

PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO DOS LASERS E LEDS

OPERATING PRINCIPLES OF LASERS AND LEDS

PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO DE LOS LÁSERES Y LOS LED

 10.56238/sevened2026.015-001

Adenilson de Souza da Fonseca

Doutor em Biociências

Instituição: Departamento de Biofísica e Biometria, Instituto de Biologia Roberto Alcântara Gomes,

Universidade do Estado do Rio de Janeiro

E-mail: adnfonseca@yahoo.com.br

RESUMO

Neste trabalho são discutidos os fundamentos físicos e as aplicações dos *lasers* (*light amplification by stimulated emission of radiation*) e dos LEDs (*light-emitting diodes*), abordando desde as bases teóricas da mecânica quântica até os critérios de segurança biológica. Os *lasers* são discutidos como sistemas de interação entre matéria e radiação que produz feixes com alta coerência, monocromaticidade e direcionalidade. São detalhados os mecanismos de emissão estimulada, postulados por Einstein, e os requisitos para a amplificação luminosa, incluindo a inversão de população em sistemas de múltiplos níveis de energia e o papel dos ressonadores ópticos na manutenção da oscilação. São revisados os diferentes tipos de meios ativos e suas implicações nas propriedades do feixe gerado. Os princípios de funcionamento dos LEDs são também discutidos, fundamentados na eletroluminescência em junções semicondutoras P-N. É abordada a evolução dos LEDs, destacando a eficiência energética e impacto nas aplicações atuais. Por fim, a importância da dosimetria e da segurança radiológica, definindo parâmetros de irradiância e fluência e classificando os riscos biológicos associados ao uso dessas fontes de luz.

Palavras-chave: Laser. LED. Emissão Estimulada. Semicondutores. Segurança Radiológica.

ABSTRACT

This paper discusses the physical fundamentals and applications of lasers (light amplification by stimulated emission of radiation) and LEDs (light-emitting diodes), covering everything from the theoretical basis of quantum mechanics to biosafety criteria. Lasers are discussed as matter-radiation interaction systems that produce beams with high coherence, monochromaticity, and directionality. The stimulated emission mechanisms, postulated by Einstein, and the requirements for light amplification are detailed, including population inversion in multi-energy level systems and the role of optical resonators in maintaining oscillation. The different types of active media and their implications for the properties of the generated beam are reviewed. The operating principles of LEDs are also discussed, based on electroluminescence in P-N semiconductor junctions. The evolution of LEDs is addressed, highlighting energy efficiency and impact on current applications. Finally, the importance of dosimetry and radiological safety is discussed, defining irradiance and fluence parameters and classifying the biological risks associated with the use of these light sources.

Keywords: Laser. LED. Stimulated Emission. Semiconductors. Radiological Safety.

RESUMEN

Este artículo analiza los fundamentos físicos y las aplicaciones de los láseres (amplificación de luz por emisión estimulada de radiación) y los LED (diodos emisores de luz), abarcando desde la base teórica de la mecánica cuántica hasta los criterios de bioseguridad. Los láseres se describen como sistemas de interacción materia-radiación que producen haces con alta coherencia, monocromaticidad y direccionalidad. Se detallan los mecanismos de emisión estimulada, postulados por Einstein, y los requisitos para la amplificación de la luz, incluyendo la inversión de población en sistemas de múltiples niveles de energía y el papel de los resonadores ópticos en el mantenimiento de la oscilación. Se revisan los diferentes tipos de medios activos y sus implicaciones para las propiedades del haz generado. También se analizan los principios de funcionamiento de los LED, basados en la electroluminiscencia en uniones semiconductoras P-N. Se aborda la evolución de los LED, destacando su eficiencia energética y su impacto en las aplicaciones actuales. Finalmente, se discute la importancia de la dosimetría y la seguridad radiológica, definiendo los parámetros de irradiancia y fluencia y clasificando los riesgos biológicos asociados al uso de estas fuentes de luz.

Palabras clave: Láser. LED. Emisión Estimulada. Semiconductores. Seguridad Radiológica.

1 INTRODUÇÃO

Os *lasers*, acrônimo em inglês para *light amplification by stimulated emission of radiation* (amplificação da luz por emissão estimulada de radiação) e os LEDs, acrônimo em inglês para *light-emitting diodes* (diodos emissores de luz), não representa apenas um avanço técnico, mas sim marcos fundamentais da aplicação prática da mecânica quântica e da termodinâmica no controle da radiação eletromagnética.

A emissão *laser* é um processo onde a matéria e o campo eletromagnético interagem para produzir um feixe de fótons com propriedades únicas de coerência, monocromaticidade e direcionalidade. A gênese conceitual dessa tecnologia remonta a 1917, quando Albert Einstein postulou a existência da emissão estimulada, um mecanismo onde um fóton interage com um átomo excitado, forçando a emissão de uma réplica exata em termos de fase, frequência, polarização e direção. Para que a amplificação luminosa se concretize, é imperativo subverter a estatística de Boltzmann através da inversão de população, um estado de não-equilíbrio térmico alcançado via processos de bombeamento (óptico, elétrico ou químico) em sistemas de três ou quatro níveis de energia que utilizam estados metaestáveis de longa vida. A transição de um simples amplificador óptico para um oscilador funcional ocorre dentro de ressonadores ópticos ou cavidades de ressonância, onde a realimentação positiva permite que a radiação ganhe intensidade a cada passagem pelo meio ativo. A estabilidade desta cavidade e a natureza física do meio emissor, que pode variar entre cristais dopados como o Nd:YAG, gases moleculares como o CO₂, semicondutores ou soluções de corantes orgânicos, definem as características operacionais e o comprimento de onda da luz, permitindo aplicações que vão do corte industrial à microcirurgia ocular.

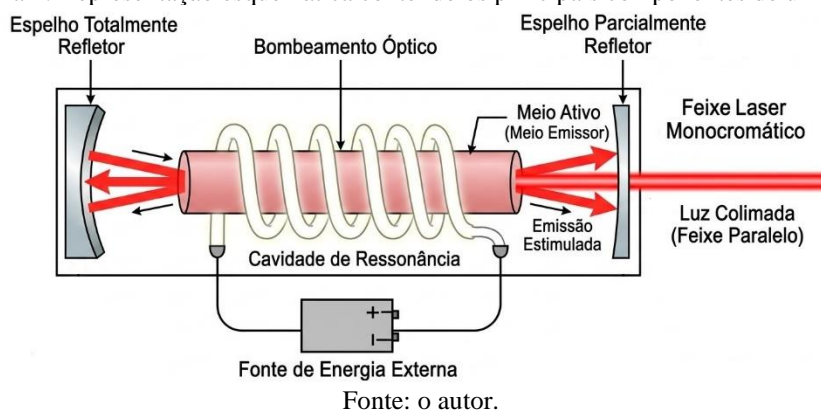
Os LEDs operam sob a física da eletroluminescência em dispositivos de estado sólido. A emissão de luz ocorre na junção P-N de materiais semicondutores dopados, onde a recombinação radiativa de elétrons e lacunas libera energia na forma de fótons. A eficiência desses dispositivos foi revolucionada pela engenharia de heterojunções e poços quânticos, que confinam portadores de carga para aumentar drasticamente a probabilidade de emissão, culminando na criação do LED azul de alto brilho. Este feito, laureado com o Prêmio Nobel de Física em 2014, possibilitou a geração de luz branca e consolidou o LED como a tecnologia de iluminação mais sustentável da atualidade. Atualmente, tanto *lasers* quanto LEDs são regidos por rigorosos parâmetros de dosimetria, como irradiância e fluência, e são estritamente classificados quanto à segurança biológica para mitigar riscos de danos térmicos ou fotoquímicos em contextos clínicos e industriais.

2 LASERS

2.1 FUNDAMENTOS FÍSICOS E PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO DOS *LASERS*

A tecnologia *laser* não representa apenas um avanço instrumental, mas uma das mais importantes aplicações da mecânica quântica e da termodinâmica. O acrônimo *laser* significa na língua inglesa amplificação da luz por emissão estimulada de radiação (*light amplification by stimulation of emission radiation*), descreve um processo onde a matéria e o campo eletromagnético interagem de forma a produzir um feixe de fótons com propriedades de coerência, monocromaticidade e direcionalidade sem precedentes na natureza (SVELTO, 2010). A compreensão exaustiva deste fenômeno exige um mergulho desde as bases teóricas estabelecidas no início do século XX até as complexas arquiteturas de ressonadores ópticos (ou cavidade de ressonância) e meios ativos (ou meio de emissão) que permitem sua operação em regimes que variam do contínuo ao attossegundo (RULLIERE, 2005). A figura 1 é uma representação esquemática contendo os principais componentes de um *laser*: cavidade de ressonância, meio emissor e fonte de energia externa.

Figura 1: Representação esquemática contendo os principais componentes de um *laser*.



2.1.1 A base teórica da emissão estimulada

A gênese conceitual do *laser* remonta a 1917, quando Albert Einstein, em seu artigo "Sobre a Teoria Quântica da Radiação", analisou o equilíbrio termodinâmico entre a matéria e a radiação (EINSTEIN, 1983). Einstein utilizou uma abordagem teórica, imaginando um gás de átomos em equilíbrio térmico com a radiação de corpo negro a uma temperatura T (EINSTEIN, 2001). Para que as leis da termodinâmica e a recém-formulada teoria atômica de Bohr fossem consistentes com a lei de distribuição de Planck, Einstein propôs que a matéria deve interagir com a radiação através de três processos fundamentais (EINSTEIN, 1983; YARIV; GORDON, 1963).

2.1.1.1 Os coeficientes de Einstein

Einstein postulou que, em um sistema de dois níveis de energia com populações N_1 (estado fundamental) e N_2 (estado excitado), onde:

$$E_2 - E_1 = h \times \nu$$

sendo E_1 e E_2 as energias dos estados fundamental e excitado, respectivamente, h é a constante de Planck e ν é a frequência da radiação) as transições entre esses estados (fundamental e excitado) são governadas por coeficientes de probabilidade específicos (SVELTO, 2010).

O primeiro processo é a emissão espontânea, descrita pelo coeficiente A_{21} , onde um átomo no estado excitado (de energia E_2) decai para o estado fundamental (de energia E_1) independentemente de qualquer estímulo (energia) externo, uma radiação, por exemplo (EINSTEIN, 1983). O segundo é a absorção, governada pelo coeficiente B_{12} , proporcional à densidade de energia da radiação $\rho(\nu)$ (EINSTEIN, 1983). A inovação crucial de Einstein foi a introdução do terceiro processo: a emissão estimulada, descrita pelo coeficiente B_{21} (EINSTEIN, 1983; EINSTEIN, 2001).

Neste terceiro mecanismo, um fóton incidente com a frequência de ressonância ν interage com um átomo já excitado, forçando-o a emitir um segundo fóton que é uma réplica exata do primeiro em termos de fase, frequência, polarização e direção (SVELTO, 2010). Einstein provou que, sob condições de equilíbrio, o número de transições ascendentes deve ser igual ao de descendentes (EINSTEIN, 1983). Sem a inclusão da emissão estimulada, a equação de equilíbrio falharia em altas temperaturas, pois a taxa de absorção aumentaria com a densidade de radiação enquanto a emissão espontânea permaneceria constante, quebrando a consistência com a lei de Planck (EINSTEIN, 2001).

2.1.1.2 Relações de Einstein e a proporcionalidade com a frequência

A análise matemática de Einstein derivou relações fundamentais entre esses coeficientes. Para estados com pesos estatísticos iguais, ele demonstrou que $B_{12} = B_{21}$, significando que a probabilidade de um fóton ser absorvido é igual à probabilidade deste fóton estimular uma emissão se este fóton interagir com um átomo excitado (EINSTEIN, 1983). Mais importante ainda, a razão entre o coeficiente da taxa de emissão espontânea e o coeficiente da taxa de emissão estimulada foi mostrada como proporcional ao cubo da frequência:

$$\frac{A_{21}}{B_{21}} \propto \nu^3$$

Esta relação possui implicações profundas para o desenvolvimento dos *lasers*, explicando por que foi consideravelmente mais simples obter a ação maser (em micro-ondas, baixas frequências) do que a ação *laser* (em luz visível ou ultravioleta), uma vez que a emissão espontânea se torna o processo dominante à medida que a frequência aumenta (EINSTEIN, 2001; YARIV; GORDON, 1963). A tabela 1 lista os processos de interação entre um fóton e um átomo, os coeficientes de Einstein, a relação entre

o processo de interação e a radiação emitida (dependente ou não da densidade de energia e as características do fóton emitido/absorvido).

Tabela 1: Processos de interação entre um fóton e um átomo, os coeficientes de Einstein, a relação entre o processo de interação e as características da radiação emitida/absorvida.

Processo de interação	Coeficiente	Dependência da radiação	Característica do fóton emitido/absorvido
Emissão espontânea	A_{21}	Independente	Direção e fase aleatórias.
Absorção	B_{12}	Proporcional a $\rho(\nu)$	Absorção do fóton incidente.
Emissão estimulada	B_{21}	Proporcional a $\rho(\nu)$	Identidade total com o fóton incidente.

A_{21} : coeficiente da taxa de taxa de emissão espontânea. B_{12} : coeficiente da taxa de taxa de absorção. B_{21} : coeficiente da taxa de taxa de emissão estimulada. $\rho(\nu)$: densidade de energia da radiação. Fonte: o autor.

2.1.2 Dinâmica de população e o conceito de inversão

Embora a emissão estimulada ocorra naturalmente, em condições de equilíbrio térmico, este processo é ofuscado pela absorção. A distribuição de átomos em diferentes níveis de energia segue a estatística de Boltzmann, que estabelece que o número de átomos no estado fundamental N_1 é sempre superior ao número no estado excitado N_2 em qualquer temperatura positiva (PALANKER, 2013; SVELTO, 2010). Para que a amplificação ocorra, é necessário subverter esta ordem natural e criar um estado de não-equilíbrio térmico conhecido como inversão de população, onde $N_2 > N_1$ (MAINI, 2013).

2.1.2.1 Sistemas de níveis e estados metaestáveis

O processo de fornecer energia externa para alcançar a inversão de população é denominado bombeamento (BAGNATO, 2001; SVELTO, 2010). Este processo de inversão de população não pode ser mantido de forma eficiente em um sistema simples de dois níveis, pois o próprio bombeamento tenderia a igualar as populações, levando o sistema à transparência, mas não ao ganho líquido (SVELTO, 2010). Portanto, o funcionamento do *laser* exige sistemas de três ou quatro níveis de energia (YARIV; GORDON, 1963).

Nos sistemas de três níveis, como o *laser* de rubi, os átomos são bombeados do estado fundamental para um estado de energia superior, de onde decaem rapidamente (geralmente por processos não radiativos) para um estado metaestável intermediário (MAIMAN, 1960). Um estado metaestável caracteriza-se por ter um tempo de vida muito superior aos estados excitados convencionais (da ordem de milissegundos), permitindo o acúmulo de átomos no nível superior da transição *laser* (PALANKER, 2013; SVELTO, 2010). A transição *laser* ocorre então entre este estado metaestável e o estado fundamental (YARIV; GORDON, 1963).

Nos sistemas de quatro níveis, a transição *laser* termina em um nível de energia excitado que está acima do estado fundamental (SOROKIN; STEVENSON, 1960). Se este nível inferior da

transição for esvaziado rapidamente para o estado fundamental, a inversão de população pode ser alcançada com muito menos energia de bombeamento do que nos sistemas de três níveis, pois não é necessário excitar mais da metade de todos os átomos do sistema (YARIV; GORDON, 1963; SOROKIN; STEVENSON, 1960). A figura é uma representação dos sistemas de dois, três e quatro níveis de energia.

