

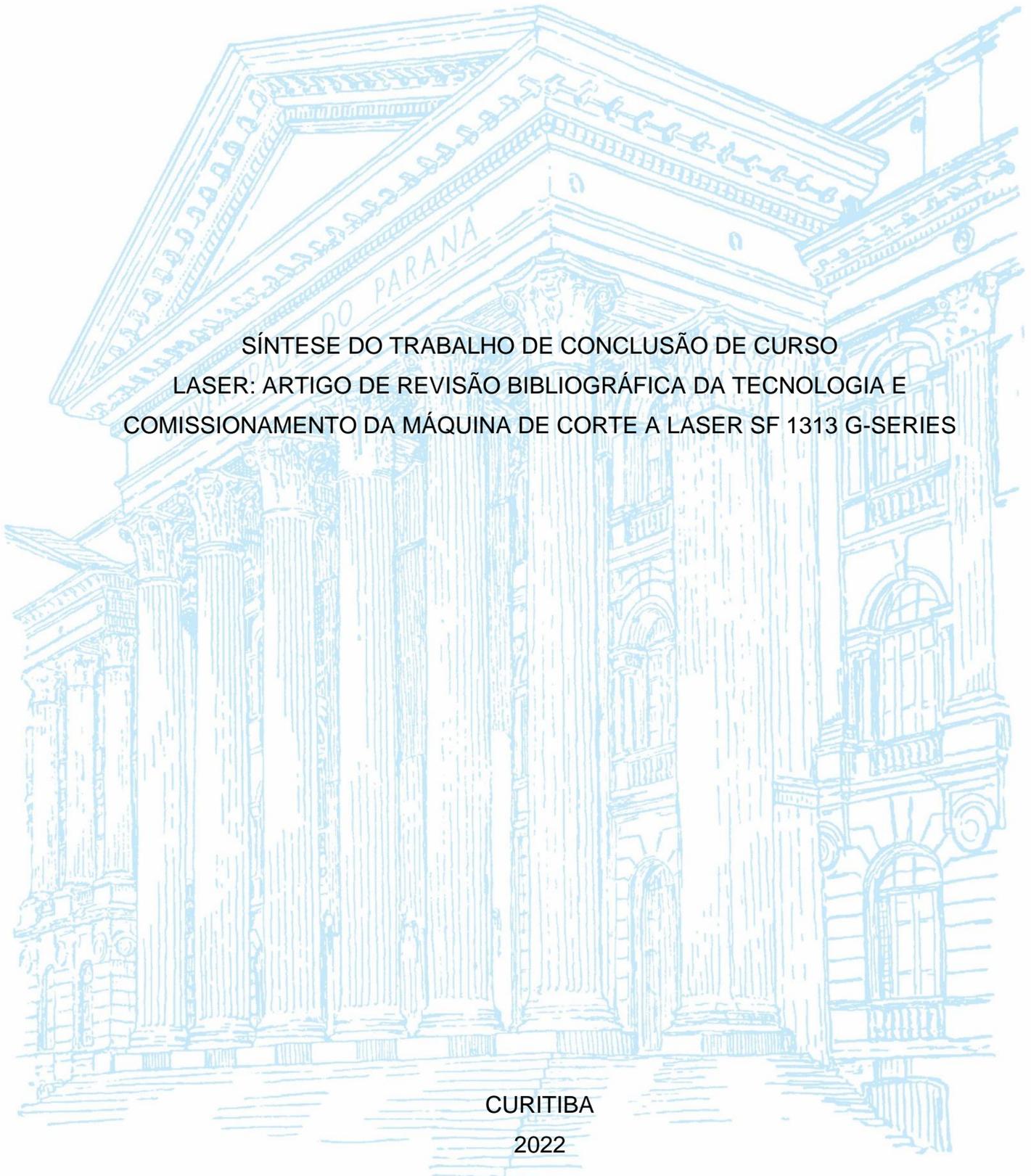
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

JONATAS PIETROCHINSKI MENDES

SÍNTESE DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO
LASER: ARTIGO DE REVISÃO BIBLIOGRÁFICA DA TECNOLOGIA E
COMISSONAMENTO DA MÁQUINA DE CORTE A LASER SF 1313 G-SERIES

CURITIBA

2022



JONATAS PIETROCHINSKI MENDES

SÍNTESE DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO
LASER: ARTIGO DE REVISÃO BIBLIOGRÁFICA DA TECNOLOGIA E
COMISSIONAMENTO DA MÁQUINA DE CORTE A LASER SF 1313 G-SERIES

TCC apresentado ao curso de Graduação em Engenharia Mecânica, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Dalberto Dias da Costa

CURITIBA

2022

TERMO DE APROVAÇÃO

JONATAS PIETROCHINSKI MENDES

SÍNTESE DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO
LASER: ARTIGO DE REVISÃO BIBLIOGRÁFICA DA TECNOLOGIA E
COMISSIONAMENTO DA MÁQUINA DE CORTE A LASER SF 1313 G-SERIES

TCC apresentado ao curso de Graduação em Engenharia Mecânica, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Prof. Dr. Dalberto Dias da Costa

Orientador(a) – Departamento de Mecânica da UFPR

Curitiba, 10 de maio de 2022.

AGRADECIMENTOS

Tive a honra de ser aceito como estagiário no Laboratório de Usinagem, tendo por orientador e supervisor de estágio o Prof. Dr. Dalberto Dias da Costa. Sou imensamente grato pelo conhecimento amalhado ao longo do meu estágio, pelo longo acompanhamento, orientação e amizade. Agradeço ainda ao meu orientador, Prof. Dr. Dalberto Dias da Costa, pela excelente sugestão do tema deste Trabalho de Conclusão de Curso – uma revisão bibliográfica de artigos que tem como tema o corte a laser e o comissionamento de entrega e operacionalização da máquina de corte a laser Senfeng SF 1313G 750W. Tanto a revisão de artigos quanto o comissionamento de um equipamento que opera com a tecnologia do laser foram temas fascinantes, que pude desenvolver com bastante afinco durante a interrupção das aulas por conta da pandemia de Covid-19.

Estendo meus agradecimentos ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Paraná, na pessoa do seu coordenador Prof. João Morais da Silva Neto, na gestão 2020-2021.

Ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Paraná, na pessoa do seu coordenador Prof. Luciano Kiyoshi Araki na gestão 2020-2021, e pelo conhecimento compartilhado por todo o corpo docente ao longo dos anos do curso.

Aos colegas, pelo companheirismo e ajuda mútua.

RESUMO

O objetivo da revisão bibliográfica narrativa que compõe a primeira metade deste Trabalho de Conclusão de Curso é a análise e descrição da tecnologia LASER de amplificação da radiação, desde sua fundamentação física teórica, desenvolvimento histórico, categorização atual quanto ao meio de ganho, tipo de operação e principais aplicações, com principal abordagem sobre a utilização do laser no corte de materiais e maior enfoque ao corte de metais. A revisão bibliográfica encerra-se com um panorama atual do laser de fibra, seu funcionamento, posição recente no mercado, comparativos com outras tecnologias de corte a laser disponíveis, análise dos dados mais recentes relativos à aplicação do LASER e reúne pareceres relativamente à sua evolução, eficácia, segurança e futuro. Foi realizada uma revisão da literatura através da consulta de livros e artigos de língua portuguesa, inglesa, francesa e italiana, com um período de publicação entre 1967 e 2020, em bases de dados de relevo. A segunda metade deste Trabalho de Conclusão de Curso debruçou-se no comissionamento operacional do novo equipamento de corte a laser, uma nova tecnologia entregue durante a reforma do Laboratório de Usinagem do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Paraná.

Palavras-chave: Laser. Usinagem. Corte a laser. Laser de fibra. Comissionamento de nova tecnologia.

ABSTRACT:

The objective of the narrative bibliographic review that composes the first half of this Final Paper is the analysis and description of the LASER technology of radiation amplification, from its theoretical physical foundation, historical development, current categorization as to the means of gain, type of operation and main applications, with a main approach to the use of lasers in cutting materials and a greater focus on metal cutting. The literature review ends with a current overview of fiber laser, its operation, recent market position, comparisons with other available laser cutting technologies, analysis of the most recent data on the application of LASER and gathers opinions regarding its evolution, effectiveness, safety and future. A literature review was carried out by consulting books and articles in Portuguese, English, French and Italian, with a publication period between 1967 and 2020, in relevant databases. The second half of this Final Paper focused on the operational commissioning of the new laser cutting equipment, a new technology delivered during the renovation of the Machining Laboratory of the Mechanical Engineering Department of the Federal University of Paraná.

Keywords: Laser. Machining. Laser cut. Fiber laser. Commissioning of new technology.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – ILUSTRAÇÃO DAS PROPRIEDADES DA RADIAÇÃO LASER, COMPARADA À LÂMPADA E AO LED.	15
Figura 2 - A ONDA ELETROMAGNÉTICA.....	17
Figura 3 – NÍVEIS DE ENERGIA DO SISTEMA QUÂNTICO.....	20
Figura 4 – INTERAÇÃO DA RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICO COM UM SISTEMA QUÂNTICO, APROXIMAÇÃO DE DOIS NÍVEIS.	20
Figura 5 - POPULAÇÃO DOS NÍVEIS ENERGÉTICOS EM EQUILÍBRIO TÉRMICO.	22
Figura 6 – AMPLIFICAÇÃO DA RADIAÇÃO.....	23
Figura 7 – ARQUITETURA DE FORMAÇÃO DA RADIAÇÃO LASER.....	25
Figura 8 - ONDAS ESTACIONÁRIAS EM UM RESSONADOR ÓPTICO.	26
Figura 9 – O PRIMEIRO CORTE A LASER DE GÁS ASSISTIDO POR OXIGÊNIO EM MAIO DE 1967.....	30
Figura 10 – PRIMEIRA MÁQUINA DE CORTE A LASER CO2 COM ÓTICA MÓVEL DE 2 EIXOS (1975).....	31
Figura 11 – CLASSIFICAÇÃO DO LASER DE ACORDO COM O MATERIAL (MEIO) ATIVO E BOMBEAMENTO.....	33
Figura 12 – ESQUEMA DO PROCESSO DE CORTE A LASER.....	39
Figura 13 – COMPONENTES DE UM SISTEMA DE CORTE A LASER.	41
Figura 14 – ESQUEMA DE UMA CABEÇA DE CORTE A LASER.....	44
Figura 15 - COMPARAÇÃO DA VELOCIDADE MÁXIMA DE CORTE COM O2 E COM ARGÔNIO PARA DIFERENTES METAIS.	47
Figura 16 - VARIAÇÃO ESQUEMÁTICA DA ESPESSURA DO FUNDIDO COM A VELOCIDADE DE CORTE.....	49
Figura 17 - ILUSTRAÇÃO DAS ESTRIAS FORMADAS EM UMA SUPERFÍCIE APÓS O CORTE A LASER.....	52
Figura 18 – SÍMBOLOS DE ADVERTÊNCIA À RADIAÇÃO LASER.	56
Figura 19 - DIAGRAMA DA ESTAÇÃO DE PROCESSAMENTO DE MATERIAIS COM LASER A FIBRA.	59
Figura 20 - UMA ILUSTRAÇÃO ESQUEMÁTICA DA FIBRA DE REVESTIMENTO DUPLO.....	62
Figura 21 - COMBINAÇÃO DE FEIXES PARA MODO MÚLTIPLO.	63
Figura 22 – ESQUEMA DE BOMBEAMENTO NA EXTREMIDADE OU LATERAL PARA O LASER DE FIBRA, GERALMENTE COM ACOPLAMENTO DE MÚLTIPLOS LASERS.....	64
Figura 23 - PRODUTO DE PARÂMETRO DE FEIXE “BPP” DE SISTEMAS DE LASER DE ESTADO SÓLIDO (FIBRA E DISCO), DE CO2 E DE DIODO DISPONÍVEIS ATUALMENTE.	65
Figura 24 - BANDAS DE EMISSÃO DOS DIFERENTES ÍONS TERRAS RARAS, EM NANÔMETROS.....	66
Figura 25 - VELOCIDADES MÁXIMAS DE CORTE ALCANÇÁVEIS USANDO O LASER DE FIBRA DE ITÉRBIO.....	67
Figura 26 – COMPARATIVO DAS VELOCIDADES MÁXIMAS DE CORTE PARA CORTE DE AÇO INOXIDÁVEL ENTRE LASER DE CO2 E LASER DE FIBRA.....	68

Figura 27 - MÁQUINA DE CORTE A LASER DE FIBRA SENFENG SF-1313G-SERIES 750 W APÓS ENTREGA TÉCNICA NO LABORATÓRIO DE USINAGEM DA UFPR.....	71
Figura 28 - FONTE LASER DE FIBRA RAYCUS RFL-C750.	74

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – MARCOS IMPORTANTES NO DESENVOLVIMENTO DE LASERS.....	29
Quadro 2 - TIPOS DE GÁS AUXILIAR TÍPICOS USADOS NO CORTE A LASER INDUSTRIAL DE METAIS.....	42
Quadro 3 - MECANISMOS DE CORTE A LASER PARA DIVERSOS MATERIAIS DE ENGENHARIA.....	53
Quadro 4 – COMPARAÇÃO DE DIFERENTES PROCESSOS DE CORTE.....	54
Quadro 5 - CLASSIFICAÇÃO DE SEGURANÇA DO LASER.....	57
Quadro 6 - COMPARAÇÃO DE FONTE DE LASER.....	69

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

BPP	- Parâmetro de qualidade de feixe laser, acrônimo do termo em inglês <i>beam parameter product</i> .
CAGR	- Taxa composta anual de crescimento.
CAD	- Desenho assistido por computador, abreviatura para a tradução deste termo em idioma inglês.
CAM	- Manufatura assistida por computador, acrônimo do termo em inglês.
CNC	- Controle numérico computadorizado de máquinas.
CW	- Modo de operação do laser em onda contínua.
EDM	- Usinagem por eletroerosão.
FEL	- Laser de elétrons livres, acrônimo do termo em inglês <i>free electron laser</i> .
FWHM	- Largura total até a metade da intensidade, acrônimo do termo em inglês <i>full width at half maximum</i> .
Kerf	- <i>Kerf</i> é definido como a largura do material que é removido por um processo de corte. Ao falar sobre o corte de forma CNC com processos de corte típicos, o <i>kerf</i> é a largura do material que o processo remove à medida que corta a placa. (ESAB).
LED	- Diodo emissor de luz
Maser	- Amplificação de micro-ondas por emissão estimulada de radiação
Q-switching	- Q-comutado
ZTA	- Zona termicamente afetada
λ	- Comprimento de onda

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
2	FUNDAMENTOS.....	17
2.1.	Interação Luz e Matéria	17
2.2.	Física quântica.....	18
2.3.	Emissão estimulada	19
2.3.1.	Sistema quântico, inversão populacional e bombeamento	21
3	ARQUITETURA DO LASER.....	24
3.1.	Material ativo (meio de ganho).....	25
3.2.	Bombeamento (fonte de energia).....	25
3.3.	Cavidade / ressonador aberto	26
4	HISTÓRIA.....	28
4.1.	Teoria e princípios.....	28
4.2.	Corte a laser.....	29
5	CLASSIFICAÇÃO E MODOS DE OPERAÇÃO.....	32
5.1.	TIPOS E PRINCÍPIOS DE OPERAÇÃO	33
5.1.1.	A gás.....	33
5.1.2.	De estado sólido	34
5.1.3.	De fibra	34
5.2.	Modos de operação	35
6	UTILIZAÇÕES	36
7	CORTE A LASER	38
7.1.	Introdução	38
7.2.	Formas de corte a laser	39
7.3.	Componentes.....	40
7.3.1.	Gases de assistência.....	41
7.3.2.	Bocais	43
7.4.	Condições do processo.....	44
7.5.	Funções do gás auxiliar e seu fluxo	45
7.5.1.	Efeito dos diferentes tipos de gases de assistência.....	46
	O subitem 7.5.1 dedica-se a explicar os efeitos dos diferentes tipos de gases	46
7.5.2.	Remoção da fusão.....	47

7.6.	Princípios do corte a laser.....	48
7.6.1.	Absortividade (coeficiente de acoplamento) ao feixe durante o corte a laser	49
7.6.2.	Mecanismos de absorção do raio laser por metais.....	50
7.7.	Qualidade da peça cortada	51
7.7.1.	Estrias.....	51
7.7.2.	Separação da camada limite e aderência de escória	52
7.8.	Considerações sobre materiais.....	53
7.9.	Vantagens e desvantagens.....	54
7.10.	Classificação de segurança	56
8	LASER DE FIBRA	58
8.1.	Introdução, histórico e panorama atual	59
8.2.	Mecanismo de emissão laser.....	60
8.3.	Laser de fibra de alta potência de itérbio	60
8.4.	Recursos	62
8.4.1.	Potência de saída	63
8.4.2.	Qualidade de feixe e sua focabilidade	64
8.4.3.	Comprimento de onda	65
8.5.	Desempenho no corte de metais	66
8.5.1.	Velocidade máxima alcançável.....	66
8.6.	Comparativo do laser de fibra com o laser CO ₂	68
8.7.	Ponderações sobre a tecnologia de corte a laser de fibra	69
9	MÁQUINA DE CORTE A LASER DE FIBRA SENFENG SF1313G 750W	71
9.1.	Equipamentos periféricos.....	72
9.1.1.	Sistema compressão, tratamento e distribuição de ar atmosférico via rede de ar comprimido	72
9.1.2.	Refrigerador da água em dois canais.	72
9.1.3.	Transformador elétrico.....	73
9.1.4.	Exaustor de fumos e gases tóxicos.	73
9.1.5.	Fonte de laser.....	73
9.2.	Limpeza da lente.....	74
9.3.	Montagem do bocal de corte.....	74
10	SEQUÊNCIA DE ACIONAMENTO DA MÁQUINA DE CORTE A LASER DO LABOTARÓRIO DE USINAGEM	76

11	TUTORIAL PARA REFERÊNCIA E USO DO PROGRAMA CAM CYPCUT LASER CUTTING SYSTEM	77
12	CONCLUSÃO.....	78
13	BIBLIOGRAFIA	79

1 INTRODUÇÃO

A monografia foi desenvolvida durante um ano e meio, em função das restrições sanitárias do biênio 2020-2021 e durante a reforma do Laboratório de Usinagem, então houve tempo de consultar muitos artigos que contribuiriam com seu conteúdo. A intenção deste documento é sintetizar a monografia completa "LASER: ARTIGO DE REVISÃO BIBLIOGRÁFICA DA TECNOLOGIA E COMISSIONAMENTO DA MÁQUINA DE CORTE A LASER SF 1313 G-SERIES" para fins de apresentação à banca, resumindo os principais conceitos dos autores citados em cada capítulo.

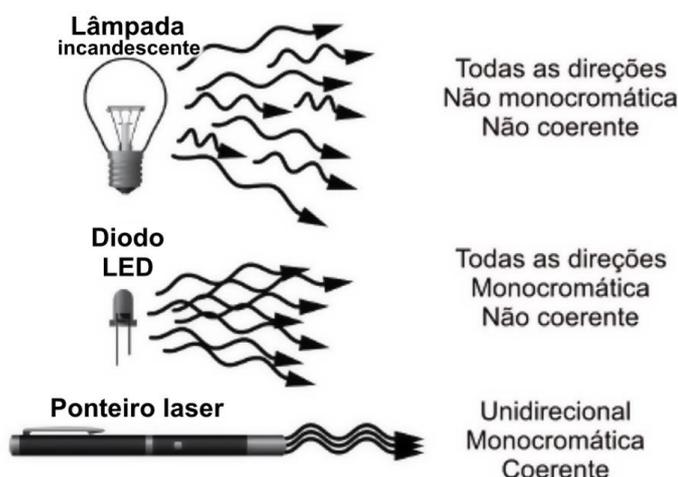
Um laser é um dispositivo que emite luz no processo de amplificação óptica, baseado na emissão estimulada de radiação eletromagnética. O termo "laser" é um acrônimo no idioma inglês para "amplificação da luz por emissão estimulada de radiação". O primeiro laser foi uma evolução natural do trabalho da amplificação de micro-ondas concretizado em 1958 por duas equipes que trabalharam em paralelo - dos russos Aleksandr Mikhailovich Prokhorov e Nicolai Gennadiyevich Basov e da equipe dos americanos Charles Hard Townes e Arthur Leonard Schawlow – ambas as pesquisas que se basearam nos fundamentos teóricos dados por Albert Einstein em 1917 (HECHT J. , Laser, 2020). Reconhece-se, entretanto, que o primeiro equipamento construído a ter sucesso na amplificação da luz visível foi construído em 1960 por Theodore H. Maiman, no *Hughes Research Laboratory*, usando rubi sintético como seu meio de ganho (ZLATANOV, 2016).

A tecnologia laser está no centro da área mais ampla da fotônica, essencialmente porque a luz laser tem uma série de propriedades muito especiais (SVELTO, Principi dei Laser, 1970):

- Colimação: o raio laser emitido é bem direcionado pode se propagar por longa distância sem muita divergência. Pode ser focado em pontos muito pequenos, onde uma alta intensidade é alcançada.
- Monocromaticidade: o laser pode emitir em uma largura de banda óptica muito estreita, enquanto a maioria das lâmpadas emite luz com um espectro óptico muito amplo.
- Direcionalidade: significa que o feixe é bem colimado pode se propagar longas distâncias mantendo-se estreito e com pouco espaçamento.
- Coerência: a coerência garante que as ondas produzidas estão em fase, movendo-se precisamente juntas no tempo e no espaço e, portanto, suas amplitudes se somam em interferência construtiva em vez de cancelar a amplitude uma da outra por interferência destrutiva (CARISTAN, Laser Cutting Guide for Manufacturing, 2004, p. 359).
- Brilho: a característica geral da radiação laser resultante das propriedades acima mencionadas, juntamente com alta energia ou potência, causa alto brilho da luz laser. Um laser de potência até moderada (por exemplo, alguns miliwatts) tem um brilho que é ordens de magnitude maior do que o das fontes convencionais mais brilhantes. Isso se deve principalmente ao alto propriedades direcionais do feixe de laser (SVELTO, Principi dei Laser, 1970).

As diferenças entre a radiação laser coerente e outras fontes de luz incoerentes são mostradas na Figura 1.

Figura 1 – ILUSTRAÇÃO DAS PROPRIEDADES DA RADIAÇÃO LASER, COMPARADA À LÂMPADA E AO LED.



FONTE: Adaptado da figura 2.14 de (JELÍNKOVÁ & ŠULC, 2013).

