

**Antonio Eduardo de Aquino Junior
Vanderlei Salvador Bagnato**

COLABORADORES

**Cynthia Ap. de Castro, Stephanya Covas da Silva,
Guilherme T. Okada, Fernanda Mansano Carbinatto,
Tiago Zuccolotto Rodrigues, Vanessa Garcia,
Dalila Menezes Ferreira, Bruno Pereira de Oliveira,
Fátima Maria Mitsue Yasuoka,
Jarbas Caiado de Castro Neto**

**COMPREENSÃO
E
TRATAMENTO**

FIBROMIALGIA

**REALIZADO POR PESQUISADORES DA USP
DE SÃO CARLOS E COLABORADORES**

**INSTITUTO DE FÍSICA DE SÃO CARLOS
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**

3. Fundamentação de conceitos de Óptica e suas aplicações

**Bruno Pereira de Oliveira¹; Fátima Maria Mitsue Yasuoka²; Jarbas
Caiado de Castro Neto³**

¹ Engenheiro, químico e Doutor em Física pela Universidade de São Paulo – USP

² Física e Doutora em Física pela Universidade de São Paulo - USP

³ Físico e Doutor em Física pelo *Massachusetts Institute of Technology* - MIT

INTRODUÇÃO

A compreensão da natureza luminosa que vivenciamos no dia a dia e em todos os espaços em nossa volta conduz essencialmente às importantes áreas que envolvem a física e a química e as suas mais variadas vertentes de aplicações.

O conhecimento da estreita faixa eletromagnética da radiação denominada de luz e a suas aplicações fenomenológicas conduzem à obtenção de grandes avanços na ciência, podendo aplicar assim os conhecimentos da área de informática, medicina, bioquímica entre outras.

Uma das mais conhecidas fontes de aplicação são as luzes proveniente de LEDs, que em tradução significa Luz Emitida por um Diodo e os LASERS, cuja definição física é luz monocromática coerente e amplificada e alguns exemplos de aplicações que são TVs, lâmpadas, equipamentos estéticos e terapêuticos, entre outros. Para o amplo

entendimento se faz necessário a compreensão do conceito das ondas eletromagnéticas e os fenômenos ópticos.

As caracterizações de tais fenômenos, em especial, o fenômeno de absorção de fótons por uma molécula proporciona vasto conhecimento nas interações específicas que podem ocorrer nesta molécula. Pode-se citar como exemplo desta interação, que a absorção da energia via fóton faz com que excite a molécula, que por sua vez pode transferir elétrons para níveis de energias mais altos e como consequência disto, ao retornar a níveis de energias mais baixos, necessita emitir energia correspondente, definindo assim alguns dos processos a serem abordados e que serão compreendidos no presente capítulo.

1. LUZ: ONDAS ELETROMAGNÉTICAS

O entendimento do comportamento da luz é de suma importância nas ciências básicas e aplicadas. Para a elucidação do seu conceito físico, primeiramente vamos considerar a luz como pacotes de energias emitidas por corpos luminosos, que possuem a capacidade de propagação independente do meio na qual se propaga. Assim, esta energia é chamada de onda eletromagnética, cuja configuração está ilustrada pela Figura 1, como uma onda que se propaga no espaço livre independente do meio de propagação. Esta onda contém o campo elétrico propagando numa direção (em vermelho) e na direção perpendicular a propagação do campo magnético (em azul), ou seja, a referida figura ilustra a propagação de uma onda eletromagnética, diferentemente de uma onda mecânica.

COMPREENSÃO E TRATAMENTO FIBROMIALGIA

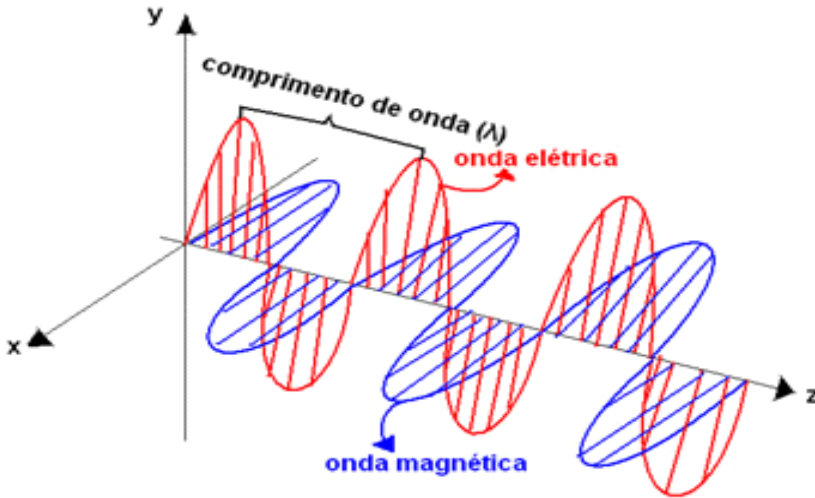


Figura 1: Propagação de uma onda eletromagnética em um plano cartesiano 3D.

A propagação da onda tem um comportamento senoidal ou cossenoidal na direção do eixo z por padrão usual da norma científica internacional, sendo que o componente elétrico da onda se propaga no plano yz e no plano xz a componente magnética. Quando se considera o em 2D em relação a variável de tempo, estas propagações dos componentes elétrico e magnético são mostrados em movimentos ondulatórios.

A exemplificação da propagação em uma direção pode ser esquematizada conforme ilustrada na Figura 2.

COMPREENSÃO E TRATAMENTO FIBROMIALGIA

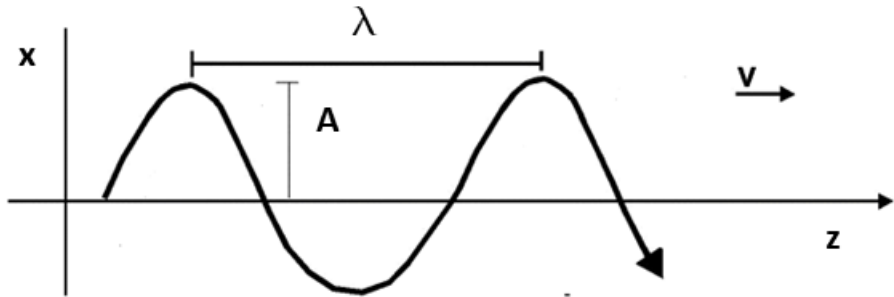


Figura 2: Esquemática da propagação da onda em relação ao eixo x e suas variáveis.