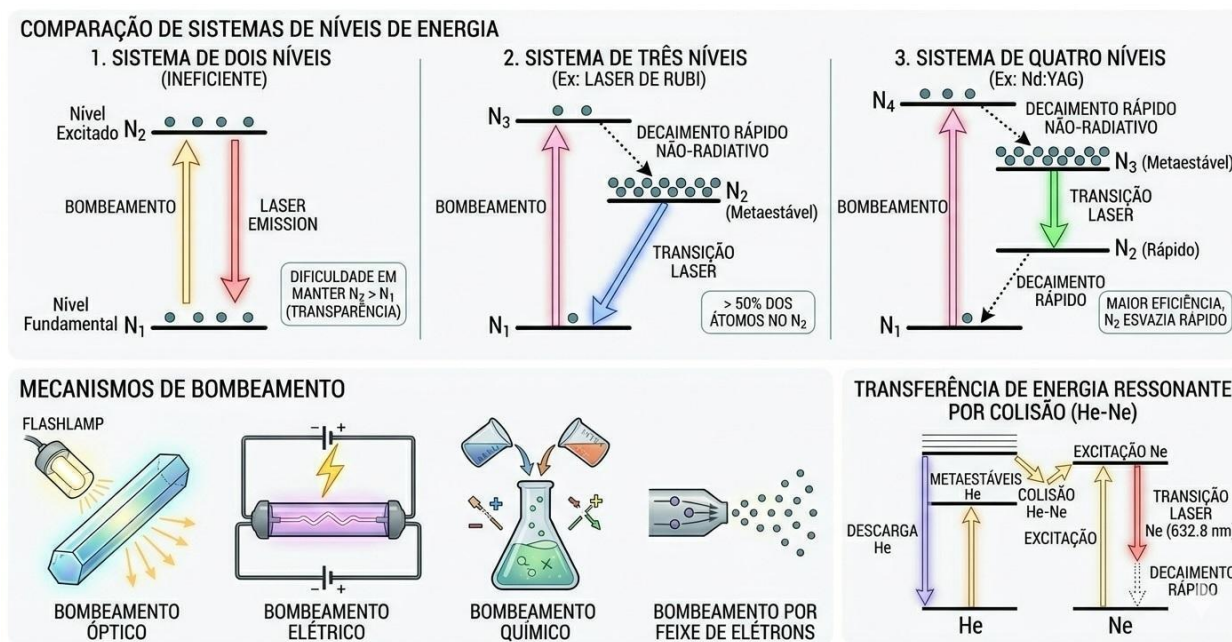
2.1.2.2 Mecanismos de bombeamento e transferência de energia

Para que ocorra a inversão de população o processo de bombeamento de energia pode ser contínuo ou pulsado, dependendo da aplicação e das limitações térmicas do meio ativo (YARIV; GORDON, 1963). Tipos de processo de bombeamento:

- **Bombeamento óptico:** Comum em *lasers* de estado sólido e de corante, utiliza fontes de luz como lâmpadas de *flash* de xenônio ou outros *lasers* (como diodos *laser*) para excitar o meio ativo (SVELTO, 2010; MORAES, 2014).
- **Bombeamento elétrico:** Predominante em *lasers* de gás e semicondutores. Em *lasers* de gás, uma descarga elétrica fornece energia a elétrons que colidem com os átomos do gás, transferindo energia cinética para os átomos e promovendo assim a excitação atômica (SVELTO, 2010).
- **Bombeamento Químico:** A energia é proveniente de uma reação química exotérmica que produz moléculas já em estados excitados (MORAES, 2014).
- **Bombeamento por Feixe de Elétrons:** Utilizado em *lasers* de elétrons livres e alguns *lasers* de excímeros, onde elétrons de alta energia são injetados diretamente no meio emissor (SVELTO, 2010).

Em sistemas complexos, como o *laser* de Hélio-Neônio, o bombeamento envolve uma transferência de energia ressonante por colisão (JAVAN et al., 1961). Os elétrons da descarga excitam preferencialmente os átomos de Hélio para níveis metaestáveis que possuem quase a mesma energia que os níveis superiores do Neônio. Através de colisões, os átomos de Hélio transferem sua energia para os átomos de Neônio, criando a inversão de população necessária para a emissão *laser* no gás Neônio (SVELTO, 2010). A figura 2 é uma representação dos diferentes tipos de sistemas laser, dos mecanismos de bombeamento e da transferência de energia ressonante por colisão.

Figura 2: Representação dos diferentes tipos de sistemas *laser*, dos mecanismos de bombeamento e da transferência de energia ressonante por colisão. Fonte: o autor. Nd: YAG: granada de ítrio-alumínio dopada com neodímio. He: hélio. Ne: neônio. nm: nanômetro.



Fonte: o autor.

2.1.3 Ressonadores ópticos e a física da cavidade de ressonância

A inversão de população por si só atua apenas como um amplificador óptico. Para transformar este amplificador em um oscilador capaz de gerar um feixe *laser* coerente e direcional, é necessário introduzir realimentação óptica positiva através de um ressonador (SIEGMAN, 1986). O ressonador óptico, ou cavidade de ressonância, é o componente que confina a radiação, forçando-a a passar repetidamente pelo meio ativo para ser amplificada por emissão estimulada (PALANKER, 2013).

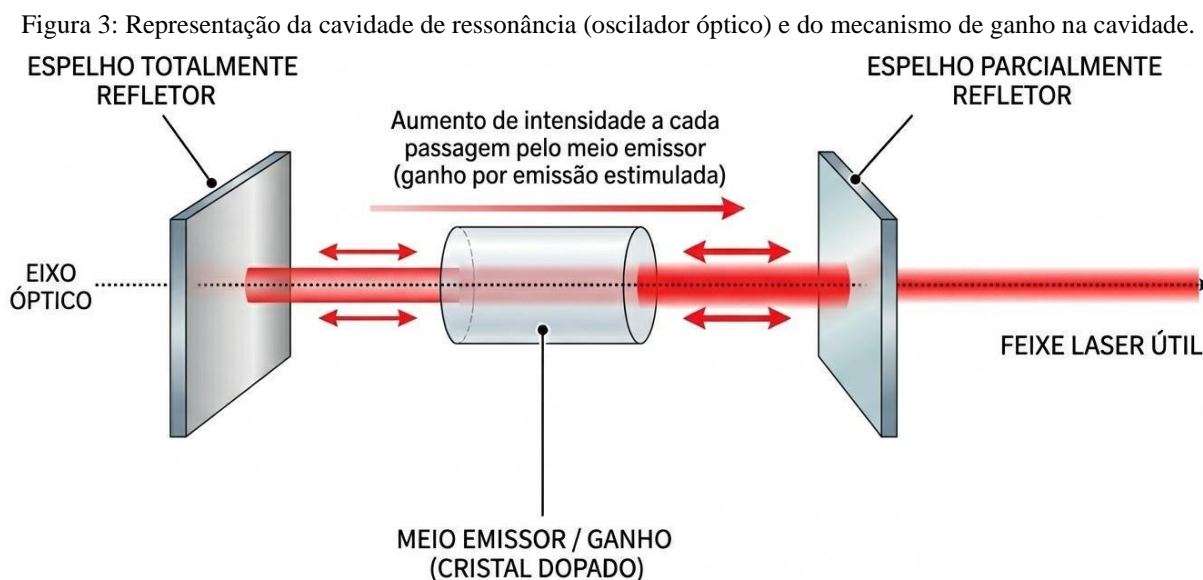
2.1.3.1 Estrutura e estabilidade da cavidade de ressonância

A configuração mais simples de uma cavidade de ressonância consiste em dois espelhos alinhados: um espelho totalmente refletor e um espelho parcialmente refletor, conhecido como acoplador de saída (SVELTO, 2010; PALANKER, 2013). A radiação que viaja ao longo do eixo óptico é refletida de volta, ganhando intensidade a cada passagem pelo meio excitado (SVELTO, 2010; PALANKER, 2013). A porção de luz que escapa pelo espelho parcialmente refletor constitui o feixe *laser* útil (PALANKER, 2013).

A estabilidade de uma cavidade de ressonância é um fator crítico e depende da curvatura dos espelhos (R_1 e R_2) e da distância L entre os espelhos (SIEGMAN, 1986; SVELTO, 2010). Matematicamente, a estabilidade é definida pelo parâmetro g , onde

$$g_i = 1 - \frac{L}{R_i}$$

Uma cavidade de ressonância é estável se a condição $0 < g_1 \times g_2 < 1$ for satisfeita, o que garante que os feixes de luz emitidos não divergirão para fora da cavidade após múltiplas reflexões no interior da cavidade de ressonância (SIEGMAN, 1986; CHANG, 2005). A figura 3 é uma representação da cavidade de ressonância (oscilador óptico), do mecanismo de ganho na cavidade e do parâmetro g .



Fonte: o autor.

2.1.4 Classificação e física dos meios emissores

O meio ativo, ou meio emissor, determina o comprimento de onda da emissão e as características operacionais do laser (BRETENAKER, 2014; MORAES, 2014a). A diversidade de materiais capazes de sustentar a inversão de população é vasta, abrangendo todos os estados da matéria (BRETENAKER, 2014; MORAES, 2014a).

2.1.4.1 Lasers de estado sólido e dopagem de cristais

Em *lasers* de estado sólido, o meio ativo consiste em uma matriz cristalina ou vítrea hospedeira na qual são introduzidos íons dopantes (impurezas) que realizam a transição *laser* (MORAES, 2014b; BRETENAKER, 2014). O cristal modifica os níveis de energia dos íons, mas a emissão permanece essencialmente atômica (MESCHEDE, 2007).

O Nd:YAG (acrônimo do inglês *neodymium-doped yttrium aluminium garnet*) é o principal exemplo, emitindo tipicamente em 1064 nm (BRETENAKER, 2014; MORAES, 2014b). Este *laser* opera em sistema de quatro níveis, o que confere alta eficiência (SOROKIN; STEVENSON, 1960; MORAES, 2014a). Outro exemplo é o *laser* de rubi, onde íons de cromo em uma matriz de safira emitem luz vermelha visível (MAIMAN, 1960; BRETENAKER, 2014). Estes *lasers* são conhecidos por sua alta potência de pico e capacidade de operar em regimes pulsados intensos, embora apresentem o chamado efeito de lente térmica devido ao aquecimento do cristal durante o bombeamento

(SIEGMAN, 1986; BRETENAKER, 2014). O efeito de lente térmica é um fenômeno óptico-não linear onde o aquecimento não homogêneo de um material por um *laser* induz uma variação no seu índice de refração, agindo como uma lente física. Este efeito pode causar instabilidade na cavidade de ressonância, aberrações ópticas, focalização ou desfocalização do feixe e degradação da qualidade do feixe em *lasers*. Por outro lado, este efeito é aplicado como ferramenta sensível para caracterizar propriedades térmicas de materiais (SIEGMAN, 1986).

2.1.4.2 Lasers de gás

Os *lasers* de gás utilizam gases neutros, íons ou moléculas como meio emissor (MORAES, 2014b). Uma das principais vantagens dos gases é sua alta homogeneidade óptica, o que permite a produção de feixes extremamente colimados e estáveis (MORAES, 2014b; BRETENAKER, 2014).

O *laser* de CO₂ é um *laser* molecular que utiliza transições entre estados vibracionais e rotacionais da molécula de dióxido de carbono (SVELTO, 2010; MORAES, 2014b). Este *laser* opera no infravermelho distante (10,6 µm) com eficiências muito altas, sendo a ferramenta padrão para corte e soldagem industrial (MORAES, 2014b). Já os *lasers* de excímeros utilizam moléculas de curta duração formadas por um gás nobre e um halogênio (como ArF ou KrF) que só existem em estados excitados (MORAES, 2014b). Emitem na região do ultravioleta e são essenciais em cirurgias oculares (LASIK, acrônimo do inglês *Laser-Assisted In Situ Keratomileusis*) devido à sua capacidade de romper ligações moleculares sem danos térmicos significativos (MORAES, 2014b; JIANG et al., 2023).

2.1.4.3 Lasers semicondutores

Os *lasers* semicondutores, ou diodos *laser*, operam sob princípios físicos fundamentalmente distintos dos *lasers* de níveis atômicos isolados (MORAES, 2014). Em um semicondutor, a emissão ocorre através da recombinação radiativa de pares elétron-buraco em uma junção p-n (SVELTO, 2010; BRETENAKER, 2014). Quando uma corrente elétrica direta é aplicada, elétrons são injetados na banda de condução e buracos na banda de valência (MORAES, 2014a; MESCHÉDE, 2007, 2026). Se a taxa de injeção for suficientemente alta, cria-se uma inversão de população de portadores na região ativa da junção (MORAES, 2014a; BRETENAKER, 2014).

Diferente de outros *lasers*, a cavidade de ressonância em um diodo *laser* é frequentemente formada pelas próprias faces do cristal semicondutor (MORAES, 2014a; BRETENAKER, 2014). Estes dispositivos são extremamente compactos, energeticamente eficientes e podem ser sintonizados para emissão em uma vasta gama de comprimentos de onda através da engenharia de *gap* de banda dos materiais (GaAs ou GaN) (MORAES, 2014a; BRETENAKER, 2014).

2.1.4.4 Lasers de corante

Os *lasers* de corante utilizam soluções de moléculas orgânicas complexas, como a Rodamina 6G, dissolvidas em solventes líquidos (SCHÄFER, 1990; YOUNG, 2000). A característica física mais notável destes meios é a sua largura de banda de ganho extraordinariamente ampla, resultado da sobreposição de inúmeros níveis vibracionais e rotacionais (SCHÄFER, 1990; YOUNG, 2000).

Esta ampla largura de banda permite que o *laser* seja sintonizado continuamente em uma faixa de dezenas de nanômetros através da introdução de elementos dispersivos (redes de difração ou prismas) dentro da cavidade (SCHÄFER, 1990; YOUNG, 2000). No entanto, as moléculas orgânicas sofrem de instabilidade fotoquímica e do "bottleneck" do estado tripleto (SCHÄFER, 1990; YOUNG, 2000). Quando excitadas, as moléculas podem migrar de estados singletos (úteis para *lasing*) para estados tripletos de vida longa, que absorvem a radiação *laser* e cessam a oscilação (SCHÄFER, 1990). Para mitigar isso, as soluções de corante são circuladas em alta velocidade (YOUNG, 2000).

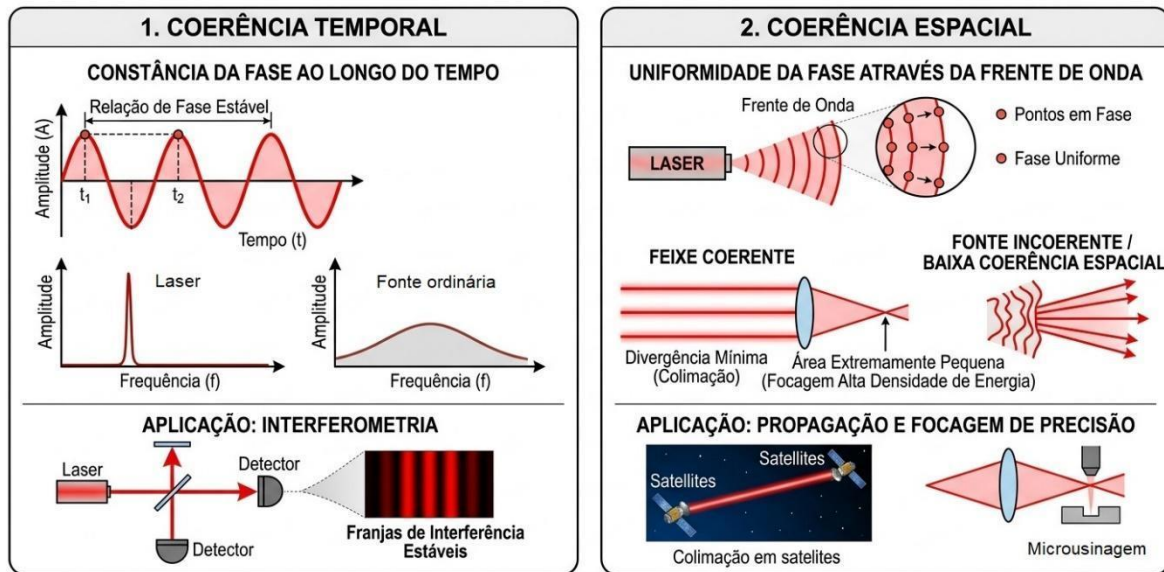
2.2 PROPRIEDADES DA LUZ LASER E SUAS BASES FÍSICAS

A radiação gerada por um *laser* possui características que a tornam qualitativamente diferente de qualquer outra fonte de luz artificial ou natural:

2.2.1 Coerência temporal e espacial

A coerência é talvez a propriedade mais fundamental do *laser* (SVELTO, 2010; PALANKER, 2013). A coerência temporal está relacionada à monocromaticidade e descreve a constância da fase da onda ao longo do tempo (CHANG, 2005; PALANKER, 2013). Um *laser* com alta coerência temporal mantém uma relação de fase estável por longas distâncias, permitindo aplicações em interferometria e holografia (YOUNG, 2000). A coerência espacial descreve a uniformidade da fase através da frente de onda (CHANG, 2005). Em um feixe *laser* coerente espacialmente, todos os pontos da frente de onda estão em fase, o que permite que o feixe se propague por grandes distâncias com divergência mínima (colimação) e seja focado em áreas extremamente pequenas (SIEGMAN, 1986; CHANG, 2005; SVELTO, 2010). A figura 4 é uma representação da coerência temporal e a coerência espacial da radiação emitida por um *laser*.

