

**PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE GOIÁS**  
**ESCOLA DE CIÊNCIAS EXATAS E DA COMPUTAÇÃO**  
CURSO DE LICENCIATURA PLENA EM FÍSICA  
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO



**ESTUDO DA FÍSICA DO LASER**

**VINÍCIUS DA SILVA CARVALHO**

GOIÂNIA  
NOVEMBRO DE 2020

**Vinícius da Silva Carvalho**

**Estudo da física do laser**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Escola de Ciências Exatas e da Computação, da Pontifícia Universidade Católica de Goiás, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Licenciatura Plena em Física.

Orientador: Prof. Dr. Clóves Gonçalves Rodrigues

Banca examinadora:

Prof. Dr. Francisco Aparecido Pinto Osório

Prof. Dr. Anderson Costa da Silva

GOIÂNIA  
NOVEMBRO DE 2020

VINÍCIUS DA SILVA CARVALHO

**ESTUDO DA FÍSICA DO LASER**

Trabalho de Conclusão de Curso aprovado em sua forma final pela Escola de Ciências Exatas e da Computação, da Pontifícia Universidade Católica de Goiás, para obtenção do título de Licenciatura Plena em Física, em 30/11/2020.

---

Orientador: Clóves Gonçalves Rodrigues

---

Profa. Ma. Ludmilla Reis Pinheiro dos Santos  
Coordenadora de Trabalho de Conclusão de Curso

GOIÂNIA  
NOVEMBRO DE 2020

*Dedicatória:*

*Dedico este trabalho aos meus professores, meus familiares e amigos, meu orientador que esteve comigo, auxiliando e ensinando. E em especial minha Mãe Maria, que nunca deixou de me apoiar e, com certeza, estará comemorando tal conquista.*

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente a DEUS, que me deu força e coragem para vencer todos os obstáculos e dificuldades enfrentadas durante o curso, que me socorreu espiritualmente, dando-me serenidade e forças para continuar.

A todos que direta ou indiretamente colaboraram para materialização deste trabalho a própria universidade PUC Goiás, aos meus companheiros e verdadeiros amigos de classe em especial ao Silfarley Rodrigues e Sandro Junior Rodrigues, contribuindo muito para a minha formatura, pelo que sempre serei muito grato.

## **RESUMO**

Neste trabalho é apresentado um estudo sobre a Física dos lasers. Comenta-se sobre a teoria proposta por Albert Einstein sobre a possibilidade de tais dispositivos. Mostra-se aqui como se dá o funcionamento de dispositivos lasers, relatando-se os tipos de dispositivos utilizados na atualidade e suas várias formas de aplicações.

**Palavras-Chave:** Laser, óptica, níveis de energia.

## **SUMÁRIO**

<b><i>ESTUDO DA FISÍCA DO LASER</i></b> .....	<b>2</b>
<b><i>ESTUDO DA FISÍCA DO LASER</i></b> .....	<b>3</b>
CAPÍTULO 1 .....	12
INTRODUÇÃO .....	12
<b><i>CAPÍTULO 2 – A Física Do Laser</i></b> .....	<b>15</b>
2.1 Propriedades do Laser .....	15
2.2 Inversão de População .....	18
2.3 Tipos de laser.....	19
Fonte: Autor. ....	23
<b><i>CAPITULO 3 – APLICAÇÕES DO LASER NA MEDICINA</i></b> .....	<b>24</b>
3.1. Uso do laser na Medicina .....	24
3.2. Luz Pulsada.....	24
3.2.1. Lazer versus Luz Pulsada .....	25
3.3.2. Laser de alta potência na saúde bucal.....	28
<b><i>4. CONCLUSÃO</i></b> .....	<b>30</b>
<b><i>APÊNDICE – ÓPTICA</i></b> .....	<b>31</b>
A.1 Óptica Geométrica .....	31
A.2 Outros conceitos importantes para a óptica .....	31
A.3 Meios Ópticos .....	32
A.4 Propagação de luz em meios homogêneos.....	32
A.6 Reflexão e Refração .....	35
A.7 Difração e Interferência da Luz.....	38
A.2 Interferência por Fenda Simples .....	39
<b><i>6. BIBLIOGRAFIA</i></b> .....	<b>42</b>

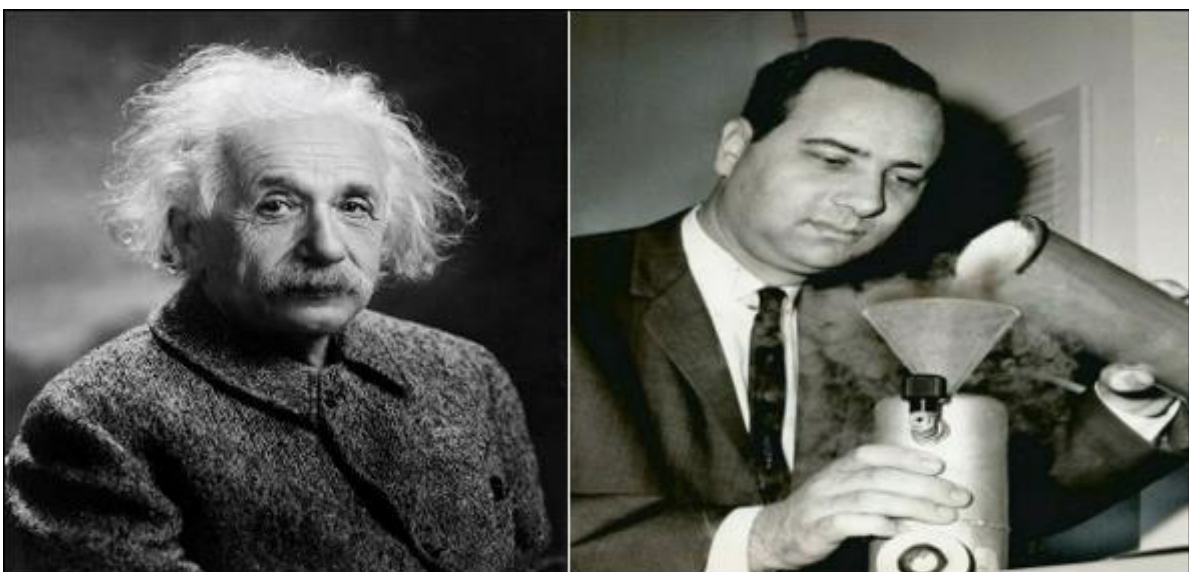
## CAPÍTULO 1

### INTRODUÇÃO

Há aproximadamente 60 anos foi criado o primeiro laser. Lasers emitem radiação eletromagnética coerente, e desde sua invenção, eles assumiram uma tremenda importância nos campos da ciência, engenharia e tecnologia por causa de seu impacto na pesquisa básica, bem como em várias aplicações tecnológicas.

Lasers são onipresentes e podem ser encontrados em bens de consumo, como tocadores de CD, impressoras, scanners para identificação de produtos, em setores como corte de metal, soldagem, perfuração, marcação, em aplicações médicas, em cirurgia e em aplicações científicas como em espectroscopia, interferometria e testes sobre os fundamentos da mecânica quântica. Os avanços científicos e tecnológicos permitiram a extensão dos lasers em escalas de tempo de operação contínua até tão curto quanto cem attossegundos, comprimentos de onda abrangendo quase todo o espectro eletromagnético até a região de raio-X, níveis de energia na região de terawatt e tamanhos que variam de minúsculas dezenas de nanômetros a lasers com comprimento de 270 km.

A origem do laser é discutida. O primeiro maser (microwave amplification by stimulated emission of radiation) ou “maser” foi desenvolvido por Theodore Maiman em 1960, embora tenha sido Einstein, em 1916, quem propiciou o desenvolvimento teórico do laser, com a publicação de seu trabalho “Zur Quantum Theorie der Strahlung”.



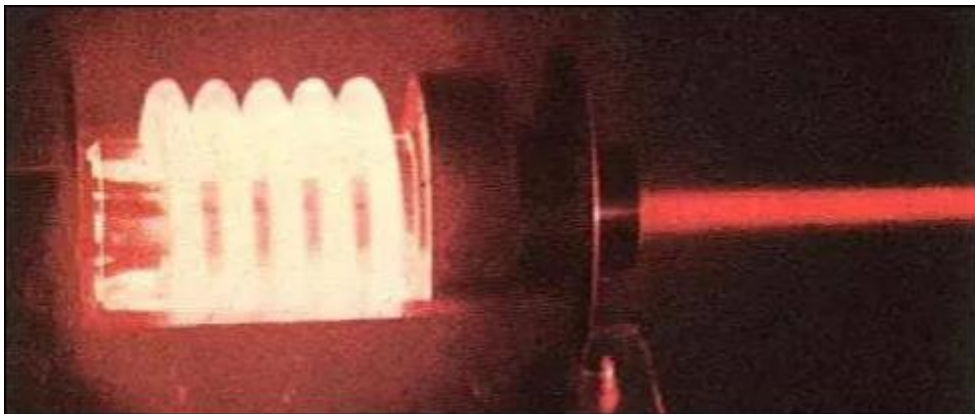
**Figura 1- Albert Einstein e Theodore Maiman**

Fonte: <https://www.clinicaviarengo.com.br/a-historia-do-laser>



A teoria da emissão estimulada proposta por Einstein baseou-se na teoria quântica proposta por Planck em 1900. Esta última discutiu as relações entre as quantidades de energia liberadas por processos atômicos. O trabalho de Einstein, por sua vez, versou sobre a interação de átomos, íons e moléculas com a radiação eletromagnética em termos da absorção e emissão espontânea de radiação. Com a aplicação de princípios termodinâmicos, Einstein concluiu que o terceiro processo de interação, a emissão estimulada, deveria existir, e nela a radiação eletromagnética deveria ser produzida por um processo atômico.

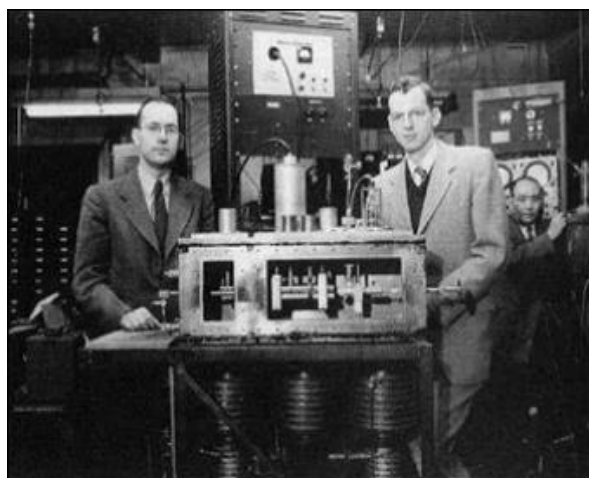
A Figura 2 mostra o primeiro dispositivo emissor de radiação laser criado por Mainam em 1960.



