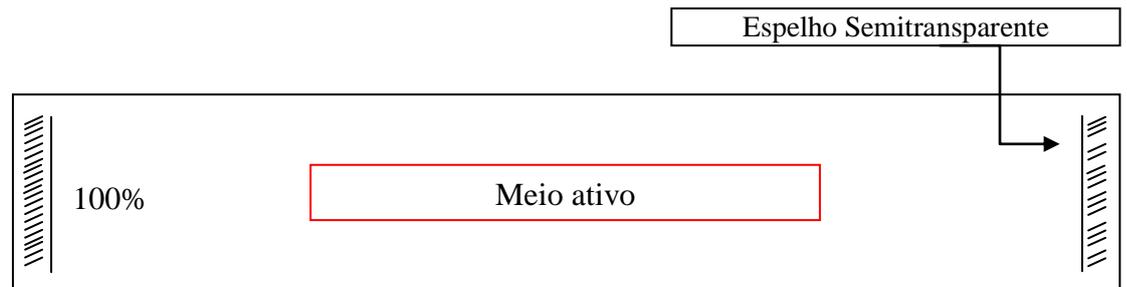


Figura 5 – Esquema da cavidade óptica *Fabry-Pérot*.



Figura 7 - Aleksandr Prokhorov (1916 – 2002) (Wikipedia, the free encyclopedia)



Figura 6 - Nicolay Basov (1922 – 2001) (Wikipedia, the free encyclopedia)

Mas foi Theodore Maiman (Figura 8) quem construiu o primeiro *maser* óptico. Maiman sugeriu o nome *loser* para *Light Oscillation by Stimulated Emission of Radiation*, mas *loser* significa "perdedor" e o nome foi trocado por *laser*, *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, que permaneceu.

Em Julho de 1960, Maiman anunciou o funcionamento do primeiro *laser*, cujo meio ativo era um cristal de rubi (Figura 9).

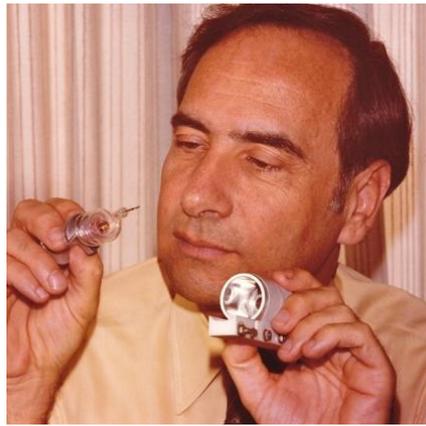


Figura 8 - Theodore Maiman
(1927 – 2007) (KILBANE, 2009)

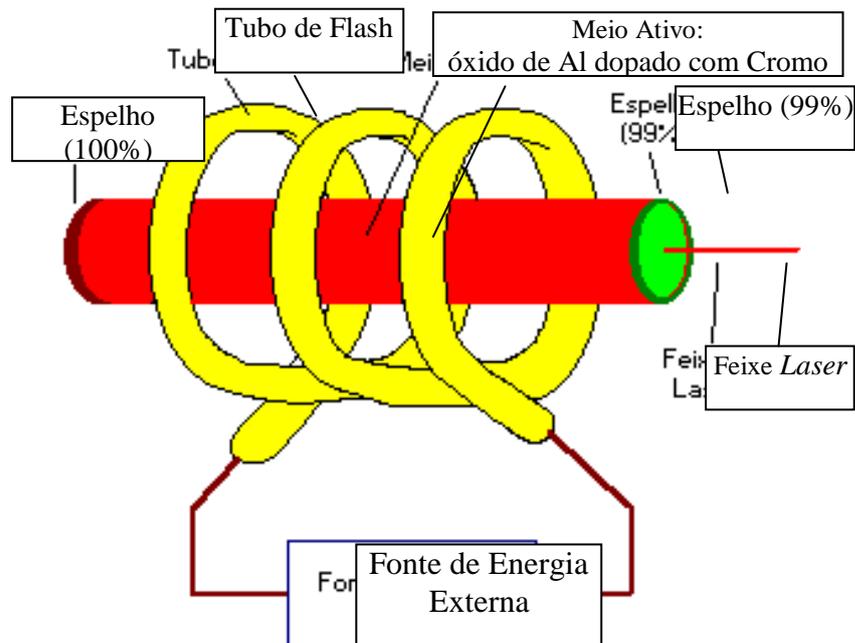


Figura 9 - Configuração do primeiro *laser*, cujo meio ativo era um cilindro de óxido de alumínio dopado com cromo (cristal de rubi) (ALBA and RODRÍGUEZ, 2008).

O rubi é um cristal de óxido de alumínio contendo um pouco de cromo. Os átomos de cromo formam o meio ativo propriamente dito, são eles que geram a luz *laser* por emissão estimulada de fótons. Eles são excitados por uma luz externa muito intensa (lâmpada de *flash*). O átomo de cromo é um sistema de três níveis: a luz externa excita o átomo de cromo do estado fundamental para um estado excitado de vida curta. Desse estado excitado o átomo decai para outro estado excitado de menor energia, chamado de metaestável e conveniente para ser usado na ação do *laser*. A diferença de energia entre o estado mais excitado e o metaestável é dissipada na forma de vibrações no cristal de rubi (BAGNATO, 2001).

No *laser* de rubi de Maiman o feixe de luz sai na forma de pulsos muito curtos. Pouco tempo depois outros *lasers* foram construídos utilizando-se de outros meios ativos, que produzem feixes contínuos de luz.

Nos anos seguintes muitas novidades surgiram, pois outros pesquisadores e engenheiros, como Javan, Bennett e Herriot apresentaram o *laser* de He-Ne (Hélio-Neônio), Johnson desenvolveu o *laser* de Nd:YAG (granada de ítrio e alumínio dopado com neodímio) e, em 1964, Patel e colaboradores apresentaram o *laser* de CO₂ (dióxido de carbono) (PÉCORA, 1999).

Hoje, os *lasers* já são parte do cotidiano, eles estão nos aparelhos de CD musicais e nos leitores de DVD do computador, nas impressoras, na comunicação por fibra óptica, nos consultórios dos oftalmologistas e até nas mãos dos conferencistas, servindo de apontadores.

CAPÍTULO 2: FUNDAMENTOS DO LASER

Atualmente a grande aplicabilidade da óptica deve-se, bastante, à existência do *laser*. Funcionando como fonte de luz de características únicas, o *laser* possui propriedades especiais que o tornam um excelente instrumento de uso científico e tecnológico. Neste capítulo comentaremos sobre seu funcionamento através dos tipos de *laser* e discutiremos as propriedades que o definem.

2.1 PROPRIEDADES

A radiação *laser* é caracterizada por algumas propriedades exclusivas, dentre as quais citamos a sua monocromaticidade, coerência, direcionalidade (a luz é altamente colimada) e focalização. A estas propriedades pode-se adicionar ainda uma quinta, muito importante, a qual se refere à capacidade de produção de pulsos ultra curtos de luz. Nas seções a seguir detalhamos tais características.

2.1.1 MONOCROMATICIDADE

A mais marcante das propriedades do *laser* está no fato dele emitir luz praticamente numa só frequência, com comprimento de onda na região do visível, com precisão muitas vezes maior, tão grande quanto cerca de uma parte em 10^{15} (SVELTO, 2010). Verificando o espectro do *laser*, veremos apenas uma linha, ou seja, ela representa praticamente apenas um comprimento de onda; enquanto uma fonte de luz branca, como uma lâmpada fluorescente, é formada por vários comprimentos de onda. O esquema da Figura 10 apresenta os dois espectros. A monocromaticidade da luz *laser* é importante em espectroscopia e em outras áreas de pesquisa que requerem luz emitida com uma energia específica.



Figura 10 - (a) Espectro de emissão da luz branca e (b) espectro de emissão do *laser* de Hélio-Neônio no comprimento de onda $\lambda = 633 \text{ nm}$, correspondendo à frequência do vermelho.

2.1.2 COERÊNCIA

Chamamos de coerência o comportamento exibido por ondas que se propagam na mesma frequência e em fase (CHO, 2013). É o caso da luz *laser*, cuja radiação é espacialmente coerente (ondas sucessivas que estão em fase) e temporalmente coerente (trens de onda se propagando todos na mesma direção e no mesmo comprimento de onda) (BAGNATO, 2011). Os trens de onda da luz de um *laser* podem se propagar por centenas de quilômetros de comprimento coerentemente, isto significa que podemos obter franjas de interferências pela combinação de dois feixes separados cujas diferenças de percurso óptico sejam dessa ordem de grandeza. Fazendo uma comparação com as lâmpadas de filamento de tungstênio ou de um tubo de descarga a gás, estas possuem o comprimento de coerência tipicamente inferior a um metro.

Para visualizarmos melhor esta propriedade imaginemos duas rolhas de cortiça flutuando para cima e para baixo num lago com ondas. Suponha que a fonte destas ondas na água seja uma única pedra jogada no lago inicialmente sem ondas. Deste modo iríamos encontrar uma perfeita correlação entre os movimentos das duas rolhas – elas podem não estar exatamente em fase (isto é, uma pode estar no topo da onda enquanto a outra se encontra no vale da mesma), mas a fase relativa entre as posições das duas rolhas iria permanecer constante no tempo. Neste caso nós dizemos que a fonte (a pedra) produz ondas coerentes (Figura 11).

Podemos dizer, ainda, que coerência espacial é a medida da correlação da fase da onda luminosa em diferentes pontos na direção transversal à direção de propagação – ela nos diz quão uniforme é a fase da frente de onda; e coerência temporal é a medida da correlação da fase da onda luminosa em diferentes pontos ao longo da direção de propagação – ela nos diz quão monocromática é a fonte (NEVES, 2005).