Um dos aspectos que chama atenção neste contexto é o comprimento de onda (λ) e a amplitude (A), a variação direta destes fatores constitui o aumento ou a diminuição da energia, sendo que o comprimento de onda é uma das formas de analisar a energia associada ao fóton e assim, os diferentes comprimentos de onda estão diretamente relacionados com a energia do fóton. Para melhor visualização está descrito na Figura 3, uma parte do espectro eletromagnético próximo à região da luz visível.

COMPREENSÃO E TRATAMENTO FIBROMIALGIA

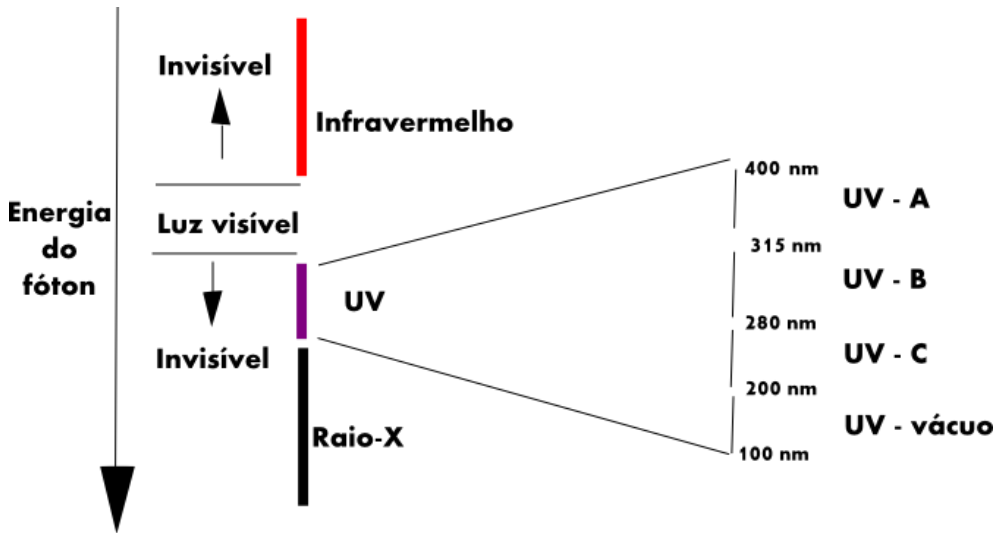


Figura 3: Escala espectrométrica com todos os comprimentos de ondas existente e suas proporções

Fonte: Próprio autor

A faixa na qual, o ser humano consegue distinguir é chamada de luz visível em que o comprimento de onda inicia desde o violeta (~430 nm) e vai até o vermelho (700 nm), isto corresponde à região de radiação emitida pela luz solar, em que poderá ser decomposta em diferentes frequências distintas.

O comprimento de onda da faixa visível está situado entre 700nm até 430nm. A luz branca corresponde a composição de todo o espectro visível e pode ser decomposta do vermelho ao violeta por meio de um componente dispersivo como o prisma, ilustrada pela Figura 4.

COMPREENSÃO E TRATAMENTO FIBROMIALGIA

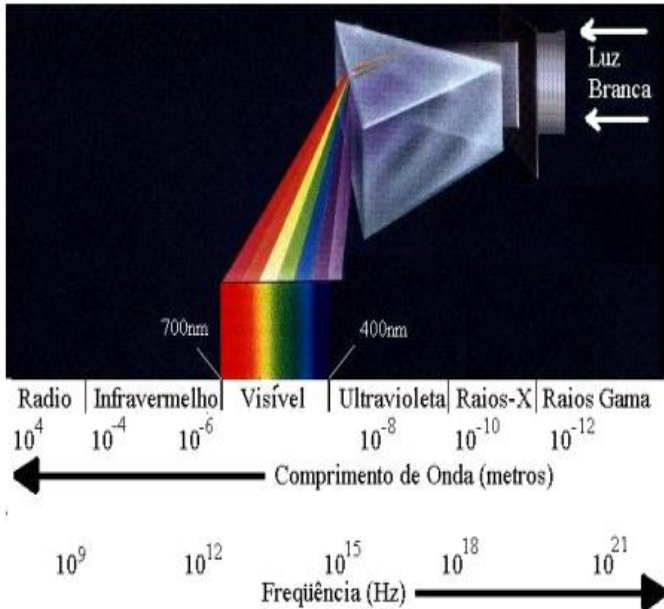


Figura 4: Espectro na faixa do visível e a decomposição das cores por meio de um prisma.

2. Lasers

Histórico do laser

Desde sua descoberta nos anos 60, tem estimulado o desenvolvimento na área de Fotônica, tornando-a uma das áreas que mais rapidamente cresceu nos últimos tempos em termos de inovação tecnológica e aplicabilidade na área de Saúde.

COMPREENSÃO E TRATAMENTO FIBROMIALGIA

A fundamentação teórica da ação laser como base para o amplificador óptico tornou-se possível, devido ao fato de Einstein ter previsto em 1916 a existência de emissão estimulada. Contudo, seu trabalho só foi compreendido em 1954, quando C. H. Townes e seus colaboradores desenvolveram o amplificador de microondas baseado na emissão estimulada da radiação, que foi denominado de **MASER** (acrônimo do inglês **M**icrowave **A**mplification by the **S**timulated **E**mission of **R**adiation). Em 1958, A. Schawlow e C. H. Townes adaptaram o princípio do maser para luz na região visível e em 1960, T. H. Maiman construiu o primeiro dispositivo laser. O laser foi constituído de um cristal de rubi como meio ativo e cavidade óptica Fabry-Perot como ressonador, com emissão na região vermelha em 694,3 nm. Mais tarde o físico iraniano A. Javan, W. R. Bennett e D. Herriott desenvolveram o primeiro laser a gás, laser de He-Ne, que emite na região visível em 632,8 nm e na região infravermelha em 1150 nm.