LEGENDA: Ilustração das propriedades da radiação de saída geradas por uma lâmpada, um LED e pelo laser.

Um laser consiste em um meio de ganho, um dispositivo que fornece energia (bombeamento) e componentes que realizam a retroalimentação óptica. O meio de ganho absorve a energia de bombeamento, que eleva alguns elétrons a estados quânticos de alta energia, excitados. As partículas podem interagir com a luz absorvendo ou emitindo fótons. O meio de ganho é um material com orbitais atômicos e níveis energéticos tais que, sendo bombeado de energia, sofrerá *inversão populacional* (a maior parte dos átomos constituintes estarão em estado excitado pelo efeito do bombeamento, com elétrons em orbitais de maior nível de energia) (HECHT J. , Laser, 2020). Quando a inversão da população é alcançada, a quantidade de emissão estimulada devido à luz que passa é maior do que a quantidade de absorção. Isto significa que um fóton incidente terá maior probabilidade de promover a emissão estimulada de outro fóton – na mesma a frequência, conforme o projeto do laser, e direção - ao causar o decaimento de um átomo excitado ao seu estado fundamental. Basicamente isto será a amplificação da luz por emissão estimulada, conforme preceitos formulados por Albert Einstein (EINSTEIN, 1917). A luz de um determinado comprimento de onda passa pelo dispositivo com ganho aumentado (potência aumentada). O meio de ganho de um laser é normalmente um material de pureza, tamanho, concentração e forma controlados, existindo atualmente em forma de gás, líquido, sólido ou plasma (JELÍNKOVÁ & ŠULC, 2013).

A *inversão populacional* é o que assegura que haja maior probabilidade de um fóton incidir sobre um átomo excitado, causando seu decaimento estimulado, do que teria de atingir um átomo em estado fundamental, cuja energia do fóton incidente iria ter como efeito excitá-lo. Este segundo processo deve ser feito idealmente pelo bombeamento, já que se a excitação se der por outro fóton não haverá ganho. Assim, para que os recursos espaciais amplifiquem a luz, ao meio de ganho deve ser fornecida energia em um processo chamado *bombeamento*. Este bombeamento de energia é geralmente feito na forma de corrente elétrica ou luz de diferentes comprimentos de onda, neste último caso por uma lâmpada de flash ou outro laser (KANNATEY-ASIBU JR., Capítulo 1 - Laser Generation, 2009).

Os lasers mais comuns usam retroalimentação de uma cavidade óptica - um par de espelhos em ambas as extremidades do meio de ganho (a cavidade óptica pode ser maior do que o meio de ganho, geralmente é maior). A luz reflete para frente e para trás entre os espelhos, passando pelo espaço e crescendo a cada passagem (geralmente 10^9 s^{-1}). O acoplamento de saída geralmente é um dos dois espelhos, que por ser parcialmente transparente permite que um pequeno percentual escape da cavidade óptica. Esta parcela da luz que sai pelo espelho é o feixe de laser que se aproveita. Dependendo do design da cavidade (espelho plano ou curvo), a luz do laser pode se propagar ou produzir um feixe estreito (PALANDI, FIGUEIREDO, DENARDIN, & MAGNAGO, 2010).

Dentre suas muitas aplicações, os lasers são usados em leitores de disco rígido, impressoras a laser e leitores de código de barras; sequenciamento de DNA, cirurgia a laser e cuidados com a pele; fibra óptica e comunicação óptica de espaço livre (FSO); corte e soldagem de materiais; equipamento militar e miras; mapeamento topográfico e sensoriamento remoto LIDAR, medição de distância e velocidade; e espetáculos de iluminação laser na indústria do entretenimento (ZLATANOV, 2016).

O objetivo geral da *primeira* metade do Trabalho de Conclusão de Curso – o TCC I - é compendiar conhecimento robusto a respeito da tecnologia LASER, sobretudo direcionando-o ao processo de usinagem numa máquina de corte a laser.

O objetivo geral da *segunda* metade do Trabalho de Conclusão de Curso – o TCC II – consiste no comissionamento da máquina de corte a laser de fibra SENFENG SF1313G 750W entregue ao Laboratório de Usinagem do Departamento de Engenharia Mecânica da UFPR durante sua reforma e modernização no ano de 2021. São objetivos concretos o acompanhamento técnico durante o período de instalação do equipamento e da infraestrutura necessária a seus periféricos, realização de ensaios durante a entrega técnica, reunião de uma rotina de acionamento da máquina de corte a laser e, finalmente, compilação de um tutorial para referência e manual de operação do programa CAM CypCut (que é a interface entre o CNC da máquina e os desenhos carregados por um operador).

2 FUNDAMENTOS

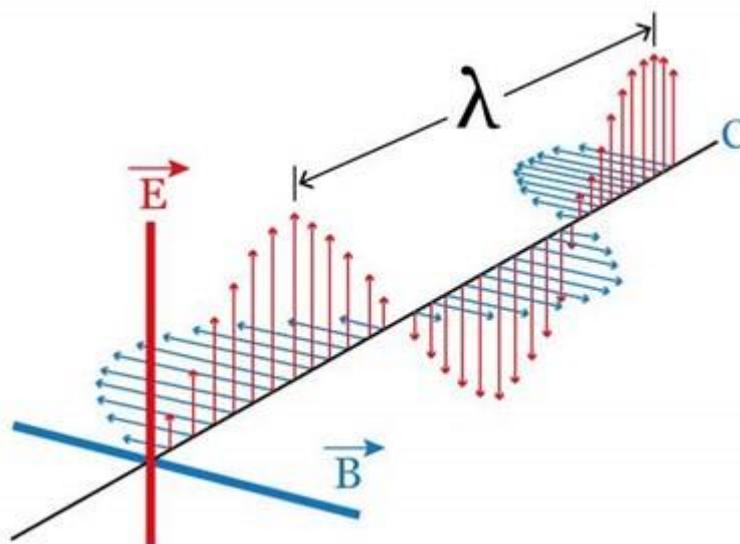
Este capítulo 2, no trabalho original, debruça-se numa revisão do processo físico de amplificação da radiação: aspectos do eletromagnetismo, natureza do fóton e uma explicação do processo de emissão estimulada de fótons, nos termos da física quântica.

Lasers são caracterizados por seu comprimento de onda no vácuo e são usados em aplicações onde técnicas simples não podem ser usadas para gerar a luz da coerência espacial ou temporal necessária (ZLATANOV, 2016, p. 2).

2.1. INTERAÇÃO LUZ E MATÉRIA

No século XIX, foi o físico escocês James Clerk Maxwell teorizou e demonstrou a existência de ondas eletromagnéticas, por demonstrar que a oscilação de uma carga elétrica C dá origem a campos magnéticos \vec{B} . Esses campos, por sua vez, produzem campos elétricos \vec{E} , assim como a variação de fluxo de campos elétricos origina campos magnéticos (Figura 2). A interação entre esses campos é responsável pelo surgimento das ondas eletromagnéticas (CARISTAN, Laser Cutting Guide for Manufacturing, 2004, p. 357) (PALANDI, FIGUEIREDO, DENARDIN, & MAGNAGO, 2010, p. 15).

Figura 2 - A ONDA ELETROMAGNÉTICA



FONTE: adaptado do original de Lennart Kudling do repositório digital da Wikimedia Commons (2019).

LEGENDA: Onda eletromagnética: representação da ortogonalidade do campo elétrico \vec{E} , campo magnético \vec{B} e direção de propagação na velocidade c , além do comprimento de onda λ .

O mesmo Maxwell percebeu que a luz visível é uma onda eletromagnética, algo que não era óbvio até então. O próprio fóton é hoje referido como sendo o “estado excitado do campo eletromagnético” (MUTHUKRISHNAN, SCULLY, & ZUBAIRY, 2003).

Enquanto o físico e matemático britânico Isaac Newton argumentava que a luz é um fluxo de pequenas partículas (MUTHUKRISHNAN, SCULLY, & ZUBAIRY, 2003), o holandês Christiaan Huygens, também físico e matemático, acreditava que a luz tinha propriedades de ondas (STEEN, Capítulo 2 - Basic Laser Optics, 2003, p. 61). No início do século XX, o físico francês Louis-Victor-Pierre-Raymond, VII duque de Broglie, conhecido geralmente como Louis de Broglie, sugeriu que estas características aparentemente diferentes eram, na realidade, o mesmo comportamento observado de diferentes perspectivas: que as partículas podem se comportar como ondas e as ondas (radiação) podem comportar-se como partículas (Prince Louis-Victor Pierre Raymond de Broglie - Prêmio Nobel de Física 1929, 1929) (EISBERG & RESNICK, Cap.3 O postulado de De Broglie – Propriedades ondulatórias das partículas, 1979).

2.2. FÍSICA QUÂNTICA

Nesta seção secundária 2.2 do trabalho original, são mencionadas as bases teóricas que previram a possibilidade de emissão de fótons de forma estimulada, em cujos postulados pesquisadores diversos fundamentaram sua busca pela amplificação da radiação visível.

Em 1905 Albert Einstein propôs uma estimativa quantitativa da radiação eletromagnética conhecida como fóton. Ele introduziu a ideia de que se a luz for absorvida ou emitida pelo corpo, ela ocorrerá nos átomos do corpo. Quando um fóton de frequência f é absorvido por um átomo, a energia de alta frequência é transferida do fóton de luz para o átomo (JELÍNKOVÁ & ŠULC, 2013, p. 19).

Quando a luz se propaga no espaço, ela se comporta como onda, mas quando incide sobre uma superfície, passa a se comportar como partícula. Trata-se da lei do efeito fotoelétrico, pela qual Einstein recebeu o Prêmio Nobel de física de 1921 (Albert Einstein – Prêmio Nobel de Física de 1921, 1921) (EISBERG & RESNICK, Cap.3 O postulado de De Broglie – Propriedades ondulatórias das partículas, 1979).

O dinamarquês Niels Bohr propunha na mesma época o modelo do átomo, com a maior parte de sua massa contida no núcleo (prótons e nêutrons) e orbitado pelos elétrons, leves, mas eletricamente equivalentes aos prótons. O sódio, ao ser aquecido, emite uma luz amarela brilhante correspondente a duas linhas próximas a 589 nm. A energia da luz (daí a frequência e, portanto, a cor) está relacionada à diferença de energia entre os estados eletrônicos (níveis de energia) durante essas transições (EISBERG & RESNICK, Cap.4 O modelo de Bohr para o átomo, 1979).

No projeto de fonte de laser, é particularmente interessante seu meio ativo, pois esta diferença de energia entre os estados eletrônicos se dá no material que o compõe, um sistema de moléculas, átomos e íons ligados entre si, constituídos por sua vez de partículas elementares: prótons, nêutrons e elétrons.

2.3. EMISSÃO ESTIMULADA

No trabalho completo, na seção secundária 2.3, estão reunidas explicações de autores citados sobre o mecanismo da emissão estimulada de fótons.

Os elétrons só podem orbitar de forma estável nos átomos, sem emitir radiação, em certas “órbitas estacionárias”, a um certo conjunto discreto de distâncias do núcleo. É a definição de Niels Bohr do átomo em seu “estado estacionário”, caracterizado por uma energia específica e bem definida (BOHR, 1934) apud (CHEN, DING, HSU, KIM, & ZHOU, 2006).

Essas órbitas estão associadas a energias definidas e bem específicas, também chamadas de camadas de energia ou níveis de energia (Figura 3). Os elétrons só podem ganhar e perder energia saltando de uma órbita permitida para outra, absorvendo ou emitindo radiação eletromagnética com uma frequência ν determinada pela diferença de energia dos níveis de acordo com a *Relação de Planck-Einstein*:

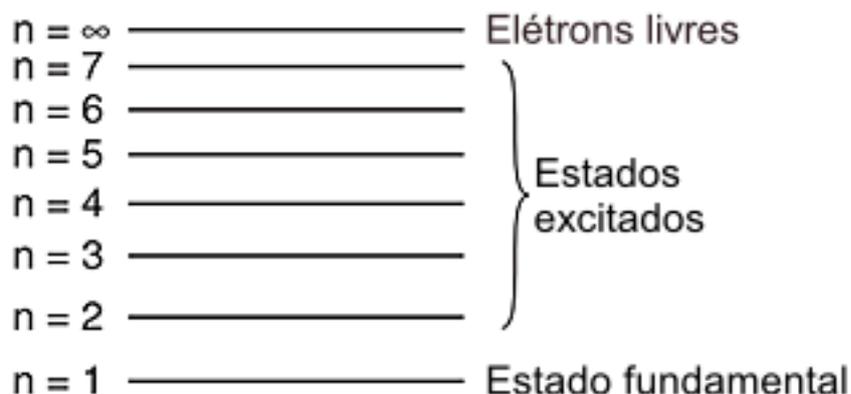
$$\Delta E = E_2 - E_1 = h\nu$$

Equação 2.1

onde h é a constante de Planck e ν é a frequência da radiação (CHEN, DING, HSU, KIM, & ZHOU, 2006)

A diferença de energia entre o estado fundamental e o estado excitado é chamada de energia de excitação. O nível de energia mais alto em um sistema quântico corresponde à energia de ionização, que divide o átomo em elétrons e íons livres, ou energia de dissociação, que divide a molécula em átomos mais simples, grupos únicos de átomos ou íons (URQUHART, 1988).

Figura 3 – NÍVEIS DE ENERGIA DO SISTEMA QUÂNTICO.

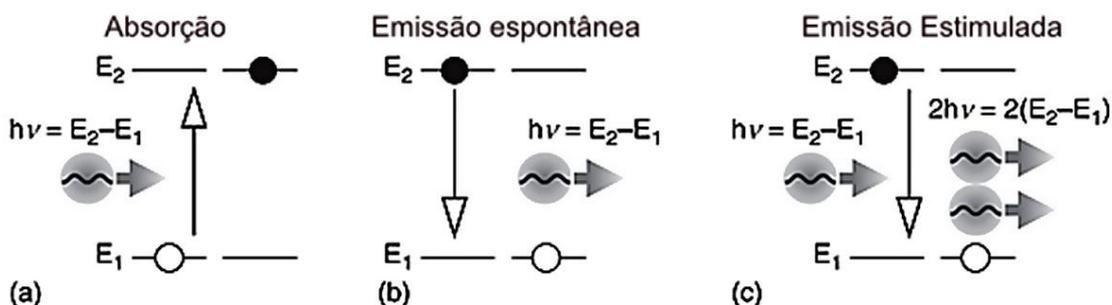


FONTE: Adaptado da figura 2.2 de (JELÍNKOVÁ & ŠULC, 2013).

LEGENDA: Níveis de energia do sistema quântico (n é o número do nível de energia que corresponde à energia E).

A transição quântica é a mudança de um estado estacionário do sistema quântico para outro. O processo é denominado *absorção* quando um sistema quântico passa a um estado excitado (nível excitado) por receber energia, podendo ser a energia advinda de uma fonte de luz externa ou como resultado de colisões de átomos ou moléculas. Depois de um tempo, o sistema quântico libera energia durante a transição e retorna a um estado estável, num processo denominado *emissão espontânea* (JELÍNKOVÁ & ŠULC, 2013, p. 19). Os efeitos que ocorrem em sistemas quânticos podem ser mais facilmente compreendidos quando explicados em apenas em dois níveis, a chamada aproximação de dois níveis (Figura 4) (JELÍNKOVÁ & ŠULC, 2013).

Figura 4 – INTERAÇÃO DA RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICO COM UM SISTEMA QUÂNTICO, APROXIMAÇÃO DE DOIS NÍVEIS.



FONTE: Adaptado da figura 2.3 de (JELÍNKOVÁ & ŠULC, 2013).

LEGENDA: Os processos durante a interação da radiação eletromagnética com um sistema quântico: absorção (a), emissão espontânea (b) e emissão estimulada (c).

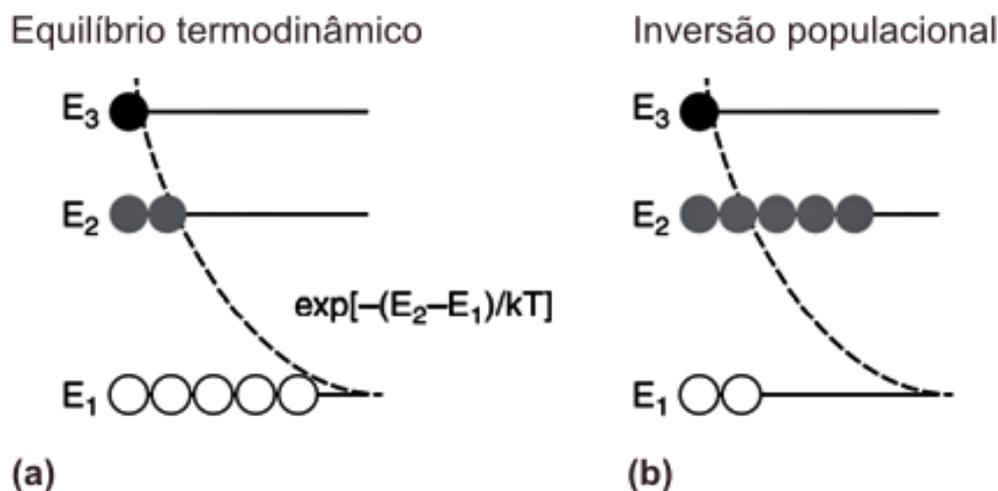
2.3.1. Sistema quântico, inversão populacional e bombeamento

Esta seção terciária 2.3.1, no trabalho completo, reúne explicações de autores mencionados sobre a maneira encontrada por pesquisadores para escapar do equilíbrio termodinâmico, realizar a inversão populacional do meio ativo e permitir um consequente ganho entre o bombeamento e a luz emitida.

A maioria das substâncias na natureza está em equilíbrio termodinâmico, isto é, a maioria dos sistemas quânticos está no estado fundamental. *Em condições naturais, portanto, a probabilidade de absorção é maior que a probabilidade de emissão estimulada de radiação, de tal modo que apenas ocorre emissão espontânea* (KANNATEY-ASIBU JR., Capítulo 1 - Laser Generation, 2009).

Para amplificar a radiação deve-se estabelecer a chamada *inversão populacional*, o que irá assegurar maior probabilidade de um fóton incidir sobre um átomo em estado excitado - digamos parte da população N_2 (no nível superior) – e diminuir a probabilidade de atingir um átomo em seu estado fundamental – que, neste exemplo, seria parte da população N_1 , nível inferior. É necessário adicionar energia ao sistema quântico para que este escape do seu equilíbrio termodinâmico e alcance essa inversão populacional (Figura 5), num processo denominado de *bombeamento de sistemas quânticos*.

Figura 5 - POPULAÇÃO DOS NÍVEIS ENERGÉTICOS EM EQUILÍBRIO TÉRMICO.

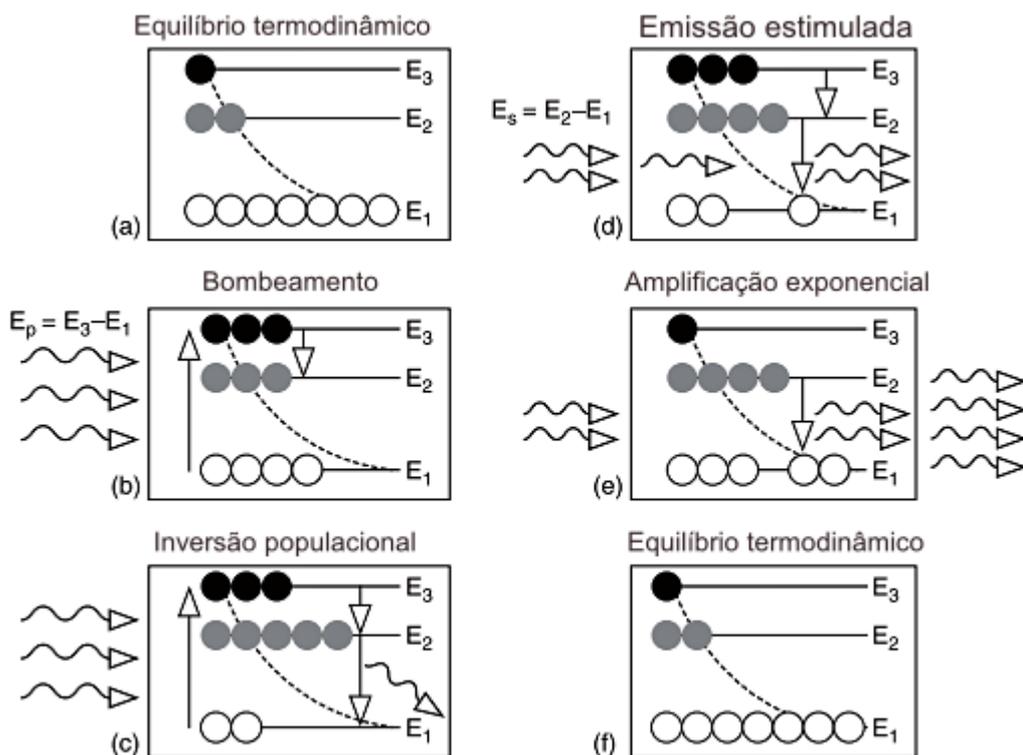


FONTE: Adaptado da figura 2.4 de (JELÍNKOVÁ & ŠULC, 2013).

LEGENDA: População dos níveis energéticos em equilíbrio térmico (a) e distribuição da população entre os níveis energéticos em caso de inversão populacional (b).

Na Figura 6, Jelínková e Šulc (JELÍNKOVÁ & ŠULC, 2013) descrevem esquematicamente o princípio da amplificação de radiação em um modelo de três níveis. O lado esquerdo da figura (Figura 6 (a – c)) mostra a interação dos fótons com os materiais não-bombeados, estando originalmente em equilíbrio termodinâmico - Figura 6.a. Os próximos *quanta* com frequência de bombeamento ressonante ν_b (isto é, em frequência proporcional à diferença de energia entre os níveis 3 e 1, conforme Equação de Planck-Einstein do efeito fotoelétrico: $\nu_b = \frac{E_3 - E_1}{h}$) são absorvidos em sua maior parte e o sistema quântico alcançará gradualmente o estado excitado (Figura 6.c). No lado direito da figura (Figura 6 (d – f)), os fótons ressonantes na onda de sinal interagem com o material ativo que está no estado excitado. A radiação da fonte externa com a energia de sinal E_s ($E_s = E_2 - E_1$) está passando pelo material excitado e *estimula* os átomos a fazer a transição (decaimento) para o nível terminal (Figura 6.d). É importante notar que esta diferença energética E_s é menor que E_b , assim: $E_s = E_b - \text{transição fônica}$. Isto assegura que o bombeamento E_b preste-se à inversão de população, enquanto emissão estimulada ocorre pelo fóton de energia E_s . À medida que se espalha pelo material ativo, um processo de “avalanche” começa e o número de fótons estimulados aumenta - a radiação original é amplificada (Figura 6.e). O sistema quântico relaxa de volta ao estado de equilíbrio termodinâmico, como no início do processo (Figura 6 (f, a)).