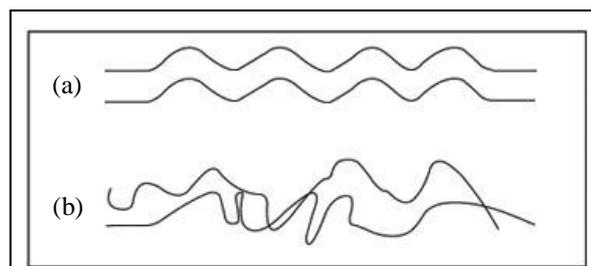


Figura 11 – Característica de coerência da luz *laser* (a) e comportamento de ondas incoerentes no tempo e espaço (b). (NEVES et al, 2005)

2.1.3 DIRECIONALIDADE OU POLARIZAÇÃO

Esta propriedade é uma consequência direta do fato de que o meio ativo é colocado em uma cavidade ressonante plano-paralela, conforme a Figura 12, mantendo-se assim um alto grau de paralelismo (afastando - se do paralelismo perfeito somente o *laser* sob efeitos da difração e/ou refração). Acrescenta-se a esta propriedade a capacidade de manter o feixe colimado, consentindo que ele divirja pouquíssimo a grandes distâncias. Essa característica é extremamente importante para uma série de aplicações em comunicação, na indústria, na eletrônica, etc.

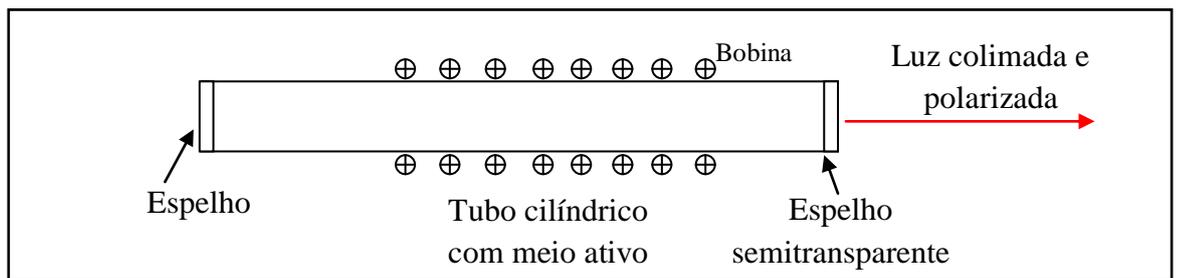


Figura 12 – Esquema da luz polarizada (SVELTO, 2010).

2.1.4 ALTA INTENSIDADE

Definimos intensidade de uma dada fonte de ondas eletromagnéticas como a potência emitida por unidade de área. Esta característica é evidente a um feixe *laser*, por ele apresentar potências que podem ser extremamente elevadas (ao contrário das fontes de luz convencionais) e estarem relacionadas ao paralelismo do feixe. Densidades de fluxo de energia da ordem de 10^{16} W/cm^2 podem ser obtidas facilmente com a luz de um *laser*. Para se ter uma referência, uma chama de maçarico de oxiacetileno tem uma densidade de fluxo de energia de aproximadamente 10^3 W/cm^2 (HALLIDAY, 2009).

Essas altas intensidades ocorrem em *lasers* pulsados, onde toda a energia acumulada ao longo do tempo é emitida em um intervalo de tempo muito curto. (o comportamento deste tipo de *laser* será visto adiante).

2.1.5 PULSOS ULTRA CURTOS

Curta duração! Bom, esta expressão nos exprime algo que representa pouca durabilidade, e esta propriedade se refere à produção de pulsos luminosos muito curtos, ou seja, liberação do *laser* propriamente dito em frações de tempo muito pequenas.

Como descrito por (SVELTO, 2010) é possível, por meio de uma técnica especial chamada modo de bloqueio, produzir pulsos de luz nos *lasers* a gás com duração de 1 *ns* (1 nanossegundo = 10^{-9} s). Essas durações de pulso não são consideradas particularmente curtas e, de fato, até mesmo alguns *flashlamps* podem emitir pulsos de luz com uma duração inferior a 1 *ns*. Por outro lado, alguns *lasers* de estado sólido chegam a gerar pulsos curtos da ordem de 10 *fs* (1 fentossegundo = 10^{-15} s), o que abre novas possibilidades para a pesquisa e as aplicações do *laser*.

Notamos que pulsos curtos implicam a concentração de energia no tempo, analogamente à monocromaticidade, que implica teores de energia em comprimento de onda específico. Como exemplo de um *laser* de pulsos ultra curtos temos o de vidro de neodímio (*laser* de estado sólido), cuja intensidade pode ser excepcionalmente elevada, podendo ultrapassar a ordem de quilojoule, com durações de pulso de uma centena de picossegundos (UNISANTA).

Pulsos *laser* com duração de até 4,5 *fs*, no comprimento de onda de 800 *nm* (região do infravermelho próximo no espectro) podem ser gerados hoje em dia, como acontece com o laser de titânio–safira (WALL and SANCHEZ, 1990) muito usado na indústria para corte de material à base de aço.

2.2 TIPOS DE LASER

Os *lasers* desenvolvidos até hoje exibem uma ampla variedade de parâmetros físicos e operacionais. Para poder emitir luz coerente, característica comentada anteriormente, o *laser* deve dispor de um meio amplificador e de espelhos de realimentação produzindo, assim, feixes contínuos ou uma série de pulsos curtos, os quais podem ser comparados com base em sua potência média. Diferentes aplicações precisam de *lasers* com potências de saída distintas. A Tabela 1 apresenta uma comparação entre os tipos de *laser* dependendo de seus parâmetros como meio amplificador, sua potência de pico, a duração de pulso, o comprimento de onda de emissão e exemplos de aplicação (CATORZE, 2009).

Meio amplificador	Potência de pico	Largura dos pulsos	Comprimento de onda	Usos
Gás				
He-Ne	1 <i>mW</i>	Onda contínua	633 <i>nm</i>	Leitoras de códigos de barras
Argônio	10 <i>W</i>	Onda contínua	488 <i>nm</i>	Espectáculos artísticos, medicina.
CO ₂	200 <i>W</i>	Onda contínua	10,6 μm	Corte e soldagem
Semicondutor				
GaAs	5 <i>mW</i>	Onda contínua	840 <i>nm</i>	CD players
AlGaAs	50 <i>mW</i>	Modulada	760 <i>nm</i>	Impressoras laser
GaLnAsP	20 <i>mW</i>	Modulada	1,3 μm	Comunicações por fibra óptica
Estado Sólido				
Rubi	100 <i>MW</i>	10 ns	694 <i>nm</i>	Holografia
Nd:YAG	50 <i>MW</i>	20 ns	1,06 μm	Medicina
Nd:YAG	2 <i>kW</i>	60 ps	1,06 μm	Pesquisa básica
Nd:vidro	100 <i>TW</i>	11 ps	1,06 μm	Fusão a laser
Corante				
Corante aromático	100 <i>mW</i>	Onda contínua	Sintonizável	Espectroscopia
Rh6G (rodamina 6G)	10 <i>kW</i>	10 fs	600 <i>nm</i>	Pesquisa básica
Molécula				
HF	50 <i>MW</i>	50 ns	3 μm	Armamentos
Excímero				
ArF (fluoreto de argônio)	10 <i>MW</i>	20 ns	193 <i>nm</i>	Processamento de materiais
XeCl (cloreto de xenônio)	50 <i>kW</i>	10 ns	375 <i>nm</i>	Medicina

Tabela 1: Comparação entre diferentes tipos de *laser* de acordo com seus parâmetros físicos e operacionais (PUC-Rio, Laser e IPL na medicina). O *laser* sintonizável (de corante aromático) permite que o usuário selecione o comprimento de onda de emissão. O *laser* de excímero faz uso de gases raros no meio ativo.

Pela Tabela 1 podemos observar que existem *lasers* com baixíssima potência, sendo possível até colocar a mão no caminho do feixe luminoso sem sentir elevação significativa da temperatura, como o laser de He-Ne, que emite um feixe contínuo, na região do vermelho ou verde, e com potência de pico de 1 *mW*. Porém há feixes *laser* capazes de furar chapas de aço em menos de um segundo, como o de neodímio YAG (Nd : YAG – granada de ítrio e alumínio dopado com neodímio), um *laser* de estado sólido que emite pulsos da ordem de picossegundos ($1 \text{ ps} = 10^{-12} \text{ s}$), na região do infravermelho, cuja potência de pico chega a 2 *kW*. Um critério básico de classificação dos *lasers* está associado ao tipo de feixe emitido por eles, isto é, se o *laser* é de emissão contínua (*laser* contínuo) ou pulsada (*laser* pulsado). Vejamos estes aspectos em maior detalhe.

2.2.1 LASER PULSADO DE ESTADO SÓLIDO

A diferença entre um *laser* pulsado e outro contínuo é semelhante à que existe entre uma bomba atômica e um reator nuclear: o primeiro fornece certa quantidade de energia em um tempo curtíssimo, com uma potência extremamente alta. O segundo vai emitindo sua energia aos poucos, com uma intensidade muito menor.

Dentre os diversos tipos de *laser* representados na Tabela 1, os mesmos se distinguem segundo o material ativo empregado (meio amplificador) e o tipo de excitação utilizada para desencadear o fenômeno. Os *lasers* pulsados são de construção relativamente simples. Dos modelos que existem, os de estado sólido são os mais comuns como, por exemplo, o *laser* de rubi, que utiliza um cristal de rubi em forma de bastonete cilíndrico como meio ativo e uma lâmpada de *flash* como fonte de excitação (SANTARELLI, 2011).

O *laser* de estado sólido é instrumento de grande utilidade em muitas experiências e aplicações técnicas. Sua aplicabilidade se deve à duração de sua emissão luminosa ser muito breve, com duração de pulsos da ordem de pico, nano ou fentossegundos.