Figura 4: Representação da coerência temporal e da coerência espacial da radiação emitida por um *laser*.



Fonte: o autor.

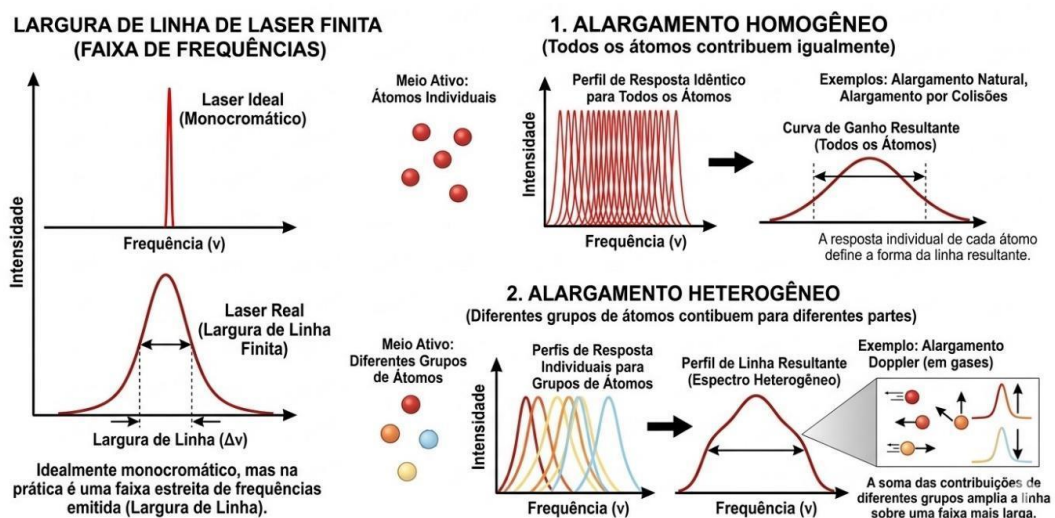
2.2.2 Monocromaticidade e alargamento de linha

Embora idealmente um *laser* emita em uma única frequência, processos físicos impõem uma largura de linha finita, isto é, uma faixa de frequências ou comprimentos de onda sobre os quais a luz laser é emitida (CHANG, 2005; SVELTO, 2010). Existem dois tipos de mecanismos de alargamento:

- **Alargamento homogêneo:** Todos os átomos do meio ativo contribuem igualmente para a largura da linha, como o alargamento natural e o alargamento por colisões (SIEGMAN, 1986).
- **Alargamento heterogêneo:** Diferentes grupos de átomos contribuem para diferentes partes do perfil da linha, como o alargamento Doppler em gases (CHANG, 2005).

A figura 5 é uma representação para monocromaticidade e alargamento de linha da radiação emitida por um *laser*.

Figura 5: Representação para monocromaticidade e alargamento de linha da radiação emitida por um *laser*.

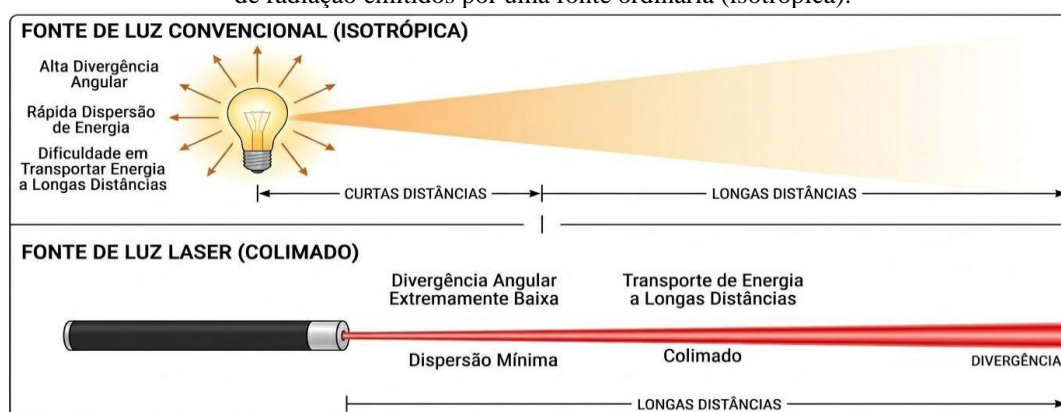


Fonte: o autor.

2.2.3 Direcionalidade

A direcionalidade é uma das características mais marcantes do *laser*, diferenciando-o drasticamente das fontes de luz convencionais (isotrópicas). Esta propriedade decorre do processo de emissão estimulada dentro de uma cavidade ressonante: apenas os fótons que viajam paralelamente ao eixo óptico do meio emissor são amplificados e conseguem emergir através do espelho parcialmente refletor. Como resultado, o feixe apresenta uma divergência angular extremamente baixa, permitindo que a energia seja transportada a longas distâncias com dispersão mínima (SVELTO, 2010). A figura 6 é uma representação para a direcionalidade de um feixe de radiação emitida por um *laser* em comparação aos feixes de radiação emitidos por uma fonte ordinária (isotrópica).

Figura 6: Representação para a direcionalidade de um feixe de radiação emitida por um *laser* em comparação aos feixes de radiação emitidos por uma fonte ordinária (isotrópica).



Fonte: o autor.

2.2.4 Alta intensidade

A alta intensidade, ou irradiância, de um *laser* refere-se à sua capacidade de concentrar uma grande quantidade de energia em uma área transversal muito pequena. Ao contrário de uma lâmpada comum, onde a luz se espalha em todas as direções, a coerência e a direcionalidade do *laser* permitem que ele seja focado em pontos microscópicos, atingindo o limite de difração. A intensidade (I) pode ser expressa pela relação entre a potência (P) e a área da seção transversal (A):

$$I = \frac{P}{A}$$

Devido à alta concentração de fótons por unidade de área, o *laser* consegue induzir efeitos fototérmicos ou fotofísicos em tecidos biológicos superficiais e profundos, fundamentais para a eficácia terapêutica em dermatoses crônicas (HECHT, 2016).

Na tabela 2 estão listadas as propriedades especiais da radiação e do feixe emitido por um *laser*, bem como a base física e algumas aplicações destas propriedades.

Tabela 2: Propriedades especiais da radiação e do feixe emitido por um *laser*, base física e algumas aplicações destas propriedades.

Propriedade	Base física	Aplicações
Monocromaticidade	Transições entre níveis de energia discretos.	Espectroscopia de alta resolução.
Coerência	Processo de emissão estimulada em fase	Holografia e comunicações.
Direcionalidade	Geometria da cavidade ressonante	Alinhamento, medida de distância entre objetos, cirurgias, obtenção de imagens.
Alta intensidade	Acúmulo de energia na cavidade e foco.	Corte industrial, fusão nuclear, cirurgias, fotobiomodulação.

Fonte: o autor.

2.3 EVOLUÇÃO HISTÓRICA

A história da invenção do *laser* é marcada por saltos teóricos e inovações experimentais. Após o sucesso do *maser* de amônia em 1954 por Charles Townes, a comunidade científica se voltou para a possibilidade de estender o conceito para frequências ópticas (TOWNES; SCHAWLOW, 1958; BRETENAKER, 2014). Em dezembro de 1958, Townes e Arthur Schawlow publicaram o artigo clássico "*Infrared and Optical Masers*", fornecendo o mapa teórico para o que viria a ser o *laser* (TOWNES; SCHAWLOW, 1958; BRETENAKER, 2014).

Paralelamente, Gordon Gould, um estudante de doutorado na Universidade de Columbia, teve percepções semelhantes (LINS, 2007; YARIV; GORDON, 1963). Em seu caderno de notas de 1957, Gould não apenas cunhou o acrônimo *LASER*, mas também detalhou esquemas para bombeamento óptico (LINS, 2007; BRETENAKER, 2014). Devido a mal-entendidos sobre patentes, Gould enfrentou uma disputa judicial de 30 anos para ser reconhecido como participante da invenção do *laser* (LINS, 2007; BRETENAKER, 2014).

A corrida para construir o primeiro *laser* operacional culminou em maio de 1960. Enquanto gigantes como a Bell Labs focavam em vapores alcalinos, Theodore Maiman, nos laboratórios da Hughes Aircraft, utilizou o rubi, material desacreditado por outros pesquisadores por ser um sistema de três níveis (MAIMAN, 1960). Maiman descobriu que a eficiência quântica do rubi era próxima de 100% e utilizou uma lâmpada de flash fotográfico helicoidal para bombear o cristal (MAIMAN, 1960; YARIV; GORDON, 1963). Em 16 de maio de 1960, o primeiro feixe de luz coerente foi gerado (MAIMAN, 1960).

A física de *lasers* no Brasil possui uma história rica, ligada ao retorno de cientistas brilhantes que atuaram nos principais centros mundiais (LINS, 2007; SANTANA; FREIRE JUNIOR, 2011). O físico brasileiro Sergio Pereira Porto desempenhou um papel internacional crucial (SANTANA; FREIRE JUNIOR, 2011; JORIO, 2019). Nos Laboratórios Bell na década de 1960, Porto reconheceu que o *laser* era a fonte perfeita para a espectroscopia Raman, que se baseia no efeito de espalhamento

inelástico de luz (SANTANA; FREIRE JUNIOR, 2011; JORIO, 2019). Ao aplicar *lasers*, Porto conseguiu gerar espectros Raman com clareza sem precedentes, transformando a técnica em uma ferramenta analítica de rotina para a química e a física (SANTANA; FREIRE JUNIOR, 2011; JORIO, 2019). No início da década de 1970, Porto retornou ao Brasil para liderar o Departamento de Eletrônica Quântica na Unicamp (LINS, 2007; SANTANA; FREIRE JUNIOR, 2011). Sua chegada impulsionou a pesquisa básica e fomentou o interesse em comunicações ópticas e separação isotópica (LINS, 2007; SANTANA; FREIRE JUNIOR, 2011). Paralelamente, o Instituto de Física de São Carlos da USP, liderado por pesquisadores como Vanderlei Bagnato, desenvolveu programas de metrologia de tempo e frequência utilizando *lasers* para o resfriamento de átomos (BAGNATO, 2005; DEMARTIN, 2014).

2.4 PARÂMETROS FÍSICOS DA RADIAÇÃO E DO FEIXE EMITIDO POR UM LASER

2.4.1 Comprimento de onda (λ)

O comprimento de onda é a distância entre dois máximos (ou cristas) consecutivos da onda eletromagnética, geralmente medido em nanômetros (nm). Na dermatologia, por exemplo, este é o parâmetro mais crítico, pois determina a seletividade pelo cromóforo (alvo) e a profundidade de penetração na pele. Radiações eletromagnéticas de comprimentos de onda maiores, como no espectro infravermelho, tendem a penetrar mais profundamente do que as radiações de comprimentos de onda curtos, como a radiação ultravioleta (BAGNATO, 2005; GIANFALDONI et al., 2017).

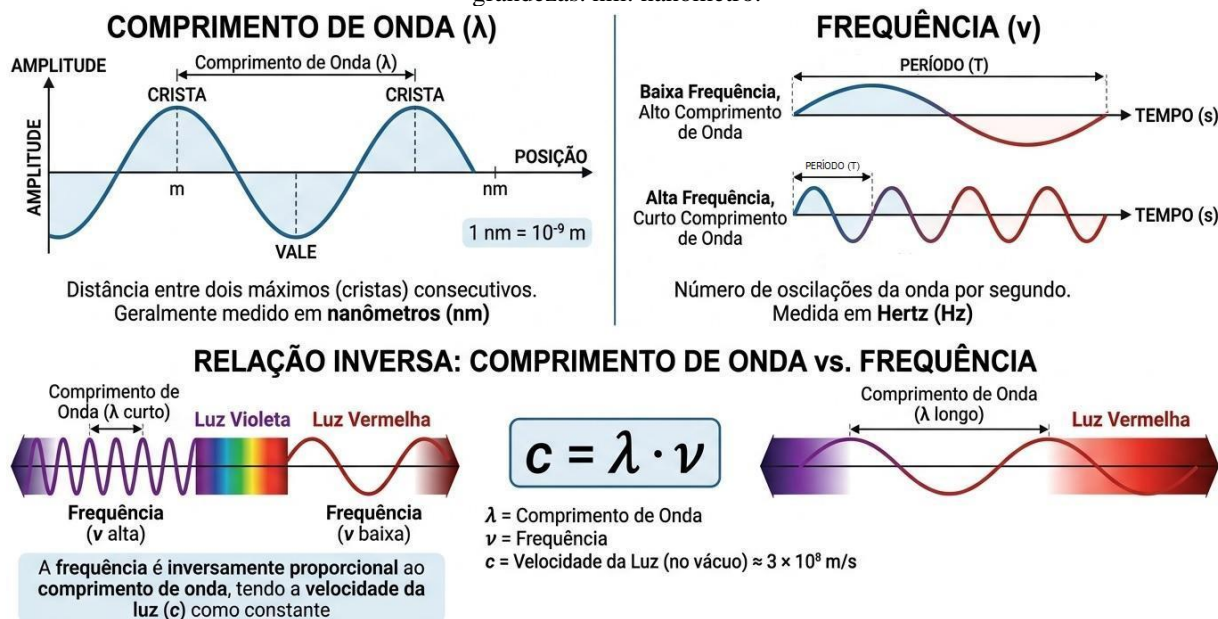
2.4.2 Frequência (ν)

A frequência que se refere ao número de oscilações da onda por segundo, medida em Hertz (Hz). Ela é inversamente proporcional ao comprimento de onda, tendo como constante de proporcionalidade a velocidade da luz no vácuo (c):

$$\nu = \frac{c}{\lambda}$$

Em sistemas de fototerapia, por exemplo, a frequência também pode descrever a taxa de repetição de pulsos em um *laser* pulsado, influenciando o acúmulo de calor no tecido biológico irradiado (SVELTO, 2010). A figura 7 é uma representação do comprimento de onda e da frequência de uma onda, bem como a relação entre estas duas grandezas.

Figura 7: Representação do comprimento de onda e da frequência de uma onda, bem como a relação entre estas duas grandezas. nm: nanômetro.



Fonte: o autor.

2.4.3 Energia do feixe (E)

A energia total emitida pelo *laser* é medida em Joules (J). Este parâmetro representa a capacidade total de realizar trabalho. Em tratamentos de psoríase, a energia total depositada tem sido utilizada como um indicador da "dose" total recebida pela placa psoriásica (BAROLET, 2018).