Figura 6 – AMPLIFICAÇÃO DA RADIAÇÃO.



FONTE: Adaptado da figura 2.6 de (JELÍNKOVÁ & ŠULC, 2013).

LEGENDA: Estado inicial (a); absorção da radiação ressonante E_p e criação de inversão de população (b, c); emissão estimulada (d) amplificação da radiação passante E_s (e); transição do material para o equilíbrio termodinâmico (f).

3 ARQUITETURA DO LASER

Este capítulo 3 do trabalho reúne informações de artigos diversos sobre as arquiteturas de alguns sistemas laser, que são a forma como os pesquisadores colocaram em prática os fundamentos discutidos no capítulo 2. De acordo com (ZLATANOV, 2016), são componentes de um gerador laser típico:

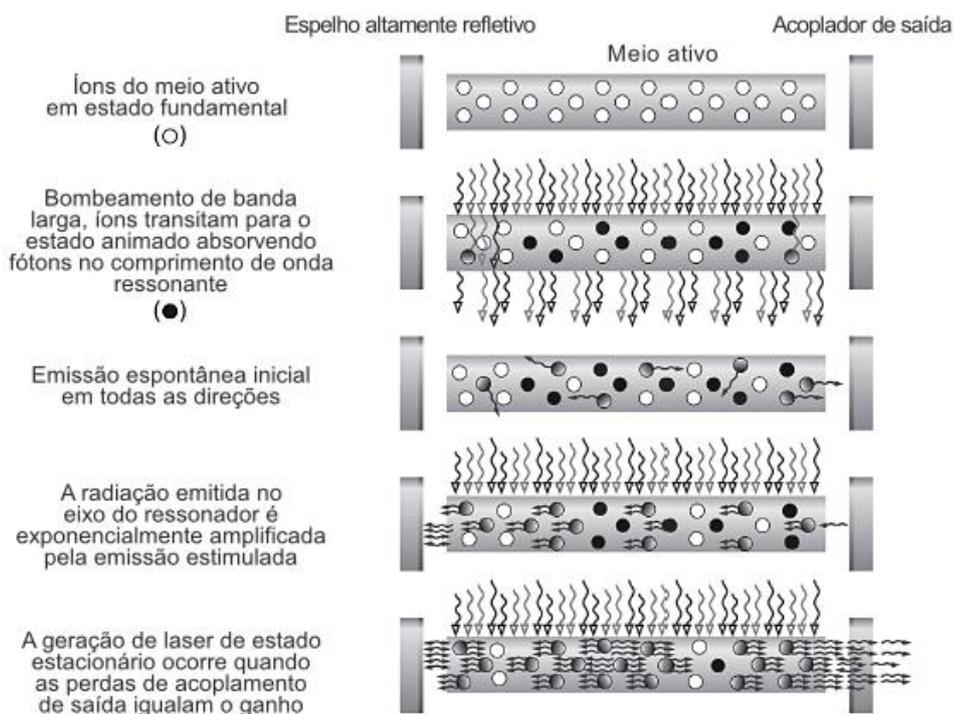
- Meio de ganho
- Sistema de energia para bombeamento do laser
- Espelho de alta reflexão
- Acoplador de saída (espelho menos refletivo)
- Feixe de laser

O pioneiro laser de rubi, construído pelo físico estadunidense Theodore Harold Maiman trabalhou com o seguinte princípio: Quando a inversão da população é estabelecida pelo bombeamento E_b , os átomos, os íons ou as moléculas do material ativo estão excitados e então a geração de radiação laser pode começar. Devido ao esforço de um sistema quântico para permanecer em equilíbrio termodinâmico, alguns dos sistemas quânticos estão retornando ao estado inferior com a emissão espontânea de fótons, emitidos com diferentes polarizações em todas as direções e em uma ampla faixa espectral dada pelo meio ativo do laser (ilustrado na figura 12 da monografia completa, não reproduzida neste) (MAIMAN, The Laser Odyssey, 2000).

Estes fótons espontâneos cumprem o papel dos fótons estimulantes (ver Figura 6.d), causando a transição induzida (decaimento) de outros sistemas quânticos excitados (átomos, íons, moléculas) para o estado fundamental, com a emissão estimulada de fótons (emissão estimulada). Como resultado, todo fóton emitido espontaneamente desencadeia a geração de outros fótons. Enquanto passam pelo meio ativo, como descrito acima, os fótons iniciam um processo de "avalanche" e o número de fótons estimulados aumenta exponencialmente. Para ampliar ainda mais o feixe de fótons gerado, um espelho 100% refletivo é colocado no caminho dos fótons em propagação. Após a reflexão, eles passam pelo meio ativo mais uma vez e seu número aumenta. Quando o segundo espelho - paralelo ao primeiro - é usado no lado oposto do meio ativo, a radiação é mais uma vez refletida e passa pelo meio ativo novamente. O sistema de dois espelhos ajustados em plano paralelo é chamado de "ressonador óptico (aberto)", baseado na cavidade Fabry-Pérot (KANNATEY-ASIBU JR., Capítulo 2 - Optical Resonators, 2009). Quando o bombeamento ainda está ligado (resultando que, no meio ativo, existam sistemas suficientes no estado excitado), o número de fótons emitidos dentro do ressonador está crescendo, o feixe de laser é formado e deixa o ressonador através do segundo espelho, que é *parcialmente refletivo*. Este segundo espelho, que permite que parte da radiação escape para formar o feixe laser útil, é chamado de "acoplador de saída". A formação de radiação laser no interior do ressonador é ilustrada graficamente na Figura 7. Os fótons que se deslocam em outras direções

(que não a direção perpendicular aos espelhos ressonadores) não retornam ao meio ativo e não desempenham um papel ativo na geração de radiação laser (JELÍNKOVÁ & ŠULC, 2013).

Figura 7 – ARQUITETURA DE FORMAÇÃO DA RADIAÇÃO LASER.



FONTE: Adaptado da figura 2.7 de (JELÍNKOVÁ & ŠULC, 2013).

3.1. MATERIAL ATIVO (MEIO DE GANHO)

O meio de ganho é uma substância na qual a inversão populacional pode ser alcançada pois têm, como característica comum, uma estrutura interna complicada de níveis ou bandas de energia (para os semicondutores).

Este material ativo pode estar em qualquer estado: gás, líquido, sólido ou plasma (JELÍNKOVÁ & ŠULC, 2013). O importante é que o meio de ganho de um laser é cuidadosamente selecionado para o projeto laser específico de modo a emitir em uma desejada faixa de frequência, de modo que o projeto da cavidade e da fonte de bombeamento é específica para o meio de ganho. É normalmente um material de pureza, tamanho, concentração e forma controlados (ZLATANOV, 2016).

3.2. BOMBEAMENTO (FONTE DE ENERGIA)

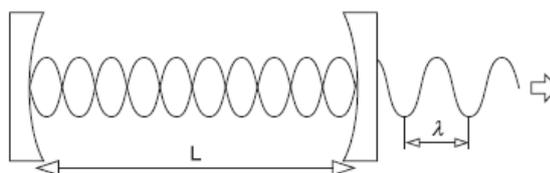
Como o principal requisito para a amplificação da radiação é criar e manter a inversão populacional dos níveis de energia no meio ativo do laser, faz-se necessária uma fonte de energia. Devido a vários materiais ativos, existem inúmeros sistemas de bombeamento a laser, que são fortemente dependentes das propriedades do meio ativo, alguns dos sistemas de bombeamento mais comuns seriam: opticamente bombeados (por um *flash* ou mesmo pela radiação de outro laser de menor potência), por descarga elétrica, por feixe de elétrons, por expansão de gás comprimido, por reação química e por recombinação (Figura 11) (KOECHNER, 1999).

3.3. CAVIDADE / RESSONADOR ABERTO

O ressonador óptico é o mecanismo que estimula uma direção específica de propagação para a emissão estimulada e restringe as perdas por difração, por meio de espelhos (HODGSON & WEBER, 2005). É um sistema de duas ou mais superfícies refletivas - espelhos ou outros elementos ópticos refletivos tais como prismas que permitem estabelecer ondas estacionárias com comprimento de onda λ muito menor que a dimensão geométrica dos espelhos e a distância entre eles, vide Figura 8 (WATSON, 1992).

Um dos espelhos do ressonador é totalmente refletivo (sua reflexividade é de $\sim 100\%$); o outro é parcialmente transparente (a transparência é igual a 1% a 99%, de acordo com o projeto de sistema do laser). Por esse espelho (chamado acoplador de saída) o feixe de laser sai do ressonador. O meio de ganho amplificará todos os fótons que passarem por ele, independentemente da direção; mas apenas os fótons em um modo espacial suportado pelo ressonador - na direção de reflexão entre os dois espelhos - passarão mais de uma vez pelo meio (aproximadamente 10^9 s^{-1}) e receberão amplificação substancial (SILFVAST, 2004).

Figura 8 - ONDAS ESTACIONÁRIAS EM UM RESSONADOR ÓPTICO.



FONTE: Adaptado da figura 2.8 de (JELÍNKOVÁ & ŠULC, 2013).

LEGENDA: Esquema das ondas estacionárias dentro do ressonador óptico e radiação gerada transmitida pelo espelho ressonador parcialmente transparente (L - comprimento do ressonador, distância entre os espelhos do ressonador, λ - comprimento de onda da radiação gerada).

4 HISTÓRIA

Neste capítulo 4 do trabalho original, estão citados os principais pesquisadores que, paulatinamente, progrediram a tecnologia da amplificação da radiação, trabalhando sobre bases teóricas postuladas no início do século XX, que anteviam a possibilidade de emissão de fótons de forma estimulada. Uma seção secundária, 4.2, foca na história do corte a laser, conforme informação reunida dos autores citados.

4.1. TEORIA E PRINCÍPIOS

Em 1917, Albert Einstein estabeleceu as bases teóricas para o laser e o maser no artigo *Zur Quantentheorie der Strahlung* (Sobre a Teoria Quântica da Radiação, em tradução livre) (EINSTEIN, 1917). Einstein levantou a hipótese de que, além da emissão espontânea, uma transição estimulada, induzida ou forçada pode existir. Basicamente, Albert Einstein traçou os princípios teóricos para a amplificação da radiação pela suposição que elétrons podem ser estimulados a emitir luz de comprimento de onda λ particular, a partir de luz estimulante naquele mesmo λ . Essa emissão ocorre quando o fóton recebido (estimulante, com a energia igual à diferença $\Delta E = E_2 - E_1$) induz a transição do sistema quântico do estado excitado para o estado fundamental. O novo fóton *emitido*, então, não apenas tem a mesma energia que o fóton *estimulante*, mas se propaga na mesma direção e tem a mesma fase. Essa emissão é denominada emissão estimulada, induzida ou forçada (Figura 4.c) (KLEPPNER, 2005).

Em 1928, os físicos alemães Hans Kopfermann e Rudolf Walther Ladenburg observaram a emissão estimulada pela primeira vez, por meio de uma descarga de gás (KOPFERMANN, 1928), embora na época parecesse não ter uso prático tão evidente (HECHT J. , Laser, 2020).

A ideia de amplificar a radiação por emissão estimulada foi comprovada pela primeira vez na região de micro-ondas. Em 1954, um dispositivo molecular MASER para gerar radiação de micro-ondas com um comprimento de onda de 13 mm foi construído independentemente por Nikolay G. Basov e Aleksandr M. Prokhorov, e por James P. Gordon, Herbert J. Zeiger e Charles Hard Townes (BASOV & PROKHOROV, 1954) (GORDON, ZEIGER, & TOWNES, 1955). O Prêmio Nobel de Física de 1964 foi dividido, metade concedido a Charles Hard Townes, a outra metade juntamente com Nicolay Gennadiyevich Basov e Aleksandr Mikhailovich Prokhorov "pelo trabalho fundamental no campo da eletrônica quântica, que levou à construção de osciladores e amplificadores baseado no princípio maser-laser" (Prêmio Nobel em física 1964 - Charles Hard Townes, Nicolay Gennadiyevich Basov, Aleksandr Mikhailovich Prokhorov, 1964).

A partir desta época iniciou-se uma "corrida" pela construção com sucesso do primeiro laser, que amplificaria radiação na faixa de luz visível. Um gradual

desenvolvimento de tecnologias, por diversos cientistas, permitiu que todas as partes do futuro laser estivessem disponíveis (ou seja, o meio ativo, o bombeamento e o ressonador aberto). Coube, porém, a mais um personagem – o físico estadunidense Theodore Harold Maiman - reuni-las com uma técnica e apuro tal que permitisse a construção do aparelho que finalmente produziu a amplificação da radiação visível (Estados Unidos da América Patente Nº US3353115A, 1965). Em 16 de maio de 1960, nos laboratórios da Hughes Aircraft Co. em Malibu, no estado estadunidense da Califórnia, Theodore Harold Maiman gerou a primeira radiação laser óptica de todos os tempos. Ele disparou pulsos brilhantes de uma lâmpada de flash de fotógrafo para excitar átomos de cromo em um cristal de rubi sintético, um material que escolheu porque havia estudado cuidadosamente como ele absorvia e emitia luz e calculou que deveria funcionar como um laser (HECHT J. , Laser, 2020). O laser de Maiman, o primeiro funcional, produziu luz laser vermelha com comprimento de onda de 694 nanômetros. Uma lâmpada helicoidal (fonte de bombeamento) cercava um cristal de rubi sintético em forma de haste (meio ativo), e a cavidade óptica foi formada revestindo as extremidades achatadas da haste de rubi com um material altamente refletivo (cavidade aberta). Um feixe vermelho intenso foi observado emergindo da extremidade da haste quando a lâmpada foi disparada: obteve a radiação vermelha em um comprimento de onda de 694,3 nm em operação pulsada.

Quadro 1 – MARCOS IMPORTANTES NO DESENVOLVIMENTO DE LASERS.

Ano	Autor	Tipo de Laser ou Princípio
1952	Albert Einstein	Princípio Maser
1954	Townes, Gordon, Zeiger	Maser
1958	Townes, Schawlow, Basov, Prokhorov	Princípio Laser
1960	Theodore Maiman	Laser de Rubi
1961	A. Javan, W. Bennett e D. Harriott	Laser de Hélio-Neônio
1961	L. F. Johnson e K. Nassau	Laser de Neodímio
1962	A. Javan e Nicolay G. Basov	Princípio Diodo Laser Semicondutor
1962	R. Hall	Laser de Semicondutores
1963	C. K. N. Patel	Laser de CO2
1964	W. Bridges	Laser de Íon de Argônio
1966	W. Silfvast, G. R. Fowles e B. D. Hopkins	Laser de Hélio-Cádmio
1966	P. P. Sorokin e J. R. Lankard	Laser de Corante Sintonizável
1975	J. J. Ewing e C. Brau	Laser de Excímero
1976	J. M. J. Modey e colaboradores	Laser de Elétron Livre
1979	Walling e colaboradores	Laser de Alexandrita
1985	D. Mathews e colaboradores	Laser de Raio-x

FONTE: Reproduzido e traduzido da publicação de patente internacional WO 2006059341 A1 "Laser electric power generator", por SOUNTHIRARAJAN, Shry K. (2006).

4.2. CORTE A LASER

O primeiro experimento no processamento de materiais a laser foi conduzido em maio de 1967, quando o britânico Peter Houldcroft usou um gás auxiliar de oxigênio para cortar chapas de aço de 1 mm de espessura com um feixe de laser de CO₂ de fluxo lento de 300W focalizado (POWELL, et al., 2008). Este laser de 300W estava operacional no Reino Unido apenas dois anos depois de Patel ter demonstrado a ação de emissão laser da molécula de CO₂. Esses primeiros experimentos marcam o início de processamento de materiais a laser como o conhecemos hoje, particularmente relevante pois o corte é a aplicação mais significativa do uso de lasers no processamento de materiais e na indústria (RIVEIRO A. , et al., 2019).

Houldcroft projetou, no início de 1967, um 'bocal de corte a laser', algo fundamental no corte a laser meio século depois. O corte foi auxiliado por gás ativo oxigênio: uma câmara de pressão de oxigênio que forneceria o fluxo de gás auxiliar reativo coaxial na região do foco do feixe de laser, conforme Figura 9.

Figura 9 – O PRIMEIRO CORTE A LASER DE GÁS ASSISTIDO POR OXIGÊNIO EM MAIO DE 1967



FONTE: Adaptado da figura 2 de (HILLTON, 2007).

O primeiro sistema de corte a laser de CO₂ ótica móvel disponível comercialmente, com uma configuração comparável a uma ampla gama de equipamentos disponíveis hoje, foi fornecido pela Laser Work AG da Suíça em 1975, visto na Figura 10.

Figura 10 – PRIMEIRA MÁQUINA DE CORTE A LASER CO₂ COM ÓTICA MÓVEL DE 2 EIXOS (1975)



FONTE: Foto de Laser – Work AG, apud (HILLTON, 2007).

5 CLASSIFICAÇÃO E MODOS DE OPERAÇÃO

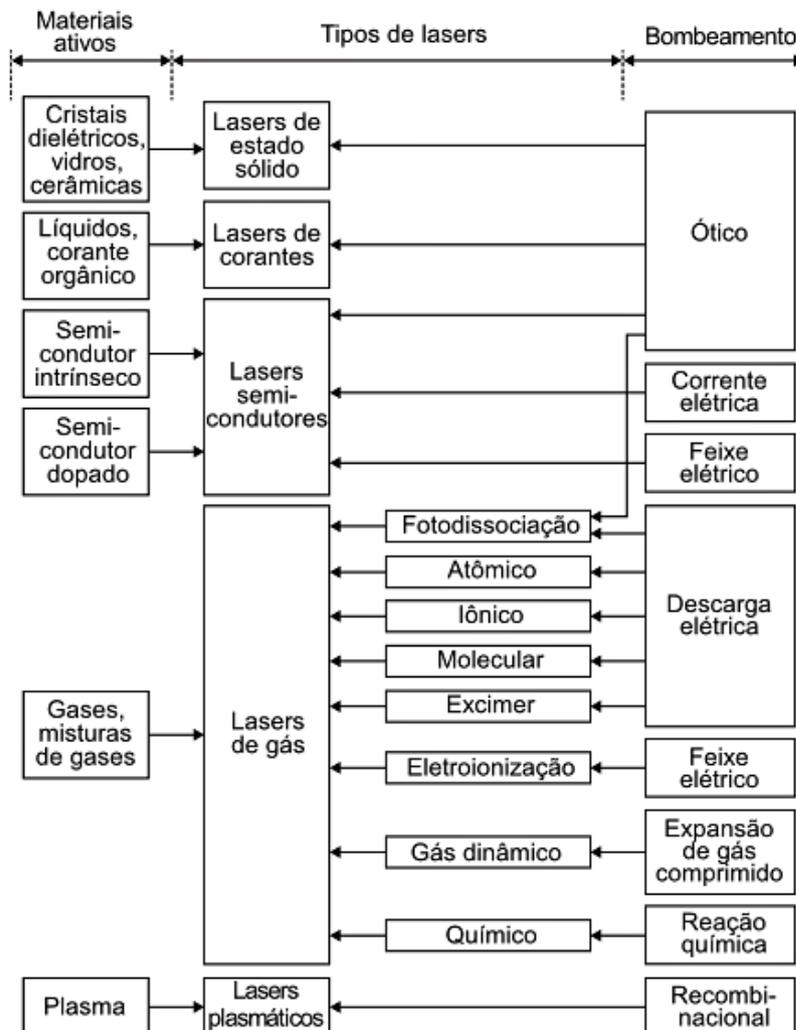
Este capítulo 5 sintetiza conteúdos de diversos autores que explicam alguns conceitos e parâmetros relevantes para categorizar e entender a diferença entre diferentes projetos de um sistema LASER.

Diversos critérios podem ser empregados para categorizar os sistemas a laser: conforme o material (meio) ativo, mecanismo de bombeamento, comprimento de onda gerado, regime de operação, operação temporal, tipo de transições quânticas etc. (JELÍNKOVÁ & ŠULC, 2013) (HECHT J. , Laser, 2020).

- os *meios ativos* do laser podem ser classificados em cinco grandes grupos: lasers de estado sólido, semicondutor, gás, líquido e plasma. Além destes principais materiais, há ainda possibilidade de emissão laser de mídias exóticas, elétrons livres e reações químicas, segundo item 5.1;
- os *níveis de energia* envolvidos nos lasers de emissão estimulados são distinguidos como: bandas de elétrons, de íons e moleculares em lasers semicondutores;
- *métodos de bombeamento*: os sistemas são divididos em lasers bombeados opticamente, por feixe de elétrons, por expansão de gás comprimido, descarga elétrica, reação química, por recombinação etc.;
- os *comprimentos de onda* gerados pelos lasers podem ser divididos em: laser infravermelho, visível, ultravioleta e de raios-X;
- *desenvolvimento temporal* da radiação: os lasers podem ser divididos em contínuos (CW), pulsados e quase contínuos (subitem 5.2);
- *regime de operação*: os lasers podem ser de execução livre, Q-switch ou de modo bloqueado (subitem 5.2).

A classificação dos lasers de acordo com os materiais ativos e o tipo de bombeamento é apresentada na Figura 11.

Figura 11 – CLASSIFICAÇÃO DO LASER DE ACORDO COM O MATERIAL (MEIO) ATIVO E BOMBEAMENTO.



FONTE: Adaptado da figura 2.13 de (JELÍNKOVÁ & ŠULC, 2013).

5.1. TIPOS E PRINCÍPIOS DE OPERAÇÃO

Além dos principais meios ativos comercialmente disponíveis mencionados nos subitens 5.1.1 até 5.1.3, o trabalho completo descreve outros meios ativos: cristal fotônico; excímero, de semicondutores (diodos emissores de luz), químicos, elétrons livres e de corantes (subitens 5.1.4 até 5.1.9 no trabalho original).