Quando comparado a outros tipos de *lasers*, o de estado sólido apresenta estrutura bastante simples. O núcleo vital do aparelho é formado por um bastonete cilíndrico de material especial acoplado a um meio hospedeiro e uma lâmpada de *flash*. O bastonete é de monocristal ou vidro, onde estão inclusos os íons ativos. O material hóspede tem somente função passiva, de suporte (SANTARELLI, 2011).

O bastonete deve ser transparente à radiação excitadora, às radiações *laser* e, além disso, precisa ter grande capacidade de acolher os íons ativos. O primeiro material que correspondeu a essas exigências foi o rubi, ainda hoje muito empregado na fabricação de *laser*. Trata-se de um rubi artificial, cujo suporte é o óxido de alumínio (Al_2O_3) cristalino, e o íon ativo é o cromo. Os rubis assim obtidos têm coloração menos intensa que os naturais, pois apresentam grande quantidade de impurezas.

Vejam o esquema do *laser* de rubi na Figura 13. Neste esquema, a lâmpada de *flash* é que produz a radiação que vai excitar os níveis metaestáveis dos átomos de cromo. O conjunto rubi-lâmpada fica encerrado em uma cavidade perfeitamente espelhada para se evitar perdas de radiação. Depois de estimulados, os átomos de cromo decaem espontaneamente e produzem intensa emissão de radiação luminosa. Como o rubi tem a forma de bastonete, a radiação sai por uma das extremidades, em um feixe paralelo.

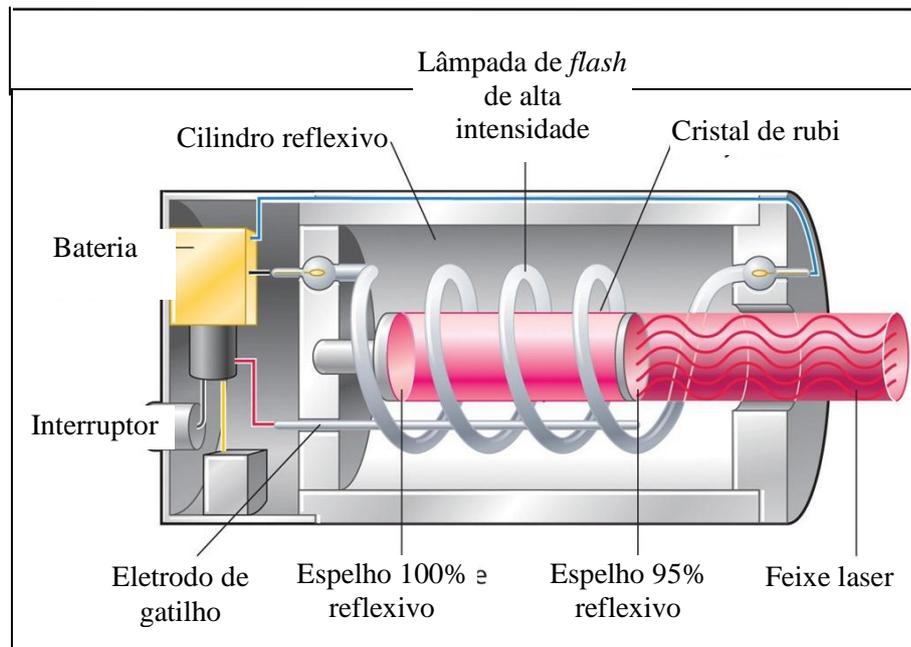


Figura 13 – Esquema de um *laser* de rubi. (LEKULE, 2015)

A construção de um aparelho desse tipo não oferece grandes problemas. O maior cuidado é com o rubi. Ele deve ser dotado de excelentes qualidades ópticas, trabalhado de modo perfeito, com margens de tolerância muito restritas. Por sua vez, a lâmpada de *flash* deve permitir emissão rápida da radiação luminosa, em tempo da ordem de microssegundos (ORTEGA, 2011).

Mas o rubi não é o único material empregado na construção de *lasers* de estado sólido. Há os que utilizam como elementos ativos as terras raras. Dentre eles, o *laser* de neodímio é o mais comum.

A colocação em funcionamento do primeiro *laser*, em 1960, não excitou somente a imaginação dos escritores e produtores de filmes de ficção científica. Entre os próprios cientistas, houve quem aventasse a possibilidade de armas como o "raio da morte", um feixe luminoso capaz de destruir aparelhos e matar pessoas a grandes distâncias instantaneamente (ZOLNERKEVIC , 2010). Hoje os *lasers* mais potentes são capazes de perfurar chapas de metal relativamente espessas. Os *lasers* pulsados têm usos específicos, comparados aos de emissão contínua, devido às diferentes características dos feixes emitidos.

Devido à largura dos pulsos emitidos pelo *laser* pulsado, podemos observar modelos capazes de descarregar uma energia de 100 J em 1 milionésimo de segundo (MAXIMO, 2015), o que nos leva a uma das mais espetaculares aplicações do *laser*, que é sua utilização para perfurar materiais de alto ponto de fusão. Mesmo os elementos que se fundem a

temperaturas muito elevadas, como o tântalo (fusão em torno de $3.017^{\circ} C$), são vaporizados pelo feixe concentrado.

Durante o tempo de emissão, sua potência instantânea equivale a $10^5 kW$. O feixe pode ser concentrado por meio de lentes em um círculo de $1 \mu m$ de diâmetro, dando neste ponto uma iluminação 10 milhões de vezes mais potente do que a proveniente da superfície do sol (UNISANTA).

2.2.2 LASER CONTÍNUO A GÁS

Conforme dito anteriormente o *laser* de emissão contínua apresenta uma baixa potência de saída. Entretanto são de construção mais complexa do que os *lasers* pulsados. O *laser* contínuo mais comum usa um gás, ou uma mistura de gases, como meio ativo. Como exemplos temos o *laser* de argônio (Ar), que emite na região do ultravioleta, e o laser de hélio-neônio (He-Ne), que emite na região do vermelho ou verde (SOUZA, 1996). O modo como se dá a emissão de um feixe num laser contínuo é visto na Figura 14.

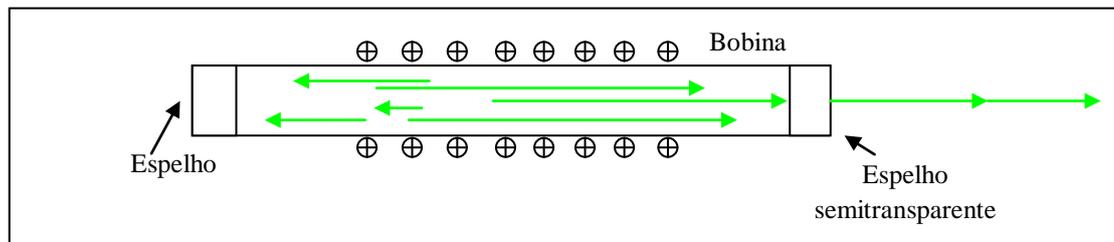


Figura 14 – Esquema de um *laser* de emissão contínua utilizando-se espelhos planos. Através de uma bobina que engloba o tubo contendo o gás (meio ativo), uma descarga elétrica é lançada sobre o mesmo.

Neste tipo de *laser*, a luz é constantemente refletida para um lado e para o outro, dentro de um tubo que contém o gás. A cada passagem do feixe nos espelhos, há um aumento muito pequeno de sua intensidade e se, no interior do tubo, há algo que absorva mais do que 1% da luz em cada passagem, a emissão se amortece, ao invés de se manter numa certa intensidade ou aumentar (SOUZA, 1996). Cada fóton sofre aproximadamente cem reflexões antes de aparecer outro; assim, é preciso eliminar ao máximo os obstáculos capazes de absorvê-lo para que o feixe seja mantido em oscilação, e ainda se possa extrair um parte para ser utilizada. Devido a isso, surgem muitos problemas técnicos na construção dos modelos de *laser* de emissão contínua.

No lado que contém o espelho semitransparente, há passagem de uma pequena fração da luz; assim, a intensidade da radiação no interior do tubo vai aumentando, até que é

alcançado, em uma fração minúscula de segundo, um equilíbrio entre excitação e o disparo dos átomos de neônio (no caso de *laser* a gás de He-Ne). Surge, então, uma emissão contínua, uma parte da qual passa para fora pelo espelho semitransparente e pode ser utilizada (SOUZA, 1996).

Para que o feixe permaneça no interior no tubo, é necessário que os espelhos sejam perfeitamente planos, e estritamente paralelos. Qualquer irregularidade, mesmo um desvio de alguns milésimos de milímetro, pode impedir o funcionamento do *laser*. Por isso sua construção é muito complexa. Os ajustes mecânicos devem ser também muito precisos, e muitas vezes é necessário regular a temperatura do instrumento, de modo a evitar que algumas partes se dilatem mais do que as outras.

Os *lasers* de emissão contínua podem operar usando, além dos sistemas ópticos de espelhos planos, um sistema óptico de espelhos confocais, que elimina muitas das dificuldades inerentes à construção dos *lasers* de espelhos planos (BAGNATO, 2001). A precisão exigida nesses modelos é dez vezes menor do que no outro tipo. Este modelo está representado na Figura 15.