2.4.4 Potência do feixe (P)

A potência é a taxa na qual a energia é emitida por unidade de tempo, medida em Watts (W), onde $1 \text{ W} = 1 \text{ J/s}$. Este parâmetro define a rapidez com que a energia é entregue ao sistema, um tecido biológico, por exemplo. *Lasers* de alta potência podem causar efeitos térmicos imediatos, enquanto *lasers* de baixa potência induzem efeitos de fotobiomodulação (NIEMZ, 2019).

2.4.5 Fluência do feixe ou densidade de energia (f)

A fluência (ou densidade de energia) é a quantidade de energia (E) entregue por unidade de área (A), expressa em Joules por centímetro quadrado (J/cm^2). É o parâmetro mais utilizado para definir protocolos terapêutico, pois padroniza a dose independentemente do tamanho do feixe:

$$F = \frac{E}{A}$$

Em geral, a área nesta equação se refere à área do *spot size* do feixe de luz emitida pelo *laser* (CATORZE, 2009; BAROLET, 2018).

2.4.6 Irradiância do feixe (I)

A irradiância (ou densidade de potência) representa a potência distribuída por unidade de área, medida em Watts por centímetro quadrado (W/cm^2). Este parâmetro determina a "intensidade" do impacto do *laser* na superfície do meio irradiado. Por exemplo, em protocolos terapêuticos utilizados em dermatologia, este parâmetro é de importância para evitar queimaduras acidentais por excesso de calor concentrado na pele (WALT, 2026):

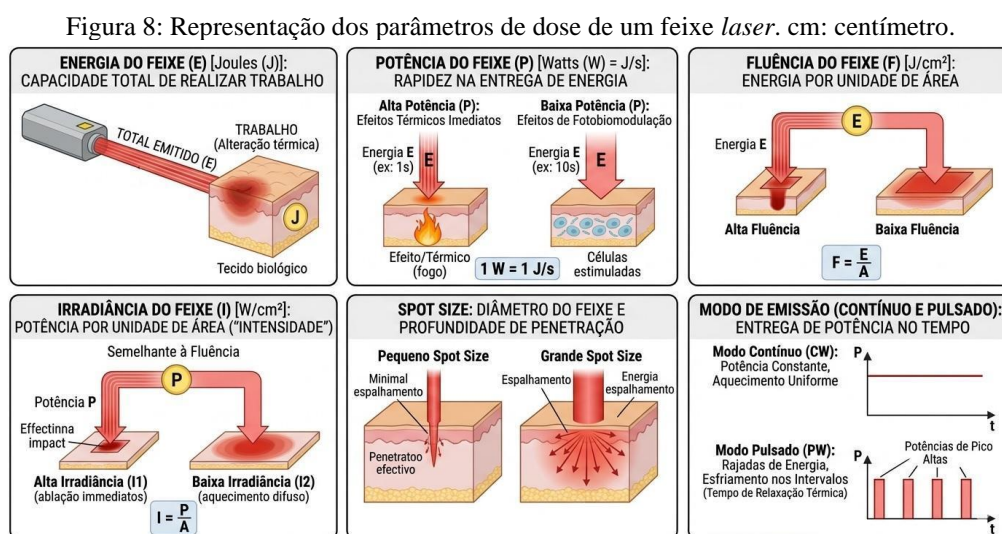
2.4.7 Spot size

O *spot size* é o diâmetro da seção transversal do feixe *laser* no ponto de contato com a pele. Além de definir a área de tratamento, o tamanho do *spot size* influencia a profundidade de penetração efetiva do feixe *laser*. Isto ocorre devido ao espalhamento (*scattering*) do feixe *laser* ao longo de sua trajetória no meio irradiado. Assim, feixes *lasers* de *spots* maiores sofrem menos perda por dispersão lateral e atingem maior profundidade no meio irradiado, camadas mais profundas da derme, por exemplo (CHAVES et al., 2016; EL ARABI et al., 2022).

2.4.8 Modo de emissão (contínuo e pulsado)

O modo de emissão descreve como a luz é emitida pela fonte. No modo contínuo a potência é constante ao longo do tempo e no modo pulsado a potência do feixe *laser* durante a emissão, permitindo atingir potências de pico altíssimas. No modo pulsado de emissão, o meio irradiado esfria nos intervalos (tempo de relaxação térmica), o que influencia os efeitos causados pela radiação absorvida pelo meio irradiado (BAGNATO, 2005; SHURRAB, 2025).

A figura 8 é uma representação dos principais parâmetros utilizados como parâmetros de dose de um feixe *laser*.



Fonte: o autor.

2.5 CLASSIFICAÇÃO DOS LASERS

A classificação dos *lasers* é fundamental para a organização do conhecimento técnico-científico, permitindo que o equipamento adequado seja escolhido com base em sua natureza física e no risco que representam. Essa classificação ocorre com base no estado físico do meio emissor e o potencial de risco biológico (segurança).

2.5.1 Classificação quanto ao meio emissor

O meio emissor define o comprimento de onda e, conseqüentemente, a aplicação clínica da radiação *laser* emitida (BAGNATO, 2005; SVELTO, 2010; NIEMZ, 2019):

- **Sólidos:** Utilizam cristais ou vidros dopados. O exemplo mais clássico é o *laser* Nd:YAG e o *laser* Rubi. Estes *lasers* são robustos e capazes de gerar altas potências de pico no modo pulsado de emissão.
- **Gasosos:** O meio emissor é uma mistura de gases. O *laser* de CO₂ (emissão no espectro da radiação infravermelha) e o *laser* Excimer (emissão no espectro da radiação ultravioleta) são os exemplos de *lasers* gasosos.
- **Semicondutores (diodos):** O meio emissor é composto de material semicondutor que constituindo um diodo. Estes *lasers* são pequenos, eficientes e de menor custo de obtenção e manutenção.
- **Líquidos (corantes):** Utilizam corantes orgânicos (como a Rodamina) dissolvidos em solventes como meio emissor. Estes *lasers* são versáteis por permitirem a sintonização de diferentes comprimentos de onda.

2.5.2 Classificação quanto à segurança

Esta classificação é baseada no potencial de dano aos olhos e à pele, sendo de grande importância para o profissional que utiliza ou que têm exposição ocupacional a feixes *laser* (NIEMZ, 2019):

- **Classe 1:** Seguros sob condições normais (como exemplo: *lasers* utilizados em leitores de *compact disc* - CD).
- **Classe 2:** Lasers de luz visível onde o reflexo de piscar protege o olho (como exemplo: apontadores *laser* utilizados em apresentações, palestras e aulas).
- **Classe 3R/3B:** Podem causar danos oculares se houver exposição direta (como exemplo: *lasers* utilizados em protocolos terapêuticos baseados na fotobiomodulação de tecidos biológicos). Exigem óculos de proteção.
- **Classe 4:** Inclui quase todos os *lasers* cirúrgicos e terapêuticos de alta potência (como exemplo: *laser* Excimer e *laser* de CO₂). São perigosos para os olhos e pele, mesmo em reflexos difusos,

e podem representar risco de incêndio. O uso de Equipamentos de Proteção Individual (EPIs) é obrigatório e rigoroso.

2.5.3 Classificação quanto à potência

Os *lasers* podem também ser classificados com base na sua potência de saída e nos efeitos biológicos resultantes é fundamental para distinguir entre terapias regenerativas e procedimentos ablativos. Essa classificação divide os equipamentos primordialmente em dois grandes grupos: *lasers* de baixa potência e *lasers* de alta potência (ROCHA JÚNIOR et al., 2007; CHAVES et al., 2014):

- Laser de baixa potência: Também conhecidos como *lasers* "frios", os *lasers* de baixa potência operam com potências que variam de 1 mW a 500 mW (0,5 W). Sua principal característica é a ausência de efeito térmico macroscópico, ou seja, não elevam a temperatura do tecido a ponto de causar danos térmicos. O mecanismo de ação é a fotobiomodulação, onde a energia luminosa é absorvida pelas mitocôndrias (especificamente pela citocromo c oxidase), estimulando a produção de ATP e acelerando processos de cicatrização e redução de inflamação.
- Laser de alta potência: Os *lasers* de alta potência, ou *lasers* "quentes", operam com potências acima de 500 mW, podendo chegar a dezenas de Watts. Ao contrário dos *lasers* de baixa potência, o objetivo aqui é gerar um efeito fototérmico. Dependendo da irradiância, podem causar coagulação, vaporização ou ablação do tecido alvo. Nesta categoria, enquadram-se os *lasers* cirúrgicos (CO₂) e o *laser* Excimer.

2.6 SEGURANÇA NO USO E EXPOSIÇÃO A RADIAÇÕES EMITIDAS POR LASERS

A segurança no uso de *lasers* é uma disciplina essencial devido à dessas tecnologias em setores industriais, médicos, científicos e de consumo, abrangendo desde leitores de códigos de barras e comunicações por fibra óptica até procedimentos cirúrgicos complexos (SLINEY, 1993; ICNIRP, 1996; ICNIRP, 2000; ICNIRP, 2013). A radiação *laser* é classificada como radiação óptica não ionizante, o que a diferencia de radiações como os raios X e gama (SLINEY, 1993).

2.6.1 Riscos associados à radiação *laser*

Os danos causados pela radiação *laser* dependem do comprimento de onda (λ), da duração da exposição e da potência do feixe. Os danos são divididos em três categorias principais: térmicos, fotoquímicos e mecânicos (acústicos):

- Dano térmico: Ocorre quando a energia absorvida aumenta a temperatura do tecido local, causando a desnaturação de proteínas. É o risco principal de *lasers* de onda contínua (CW) e infravermelhos (ICNIRP, 2013).

- Dano fotoquímico: Resulta de reações químicas induzidas por fótons de alta energia (luz azul e ultravioleta). O dano é cumulativo e pode levar a fotoceratite ou catarata prematura (SLINEY, 2021).
- Dano mecânico (fotoacústico): Pulsos ultracurtos (nanossegundos ou menos) causam uma expansão térmica tão rápida que gera ondas de choque no humor vítreo, podendo romper fisicamente as camadas da retina (HENDERSON; SCHULMEISTER, 2024).

Os riscos associados à exposição inadequada ao feixe *laser* são os riscos oculares e os riscos cutâneos:

- Riscos oculares: O olho é a estrutura mais vulnerável, podendo sofrer queimaduras na córnea ou na retina em casos de exposição aguda. A região espectral de 400 nm a 1400 nm é particularmente crítica para lesões na retina. Exposições crônicas a níveis excessivos podem levar ao desenvolvimento de cataratas ou opacidade do cristalino. De acordo com a ICNIRP (2013), a região entre 400 nm e 1400 nm é denominada "região de perigo retiniano". Nessa faixa, a córnea e o cristalino são transparentes, permitindo que o feixe atinja a retina. Devido ao poder de focalização do olho, a irradiância (W/cm^2) do *laser* pode ser amplificada em até 100.000 vezes na fóvea (HENDERSON; SCHULMEISTER, 2024).
- Riscos cutâneos: Exposições agudas a altos níveis de radiação podem resultar em queimaduras na pele. Além disso, radiações de comprimentos de onda específicos na faixa ultravioleta apresentam riscos de carcinogênese cutânea. Embora a pele seja mais resistente que os olhos, *lasers* de Classe 4 podem causar queimaduras graves. A radiação ultravioleta do *laser* está associada ao eritema, envelhecimento precoce e aumento do risco de carcinogênese (ICNIRP, 2013). No infravermelho distante (como o *laser* de CO_2 em 10,6 μm), a radiação é absorvida pela água nas camadas superficiais da pele, o que pode causar ablação térmica (MORAES, 2014).
- Riscos não radiativos: Além da radiação em si, *lasers* podem apresentar perigos químicos provenientes de materiais utilizados, como em *lasers* de corante ou excímeros.

2.6.2 Diretrizes e limites de exposição

A Comissão Internacional de Proteção contra Radiação Não Ionizante (ICNIRP) estabelece Limites de Exposição para evitar efeitos biológicos adversos (ICNIRP, 2013).

- Evolução normativa: As diretrizes foram publicadas originalmente em 1996, cobrindo comprimentos de onda de 180 nm a 1000 μm . Em 2000, houve uma revisão específica para proteção da retina contra feixes pulsados de pulsos ultracurtos e feixes contínuos (ICNIRP, 2000).

- Atualização de 2013: A revisão mais recente ajustou os limites térmicos da retina, considerando a dependência do tamanho da mancha (spot size) e a duração do pulso (ICNIRP, 2013b).
- Diferenciação de público: Ao contrário das normas para campos eletromagnéticos, as diretrizes para radiação óptica geralmente não diferenciam limites entre trabalhadores e o público em geral, uma vez que os limiares de lesão aguda são bem definidos (ICNIRP, 2013b).

2.6.3 Medidas de proteção e controle

A estratégia mais eficaz para garantir a segurança é o enclausuramento total do feixe *laser*, o que impede a exposição humana direta (ICNIRP, 1996; ICNIRP, 2013b). Quando o enclausuramento total não é viável, como em ambientes de pesquisa ou medicina, outras medidas são necessárias (ICNIRP, 1996; SIENKIEWICZ, 2013; SLINEY, 2021):

- Classificação: Os *lasers* são classificados (Classes 1 a 4) com base no seu potencial de dano.
- Equipamento de proteção individual (EPI): O uso de óculos de segurança específicos para o comprimento de onda da radiação emitida é obrigatório em situações onde há risco de exposição.
- Controles de engenharia: Barreiras parciais e dispositivos de intertravamento auxiliam na mitigação de riscos em ambientes industriais e médicos.

2.7 REGIMES OPERACIONAIS E TÉCNICAS AVANÇADAS

A versatilidade dos lasers provém de técnicas que manipulam a saída da cavidade para obter pulsos intensos ou curtos (YOUNG, 2000), tais como:

2.7.1 *Q-Switching*

O *Q-Switching* é uma propriedade que permite gerar pulsos de luz de altíssima intensidade e curta duração, geralmente na escala de nanossegundos (10^{-9} s). O termo deriva do "Fator de Qualidade" (Q) da cavidade de ressonância: inicialmente, o Q é mantido baixo (alta perda) por meio de um obturador ou absorvedor saturável, impedindo a emissão de luz enquanto o meio emissor acumula uma enorme quantidade de energia. Quando o Q é subitamente elevado, essa energia é liberada de uma só vez, resultando em um pulso de luz de alta intensidade (SVELTO, 2010). Na Medicina, essa propriedade é indispensável para a fototermólise seletiva de alvos microscópicos, como os pigmentos de tatuagens e melanossomos em lesões hiperpigmentadas, fragmentando o alvo sem dissipar calor excessivo para o tecido adjacente (BAGNATO, 2005; TRÍDICO & ANTONIO, 2021).

2.7.2 *Mode-locking*

Diferente do *Q-switching*, o *Mode-locking* é a propriedade utilizada para gerar pulsos "ultracurtos", atingindo as escalas de picossegundos (10^{-12} s) ou femtossegundos (10^{-15} s). Esse fenômeno ocorre quando os múltiplos modos longitudinais da cavidade *laser* são forçados a oscilar com uma relação de fase fixa entre si. A interferência construtiva desses modos resulta em um único pulso extremamente estreito que circula na cavidade, sendo parcialmente emitido a cada volta (CORREIA et al., 2020). Devido à sua duração de pulso inferior ao tempo de relaxação térmica das células, o *mode-locking* é a base dos *lasers* de femtossegundo usados em cirurgias refrativas de alta precisão e em pesquisas de espectroscopia ultrarrápida, permitindo avaliar reações químicas em tempo real (GOUN & GLUSAC, 2023).

2.8 APLICAÇÕES DOS LASERS

Os *lasers*, por diferenciarem-se das fontes ordinária de luz por possuírem três propriedades fundamentais: monocromaticidade (frequência única), coerência (fases sincronizadas) e colimação (baixa divergência) têm sido utilizadas em aplicações específicas.