**Figura 2 – Primeiro Dispositivo Laser**

Fonte: <https://www.clinicaviarengo.com.br/a-historia-do-laser>

Contudo, outros autores atribuem ao físico americano Gordon Gold o desenvolvimento desse fantástico sistema de seleção de ondas, que permitiu a obtenção de um feixe de luz altamente concentrado.



**Figura 3 – Charles Townes e Jin Gordon Gold**

Fonte: <https://www.clinicaviarengo.com.br/a-historia-do-laser>

Foram Schawlow e Townes os enunciadores dos princípios segundo os quais todos os lasers operam. Contudo, Townes, Basov e Prokhorov receberam o prêmio Nobel em 1964, de modo que foi creditado a eles o desenvolvimento da teoria da emissão espontânea e estimulada de radiação. Os princípios que regiam a física do laser, antes de 1916, restringiam-se aos princípios de interação da matéria até então conhecidos.

A laserterapia, ou terapia com laser de baixa potência, tem sido amplamente utilizada e está consolidada em artigos científicos, como o de Bensadoun (2006), que salientou os benefícios da laserterapia para mucosites radioinduzidas. As vantagens de sua aplicação estão disponíveis em diversos livros e artigos científicos. Já está bem estabelecido o uso do laser de baixa intensidade como coadjuvante no tratamento da dor, inflamação e edema, tais como nas úlceras aftosas recorrentes, no herpes simples recorrente, em mucosites orais e parestesias.

O laser cirúrgico de alta potência possui muitas vantagens, destacando-se entre elas o controle do sangramento transoperatório, o que favorece a excisão e proporciona uma melhor visualização do campo operatório, e a redução do tempo de procedimento.

Os dispositivos lasers podem nos ajudar na pesquisa e na compreensão do conceito básico de espaço e matéria. A pesquisa e o desenvolvimento continuam inabaláveis no que se refere ao desenvolvimento de lasers com comprimentos de onda mais curtos, pulsos mais curtos, energias mais altas, etc.

Linac Coherent Light Source é o primeiro laser de elétrons livres de raio-X rígido do mundo, localizado no SLAC National Accelerator Laboratory na Califórnia. Recentemente o laser produziu seus primeiros pulsos de laser de raio-X de energia sem precedentes e ultra curta duração com comprimentos de onda menores que o tamanho das moléculas. Tais lasers são esperados para permitir pesquisas de fronteira em estudos sobre processos químicos e para talvez compreender, em última análise, os processos que levam à vida.

## CAPÍTULO 2 – A Física Do Laser

### 2.1 Propriedades do Laser

A história do laser é bastante antiga e se inicia com Einstein que, em 1917, expôs os princípios físicos da emissão estimulada de radiação. Em 1960, Theodore Maiman construiu o primeiro emissor de laser e em 1965, Stern e Sognaes o utilizaram pela primeira vez na Odontologia. Desde então, graças aos avanços tecnológicos, verifica-se a crescente utilização de equipamentos de laser na área Odontológica (CATÃO, 2004).

O termo “laser” é derivado do inglês e é a abreviatura de “Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation”, que traduzido para o português seria “amplificação da luz por emissão estimulada de radiação”. O funcionamento do laser é baseado na emissão estimulada, conceito proposto por Einstein em 1917.

Porém, o laser só foi desenvolvido em 1960 e se configurou como uma radiação eletromagnética visível, cujas principais características são:

- **Monocromática**

A luz do laser apresenta somente um comprimento de onda e, conseqüentemente, uma única cor.

- **Coerente**

Se dois feixes produzidos por um mesmo laser forem separados e, em seguida, recombinados, mesmo após percorrerem longas distâncias, ainda haverá uma relação constante entre as fases dos dois feixes.

- **Direcional**

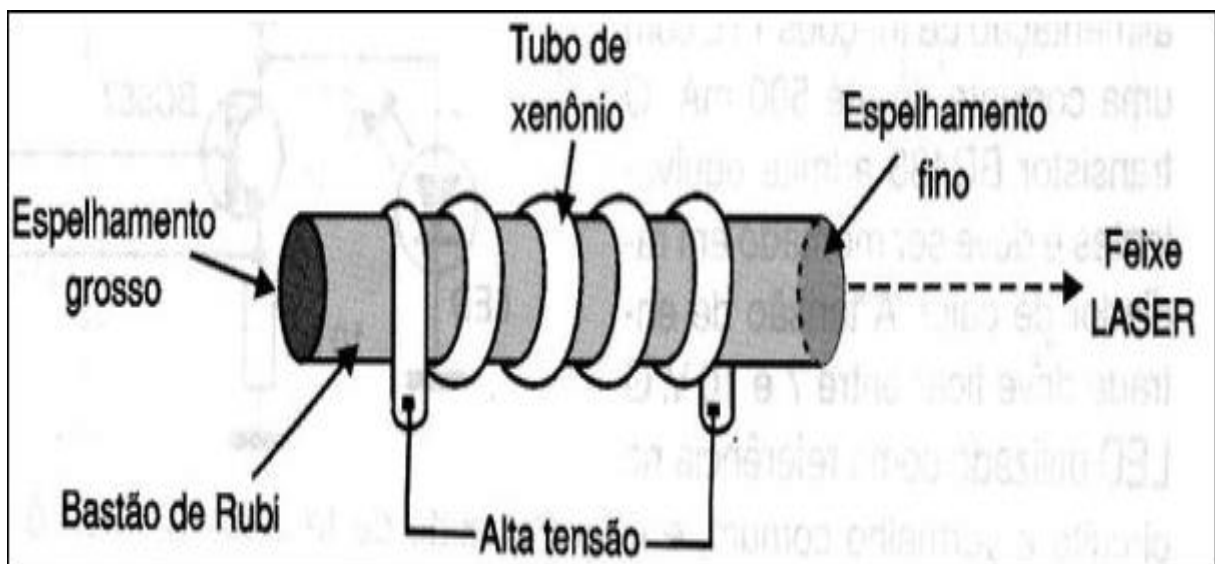
O feixe de luz produzido por um laser é formado por ondas produzidas na mesma direção e é bastante estreito, ou seja, propaga-se na mesma direção e sofre o mínimo de dispersão.

- **Alta intensidade**

Outra característica é que a luz do laser é muito potente, podendo chegar à ordem de  $10^{12}$  Watts. Com isso, a intensidade da luz do laser produzida é extremamente grande.

O funcionamento básico do laser pode ser compreendido através de um modelo simplificado do átomo. De forma simplificada, pode-se definir um átomo consistindo em um determinado núcleo com prótons e nêutrons e uma nuvem eletrônica ao redor do núcleo. Cada orbital de elétrons tem um nível de energia. Quando submetidos à energia eletromagnética, os elétrons absorvem energia e passam a ocupar o nível de energia superior do átomo, ou seja, o estado excitado, e têm forte tendência de retornar ao seu nível de energia “natural”.

O fóton emitido tem a mesma energia da radiação que excita a emissão e, ao atingir outro átomo no mesmo estado, também excitará a emissão de outros fótons com as mesmas características, resultando em um efeito cascata. Quando o número de fótons emitidos é maior que o número de fótons absorvidos. Assim o laser produz luz.

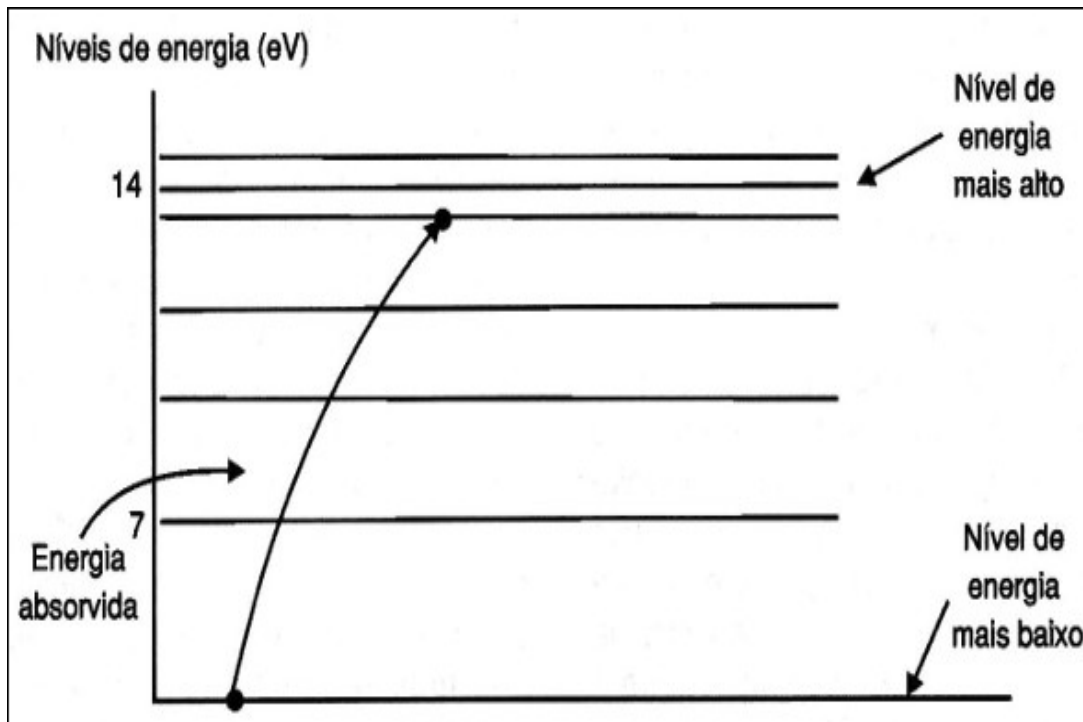


**Figura 4 – Laser de Rubi**

Fonte: <https://www.newtonbraga.com.br/index.php/como-funciona/16952-como-funciona-o-diodo-laser->

Nesse arranjo, a haste cilíndrica de rubi tem dois espelhos, um mais espesso que o outro. A superfície do espelho é interna, então a luz ou radiação gerada dentro do dispositivo será refletida nesses espelhos e, portanto, permanecerá dentro. O tubo de xenônio é envolto em uma haste de rubi.