5.1.1. A gás

Seguindo a invenção do laser de gás He-Ne por Javan et al. (operando em $\lambda=1,15 \mu\text{m}$) (JAVAN, BENNET Jr., & HERRIOTT, 1961), lasers de gás usando muitos gases diferentes foram construídos para amplificar a luz de forma coerente e usados para muitos propósitos. Os lasers comerciais de dióxido de carbono (CO_2) podem emitir muitas centenas de watts em um único modo espacial que pode ser concentrado em um pequeno ponto. Os lasers de íon de argônio (Ar^+) podem operar em várias transições de laser entre 351 e 528,7 nm. Lasers de íons metálicos são lasers de gás que geram comprimentos de onda ultravioleta profundos. Hélio-prata (He-Ag) 224 nm e neônio-cobre (Ne-Cu) 248 nm são dois exemplos.

5.1.2. De estado sólido

Os lasers de estado sólido usam um bastão cristalino ou de vidro que é "dopado" com íons que fornecem os estados de energia necessários. Itérbio, hólmio, túlio e érbio são outros "dopantes" comuns em lasers de estado sólido. As limitações térmicas em lasers de estado sólido surgem da potência da bomba não convertida que aquece o meio. Este calor, quando acoplado a um alto coeficiente termo-óptico $\frac{dn}{dT}$, pode causar lente térmica e reduzir a eficiência quântica (ZENTENO, 1993).

5.1.3. De fibra

São chamados de lasers de fibra amplificadores de laser em que a luz é guiada pela reflexão interna total em uma fibra ótica com um núcleo dopado com um elemento de terra rara, que é o meio ativo deste laser. Os elementos comuns usados para dopagem incluem érbio (Er), neodímio (Nd) e itérbio (Yb) (KANNATEY-ASIBU JR., Capítulo 8 - Types of Lasers, 2009, p. 180). O bombeamento normalmente é feito usando bancos de diodos. A luz é canalizada e amplificada por meio de um cabo de fibra ótica semelhante ao usado para transferência de dados. A luz amplificada, ao sair do cabo de fibra, é colimada e então focada por uma lente no material a ser cortado. A criação da luz é 200% mais eficiente do que por meio de um laser CO_2 tradicional (KELLENS, RODRIGUES, DEWULF, & DUFLOU, 2014, p. 856) e o fornecimento é muito mais simples, sem espelhos óticos caros (LARCOMBE, 2013). A lente de foco, ao contrário de uma máquina de laser CO_2 convencional, é selada na cabeça de corte e, portanto, não é um item consumível.

Como o direcionamento dentro das fibras óticas permite que as regiões de ganho sejam longas (até mesmo quilômetros) e as fibras têm excelente relação volume / área de superfície, há condição de resfriamento muito eficiente que torna possível suportar quilowatts de potência de saída contínua. Com comprimento de onda de 1064 nm, os lasers de fibra produzem um diâmetro focal particularmente pequeno, o que significa que sua intensidade é até 100 vezes maior do que a dos lasers de CO_2 com a mesma potência média emitida (MELO, SOUSA, BERENDT,

HENDOW, & SALCEDO, 2011). Lasers de fibra são apresentados de maneira dedicada no capítulo 8.

5.2. MODOS DE OPERAÇÃO

No domínio do tempo, conforme o procedimento de bombeamento, os lasers podem ser divididos em emissão contínua (CW, sigla do termo inglês *continuous wave*) ou emissão pulsada. Além desses dois regimes básicos, os lasers podem funcionar em um modo de *execução livre*, *bombeamento pulsado*, *Q-comutado* ou, ainda, *modo bloqueado* (que também pode ser contínuo ou pulsado) (KANNATEY-ASIBU JR., Capítulo 6 - Beam Modification, 2009) (JELÍNKOVÁ & ŠULC, 2013).

O trabalho contempla seis subitens, de 5.2.1 até 5.2.6, descrevendo os modos de operação: onda contínua (CW), regime pulsado, operação livre, Q-comutado, em modo bloqueado e de bombeamento pulsado.

6 UTILIZAÇÕES

O capítulo 6 reúne informações dos autores citados sobre como a tecnologia laser encontrou diversificados campos de aplicação em pouco mais de seis décadas. Nenhuma das aplicações elencadas está aprofundada aos detalhes, com exceção do corte a laser para fins industriais, que é detidamente tratado no capítulo 7. Desde a demonstração da amplificação da luz visível realizada por Theodore Maiman no pioneiro laser de rubi, esta demonstrou utilidade em milhares de aplicações altamente variadas em cada seção da sociedade moderna, incluindo produtos eletrônicos de consumo, tecnologia da informação, ciência, medicina, indústria, aplicação da lei, gravação de padrões em produtos em linha de produção, entretenimento, militar e comunicação. Nesta última aplicação, a comunicação via fibra óptica por meio de lasers permite serviços como a Internet, logo é uma tecnologia-chave nas comunicações modernas e em nosso estilo de vida (ZLATANOV, 2016).

Lasers de uso amplo variam em tamanho desde microscópicos lasers de diodo (com numerosas aplicações na vida cotidiana), a lasers de vidro de neodímio do tamanho de campos de futebol que podem gerar dois petawatts ($2 \cdot 10^{15}$ W) durante um período de um picossegundo (10^{-12} s), usados para fusão nuclear de confinamento inercial (uma opção a aceleradores de partículas no campo de fusão nuclear) e outros experimentos físicos de alta densidade de energia (SARRI, 2015).

Os lasers de hélio-neon foram os primeiros lasers com amplas aplicações comerciais. Como podiam ser ajustados para gerar um feixe vermelho visível em vez de um feixe infravermelho, eles encontraram uso imediato para projetar linhas retas para alinhamento, levantamento topográfico, construção e irrigação. Logo os cirurgões oculares começaram a usar pulsos de lasers de rubi para soldar retinas destacadas de volta no lugar, sem cortar o olho. A primeira aplicação em larga escala para lasers foi o scanner a laser de código de barras para caixas automáticas em supermercados, que foi desenvolvido em meados da década de 1970 e se tornou comum alguns anos depois. O reproduzidor de disco laser, LD, lançado em 1978, foi o primeiro produto de consumo de sucesso a incluir um laser, mas o reproduzidor de disco laser compacto, o conhecido CD, foi o primeiro dispositivo equipado com um laser a se tornar comum, começando em 1982, sendo logo seguido pelas impressoras a laser (HECHT J. , Laser, 2020).

Alguns outros usos são (ZLATANOV, 2016):

- Indústria: Corte, soldagem, tratamento térmico de materiais, marcação de peças, medição sem contato de peças.
- Medicina: cirurgia sem sangue, cura a laser, tratamento cirúrgico, tratamento com cálculo renal, tratamento ocular, odontologia.
- Desenvolvimento de produto / comercial: impressoras a laser, impressoras 3D a laser (sinterização seletiva de sólidos ou estereolitografia de resinas), discos ópticos, leitores de código de barras, termômetros, ponteiros laser, hologramas, bolhas.

- Militar: marcação de alvos, munições guiadas, defesa antimísseis, contramedidas eletro-ópticas (EOCM), alternativa ao radar, tropas cegantes.
- Aplicação da lei: usado para detecção de impressão digital latente no campo de identificação forense.
- Pesquisa: Espectroscopia, ablação a laser, recozimento a laser, espalhamento a laser, interferometria a laser, lidar, microdissecção de captura a laser, microscopia de fluorescência, metrologia.
- Exibições de luz laser: Exibições de luz laser.
- Tratamentos cosméticos para a pele: tratamento da acne, redução da celulite e estrias e depilação.

No trabalho completo, no título 6.2 são classificadas aplicações do laser por sua potência, dos 10^{-3} W de um ponteiro laser até $2 \cdot 10^{15}$ W no laser LFEX da Universidade de Osaka, no Japão, aplicado a experimentos relacionados não apenas à fusão nuclear, mas também a interações relativísticas de plasma e física nuclear induzida por laser.

O título 6.3 relata usos militares do laser. O 6.4 discorre sobre o uso do laser em telecomunicações, sobretudo comunicação óptica espacial. Fato muito recente, a empresa SpaceX, de Elon Musk, retomou a conexão da Ucrânia em guerra através da *internet* via satélite, que utiliza lasers para melhorar a conexão da Starlink (ARBULU & RIGUES, 2021).

A medicina é ainda outro ramo da ciência em que o laser encontrou inúmeras aplicações, reunida de autores mencionados e relatadas no título 6.5.

No título final do capítulo, 6.6, o uso industrial do laser é abordado. Nos últimos 50 anos seu uso como ferramenta de produção industrial tem sido explorado de forma extremamente eficiente e inovadora, sobretudo com o advento da automação e robotização - CNC. Além do seu uso mais difundido no corte a laser, marcação e soldagem, outros processos industriais relevantes que empregam o laser devem ser mencionados: fabricação aditiva, revestimento duro (restauração de partes que tenham sofrido algum tipo de fenômeno de desgaste), tratamento térmico, decapagem e medições (MICRONORA, 2012).

7 CORTE A LASER

7.1. INTRODUÇÃO

O capítulo 7 trata especificamente da aplicação industrial do laser como ferramenta de corte, introduzindo o assunto ao qual a segunda metade do trabalho completo está dedicado.

Riveiro (2019) elenca atributos que depõem a favor do processo de corte por fusão a laser em relação a outros métodos de corte, convencionais ou não: qualidade de acabamento na borda cortada, automatização e facilidade de operação, versatilidade quanto aos materiais, repetibilidade e precisão, otimização no aproveitamento do material e, virtualmente, inexistência de desgaste de ferramentas (RIVEIRO A. , et al., 2019). Como mencionado no item 4.2, a primeira tentativa relatada de usar um laser como uma ferramenta de corte pode ser bem atribuído a britânico Peter Houldcroft, que em 1967 usou um laser de CO₂ de 300W com oxigênio como gás de assistência para cortar folha de aço de 1 mm de espessura (HILLTON, 2007). Tal processo é hoje rotina na indústria, sobressaindo para corte de chapas de aço com espessuras que variam de 0,5 a 30 mm, bem como em outros materiais de engenharia (POWELL, et al., 2008).

De modo conciso, para haver a perfuração inicial da chapa e o corte a laser subsequente, o raio laser focalizado é direcionado para a superfície da peça para aquecê-lo rapidamente, resultando em fusão e/ou vaporização, dependendo da intensidade do feixe e do material da peça. O fundido ou vapor é removido ao ser soprado pelo gás auxiliar, inerte ou reativo (Figura 12). Se utilizar um gás auxiliar que seja quimicamente inerte, com função de remoção do fundido e até mesmo a formação de uma atmosfera livre do oxigênio, o processo é chamado de *corte por fusão a laser*. Quando o gás auxiliar é reativo em contato com o material fundido, é designado como *corte de fusão reativa a laser*. O corte é o *slot* ou a abertura criada pelo processo de corte (READY & FARSON, LIA Handbook of Laser Materials Processing, 2001). As particularidades do processo de *perfuração a laser* não são discutidas tampouco no trabalho completo, porém como demonstrado no capítulo 11, sobretudo na seção quaternária 11.2.2.5, *todo caminho de corte necessita de uma perfuração inicial* (Reliablelaser, 2020).

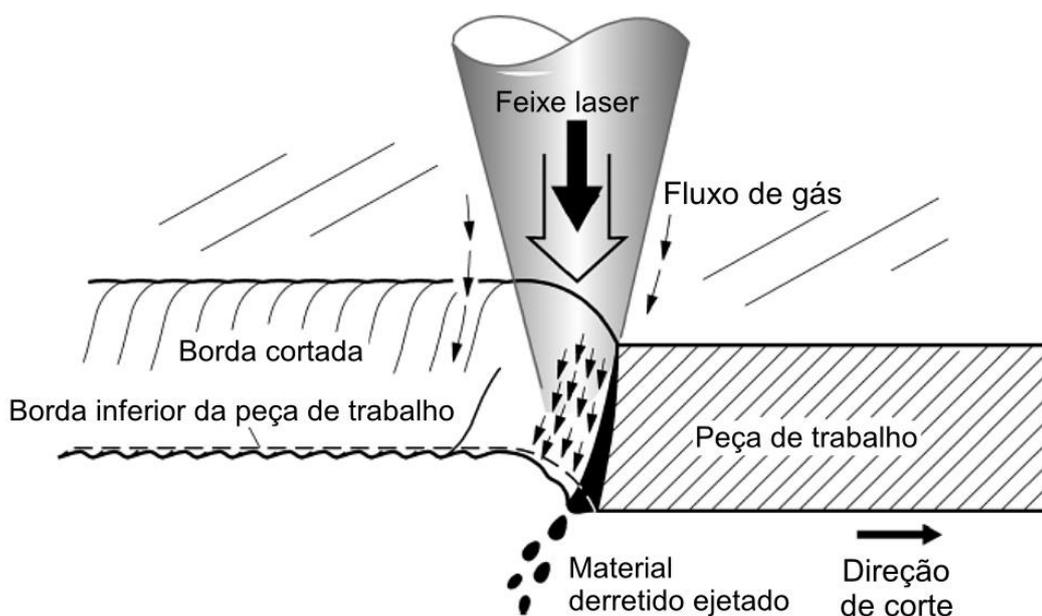
Para metais, a densidade de potência necessária é tipicamente da ordem de 10⁶ a 10⁷ W/cm². Os lasers podem ser usados para cortar efetivamente placas de metal de espessuras de até 10 cm (KANNATEY-ASIBU JR., Capítulo 15 - Laser Cutting and Drilling, 2009, p. 431). Resultam do processo de corte de metais superfícies aproximadamente paralelas e com arestas retas. Sempre haverá, na realidade, uma ligeira inclinação da superfície de corte produzida devido à natureza divergente do feixe, fenômeno mais acentuado para maiores espessuras de chapas. A espessura da peça que pode ser cortada com lados paralelos é determinada pela profundidade do foco. Placas mais espessas que a profundidade de foco normalmente resultam em superfícies cônicas. Além disso, para remoção eficaz do material da zona de corte, a proporção entre a espessura da peça e a largura do

corde precisa ser menor que 20:1 para a maioria dos metais e menor que 40:1 para a cerâmica (KANNATEY-ASIBU JR., Capítulo 15 - Laser Cutting and Drilling, 2009).

O tamanho de zona afetada pelo calor (ZTA) é pequeno, da ordem de 0,1 mm, pois o processo de corte a laser demanda uma entrada total de calor relativamente pequena. Além disso, o tamanho pequeno do feixe focalizado resulta em tamanhos de abertura de corte muito estreitos, geralmente cerca de 0,05mm a 1 mm (BADONIYA, 2018).

A produção de bordas de corte de alta qualidade pode ser feita controlando os parâmetros de corte a laser de maneira correta. Existem muitos parâmetros para o processo do laser, como distância do bocal, posição do foco, velocidade de corte, diâmetro do bico, espessura da camada de trabalho, pressão do gás auxiliar etc. Muitos pesquisadores estudaram o efeito desses parâmetros nas larguras do corte, ângulo de conicidade, taxa de remoção de material, zona afetada pelo calor (ZTA) e rugosidade da superfície (CHEN S. L., 1999) apud (BADONIYA, 2018).

Figura 12 – ESQUEMA DO PROCESSO DE CORTE A LASER.



FONTE: Extraído e adaptado de (READY & FARSON, LIA Handbook of Laser Materials Processing, 2001).

7.2. FORMAS DE CORTE A LASER

De acordo com (KANNATEY-ASIBU JR., Capítulo 15 - Laser Cutting and Drilling, 2009), o processo de corte a laser pode ocorrer em uma das três formas:

- **Corte por fusão** - abordado no subitem 7.2.1 do trabalho completo, ainda conforme Kannatey-Asibu Jr. (2009) esse é o processo mais comum no uso

industrial do corte a laser, utiliza um feixe de laser focalizado para a fusão do material base, que é continuamente ejetado usando um gás auxiliar sob alta pressão, inerte ou reativo. No caso de uso de um gás inerte, tal como o nitrogênio (inerte à maioria dos metais), hélio ou argônio, a energia para fundir é fornecida inteiramente pelo raio de laser. O gás é usado somente para ejeção do fundido, podendo mesmo ser usado para formação de uma atmosfera que evita a oxidação. Quando é utilizado o oxigênio ou ar, que reagem com o metal base, a reação exotérmica resultante fornece energia adicional para o processo.

- **Corte por sublimação** - mencionado no subitem 7.2.2 do trabalho completo a partir de textos dos autores citados, este processo de corte que *vaporiza* o material da peça ao longo da linha de corte, o que é alcançado geralmente usando um feixe de laser pulsado e um jato de gás de assistência inerte, coaxial com o feixe, usado para soprar o vapor produzido. Seu uso em metais é, ainda, limitado a seções relativamente finas, pois em comparação com o corte por fusão do subitem 7.2.1 é necessária mais energia para remover um volume unitário de material (TRUMPF GROUP).
- **Ablação fotoquímica** – citado no subitem 7.2.3, esta é uma técnica relativamente nova possibilitada pelo uso de lasers de excímero de alta potência trabalhando no ultravioleta (STEEN, Capítulo 3 - Laser Cutting, 2003), utilizado normalmente para corte de materiais orgânicos, cerâmicos ou de difícil corte em geral. Quando um material orgânico é irradiado com um feixe ultravioleta, absorve a energia do feixe em uma camada muito fina perto da superfície, da ordem dos submícrons. A absorção rompe ligações moleculares, causando decomposição ablativa da área irradiada em um processo quase instantâneo, cerca de 20 nanossegundos de duração. Como a condutividade térmica dos materiais orgânicos é relativamente baixa, as bordas resultantes são bem definidas, com danos térmicos mínimos à área que a circunda, sendo às vezes chamado de “corte a frio” (STEEN, Capítulo 3 - Laser Cutting, 2003). A ablação a laser também é um método para a deposição física de camadas finas. Um feixe de laser pulsado é focado em um alvo feito do material a ser depositado. A interação alvo-feixe faz com que o material que constitui o alvo seja arrancado, por pulverização catódica, evaporação ou mesmo fraturamento mecânico. Este material pode então ser depositado em um substrato colocado em frente ao ponto de laser (PHIPPS, 2011).

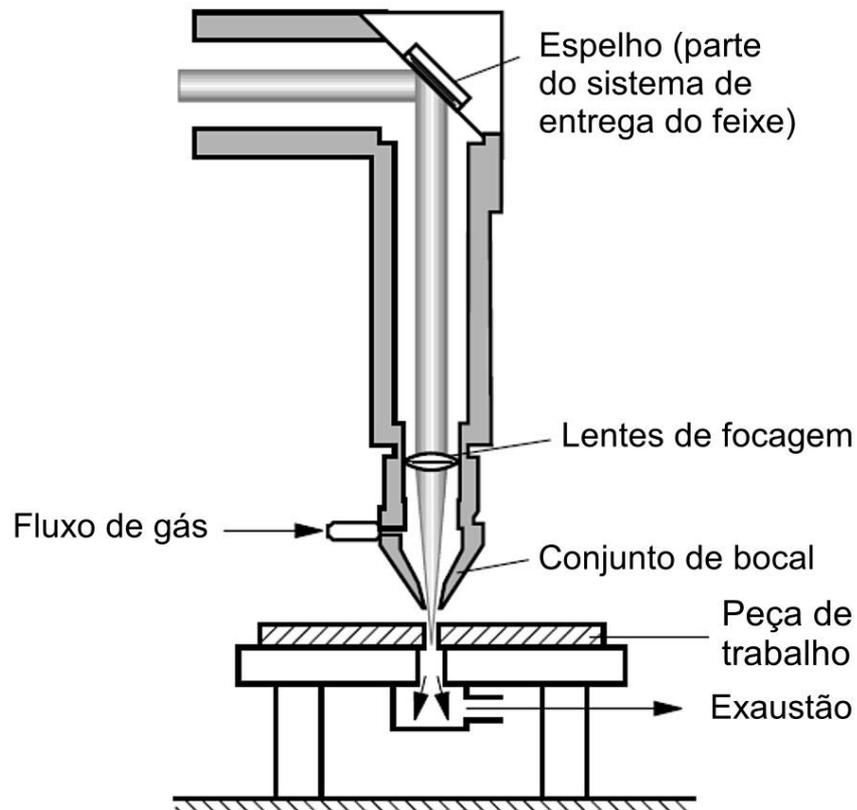
7.3. COMPONENTES

Os componentes básicos de um sistema de corte estão ilustrados na Figura 13 e incluem (KANNATEY-ASIBU JR., Capítulo 15 - Laser Cutting and Drilling, 2009):

- **GERADOR** ou **FONTE** – o sistema que produz o feixe laser, conforme explicado no capítulo 3;

- DIRECIONAMENTO - Um sistema de reflexão do feixe de laser entre o gerador e as lentes de foco (espelhos, prismas, fibra ótica etc.);
- FOCALIZAÇÃO – Lente que posicionará o foco do feixe de laser relativamente à superfície da peça de trabalho;
- MOVIMENTAÇÃO - Uma unidade de movimentação, para fornecer movimento relativo entre o feixe de laser e a peça de trabalho, controlado por computador (CNC);
- EXAUSTÃO - Um conjunto de bocal, geralmente integrado ao conjunto de lente de focagem e coaxial com o feixe, para direcionar o gás de assistência à peça de trabalho e exaustão para o material fundido, residual.

Figura 13 – COMPONENTES DE UM SISTEMA DE CORTE A LASER.



FONTE: Adaptado da figura 15.2 de (KANNATEY-ASIBU JR., Capítulo 15 - Laser Cutting and Drilling, 2009).

7.3.1. Gases de assistência

Os três principais gases empregados neste processo, individualmente ou combinados, são o oxigênio, o nitrogênio e ar atmosférico (KANNATEY-ASIBU JR.,

Capítulo 15 - Laser Cutting and Drilling, 2009, p. 439), cada um com características e resultados diferentes (CARISTAN, Capítulo 5 - Methods , 2004, p. 127).

Oxigênio: além de remover o metal fundido, ele tem um efeito oxidativo que adiciona energia e facilita o corte de metais, fundamental sobretudo para chapas de maior espessura. Enquanto isso, a superfície do material cortado será significativamente oxidada e, também, apresenta um efeito de têmpera na superfície cortada e adjacente, aumentando a dureza no material, o que precisa ser considerado no processamento posterior (POWELL, IVARSON, KAMALU, BRODÉN, & MAGNUSSON, 1992) (STEEN, Capítulo 3 - Laser Cutting, 2003).

Nitrogênio: este gás forma uma atmosfera protetora que evita a oxidação da superfície de corte e promove assim uma qualidade superficial superior no corte, porém por outro lado não tem o efeito de aumentar a transferência de calor e a capacidade de corte como no caso do oxigênio. Outro senão do uso do nitrogênio é o alto consumo deste gás, com efeitos negativos sobre a economia da operação (AGGOUNE, AMARA, & DEBIANE, 2012).