2.8.1 Setor industrial: processamento de materiais e manufatura

Na indústria, os *lasers* são ferramentas de transferência de energia térmica. Os *lasers* de fibra revolucionaram a linha de produção por sua alta eficiência energética (cerca de 30%) e qualidade de feixe, sendo utilizados para (STEEN & MAZUMDER, 2010):

- **Corte e soldagem:** O feixe funde ou vaporiza o material enquanto um gás de assistência remove o excesso. A zona afetada pelo calor é mínima, o que evita deformações estruturais em peças de precisão.
- **Sinterização seletiva a *laser*:** No contexto da Indústria 4.0, o *laser* funde camadas de pó metálico ou polimérico para criar geometrias complexas impossíveis de serem obtidas por usinagem convencional.

2.8.2 Área da saúde

A interação *laser*-tecido é dependente do comprimento de onda da radiação emitida pelo *laser*. O *laser* pode ser usado como um "bisturi de luz" ou como um agente terapêutico (NIEMZ, 2019; MENDES et al., 2022):

- **Fotobiomodulação:** *lasers* de baixa potência são utilizados na Biomedicina (procedimentos estáticos), na Enfermagem (cicatrização de feridas), na Fisioterapia (tratamento de lesões musculoesqueléticas), na Medicina (procedimentos dermatológicos) e na Odontologia

(tratamento de doenças e condições clínicas da cavidade oral) devido aos seus efeitos em níveis molecular, celular e sistêmico.

- **Ablação e vaporização:** *lasers* de alta potência, como o *laser* de CO₂ e o *laser* Er:YAG emitem radiações que possuem alta afinidade pela água, sendo ideais para cirurgias de tecidos moles e remoção de cáries, minimizando o sangramento devido à cauterização simultânea.

2.8.3 Agricultura e meio ambiente

A modernização do campo, ou Agricultura 4.0, tem utilizado técnicas baseadas sensores fotônicos (SILVA, 2021):

- **Sensoriamento remoto:** sistemas a *laser* montados em aeronaves ou tratores criam mapas 3D do dossel das plantações, permitindo calcular a biomassa e identificar falhas de plantio.
- **Controle de pragas:** protótipos de "cercas de *laser*" estão sendo testados para identificar e neutralizar insetos ou ervas daninhas de forma seletiva, reduzindo o uso de defensivos químicos.

2.8.4 Setor de serviços e infraestrutura

Nesta área, os *lasers* são utilizados principalmente no transporte e na captura de dados (CHANDRASEKHAR, 2021):

- **Telecomunicações:** a infraestrutura global de internet depende de *lasers* diodos (como o *laser* de InGaAsP) que emitem radiação na faixa do infravermelho, transmitindo terabytes de dados por cabos de fibra óptica com atenuação mínima.
- **Metrologia e topografia:** *scanners* a *laser* terrestres permitem o levantamento de fachadas históricas ou a verificação de prumo em grandes edifícios com precisão milimétrica.

2.8.5 Entretenimento e visualização

A pureza espectral das radiações emitidas por *lasers* permite a criação de cores que a tecnologia LED ou lâmpadas não conseguem reproduzir (BACKES & CASANOVA, 2021):

- **Projeção RGB:** projetores de cinema de última geração utilizam três fontes *laser* (*Red*, *Green*, *Blue*), resultando no espaço de cor Rec. 2020, o mais próximo da visão humana.
- **Show de luzes:** a alta colimação permite que feixes *lasers* percorram quilômetros sem perder a nitidez, sendo essenciais em grandes eventos e sinalização aérea.

A tabela 3 resume os principais *lasers* e suas aplicações predominantes conforme discutido acima.

Tabela 3: *Lasers* e algumas de suas aplicações

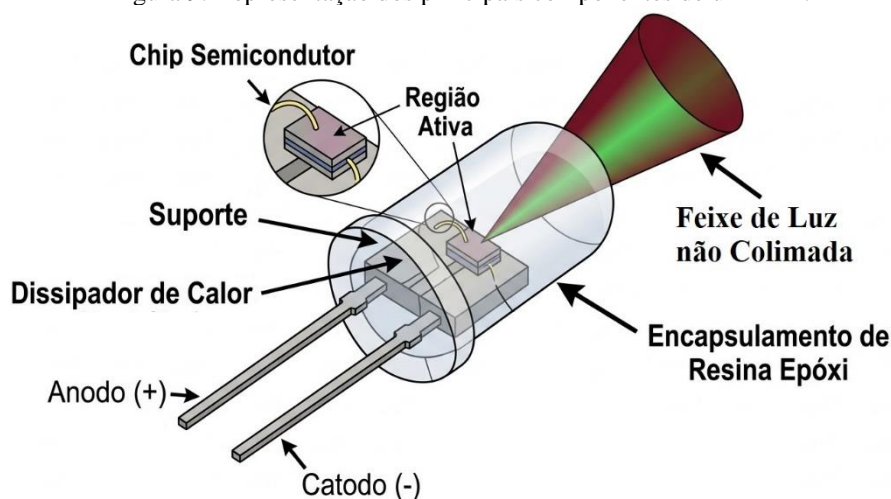
Laser	Comprimento de onda	Meio emissor	Aplicação principal	Setor
CO ₂	10,6 μm (infravermelho)	Mistura de gases	Corte de não-metals e cirurgia	Industrial/Saúde
Nd:YAG	1064 nm (infravermelho)	Cristal sólido	Soldagem e remoção de tatuagem	Industrial/Saúde
Fibra	1030 a 1080 nm (infravermelho)	Fibra dopada	Corte de metais de alta reflexão	Industrial
Diodo	405 a 980 nm (visível/infravermelho)	Semicondutor	Leitores de código e Telecom	Serviços
Argônio	488 a 514 nm (visível)	Gás ionizado	Fotocoagulação de retina	Saúde

CO₂: dióxido de carbono. Nd:YAG: granada de ítrio-alumínio dopada com neodímio. μm: micrômetro. nm: nanômetro.
Fonte: o autor.

2.8.5.1 LED (*light-emitting diode*)

Os LEDs, ou diodos emissores de luz, são dispositivos semicondutores que convertem energia elétrica diretamente em luz por meio de um fenômeno denominado eletroluminescência. Diferente das fontes de luz convencionais (incandescentes ou fluorescentes), o LED é uma tecnologia de estado sólido (*Solid-State Lighting - SSL*), o que confere maior durabilidade, eficiência energética e velocidade de resposta (SCHUBERT, 2006). A figura 9 é uma representação dos principais componentes de um LED: chip semicondutor, eletrodos, suporte, dissipador de calor e encapsulamento de resina.

Figura 9: Representação dos principais componentes de um LED.



Fonte: o autor.

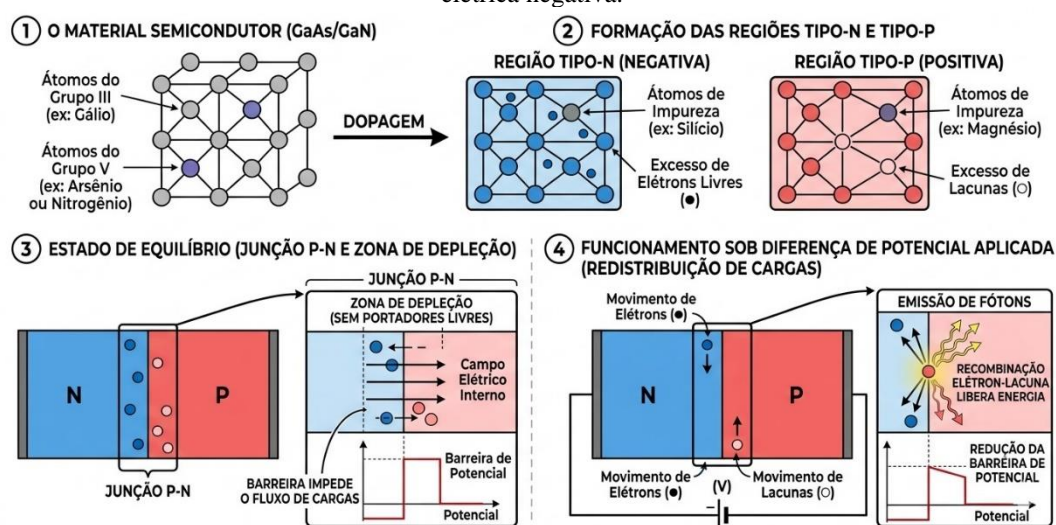
3 NATUREZA SEMICONDUTORA, DOPAGEM E JUNÇÃO P-N

A base de um LED é o material semicondutor, geralmente composto por elementos dos grupos III e V da tabela periódica (como o Arsenieto de Gálio - GaAs ou Nitreto de Gálio - GaN). Para que o dispositivo funcione, o cristal semicondutor passa por um processo de dopagem, onde impurezas são adicionadas para criar duas regiões distintas (RODRIGUES, 2012). A região tipo-N (negativa) possui

excesso de elétrons livres (portadores de carga negativa) e a região tipo-P (positiva) possui excesso de "lacunas" ou "buracos" (ausência de elétrons, que atuam como portadores de carga positiva).

A interface entre essas duas regiões é a junção P-N. Em equilíbrio, forma-se uma zona de depleção que impede o fluxo de cargas. No entanto, quando uma diferença de potencial é aplicada na junção P-N, a barreira de potencial é reduzida, permitindo que os elétrons e as lacunas se movam em direção à junção (ZUKAUSKAS; SHUR; GASKA, 2002). A figura 10 é uma representação da junção P-N de um LED contendo a estrutura do material semiconductor, a formação das regiões P e N, o estado de equilíbrio da junção P-N e a emissão de fótons.

Figura 10: Representação da junção P-N de um LED. P: portadores de carga elétrica positiva. N: portadores de carga elétrica negativa.



Fonte: o autor.

3.1 PROCESSO DE DOPAGEM

O processo de dopagem em um LED consiste na introdução deliberada de impurezas em um cristal semiconductor intrínseco para modificar suas propriedades elétricas e possibilitar a emissão de luz por meio da criação de portadores de carga elétrica (SCHUBERT, 2026). No semiconductor tipo-N, são adicionados átomos "doadores" que possuem elétrons excedentes em sua camada de valência, enquanto no semiconductor tipo-P, a inserção de átomos "aceitadores" gera lacunas ou "buracos", que atuam fisicamente como portadores de carga positiva (SILVA, 2018). Essa alteração da composição do meio é fundamental para a formação da junção P-N, pois estabelece o gradiente de concentração necessário para que, sob a aplicação de uma diferença de potencial elétrico, os elétrons e as lacunas migrem para a região ativa onde ocorre a recombinação radiativa (RODRIGUES, 2012). Em materiais optoeletrônicos avançados, como o nitreto de gálio (GaN), a precisão do processo de dopagem determina não apenas a condutividade do dispositivo, mas também a integridade do seu *bandgap*, influenciando diretamente a cor da luz emitida e a eficiência quântica do componente (SCHUBERT, 2006). O *bandgap* (ou banda proibida) é a diferença de energia entre a banda de valência (onde os

elétrons estão presos) e a banda de condução (onde se movem livremente) em um material sólido. É uma faixa energética proibida para elétrons, definindo se um material é um isolante, condutor ou semiconductor (HUDGINS, 2003). Assim, para criar um LED, o semiconductor puro é "dopado" com impurezas específicas (SILVA, 2018):

- Tipo-N (negativo): adiciona-se elementos que possuem elétrons extras em sua camada de valência (como o fósforo), criando uma região rica em elétrons livres.
- Tipo-P (positivo): Adiciona-se elementos com menos elétrons (como o boro), gerando "lacunas" ou "buracos", que se comportam como cargas positivas.

3.2 JUNÇÃO P-N

A junção P-N constitui elemento fundamental de um LED, sendo o local onde ocorre a conversão direta da energia dos portadores de carga elétrica em energia eletromagnética na forma de radiação eletromagnética. Estruturalmente, essa junção é formada pelo contato atômico entre um semiconductor dopado com impurezas do tipo-P e um semiconductor dopado com impurezas do tipo-N (LORENZ; MARQUES; MONTEIRO, 2015). Na interface, ocorre um processo de difusão, onde elétrons e lacunas migram para regiões opostas, estabelecendo uma região de carga espacial conhecida como zona de depleção. Esta zona gera um campo elétrico interno que resulta em uma barreira de potencial (V_{bi}), o que impede o fluxo contínuo de corrente em equilíbrio térmico (SÁ JUNIOR et al., 2007).

Para que o dispositivo emita luz, é necessária a aplicação de uma polarização direta, onde o potencial externo reduz a barreira de energia da junção, permitindo que os elétrons da banda de condução (lado N) e as lacunas da banda de valência (lado P) sejam injetados na região ativa. O fenômeno central que define o LED é a recombinação radiativa, na qual ao encontrar uma lacuna, o elétron transita de um estado de alta energia para um de baixa energia, liberando a diferença de energia na forma de um fóton (PIMPUTKAR et al., 2009). A energia desse fóton (E_f) é determinada pela *bandgap* (E_g) do material, conforme a equação Planck-Einstein:

$$E_g = h \nu = \frac{h \times c}{\lambda}$$

Onde:

h representa a constante de Planck ($6,62607015 \times 10^{-34}$ J.s), c a velocidade da luz no vácuo (299792458 m/s) e λ , o comprimento de onda da radiação emitida.

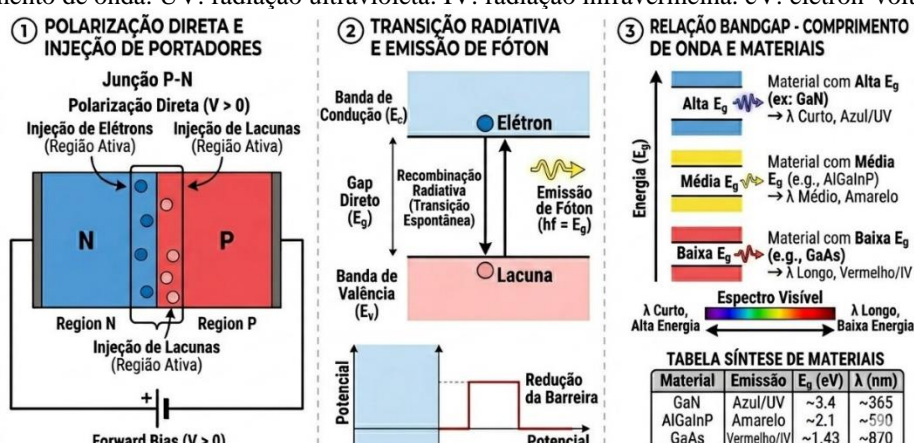
Diferente de diodos retificadores comuns feitos de silício (*gap* indireto), os LEDs utilizam semicondutores de *gap* direto, como o Nitreto de Gálio (GaN) ou Arsenieto de Gálio (GaAs), onde a conservação de momento linear favorece a emissão de radiação em detrimento da dissipação térmica (CHO et al., 2017).

A eficiência desse processo é ampliada em LEDs modernos através do uso de heterojunções e poços quânticos, camadas ultrafinas de diferentes materiais que confinam os portadores em uma região espacial extremamente restrita, aumentando a probabilidade de recombinação (LORENZ; MARQUES; MONTEIRO, 2015). Além da eficiência interna, a geometria do chip e o índice de refração dos materiais são cruciais para a "eficiência de extração", garantindo que os fótons gerados na junção P-N consigam escapar da estrutura semicondutora sem serem reabsorvidos ou refletidos internamente (CHO et al., 2017). Assim, a junção P-N não é apenas um ponto de contato, mas uma zona de engenharia de precisão que define o comprimento de onda (ou frequência) e a intensidade de radiação emitida, bem como, a vida útil da tecnologia de estado sólido.

4 ELETROLUMINESCÊNCIA

A eletroluminescência é o fenômeno físico fundamental que define o funcionamento de um LED, caracterizando-se pela emissão de luz resultante da passagem de uma corrente elétrica através de um material semicondutor sem a necessidade de aquecimento térmico prévio. Diferente da incandescência, onde a luz é um subproduto do calor, a eletroluminescência em dispositivos de estado sólido ocorre via recombinação radiativa de elétrons e lacunas (ou "buracos") dentro da junção P-N do LED (SCHUBERT, 2006). A figura 11 é uma representação do processo de eletroluminescência contendo a polarização dos portadores de carga elétrica, a transição radiativa e a relação *bandgap*-comprimento de onda da luz emitida pelo LED.