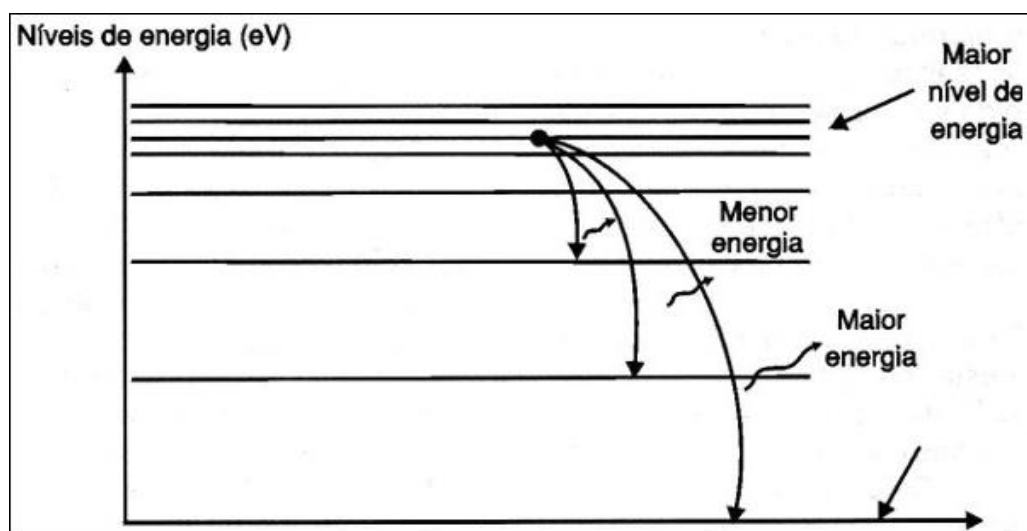
Quando uma descarga de alta voltagem é gerada no tubo de flash, ele emite um poderoso pulso de luz, que é absorvido pelos átomos da haste de rubi. Essa absorção ocorre pelos elétrons. Esses elétrons deixam suas órbitas normais e se movem para orbitais de maior energia, conforme ilustra a Figura 5.



**Figura 5 – Transições de níveis de energia**

Fonte: <https://www.newtoncbraga.com.br/index.php/como-funciona/16952-como-funciona-o-diodo-laser->

O pulso de luz deve ser muito forte para que a maioria dos elétrons dos átomos do rubi sejam levados a um nível de energia superior, ou seja, ocorre um fenômeno de “inversão populacional”. O número de elétrons no nível de energia normal torna-se menor que o número de elétrons que estão excitados ou no nível de energia mais alto. Essa condição é fundamental para obter o efeito do laser. Porém, após o flash, os elétrons não podem permanecer em um nível de energia superior indefinidamente, mantendo assim a energia absorvida.

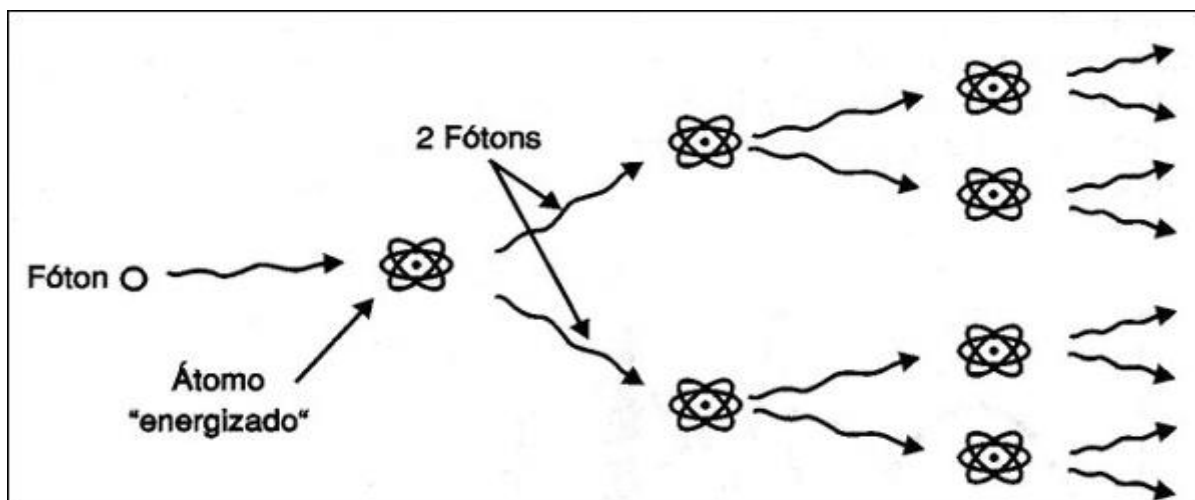


**Figura 6 – Momento em que os elétrons voltam aos níveis mais baixos de energia devolvendo a energia absorvida.**

Fonte: <https://www.newtoncbraga.com.br/index.php/como-funciona/16952-como-funciona-o-diodo-laser->

O pulo de energia maior significa luz com comprimento de onda mais curto ou frequência mais alta. O fóton emitido pode ser na faixa visível ou em uma outra frequência do espectro, mas é sempre de uma única frequência, que tem o efeito de estimular outros elétrons no nível de energia mais alto do material, de modo que também tendem a “realimentar” a energia absorvida.

Portanto, ao “atingir” os elétrons próximos, o fóton causará o retorno de um novo fóton, e agora emitindo dois fótons no material.



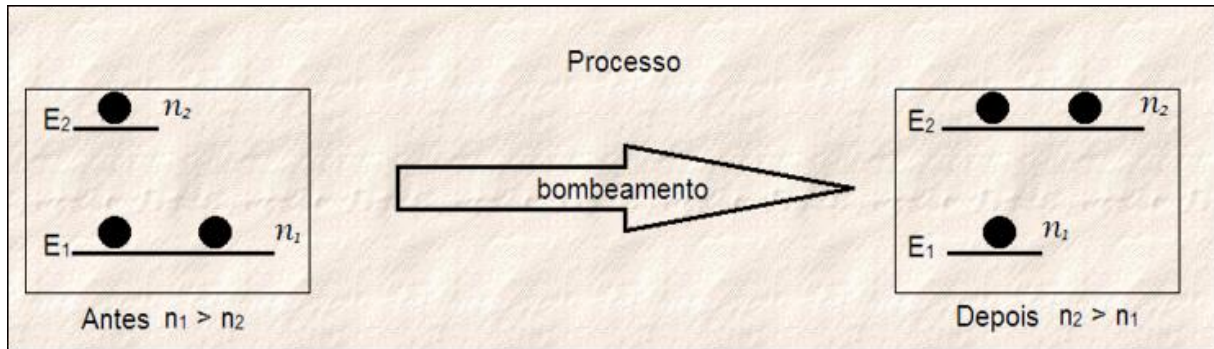
**Figura 7 – Processo de estímulo em cadeia**

Fonte: <https://www.newtoncbraga.com.br/index.php/como-funciona/16952-como-funciona-o-diodo-laser->

## 2.2 Inversão de População

Em um processo denominado emissão estimulada, os fótons incidentes com energia  $h\nu = E_2 - E_1$  excitam os átomos para a transição do estado de maior energia para o estado de menor energia. Quando o átomo retorna ao estado de energia  $E_1$ , ele emite dois fótons idênticos com a mesma energia, direção, fase e polarização.

Quando em um estado de equilíbrio térmico,  $n_2 < n_1$ , onde  $n_2$  é o número de átomos no estado de energia  $E_2$  e  $n_1$  é o número de átomos no estado  $E_1$ . A reversão populacional é entendida como a mudança no número de átomos em cada nível de energia.



**Figura 10 – Inversão de população dos átomos.**

Fonte: <https://www.sites.google.com/site/>

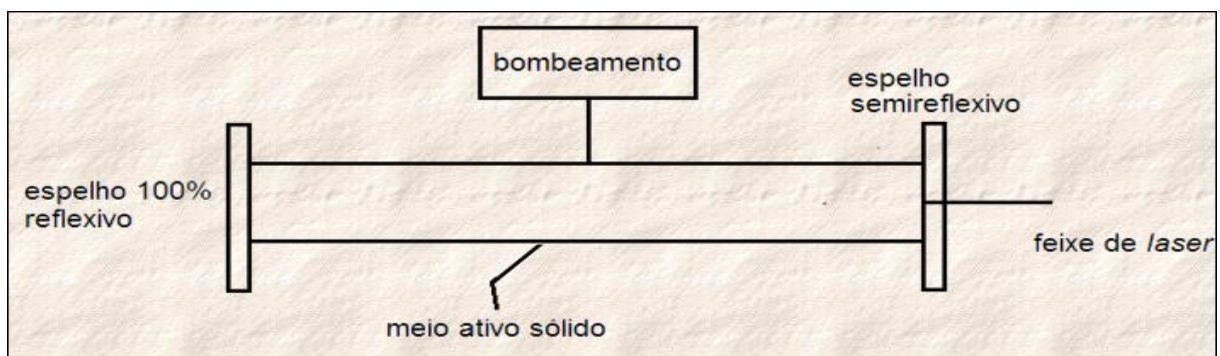
Em outras palavras, o número de átomos em  $E_2$  maior que em  $E_1$ , e  $n_2 > n_1$ . O objetivo é atingir uma emissividade superior à taxa de absorção. Isso significa que a intensidade da radiação será amplificada pelo processo de bombeamento, e a radiação emitida é muito mais do que a radiação absorvida.

### 2.3 Tipos de laser

Existem vários tipos de lasers no mercado. Eles liberaram uma certa potência durante curtos espaços de tempo e exibem um ponto de luz entre 50 a 2000 mm, podendo ser utilizado para vários tipos de operações. De maneira geral os lasers são classificados como:

- **De Estado Sólido**

Um laser de estado sólido se refere a um laser cujo meio ativo é composto de materiais sólidos. Os mais comuns são: granadas de ítrio e alumínio dopado com neodímio (Nd: YAG) e vidro dopado com neodímio. Relatos da história do laser nos dizem que o primeiro laser de estado sólido produzido tem o rubi como meio ativo, mas não é mais usado devido à baixa eficiência.