Nos anos seguintes foram desenvolvidos outros dispositivos lasers utilizando diferentes meios ativos lasers gerando emissão em regiões de comprimentos de onda diferentes. Na maior parte da década de 60, o laser era visto pelo mundo da indústria e tecnologia como uma curiosidade científica. Entre as décadas 60 e 70 esta concepção foi mudando, e o laser tornou-se a fonte única de luz coerente e intensa. O laser passou a ser usado em novas aplicações e juntamente com a inovação da fibra óptica e dispositivos optoeletrônicos revolucionou a óptica e a indústria de óptica.

Basov e Javan propuseram o conceito de diodo laser semiconductor e em 1962, Robert N. Hall demonstrou o primeiro dispositivo diodo laser, feito de arseneto de gálio e emitindo em 850 nm na faixa do infravermelho próximo do espectro. Mais tarde naquele ano, N. Holonyak J. demonstrou o primeiro laser semiconductor com uma emissão visível. Este primeiro

COMPREENSÃO E TRATAMENTO FIBROMIALGIA

laser semicondutor só foi usado em regime pulsado e resfriado a temperaturas de nitrogênio líquido (77 K). Em 1970, Z. Alferov, na URSS, e I. Hayashi e M. Panish, da Bell Telephone Laboratories, também desenvolveram, de forma independente, laser de diodos de operação contínua, utilizando a estrutura de heterojunção.

Desde o período inicial da história do laser foram produzidas uma variedade de tipos de laser aprimorados e especializados, otimizados para diferentes metas de desempenho, incluindo: novas bandas de comprimentos de onda, potência máxima de saída média, potência de pico máxima, energia máxima de pulso, duração mínima do pulso de saída, largura de linha mínima, eficiência máxima de energia.

Os lasers de estado sólido usam uma barra cristalina ou de vidro que é dopada com íons que fornecem os estados de energia necessários. O primeiro laser foi de rubi, feito de coríndon dopado com cromo. A inversão da população é realmente mantida no dopante. Esses materiais são bombeados opticamente usando um comprimento de onda menor que o comprimento de onda da ação laser, geralmente um tubo de flash ou de outro laser. Os lasers de semicondutores (diodos laser) não são classificados como lasers de estado sólido.

O neodímio é um dopante comum em vários cristais de laser de estado sólido (Nd:YVO₄, Nd:YLF e Nd:YAG). Todos esses lasers podem produzir altas potências no espectro infravermelho em 1064 nm. Eles são usados para corte, soldagem e marcação de metais e outros materiais, e também em espectroscopia e bombeamento de lasers de corante. Esses lasers também são comumente duplicados, triplicados ou quadruplicados para produzir feixes em 532 nm (verde), 355 nm e 266 nm (UV), ao utilizar cristais com propriedades ópticas para multiplicação de frequência, como KTP, LBO, BBO e BiBO. Os lasers de estado sólido bombeado por diodo

COMPREENSÃO E TRATAMENTO FIBROMIALGIA

com dupla frequência (DPSS) são usados para fazer apontadores de laser verde. Itérbio, hólmio, túlio e érbio são outros dopantes comuns em lasers de estado sólido. Itérbio é utilizado em cristais tais como Yb:YAG, Yb:KGW, Yb:KYW, Yb:SYS, Yb:CaF₂, operando tipicamente em torno de 1020-1050 nm. Eles são potencialmente muito eficientes e de alta potência devido a um pequeno defeito quântico. Potências extremamente altas em pulsos ultracurtos podem ser obtidas com Yb:YAG. Os cristais YAG dopados com hólmio emitem em 2097 nm e formam um laser eficiente operando em comprimento de onda infravermelho fortemente absorvidos pelos tecidos aquosos. O Ho:YAG geralmente é operado em modo pulsado, e passa por dispositivos cirúrgicos de fibra ótica para reparações das articulações, remoção de partes decompostas de dentes e pulverização de pedras nos rins e na vesícula.

O cristal de safira dopada com titânio (Ti:Safira) produz um laser infravermelho altamente sintonizável, comumente usados para espectroscopia. Também é notável seu uso como um laser de pulsos ultracurtos de potência de pico extremamente alta.

Em 2017, pesquisadores da TU Delft demonstraram um laser de microondas de junção Josephson AC. Como o laser opera no regime supercondutor, é mais estável que outros lasers baseados em semicondutores. O dispositivo tem potencial para aplicações em computação quântica. Em 2017, pesquisadores da TU Munich demonstraram um laser em regime *mode-locked* capaz de emitir pulsos em picosegundos com uma frequência de repetição de até 200 GHz.

Em 2017, pesquisadores da Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), juntamente com pesquisadores norte-americanos da JILA, que é a junção do Instituto Nacional de Padrões e Tecnologia, NIST, e da Universidade do Colorado Boulder, estabeleceram um novo recorde

COMPREENSÃO E TRATAMENTO FIBROMIALGIA

mundial desenvolvendo um laser de fibra dopada com érbio com uma largura de linha de apenas 10 mHz.

Lasers de estado sólido ou amplificadores a laser nos quais a luz é guiada devido à reflexão interna total em uma fibra óptica de modo único são chamados de lasers de fibra. O direcionamento da luz permite regiões de ganho extremamente longo, proporcionando boas condições de resfriamento; as fibras têm uma elevada relação entre a área superficial e o volume, o que permite um arrefecimento eficiente. Além disso, as propriedades da guia de ondas da fibra tendem a reduzir a distorção térmica do feixe. Íons de érbio e itérbio são meios ativos comuns em tais lasers.

A terapia a laser de baixa potência começou no final da década de 60 e início dos anos 70 na Europa Oriental, com o médico e professor húngaro Endre Mester, membro da Universidade de Semmelweis em Budapeste na Hungria. Ele observou um efeito facilitador na cicatrização de feridas e úlceras abertas, mediante a estimulação da reparação tecidual, quando empregava um Laser de rubi operando em baixa intensidade. Mais especificamente, ao aplicar laser nas costas raspadas de ratos, ele notou que o pelo cresceu de volta mais rapidamente no grupo tratado em relação ao grupo não tratado. Ele é considerado o pai da bioestimulação a laser. O laser chegou a ser uma modalidade de tratamento popular, principalmente na União Soviética e Europa Oriental, onde aconteceu um número grande de aplicações. Os primeiros relatos entusiastas de que o laser induzia alterações na função de células e tecidos, apareceram em jornais de pouco acesso. No Ocidente, um dos primeiros trabalhos foi o do Dr. Friedrich Plog, do Canadá, que estudou o uso do laser nos pontos da acupuntura, em 1973. Em 1988, o tratamento a laser recebeu o nome de terapia laser de baixa potência do inglês Low-Level Laser Therapy

COMPREENSÃO E TRATAMENTO FIBROMIALGIA

(LLLT), seria uma técnica usada para tratar uma infinidade de condições que requerem estimulação da cura, alívio da dor e inflamação e restauração da função em análise, estudado por Oshiro e Calderhead.