Figura 11: Representação do processo de eletroluminescência em um LED. P: portadores de carga elétrica positiva. N: portadores de carga elétrica negativa. V: potencial elétrico. E_c : energia da banda de condução. E_v : energia da banda de valência. E_g : energia da *bandgap*. GaN: nitreto de gálio. AlGaInP: fosfeto de alumínio, gálio e índio. GaAs: arsenieto de gálio. λ : comprimento de onda. UV: radiação ultravioleta. IV: radiação infravermelha. eV: elétron-volt. nm: nanômetro.



Fonte: o autor.

4.1 MECANISMO DE ELETROLUMINESCÊNCIA

O processo de eletroluminescência inicia quando o dispositivo é submetido a uma polarização direta, o que promove a injeção de elétrons da banda de condução para a região ativa da junção P-N, simultaneamente à injeção de lacunas provenientes da banda de valência. De acordo com a mecânica quântica, os elétrons ocupam estados de energia mais elevados, enquanto as lacunas representam estados de energia mais baixos. Quando um elétron encontra uma lacuna, ocorre uma transição espontânea para o estado de menor energia, "preenchendo" a lacuna (LORENZ; MARQUES; MONTEIRO, 2015).

Durante essa transição, a conservação de energia exige que a diferença energética entre a banda de condução e a banda de valência, a *bandgap* (E_g), seja liberada. Em semicondutores de *gap* direto, como o Nitreto de Gálio (GaN) ou o Arsenieto de Gálio (GaAs), essa energia é emitida predominantemente na forma de um fóton, de acordo com equação de Planck-Einstein (SÁ JUNIOR et al., 2007). Essa relação matemática explica porque o comprimento de onda (ou frequência) da radiação emitida é intrínseca à natureza química do material utilizado, tal que materiais com *bandgaps* maiores são capazes de emitir luz azul, violeta ou radiação ultravioleta, enquanto materiais com *bandgaps* menores emitem luz vermelha ou radiação infravermelha. A tabela 4 abaixo sintetiza os principais materiais utilizados na indústria optoeletrônica e suas respectivas características de emissão.

Tabela 4: Semicondutores, comprimentos de onda e *bandgap*.

Radiação	Comprimento de onda	<i>Bandgap</i>	Material semicondutor
Infravermelho	> 760 nm	< 1,63 eV	GaAs, AlGaAs
Vermelho	620 - 750 nm	1,65 - 2,00 eV	AlGaInP, GaAsP
Laranja	590 - 620 nm	2,00 - 2,10 eV	AlGaInP, GaAsP
Amarelo	570 - 590 nm	2,10 - 2,18 eV	AlGaInP, GaP
Verde	495 - 570 nm	2,18 - 2,50 eV	InGaN, GaP
Azul	450 - 495 nm	2,50 - 2,75 eV	InGaN, ZnSe
Violeta	400 - 450 nm	2,75 - 3,10 eV	InGaN
Ultravioleta	< 400 nm	> 3,10 eV	AlGaN, AlN

eV: elétron-volt. nm: nanômetro. GaAs: arsenieto de gálio. AlGaAs: arsenieto de gálio e alumínio. AlGaInP: fosfeto de alumínio, gálio e índio. GaAsP: fosfeto de arsenieto de gálio. GaP: fosfeto de gálio. InGaN: nitreto de gálio e índio.

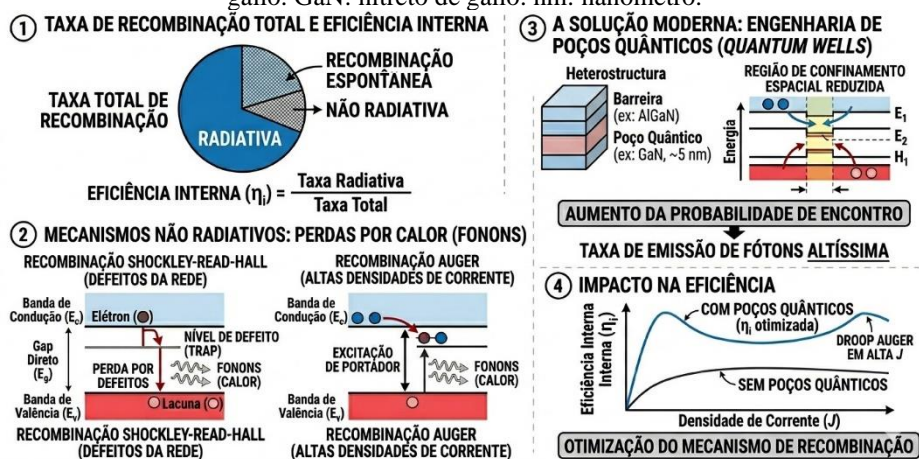
ZnSe: seleneto de zinco. AlN: nitreto de alumínio. Fonte: o autor.

4.2 RECOMBINAÇÃO RADIATIVA E RECOMBINAÇÃO NÃO RADIATIVA

Nem toda recombinação resulta em processo radiativo. O mecanismo de eletroluminescência compete diretamente com processos de recombinação não radiativa, como a recombinação Shockley-Read-Hall (causada por defeitos na rede cristalina) e a recombinação Auger (predominante em densidades de corrente muito elevadas), onde a energia é dissipada na forma de calor (fonons) (KRAMES et al., 2007). A eficiência interna de um LED (η_i) é, portanto, a razão entre a taxa de recombinações radiativas e a taxa total de recombinações. Para otimizar esse mecanismo, a engenharia moderna utiliza poços quânticos (*quantum wells*), que são camadas ultra-delgadas de semicondutores

inseridas na junção para confinar os portadores em uma região espacial reduzida, aumentando drasticamente a probabilidade de encontro entre elétrons e lacunas e, conseqüentemente, a taxa de emissão de fótons (PIMPOTKAR et al., 2009). A figura 12 é uma representação dos processos de recombinação radiativa e recombinação não radiativa em uma junção P-N.

Figura 12: Representação dos processos de recombinação radiativa e recombinação não radiativa em uma junção P-N. E_c : energia da banda de condução. E_v : energia da banda de valência. E_g : energia da *bandgap*. AlGaIn: nitreto de alumínio e gálio. GaN: nitreto de gálio. nm: nanômetro.



Fonte: o autor.

A evolução dos LEDs, de simples indicadores coloridos para fontes de iluminação de alta potência, deve-se fundamentalmente à transição das homojunções para as heterojunções e ao desenvolvimento de poços quânticos. Enquanto uma junção P-N convencional (homojunção) utiliza o mesmo material semiconductor em ambos os lados, as heterojunções combinam materiais com diferentes *bandgaps*, permitindo um controle sem precedentes sobre o confinamento de portadores de carga e a extração de luz (KROEMER, 2001).

O conceito de dupla heteroestrutura, proposto independentemente por Herbert Kroemer e Zhores Alferov, resolveu o maior problema das homojunções: a baixa eficiência de recombinação. Em uma homojunção, os elétrons e lacunas podem se difundir para longe da interface antes de se recombinarem. Na heteroestrutura, uma camada ativa de material com *bandgap* menor (como o InGaIn) é "ensanduichada" entre duas camadas de material com *bandgap* maior (como o GaN) (CHO et al., 2017). Essa configuração cria poços de potencial que capturam tanto elétrons quanto lacunas em uma região espacial extremamente estreita. Esse confinamento aumenta drasticamente a probabilidade de recombinação radiativa, elevando a eficiência quântica interna do dispositivo (NAKAMURA, 1994). Além disso, as camadas adjacentes de maior *bandgap* atuam como janelas transparentes, permitindo que os fótons gerados escapem sem serem reabsorvidos pelo próprio material (KRAMES et al., 2007).

A eficiência de um LED não depende apenas da capacidade de gerar fótons dentro da junção P-N (eficiência quântica interna), mas também da capacidade de fazer com que esses fótons escapem

para o ambiente externo. Esse desafio é conhecido como eficiência de extração de luz (*LEE - light extraction efficiency*) e representa um dos maiores obstáculos da engenharia optoeletrônica devido às propriedades ópticas inerentes aos semicondutores (KRAMES et al., 2007).

O problema fundamental reside no alto índice de refração (n) dos materiais semicondutores. Por exemplo, o Nitreto de Gálio (GaN) possui um índice de refração de aproximadamente 2,4, enquanto o ar possui índice de refração 1,0. De acordo com a Lei de Snell, quando a luz tenta passar de um meio mais denso para um menos denso, ocorre desvio. Se o ângulo de incidência for superior ao ângulo crítico, ocorre o fenômeno da reflexão interna total, onde o fóton é refletido de volta para o interior do chip e acaba sendo reabsorvido, transformando-se em calor (SCHUBERT, 2006). Para o GaN, o cone de escape é de apenas cerca de 25° , o que significa que, sem intervenção, apenas uma fração mínima da radiação gerada conseguiria sair do dispositivo.

Para mitigar esse "aprisionamento" de fótons, utiliza estratégias avançadas:

- Encapsulamento hemisférico: A utilização de cúpulas de resina epóxi ou silicone com índices de refração intermediários ($n \cong 1,5$) entre o chip e o ar aumenta o ângulo crítico, facilitando a saída da luz (LORENZ; MARQUES; MONTEIRO, 2015).
- Texturização de superfície: Através de processos químicos ou físicos (como o *etching*), a superfície do chip é tornada rugosa ou padronizada em escala micrométrica. Isso altera o ângulo de incidência dos fótons em cada reflexão, aumentando estatisticamente a chance de o fóton encontrar a superfície dentro do cone de escape (CHO et al., 2017).
- Geometria do chip: Em vez de formatos cúbicos simples, muitos LEDs de alta potência são fabricados em formas de pirâmides truncadas ou com cantos chanfrados, o que redireciona a luz interna para as faces de saída (KRAMES et al., 2007).
- Cristais fotônicos: Estruturas periódicas em nanoescala são gravadas na superfície para manipular a difração da luz e eliminar modos guiados que ficariam presos no material (PIMPUTKAR et al., 2009).

Essas estratégias utilizadas em micro e nanofabricação têm permitido aumentar a eficiência de emissão de radiação em LEDs, o que consolidou os LEDs como as fontes de luz mais eficientes já criadas pela humanidade (CHO et al., 2017).

5 HISTÓRICO

A história do desenvolvimento dos LEDs é uma jornada fascinante que atravessa mais de um século, evoluindo de uma curiosidade de laboratório de pesquisa para as mais diversas aplicações em diferentes áreas de atividade humana. Diferente das lâmpadas incandescentes de Thomas Edison, que dependiam do calor, o LED nasceu da exploração das propriedades quânticas dos semicondutores.

5.1 DA DESCOBERTA A ELETROLUMINESCÊNCIA AO LED AZUL

O marco inicial da eletroluminescência ocorreu em 1907, quando o experimentador britânico Henry Joseph Round, nos laboratórios da Marconi, observou a emissão de uma luz amarelada ao aplicar tensão em um cristal de carbeto de silício (SiC). Embora Round tenha documentado o fenômeno, ele não buscou uma explicação física profunda (SÁ JUNIOR et al., 2007). Foi apenas em 1927 que o inventor russo Oleg Losev publicou o primeiro estudo detalhado sobre o fenômeno em um artigo intitulado "*Luminous Carborundum Detector and Detection with Crystals*", prevendo que esses dispositivos poderiam ser usados como fontes de luz fria de estado sólido (ZUKAUSKAS; SHUR; GASKA, 2002).

A tecnologia permaneceu em relativo hiato até a década de 1950, com o avanço da física de semicondutores e o desenvolvimento de compostos III-V. Em 1962, o engenheiro Nick Holonyak Jr., trabalhando na General Electric, desenvolveu o primeiro LED de espectro visível (vermelho) utilizando fosfeto de arsenieto de gálio (GaAsP) (SCHUBERT, 2006). Por esse feito, Holonyak é frequentemente chamado de "o pai do LED". Durante a década de 1970, novos materiais permitiram a criação de cores adicionais, como o laranja e o amarelo, além de melhorias significativas na eficiência luminosa (LORENZ; MARQUES; MONTEIRO, 2015).

O grande "Santo Graal" da indústria, contudo, era o LED azul. Sem ele, era impossível criar a luz branca necessária para substituir a iluminação residencial. O desafio era técnico: o nitreto de gálio (GaN), material promissor para o azul, era extremamente difícil de cultivar em cristais de alta qualidade e quase impossível de dopar como tipo-P (CHO et al., 2017). A superação desse obstáculo veio apenas nos anos 1990, através dos esforços de Isamu Akasaki, Hiroshi Amano e Shuji Nakamura. Eles desenvolveram métodos para cultivar cristais de GaN sobre safira e ativaram a dopagem tipo-P, permitindo a fabricação de LEDs azuis de alto brilho. Essa descoberta foi tão importante que rendeu aos três o Prêmio Nobel de Física em 2014 (PIMPUTKAR et al., 2009).

Com o LED azul disponível, a geração de luz branca tornou-se uma realidade comercial através do uso de fósforos conversores (geralmente YAG:Ce) aplicados sobre o chip azul. Desde então, a história do LED tem sido uma corrida de eficiência e redução de custos, transformando-o na tecnologia de iluminação mais sustentável e versátil da história da humanidade (CHO et al., 2017).

5.2 O LED AZUL E O PRÊMIO NOBEL

Até o início da década de 1990, LEDs vermelhos e verdes já eram comerciais, mas a criação de um LED azul eficiente permanecia um desafio na optoeletrônica. O desafio residia na dificuldade de cultivar cristais de Nitreto de Gálio (GaN) de alta qualidade e na impossibilidade, até então, de realizar a dopagem tipo-P de forma eficaz (AKASAKI; AMANO, 2006).

O avanço premiado com o Nobel de Física em 2014 veio através do trabalho de Isamu Akasaki, Hiroshi Amano e Shuji Nakamura. Eles superaram esses obstáculos utilizando técnicas como o crescimento de camadas de amortecimento de AlN e a ativação térmica de aceitadores de Magnésio (Mg). Nakamura, especificamente, aperfeiçoou o uso dos poços quânticos de Nitreto de Índio e Gálio (InGaN) (NAKAMURA, 1991). Ao ajustar a fração de índio na liga de InGaN, foi possível sintonizar a emissão para o espectro azul com brilho sem precedentes. A invenção foi revolucionária porque, ao combinar a luz azul com fósforos conversores (ou com LEDs vermelhos e verdes), tornou-se possível gerar a luz branca, substituindo as lâmpadas incandescentes e fluorescentes (PIMPOTKAR et al., 2009).

A implementação de múltiplas heterojunções (MQW - *Multiple Quantum Wells*) permitiu que os LEDs modernos atingissem eficiências luminosas superiores a 200 lm/W. Diferente das fontes térmicas, onde a maior parte da energia é desperdiçada como radiação infravermelha, a engenharia de heterojunções permite que quase cada elétron injetado resulte na emissão de um fóton visível, consolidando o LED como a tecnologia de iluminação mais sustentável da atualidade (KRAMES et al., 2007).

6 CLASSIFICAÇÃO DOS LEDs

A classificação dos LEDs evoluiu de simples indicadores luminosos para categorias complexas que abrangem desde a física de materiais até requisitos normativos de desempenho. De acordo com a ABNT IEC/TS 62504 (2013), que estabelece os termos e definições para LEDs na iluminação geral, o dispositivo é classificado primordialmente por sua estrutura física e função no sistema luminoso, diferenciando entre o "LED pacote" (o componente individual), o "módulo de LED" e a "luminária LED" completa. Historicamente, essa classificação acompanhou a descoberta de novos materiais semicondutores, permitindo a transição de dispositivos de baixa potência para os atuais *power* LEDs de alto fluxo luminoso (SÁ JUNIOR et al., 2007).