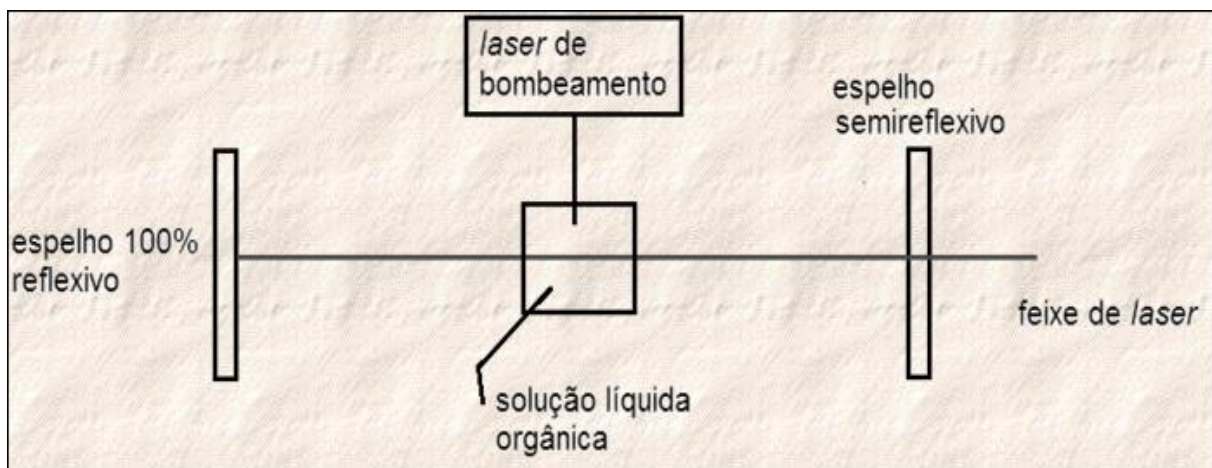
**Figura 11 – Estrutura do laser sólido.**

Fonte: <https://www.sites.google.com/site/>

O material para gerar laser é distribuído numa matriz sólida (como o rubi ou neodímio-ítrio-alumínio garnet “YAG”). Lâmpadas de flash são as fontes de potência. O laser Nd:YAG emite luz no infravermelho em 1064 nm.

- **Corante (Dye)**

Lasers líquidos ou corantes permitem que a luz passe através de corantes orgânicos, geralmente soluções líquidas, geralmente Rodamina 6G ou Rodamina B para amplificar a luz. Eles podem ser usados em uma ampla gama de comprimentos de onda. Fontes de luz de alta energia são necessárias para bombear o líquido acima do limite do laser. Para fazer isso, usa-se um flash ou outro tipo de laser. Resfria-se a camada reflexiva com água para evitar o choque térmico do corante causado pelos raios infravermelhos próximos gerados pela lâmpada de flash.



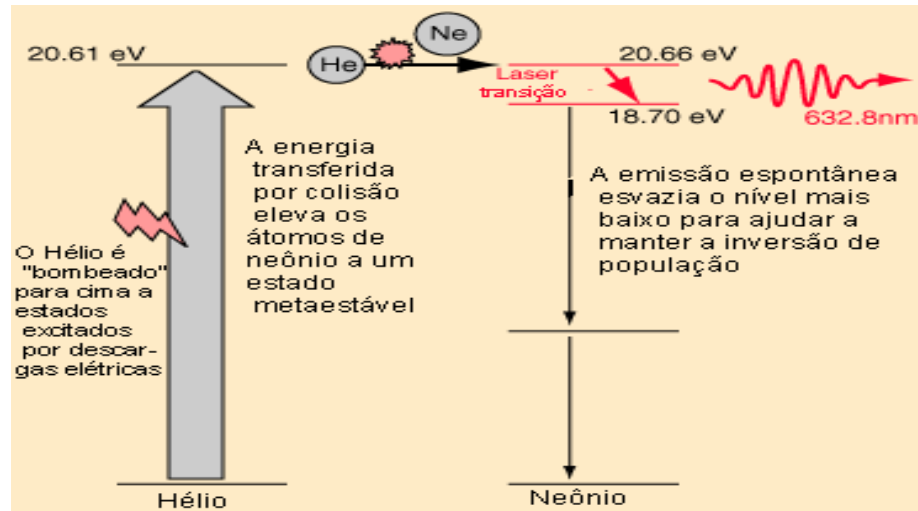
**Figura 12 – Estrutura de um Laser Líquido.**

Fonte: <https://www.sites.google.com/site/>

- **Laser de Gás**

Existe uma grande variedade de lasers a gás. Dentre eles temos o HeNe (Hélio-Neônio) que são os lasers de gás mais comuns e baratos e geralmente são construídos para funcionar em vermelho a 632,8 nm. Ele também pode ser configurado para emitir laser em luz verde 543,5 nm e também infravermelha de 1523 nm. Um dos níveis de excitação do hélio está em 20,61 eV e é muito próximo ao nível de energia do neônio em 20,66 eV. Na verdade tão perto que a energia pode ser transferida do hélio para os átomos de neônio após a colisão dos átomos de hélio e neônio.

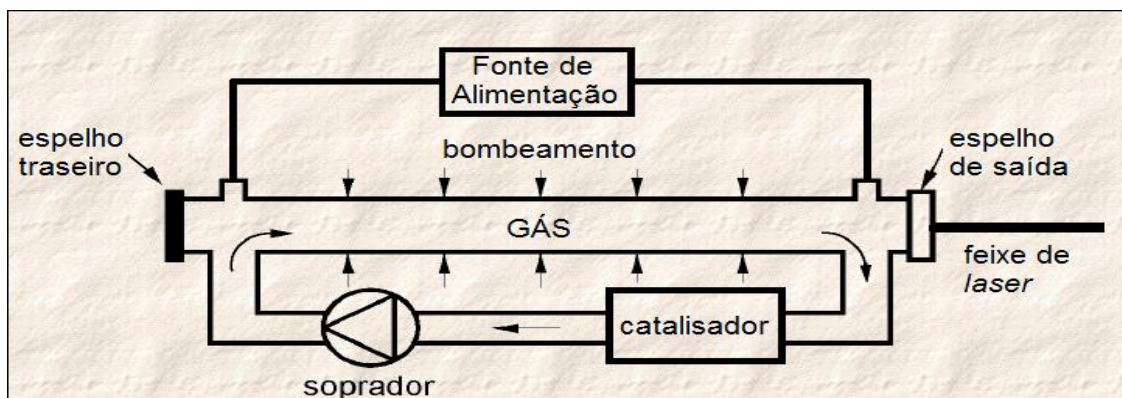




**Figura 13 – Reprençação do laser Hélio–Neônio.**

Fonte: <https://www.bertolo.pro.br/Biofisica/Optica%20e%20Radiacao/lasgas.htm>

A tecnologia usada pelo laser de argônio é excitar separadamente os íons a uma pressão de 0,1 a 1,0 Torr, o que requer um pulso de 8 kVdc, e então ionizá-los a 45 A e 600 V. Sua potência de saída é de cerca de 15 W, o comprimento de onda está entre 488 a 515 nm, o diâmetro é de 1 a 2 mm, o rendimento é inferior a 0,1% e a divergência é inferior a 1 mrd.



**Figura 14 - Estrutura Básica do Lasers a Gás.**

Fonte: <https://www.sites.google.com/site/>

- **Excímeros (dos termos excited e dimers):**

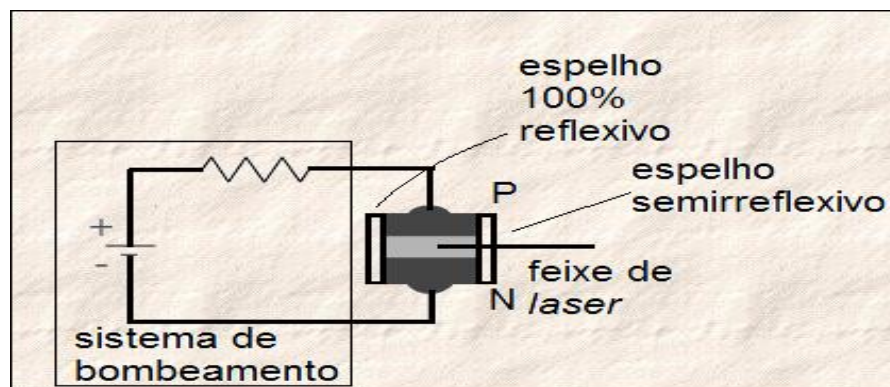
Esse tipo de laser utiliza os gases reativos, como clorine e fluorine, misturados com gases inertes como Ar, Kr, ou Xe, quando estimulados por corrente elétrica.

- **Laser diodo**

O diodos laser ou lasers de injeção são usados em muitos dispositivos eletrônicos, incluindo algumas aplicações muito interessantes, como impressoras a laser, leitores de

código de barras e detectores de objetos em linhas de produção. Eles também podem ser usados como referências em posicionamento de máquinas e fitas métricas eletrônicas.

Esses lasers consistem em pequenos cristais semicondutores divididos em 0,5 mm de comprimento, com uma clivagem perpendicular ao eixo do laser para que atue como um espelho. Eles são produzidos por meio de fotolitografia na camada p-n, material isolante e camada de contato metálico.



**Figura 15 – Estruturas do lasers diodo.**

Fonte: <https://www.sites.google.com/site/>

Os lasers mais comuns são as heteroestruturas, nas quais outras camadas são adicionadas à junção p-n. A tabela a seguir foi elaborada para a melhor compreensão dos respectivos tipos de Lasers e o comprimento de sua onda.

**Tabela 1-** Tipos de lasers e os seus respectivos comprimentos de ondas.

<b>Tipo de laser</b>	<b>Comprimento de onda (nm)</b>
Rubi	694,3
He-Ne	543,5 verde e 632,8 invisível
CO2	10.600
Argônio	481 azul, 514 vermelho
Diodo	620 a 1500
Diodo AsGa	558
Nd:YAG	1060
Er:YAG	2940
Ho:YAG	2100
Corante Cumarina	450

Corante rodamina	<b>580</b>
Exímero ArF	<b>193</b>
KrF	<b>248</b>
XeCl	<b>308</b>

Fonte: Autor.

## CAPITULO 3 – APLICAÇÕES DO LASER NA MEDICINA

### 3.1. Uso do laser na Medicina

Conforme vimos no Capítulo 1 o laser foi fabricado pela primeira vez em 1960 pelo físico americano Theodore H. Maiman. A primeira aplicação do laser na medicina ocorreu na área da oftalmologia na década de 1960. Os tratamentos estéticos a laser mais procurados pelas mulheres são a depilação, o tratamento vascular e o rejuvenescimento da pele. Outra aplicação popular do laser é a remoção de tatuagens. A demanda atual por homens também possibilita o tratamento da cera de barba, do rejuvenescimento facial e da celulite local.

A primeira aplicação do laser de rubi na odontologia clínica foi realizada por Goldman Sachs em 1965. Em 1988, a “Food and Drug Administration” (FDA) dos EUA aprovou o uso de lasers para cirurgia de tecidos na cavidade oral.

No início da década de 1990, os lasers de dióxido de carbono de alta potência foram desenvolvidos (Heart Laser, PLC Medical Systems Inc., Franklin, Massachusetts, EUA), para que possam ser aplicados no coração pulsante sem circulação corporal excessiva.

### 3.2. Luz Pulsada

Em 1972, a Harte Corporation dos Estados Unidos registrou sua primeira patente sobre o princípio da luz pulsada. Em sua patente, ele descreveu o mecanismo de remoção leve de pelos. Os valores de duração de fluência e empuxo ainda são válidos hoje.