No final dos anos 60, o laser de Hélio-Neônio foi a primeira fonte de luz coerente disponível comercialmente, recebendo o nome de *cold laser* ou *soft laser*. No final da década de setenta os primeiros lasers de GaAs e de GaAlAs surgiram e foram aplicados na terapia a laser.

O intervalo espectral mais comumente utilizado na prática clínica ou laboratorial de laser de baixa potência está entre os comprimentos de onda de 630 a 1300 nm, que inclui a luz visível vermelha e o infravermelho próximo, que é denominada de “janela terapêutica” para tecidos biológicos. O laser de Hélio-Neônio com comprimento de onda de 632,8 nm é bastante utilizado na prática clínica, a penetração deste comprimento de onda no tecido biológico é de 6 a 8 mm a 3,5 mW e de 8 a 10 mm com 7 mW de potência. Este laser é altamente colimado. Os lasers infravermelhos emitem nos comprimentos de onda entre 770 e 1300 nm. Estes lasers são constituídos fundamentalmente pelo cristal de arseneto de gálio (Ga-As) e pelo arseneto de gálio alumínio (Ga-Al-As). O primeiro emite em 904 nm à potência de pico entre 10-15W e opera na forma pulsada à profundidade de penetração de 30 a 50 mm, conforme o tipo de tecido. O laser de GaAlAs emite nos comprimentos de onda 820 e 830 nm, potência de pico entre 20 e 100 mW, pode operar de forma contínua ou pulsada, podendo penetrar de 20 a 30 mm em sua potência de pico.

A aplicação do laser terapêutico se inicia em diversas doenças, como também em pesquisas e experimentações, obtendo desta maneira, avanços a respeito dos efeitos fisiológicos, mecanismos de produção e no aperfeiçoamento dos aparelhos.

COMPREENSÃO E TRATAMENTO FIBROMIALGIA

Os efeitos do laser de baixa potência podem ser observados no comportamento dos linfócitos aumentando sua proliferação e ativação; sobre os macrófagos, aumentando a fagocitose; elevando a secreção de fatores de crescimento de fibroblasto e intensificando a reabsorção tanto de fibrina quanto de colágeno. Além disso, contribuem para elevar a motilidade de células epiteliais, a quantidade de tecido de granulação e, podem diminuir a síntese de mediadores inflamatórios. Sua ação pode ser observada sobre a redução da área de feridas cutâneas tanto em humanos quanto em animais, muito embora a adoção das variáveis físicas implicadas nos tratamentos ainda não seja um consenso entre os pesquisadores. Em relação ao protocolo de irradiação, a utilização dos lasers pode diferir quanto ao tipo de meio ativador, à potência e dose utilizada e, também, quanto ao modo, tempo de irradiação e número de aplicações.

Laserterapia

Os lasers são classificados em alta e baixa potência. Os primeiros geralmente aplicados para a remoção, corte e coagulação de tecidos, enquanto os lasers de baixa potência são mais comumente aplicados em processos de reparação tecidual, tais como traumatismos musculares, articulares, nervosos, ósseos e cutâneo.

Os efeitos fotobiológicos da radiação laser, convencionalmente, pode ser divididos em curto e longo prazo. As respostas em curto prazo são aquelas nas quais o efeito pode ser observado poucos segundos ou minutos após a irradiação. Já os efeitos observados em longo prazo são aqueles que ocorrem horas ou ainda dias após o final da irradiação e, usualmente, envolvem nova biossíntese celular, especialmente na fase proliferativa da inflamação.

COMPREENSÃO E TRATAMENTO FIBROMIALGIA

Uma variedade de lasers pode ser encontrada na literatura a fim de promover o processo de cicatrização tecidual, entre eles: Hélio-Cádmio, Argon, Hélio-Neônio, Krypton, Arseneto de Gálio e Alumínio e CO₂. Sabe-se, no entanto, que o sucesso da terapia de baixa potência e seus respectivos efeitos mostra-se dependente do comprimento de onda, potência, dose e tempo aplicados.

O laser de baixa potência é um dos recursos físicos utilizados nas clínicas de fisioterapia para o tratamento da dor, inflamação, cicatrização e lesões musculoesqueléticas. A forma de emissão da radiação luminosa, proporcionada pelo laser, apresenta algumas características especiais que a diferenciam da radiação eletromagnética natural como, por exemplo, a monocromaticidade, a coerência e a polarização. As propriedades do laser estão diretamente relacionadas com seu comprimento de onda. Outros parâmetros como potência média, potência de pico, área irradiada e regime de pulso (contínuo ou pulsado), também são importantes. Podem ser incluídas ainda, como parâmetros, a densidade de potência e a densidade de energia ou dose, que é definida como a energia total transmitida por unidade de área, sendo expressa em J/cm². Dentre os equipamentos disponíveis, os mais utilizados são os de Hélio-Neônio (He-Ne) e Arseneto de Gálio (AsGa), embora também existam no mercado nacional alguns outros, lançados mais recentemente, como os de Alumínio-Gálio-Índio-Fósforo (AlGaInP) e Arseneto-Gálio-Alumínio (AsGaAl). Atualmente encontram-se equipamentos analógicos ou digitais que viabilizam diferentes informações quanto à precisão na emissão de seus parâmetros. A ação laser sobre os tecidos depende, em grande parte, de sua potência média, do tempo de emissão nas diferentes densidades de energia e da área de aplicação. Assim, se estes parâmetros não forem devidamente aferidos e/ou calibrados, poderão apresentar erros que irão

COMPREENSÃO E TRATAMENTO FIBROMIALGIA

promover a ineficiência do tratamento aplicado, comprometendo a confiabilidade da terapia.