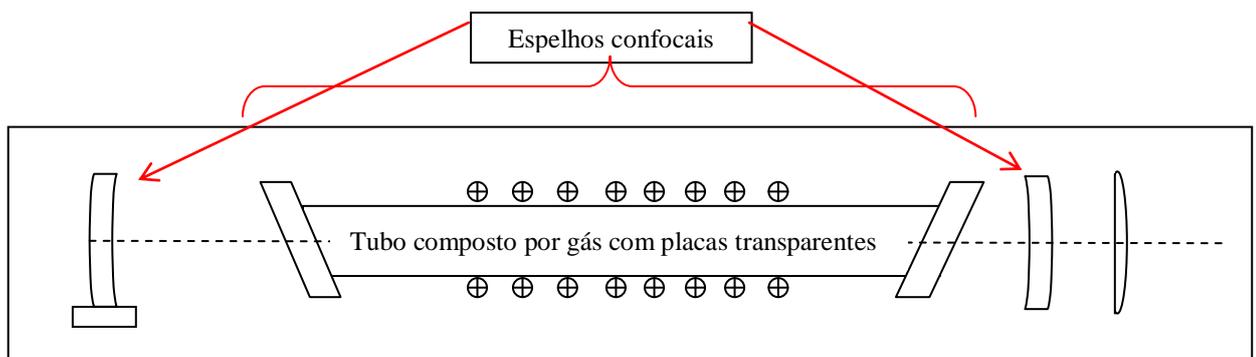


Figura 15 – Esquema de um *laser* de emissão contínua usando um sistema óptico composto por espelhos confocais.

Uma das dificuldades de situar os espelhos externamente é que se torna necessário dotar as extremidades do tubo de duas placas transparentes. Em vidros comuns há uma perda da intensidade luminosa da ordem de 2 a 5% ao se atravessar a interface gás/vidro, o que impede a ocorrência do fenômeno *laser*, pois haveria perdas superiores da amplificação produzida em cada passagem do feixe pelo tubo (NEWMAN, (2014)). Daí houve a necessidade de se desenvolver um novo tipo de sistema, com uma transparência muito superior, o qual consiste em duas lâminas oblíquas posicionadas nas extremidades do tubo e constituídas por um vidro fino e muito transparente; estas lâminas são inclinadas num ângulo em particular, o qual se define como ângulo de Brewster (HALLIDAY, 2009). Isto

proporciona que uma parte da luz polarizada na direção do plano da página seja transmitida para o exterior, enquanto outra parte, polarizada perpendicularmente, reflita totalmente dentro do tubo.

Logo após algumas idas e vindas pelo tubo, a luz estará totalmente polarizada no plano desejado e atravessará as janelas de Brewster sem novas perdas, a não ser as da própria absorção do vidro (muito pequena). Nesses aparelhos não são utilizados espelhos planos, e sim espelhos côncavos esféricos de centros coincidentes.

Os instrumentos *laser* de emissão contínua exigem a utilização de superfícies espelhadas de grande poder refletor. Os espelhamentos metálicos comuns não proporcionam esse elevado grau de reflexão. Assim houve o desenvolvimento de sistemas que provocam a reflexão por um fenômeno de interferência (NEWMAN, (2014)). Obtém-se, com estes sistemas, uma reflexão generosa de mais de 99,6% da luz.

As mais conhecidas aplicações do laser de emissão contínua - que emite luz durante todo o tempo em que está ligado - são as provenientes de seu comportamento associado à produção de um feixe cilíndrico. Tendo um espalhamento muito pequeno, a luz desses *lasers* pode ser transmitida a grandes distâncias, fazendo com que um de seus possíveis empregos seja na área das telecomunicações (ORENSTEIN, 2005): a estação emissora enviará um feixe *laser* dotado de certa variação da intensidade luminosa ou de outra característica; variações estas que, decodificadas numa estação receptora localizada a uma grande distância, torna possível a transmissão da mensagem. Pode-se utilizar esse tipo de *laser* também como auxílio para dirigir aparelhos, através da construção de dispositivos que façam com que uma máquina sempre se mova seguindo a direção da luz, o que permite se obter trajetórias extremamente retilíneas (GUERARDI, 2014). Outra aplicação é na fabricação de bisturis a *laser*, capazes de cortar e cauterizar tecidos em operações cirúrgicas (PUC-Rio, Laser e IPL na medicina).

CAPÍTULO 3: A DIFRAÇÃO E UMA APLICAÇÃO PARA SALA DE AULA COM LASER

Neste capítulo discutiremos uma aplicação didática do *laser* a gás em sala de aula através de um experimento simples envolvendo o conceito de difração.

3.1 O FENÔMENO DA DIFRAÇÃO

Difração é um fenômeno que ocorre quando uma onda encontra um obstáculo ou um orifício de dimensões da ordem de grandeza do comprimento de onda do feixe luminoso que incide sobre o mesmo. Tal fenômeno comprova, assim, as características da teoria ondulatória, que estuda a natureza ondulatória da luz (NUSSENZVEIG, 1998).

Observamos uma frente de onda incidindo sobre um obstáculo, na Figura 16 (a), e outra semelhante incidindo sobre uma fenda, na Figura 16 (b).

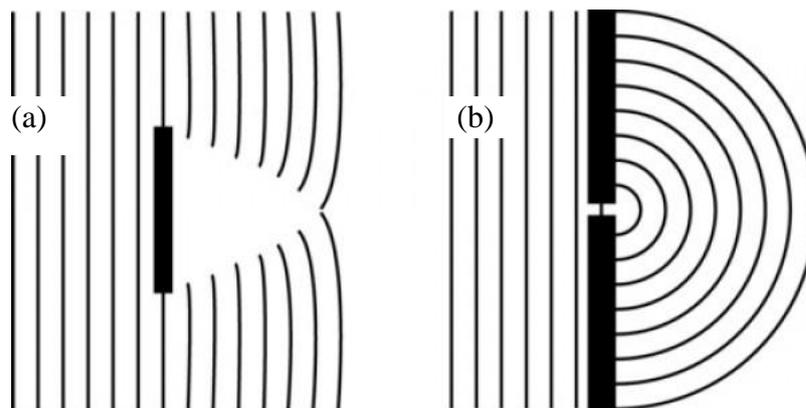


Figura 16 - Frentes de onda encontrando obstáculo (a) e uma fenda na parede (b). (JANUS, 2006)

Na Figura 16 (a), a frente de onda choca-se com um obstáculo que possui dimensões da ordem de grandeza do comprimento da onda, passando lateralmente ao obstáculo e contornando o mesmo. Na Figura 16 (b) a onda passa pelo orifício, que também apresenta dimensões da ordem de grandeza do comprimento da onda, e as frentes de onda se espalham no ambiente secundário, produzindo um efeito semelhante ao surgimento de uma nova fonte de ondas. Em ambos os exemplos, podemos afirmar que as frentes de onda secundárias, formadas após o obstáculo e o orifício, representam menor energia que a onda original.

Podemos associar também a propagação do som em um ambiente a um fenômeno de difração. O som, como uma onda cujo comprimento é da ordem de grandeza de metros, contorna os obstáculos domésticos, por exemplo, até alcançar nossos ouvidos; porém, ao longo de sua trajetória, sua intensidade diminui, fato relacionado à difração sofrida pelas ondas sonoras ao encontrar obstáculos à sua propagação (TIPLER, 2009).

E para uma onda eletromagnética, como a luz visível, será que os efeitos são os mesmos? Claro que sim, visto que a característica ondulatória da luz com peculiaridades inerentes às qualidades de uma onda eletromagnética é constatada no fenômeno da difração.

Vejamos, por exemplo, quando uma luz monocromática de uma fonte distante (fonte *laser*, por exemplo) passa por uma fenda estreita e é interceptada por um anteparo, exibindo uma figura de interferência denominada figura de difração (Figura 17).

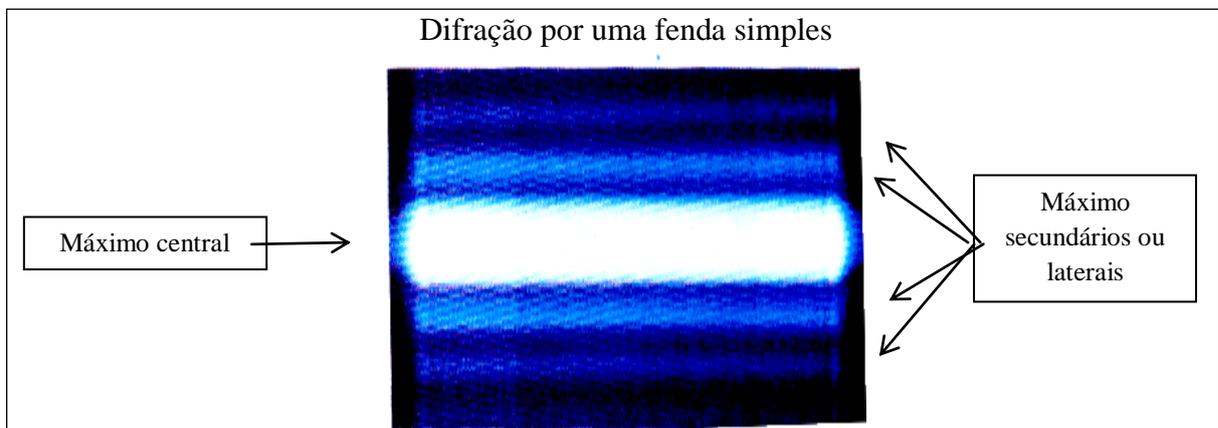


Figura 17 - Figura de difração que aparece sobre um anteparo atingido por uma luz que anteriormente passa por uma fenda estreita. O processo de difração provoca o espalhamento da luz, perpendicularmente à dimensão da fenda. Este processo produz uma figura de interferência formada por um máximo central largo (interferência construtiva) e máximos secundários (ou laterais) menos intensos e mais estreitos; e mínimos (interferências destrutivas). (ALHANATI, 2016)

Já havia sido observado por Francesco Maria Garibaldi, em um livro publicado postumamente em 1665 que, quando o orifício é muito pequeno, como um buraquinho de alfinete, e a distância ao anteparo de observação é suficientemente grande, verifica-se que a luz penetra na região de sombra geométrica, com o aparecimento de franjas claras e escuras na vizinhança do limite da sombra (NUSSENZVEIG, 1998).