Logo no início dos anos 90, Goldman e Eckhouse começaram o desenvolvimento da lâmpada de pulso de alta intensidade para o tratamento de anormalidades vasculares da pele. Nos últimos anos, esta fonte de luz provou ter um bom efeito de depilação. A facilidade de operação do equipamento e o mínimo de efeitos adversos e a capacidade de tratar grandes áreas vêm aumentando a demanda.



**Figura 19 - Luz pulsada em tratamento de remoção de pelos**

Fonte: [www.bramed.com.br/site/blog/noticias/qual-a-diferenca-entre-laser-e-lip/](http://www.bramed.com.br/site/blog/noticias/qual-a-diferenca-entre-laser-e-lip/)

O LIP (Luz intensa Pulsada) é uma fonte de luz de alta intensidade que emite luz multicolorida (515 nm a 1200 nm) sem colimação e coerência. Na lâmpada de xenônio de fonte LIP a corrente fluindo através do filamento devido ao efeito Joule faz com que o filamento aqueça.



**Figura 20 – Aparelho de Luz pulsada**

Fonte: [www.bramed.com.br/site/blog/noticias/qual-a-diferenca-entre-laser-e-lip/](http://www.bramed.com.br/site/blog/noticias/qual-a-diferenca-entre-laser-e-lip/)

A energia é um conceito que pode quantificar a interação entre fenômenos muito diferentes. A unidade oficial de medição de energia é o Joule (J) e de potência é o Watt ( $1 \text{ W} = 1 \text{ J/s}$ ). Como o xenônio fornece iluminação brilhante quando é frequentemente usado como fonte de luz. A lâmpada de xenônio foi originalmente desenvolvida como uma fonte de bomba para lasers e agora tem sido usada diretamente no campo de tratamento.

### **3.2.1. Lazer versus Luz Pulsada.**

O comprimento da luz pulsada está entre 200 e 1.800 nm (nanômetros). As cores lançadas pela tecnologia são: azul, verde, amarelo e vermelho, utilizando comprimento de onda específico, selecionando a parte do tecido que irá absorver mais luz. A luz que penetra no tecido durante o flash será absorvida pelos principais cromóforos, como sangue, melanina e água. Oxihemoglobina é o cromóforo principal abaixo de 600 nm.

O efeito térmico da luz pulsada nos tecidos biológicos é um processo complexo que leva a fenômenos diferentes: a conversão da luz em calor e a transmissão da luz.

O calor e a reação do tecido estão relacionados à temperatura e ao tempo de aquecimento. Essa interação leva à degeneração ou destruição de um certo volume de tecido. A tabela 2 a seguir mostra as diferenças entre o laser e a luz pulsada na depilação.

**Tabela 2 – Comparação das técnicas de depilação laser e Luz pulsada**

TIPOS DE ENERGIA	LASER	LUZ INTENSA PULSADA
Forma de aplicação	Em grandes e pequenas áreas	Em grandes e pequenas áreas
Mecanismos de ação	Efeito térmico	Efeito térmico
Mecanismo de ação por coloração	Fototérmolise seletiva	Fototérmolise seletiva
Uniformidade da luz	Monocromática	Policromática
Tipo de estímulo	Contínuo	Pulsado
Aplicabilidade	Várias aplicações na medicina	Aplicações em dermatologia e angiologia
Potencia	Pode atingir maior potência que o IPL	Atinge menor potência que o laser
Área de ação	Área de ação menor que a área de ação do IPL	Área de ação maior que a área de ação do laser
Temperatura	Temperatura superior a do IPL	Temperatura inferior que a do laser

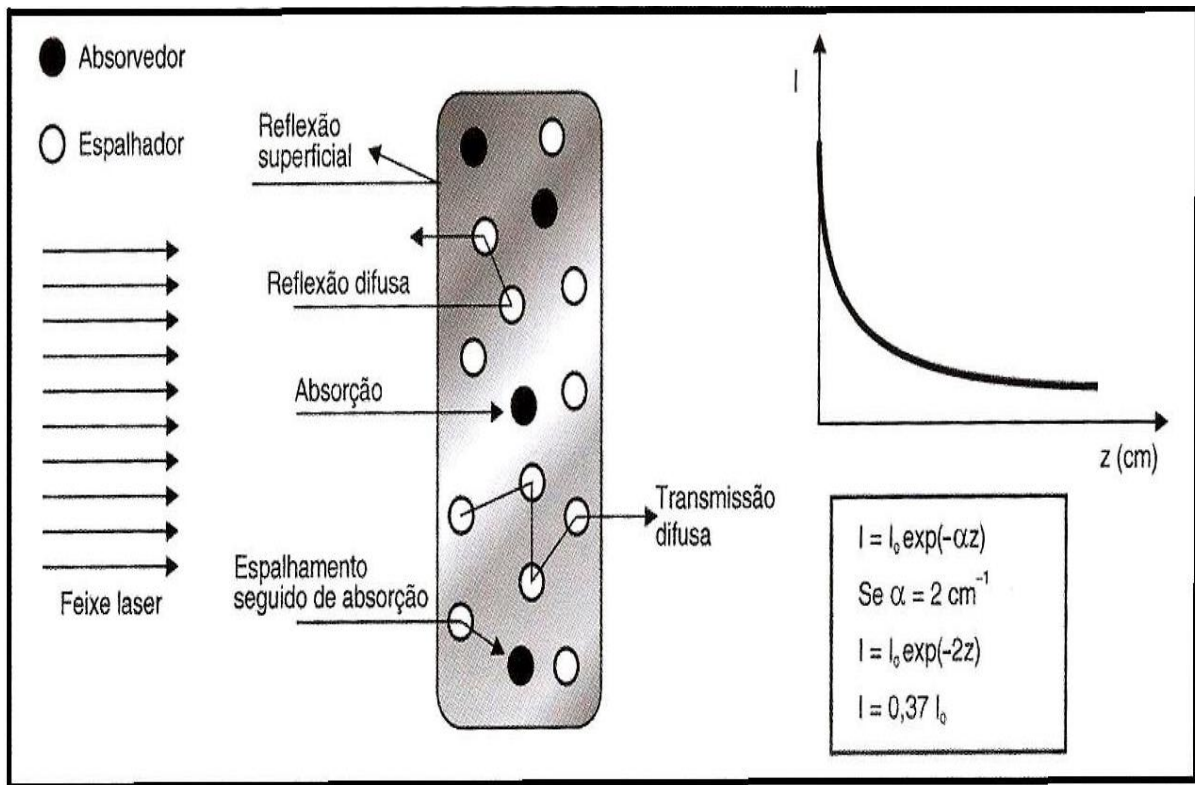
Fonte: adaptado de Rudolf et al, 2008 e Santos et al (2009)

A principal diferença entre luz intensa pulsada e laser é que a luz pulsada possui vários comprimentos de onda (cores) em cada emissão (pulso), enquanto no laser o disparo contínuo produz apenas um comprimento de onda (monocromático).

As doenças relacionadas à fotossensibilidade (como lúpus e erupção polimórfica) são contra-indicadas no IPL, mas o laser não é contra-indicado. Isso ocorre porque o lúpus é desencadeado principalmente pela radiação UVB (280-320 nm), em menor extensão pela UVA (320-400 nm) e pela luz visível (400-800 nm). A radiação infravermelha é inofensiva. A possibilidade de alterar a energia, o fluxo, a duração do pulso e o intervalo entre eles torna o sistema (IPL) muito versátil e flexível, podendo ser usado para vasos sanguíneos, pigmentação e depilação, bem como fotorejuvenescimento da pele. É uma alternativa ao laser.

### 3.3. Laser na odotologia

Ao atingir o tecido, a luz passa por quatro processos: um processo impermeável é denominado luz refletida, a parte penetrante é dividida em três partes: absorve, transmite e espalha a luz. Para produzir quaisquer efeitos clínicos, a luz precisa ser absorvida, enquanto outras propriedades ópticas não têm efeito no tecido (YOSHIYASU, 2001 p.20).



**Figura 21 – Representação básica da interação da luz laser com lâmina de tecido biológico.**

Fonte: Lasers em Odontologia, Guanabara Koogan, 2010. p.14

Essa luz absorvida, também conhecida como densidade de energia, pode ser dividida de acordo com a conversão experimentada:

- **O efeito fototérmico**, no qual a energia luminosa é convertida em calor, e dependendo da temperatura atingida, pode destruir o objeto alcançado;
- **Ação fotoquímica**, na qual são introduzidas moléculas preparadas quimicamente (fotossensibilizadores), que são posteriormente ativadas sob a ação da luz.
- **Processo não linear**, em que a energia é distribuída muito rapidamente em um pequeno espaço do tecido, gerando calor e causando evaporação explosiva do tecido

### 3.3.1 Tipos de lasers e seu efeitos biológicos

Os lasers são divididos em duas classes de acordo com a potência e consequentemente, com o efeito produzido nos tecidos biológicos: laser de alta potência (HILT – *high-intensity laser treatment*), que age através da produção de calor, e laser de baixa potência (LILT – *low-intensity laser treatment*), que age promovendo um efeito bioestimulador (JORGE; CASSONI; RODRIGUES, 2010).

Também chamado de laser cirúrgico, este gera alguns efeitos no tecido alvo, tais como fotomecânico-acústico (corte preciso), fototérmico (coagulação, carbonização e vaporização), fotoablativo (disrupção) e fotoionizante (quebra de ligação do DNA).

**Tabela 3 – Os tipos de Lasers e suas ações e indicações.**

TIPO	AÇÃO	INDICAÇÕES
CO <sup>2</sup>	Incisão, ablação de tecido, coagulação de pequenos vasos	Extirpação de tumores e leucoplasias, gengivectomias, desepitelização, cirurgia periimplantar
Nd:YAG	Coagulação de vasos maiores	Curetagem, biópsia, ressecções, cirurgia de tecidos moles
Diodo	Ablação de tecidos mole	Cirurgia de tecidos moles, coagulação, cirurgia periimplantar
Argônio	Coagulação de vasos calibrosos	Cirurgia de tecidos moles, coagulação
Ho:YAG	Ablação de tecido	Cirurgia de tecidos moles, cirurgia de articulação temporomandibular
Er:YAG	Incisão, ablação de tecido duro, coagulação pouco intensa	Cirurgia de tecidos moles, osteotomia, ressecção de ápice radicular

Fonte: A Odontologia e o Laser: atuação do laser na especialidade odontológica. Berlin: Quintessence, 2004. p 182.

### 3.3.2. Laser de alta potência na saúde bucal

Em lasers de alta potência, a intensidade da energia é tão alta que ocorrem danos térmicos. Nesse caso, o limiar de sobrevivência da célula é ultrapassado, levando à análise celular, que leva à morte celular.