Ar atmosférico: Composto de 78% de nitrogênio e de 21% de oxigênio, o uso do ar como gás auxiliar terá como resultado alguma oxidação, porém devido ao alto percentual de nitrogênio a oxidação não terá efeito significativo de aumentar a capacidade de corte por meio de uma maior transferência de calor. Entende-se como uma solução intermediária entre os primeiros gases citados, com a significativa vantagem do custo ser apenas o consumo de energia usado no compressor/secador e o custo do elemento de filtragem do mesmo.

Quadro 2 - TIPOS DE GÁS AUXILIAR TÍPICOS USADOS NO CORTE A LASER INDUSTRIAL DE METAIS.

Material	Gás de assistência (pressão em bar)	Comentário
Aço carbono	O ₂ de baixa pressão (1,5-1,8)	Mais comum para 1/4 pol. (6,40 mm) ou mais espesso
Aço carbono	O ₂ de média pressão (1,8-5,0)	Mais comum para menos de 1/4 pol. (6,40 mm) de espessura
Aço carbono	N ₂ de alta pressão (5-20)	Principalmente para corte de alta velocidade de chapas finas e para evitar escamas de óxido nas bordas de corte de aço
Aço carbono	Ar atmosférico de alta pressão (5-20)	Principalmente para corte de alta velocidade de chapas finas - velocidade e custo menores do que o N ₂ puro e aumenta a oxidação da borda
Aço inoxidável	N ₂ de alta pressão (5-20)	Mais comum
Aço inoxidável	Ar atmosférico de alta pressão (5-20)	Custo inferior ao N ₂ puro, mas aumenta a oxidação da borda e a escória
Ligas de alumínio	N ₂ de alta pressão (5-20)	Para requisitos especiais de borda de corte não oxidada e / ou placa espessa

Material	Gás de assistência (pressão em bar)	Comentário
Ligas de alumínio	Ar atmosférico de alta pressão (5–20)	Mais comum para alumínio - menor custo do que N ₂ puro, mas aumenta a escória
Ligas de cobre	O ₂ de baixa pressão (1,5-1,8)	Moderadamente mais eficiente que o ar
Latão	O ₂ de baixa pressão (1,5-1,8)	Moderadamente mais eficiente que o ar
Latão	O ₂ ou N ₂ de alta pressão (20)	Corte de alta velocidade de folhas finas
Ligas de titânio	Argônio de alta pressão (3–10)	Para aplicações aeroespaciais, O ₂ e N ₂ reativos são evitados
Ligas de níquel	O ₂ de baixa pressão (3)	Para aplicações da indústria de energia, alta velocidade de corte é habilitada, mas com escória e oxidação da borda
Ligas de níquel	N ₂ de alta pressão (3-10)	Para aplicações da indústria aeroespacial e de energia, há velocidade de corte mais lenta do que com assistência de O ₂ , mas menos escória e nenhuma oxidação de borda

FONTE: Tabela 5-1 de (CARISTAN, Laser Cutting Guide for Manufacturing, 2004, pp. 128-129).

NOTA: Os valores numéricos indicados são pressões absolutas e não relativas à pressão atmosférica. Gás adicional misturas, como Ar / He e N₂ / H₂, às vezes são úteis para certas aplicações, como titânio ou alta velocidade, folha fina corte.

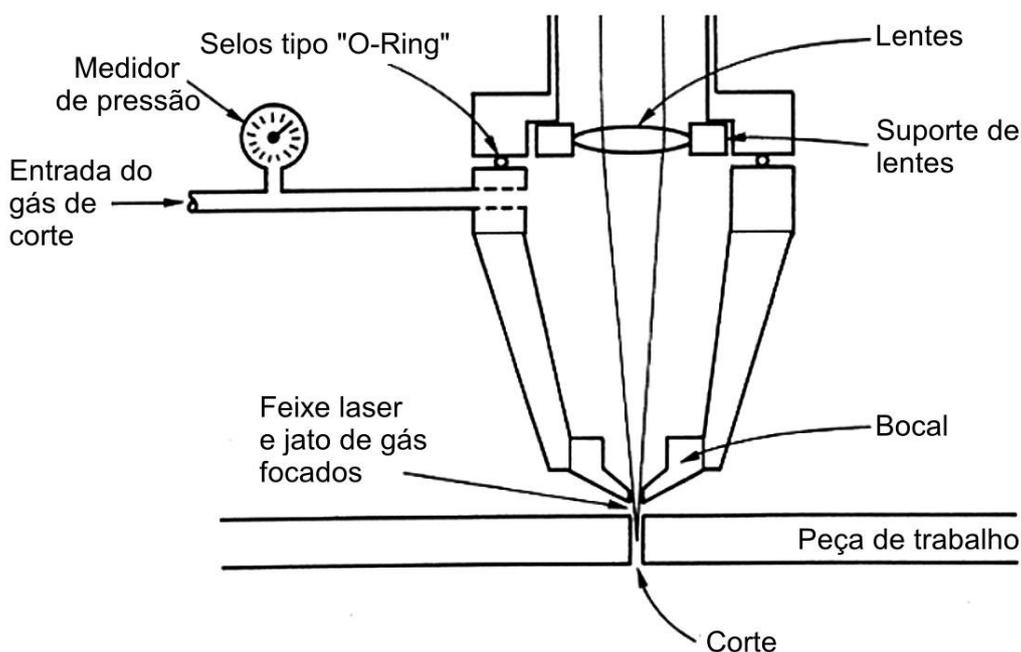
7.3.2. Bocais

O item 7.3.2 do trabalho completo mostra e faz algumas considerações sobre a forma interna dos bocais e as técnicas de corte que os emprega, citando principalmente o capítulo 15 de Kannatey-Asibu Jr. (2009).

De consideração mais trivial, o diâmetro do bocal influencia diretamente a velocidade do fluxo. Conforme observa (KANNATEY-ASIBU JR., Capítulo 15 - Laser Cutting and Drilling, 2009, p. 441), resultados de boa repetibilidade são produzidos empregando um bocal coaxial no corte à laser com taxas de fluxo baixas ou subsônicas, especialmente quando o bocal é posicionado próximo à peça de trabalho, ou seja, com uma distância de afastamento (medida do bocal à zona de corte) de cerca de 0,1 a 1,5 mm. Kannatey-Asibu observa ainda que, embora pressões ou taxas de fluxo mais altas resultem em velocidades e qualidade de corte mais altas, um fluxo turbulento de gás obtido nestas condições não garante boa repetibilidade ao processo.

A Figura 14 mostra um arranjo típico de uma cabeça de corte a laser, com o feixe de laser focalizado passa pelo centro do bocal coaxialmente ao jato de gás auxiliar de corte, este sim direcionado pelo bocal (POWELL, et al., 2008).

Figura 14 – ESQUEMA DE UMA CABEÇA DE CORTE A LASER.



FONTE: Adaptado da figura 4 de (POWELL, et al., 2008) e figura 1 de (POWELL, IVARSON, KAMALU, BRODÉN, & MAGNUSSON, 1992).

LEGENDA: Um esquema de uma cabeça de corte a laser, mostrando que o feixe de laser focalizado passa pelo bocal coaxialmente com o jato de gás auxiliar de corte.

7.4. CONDIÇÕES DO PROCESSO

Esta seção secundária 7.4 aborda os principais parâmetros que afetam o processo de corte a laser, a adequação destes parâmetros ao metal e espessura da chapa determina a qualidade e velocidade do processo de corte:

1. Potência do feixe;
2. Características do feixe;
3. Velocidade – a velocidade transversal é abordada na seção terciária 7.4.3;
4. Tipo de gás auxiliar e seu fluxo;
5. Localização do ponto focal em relação à superfície da peça.

O subitem 7.4.1 define a *potência* como o mais significativo dos parâmetros listados, pois o aumento da potência incrementa diretamente a espessura máxima que pode ser cortada e/ou a velocidade possível do corte (KANNATEY-ASIBU JR., Capítulo 15 - Laser Cutting and Drilling, 2009).

O subitem 7.4.2, subdividido em diversas seções, aborda as características de radiação do laser de saída que atuam na interação com o material. Cada sistema laser é caracterizado por seus parâmetros de saída, a saber:

- Características espectrais - comprimento de onda gerado, do infravermelho distante ao Raio-X;
- Características temporais – a forma do feixe como onda pulsada ou contínua (CW) podem ser produzidos na emissão laser, além de variações mais específicas;
- Energia ou densidade de potência
- Características espaciais - a *estrutura espacial* é definida pela distribuição da intensidade espacial e pelo perfil. A *divergência* caracteriza-se pelo diâmetro e por seu fator de qualidade, refere-se à focagem do feixe laser;
- Brilho.

Essas características são de projeto da fonte laser. Subitens específicos no trabalho original debatem ainda:

Modo de raio - comparável à afiação de uma ferramenta de corte, o modo de raio está relacionado à capacidade do feixe de ser focado e é uma indicação de como a intensidade da energia é distribuída pela seção transversal do feixe (STEEN, Capítulo 2 - Basic Laser Optics, 2003 , p. 79).

Estabilidade do feixe - garante que a potência, modo e direção do feixe (estabilidade do foco) permaneçam constantes com o tempo. Um feixe instável afeta as tolerâncias e o acabamento da superfície alcançáveis com o corte a laser, enquanto um feixe estável reduz as variações na produção e melhora a qualidade (STEEN, Capítulo 2 - Basic Laser Optics, 2003).

Polarização – a luz é uma onda eletromagnética e, portanto, transversal. Ondas transversais têm sua oscilação perpendicular à sua propagação e vibram em infinitos planos, ou direções. A luz que oscila em várias direções é dita não-polarizada (o sol, lâmpadas, velas, etc.). O fenômeno da polarização da luz consiste em permitir que a onda oscile em apenas uma direção, utilizando habitualmente um filtro polarizador (STEEN, Capítulo 2 - Basic Laser Optics, 2003 , p. 81).

Velocidade transversal – tratado no subitem 7.4.3, a velocidade máxima atingível para uma dada potência de laser diminui com o aumento da espessura da peça de trabalho, conforme cita Steen no subitem *Effect of Power* do capítulo 3 (STEEN, Capítulo 3 - Laser Cutting, 2003). Para uma determinada potência, um gráfico da variação da velocidade de corte com a espessura geralmente terá duas curvas limitantes, com a zona aceitável entre elas. A curva superior indica a velocidade máxima que pode ser alcançada para uma dada espessura. Acima da curva superior, o corte estará incompleto, a abertura de corte pode não se abrir e o material fundido não será expelido. Abaixo da curva inferior, ocorre a “autoqueima”, isto é, o material continua a queimar sem a ajuda do laser, o que geralmente amplia o corte e produz uma indesejável aspereza na superfície.

7.5. FUNÇÕES DO GÁS AUXILIAR E SEU FLUXO

Para a atual tecnologia de corte a laser de metal de seção espessa, o uso de um gás inerte ou um gás ativo é indispensável (RIVEIRO A. , et al., 2019). Já aludido no subitem 7.3.1 no trabalho completo, o título 7.5 detalha ainda mais as funções do gás auxiliar do corte a laser, resumidamente:

1. Facilita a ejeção do metal fundido pela parte de trás da peça de trabalho.
2. Protege a lente contra respingos.
3. Se ativo, atua como fonte de calor, por meio de uma reação exotérmica que auxilia no corte, como pode ocorrer no corte de aço assistido por oxigênio.
4. Quando inerte, cria uma atmosfera não oxidativa.

7.5.1. Efeito dos diferentes tipos de gases de assistência

O subitem 7.5.1 dedica-se a explicar os efeitos dos diferentes tipos de gases de assistência: gases inertes ou gases reativos.

7.5.1.1. *Gases inertes*

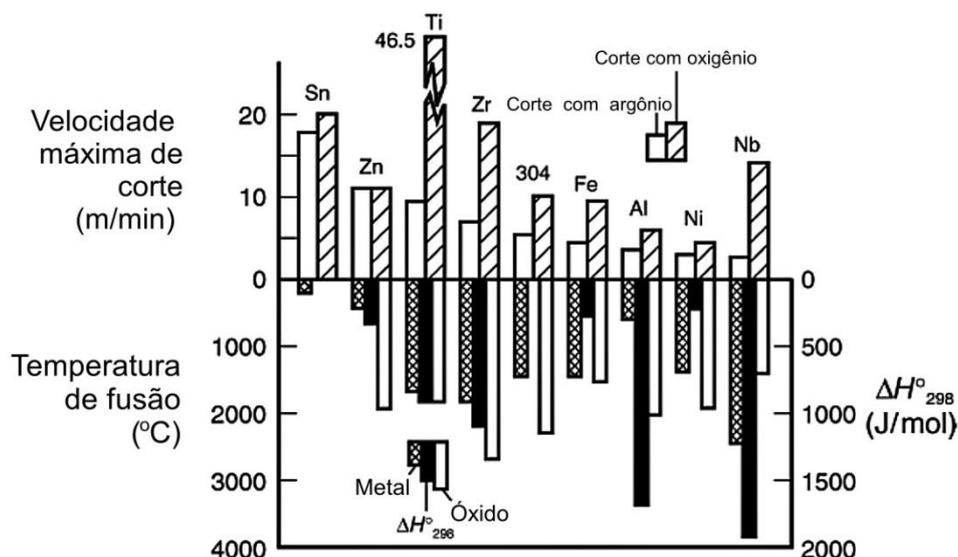
O principal papel do jato de gás de assistência inerte durante o corte a laser de uma peça de metal é ejetar o volume de metal fundido para criar a abertura de corte. Cria também uma atmosfera livre do oxigênio, totalmente ocupada pelo gás inerte, por esta razão materiais metálicos como aço inoxidável e alumínio são frequentemente cortados a laser usando um jato de gás auxiliar inerte para favorecer bordas de corte não oxidadas, limpas, que não exigem nenhuma operação de limpeza após o corte. Gases puramente inertes são o argônio e o hélio. O nitrogênio, apesar de não ser um gás inerte puro, é classificado como um gás neutro e é largamente empregado no corte a laser como uma opção de menor custo aos gases inertes puros (CARISTAN, Laser Cutting Guide for Manufacturing, 2004, p. 127).

7.5.1.2. *Gases reativos*

Durante o corte de fusão reativa, o raio laser incidente derrete a peça de trabalho e, também, inicia e continua a reação exotérmica entre o metal fundido e o oxigênio presente no jato de gás ativo. Portanto, o jato de gás de assistência ativo que passa pelo corte desempenha dois papéis importantes, que incluem exercer a força de arrasto necessária para soprar o material fundido para fora da abertura de corte e fornecer calor adicional ao processo de corte. Conseqüentemente, para a mesma potência de laser incidente, as velocidades do corte à laser com fusão reativa usando um gás de assistência ativo (oxigênio ou ar comprimido) são geralmente mais altas em comparação com o processo de corte com gás inerte (RIVEIRO A. , et al., 2019).

As velocidades máximas de corte alcançadas dependem das propriedades térmicas do metal. Conforme o gráfico da Figura 15, são obtidas velocidades mais altas para metais de baixos pontos de fusão e baixa condutividade térmica para corte assistido por gás inerte. As velocidades máximas de corte são mais altas para o corte assistido por oxigênio, em comparação com a assistência de gases inertes, para o corte de titânio, zircônio e nióbio devido à energia exotérmica relativamente alta associada a esses metais (MIYAMOTO & MARUO, 1991).

Figura 15 - COMPARAÇÃO DA VELOCIDADE MÁXIMA DE CORTE COM O₂ E COM ARGÔNIO PARA DIFERENTES METAIS.



FONTE: Adaptado da figura 1 de (MIYAMOTO & MARUO, 1991, p. 283)

LEGENDA: ΔH° é a energia associada à reação exotérmica do processo. (Laser CO₂ 1 kW CW, 1mm de espessura)

7.5.2. Remoção da fusão

É de suma importância para o desempenho de corte e para a qualidade da aresta de corte a eficiente remoção do metal derretido pelo laser, pois a abertura de corte é criada pela ação da força de arrasto do jato de gás auxiliar de alta pressão que atua coaxial ao raio laser (vide Figura 14) (KANNATEY-ASIBU JR., Capítulo 15 - Laser Cutting and Drilling, 2009, p. 439). Os metais fundidos que têm alta tensão superficial e alta viscosidade são mais difíceis de remover da frente de corte e têm uma alta tendência a se fixar na parte inferior do corte como escória. Assim, a qualidade do corte depende da quantidade de fundido que se acumula no corte e causa escória na superfície do corte (YILBAS & SAHIN, 1995).

No subitem 7.5.2.1 debate a relação entre a velocidade do fluxo de fusão e espessura do filme de fusão. A presença desse filme de fusão é importante para o acoplamento da energia do laser ao metal ainda sólido, influencia a absorvidade, porém deve ter sua espessura controlada pelo fluxo de gás de assistência para garantir a qualidade do corte (POWELL, IVARSON, KAMALU, BRODÉN, & MAGNUSSON, 1992).

7.6. PRINCÍPIOS DO CORTE A LASER

Nesta seção secundária 7.6, estão resumidas noções trazidas por Kannatey-Asibu Jr. (2009), sobretudo do capítulo 15 da literatura citada, e por Steen (2003) em seu capítulo 2. O processo de corte por fusão a laser é ilustrado esquematicamente na Figura 12. Tanto o feixe de laser quanto o jato de gás auxiliar colidem com a superfície da peça. Fontes de calor para o processo de corte incluem a radiação a laser absorvida e, no caso da utilização de um gás de assistência ativo, também a reação exotérmica entre o material base e oxigênio do gás auxiliar, conforme discutido no item anterior (7.5 Funções do gás auxiliar e seu fluxo).

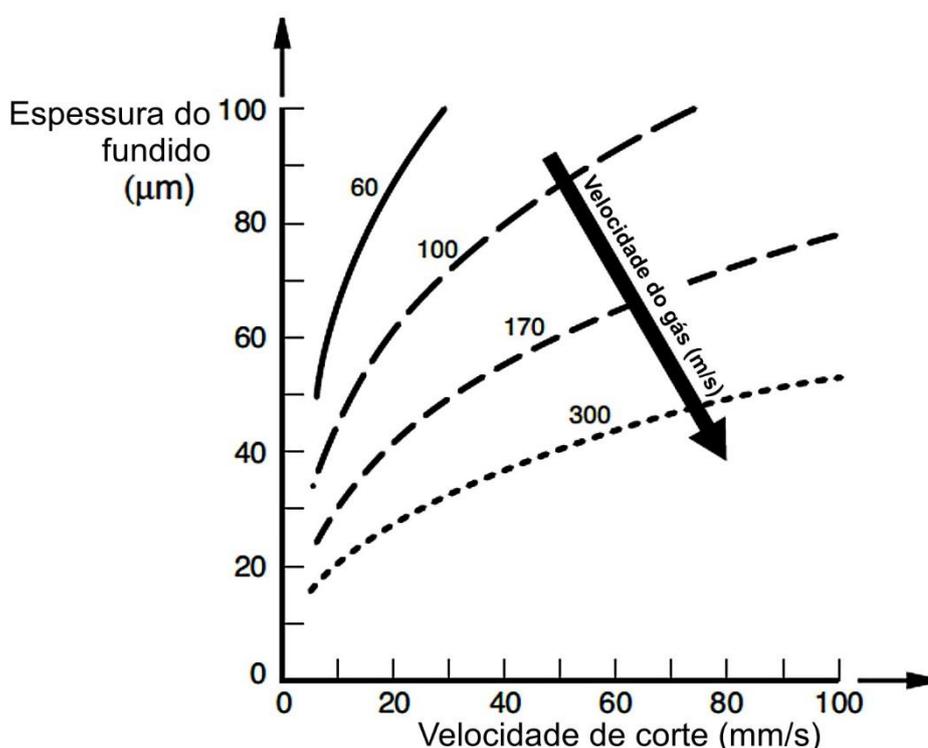
A energia proveniente das fontes de calor derrete e pode vaporizar parcialmente o material na frente do feixe, de tal modo que o jato de gás pressurizado ejeta o material fundido pela superfície inferior da peça de trabalho e, também, parte da remoção de material pode ocorrer pela evaporação diretamente da superfície da camada fundida.

Durante o processo de corte a laser, a energia será dissipada e perdida pela fusão do material sólido, ejeção do metal fundido, evaporação da frente de erosão, condução de calor, radiação, reflexão e resfriamento por convecção pelo fluxo de gás. Para um fluxo de gás subsônico, o efeito de resfriamento por convecção é desprezível (KANNATEY-ASIBU JR., Capítulo 15 - Laser Cutting and Drilling, 2009) e (STEEN, Capítulo 3 - Laser Cutting, 2003).

Nos estágios iniciais do processo, todo o feixe e o jato de gás atingem a superfície da peça. No entanto, uma vez iniciado o processo, um corte é formado, e apenas uma parte do gás e do feixe de laser colide com a superfície superior da peça de trabalho diretamente à frente do corte, e essa parte pode ser refletida de volta. A porção restante do feixe se propaga para baixo no corte e é parcialmente absorvida na extremidade frontal do corte (frente de erosão), que é levemente inclinada para a vertical. Conforme citado no subitem 7.4.2.5 sobre polarização, a maior parte da potência do feixe é absorvida na frente da erosão para um feixe polarizado linearmente na direção do corte. Uma fina camada de material fundido se forma na interface entre o corte e o material base sólido à sua frente e é ejetada pelos mecanismos listados anteriormente. A espessura do fundido aumenta com o aumento da velocidade de corte, pois mais metal fundido é produzido por unidade de tempo, enquanto um aumento na velocidade do gás auxiliar diminui a espessura do filme de fundido, pois resulta em uma ejeção mais rápida do material derretido (Figura 16).

Para uma determinada potência do laser, as temperaturas médias atingidas na camada fundida diminuem à medida que a espessura da peça de trabalho aumenta, principalmente pelo efeito da condução térmica (YILBAS & SAHIN, 1995). Acima de uma certa espessura, na qual a temperatura média cai abaixo da temperatura de fusão, o corte ficará incompleto. Essa é a máxima espessura que pode ser cortada com um laser desse nível de potência, mantidos todos os outros parâmetros.

Figura 16 - VARIAÇÃO ESQUEMÁTICA DA ESPESSURA DO FUNDIDO COM A VELOCIDADE DE CORTE.



FONTE: Adaptado de (VICANEK, SIMON, URBASSEK, & DECKER, 1987) e figura 5.15 de (STEEN, 2003, p. 222).