Podemos ver a difração da luz, por exemplo, olhando para uma fonte luminosa distante, tal como um anúncio de néon através da fenda formada entre dois dedos, ou observando a luz que escoo pelo tecido de um guarda-chuva (GOVÊA, 2004). Em geral os efeitos de difração são muito pequenos, devendo ser analisados e investigados

minuciosamente. Em Física Clássica, o fenômeno da difração é descrito como uma aparente flexão das ondas em volta de pequenos obstáculos e também como o espalhamento, ou alargamento, das ondas após atravessar orifícios ou fendas; isso para todos os tipos de onda incluindo ondas na água e as eletromagnéticas (como luz visível, raios-X e ondas de rádio). Podemos observar que, quanto maior o comprimento de onda do feixe incidente em relação às dimensões da abertura ou obstáculo, mais fortes devem ser os efeitos de difração.

3.2 MEDINDO O DIÂMETRO DE UM FIO DE CABELO

Através da difração e da interferência de ondas luminosas, e com a utilização de equações que descrevem os padrões de luz difratada por alguns tipos de obstáculos, pudemos quantificar alguns parâmetros das partes envolvidas no fenômeno através da realização de experimentos simples que, em sala de aula, podem se mostrar ótimos exemplos de aplicação da utilidade do *laser* e da difração.

Neste Trabalho de Conclusão de Curso mostramos como é possível medir o diâmetro de um fio de cabelo usando um *laser* a gás de He-Ne.

As equações associadas aos experimentos são as devido à difração de uma fenda simples, fundamentada no *princípio de Babinet*, que diz: anteparos complementares fornecem o mesmo padrão de difração (CATELLI, 2002).

Para chegarmos a esta comprovação foram realizados dois experimentos, denominados experimento I e experimento II, divididos em duas etapas cada um. Foram realizados no laboratório IV, pertencente ao Departamento de Física da Universidade Estadual da Paraíba (UEPB), em Campina Grande-PB.

3.2.1 EXPERIMENTO I

O objetivo deste experimento foi realizar a calibração com a intenção de posteriormente realizar o experimento II, bem como verificar a eficácia da teoria da difração calculando-se experimentalmente o diâmetro da grade de difração e comparando o resultado com o valor do fabricante (tal valor era de nosso conhecimento).

Dividimos este experimento em duas etapas. Na primeira, foi utilizado um *laser* contínuo, operando na região do verde, conforme descrito com o material abaixo:

- um aparelho *laser* de He-Ne, operando no comprimento de onda de $\lambda=532 \text{ nm} \pm 10 \text{ nm}$, com potência $< 1000 \text{ mW}$;

- uma rede de difração com 12 fendas por *mm* e cada fenda com $8,33 \times 10^{-5} \text{ m}$ de diâmetro;
- um suporte para fixação do aparelho *laser*;
- uma régua de 30 *cm*;
- um anteparo branco (uma folha de papel em branco, tamanho A4);
- um lápis preto.

Para a primeira etapa do experimento I (medição do diâmetro da fenda da grade de difração) fixamos o *laser* a um suporte (Figura 18a). A uma certa distância dele, fixamos perpendicularmente a rede de difração (Figura 18b) e, logo em seguida, posicionamos o anteparo no qual colamos uma folha de papel branca (Figura 18c), conforme ilustrado a seguir:

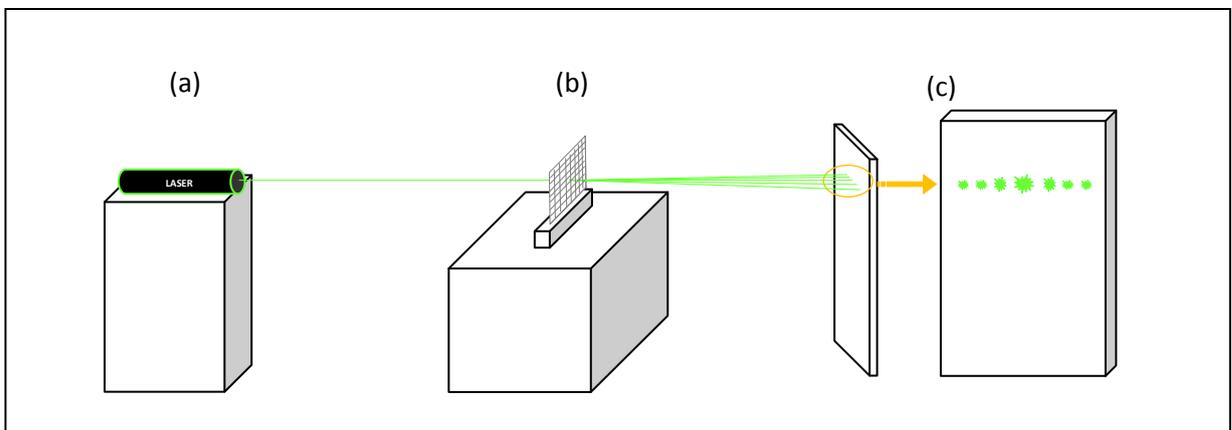


Figura 18 – Esquema da disposição dos objetos na realização da primeira etapa do experimento I: *laser* de He-Ne (a), grade de difração (b) e anteparo (c), no qual a figura de difração foi observada.

A Figura 19 mostra a montagem real do experimento, com o *laser* (ao fundo) incidindo perpendicularmente à rede de difração e a figura de difração propriamente dita (projetada no anteparo).

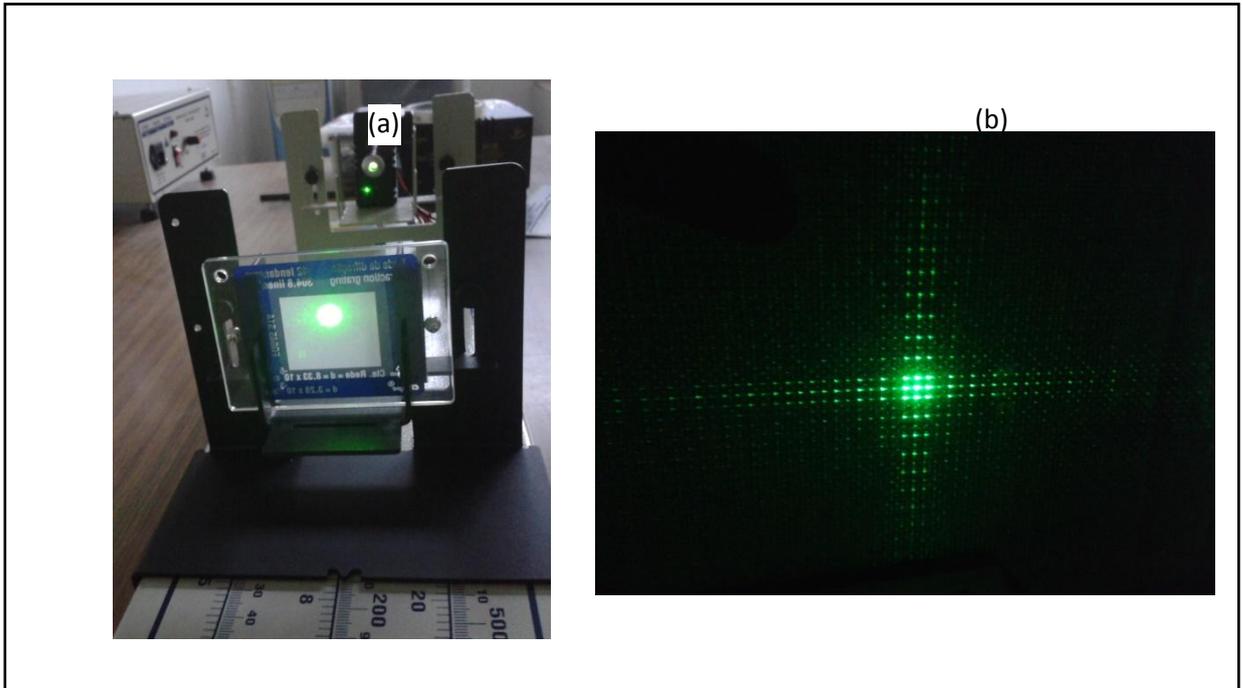


Figura 19 – Feixe luminoso emitido por um *laser* à gás de He-Ne incidindo sobre a grade de difração (a) e a figura de difração resultante projetada no anteparo composto por uma folha de papel branco (b). A projeção possui fundo preto devido à execução do experimento ter se dado em condições de baixa luminosidade.

Ao incidir o *laser* perpendicularmente à grade de difração, observamos a projeção formada sobre o anteparo. São várias sessões iluminadas intercaladamente, fenômeno característico da difração com ondas eletromagnéticas, na qual identificamos a interferência construtiva da luz, onde os raios de luz difratados se somam e aumentam o efeito luminoso; e, nas zonas escuras, foi verificada uma interferência destrutiva, onde os raios de luz se cancelam totalmente, anulando assim qualquer efeito visível. Tal esquema está ilustrado na Figura 20.