Segundo Suter *et al.* (2010) foi realizada a biópsia IHF em 15 pacientes, divididos em 3 grupos de acordo com o equipamento cirúrgico utilizado: laser de CO<sub>2</sub> em modo contínuo, laser de CO<sub>2</sub> em modo pulsado e laser de diodo. Vale ressaltar que o dano térmico



no grupo cirurgia com laser de diodo foi maior do que nos dois grupos com laser de dióxido de carbono. Uma biópsia com laser de diodo do granuloma purulento foi realizada, e a cirurgia foi realizada para remover os depósitos de melanina das gengivas da bochecha. Observaram que apesar da formação de úlceras na superfície, obteve-se um bom efeito hemostático, não sendo necessária sutura. Eles também descobriram que, apesar da degeneração na borda da lesão, a amostra ainda é adequada para análise histopatológica.

Um estudo foi realizado por Angiero *et al* (2012) para analisar 608 amostras de várias lesões variando de 2 a 26 mm de diâmetro para verificar se o dano térmico causado por lasers de diodo afeta o diagnóstico histopatológico e as bordas da lesão. A biópsia é uma incisão (quando a lesão é maior que 5 mm e há suspeita de tumor maligno) e uma biópsia de excisão (quando é benigna ou há suspeita de tumor maligno, mas menos de 5 mm).

Nas lesões maiores que 3 mm, não foram encontradas alterações significativas na morfologia epitelial e mesenquimal, vascular e citológica. Porém, nas lesões menores que 3 mm, foram encontradas alterações significativas nas alterações epiteliais, intersticiais e/ou vasculares, e 46,15% das amostras não puderam ser diagnosticadas. A largura do tecido danificado pelo laser varia entre 260,7 $\mu$ m e 321,4 $\mu$ m (282,8 $\mu$ m em média). Nas lesões que possuíam mais do que 4mm de diâmetro, o diagnóstico histopatológico correto e confiável foi possível em 100% dos casos.

## 4. CONCLUSÃO

Esse trabalho teve o intuito de expor as funcionalidades do lasers utilizados mundialmente, para diversos tipos de situações. O laser é um dispositivo que gera radiação eletromagnética. Sua principal característica é: radiação monocromática, ou seja, possui um comprimento de onda bem definido; coerentemente, todos os fótons que compõem o feixe estão em fase e colimados, e ele se propaga como um feixe de ondas paralelas. Essas características tornam os lasers amplamente utilizados em diversos campos científicos e tecnológicos.

O laser começou a ser usado por volta do final dos anos 1960 na área médica. Hoje em dia, vários procedimentos médicos são realizados em todo o mundo. A maioria deles pertence à família das cirurgias minimamente invasivas, que se referem a procedimentos cirúrgicos sem contato. Por um lado, os lasers de maior potência são passíveis de tornar o processo mais rápido, eficiente e com mais aplicações, mas por outro lado, se utilizado de forma inadequada, irá causar danos mais graves aos tecidos biológicos.

A radiação de luz artificial está em diferentes setores e atividades nas áreas industriais. Em termos de saúde, esta utilização é visível, principalmente na odontologia e dermatologia, bem como na indústria de corte e solda. Como visto, a radiação de luz artificial pode causar muitos danos à pele e aos olhos. Portanto, há boas razões para tomar medidas para proteger todos os trabalhadores desta área.

## APÊNDICE – ÓPTICA

A óptica é o campo da física que tenta compreender vários fenômenos relacionados à luz. Diante disso, pode ser entendido como um caso especial das ondas elétricas. A óptica na física clássica se divide em óptica geométrica e óptica física, e na física moderna em óptica quântica.

### A.1 Óptica Geométrica

A óptica geométrica interpreta a luz como segmentos retos, chamados raios de luz. A luz é usada para descrever a direção da propagação da luz. Muitos fenômenos de luminescência que observamos em nossas atividades diárias só podem ser explicados pelos efeitos da óptica geométrica, como sombras, eclipses solares e reflexos de luz.

A óptica geométrica usa um design de fonte de luz relativamente simples, para que possamos explicar facilmente como a formação da imagem ocorre em sistemas ópticos reflexivos (como espelhos planos e esféricos) e sistemas ópticos refrativos (como lentes finas e prismas).

O princípio explica o comportamento da luz em diferentes situações. Eles são eficazes sob certas condições envolvendo meios óticos homogêneos (índice de refração constante) e meios isotrópicos (que têm as mesmas propriedades, independentemente da direção). Esses princípios são:

- ✚ **O princípio da propagação da luz em linha reta:** a luz viaja em linha reta.
- ✚ **O princípio da independência da luz:** Ao passarem, dois raios de luz passam um através do outro como se não existissem um com o outro.
- ✚ **Princípio da reversibilidade da luz:** A direção da propagação da luz é reversível.

### A.2 Outros conceitos importantes para a óptica

- ✚ **Fontes primárias:** Eles são objetos luminosos, também chamados de objetos emissores de luz. A luz pode ser gerada através de diferentes processos, como termoluminescência e luminescência, e esses processos envolvem diferentes fenômenos de luminescência em baixas temperaturas. Alguns exemplos de fontes emissoras de luz primárias são a luz solar, lâmpada, chama de uma vela,

até a própria resistência de uma churrasqueira elétrica ligada na energia, etc.

- ✚ **Fontes secundárias:** São objetos que refletem apenas a luz que incide sobre eles, portanto, são chamados de objetos iluminados. Exemplos de fontes secundárias são: a lua, seres humanos, plantas, etc.
- ✚ **Fontes puntiformes:** Seu tamanho é desprezível, ou seja, são pequenos em relação ao observador. Por exemplo: estrelas distantes, pixels de TV, lanternas a alguns quilômetros de distância.
- ✚ **Fontes externas:** Eles são fontes de luz cujo tamanho não pode ser ignorado porque seu tamanho é comparável ao tamanho da cena de iluminação. Por exemplo: Sol, Lua.

Outro conceito muito importante para o estudo da óptica é a cor. A cor depende também de como o cérebro interpreta os estímulos visuais. O olho humano pode detectar a faixa de frequência das ondas eletromagnéticas denominadas radiação visível, que se estende entre a radiação infravermelha e ultravioleta.

### A.3 Meios Ópticos

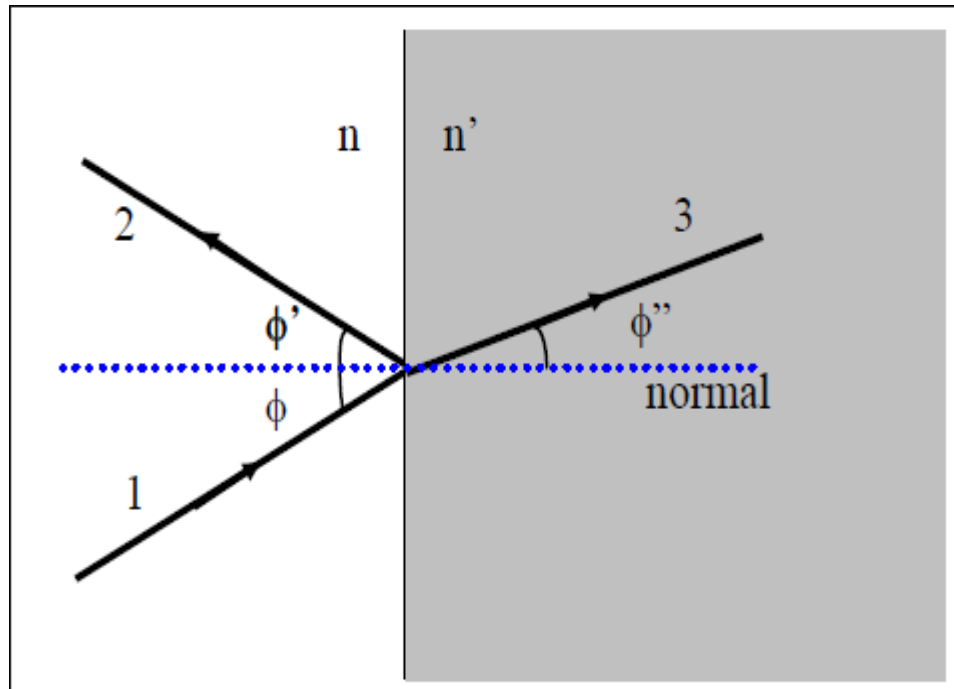
Os meios ópticos transparentes, translúcidos ou opacos dentre eles temos:

- ✚ **Meios transparentes:** podem transmitir luz com pouca perda de intensidade. Por exemplo: vácuo, ar, vidro, etc.
- ✚ **Meios translúcidos:** Eles permitem a transmissão parcial da luz. Por exemplo: antiembaçante, papel à prova de graxa, vidro fosco, etc.
- ✚ **Meios opacos:** Eles interrompem a passagem da luz, refletem ou absorvem luz. Por exemplo: paredes, ossos, metal, etc.

### A.4 Propagação de luz em meios homogêneos

Os trabalhos realizados até à primeira metade do século XVII comprovaram que a luz transmitida obedecia aos seguintes princípios:

- a) Em um ambiente uniforme, a difusão é direta.
- b) Quando o raio (raio 1) atinge a interface separando dois meios diferentes, temos uma parte refletida (raio 2) e uma parte de refratada (raio 3), de acordo com a figura a seguir.



**Figura 22 - Reflexão e refração de um raio luminoso numa interface dielétrica.**

Fonte: Fundamentos da óptica moderna, Sérgio C. Zilio p. 15 .

A característica de cada meio é um parâmetro denominado índice de refração  $n$ , que determina a velocidade de propagação da luz no meio. As direções seguidas pelos raios 2 e 3 não são arbitrárias. Usando as condições de contorno do campo eletromagnético, eles seguem as seguintes regras: (i) os raios 1, 2 e 3 estão todos no mesmo plano, que é chamado de plano incidente; (ii)  $\varphi = \varphi'$ , e (iii)  $n \sin \varphi = n' \sin \varphi''$  (Lei de Snell). Essas leis são muito importantes para rastrear raios na presença de interfaces dielétricas. Na fórmula (iii), quando o raio penetra um meio com um índice de refração mais alto, ele está próximo da linha normal.

### A.5 Propagação de luz em meios não homogêneos

Em várias aplicações práticas e situações que ocorrem na vida diária, a motivação para estudar a propagação da luz em um ambiente não uniforme foi descoberta. Entre os vários exemplos que podem ser citados, nos concentramos nos seguintes:

(i) **turbulências atmosféricas** - Quando olhamos para as estrelas em uma noite clara, notamos que elas piscam. Isto é porque a turbulência atmosférica, como flutuações de pressão e densidade, pode causar correntes de vento e alterar o índice de refração do ar. Como resultado, o caminho da luz é instável, o que torna difícil fazer observações astronômicas de corpos celestes, o que requer o uso de satélites. Na óptica adaptativa, os lasers de corante são

usados para excitar átomos de sódio na atmosfera superior. Isso produz um ponto circular brilhante devido à luminescência do sódio, que é causada pelas flutuações atmosféricas, mas o sódio visto pelo telescópio é distorcido. Em seguida, o sistema servomecânico corrige a curvatura de um dos espelhos do telescópio para eliminar essas distorções. O tempo de resposta deste sistema de correção é de cerca de 0,1 s.