7.6.1. Absortividade (coeficiente de acoplamento) ao feixe durante o corte a laser

No subitem 7.6.1, é introduzido o conceito de absortividade – coeficiente de acoplamento do raio laser ao metal da peça de trabalho. Niziev e Nesterov-Mueller destacam a *absortividade* como a propriedade mais expressiva a afetar o desempenho do corte, uma vez que a eficiência do processo depende completamente da absorção de energia pela peça de trabalho (NIZIEV & NESTEROV-MUELLER, 1999). A absortividade A da superfície do metal para a

radiação do laser é definida como a razão entre a potência do laser absorvida na superfície e a potência do laser incidente. De acordo com Steen descreve no subitem *Reflection or Absorption* dentro do capítulo 2 seu livro (STEEN, Capítulo 2 - Basic Laser Optics, 2003 , pp. 69-74), para um material opaco como um metal, a absorptividade é dada como

$$A = 1 - R$$

Equação 7.1

onde R é a reflexividade da superfície da peça. A absorção do feixe de luz pela peça de metal geralmente aumenta com o aumento da temperatura do material metálico. Quando o ângulo de incidência é zero (isto é, incidência vertical), tanto o raio laser polarizado paralelo (R_p) quanto o raio laser polarizado perpendicularmente (R_s) são absorvidos igualmente. No entanto, o coeficiente de absorção da luz polarizada paralela (R_p) aumenta com o aumento do ângulo de incidência e é mais alto no ângulo de Brewster (READY & FARSON, LIA Handbook of Laser Materials Processing, 2001), enquanto o coeficiente de absorção da luz polarizada perpendicularmente (R_s) diminui com o aumento do ângulo de incidência θ (ION, Capítulo 5 - Engineering Materials, 2005).

O efeito do comprimento de onda é altamente significativo. Citando diretamente Steen: “Em comprimentos de onda mais curtos, os fótons mais energéticos podem ser absorvidos por um maior número de elétrons ligados e assim a refletividade cai e a absorptividade da superfície é aumentada” (STEEN, Capítulo 2 - Basic Laser Optics, 2003 , p. 71). No trabalho original, a tabela 3 – adaptada da tabela 1 de (READY & FARSON, Capítulo - Laser cutting, 2001) - ratifica com seus dados esta tendência de aumento da absorptividade a menores comprimentos de onda.

7.6.2. Mecanismos de absorção do raio laser por metais

Este subitem do trabalho dedica-se a citar trabalhos que explicam a física do acoplamento entre a energia incidente na forma de fótons aos átomos do metal. Citando indiretamente Steen (STEEN, Capítulo 4 - Laser Welding, 2003), após o início do corte, o processo de corte progride pela absorção do feixe de laser na frente inclinada, íngreme, pela ação de dois mecanismos de absorção, a saber: a absorção de Fresnel e a absorção de plasma (efeito de bremsstrahlung inverso).

O mecanismo de absorção de plasma (isto é, efeito de bremsstrahlung inverso) ocorre quando há presença de plasma induzido por laser durante o processo. A absorção do plasma ocorre através da absorção do feixe de laser pelos elétrons livres no plasma (isto é, vapor de metal quente), levando à re-radiação do plasma (STEEN, Capítulo 4 - Laser Welding, 2003, p. 165).

A absorção de Fresnel é o mecanismo mais significativo no corte a laser, é a absorção direta do feixe pela peça de trabalho durante a reflexão a partir da superfície (KANNATEY-ASIBU JR., Capítulo 15 - Laser Cutting and Drilling, 2009),

na interação direta do feixe com o material. A absorção de Fresnel ocorre quando os fótons da radiação incidente do feixe de laser são absorvidos pelos elétrons livres na estrutura do metal. A energia absorvida coloca os elétrons em um movimento de vibração forçada, que pode ser detectado como *calor* (WANDERA C. , Capítulo 18 - Fiber Lasers in Material Processing, 2016). A absorção aumenta com o aumento da temperatura do material devido a um aumento na população de fônons, causando mais trocas de energia fônon-elétron e mais tendências para os elétrons interagirem com a estrutura do material, com a conseqüente queda na reflexividade (STEEN, Capítulo 3 - Laser Cutting, 2003).

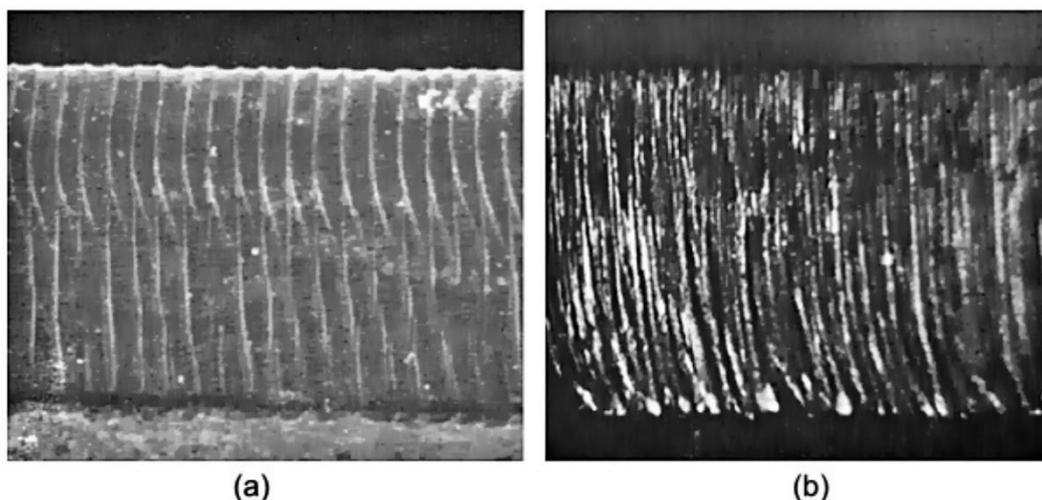
7.7. QUALIDADE DA PEÇA CORTADA

Neste item, ainda dividido entre subitens 7.7.1 até 7.7.7, conforme as fontes consultadas e mencionadas, estão citados os principais fatores que determinam a qualidade da peça cortada: estrias da superfície, formação de escória e fissuras. De acordo com a norma ISO para classificação de cortes térmicos ISO 9013:2017 (ISO 9013, 2017), as características das arestas de corte usadas para classificar cortes térmicos incluem *rugosidade da superfície* e *desvio da perpendicularidade* (ASTARITA, et al., 2014). A aderência de escória e a presença da separação da camada limite nas arestas de corte são dois aspectos críticos de qualidade que precisam ser considerados no corte a laser de metal de seção espessa, pois afetam a característica de rugosidade da superfície de uma aresta de corte a laser (AGGOUNE, AMARA, & DEBIANE, 2012).

7.7.1. Estrias

Conforme Kannatey-Asibu Jr. afirma no capítulo 15 (KANNATEY-ASIBU JR., Capítulo 15 - Laser Cutting and Drilling, 2009), superfícies cortadas usando um feixe laser normalmente têm um padrão de estrias periódico, conforme visto na Figura 17 (a), que resulta em uma rugosidade da superfície. Dependendo das condições de processamento, porém, também pode variar na direção da espessura, Figura 17 (b).

Figura 17 - ILUSTRAÇÃO DAS ESTRIAS FORMADAS EM UMA SUPERFÍCIE APÓS O CORTE A LASER.



FONTE: Adaptado (a) de (READY & FARSON, Capítulo - Laser cutting, 2001); (b) de (POWELL, FRASS, MENZIES, & FUHR, 1989) apud figura 15.18 de (KANNATEY-ASIBU JR., Capítulo 15 - Laser Cutting and Drilling, 2009).

LEGENDA: Ilustração das estrias formadas em uma superfície após o corte a laser. (a) Natureza periódica do padrão de estriação. (b) Variação do padrão de estriação na direção da espessura para materiais relativamente espessos.

Kannatey-Asibu (KANNATEY-ASIBU JR., Capítulo 15 - Laser Cutting and Drilling, 2009) lista as principais causas dessas estrias:

1. Vibrações na unidade de movimento.
2. Flutuações na potência do laser.
3. Flutuações no fluxo de gás.
4. Hidrodinâmica do fluxo de metal fundido.

7.7.2. Separação da camada limite e aderência de escória

São características de baixa qualidade da aresta de corte a presença da separação da camada limite e a aderência da escória na aresta de corte a laser. A escória é essencialmente o material da frente de corte laser que, uma vez solidificado, se agarra no formato de gotas à borda inferior da peça de trabalho (CARISTAN, Capítulo 9 - Quality, 2004, p. 235). O comportamento que leva à formação de escória depende da tensão superficial e viscosidade do metal fundido. O corte assistido por gás inerte tem uma tendência maior de formar escória em comparação com o corte assistido por oxigênio do mesmo material, uma vez que a tensão superficial do metal puro é geralmente maior que a do seu óxido (YILBAS & SAHIN, 1995), conforme mostrado na tabela 2 do trabalho original (não reproduzida nesta síntese). Para obter um corte sem escória com auxílio de gás inerte são

empregadas pressões mais altas (acima de 1 MPa ou 10 bar), significativamente maior do que o necessário quando se usa o oxigênio como gás de assistência.

No trabalho original, as figuras 69 e 70 (não reproduzidas nesta síntese) ilustram a presença de uma linha de separação de camada limite e comparam sua presença com o aumento da pressão do gás de assistência.

O subitem 7.7.3 cita artigos em que seus autores debatem a qualidade de aresta considerando a situação de cortes de chapas mais espessas.

Os subitens 7.7.4, 7.7.5, 7.7.6 e 7.7.7 trazem, respectivamente, artigos que debatem o efeito da potência do laser e velocidade de corte, tipo e pressão do gás auxiliar, diâmetro do bocal e, finalmente, da posição focal sobre a qualidade da peça cortada, com ilustrações e gráficos que demonstram a relação entre os parâmetros e a rugosidade de aresta cortada.

7.8. CONSIDERAÇÕES SOBRE MATERIAIS

Nas treze páginas que compõem o item 7.8 e seus diversos subitens, estão elencados os principais materiais, divididos entre metais (na seção terciária 7.8.1) e não-metals (seção terciária 7.8.2). No subitem que trata de metais, um apanhado de artigos mostra as principais ligas metálicas e de que forma as reações de oxidação destas favorecem o uso de gás reativo ou de um gás inerte. Com menção especial aos livros de Caristan (2004) e Kannatey-Asibu Jr. (2009), estes consagrados autores enfatizam de que forma o resultado do corte a laser das ligas mencionadas pode tornar o corte a laser recomendado ou inadequado para aplicações específicas que exijam acabamento superficial excelente, tais como aplicações aeronáuticas e aeroespaciais.

Sobre não-metals - subitem 7.8.2 - a aplicabilidade do corte a laser e as particularidades dos principais tipos de material é aludido, ainda que de forma superficial e objetiva, com ajuda de alguns quadros, já que o assunto é extenso seu detalhamento foge do escopo proposto. Os mecanismos de corte a laser comumente empregados para alguns dos principais materiais de engenharia são resumidos no Quadro 3.

Quadro 3 - MECANISMOS DE CORTE A LASER PARA DIVERSOS MATERIAIS DE ENGENHARIA.

Material	Corte por fusão com gás inerte	Corte por fusão com gás reativo	Vaporização	Degradação química	Riscamento
Ligas ferrosas	✓	✓	✗	✗	✗
Ligas não ferrosas	✓	✓ Ti	✗	✗	✗
Polímeros	✓ Termoplásticos	✓ Termofixos	✓ PMMA	✓ Termofixos	✗

Material	Corte por fusão com gás inerte	Corte por fusão com gás reativo	Vaporização	Degradação química	Riscamento
Cerâmica	✓	✗	✗	✗	✓
Vidros	✓	✗	✗	✗	✓
Elastômeros	✗	✗	✗	✓	✗
Compósitos	✓	✗	✗	✓ Madeira	✓

Fonte: adaptado da Tabela 14.1 de (ION, Capítulo 14 - Cutting, 2005)

7.9. VANTAGENS E DESVANTAGENS

Neste item 7.9, os autores citados fizeram um interessante trabalho ao comparar de forma objetiva o corte a laser com outros métodos utilizados na indústria para corte e perfuração, principalmente, mas também no tratamento superficial e solda industrial. Os autores citados, resumidamente, apresentam abundantes vantagens do corte a laser em muitas aplicações, porém listam também aplicações nas quais esta tecnologia se mostra, ainda, inadequada. Primeiramente é apresentado o Quadro 4, adaptado da tabela 3.1 de (STEEN, Capítulo 3 - Laser Cutting, 2003, p. 109), na qual o autor compara méritos e pontos fracos de dez diferentes processos de corte. Já nos subitens seguintes estão elencadas algumas vantagens (subitem 7.9.1), desvantagens (subitem 7.9.2) e comparações a outros processos concorrentes de corte, de maneira mais específica, no subitem 7.9.3.

Quadro 4 – COMPARAÇÃO DE DIFERENTES PROCESSOS DE CORTE.

Qualidade	Laser	Punção	Plasma	Desbaste	Jato de fluido abrasivo	Eletroerosão	Fresa CNC	Serrar	Usinagem ultrassônica	Oxiacetileno
Taxa de corte	✓	✓	✓	✗	✗	✗	✗		✗	✗
Qualidade da borda	✓	✓	✗	✗	✓	✓	✓	✗	✓	✗
Largura da abertura de corte	✓	✓	✗		✓	✓		✗		

Qualidade	Laser	Punção	Plasma	Desbaste	Jato de fluido abrasivo	Eletroerosão	Fresa CNC	Serrar	Usinagem ultrassônica	Oxiacetileno
Refugo e aparas	✓	✓		✗	✓			✗		✓
Distorção	✓		✗		✓		✓		✓	✗
Ruído	✓	✗	✗		✗					✗
Metal & não metal	✓		✗		✓		✓		✓	
Formas complexas	✓	✗	✓							
Agrupamento de peças	✓	✗			✓					
Múltiplas camadas	✗	✓								
Custo do equipamento	✗				✗			✓		✓
Custo operacional						✗		✓		✓
Alto volume	✓	✓		✗					✗	
Flexibilidade	✓	✗	✓	✓	✓	✗				
Desgaste da ferramenta	✓	✗	✓	✗	✓		✗	✗	✗	✓
Automação	✓	✓	✓	✗	✓	✗	✓			✗
Zona termicamente afetada	✓	✓	✗		✓	✓	✓			✗
Fixação	✓	✗	✓		✓		✗	✗		
Cortes / furos cegos	✓	✓	✓	✓		✗	✗		✗	✓
Borda soldável	✓	✓	✗	✓	✓	✓	✓		✓	✗

Qualidade	Laser	Punção	Plasma	Desbaste	Jato de fluido abrasivo	Eletroerosão	Fresa CNC	Serrar	Usinagem ultrassônica	Oxiacetileno
Troca de ferramenta	✓	✗	✓		✓					

✓ Mérito específico

✗ Desvantagem específica

Fonte: Tabela 3.1 de (STEEN, Capítulo 3 - Laser Cutting, 2003, p. 109).

7.10. CLASSIFICAÇÃO DE SEGURANÇA

Figura 18 – SÍMBOLOS DE ADVERTÊNCIA À RADIAÇÃO LASER.

Segurança



FONTE: Adaptado e livremente traduzido de (ZLATANOV, 2016, p. 20).

LEGENDA: Esquerda: Símbolo europeu de advertência de laser necessário para lasers de Classe 2 e superior. À direita: etiqueta de advertência de laser dos EUA, neste caso, para um laser Classe 3B

Os lasers são geralmente rotulados com um número de classe de segurança, que identifica o quão perigoso o laser é, conforme o Quadro 5, adaptado de (YUAN, CHEN, & LUZZI, 2017).

Quadro 5 - CLASSIFICAÇÃO DE SEGURANÇA DO LASER.

Classe	Tipo	Base para classificação
Classe 1	Lasers de baixa potência ou lasers encapsulados	Os lasers são considerados seguros em condições de operação razoavelmente previsíveis, como impressoras a laser, CD players e equipamentos de pesquisa. Não há requisitos de segurança para o uso deste tipo de laser. Inerentemente segura porque a luz está contida em um gabinete.
Classe 1 M	Lasers de baixíssima potência; colimado com grande diâmetro de feixe ou altamente divergente	Seguro em condições de operação razoavelmente previsíveis, mas pode ser perigoso se observado usando óptica de visualização. Exemplo: diodo laser, LED, sistema de comunicação de fibra
Classe 2	Lasers de baixa potência visíveis, de até 1 mW.	Lasers de baixa potência e são seguros para exposição não intencional, mas um olhar fixo prolongado deve ser evitado. O tempo de reflexo de piscar do olho evitará danos. Estão nessa classe lasers de até 1 mW de potência. Exemplo: Alinhamento HeNe lasers com potências abaixo de 1mW, leitores de bares de supermercado, ponteiros laser.
Classe 2 M	Lasers visíveis de baixa potência; colimado com grande diâmetro de feixe ou altamente divergente	Igual à Classe 2, mas potencialmente perigoso quando instrumentos ópticos são usados
Classe 3R	Lasers de baixa potência, têm geralmente até 5 mW	Seguro quando manuseado com cuidado. Apenas um pequeno risco potencial para exposição acidental. Envolvem um pequeno risco de lesão ocular durante o tempo do reflexo de piscar. Olhar fixamente para esse feixe por vários segundos provavelmente causará danos a um ponto na retina.
Classe 3B	Lasers de média potência	Perigoso quando o olho está exposto, pode causar danos oculares imediatos após a exposição. Use proteção ocular dentro da área de risco ocular nominal (NOHA). Normalmente não há perigo para a pele. Reflexos difusos geralmente seguros.
Classe 4	Lasers de alta potência	Perigoso para visualização intra-feixe direto, refletido direto e refletido difuso. Eles podem causar lesões nos olhos ou na pele e, também, podem constituir um risco de incêndio. Em alguns casos, mesmo a luz dispersa pode causar danos aos olhos e/ou à pele. Muitos lasers industriais e científicos estão nesta classe

Fonte: Adaptado da tabela 3.1 de (YUAN, CHEN, & LUZZI, 2017, p. 46)

Para evitar danos à saúde dos trabalhadores expostos, fumos resultantes devem ser extraídos por um sistema de sucção integrado ao cabeçote de corte, coletados por filtros de ar integrados e acumulados em recipientes apropriados, a serem descartados adequadamente de acordo com as regulamentações de segurança, saúde e meio ambiente locais (CARISTAN, Capítulo 12 - Safety and Environment, 2004, p. 306).

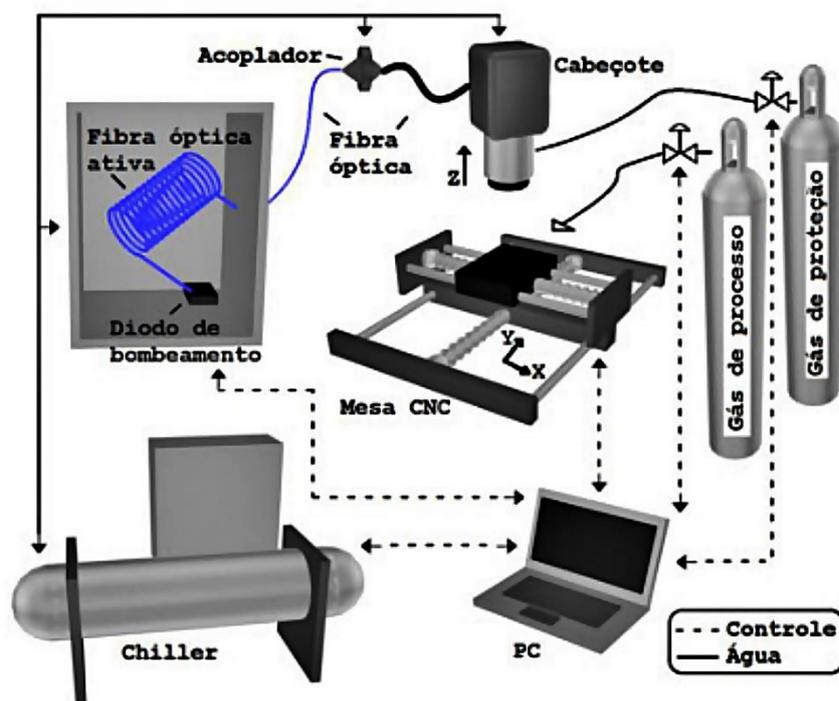
8 LASER DE FIBRA

O laser de fibra empregado em processo de corte tem destaque no capítulo 8 por dois motivos principais:

- É o tipo de fonte laser (e entrega do feixe) da máquina de corte a laser Senfeng SF 1313G-Series em funcionamento no Laboratório de Usinagem do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Paraná, cujo comissionamento foi o foco da segunda metade deste trabalho de conclusão de curso.
- A literatura a respeito da utilização de máquinas de corte a laser de fibra é limitada, sobretudo por ser ainda recente a tecnologia que permitiu atingir altas potências e, dessa forma, viabilizou seu uso a partir da década de 2001-2010 (MELO, SOUSA, BERENDT, HENDOW, & SALCEDO, 2011).

Os lasers de fibra são lasers de estado sólido em que a fibra óptica é dopada com uma pequena quantidade de terras raras. Diodos são usados como bombeamento para excitar o material gerador (o meio ativo), que emite fótons em certos comprimentos de onda conforme o elemento utilizado na dopagem (COELHO, LIMA, & COSTA, 2013). Um diagrama representativo de um sistema de corte a laser de fibra típico, como a máquina Senfeng SF 1313G-Series do Laboratório de Usinagem, é mostrado na Figura 19.

Figura 19 - DIAGRAMA DA ESTAÇÃO DE PROCESSAMENTO DE MATERIAIS COM LASER A FIBRA.



FONTE: Figura 1 de (COELHO, LIMA, & COSTA, 2013).

8.1. INTRODUÇÃO, HISTÓRICO E PANORAMA ATUAL

Com a redução das perdas de sinal de fibra óptica a partir da década de 1970 e, principalmente, com o desenvolvimento dos amplificadores de fibra óptica dopados com érbio (EDFA) operando em $1,5 \mu\text{m}$, a partir da década de 1980, esta tecnologia passou a receber forte impulso (ZAVECZ, SAIFI, & NOTIS, Metal reflectivity under high-intensity optical radiation, 1975). Estímulos para o desenvolvimento desta tecnologia em tempos atuais são sua eficiência elevada, ausência de manutenção e alta fiabilidade, qualidade modal excelente e apresentação muito compacta (TÜNNERMANN, et al., 2005).