O laser de baixa intensidade gera efeitos fotoquímicos, fotônicos e fotobiológicos, afetando não só a área de aplicação, como também as regiões circundantes, sendo que o efeito do laser terapêutico que mais se destaca é o cicatrizante.

A laserterapia de baixa intensidade produz efeitos fotoquímicos em detrimento dos térmicos e, por isso, são indicados para a cicatrização de ferimentos e manutenção de dores provenientes de diversas causas.

Em relação aos efeitos que o laser produz nos tecidos é necessário entender que os fótons interagem com as biomoléculas de uma maneira precisa, dependendo da energia absorvida. As moléculas específicas alcançam um estado de excitação eletrônica, onde são capazes de sofrer reações químicas como oxidação, redução, isomerização, ruptura de ligações covalentes ou interações com outras moléculas.

Como as radiações ópticas são não ionizantes, sua ação pode ser fotoquímica para as radiações de comprimentos de ondas ultravioleta ou termal para a faixa infravermelha. A região visível permanece entre estes dois extremos, sendo considerada uma região de transição caracterizada pelos dois efeitos: termal e fotoquímico.

Os benefícios clínicos da laserterapia podem ser vistos em procedimentos que vão desde questões estéticas até situações mais graves. Nesse sentido, são relatados principalmente o tratamento de cicatrizes, ferimentos, hematomas, queimaduras, neuralgias e inflamações localizadas.

Os resultados gerais apontam para um efeito bioquímico que envolve a estimulação de ATP (trifosfato de adenosina), a liberação de

COMPREENSÃO E TRATAMENTO FIBROMIALGIA

neurotransmissores que causam sensação de relaxamento e bem-estar (serotonina e endorfina), a interferência na produção de prostaglandinas e a ação fibrinolítica característica. Também são relatadas ações bioestimulantes, como implicações no aumento da mobilidade iônica, estimulação das mitocôndrias e elevação da atividade fagocítica. Esses desfechos intracelulares ocorrem em organelas específicas.

As consequências são a expansão do tecido de granulação, a regeneração das fibras nervosas e a formação de novos complexos sanguíneos. Além disso, é evidenciada uma maior produção de colágeno e uma aceleração no processo de cicatrização.

O recrutamento amplo de macrófagos e linfócitos facilita a atividade fagocitária e melhora a resposta imunológica frente a antígenos diversos. A laserterapia promove efeitos analgésicos, anti-inflamatórios, cicatrizantes e antiedematosos. Este último, obtido pela redução da sensibilização das prostaglandinas e pelo aumento da permeabilidade vascular.

A laserterapia para o tratamento das chamadas úlceras de pressão, conhecidas popularmente como escaras. Trata-se de feridas em algumas partes do corpo devido à imobilidade dos pacientes em regime de internação hospitalar. Nesse caso, a laserterapia de baixa intensidade aplicada em intervalos programados tem melhorado o aspecto dessas formações bolhosas e diminuído a dor atribuída ao contato com elas.

Nos tratamentos cutâneos, os lasers de baixa intensidade têm diminuído ou cessado a dor crônica, em especial as fibromialgias, que são pessoas que sofrem com dores musculares e não conseguem realizar confortavelmente as atividades diárias por apresentarem uma situação dolorosa latente.

COMPREENSÃO E TRATAMENTO FIBROMIALGIA

A laserterapia de baixa potência é menos invasiva e com potencial analgésico característico. As principais pesquisas demonstram que esse tipo de laser bloqueia a condução do estímulo nervoso, diminuindo, assim, a percepção cerebral da dor. Além disso, o procedimento promove a liberação periférica de opioides endógenos, que causam, além da analgesia, uma sensação de relaxamento e bem-estar durante as aplicações periódicas.

A parestesia é uma enfermidade relacionada a uma lesão no tecido neural, que causa formigamento ou desconforto ao paciente. Como se trata de um dano nos nervos, pode acometer diversas áreas do corpo. O que acontece é uma hiperestimulação nervosa, gerada por potenciais de ação sucessivos e com um limiar mais baixo, propiciando um estímulo intermitente. A laserterapia tem sido empregada para diminuir a sensação incômoda, ajudando com que o paciente retome as suas atividades cotidianas. A recuperação sensitiva ocorrerá em longo prazo, pois dependerá do fenômeno da neuroplasticidade, que é uma adaptação das células nervosas às novas situações.

Outros benefícios da aplicação da laserterapia na parestesia é a reparação tecidual e a otimização da microcirculação sanguínea, condição essencial para ajudar as células nervosas livres de outras lesões.

Princípios básicos do laser

Lasers são dispositivos fotônicos amplamente aplicados na área da Saúde nas últimas décadas, é com certeza o mais importante dispositivo desenvolvido nos últimos 63 anos. A palavra "**LASER**" é uma sigla que descreve o princípio de funcionamento desse dispositivo em inglês: "*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*", que pode ser traduzido para

COMPREENSÃO E TRATAMENTO FIBROMIALGIA

o português como "Amplificação da Luz por Emissão Estimulada de Radiação".

A estrutura técnica de um laser é constituída de três partes principais:

Fonte de bombeamento: é a parte do laser que fornece energia ao sistema. Geralmente, uma fonte de energia, como uma lâmpada flash, um diodo laser ou outra fonte de energia, é usada para excitar os átomos ou moléculas no meio laser ativo.

Meio ativo: é a substância que emite a radiação laser quando é bombeada por uma fonte de energia. O tipo de meio laser ativo pode ser: gás, cristal, fibra ou até mesmo semicondutores, dependendo do tipo de laser.

Ressonador: é a parte do laser que contém o meio laser ativo e é composto por dois espelhos, um dos quais é parcialmente refletivo. Os espelhos refletem a luz dentro do ressonador, permitindo que ela passe várias vezes pelo meio ativo, o que amplifica a luz.

O princípio básico da ação laser se resume na ocorrência de amplificação óptica da luz, cujo esquema básico de um laser está ilustrado na Figura 5. A luz precisa de um meio amplificador, chamado de meio ativo (2) e de uma fonte externa fornecedora de energia, denominada sistema de bombeio (1). Além disso, é necessário que a luz amplificada seja confinada em um ressonador de modo a garantir consecutivas passagens da luz pelo meio ativo por meio dos refletores (3) e (4) e, assim, obter um ganho considerável. Esse ressonador é conhecido como cavidade óptica.