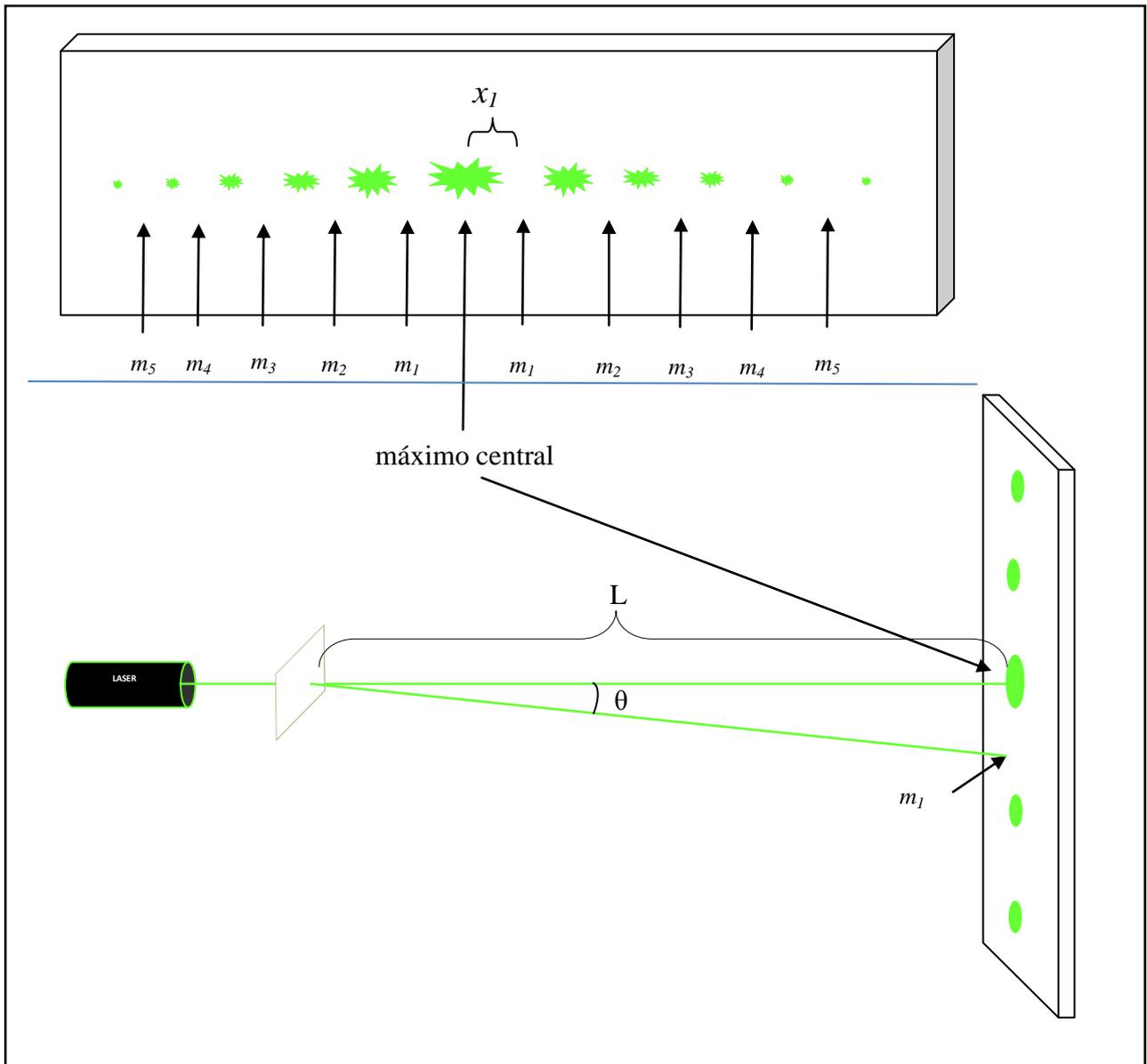


Figura 20 – Esquema da identificação da figura de difração, com as respectivas regiões de interferência construtiva (representadas pelas manchas verdes, sendo a maior delas o máximo central) e destrutiva, representadas pelos mínimos (m_1, m_2, \dots, m_5). A distância entre o centro do máximo central e uma de suas extremidades é representada por x_1 . L corresponde à distância entre o anteparo e a grade de difração.

Analisando a projeção no anteparo, medimos com a régua a distância x_1 , a qual representa a medida do centro do máximo central até uma de suas extremidades, e a distância L , que representa a distância da grade de difração, local em que a luz difrata, até o anteparo.

Utilizando-se das relações trigonométricas, podemos calcular o ângulo θ (ângulo entre os centros do máximo central e do primeiro mínimo, m_1) fazendo o uso dos dados abaixo:

$$\lambda = 532 \text{ nm}$$

$$L = 94,8 \text{ cm}$$

$$x_1 = 0,7 \text{ cm}$$

$m_1 = 1$ (primeiro mínimo, valor referente à ordem dos mínimos)

Calculamos a $\text{tg } \theta$ usando os valores supracitados, obtendo, assim, o valor de θ , temos:

$$\text{tg}\theta = \frac{x_1}{L} \Rightarrow \text{tg}\theta = \frac{0,7}{94,8}$$

$$\text{tg}\theta = 7,383 \cdot 10^{-3}$$

$$\theta = 0,4230^\circ$$

Fazendo uso também da equação que associa o ângulo θ à interferência destrutiva (BORGES, 2009), temos:

$$m\lambda = d \cdot \text{sen}\theta, \quad (1)$$

onde d representa o diâmetro do obstáculo transpassado pela luz, no caso a fenda da grade de difração. Substituindo m por $m_1 = 1$ na Equação (1) obtemos, para d :

$$d = m \frac{\lambda}{\text{sen}\theta} \Rightarrow d = 1 \frac{\lambda}{\text{sen}\theta} \quad (2)$$

Substituindo os valores em na Equação (2) obtemos, para o diâmetro da fenda da rede de difração:

$$d = \frac{532 \times 10^{-9}}{7,3837 \times 10^{-3}} = 7,205 \cdot 10^{-5} \text{ m.}$$

Para o cálculo do erro do resultado encontrado em relação ao valor real do diâmetro da fenda, usamos (LIMA, 2010):

$$\text{err} = \frac{V_{\text{real}} - V_{\text{exp}}}{V_{\text{real}}} \Rightarrow \text{err} = \frac{8,33 \times 10^{-5} - 7,21 \times 10^{-5}}{8,33 \times 10^{-5}}.$$

Logo, o erro é em torno de:

$$err \simeq \pm 13\%,$$

que é aceitável, levando em consideração o limite de precisão da régua.

Na segunda etapa do Experimento I, temos a finalidade de confirmar o resultado obtido para o valor do diâmetro da fenda da grade de difração fazendo uso de um *laser* contínuo operando em um comprimento de onda diferente do anterior. Para tanto, utilizamos o material abaixo:

- um *laser* de He-Ne emitindo no comprimento de onda de $\lambda = 665 \text{ nm} \pm 15 \text{ nm}$ (região do vermelho); e
- os outros materiais anteriormente citados na primeira etapa do experimento I.

Realizando o mesmo experimento com o *laser* operando no vermelho obtemos, para os parâmetros já descritos:

$$\lambda = 665 \text{ nm}$$

$$L = 55,9 \text{ cm}$$

$$x_1 = 0,5 \text{ cm}$$

$$m_1 = 1 \text{ (primeiro mínimo, valor referente à ordem dos mínimos)}$$

Para calcularmos o valor de θ usamos $x_1 = 0,5 \text{ cm}$ e $L = 55,9 \text{ cm}$, obtendo:

$$\text{tg}\theta = \frac{x_1}{L} \quad \Rightarrow \quad \text{tg}\theta = \frac{0,5}{55,9}$$

$$\text{tg}\theta = 8,9445 \times 10^{-3}$$

$$\theta = 0,51247^\circ.$$

Utilizando-se dos valores supracitados na Equação (2), obtemos:

$$d = \frac{665 \times 10^{-9}}{8,9442 \times 10^{-3}} = 7,43 \cdot 10^{-5} \text{ m}.$$

Logo, o diâmetro da fenda da rede de difração é $d = 7,43 \times 10^{-5} \text{ m}$.

Calculando o erro, obtemos:

$$err = \frac{V_{real} - V_{exp}}{V_{real}} \quad \Rightarrow \quad err = \frac{8,33 \times 10^{-5} - 7,43 \times 10^{-5}}{8,33 \times 10^{-5}}$$

Assim, o erro é em torno de:

$$err \simeq \pm 11\%,$$

o que é coerente com o medido usando o *laser* operando em $\lambda = 532 \text{ nm}$.

A Figura 21 mostra a figura de difração projetada no anteparo usando-se o *laser* operando em $\lambda = 665 \text{ nm}$. O Experimento I serviu, portanto, para verificarmos a validade da teoria de difração e como uma calibração para o próximo experimento.

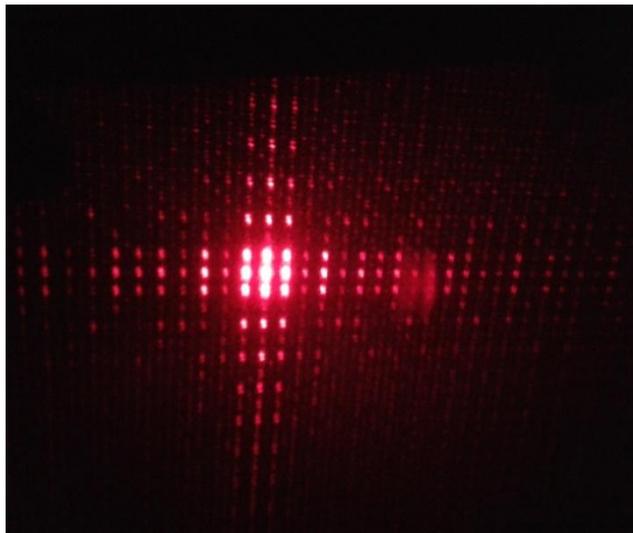


Figura 21 - Figura de difração projetada no anteparo observada durante a segunda etapa do Experimento I, quando do uso do *laser* de He-Ne operando na região do vermelho.

3.2.2 EXPERIMENTO II

O objetivo deste experimento foi medir o diâmetro de um fio de cabelo usando o *laser* a gás de He-Ne operando em $\lambda = 532 \text{ nm}$ e, posteriormente, em $\lambda = 665 \text{ nm}$, a fim de se comparar os resultados. Esta atividade representa uma abordagem didática como proposta para utilização em sala de aula, de uma aplicação do *laser* associado aos conceitos de difração e da complementariedade advinda do *princípio de Babinet*. Para isso, a grade de difração do Experimento I foi substituída por um fio de cabelo (disposto na vertical) acoplado a um suporte (Figura 22).