**(ii) efeito miragem** – O aquecimento do ar próximo à superfície Terra muda seu índice de refração, o que faz com que a luz siga um caminho não linear. Este efeito pode ser visto claramente na transmissão de corridas na TV. O movimento convectivo ascendente do ar aquecido pelo contato com o asfalto faz a imagem do carro tremer como se houvesse um pouco de fumaça à sua frente. O efeito do desvio de luz é mais evidente, por exemplo, quando viajamos de carro e observamos a imagem do céu e das nuvens refletidas no asfalto, dá a impressão de uma poça. Neste caso, o raio incidente está localizado perto da estrada de asfalto e alcance o olhar de quem vê.

**(iii) comunicações ópticas** - Ao usar a luz para transmitir informações, o meio pelo qual a luz viaja desempenha um papel muito importante. Na transmissão de microondas de visualização direta, o sinal gerado pela antena de satélite é capturado por outra. Devido à instabilidade do caminho do raio, flutuações na atmosfera irão gerar ruído no sinal transmitido e, às vezes, tais flutuações não podem atingir a antena receptora perfeitamente.

Na comunicação de fibra óptica, a luz gerada pelo laser semiconductor é principalmente limitada ao núcleo da fibra e o índice de refração do núcleo é maior que o da camada externa. Portanto, a mudança no índice de refração muda novamente a propagação dos raios. A focalização da luz na fibra óptica é geralmente realizada por uma lente GRIN (índice de refração graduado), cujo índice de refração diminui continuamente na direção radial.

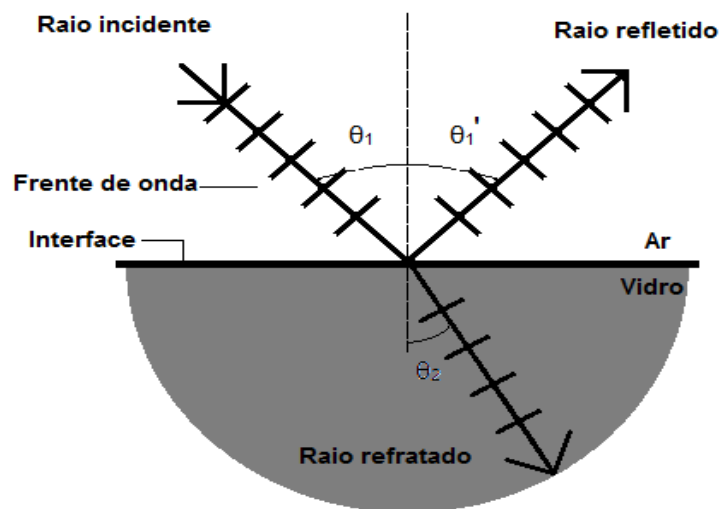
**(iv) efeitos auto-induzidos** - Ocorre quando um feixe de laser passa por um meio do tipo Kerr. O índice de refração do meio depende da intensidade. A fórmula é a seguinte:  $n(I) = n_0 + n_2 I$ , onde  $n_0$  é o índice de refração de baixa intensidade e  $n_2$  é chamado de índice de refração não linear. O feixe de laser geralmente tem uma distribuição de intensidade de seção transversal gaussiana, que muda o índice de refração na direção radial, produzindo assim um efeito de lente. A origem de  $n_2$  pode ser de natureza térmica ou eletrônica.

## A.6 Reflexão e Refração

A reflexão é definida como a radiação magnética que retorna da superfície sobre a qual incide. A lei simples da reflexão requer que as ondas normais incidentes e refletidas estejam no mesmo plano do vetor de superfície normal, que é chamado de plano incidente. O ângulo de reflexão  $\theta'$  é igual ao ângulo de incidência. Esses ângulos são medidos com base no vetor normal da superfície e no vetor normal do feixe incidente e são refletidos, ou seja:

$$\theta' = \theta$$

É importante citar que as irregularidades da superfície são menores que o comprimento de onda da radiação. Causa a chamada reflexão especular. No caso de grandes irregularidades ou mesmo equivalentes ao comprimento de onda da radiação, ocorrerá reflexão difusa.



**Figura 25 - Geometria de reflexão e refração**

Fonte: Fundamentos da óptica moderna Sérgio C. Zilio 2006

Por outro lado, a refração geralmente ocorre quando duas superfícies reflexivas separam duas superfícies com índices de refração diferentes. Isso decorre da mudança na velocidade da luz. A relação matemática que rege a refração é chamada de lei de Snell e é determinada por:

$$\frac{\sin \theta}{\sin \theta''} = \frac{v}{v'}$$

Onde  $\theta''$  ângulo de refração;  $v$  velocidade da luz do feixe incidente,  $v'$  velocidade da luz do feixe refratado.

$$n = \frac{c}{v}$$

Sendo que  $c$  é a velocidade luz no vácuo a respectiva equação pode ser escrita como:

$$n \sin \theta = n' \sin \theta''$$

A refletividade depende do ângulo de incidência, da polarização da radiação e do índice de refração do material. A relação entre refletividade e refletividade pode ser encontrada na equação de Fresnel. Sendo assim a equação dadas pelas leis de Fresnel são:

$$\frac{E'_s}{E_s} = \frac{\sin(\theta - \theta'')}{\sin(\theta + \theta'')}$$

$$\frac{E'_p}{E_p} = \frac{\tan(\theta - \theta'')}{\tan(\theta + \theta'')}$$

$$\frac{E''_s}{E_s} = \frac{2 \sin(\theta'') \cos \theta}{\sin(\theta + \theta'')}$$

$$\frac{E''_p}{E_p} = \frac{2 \sin(\theta'') \cos \theta}{\sin(\theta + \theta'') \cos(\theta - \theta'')}$$

Sendo que;

$E$  amplitude do vetor campo elétrico incidente,

$E'$  amplitude do vetor campo elétrico refletido,

$E''$  amplitude do vetor campo elétrico refratado.

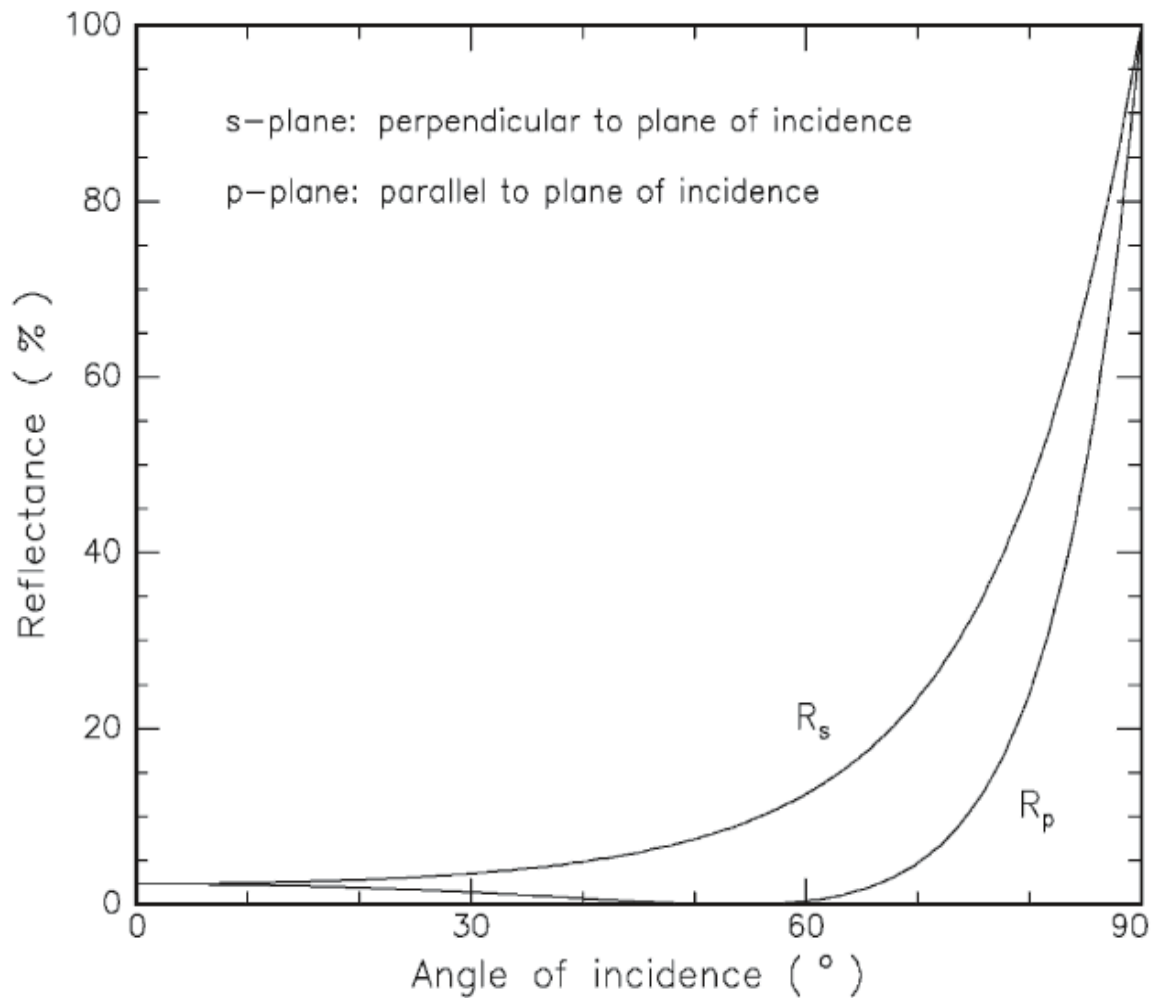
As siglas subscritas na fórmula em "s" e "p" representam o plano de oscilação, onde "s" é o plano vertical do alemão "senkrecht" e "p" é o plano perpendicular ao plano de incidência. A refletividade  $R_s$  e  $R_p$  no plano são dadas por:

$$R_s = \left( \frac{E'_s}{E_s} \right)^2$$



$$R_p = \left( \frac{E'_p}{E_p} \right)^2$$

Usando as equações fornecidas, a relação entre a refletividade e o ângulo de incidência pode ser obtida por substituição. A Figura abaixo mostra essa relação, onde a refletividade é uma função do ângulo de incidência.