COMPREENSÃO E TRATAMENTO FIBROMIALGIA

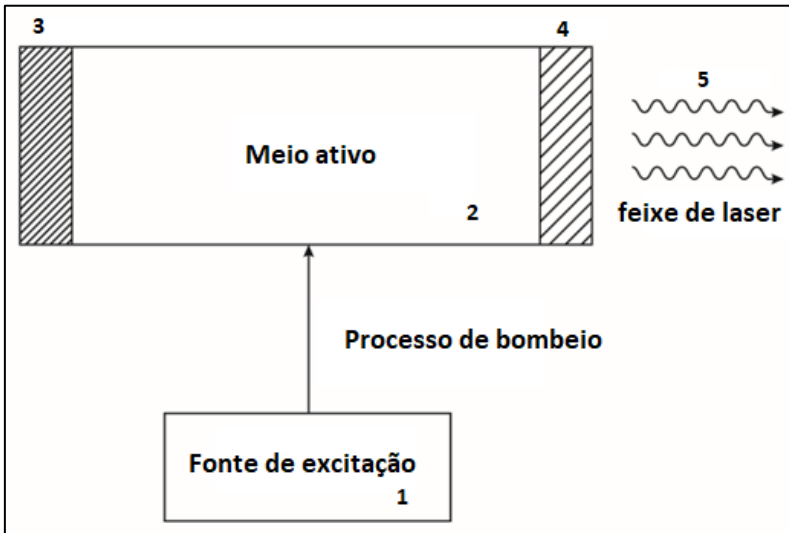


Figura 5: Esquema de um laser ilustrando a geometria básica de uma cavidade laser: espelho com refletividade 95 -88% (4) e 100% (3) meio ativo (2), fonte de bombeio (1) e saída do laser (5).

Potência/Fluência

O limite de dano induzido por laser (**LIDT**, acrônimo do inglês **Laser-Induced Damage Threshold**) é frequentemente expresso em unidades de fluência de pico de laser ou densidade de pico de potência de laser. A fluência do laser descreve a energia fornecida por unidade (ou área efetiva). A comunidade técnico-científica de lasers define fluência em unidades de J/cm^2 , ou seja:

$$\text{Fluência} \left[\frac{J}{cm^2} \right] = \frac{\text{Energia do pulso de laser [J]}}{\text{área do spot do foco efetivo [cm}^2\text{]}}$$

COMPREENSÃO E TRATAMENTO FIBROMIALGIA

Para a caracterização do laser pulsado, parâmetros como potência média, taxa de repetição e duração do pulso devem ser medidos, de forma que parâmetros como energia por pulso e potência de pico possam ser calculados. A área do *spot* do foco efetivo é determinada através da largura total à metade do máximo (**FWHM**, acrônimo do inglês *Full-Width at Half-Maximum*), conforme ilustra a Figura 6.

A energia por pulso é determinada pela razão da potência média pela taxa de repetição. A quantidade resultante é dada em Joules contida em cada pulso do laser:

$$\text{Energia por pulso [Joules]} = \frac{\text{Potência média [Watts]}}{\text{taxa de repetição } \left[\frac{\text{pulsos}}{\text{segundos}} \right]}$$

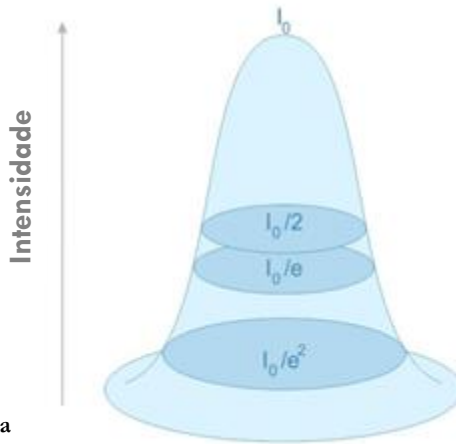
A potência de pico por pulso é determinada por dividir a energia por pulso pela duração do pulso à metade da intensidade:

$$\text{Potência de pico [Watts]} = \frac{\text{Energia por pulso [J]}}{\text{Duração do pulso [segundos]}}$$

No caso de feixes gaussianos, a área de *spot* do foco efetivo pode ser registrada por um CCD e convertido para as unidades de centímetros quadrados na intensidade máxima em nível de nível I_0/e , conforme ilustra a Figura 6. Às vezes a intensidade da densidade de potência de pico do laser é usada em vez da fluência, então:

COMPREENSÃO E TRATAMENTO FIBROMIALGIA

$$\text{Intensidade} \left[\frac{\text{Watts}}{\text{cm}^2} \right] = \frac{\text{Potência de pico [W]}}{\text{área do spot do foco efetivo [cm}^2\text{]}}$$



Figura

As propriedades fundamentais para ocorrer a ação laser são:

Monocromaticidade: significa que a radiação laser é composta de uma banda estreita de comprimento de onda específico, resultando em uma cor única e bem definida.

Uma fonte de luz comum exibe uma banda larga de comprimento de onda, ou seja, seu perfil de intensidade de luz em função do comprimento de onda é extenso, enquanto o laser apresenta uma banda muito estreita, denominada de linha espectral, que indica que o laser exibe um alto grau de monocromaticidade. Devido à amplificação pelo processo de emissão estimulada, as energias dos fótons gerados são similares por serem oriundos de uma mesma transição de energia. Essa diferença é

COMPREENSÃO E TRATAMENTO FIBROMIALGIA

indicada pela largura de banda. O grau de monocromaticidade é definida como a razão entre o comprimento de onda central λ_0 pela largura de banda $\Delta\lambda$ dessa emissão,

$$\mu = \frac{\lambda_0}{\Delta\lambda} = \frac{\Delta f}{f_0}$$

em que f_0 e Δf são a frequência central e a largura de banda em termos de comprimento de frequência respectivamente. A Figura 7 mostra o espectro de emissão de um laser.