Este laser, que vinha sendo usado por muitos anos em baixa potência, a partir da década 2001-2010 atinge altas potências. Especialmente depois que a potência de saída do laser de fibra ultrapassa 1 kW, a indústria de processamento de materiais ganha interesse nesta nova tecnologia para adicionar ou possivelmente substituir os tradicionais lasers de CO_2 e Nd:YAG usados então. Apesar do constante desenvolvimento científico, somente nesta última década 2011-2020 os lasers de fibra óptica alcançaram posição de destaque no setor. Os lasers de fibra óptica agora competem em muitas aplicações com lasers de estado sólido e de gás convencional e, em muitos casos, já é o candidato mais adequado. Relatórios anuais de mercado recentes citados no item 8.1 do trabalho completo versam sobre a tomada do primeiro lugar no mercado de corte a laser assumido pela tecnologia de

laser amplificada em fibra ótica. A liderança foi concretizada na última década (2011-2020) (GRAND VIEW RESEARCH, 2017) e a tendência de continuar a aumentar sua participação nesta década que recém se iniciou (2021-2030) (Technavio Research, 2020).

8.2. MECANISMO DE EMISSÃO LASER

Lasers de fibra (não deve ser confundida com lasers *fornecidos por fibra*, no qual a fibra ótica é apenas o mecanismo óptico para entrega da luz) são lasers de estado sólido, onde a fibra dopada com baixos níveis de um elemento de terras raras é o meio de ganho laser, para amplificação da luz. Diodos são usados para estimular o meio de lasers a emitir fótons, o conhecido bombeamento, num comprimento de onda específico conforme o elemento de terras raras usados como dopante (URQUHART, 1988, p. 388). O itérbio é geralmente usado em lasers modernos alta potência. Seu comprimento de onda de emissão é aproximadamente o mesmo que o dos lasers Nd:YAG e sua faixa de comprimento de onda é de 1.060 a 1.085 nm (CANNING, 2006) e (NILSSON, et al., 2004). A fibra dopada é envolvida por um material com baixo índice de refração, que atua como um guia de onda para a luz de bombeamento e garante que essa energia seja transferida de maneira ideal para o meio laser. Grades de difração são utilizadas como espelho traseiro e acoplador de saída para formar o ressonador laser, formando assim um laser longo e fino, que pode ser muito compacto devido à flexibilidade da fibra que pode ser enrolada.

A rota de fabricação atualmente preferida para obter potências de saída adequadas para soldagem de metais de penetração profunda é combinando as saídas de uma série dessas unidades modo único disponíveis comercialmente em uma única saída de fibra (Figura 21).

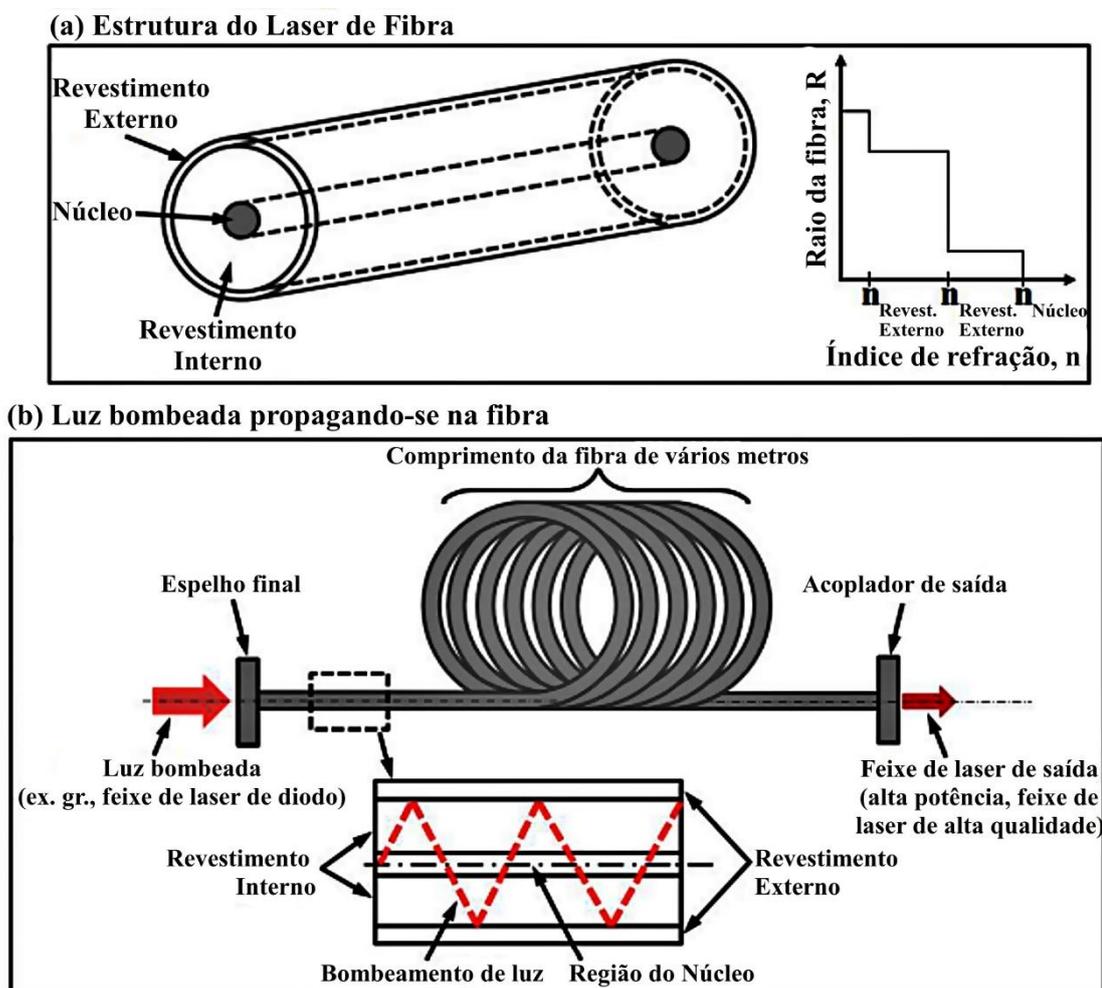
A geometria longa e fina da fibra permite um resfriamento eficaz e, portanto, é ideal para minimizar os efeitos térmicos da energia de bombeamento (HÜGEL, 2000). Isso, e o ganho inerentemente alto da fonte de laser de fibra, traduz-se em uma alta eficiência de conversão de energia, que é a razão entre a potência óptica disponível na peça e a energia elétrica consumida, que se afirma estar entre 20% e 30% (SHINER, 2004). Os quadros 11 (no trabalho original, não reproduzido nesta síntese) e Quadro 6, adaptados de O'Neil e Verhaeghe & Hilton, respectivamente, e comparam o desempenho do laser de fibra com outras tecnologias de amplificação comuns no mercado, notavelmente CO₂ e de meio sólido, traduzindo em números as vantagens citadas da tecnologia de amplificação da radiação em fibra de vidro dopada de íons de terras raras.

8.3. LASER DE FIBRA DE ALTA POTÊNCIA DE ITÉRBIO

Esta seção secundária do trabalho destaca características do laser de fibra de alta potência que usa o itérbio como dopante da fibra ótica. Conforme relata Petring et al., este dopante permitiu à tecnologia da fonte de laser de fibra atingir mais altas potências de saída atingidas a partir da década 2001-2010, graças em grande parte à melhor possibilidade de resfriamento da fonte (PETRING, SCHNEIDER, WOLF, & NAZERY, 2008). O itérbio é altamente absorvente da radiação do bombeamento e é preferido como material dopante para o laser de fibra de alta potência pois fornece potência de saída em kilowatts adequada ao processamento do material (MÜLLER, KIRCHHOF, REICHEL, & UNGER, 2006). Opera na faixa espectral de 1.060 a 1.080 nm, de alta absorvidade nas ligas metálicas mais utilizadas.

A estrutura do laser de fibra de itérbio de alta potência inclui uma fibra de vidro de revestimento duplo com uma região central na qual os íons de itérbio que são o meio de ganho do laser são depositados. Para confinar a luz do bombeamento na região central do núcleo, dopada com íons de itérbio, esta região central é a que apresenta maior índice de refração e está cercada por duas regiões de revestimento com índice de refração progressivamente decrescente: um revestimento interno de menor índice de refração do que o núcleo e que, por sua vez, é circundado por um revestimento externo de um índice de refração ainda mais baixo, formando uma fibra de índice de etapas (Figura 20a). A luz de bombeamento das matrizes de diodo laser de alta potência é guiada para o revestimento interno (conhecido como revestimento do bombeamento) e essa luz de bombeamento é confinada no revestimento interno pelo revestimento externo com menor índice de refração (Figura 20b). O confinamento dos raios de luz de bombeamento na região do núcleo da fibra - sujeito a algumas perdas por absorção ou espalhamento - mantém a intensidade da luz de bombeamento se propagando na fibra ao longo de vários metros de comprimento, excitando e sendo absorvida pelos íons de itérbio na região central da fibra, resultando na emissão estimulada laser pelos íons de itérbio (que é o meio de ganho) (TÜNNERMANN, et al., 2005). A emissão estimulada resultante da ação laser é guiada dentro da região central, acumulando altas intensidades antes de finalmente emergir como um feixe de laser de alta potência na faixa espectral do infravermelho próximo, de 1.060 a 1.080 nm (NILSSON, et al., 2004).

Figura 20 - UMA ILUSTRAÇÃO ESQUEMÁTICA DA FIBRA DE REVESTIMENTO DUPLO.



FONTE: Adaptado da figura 1 de (WANDERA C. , Capítulo 18 - Fiber Lasers in Material Processing, 2016, p. 403).

LEGENDA: n - índice de refração.

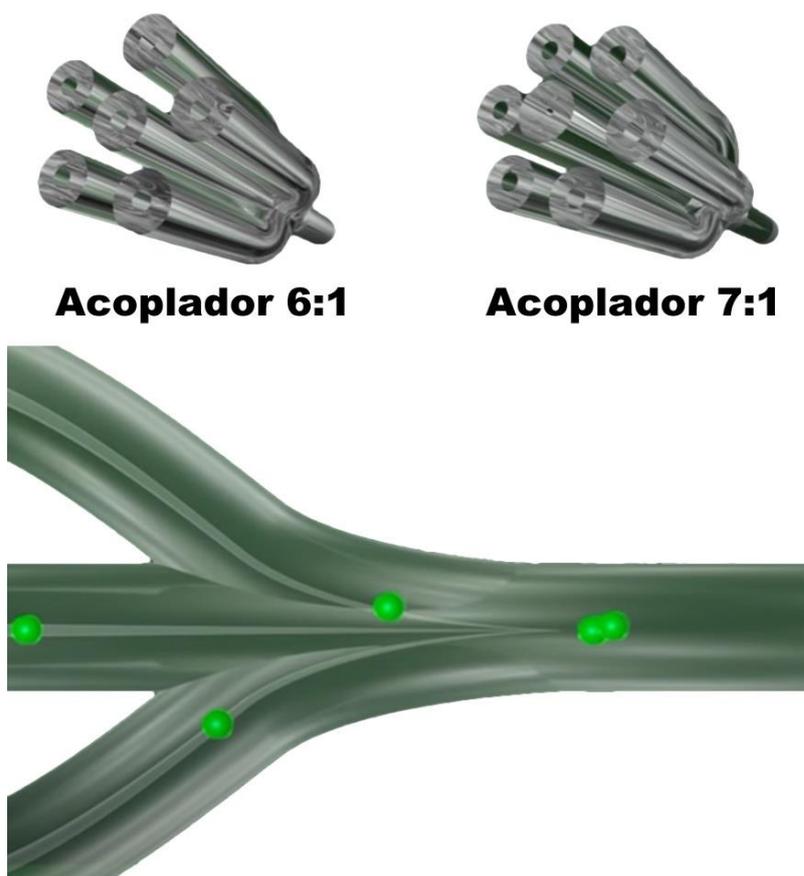
8.4. RECURSOS

Este item do trabalho original e seus três subitens apresentam características do laser de fibra de itérbio de alto brilho que resultam em maior flexibilidade e desempenho em aplicações de processamento de materiais: oferece *alta potência de saída*, *alta qualidade de feixe* e seu *comprimento de onda* está no infravermelho próximo - operando na faixa espectral de 1.060 a 1.080 nm (NILSSON, et al., 2004). Estas características são explicadas nos subitens 8.4.1, 8.4.2 e 8.4.3, com argumentos reunidos a partir do artigo de Wandera (WANDERA C. , Capítulo 18 - Fiber Lasers in Material Processing, 2016, p. 402).

8.4.1. Potência de saída

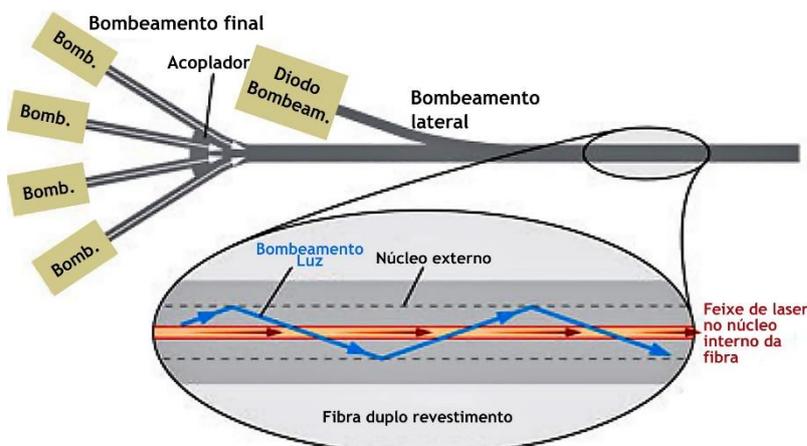
Neste subitem, o aumento da potência de laser obtida com esta tecnologia é explicado pelo agrupamento de vários elementos de laser de fibra de modo único para fornecer até 10 kW de potência em modo múltiplo, ilustrado nas Figura 21 e Figura 22 (IPG Photonics, 2010).

Figura 21 - COMBINAÇÃO DE FEIXES PARA MODO MÚLTIPLO.



FONTE: Adaptado de (IPG Photonics, 2010).

Figura 22 – ESQUEMA DE BOMBEAMENTO NA EXTREMIDADE OU LATERAL PARA O LASER DE FIBRA, GERALMENTE COM ACOPLAMENTO DE MÚLTIPLOS LASERS.



FONTE: Adaptado da figura 2 de (HECHT J. , FIBER LASERS: Fiber lasers: The state of the art, 2012).

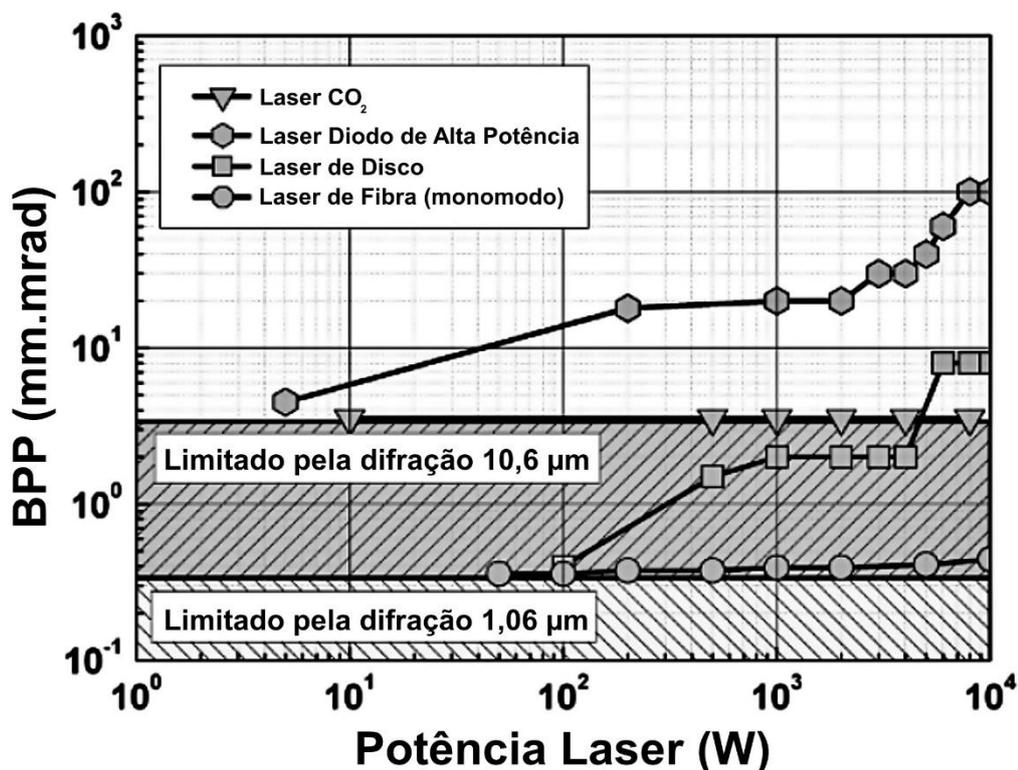
LEGENDA: Um laser de fibra pode ser bombeado na extremidade com um ou mais lasers, ou bombeado lateralmente (geralmente com muitos lasers) por luz de bomba de acoplamento lateral no núcleo externo.

8.4.2. Qualidade de feixe e sua focabilidade

Um raio laser pode ser caracterizado por um ângulo de divergência e um diâmetro do raio. A qualidade do feixe é definida como a razão entre a largura do feixe e o ângulo de divergência do feixe real em relação ao esperado para um feixe perfeito (para o qual a forma de propagação é uma hipérbole). A qualidade do feixe de um laser de estado sólido é geralmente chamada de BPP (acrônimo do termo em língua inglesa *beam parameter product*, ou produto do parâmetro do feixe, em tradução livre) (STEEN, Capítulo 2 - Basic Laser Optics, 2003).

A Figura 23 fornece uma comparação do BPP para laser de fibra (modo único), laser de disco, laser de diodo de alta potência e laser a gás de CO₂ (BEYER, MAHRLE, LÜTKE, STANDFUSS, & BRUECKNER, 2012), no qual o laser de fibra um menor valor do BPP e, portanto, melhor focabilidade na comparação com as outras tecnologias.

Figura 23 - PRODUTO DE PARÂMETRO DE FEIXE “BPP” DE SISTEMAS DE LASER DE ESTADO SÓLIDO (FIBRA E DISCO), DE CO₂ E DE DIODO DISPONÍVEIS ATUALMENTE.

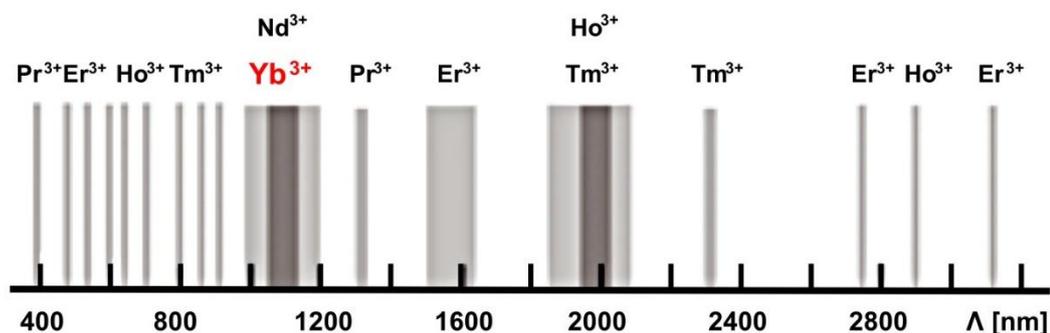


FONTE: Adaptado da figura 1 (a) de (BEYER, MAHRLE, LÜTKE, STANDFUSS, & BRUECKNER, 2012).

8.4.3. Comprimento de onda

Os lasers de fibra foram feitos para operar em uma variedade de comprimentos de onda, incluindo as importantes bandas de 1300 nm, 1550 nm e as regiões de 2 a 3 micrômetros no infravermelho. A absorção do feixe de laser pelos metais aumenta em comprimentos de onda em direção às regiões visível e ultravioleta, mas diminui para comprimentos de onda infravermelhos mais longos (no trabalho original, consulte as figuras 78, 80 e a tabela 3, não reproduzidos na síntese). Os espectros dos íons de terras raras e a natureza dos materiais hospedeiros tornam possíveis a emissividade em tais comprimentos de onda (URQUHART, 1988), conforme ilustrado pela Figura 24.

Figura 24 - BANDAS DE EMISSÃO DOS DIFERENTES ÍONS TERRAS RARAS, EM NANÔMETROS.



FONTE: Adaptado da figura 6 de (MELO, SOUSA, BERENDT, HENDOW, & SALCEDO, 2011, p. 24).

8.5. DESEMPENHO NO CORTE DE METAIS

De maneira idêntica às outras tecnologias de corte a laser, as velocidades de corte máximas alcançáveis, as máximas profundidades de corte possíveis e a qualidade da aresta de corte atingível são as métricas usadas na avaliação do desempenho do sistema a laser de fibra no corte de metal. Tais características são regidas por vários parâmetros relacionados ao sistema de laser, especificação da peça de trabalho e processo de corte (BEYER, MAHRLE, LÜTKE, STANDFUSS, & BRUECKNER, 2012).