6.1 CLASSIFICAÇÃO POR ESPECTRO E MATERIAL SEMICONDUTOR

A classificação mais fundamental de um LED ocorre pelo seu comprimento de onda (λ), que é determinado pelo hiato de energia (*bandgap*) do material. Segundo Schubert (2006), os LEDs são categorizados em três grandes grupos (CHO et al., 2017; KRAMER; LUDWIG, 2017):

- Infravermelho: Utilizam Arsenieto de Gálio (GaAs) e são essenciais para sensores e controles remotos.
- Visível: Abrange o espectro de 380 nm a 780 nm. Os LEDs vermelhos e amarelos se baseiam em ligas de AlInGaP, enquanto os azuis e verdes de alta eficiência utilizam InGaN.

- Ultravioleta: Classificados em UV-A, UV-B e UV-C, baseados em Nitreto de Alumínio e Gálio (AlGaIn), com aplicações crescentes em esterilização e cura industrial.

6.2 CLASSIFICAÇÃO POR POTÊNCIA, ENCAPSULAMENTO E TECNOLOGIA DE MONTAGEM

Com o avanço da eficiência de extração, a classificação por potência tornou-se crucial para o design de luminárias. Os LEDs são divididos entre LEDs de sinalização/indicadores (baixa corrente elétrica, tipicamente 20 mA) e LEDs de Iluminação (*power LEDs*), que operam com correntes de centenas de miliamperes e exigem sistemas de gerenciamento térmico integrados (KRAMES et al., 2007).

Quanto à montagem, a indústria classifica-os conforme o tipo de encapsulamento (LORENZ; MARQUES; MONTEIRO, 2015; CHO et al., 2017):

- *Through-hole*: O modelo clássico com terminais longos.
- SMD (*surface mount device*): Montados diretamente na superfície da placa de circuito, permitindo miniaturização e melhor dissipação.
- COB (*chip-on-board*): Múltiplos chips montados em um único substrato cerâmico ou metálico, criando uma fonte de luz única e densa, eliminando o efeito de "múltiplas sombras" comum em arranjos SMD.

6.3 CLASSIFICAÇÃO POR EMISSÃO DE LUZ BRANCA E SISTEMAS DE CONTROLE

A classificação dos LEDs brancos também é feita pela forma como a luz é gerada. A categoria predominante é a dos LEDs convertidos por fósforo (PC-LEDs), onde um chip azul é revestido com fósforo para gerar o espectro branco. Alternativamente, os LEDs RGB (*red-green-blue*) são classificados como sistemas *multichip* que misturam as cores primárias para obter o branco ou cores dinâmicas (PIMPUTKAR et al., 2009). Normas como a LM-80 e a IES TM-21 são utilizadas para classificar a manutenção do fluxo luminoso e a vida útil desses dispositivos, garantindo que o envelhecimento dos materiais de encapsulamento não comprometa a estabilidade da cor (SÁ JUNIOR et al., 2007).

7 PARÂMETROS DE IRRADIAÇÃO DOS LEDs

A caracterização dos parâmetros de irradiação dos LEDs é fundamental para aplicações que transcendem a iluminação convencional, como a fotobiomodulação, a cura de polímeros e a agricultura de precisão. Diferente da fotometria, que se baseia na resposta visual humana (lúmens), a radiometria se baseia na energia transportada pelos fótons, sendo regida por grandezas que descrevem a potência, a distribuição espacial e a densidade energética (SCHUBERT, 2006).

7.1 POTÊNCIA RADIANTE E IRRADIÂNCIA

O parâmetro inicial é o Fluxo Radiante ou Potência Radiante (P), aferido em Watts (W). Este parâmetro representa a energia total (E) emitida pelo chip semiconductor por unidade de tempo (t) em todas as direções.

$$P = \frac{E}{t}$$

No entanto, para a maioria das aplicações práticas, o parâmetro mais relevante é a Irradiância (I), que define a densidade de potência radiante (P) incidente sobre a área (A) da superfície irradiada, expressa em W/m^2 ou, mais comumente em contextos médicos e laboratoriais, em mW/cm^2 (KRAMER; LUDWIG, 2017).

$$I = \frac{P}{A}$$

A irradiância é inversamente proporcional ao quadrado da distância (d) entre a fonte e o alvo, seguindo a Lei do Inverso do Quadrado, embora para LEDs com lentes colimadoras ou em distâncias muito curtas (campo próximo), essa relação exija correções geométricas (SÁ JUNIOR et al., 2007).

$$I \propto \frac{1}{d^2}$$

7.2 DOSIMETRIA E FLUÊNCIA

Em processos onde a luz interage com a matéria de forma acumulativa, como na terapia por luz (fototerapia) ou na síntese química, utiliza-se a Fluência ou Dose Radiante (F). Este parâmetro quantifica a energia total (E) entregue por unidade de área (A) ao longo de um tempo de exposição.

$$F = \frac{E}{A}$$

Este parâmetro tem sido utilizado como parâmetro de dose e a unidade é o Joule por centímetro quadrado (J/cm^2). A precisão neste cálculo é crítica, pois respostas biológicas e químicas costumam seguir uma curva bifásica, onde uma dose insuficiente não gera efeito e uma dose excessiva pode causar danos térmicos ou inibição celular (HUANG et al., 2011).

7.3 DISTRIBUIÇÃO ESPECTRAL E INTENSIDADE

Outro parâmetro físico essencial é a Irradiância Espectral, que descreve a potência radiante (P) por unidade de área (A) e por unidade de comprimento de onda (λ), sendo aferida em $W/m^2 \times nm$. Devido à natureza semicondutora do LED, a emissão ocorre em uma banda estreita definida (o *bandgap* do material), apresentando uma Largura Espectral à Meia Altura (*full width at half maximum* - FWHM) típica de 20 a 50 nm (LORENZ; MARQUES; MONTEIRO, 2015).

Por fim, a Intensidade Radiante (I_r), aferida em Watts por esterradiano (W/sr), descreve como a energia é distribuída angularmente. LEDs modernos utilizam lentes primárias e secundárias para controlar o ângulo de abertura (*beam angle*), concentrando a irradiação em feixes estreitos para maximizar a irradiância no alvo ou distribuindo-a de forma Lambertiana para uniformidade de cobertura (SCHUBERT, 2006).

$$I_r = \frac{P}{\Omega}$$

Sendo P a potência e Ω o ângulo sólido.

7.4 TEMPO NECESSÁRIO PARA ATINGIR UMA DOSE ESPECÍFICA

Para calcular o tempo de exposição necessário para atingir uma dose específica, utilizamos a relação fundamental da dosimetria óptica. O cálculo é direto, mas exige atenção às unidades de medida para evitar erros comuns de subdosagem ou sobredosagem. A fórmula básica deriva da definição de fluência (F), onde o tempo (t) é a razão entre a dose (fluência) desejada (F) e a irradiância da fonte (I) na superfície do alvo (KRAMER; LUDWIG, 2017).

$$t = \frac{F}{I}$$

Sendo t é o tempo em segundos (s), F é a dose (fluência) em Joules por centímetro quadrado (J/cm^2) e I é a irradiância em Watts por centímetro quadrado (W/cm^2).

Na prática laboratorial e clínica, os LEDs costumam ter sua irradiância expressa em miliwatts (mW/cm^2), sendo $1 mW = 0,001 W$ (HUANG et al., 2011).

Exemplo:

Se você deseja aplicar uma dose de $6 J/cm^2$ utilizando um LED que entrega uma irradiância de $50 mW/cm^2$ na distância de tratamento:

- Converta a irradiância: $50 \text{ mW/cm}^2 = 0,050 \text{ W/cm}^2$.
- Aplique a equação acima: $t = 6/0,050 = 120 \text{ s}$.
- Resultado: O tempo de exposição deve ser de 2 minutos.

É importante notar que a irradiância não é constante se a distância entre o LED e o alvo mudar. De acordo com a Lei do Inverso do Quadrado, se você dobrar a distância, a irradiância cairá para um quarto do valor original, exigindo que o tempo de exposição seja quadruplicado para manter a mesma dose (SÁ JUNIOR et al., 2007). Além disso, em protocolos de alta precisão, deve-se considerar a irradiância média sobre a área de interesse, e não apenas o ponto central de maior intensidade (*hot spot*), para garantir a uniformidade da entrega energética (LORENZ; MARQUES; MONTEIRO, 2015).

8 APLICAÇÕES DO LEDs

A versatilidade dos LEDs transformou esses dispositivos em uma das tecnologias mais importantes do século XXI. Devido à sua alta eficiência energética, vida útil prolongada e, crucialmente, à capacidade de controle espectral preciso, as aplicações dos LEDs foram expandidas para além da simples sinalização, atingindo setores críticos como a saúde, a agricultura de precisão e a comunicação de dados de alta velocidade (CHO et al., 2017).

8.1 ILUMINAÇÃO GERAL E PÚBLICA

A aplicação mais onipresente é a iluminação de estado sólido. A transição para o LED na iluminação pública e residencial foi impulsionada pela redução drástica no consumo de energia elétrica e pela melhoria na reprodução de cor. Diferente das lâmpadas de vapor de sódio, os LEDs permitem o ajuste da temperatura de cor correlacionada, melhorando a visibilidade e a segurança em ambientes urbanos (SÁ JUNIOR et al., 2007). Além disso, a integração com sistemas de "Smart Cities" permite a dimerização dinâmica, otimizando o consumo conforme o fluxo de pedestres e veículos (PIMPULKAR et al., 2009).

8.2 SAÚDE

Na Saúde, os LEDs são protagonistas em protocolos terapêuticos baseados na chamada Fotobiomodulação, que é utilizada para tratamento de diversas doenças e condições clínicas. O uso de radiações de comprimentos de onda específicos (especialmente no vermelho e infravermelho próximo) é empregado para acelerar a cicatrização de feridas, reduzir inflamações e tratar dores crônicas, devido aos seus efeitos moleculares, celulares e sistêmicos (HUANG et al., 2011). Outra aplicação importante é a Fototerapia neonatal, onde LEDs azuis são usados para tratar a icterícia em recém-nascidos,

convertendo a bilirrubina em formas solúveis em água de maneira mais eficiente e segura do que as lâmpadas fluorescentes tradicionais (KRAMER; LUDWIG, 2017).

8.3 HORTICULTURA E AGRICULTURA DE PRECISÃO

A agricultura em ambientes controlados (fazendas verticais) utiliza LEDs para criar "receitas de luz" customizadas. Como as plantas absorvem principalmente luz nas bandas do azul e do vermelho para a fotossíntese, os LEDs permitem otimizar o crescimento vegetal, alterando o sabor, a textura e o tempo de colheita sem o uso de defensivos químicos (MASSA et al., 2008). Essa aplicação é fundamental para a segurança alimentar em áreas urbanas densas e para futuras missões espaciais de longa duração.

8.4 COMUNICAÇÃO DE DADOS (LI-FI)

Uma aplicação emergente e altamente tecnológica é o Li-Fi (*light fidelity*). Através da modulação rápida da intensidade da luz (imperceptível ao olho humano), os LEDs podem transmitir dados em velocidades superiores ao Wi-Fi convencional. Por não utilizarem radiofrequência, são ideais para ambientes sensíveis a interferências eletromagnéticas, como hospitais e cabines de aeronaves (HAAS, 2011).

8.5 ESTERILIZAÇÃO E DESINFECÇÃO

Recentemente, os LEDs UVC (ultravioleta C) ganharam destaque na sanitização de água, ar e superfícies. Eles são capazes de inativar microrganismos, incluindo vírus e bactérias, pois causam danos em biomoléculas importantes, como o DNA, proteínas e lipídeos. Comparados às lâmpadas de mercúrio, os LEDs UVC são livres de metais pesados, mais compactos e permitem acionamento instantâneo, facilitando a integração em purificadores domésticos e sistemas de ventilação (KRAMER; LUDWIG, 2017).

9 SEGURANÇA

A segurança na implementação da tecnologia LED transcende à proteção elétrica convencional, abrangendo riscos fotobiológicos complexos decorrentes da radiação óptica não ionizante e efeitos sistêmicos no organismo humano. O principal referencial normativo global para a avaliação desses riscos é a norma IEC 62471, adotada no Brasil como ABNT NBR IEC 62471, que estabelece diretrizes para a classificação de lâmpadas e sistemas de iluminação quanto à segurança para a pele e, principalmente, para os olhos (IEC, 2014). Esta norma categoriza os dispositivos em quatro Grupos de Risco (RG): Isento (sem risco), RG1 (Baixo Risco), RG2 (Risco Moderado) e RG3 (Alto Risco),

baseando-se nos limites de emissão e no tempo máximo de exposição segura antes que ocorram danos fotoquímicos ou térmicos (SLINEY, 2016).

Um dos focos mais críticos na literatura científica contemporânea é o chamado Risco de Luz Azul (*Blue Light Hazard*). Diferente das lâmpadas incandescentes tradicionais, a maioria dos LEDs brancos utiliza um chip azul de Nitreto de Gálio (GaN) com conversão por fósforo, o que gera um pico emissão na faixa de comprimento de onda 435 nm a 465 nm. A exposição direta e prolongada a essa radiação pode induzir estresse oxidativo nas células do epitélio pigmentado da retina, contribuindo para processos de degeneração macular (BEHAR-COHEN et al., 2011). Por essa razão, a norma exige que dispositivos classificados como RG2 ou superiores possuam símbolos de advertência claras e restrições quanto à distância mínima de visualização, visando prevenir lesões permanentes.

No âmbito da segurança elétrica e funcional, os LEDs devem cumprir requisitos rigorosos de isolamento e gerenciamento térmico, regidos por normas como a IEC 62031 (para módulos LED) e a IEC 60598 (para luminárias). Como os LEDs são extremamente sensíveis à temperatura, a falha no projeto do dissipador de calor pode levar não apenas à alteração na emissão da luz, mas também a riscos de incêndio ou falhas catastróficas do *driver* elétrico (SÁ JUNIOR et al., 2007). Além disso, a Compatibilidade Eletromagnética (EMC), tratada pela norma CISPR 15, é vital para garantir que a alta frequência de chaveamento dos *drivers* de LED não interfira em outros equipamentos eletrônicos sensíveis, como dispositivos médicos ou redes de comunicação (IEC, 2026).

Recentemente, a discussão sobre segurança expandiu-se para os efeitos não visuais (circadianos). A exposição à luz azul durante o período noturno pode causar a supressão da melatonina, desregulando o ciclo sono-vigília e impactando o metabolismo humano. Estudos científicos sugerem que a "segurança" do LED deve agora ser avaliada de forma abrangente, considerando não apenas o dano agudo à retina, mas os efeitos crônicos da exposição à temperatura de cor inadequada em horários impróprios (BEHAR-COHEN et al., 2011). Portanto, a conformidade com as normas ABNT e IEC é a garantia de que o dispositivo foi testado contra danos imediatos, mas a aplicação correta em projetos luminotécnicos é o que assegura o bem-estar biológico a longo prazo.

10 COMPARANDO LASERS E LEDs

A tabela 5 a seguir compara os *lasers* e os LEDs, detalhando seus princípios de funcionamento, os parâmetros de irradiação e as aplicações.

Tabela 5: Comparação entre *lasers* e LEDs quanto aos seus princípios de funcionamento, parâmetros de irradiação e aplicações.

Item	Lasers	LEDs
Princípios de funcionamento	Emissão estimulada; inversão de população; meio emissor sólido, líquido ou gasoso; cavidade de ressonância óptica (cavidades) para amplificação e feedback.	Eletroluminescência; meio emissor sólido; emissão de luz pela recombinação radiativa de elétrons e lacunas em uma junção semicondutora P-N.
Parâmetros de irradiação	Comprimento de onda (nm); frequência (Hz); energia (J); potência (W); fluência (J/cm ²); irradiância (mW/cm ²); diâmetro do feixe (cm); modo de emissão (contínuo ou pulsado).	Potência radiante (W); irradiância (mW/cm ²); fluência (J/cm ²); largura espectral (FWHM de 20-50 nm); intensidade radiante (W/sr).
Aplicações	Corte e soldagem industrial; microcirurgia ocular (LASIK); tratamentos dermatológicos (psoríase); interferometria; holografia; comunicações ópticas.	Iluminação pública e residencial; fotobiomodulação; fototerapia neonatal; agricultura de precisão; esterilização (UVC).
Segurança	Classificados de 1 a 4 com base no risco biológico; podem causar danos oculares graves e queimaduras térmicas acidentais se a irradiância não for controlada.	Regidos por rigorosos parâmetros de dosimetria para mitigar riscos de danos térmicos ou fotoquímicos e evitar a inibição celular por doses excessivas.