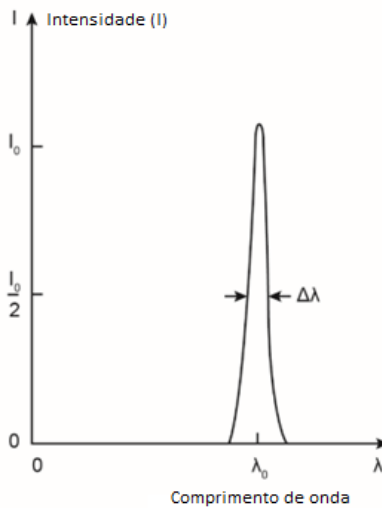


Figura 7: Espectro de emissão de um laser. A largura de banda ($\Delta\lambda$) é comparada ao comprimento de onda central da emissão (λ_0).

Coerência: refere-se ao fato de que os fótons no raio laser estarem em fase, o que significa que as cristas e vales das ondas de luz estão

COMPREENSÃO E TRATAMENTO FIBROMIALGIA

alinhados. Isso resulta em feixes de luz altamente direcionados e paralelos, tornando-os úteis em várias aplicações.

A emissão espontânea ocorre de maneira desordenada e os fótons oriundos de transições de diferentes níveis de energia não possuem relações entre si, ou seja, não há padrão de fase, frequência, polarização ou direção de deslocamento. A luz emitida, portanto, consiste em grupos de fótons, cada um correspondendo a um certo número de átomos excitados em um determinado estado de energia. Cada um desses grupos representa um trem de ondas.

O número de fótons emitidos concomitantemente é referido como o comprimento do trem de ondas. Assim, um maior número de fótons oriundos de transições de um nível de energia é representado por um trem de ondas mais longo. O tempo de vida τ de cada estado atômico relativo ao trem de ondas é denominado de coerência temporal e o comprimento do trem de ondas $c\tau$ (c é a velocidade da luz no vácuo) é conhecido como coerência espacial. Pelo princípio da incerteza, o tempo de vida típico de uma fonte de luz é da ordem de 10^{-8} a 10^{-10} s.

Quanto maior a coerência temporal, maior é a coerência espacial do feixe. No caso específico de ação laser, alguns estados de energia particulares são muito mais populosos do que os outros, que podem estar quase vazios, o que implica em uma coerência temporal da ordem de 10^{-3} s e resulta em um comprimento de coerência de 10^5 m.

Polarização: ocorre quando as ondas de luz estão todas orientadas num só plano linear ou circular, de modo que as vibrações em seus campos elétricos acontecem numa única direção. Esta propriedade caracteriza a emissão de fótons unidirecionais e paralelos entre si.

COMPREENSÃO E TRATAMENTO FIBROMIALGIA

Colimação: devido à coerência espacial, o feixe laser se mantém paralelo, inexistindo praticamente qualquer divergência da radiação emitida ao longo da distância percorrida. Isto é, refere-se ao alto grau de paralelismo do feixe laser, mantendo uma pequena divergência de saída do feixe comparada a uma distância relativamente grande.

O funcionamento de um laser é baseado no fenômeno de emissão estimulada, onde átomos ou moléculas em um meio ativo são estimulados a liberar fótons de luz quando excitados por outros fótons. Essa emissão estimulada ocorre em cascata, levando a uma amplificação da luz original, resultando em um feixe de luz altamente concentrado, coerente, monocromático e colimado. Essas características do feixe de luz emitido por um laser, é que torna essa tecnologia uma ferramenta valiosa em uma ampla variedade de aplicações, desde corte, marcação e gravação de materiais, tratamentos terapêuticos em várias áreas da Saúde, cirurgias de alta precisão em oftalmologia até comunicações ópticas e pesquisa.

Tipos de laser utilizados na Fisioterapia

Os tipos de laser utilizados na fisioterapia podem ser classificados conforme a percepção do feixe e a forma de emissão. Os lasers HeNe e ALGaInP são visíveis e os lasers AsGa e AsGaAL operam no infravermelho. A tabela abaixo ilustra as informações sobre o comprimento de onda e potência.

Tabela 1: Tipos de laser utilizados na Fisioterapia

Tipo de Laser	Comprimento de onda (intervalo)	Potência	Regime
HeNe	628 nm	2 a 10 mW	Contínuo
AlGaInP	670 nm (630-685)	15 a 30 mW	Contínuo

COMPREENSÃO E TRATAMENTO FIBROMIALGIA

AsGa	904 nm	15 a 30 mW	Pulsado
AsGaAl	830 (780-870)	30 mW	Contínuo

O laser de Hélio-Neônio (HeNe) tem a cor vermelha e consegue penetrar de 10 a 15 mm na pele. Por isso, é empregado para o tratamento de lesões superficiais, cicatrizes menos complexas, manchas na pele etc.

O laser de Arseneto de Gálio (AsGa) e o laser de Gálio, Alumínio e Arseneto (AsGaAl) operam na região do infravermelho e são opções terapêuticas para tratamento de lesões profundas. Somente o laser AsGa opera na forma pulsada, devido às características inerentes do seu feixe, que possibilitam operar em frequências de 2,5 Hz a 2 KHz. As frequências de 2,5 Hz são aplicadas em lesões agudas; as de 20 Hz para cura de feridas; acima de 120 Hz para alívio dos processos dolorosos crônicos; e as de 2 KHz para lesões crônicas e feridas de difícil cicatrização.

Os lasers mencionados acima podem ser aplicados em regiões específicas ou por método de varredura. Para a administração pontual, é fundamental demarcar a região, definindo o diâmetro do ponto e a zona que será atingida.

Os lasers de alta potência, que também são chamados de cirúrgicos, diferem entre si conforme o coeficiente de absorção no tecido corpóreo, da potência dos seus feixes e do modo de ação no alvo fisiológico. Nesse tipo de laser, é comum o aumento da temperatura, ao contrário do de baixa frequência, que é atérmico. As energias térmicas variam de 40 ° a 100° C, e a temperatura ideal é definida conforme a indicação clínica.

Temperaturas em torno de 40 °C é possível evidenciar a retração tecidual e uma hipertermia característica. Acima de 50 °C ocorrerá a

COMPREENSÃO E TRATAMENTO FIBROMIALGIA

diminuição das atividades metabólicas, uma vez que a temperatura ideal das enzimas é abaixo desse valor.