**Figura 26** - Reflectâncias nos planos -s e -p para ar e água (n=1,33)

Fonte: Fundamentos da óptica moderna Sérgio C. Zilio 2006

A tabela 4 mostra a relação da variação do índice de refração e da reflectância para diferentes comprimentos de onda.

Comprimento de Onda $\lambda$ ( $\mu\text{m}$ )	Índice de refração n	Reflectância R
0,2	1,396	0,027
0,3	1,349	0,022
0,4	1,339	0,021
0,5	1,335	0,021
0,6	1,332	0,020
0,7	1,331	0,020
0,8	1,329	0,020
0,9	1,328	0,020
1,0	1,327	0,020
1,6	1,317	0,019
2,0	1,306	0,018
2,6	1,242	0,012
2,7	1,188	0,007
2,8	1,142	0,004
2,9	1,201	0,008
3,0	1,371	0,024
3,1	1,467	0,036
3,2	1,478	0,037
3,3	1,450	0,034
3,4	1,420	0,030
3,5	1,400	0,028
4,0	1,351	0,022
5,0	1,325	0,020
6,0	1,265	0,014
7,0	1,317	0,019
8,0	1,291	0,016
9,0	1,262	0,013
10,0	1,218	0,010

**Tabela 4** - Índices de refração e reflectâncias para a água.

Fonte: Dados de acordo com Hale e Querry (1973)

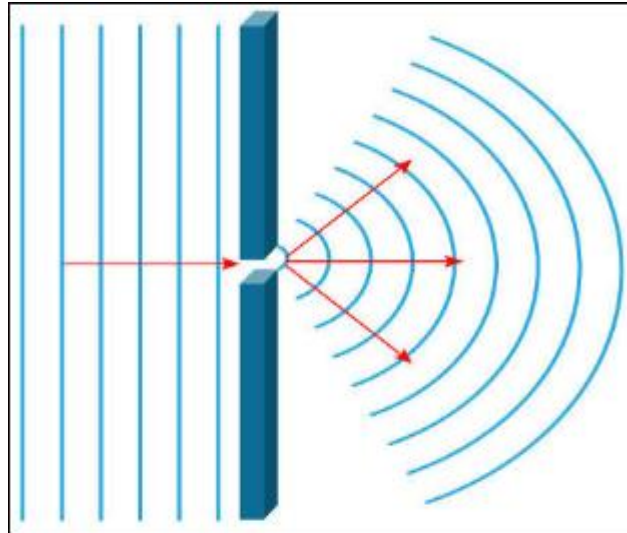
Percebe-se que duas bandas de alta absorção que ocorrem entre 2,9 $\mu\text{m}$  e 6,0 $\mu\text{m}$ . Geralmente, é difícil medir o índice de refração de vários tipos de tecidos devido à absorção e espalhamento. Portanto, a reflexão desses tecidos deve ser medida empiricamente

### A.7 Difração e Interferência da Luz

A radiação eletromagnética de um laser é composta por feixes de luz paralelos e direcionados, extremamente concentrados e com grande intensidade de energia.

A difração é um fenômeno físico que ocorre em qualquer tipo de onda, como as ondas sonoras e luminosas, e pode ser entendida como o desvio do caminho reto da luz após

passar por bordas como, por exemplo, uma fenda. A onda se propagará próximo ao obstáculo e atingirá o outro lado do obstáculo, mas o formato é circular. Em relação ao comprimento de onda da onda, a largura da fenda afeta a ocorrência do fenômeno, portanto, quanto maior o comprimento de onda em relação à largura da fenda, mais forte é a difração.

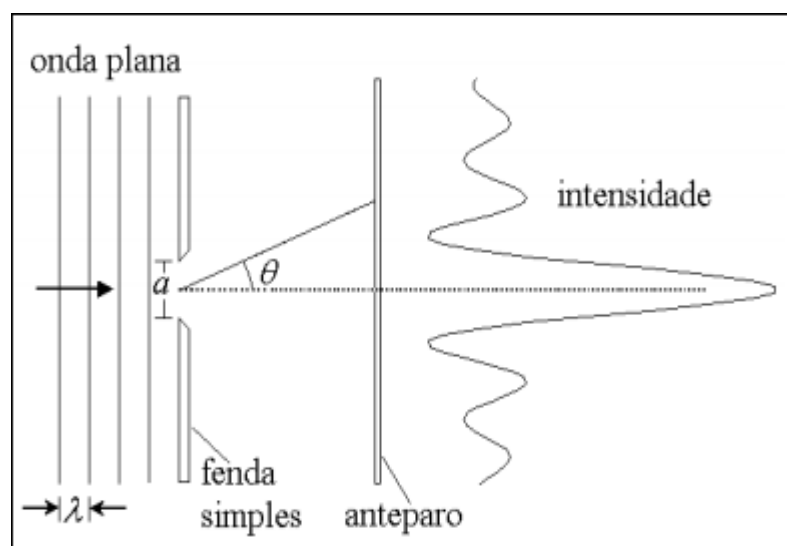


**Figura 16 – Difração.**

Fonte: <http://www.uel.laboratorio20fisica-difracao.com.br/>

## A.2 Interferência por Fenda Simples

Uma onda, com comprimento de onda  $\lambda$ , será afetada por uma fenda simples com uma largura  $a$ , conforme mostra a Figura A.1, a qual ilustra o fenômeno de difração.



**Figura A.1 - Intensidade de uma onda plana difratada.**

Fonte: <http://www.uel.laboratorio20fisica-difracao.com.br/>

A intensidade da luz apresenta uma dependência com o ângulo  $\Theta$  de acordo com a equação a seguir:

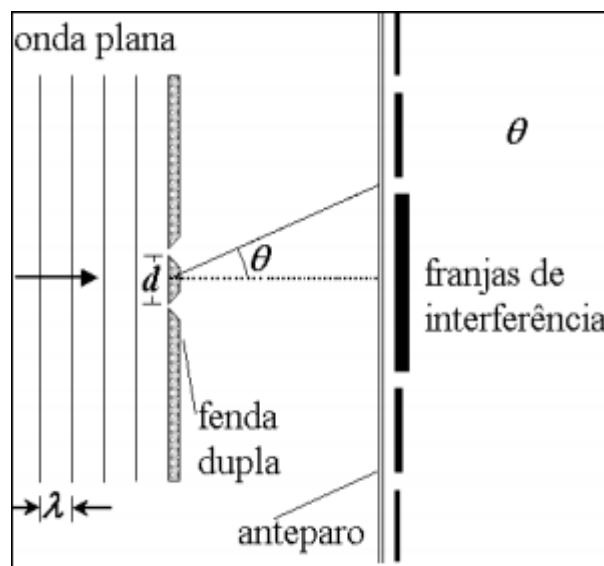
$$I = I_0 \cdot \left( \frac{\text{sen} \alpha}{\alpha} \right)^2 \Rightarrow \alpha = \frac{\pi \cdot a}{\lambda} \cdot \text{sen} \theta$$

Sendo  $I_0$  a intensidade máxima central, sendo neste caso que  $\Theta$  seria igual a 0. Já para os pontos de mínimo de interferência atendem a  $\alpha = m\pi$ :

$$a \cdot \text{sen} \theta = m\lambda, \quad m = \pm 1, \pm 2, \pm 3 \dots$$

Uma onda plana incidindo em duas fendas de largura  $a$  e separadas por uma distância  $d$  mostram difração em cada fenda, resultando em um processo de interferência segundo o princípio de Young conforme ilustra a Figura A.2. Essa interferência possui a condição de:

$$d \cdot \text{sen} \theta = m\lambda \quad (m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3 \dots)$$



**Figura A.2 - Difração em fenda dupla**

Fonte: <http://www.uel.laboratorio20fisica-difracao.com.br/>

Contudo se muitas fendas forem alocadas lado a lado, elas formarão uma rede de difração, que é um sistema de inúmeras fendas separadas por uma distância  $d$ . A onda plana que incide sobre a rede de difração apresenta difração em cada trinca e, portanto, apresenta interferência de forma equivalente ao processo de dupla trinca. Essa interferência possui a condição de:

$$d \cdot \sin\theta = m\lambda \quad (m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3 \dots)$$

Esse aumento de fendas faz com que a largura de cada máximo diminua.

## 6. BIBLIOGRAFIA

ALMEIDA-LOPES, L; RIGAU, J; ZÂNGARO, R.A; GUIDUGLI-NETO, J; JAEGER, M.M.M. Comparison of the lowlevel laser therapy effects on cultured human gingival fibroblasts proliferation using different irradiance and same fluence. **Lasers Surg Med.** v. 29, n. 2, p. 179-184, 2001.

ANGIERO, F; PARMA, L; CRIPPA, R; BENEDICENTI, S. Diode laser (808 nm) applied to oral soft tissue lesions: a retrospective study to assess histopathological diagnosis and evaluate physical damage. **Lasers Med Sci.** v. 27, n. 2, p. 383-388, 2012.

AZMA, E; SAFAVI, N. Diode laser application in soft tissue oral surgery. **J Lasers Med Sci,** v. 4, n. 4, p. 206, 2013.

Como funciona o Diodo. Disponível em: <<https://www.newtonbraga.com.br/index.php/16952-laser-art1891>> Acesso em: 10/9/2020.

Drummond A M C. Confiabilidade Metrológica de Equipamentos Eletromédicos a Laser e a Luz Intensa Pulsada [Dissertação] Rio de Janeiro: Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro; 2007.

KUHN, A.; DALL'MAGRO, E.; RHODEN, R. M. Visão multidisciplinar dos lasers de Érbio (Er: YAG) e dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). **Rev Médica HSVP,** v. 13, n. 29, p. 22-24, 2001.

Santos et al. Diferentes tipos de depilação: uma revisão bibliográfica. 2009; p. 17.

Tonidantel V E B C et al. Aplicação de luz pulsada em depilação de pelos brancos. 2011; p. 1-16.

E. Hecht, Optics, Addison-Wesley Publishing Company, 2a edição, 1987.

G. R. Fowles, Introduction to Modern Optics, Holt, Rinehart and Winston, Inc, 1968.

S. C. Zilio, Desenho e Fabricação Óptica, veja e-book no site:<https://www.fotonica.ifsc.com> acesso em: 20/10/2020.

ZILIO, sérgio. Óptica Moderna: Fundamentos e Aplicações. IFSC-USP. 315 p.

HALLIDAY, RESNICK, WALKER, jearl. Fundamentos de Física: Volume 4 Óptica e Física Moderna. 8.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

MESCHEDE, dieter. Optics, Lights and Lasers: The Practical Approach to Modern Aspects of.  
COX, ben. Optics in Medicine: Introduction to Laser-Tissue Interactions. 2013. 64 p.