Assim, obtemos uma figura de difração no anteparo, analogamente àquela apresentada usando-se a grade de difração; e utilizamos o mesmo método para o cálculo do diâmetro do obstáculo, neste caso, um fio de cabelo. A Figura 23 mostra o padrão de difração

formado por um fio de cabelo usado no experimento quando da incidência do feixe de *laser* verde ($\lambda = 532 \text{ nm}$) no mesmo.

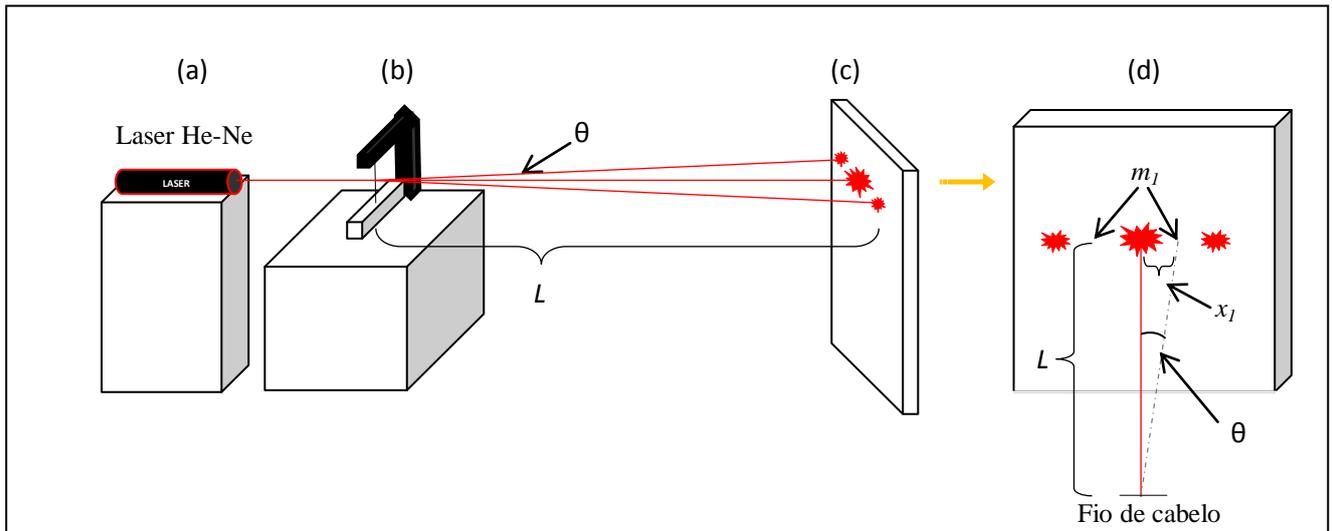
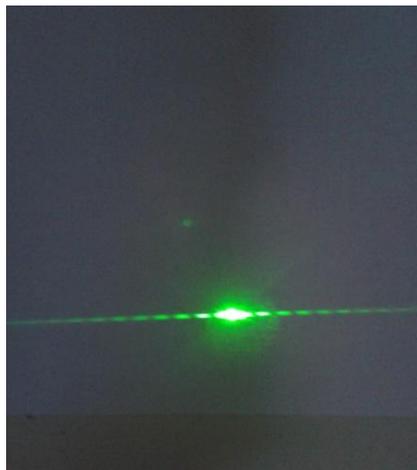


Figura 22 - Disposição dos objetos na realização do Experimento II: *laser* de He-Ne emitindo um feixe luminoso na região do vermelho (a), fio de cabelo disposto na vertical sendo incidido pelo feixe e resultando na difração (b), onde θ representa o ângulo formado entre o máximo central e m_1 (c). L representa a distância entre o obstáculo (fio de cabelo) e o anteparo (d), m_1 é o primeiro mínimo e x_1 , a distância entre o máximo central e m_1 .



3 - Padrão de difração do fio de cabelo em um anteparo, proveniente de um laser incidente (no fio) na região do

Para a primeira etapa do Experimento II, utilizamos um fio de cabelo (amostra A) submetido à incidência do *laser* emitindo na região do verde. Os parâmetros da montagem experimental estão dispostos a seguir, analogamente ao experimento anterior:

$$\lambda = 532 \text{ nm}$$

$$L = 95,7 \text{ cm}$$

$$x_1 = 0,7 \text{ cm}$$

$m_1 = 1$ (primeiro mínimo, valor referente a ordem dos mínimos)

Usando os valores acima citados, calculamos através da $\text{tg } \theta$ o valor do ângulo θ :

$$\text{tg } \theta = \frac{x_1}{L} \quad \Rightarrow \quad \text{tg } \theta = \frac{0,8}{95,7}$$

$$\text{tg } \theta = 8,36 \times 10^{-3}$$

$$\theta = 0,478^\circ.$$

Substituindo-se os valores deste experimento na Equação (2), com $m = m_1 = 1$, obtemos:

$$d = \frac{532 \times 10^{-9}}{8,359 \times 10^{-3}} = 63,6 \cdot 10^{-6} \text{ m.}$$

Dessa forma, para o diâmetro da amostra A (primeiro fio de cabelo utilizado), foi encontrado $d = 63,6 \mu\text{m}$.

Posteriormente, incidimos o feixe de luz do mesmo *laser* num fio de cabelo diferente do anterior (amostra B). Os dados relacionados ao padrão de difração observado seguem abaixo:

$$\lambda = 532 \text{ nm}$$

$$L = 95,4 \text{ cm}$$

$$x_1 = 1,2 \text{ cm}$$

$m_1 = 1$ (primeiro mínimo, valor referente a ordem dos mínimos)

Para o cálculo do ângulo θ , usamos $x_1 = 1,2 \text{ cm}$ e $L = 95,4 \text{ cm}$, obtendo:

$$\text{tg } \theta = \frac{x_1}{L} \quad \Rightarrow \quad \text{tg } \theta = \frac{1,2}{95,4}$$

$$\text{tg } \theta = 12,57 \times 10^{-3}$$

$$\theta = 0,7206^\circ.$$

Para o cálculo do diâmetro da amostra B, substituímos os valores λ e $\text{sen}\theta$ na equação (2), com $m = m_1 = 1$:

$$d = \frac{532 \times 10^{-9}}{12,5 \times 10^{-3}} = 42,6 \cdot 10^{-6} m.$$

Logo, o diâmetro da amostra B (segundo fio de cabelo utilizado) é $d = 42,6 \mu m$.

A segunda etapa do Experimento II consistiu na medida do diâmetro dos dois fios de cabelo anteriores (amostras A e B) usando o *laser* de He-Ne operando na região do vermelho. A Figura 24 mostra a montagem experimental usando a amostra A, cujos parâmetros estão dispostos abaixo:

$$\lambda = 665 \text{ nm}$$

$$L = 50,0 \text{ cm}$$

$$x_1 = 0,55 \text{ cm}$$

$m_1 = 1$ (primeiro mínimo, valor referente a ordem dos mínimos)

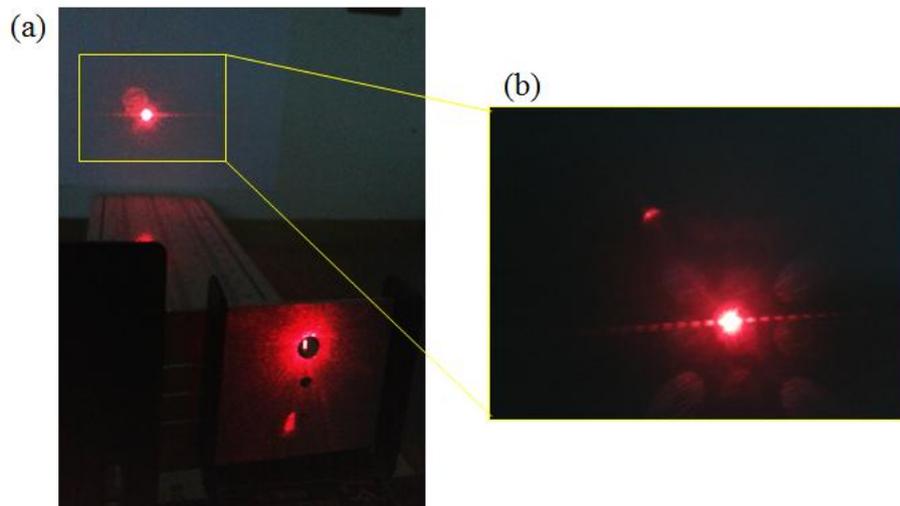


Figura 24 – Montagem Experimental para se medir o diâmetro de um fio de cabelo usando um *laser* de He-Ne operando em 665 nm (a).

Diante do estudado sobre difração, sabendo que o *laser* usado nesta etapa tem um comprimento de onda maior que no verde, podemos afirmar que o fenômeno verificado com este *laser* é observado com maior intensidade do que com o vermelho; isto porque $\lambda_{\text{vermelho}}$ se aproxima mais das medidas do obstáculo (fio de cabelo) do que λ_{verde} .

Analogamente aos cálculos anteriores, usamos os valores coletados neste Experimento para encontrarmos θ :

$$\operatorname{tg}\theta = \frac{x_1}{L} \Rightarrow \operatorname{tg}\theta = \frac{0,55}{50,0}$$

$$\operatorname{tg}\theta = 0,011$$

$$\theta = 0,63^\circ.$$

Usando a Equação (2) novamente, com $m = m_1 = 1$, $L = 50 \text{ cm}$ e $x_1 = 0,55 \text{ cm}$, obtemos:

$$d = \frac{665 \times 10^{-9}}{10,99 \times 10^{-3}} = 60,5 \cdot 10^{-6} \text{ m}$$

Logo, para o diâmetro da amostra A (primeiro fio de cabelo usado), foi encontrado $d = 60,5 \mu\text{m}$ o que é coerente com o valor encontrado anteriormente ($d = 63,4 \mu\text{m}$) usando o *laser* verde.