Fonte: o autor.

11 CONCLUSÃO

Os *lasers* e os LEDs representam marcos fundamentais na aplicação prática da mecânica quântica e da termodinâmica para o controle da emissão de radiações eletromagnéticas. Embora compartilhem a base tecnológica dos semicondutores, como observado nos diodos *laser* e nos dispositivos de estado sólido dos LEDs, as duas fontes distinguem-se primordialmente pelos seus mecanismos de emissão e pelas propriedades físicas da luz gerada.

Os *lasers* estão fundamentados na emissão estimulada, um processo que exige a subversão da estatística de Boltzmann por meio da inversão de população e o uso de ressonadores ópticos para permitir o feedback e a amplificação da emissão de luz. Esse mecanismo resulta em um feixe de alta coerência temporal e espacial, monocromaticidade rigorosa e elevada direcionalidade, características essenciais para aplicações de precisão, como a microcirurgia ocular e o corte industrial.

Por outro lado, os LEDs operam sob o princípio da eletroluminescência, onde a luz é emitida pela recombinação radiativa de elétrons e lacunas em uma junção semicondutora P-N. Diferente dos *lasers*, os LEDs emitem luz predominantemente incoerente e com uma distribuição espacial mais ampla, embora possuam uma largura espectral relativamente estreita (20 a 50 nm) comparada a fontes

térmicas convencionais de luz. Sua evolução, impulsionada por heterojunções e poços quânticos, consolidou-os como fontes de alta eficiência energética para iluminação sustentável e aplicações na área da saúde.

Apesar dessas diferenças de ordem física e estrutural, ambas as tecnologias convergem na necessidade de um controle rigoroso da dosimetria. Tanto *lasers* quanto LEDs são regidos pelos mesmos parâmetros de irradiação, como irradiância e fluência, para mitigar riscos biológicos de danos térmicos ou fotoquímicos e garantir a segurança ocupacional. Assim, enquanto o *laser* se destaca pela densidade energética e precisão espacial, o LED sobressai pela versatilidade e sustentabilidade, formando um espectro complementar de ferramentas em diferentes áreas de atividade humana.

REFERÊNCIAS

AKASAKI, I.; AMANO, H. Breakthroughs in Improving Crystal Quality of GaN and Invention of the p-n Junction Blue-Light-Emitting Diode. **Japanese Journal of Applied Physics**, v. 45, n. 12, p. 9001-9010, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT IEC/TS 62504**: termos e definições para LED e os módulos de LED de iluminação geral. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

BACKES, A. R.; CASANOVA, D. **Introdução à Visão Computacional e Processamento de Imagens**. Rio de Janeiro: LTC, 2021.

BAGNATO, V. S. **Fundamentos do laser**. São Carlos: Instituto de Física de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2001.

BAGNATO, V. S. **Lasers e suas aplicações em odontologia e medicina**. Rio de Janeiro: Livraria e Editora Revinter Ltda, 2005.

BAROLET, D. Photobiomodulation in Dermatology: Harnessing Light from Visible to Near Infrared. **Journal of Medical Research and Archives**, v. 6, n. 1, 2018.

BEHAR-COHEN, F. et al. Light-emitting diodes (LED) for domestic lighting: any risks for the eye? **Progress in Retinal and Eye Research**, v. 30, n. 4, p. 239-257, 2011.

CATORZE, M. G. Laser: fundamentos e indicações em dermatologia. **Medicina Cutânea Ibero-Latino-Americana**, v. 37, n. 1, p. 5-27, 2009.

CHANDRASEKHAR, S. **Fiber-Optic Communications Systems**. 4. ed. New Jersey: Wiley, 2021.

CHAVES, M. E. A. et al. Efeitos do laser de baixa intensidade na cicatrização de feridas: revisão de literatura. **Fisioterapia em Movimento**, v. 27, n. 3, p. 477-484, 2014.

CHAVES, M. E. A. et al. LED phototherapy improves healing of nipple trauma: a pilot study. **Photomedicine and Laser Surgery**, v. 34, n. 1, p. 39-42, 2016.

CHO, J.; PARK, J. H.; KIM, J. K.; SCHUBERT, E. F. White light-emitting diodes: history, progress, and future. **physica status solidi (a)**, v. 214, n. 8, p. 1700357, 2017.

CORREIA, M. M. et al. Laser Sintonizável em Regime Mode-Locking Harmônico (HML) em Cavidade em Figura-de-Oito. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TELECOMUNICAÇÕES E PROCESSAMENTO DE SINAIS, 37., 2019, Petrópolis. **Anais...** Petrópolis: Sociedade Brasileira de Telecomunicações, 2020.

DEMARTIN JR., J. **Relógios atômicos tipo chafariz no Brasil**. 2014. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

DUARTE, F. J.; HILLMAN, L. W.; LIAO, P. F.; KELLEY, P. **Dye Laser Principles: with applications (Quantum Electronics - Principles and Applications)**. 1. ed. New York: Academic Press, 1990.

CHANG, W. S. C. **Principles of Lasers and Optics**. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.

EINSTEIN, A. On the Quantum Theory of Radiation. In: KNIGHT, P. L.; ALLEN, L. (ed.). **Concepts of Quantum Optics**. [S. l.]: Pergamon, 1983. p. 93-104.

EINSTEIN, A. **On the quantum theory of radiation**: a detective story. Seattle: University of Washington, 2001.

EL ARABI, Y.; HALI, F.; CHIHEB, S. Laser Management and Safety in Dermatology. **Cureus**, v. 16, n. 6, e25991, 2022.

GIANFALDONI, S. et al. An Overview of Laser in Dermatology: the past, the present and ... the Future (?). **Open Access Macedonian Journal of Medical Sciences**, v. 5, n. 4, p. 526-530, 2017.

GOUN, A.; GLUSAC, K. D. Ultrafast Laser Pulse Generation by Mode Locking: MATLAB-Based Demonstrations. **Journal of Chemical Education**, v. 100, n. 2, p. 955-961, 2023.

HAAS, H. High-speed wireless networking using visible light. **SPIE Newsroom**, 2011.

HECHT, E. **Optics**. 5. ed. Boston: Pearson, 2016.

HENDERSON, R.; SCHULMEISTER, K. **Laser Safety**. 2. ed. Bristol: IOP Publishing, 2024.

HUANG, Y. Y. et al. Is it time to put support behind photobiomodulation for cognitive impairment? **Dose-Response**, v. 9, n. 4, p. 602-618, 2011.

HUDGINS, J. L. Wide and narrow bandgap semiconductors for power electronics: a new valuation. **Journal of Electronic Materials**, v. 32, n. 6, p. 471-477, 2003.

INTERNATIONAL COMMISSION ON NON-IONIZING RADIATION PROTECTION (ICNIRP). Guidelines on limits of exposure to laser radiation of wavelengths between 180 nm and 1,000 μm . **Health Physics**, v. 71, n. 5, p. 804-819, 1996.

INTERNATIONAL COMMISSION ON NON-IONIZING RADIATION PROTECTION (ICNIRP). Revision of guidelines on limits of exposure to laser radiation of wavelengths between 400 nm and 1.4 μm . **Health Physics**, v. 79, n. 4, p. 431-440, 2000.

INTERNATIONAL COMMISSION ON NON-IONIZING RADIATION PROTECTION (ICNIRP). ICNIRP Statement on Far Infrared Radiation Exposure. **Health Physics**, v. 91, n. 6, p. 630-645, 2006.

INTERNATIONAL COMMISSION ON NON-IONIZING RADIATION PROTECTION (ICNIRP). Guidelines on limits of exposure to incoherent visible and infrared radiation. **Health Physics**, v. 105, n. 1, p. 74-96, 2013a.

INTERNATIONAL COMMISSION ON NON-IONIZING RADIATION PROTECTION (ICNIRP). Guidelines on limits of exposure to laser radiation of wavelengths between 180 nm and 1,000 μm . **Health Physics**, v. 105, n. 3, p. 271-295, 2013b.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION (IEC). **IEC 60825-1**: safety of laser products - Part 1: Equipment classification and requirements. Geneva: IEC, 2014.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION (IEC). **IEC 62031-1**: LED modules - Safety requirements. Geneva: IEC, 2026.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 62471**: photobiological safety of lamps and lamp systems. Geneva: IEC, 2006.

JAVAN, A. et al. Population inversion and continuous optical maser oscillation in a gas discharge. **Physical Review Letters**, v. 6, n. 3, p. 106-110, 1961.

JIANG, Y. et al. **A two-decade bibliometric analysis of laser in ophthalmology**. Yangpu: Tongji University, 2023.

JORIO, A. O físico que olhava as luzes: Sergio Porto e o laser. **Revista Pesquisa FAPESP**, v. 280, p. 90-93, 2019.

KRAMER, N.; LUDWIG, A. Fundamentals of LED Light Emission and Dosimetry. **Journal of Biomedical Optics**, v. 22, n. 8, p. 085002, 2017.

KRAMES, M. R. et al. Status and Future of High-Power Light-Emitting Diodes for Solid-State Lighting. **Journal of Display Technology**, v. 3, n. 2, p. 160-175, 2007.

KROEMER, H. Nobel Lecture: Quasielectric fields and band offsets: teaching electrons new tricks. **Reviews of Modern Physics**, v. 73, n. 3, p. 783-793, 2001.

WORLD ASSOCIATION FOR PHOTOBIMODULATION THERAPY. **Dosage recommendations**. Disponível em: <https://waltpbm.org/documentation-links/recommendations/>. Acessado em 02/04/2026.

LINS, W. **História do Laser no Brasil, 1959-1979**: a trajetória do físico Sergio Porto. Salvador: UFBA, 2007.

LORENZ, K.; MARQUES, J. G.; MONTEIRO, T. Díodos emissores de luz e iluminação. **Gazeta de Física**, Lisboa, v. 38, n. 1/2, p. 50-57, 2015.

MAIMAN, T. H. Stimulated optical radiation in ruby. **Nature**, v. 187, n. 4736, p. 493-494, 1960.

MASSA, G. D. et al. Plant Productivity in Response to LED Lighting. **HortScience**, v. 43, n. 7, p. 1951-1956, 2008.

MENDES, L. S. et al. Aplicações da fotobiomodulação na saúde: uma revisão das evidências atuais. **Revista Brasileira de Fisioterapia**, v. 25, n. 4, p. 312-325, 2022.

BRETENAKER, F.; TREPS, N. **Laser**. Singapore: World Scientific Publishing, 2014.

MESCHEDE, D. **Optics, Light and Lasers: The Practical Approach to Modern Aspects of Photonics and Laser Physics**. 2. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2007.

MORAES, F. S. **Laser de diodo: princípios e aplicações**. São Paulo: USP, 2014a.

MORAES, M. G. **Lasers e Aplicações**. São Paulo: Editora Científica, 2014b.

NAKAMURA, S. Candela-class high-brightness InGaN/AlGaN double-heterostructure blue-light-emitting diodes. **Applied Physics Letters**, v. 64, n. 13, p. 1687-1689, 1994.

NAKAMURA, S. GaN Growth Using GaN Buffer Layer. **Japanese Journal of Applied Physics**, v. 30, n. 10A, p. L1705-L1707, 1991.

- NIEMZ, M. H. **Laser-Tissue Interactions: Fundamentals and Applications**. 4. ed. Berlin: Springer, 2019.
- PALANKER, D. **Basic laser properties**. San Francisco: American Academy of Ophthalmology, 2013.
- PIMPUTKAR, S.; SPECK, J. S.; DENBAARS, S. P.; NAKAMURA, S. Prospects for LED lighting. **Nature Photonics**, v. 3, n. 4, p. 180-182, 2009.
- PORTES, D. F. **Experimentos para o ensino médio que utilizam o LED**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Mestrado Profissional em Ensino de Física) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.
- ROCHA JÚNIOR, A. M. et al. Modulação da proliferação fibroblástica e da resposta inflamatória pela terapia a laser de baixa intensidade no processo de reparo tecidual. **Anais Brasileiros de Dermatologia**, v. 81, n. 2, p. 150-156, 2007.
- RODRIGUES, C. R. B. S. **Contribuições ao uso de diodos emissores de luz em iluminação pública**. 2012. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2012.
- RULLIERE, C. **Femtosecond laser pulses: principles and experiments**. [S. l.]: Springer, 2005.
- SÁ JUNIOR, E. M.; BIASI, R. S.; LEYVA, M. L.; SATO, S. O uso de LEDs na iluminação. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 29, n. 4, p. 621-625, 2007.
- SANTANA, W. A. L.; FREIRE JUNIOR, O. Contribuição do físico brasileiro Sergio Porto para as aplicações do laser e sua introdução no Brasil. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 33, n. 1, 2011.
- SCHÄFER, F. P. **Dye Lasers**. [S. l.]: Springer-Verlag, 1990.
- SCHUBERT, E. F. **Light-Emitting Diodes**. 2. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2006.
- SHURRAB, K. Proposed Guidelines for Reporting Parameters and Procedures of High- and Low-Level Laser Therapy in Medical Research Articles. **Medical Devices (Auckland)**, v. 18, p. 495-505, 2025.
- SIEGMAN, A. E. **Lasers**. Sausalito, CA: University Science Books, 1986.
- SIENKIEWICZ, Z. ICNIRP/WHO International Workshop on Non-Ionizing Radiation (NIR) Protection in Medicine. **Medical Physics**, v. 40, n. 11, 117001, 2013.
- SILVA, J. R. **Dispositivos semicondutores**. São Cristóvão: Universidade Federal de Sergipe (UFS), 2018.
- SILVA, J. R. **Tecnologias de Laser na Agricultura de Precisão**. São Paulo: Editora Acadêmica, 2021.
- SLINEY, D. H. (ed.). **Laser Safety Guide**. 9. ed. Orlando: Laser Institute of America, 1993.
- SLINEY, D. H. Photobiological safety of light-emitting diodes. **Journal of Biomedical Optics**, v. 21, n. 6, p. 062005, 2016.

SLINEY, D. H. Laser Safety: Past, Present and Future. **Journal of Laser Applications**, v. 33, n. 1, 2021.

SOROKIN, P. P.; STEVENSON, M. J. Stimulated infrared emission from trivalent uranium. **Physical Review Letters**, v. 5, n. 12, p. 557-559, 1960.

STEEN, William M.; MAZUMDER, Jyotirmoy. **Laser Material Processing**. 4. ed. London: Springer-Verlag, 2010.

SVELTO, Orazio. **Principles of Lasers**. 5. ed. New York: Springer, 2010.

TOWNES, C. H.; SCHAWLOW, A. L. Infrared and optical masers. **Physical Review**, v. 112, n. 6, p. 1940-1949, 1958.

TRÍDICO, L. A.; ANTONIO, C. R. Quality-switched laser (Q-switched): review of their variations and main clinical applicabilities. **Surgery & Cosmetic Dermatology**, v. 11, n. 4, p. 274-279, 2019.

YARIV, A.; GORDON, J. P. The laser. **Proceedings of the IEEE**, v. 51, n. 1, p. 4-29, 1963.

YOUNG, M. **Optics and Lasers**, including Lasers and Optical Fibers. 5. ed. Berlin: Springer-Verlag, 2000.

ZUKAUSKAS, A.; SHUR, M. S.; GASKA, R. **Introduction to Solid-State Lighting**. New York: Wiley-Interscience, 2002.