A partir dos 60 °C acontecerá a desnaturação das proteínas, que perderão sua característica terciária e quaternária e, com isso, deixam sua funcionalidade biológica, que pode ser enzimática ou estrutural. O resultado é a perda da integridade das membranas biológicas e o colapso celular.

Após 80 °C já se observa a desnaturação do colágeno, molécula importante para sustentação da pele, ossos, cartilagens e tendões, e sua perda causa falta de elasticidade e vigor nessas estruturas.

Além da fisioterapia, a laserterapia de alta potência tem diversas aplicações em outras áreas da saúde, como: oftalmologia, odontologia, ginecologia, urologia, cirurgias vasculares e neurológicas, ortopedia, entre outras.

Os lasers utilizados na oftalmologia tratam distúrbios da visão (miopia, hipermetropia e astigmatismo), glaucoma e retinopatia diabética. Para esta última, o procedimento consiste em foto coagulação.

Na odontologia, a laserterapia é utilizada para tratamento estético ou reparadores. São descritos trabalhos exitosos de clareamento dental, remoção de cáries, cirurgias ósseas e implantodontia.

Para clínicos que atuam na área da cardiologia e cirurgia vascular, os estudos já comprovaram a eficácia do uso de laser para remoção de placas ateromatosas, que diminuem fluxo sanguíneo. Com efeito, se observa a redução de problemas cardiovasculares em longo prazo.

Como são feixes de ondas eletromagnéticas que atuam mais profundamente, são usados na remoção de tatuagens e de manchas na

COMPREENSÃO E TRATAMENTO FIBROMIALGIA

pele. O hemangioma, por exemplo, dependendo da extensão corporal, poderá ser eliminado em poucas sessões.

Na ginecologia, as mulheres podem se beneficiar com aplicação à laser para tratamento de neoplasias nas regiões reprodutoras, endometriose ou transtornos infecciosos, como é o caso do HPV (Papilomavírus Humano). O HPV é uma infecção viral comum que afeta a área genital e pode causar verrugas genitais e, em alguns casos, levar ao câncer cervical. Em alguns cenários, procedimentos a laser, como a vaporização a laser, podem ser usados para remover verrugas genitais causadas pelo HPV.

Tipos de lasers futuristas aplicados em Laserterapia

Existem outros tipos de lasers tecnologicamente mais avançados sendo utilizados em outras áreas da Saúde, como por exemplo na área de oftalmologia, que poderiam ser muito bem aplicados na Fisioterapia. São tipos de lasers que seriam o futuro da Laserterapia.

Laser de diodo

Laser de diodo é um dispositivo semicondutor emissor de luz similar ao **LED** (acrônimo do inglês *Light-Emitting Diode*) em que a ação laser ocorre na junção do diodo. Seu comprimento de onda é na faixa de 805-810 nm, o qual é absorvido pela melanina. A região do espectro infravermelho próximo (região invisível aos olhos humanos) é extremamente confortável para ser utilizada em tratamento oftalmológicos, que poderiam ser amplamente utilizados em outros tipos de terapias fotônicas, por não ser perceptível aos olhos do paciente. Esse laser possui boa penetração na retina e na coróide, sendo usual na técnica de fotocoagulação para tratamentos de retinopatia da prematuridade, por

exemplo. Embora já existam hoje algumas empresas que já estejam aplicando este laser e gerando seus respectivos protocolos de aplicação terapêutica.

REFERÊNCIAS

1. Frank L. Pedrotti, Leno S. Pedrotti, Introduction of Optics, 2nd Edition, Prentice-Hall International, Inc., USA, 1993.
2. Mark Csle, Fundamentals of light sources and lasers, Hohn & Wiley & Inc., Canada, 2004.
3. D. R. Vij and K. Mahesh; Medical applications of lasers; Springer Science+Business Media, LLC;New York, 2002.
4. B. Bhattacharyya; Step by step Laser in Ophthalmology, Jaypee Brothers Medical Publishers (P) Ltda, India, 2009.
5. Duna Raoof-Daneshvar and Roni M Shtein, Femtosecond Lasers in Ophthalmology, US OPHTHALMIC Review, 38-41, Touch Medical Media 2013
6. <https://www.rp-photonics.com/encyclopedia.html>
7. Patrícia M. Carrinho, Estudo comparativo utilizando laser 685 nm e 830 nm no processo de reparo tecidual em tendões tenotomizados de ratos; Dissertação de Mestrado no programa de Pós-Graduação em Fisioterapia da Universidade Federal de São Carlos, 2004.
8. Maria C. S. Ortiz, Patrícia M. Carrinho, Alexandre A. S. dos Santos, Raquel C. Gonçalves, Nivaldo A. Parizotto; Laser de baixa intensidade: princípios e generalidades - Parte 1; Fisioterapia Brasil - Volume 2 - Número 4 - Julho / Agosto 2001 223
9. Weis LC, Arieta A, Souza J, Guirro R. Utilização do laser de baixa potência nas clínicas de fisioterapia de Piracicaba, SP.

- Fisioterapia Brasil – Volume 6- Número 2 – março/abril de 2005.
10. Lasers em Oftalmologia – 63º. Congresso Brasileiro de Oftalmologia – CBO
Relatores: Armando Crema, Elisabero Ribeiro Gonçalves, Francisco Lima Coordenadores: Adriana dos Santos Forseto, Marcony R. Santhiago, Roberto Murillo Limongi
Parte I: Capítulo 1: Introdução: Propriedades dos Lasers utilizados em Oftalmologia, André Orlandi de Oliveira, Fátima Maria Mitsue Yasuoka, Jarbas Caiado de Castro Neto, Cultura Médica – RJ - 2019
 11. Fabiana S.S.D. Andrade, Rosana M.O. Clark, Manoel L. Ferreira. Efeitos da laserterapia de baixa potência na cicatrização de feridas cutâneas, Rev. Col. Bras. Cir. 2014; 41(2): 129-133. DOI: 10.1590/S0100-69912014000200010
 12. <https://www.salesforce.com/br/products/einstein/ai-deep-dive/?bc=HA>
 13. <https://drauziovarella.uol.com.br/doencas-e-sintomas/fibromialgia/>
 14. <https://www.minhavidacom.br/saude/temas/fibromialgia>