Para finalizarmos, incidimos o mesmo *laser* vermelho na amostra B (segundo fio de cabelo usado no experimento). Abaixo encontram-se os dados coletados no experimento de difração:

$$\lambda = 665 \text{ nm}$$

$$L = 57,1 \text{ cm}$$

$$x_1 = 0,9 \text{ cm}$$

$m_1=1$ (primeiro mínimo, valor referente a ordem dos mínimos)

Para calcularmos o ângulo θ , usamos os valores $L = 57,1 \text{ cm}$ e $x_1 = 0,9 \text{ cm}$:

$$\operatorname{tg}\theta = \frac{x_1}{L} \Rightarrow \operatorname{tg}\theta = \frac{0,9}{57,1}$$

$$\operatorname{tg}\theta = 0,01576$$

$$\theta = 0,903^\circ.$$

Substituindo os valores λ e θ na Equação (2), com $m = m_1 = 1$, obtemos:

$$d = \frac{665 \times 10^{-9}}{15,76 \times 10^{-8}} = 42,2 \cdot 10^{-6} \text{ m.}$$

Logo, o diâmetro da amostra B, segundo analisado com o *laser* vermelho, é $d = 42,2 \mu\text{m}$, que é coerente com o valor encontrado para o diâmetro desta amostra usando o *laser* verde ($d = 42,6 \mu\text{m}$).

Com a realização do experimento de difração dos fios de cabelo foi possível verificar, através de uma atividade simples, os conceitos de difração e, concomitantemente, exemplificar uma aplicação do *laser*. A técnica utilizada pode ser facilmente reproduzida em sala de aula (substituindo o *laser* usado na montagem experimental por um apontador *laser*), contribuindo para o ensino dos fenômenos ópticos analisados neste Trabalho de Conclusão de Curso.

4 CONCLUSÕES

- Foram analisados os fundamentos do *laser*, como é possível o seu funcionamento e a sua aplicabilidade. Foram discutidas as suas características principais, que o diferenciam da luz comum;
- Comentamos sobre os tipos de *laser*, destacando-se a classificação quanto à sua forma de emissão (contínuo ou pulsado) através do exemplo de um *laser* à gás (*laser* de He-Ne) e de um *laser* de estado sólido (*laser* de Nd :YAG);
- Abordamos o conceito de difração através de dois experimentos simples, usando o *laser* de He-Ne operando em comprimentos de onda distintos (532 nm e 665 nm), para se medir o diâmetro de uma fenda numa grade de difração e o diâmetro de fio de cabelo. Tais atividades podem ser realizadas em sala de aula (com o auxílio de um apontador *laser*), e a técnica usada permite demonstrar matematicamente a difração associada ao princípio de Babinet, e relacioná-la a uma aplicação tecnológica do *laser* (medir a dimensão de um objeto de dimensões bem inferiores a 1 mm).

REFERÊNCIAS

- (ALBA, 2008) D. V. Alba e J. C. Rodríguez, *Fundamentos Del Láser Y Su Aplicación En Urología*, Arch. Esp. Urol., v.61, n.9, Madrid (2008).
- (ALHANATI, 2016) L. S. Alhanti, *Difração*, link <http://www.alfaconnection.pro.br/ondas/interferencia-difracao-e-polarizacao/difracao/>.
- (BAGNATO, 2013) V. S. Bagnato, *Os fundamentos da luz laser*, link: <http://www.sbfisica.org.br/fne/Vol2/Num2/a02.pdf> , São Paulo (2011).
- (BARTZ, 2011) A. B. Bartz, D. I. da Silva, T. W. de Figueredo e C. B. Spohr, *Processo de corte em máquinas laser*, link http://www.fahor.com.br/publicacoes/sief/2011_Processo_corte_maquinas_laser.pdf, (2011).
- (BONATTO, 2012) A. Bonatto, C. R. Barros, R. A. Gemeli, T. B. Lopes, M. D. Frison, *Interdisciplinaridade no Ambiente Escolar*, link <http://www.ucs.br/etc/conferencias/index.php/anpedsul/9anpedsul/paper/viewFile/2414/501>, (2012).
- (BORGES, 2009) P. D. Borges. *Apostila de física*, Santa Maria, (2009).
- (CHO, 2012) S. Cho, M. A. Alonso and T. G. Brown, “*Measurement of spatial coherence through diffraction from a transparent mask with a phase discontinuity*”, Opt. Lett., vol. 37, pp. 2724–2726, (2012).
- (CHO, 2013) S. Cho. *Studies on Partially Coherent Fields and Coherence Measurement Methods*, (2013).
- (CIÊNCIA HOJE, 2015) Ciência hoje, nº 323, Vol 54, (2015), Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência (SBPC), link <http://assinaturadigital.cienciahoje.org.br/revistas/reduzidas/323/files/assets/basic-html/page10.html>.
- (EINSTEIN, 1917) A. Einstein. *On the Quantum Theory of Radiation*, Z. Phys, (1917).
- (GALLAS, 2016) M. R. Gallas, *Coerência*, link <http://www.if.ufrgs.br/~marcia/coerencia.pdf>.
- (GARWIN, 2003) L. Garwin and T. Lincoln, editors: *A Century of Nature: Twenty-One Discoveries that Changed Science and the World*, With a Foreword by Steven Weinberg ©2003, 380 pages, 7 halftones, 23 line drawings; published by the University of Chicago Press, by The University of Chicago, (2003).
- (GOVÊA, 2004) T. S. Govêa. *Obtenção de imagens através da difração da luz por cds*, Unicamp (2004).
- (GERARDI, 2014) M. Gueradi, *Física*, Universidade federal de Juiz de Fora (2014).

(HALLIDAY, 1995) D. Halliday, R. Resnick e J. Walker. *Fundamentos de Física*, vol. 4 (Ótica e Física Moderna), LTC Editora, 4ª. Edição, (1995).

(HEWITT, 2001) P. G. Hewitt, *Conceptual Physics (9th edition)*, Publisher: Addison Wesley; 9th edition July 2, (2001).

(ISOLANI, 1979) P. C. Isolani, *Construção de Laser contínuo da gás carbônico*. Instituto de química da USP, Química nova, (1979).

(JANUS, 2006) S. Janus, *Audio in the 21st Century - Part 5*, link <http://www.embedded.com/design/audio-design/4015764/Audio-in-the-21st-Century--Part-5>, (2006)

(JÚNIOR, 1999) A. B. Junior e J. D. Pécora, *Noções elementares sobre a física dos lasers*, São Paulo, link <http://www.forp.usp.br/restauradora/laser/fisica.html>, (1999).

(KILBANE, 2009) D. Kilbane, *Theodore Maiman: Professional Focus, Personal Warmth*, link <http://electronicdesign.com/analog/theodore-maiman-professional-focus-personal-warmth>, (2009).

(LIMA, 2010) C. R. A. Lima, *Teoria de erros medidas e gráficos*, Edição março de (2010).

(LEKULE, 2015) S. Lekule, *How LASER Beam Welding Works / LASER Beam Welding Process*, link <http://sosteneslekule.blogspot.com.br/2015/12/how-laser-beam-welding-works-laser-beam.html>, (2015)

(LOPES, 2002) L. A. Lopes, *Laserterapia na odontologia*, link http://www.nupen.com.br/Revista_port/resumo.php.

(MAXIMO, 2015) A. Máximo, *Comparação entre a soldagem de chapas finas de tântalo e monel 400 com laser pulsado de Nd:YAG e com laser contínuo de fibra*, Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do Grau de Mestre em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear – Materiais, São Paulo, (2015).

(NEVES, 2005) L. S. Neves, C. M. S. Silva, J. F. C. Henriques, R. H. Cançado, R. P. Henriques e G. Janson, *A utilização do laser em Ortodontia*, R Dental Press Ortodon Ortop Facial, Maringá, v. 10, n. 5, p. 149-156, set./out, (2005).

(NUSSENZVEIG, 1998) H. M. Nussenzveig, *Curso de Física Básica*, vol 4, (1998).

(ORENSTEIN, 2005) D. Orenstein, *Criado laser para telecomunicações mais rápido e mais eficiente*, (2005).

(ORTEGA, 2011) T. A. Ortega, *Laser self-Raman dobrado intracavidade de alta potência CW operante na região amarela do espectro eletromagnético de aplicações oftalmológicas*, São Carlos (2011).

(PÉCORA, 1999) J. D. Pécora, *Breve Histórico do Laser*, copyright 1999 Webmaster J.D. Pécora, D. M. Z. Guerisoli e J. C. Spanó Update 01/sept, (1999).

(SANTARELLI, 2011) M. C. I. A. Santarelli e M. Muramatsu, *Imagens Por Holografia: Construindo Um Holograma Feito À Mão*, São Paulo (2011).

(SOUZA, 1996) M. F. de Souza, *Laser na Medicina – Semóptica*, (1996).

(SVELTO, 2010) O. Svelto, *Principles of Laser*, Fifth edition, Polytechnic Institute of Milan and National Research Council Milan, Italy, Translated from Italian and edited by David C. Hanna, (2010).

(TIPLER, 1994) P. Tipler, *Física*, vol.4, Editora Guanabara Koogan S.A., 3ª. Edição, (1994).

(TIPLER, 2009) P. A. Tipler e G. Mosca, *Física para cientistas e engenheiros*, Vol. 2. (2009).

(WALL e SANCHEZ, 1990) K. F. Wall and A. Sanchez, *Titanium Sapphire Lasers*, Volume 3, Number 3, The Lincoln Laboratory Journal, pág 447, (1990).

(ZOLNERKEVIC, 2010) I. Zolnerkevic, *Da ficção à onipresença*, Unespciência, (2010).