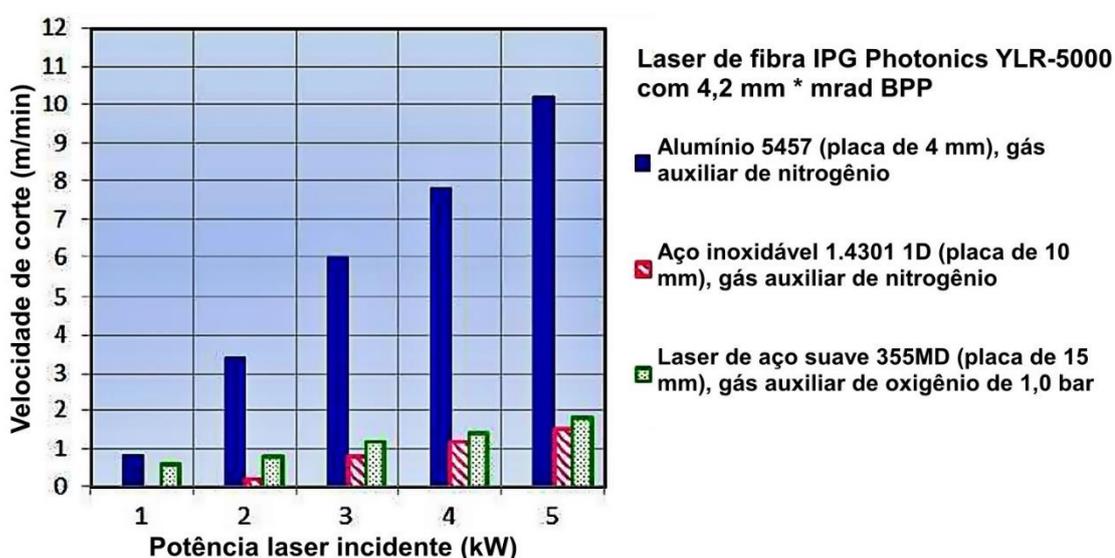
8.5.1. Velocidade máxima alcançável

Para um determinado nível de potência do laser, a velocidade máxima de corte possível será a mais alta na qual as arestas de corte resultem totalmente separadas. Wandera et al. (WANDERA, KUJANPÄÄ, & SALMINEN, Laser power requirement for cutting of thicksection steel and effects of processing parameters on mild steel cut quality, 2011) e (WANDERA, SALMINEN, & KUJANPÄÄ, Inert gas cutting of thick-section stainless steel and medium-section aluminum using a high power fiber laser, 2009), em ambos os artigos, testaram em diferentes níveis de potência de um aparelho de laser de fibra as velocidades máximas de corte possíveis para três diferentes materiais: aço inoxidável de 10 mm, aço macio de 15 mm e alumínio de 4 mm, conforme apresentado na Figura 25. Uma comparação das velocidades de corte a laser de fibra e laser de CO₂ no corte de aço macio de 15 mm e aço inoxidável de 10 mm mostrou que as velocidades de corte a laser de fibra eram 1,3 vezes maiores que as velocidades de corte a laser de CO₂ para o mesmo nível de potência (consulte Figura 26). Resultado semelhante é relatado por Sparkes et al. (SPARKES, GROSS, CELOTTO, ZHANG, & O'NEILL, 2008) no corte de aço

inoxidável de 6 a 10 mm, com velocidades de corte do laser de fibra até 1,5 vezes maior que as do laser de CO₂.

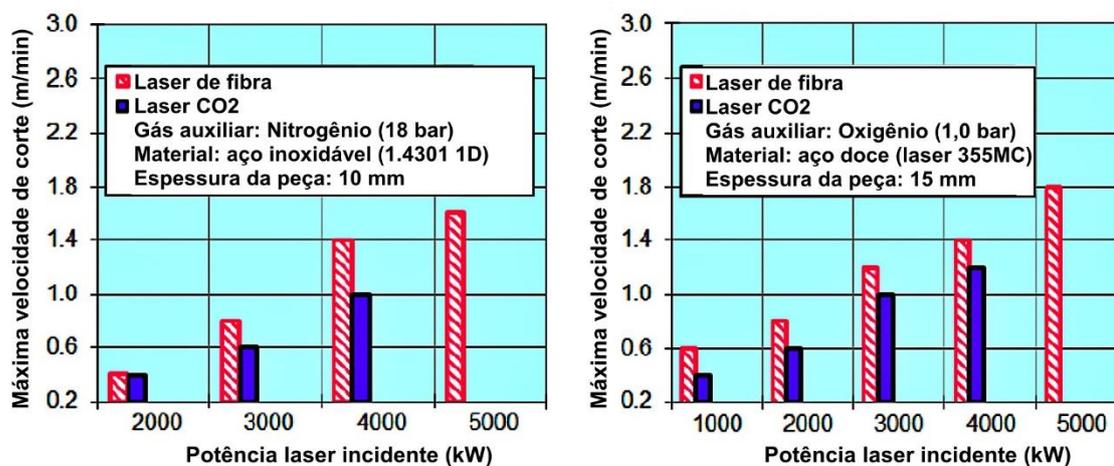
O aumento da velocidade de corte possível é uma indicação de uma maior absortividade das peças de metal ao feixe de laser de fibra pela peça de metal, em comparação com a absorção do laser de CO₂, sendo essa a conclusão de Wandera et al. (WANDERA, SALMINEN, OLSEN, & KUJANPÄÄ, 2006) e de Sparkes et al. (SPARKES, GROSS, CELOTTO, ZHANG, & O'NEILL, 2008).

Figura 25 - VELOCIDADES MÁXIMAS DE CORTE ALCANÇÁVEIS USANDO O LASER DE FIBRA DE ITÉRBIO.



FONTE: Adaptado da figura 5 de (WANDERA C. , Capítulo 18 - Fiber Lasers in Material Processing, 2016).

Figura 26 – COMPARATIVO DAS VELOCIDADES MÁXIMAS DE CORTE PARA CORTE DE AÇO INOXIDÁVEL ENTRE LASER DE CO₂ E LASER DE FIBRA.



FONTE: Adaptador da figura 6 de (WANDERA C., Capítulo 18 - Fiber Lasers in Material Processing, 2016).

LEGENDA: Velocidades máximas de corte para corte de aço inoxidável de 10 mm e aço macio de 15 mm.

8.6. COMPARATIVO DO LASER DE FIBRA COM O LASER CO₂

Este item trata especificamente da comparação do laser de fibra com o laser de CO₂, uma vez que o primeiro tomou a liderança do último na década de 2011-2020 (GRAND VIEW RESEARCH, 2017).

A criação da luz é 300% mais eficiente do que através de um laser tradicional de CO₂ (Quadro 6) e a entrega é muito mais simples, sem espelhos ópticos caros. A eficiência elétrica (de conversão de energia) é 140% maior do que o laser de CO₂, conforme Quadro 11 (apenas no trabalho original), resultando em custos operacionais consideravelmente mais baixos. Os intervalos de manutenção são 50% mais longos e custos de manutenção 50% mais baixos (VERHAEGHE & HILTON, 2005).

As velocidades máximas de corte para chapas de 4 a 15 mm, mencionadas no subitem 8.5.1, são ainda mais altas ao cortar material fino. Comparado com a mesma máquina de CO₂ de 4 kW, o laser de fibra é três vezes mais rápido em um corte reto de 1 mm em aço macio, galvanizado ou aço inoxidável e duas vezes mais rápido ao cortar 2 mm (SPARKES, GROSS, CELOTTO, ZHANG, & O'NEILL, 2008).

As desvantagens do laser de fibra em comparação com o CO₂ estão relacionadas principalmente à velocidade de corte no processamento de materiais mais espessos. Acima de 5 mm, o corte a laser de CO₂ pode ser mais rápido em linha reta e, também, tem tempos de perfuração muito mais rápidos no início do corte. Há também a vantagem de um acabamento de superfície mais suave com a

máquina de CO₂ ao cortar materiais mais espessos (WANDERA, SALMINEN, OLSEN, & KUJANPÄÄ, 2006).

Quadro 6 - COMPARAÇÃO DE FONTE DE LASER.

	CO ₂	Nd:YAG bombeado a lâmpada	Nd:YAG bombeado a diodo	Fibra de Itérbio (multi-modos)	Yb-YAG disco fino
Meio de ganho laser	Mistura de gases	Bastão cristalino	Bastão cristalino	Fibra dopada	Disco cristalino
Comprimento de onda [μm]	10,6	1,06	1,06	1,07	1,03
Transmissão do feixe	Espelho, lentes	Fibra, lentes	Fibra, lentes	Fibra, lentes	Fibra, lentes
Ø típico da fibra de entrega [μm]	-	600	400	100-200	150-200
Potência de saída^(a) [kW]	Até 15kW	Até 4kW	Até 6kW	Até 20kW	Até 4kW
Qualidade típica do feixe^(b)	3,7	25	12	12	7
[mm.mrad]^(b)	3.7	12	<12	1.8	4
Intervalo de manutenção [*1000 h]	2	0,8 a 1	2 a 5	100 ^(c)	2 a 5
Eficiência [%]	5 a 8	3 a 5	10 a 20	20 a 30	10 a 20
Custo aproximado por kW [USD]	60	130-150	150-180	130-150	130-150
Pegada da fonte laser	grande	média	média	pequena	média
Mobilidade laser	baixa	baixa	baixa	alta	baixa

Notas:

(a) Disponível comercialmente.

(b) Os números acima são na máxima potência de saída disponível, os números abaixo são para o mesmo tipo de laser, mas configurado para operação otimizada a 1kW.

(c) Declaração do fabricante.

Fonte: Extraído da tabela 1 de (VERHAEGHE & HILTON, 2005)

8.7. PONDERAÇÕES SOBRE A TECNOLOGIA DE CORTE A LASER DE FIBRA

Este subitem, no trabalho original, traz um epítome do capítulo 8, que concerne à amplificação da luz em uma fonte de fibra ótica dopada de terras raras, tecnologia utilizada na máquina de corte a laser Senfeng SF 1313G-Series instalada no Laboratório de Usinagem do Departamento de Engenharia Mecânica no campus Politécnico da UFPR. Serve também como introdução à segunda parte do trabalho de conclusão de curso (TCC II) apresentado, de comissionamento da máquina de corte a laser supramencionada, cuja descrição e detalhes de operação é foco dos capítulos 9, 10 e 11.

O desempenho do sistema de laser de fibra de itérbio de alto brilho no corte de metal foi amplamente avaliado no corte de aço inoxidável, aço-carbono e alumínio nos artigos citados neste capítulo, sobretudo no item 8.5 “Desempenho no corte de metais”, com especial menção à dedicação da Professora Catherine Wandera e seus colabores ao estudo do corte de metais com o laser de fibra. É de especial relevância a comparação desta tecnologia com o laser de CO₂, o qual o laser de fibra tem paulatinamente substituído em algumas aplicações nas últimas duas décadas (OVERTON, 2019). A otimização dos parâmetros do processo de corte para melhorar a qualidade da aresta de corte no corte de metal de seção espessa em altas velocidades de corte usando o laser de fibra de itérbio mostrou que a velocidade de corte máxima aplicável é influenciada pelo processo de remoção de fusão, que é seu ponto mais vulnerável (WANDERA, SALMINEN, & KUJANPÄÄ, Inert gas cutting of thick-section stainless steel and medium-section aluminum using a high power fiber laser, 2009, p. 160). Fontes de laser emitindo feixes de fótons alta potência e alta qualidade estão prontas para serem usadas na indústria, no entanto o potencial de novas fontes de laser de alto brilho tal como os de fibra não são ainda completamente aplicados devido à remoção ineficiente de material fundido pelos jatos de gás gerados pelos bocais convencionais. O aumento da eficiência deste processo de remoção deverá ditar o ritmo dos avanços neste processo de usinagem durante este século XXI (WANDERA & KUJANPÄÄ, Characterization of the melt removal rate in laser cutting of thick-section stainless steel, 2010, p. 68).

9 MÁQUINA DE CORTE A LASER DE FIBRA SENFENG SF1313G 750W

Este capítulo 9 é uma referência para informações técnicas trazidas na forma de um texto descritivo, complementado de imagens e tabelas, a respeito da máquina de corte e de seus equipamentos periféricos indispensáveis. Além disso, há a descrição sobre o modo correto de efetuar manutenção básica: limpeza das lentes e troca dos bocais, respectivamente nas seções secundárias 9.2 e 9.3. Aqui apresento apenas um preâmbulo especialmente curto ao capítulo 9 do trabalho completo, recomenda-se a consulta ao trabalho completo, pois em se tratando de um texto descritivo objetivo de informações técnicas, perderia conteúdo e, logo, sua finalidade.

A máquina de corte a laser Senfeng SF 1313G-Series de 750W em funcionamento no Laboratório de Usinagem do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Paraná (Figura 27) foi adquirida no ano de 2020 como parte de um grande investimento em novos e modernos equipamentos, acompanhado da reforma de estrutura elétrica e de fornecimento de ar comprimido, que o Laboratório de Usinagem do Departamento de Engenharia Mecânica da UFPR – o LABUSIG – recebeu graças aos esforços do seu coordenador, o Prof. Dr. Dalberto Dias da Costa, e do seu vice-coordenador Prof. Dr. Claudimir José Rebeyka. Com a conclusão da reforma aludida, sua entrega técnica foi realizada no dia 15 de outubro de 2021.

Figura 27 - MÁQUINA DE CORTE A LASER DE FIBRA SENFENG SF-1313G-SERIES 750 W APÓS ENTREGA TÉCNICA NO LABORATÓRIO DE USINAGEM DA UFPR.



FONTE: O autor (2022).

A SF1313G 750 watts é considerada uma máquina de corte a laser de fibra de dimensão compacta, com uma área de trabalho de 1300 * 1300 mm, e uma potência adequada para corte de metais de espessura fina a média (SENFENG, Original Instructions no.2 - Maintenance Manual V7.19 - 1313G-Series Fiber Laser Cutting Machine, 2017; SENFENG USA Laser Technology Co., 2021). A natureza do corte a laser permite explorar o corte de chapas mais espessas tendo à disposição potência menor que o ideal, porém as técnicas atuais relatam baixas “velocidades máximas de corte” e possivelmente qualidade inferior da aresta resultante. É sugestão deste autor que outros colegas pesquisem o desempenho desta máquina de corte para diferentes metais e espessuras, buscando parâmetros adequados para obter boa qualidade de aresta a uma velocidade de corte que viabilize seu uso industrial.

9.1. EQUIPAMENTOS PERIFÉRICOS

O funcionamento do processo de corte a laser realizado pela máquina SENFENG SF1313G 750W depende de alguns equipamentos periféricos. Estes demandam acionamento prévio e alguns cuidados e manutenção específica.

9.1.1. Sistema compressão, tratamento e distribuição de ar atmosférico via rede de ar comprimido

A modernização dos equipamentos hoje disponíveis no Laboratório de Usinagem da UFPR foi bem sincronizada pela coordenação para ocorrer em paralelo à reforma de estrutura elétrica e da rede de ar comprimido que atende os novos equipamentos. Ainda que o ar comprimido na SF 1313G esteja sendo utilizado somente para acionamento do cilindro que prende a mesa e não como gás de assistência durante o corte (justificado no subitem 9.1.1, maiores detalhes no subitem 11.5.1), o funcionamento da máquina de corte a laser exige alta qualidade do ar utilizado, seco e livre de impurezas que possam ser maiores do que $1 \cdot 10^{-8}$ m (SENFENG, Original Instructions no.1 - User Manual V6.17 - 1313G-Series Fiber Laser Cutting Machine, 2017, p. 20). Para tal, além da reforma da rede de ar comprimido, uma nova central de tratamento de ar foi instalada, com detalhamento no item 9.1.1.

9.1.2. Refrigerador da água em dois canais.

A amplificação de radiação dentro da fibra de vidro na fonte laser e a concentração espacial desta energia através de focalização no cabeçote é o que permite a utilização do laser como método de usinagem. Mas a geração de calor no processo é intrínseca, assim há necessidade de circulação e refrigeração desta

água, o que é assegurado por um refrigerador de água fornecido como equipamento periférico. Este equipamento é frequentemente aludido pelo seu termo no idioma inglês - *chiller* - sendo um equipamento específico que fornece água circulante de refrigeração para a fonte do laser e as lentes do cabeçote de corte. O volume da água é ≥ 12 L/min. Somente água pura de alta qualidade ou água destilada pode ser usada como água circulante de resfriamento (SENFENG, Original Instructions no.1 - User Manual V6.17 - 1313G-Series Fiber Laser Cutting Machine, 2017, p. 11). Fotos e detalhes em 9.1.2.

9.1.3. Transformador elétrico.

Necessitando do fornecimento de 15 kVA para o funcionamento do equipamento de corte e periféricos, a fonte de alimentação é trifásica 380V, conforme informado no Quadro 13 (apenas no trabalho original), portanto para isso a máquina de corte a laser está acompanhada de fábrica por um transformador de gabinete sobre rodízios como item periférico, com maiores detalhes e foto no item 0.

9.1.4. Exaustor de fumos e gases tóxicos.

O laser desta máquina é um gerador de laser de fibra, que gera gases de escape durante o corte, portanto, os extratores de ar devem ser ligados durante o corte para que a fumaça e o gás de trabalho do laser gerados durante o processamento sejam descarregados para o exterior através do tubo de exaustão. Isso é feito acionando o exaustor de gases pelo botão de partida, no quadro de comando deste.

Antes da operação, equipamentos de ventilação, filtros de manga para coleta de poeira e exaustão devem ser instalados para preservar a função pulmonar do operador (SENFENG, Original Instructions no.2 - Maintenance Manual V7.19 - 1313G-Series Fiber Laser Cutting Machine, 2017, p. 16).

9.1.5. Fonte de laser.

Apesar de estar montada na máquina de corte e ser acionado pela sequência de acionamento desta, é conveniente descrever a fonte de laser e sua posição.

A máquina de corte a laser Senfeng SF 13131G usa a fonte de laser RFL-C750 do fabricante Raycus. Emite laser em onda contínua (CW), posteriormente convertida em um feixe pulsado.

Amplifica e emite radiação no infravermelho, com o comprimento de onda 1075 a 1085 nm, sintonizável. A potência é 750 W. Está acessível pela tampa no canto inferior esquerdo na região traseira da máquina, mostrado na Figura 28.

Figura 28 - FONTE LASER DE FIBRA RAYCUS RFL-C750.



FONTE: O autor (2022).

9.2. LIMPEZA DA LENTE

Apesar de ser considerado que no corte a laser, à diferença de outros métodos de usinagem, não há desgaste de ferramentas (RIVEIRO A. , et al., 2019), existe, porém, progressiva agressão a alguns itens durante o uso que necessitam de inspeção e troca eventual. Os itens consumíveis e vulneráveis estão listados no Quadro 14 do trabalho completo. O acesso à lente para substituição é mostrado no subitem 9.2, enquanto a troca de bocais está ilustrado no subitem 9.3. A consulta a ambos deve ser feita no trabalho original.

9.3. MONTAGEM DO BOCAL DE CORTE.

A cada novo processo de corte que envolva mudança do material e espessura da chapa, sobretudo aqueles que exijam troca do gás de assistência, exigirá a consideração da troca do bocal. A escolha do diâmetro do bocal é um processo que demanda a mesma pesquisa de textos acadêmicos, ensaios empíricos e experiência do que qualquer outro dos importantes parâmetros definidos na janela LAYER PARAMETER SETTINGS, discutido em detalhes no item 11.5.

Acompanha a máquina de corte a laser sete bocais para corte com assistência de O₂, diferenciando-se visualmente pelo formato anelar e por serem em sua maior parte de menor diâmetro. Os bocais de corte para uso com nitrogênio, por sua vez, são quatro (4) e do tipo cônico, com diâmetro de bico significativamente

mais largo, o que faz sentido ao considerar que a pressão usada no corte assistido com nitrogênio é bem maior.

10 SEQUÊNCIA DE ACIONAMENTO DA MÁQUINA DE CORTE A LASER DO LABOTARÓRIO DE USINAGEM

A intenção desta seção 10 do trabalho completo é documentar as etapas recomendadas para acionamento da máquina de corte a laser, começando por seus periféricos. Recomenda-se seguir aquela rotina de tarefas ao acionar e ao desativar, para não esquecer nenhuma etapa necessária ao correto funcionamento da máquina de corte a laser SENFENG SF1313G 750W.

Há também um vídeo produzido pelo autor como parte complementar ao capítulo 10 da monografia “LASER: ARTIGO DE REVISÃO BIBLIOGRÁFICA DA TECNOLOGIA E COMISSIONAMENTO DA MÁQUINA DE CORTE A LASER SF 1313 G-SERIES”, demonstrando esta rotina de acionamento. O link atualizado para acesso ao vídeo será disponibilizado no site do Laboratório de Usinagem do Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Paraná (DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA DA UFPR, s.d.).

Por serem informações técnicas e já bastante objetivas, é opinião do autor que qualquer síntese ocasionaria perda de conteúdo de importância crítica, então indica-se consultar o integral teor do capítulo 10 no trabalho completo e o vídeo supracitado.

11 TUTORIAL PARA REFERÊNCIA E USO DO PROGRAMA CAM CYPCUT LASER CUTTING SYSTEM

O CypCut é programa de assistência à manufatura (dito CAM) utilizado na interface que integra as complexas funções CNC (sigla para “controle numérico computadorizado”) da máquina de corte a laser de fibra Senfeng a um projeto trazido de um programa de desenho (estes, comumente conhecidos pela sigla CAD). Na realidade, o CypCut possui também ferramentas de desenho relevantes.

A intenção com esta última seção da monografia “LASER: ARTIGO DE REVISÃO BIBLIOGRÁFICA DA TECNOLOGIA E COMISSIONAMENTO DA MÁQUINA DE CORTE A LASER SF 1313 G-SERIES”, o seu capítulo 11, é familiarizar o usuário com a interface do programa CAM CypCut, de modo que a consulta ao texto e imagens, em paralelo com a manipulação do programa instalado na máquina de corte ou uma cópia da versão V6.3.763.10 para simulação permitirá ao usuário realizar as tarefas mais comuns e operar o processo de corte. Esta cópia para simulação tem sido disponibilizada e pode ser descarregada na página do criador do programa (Friendess Co., Ltd., 2021).

Esse texto foi produzido com base nas seções 3 e 4 do 3º Manual Instruções da máquina de corte a laser Senfeng (SENFENG, Original Instructions no.3 - Operation Manual - 1313G-Series Fiber Laser Cutting Machine, 2017, pp. 10-84) e com consulta à *playlist* de 52 vídeos “*CypCut Software Tutorial*”, do canal de Youtube Caroline Reliablelaser (Reliablelaser, 2020). Os vídeos são em mandarim e tiveram sua legenda automática extraída, em mandarim, pela nova ferramenta do site Youtube. Posteriormente traduzidos ao inglês, os 52 vídeos daquela *playlist* foram fonte para este tutorial.

Por serem instruções técnicas de operação do programa de computador que faz a interface entre o usuário e a máquina de corte, o conteúdo daquela seção perde sentido se for resumido, então recomenda-se percorrer o capítulo 11 do trabalho integral.

12 CONCLUSÃO

A compreensão das propriedades físico-químicas da matéria no século XIX e o entendimento da física quântica no início do século XX permitiu domínio e manipulação das propriedades da radiação, sua seleção e amplificação, tendo diversos usos sido desenvolvidos.

Particularmente como processo de usinagem, por ser um processo inerentemente CNC, sem desgaste de ferramenta e de baixa manutenção, o corte a laser encontra seu habitat ideal nas indústrias 4.0.

O desafio maior para o bom uso desta tecnologia é a determinação dos parâmetros ideais de corte, que combinem qualidade, produtividade, economia dos gases de corte e da matéria prima.

Por ser a tecnologia de corte a laser *de fibra* ainda recente e, apesar disso, já a mais difundida no mercado (STRATEGIES UNLIMITED, 2018), mostra-se muito acertada sua escolha de tecnologia para a máquina de corte a laser Senfeng SF 1313G 750W adquirida durante a reforma e modernização do Laboratório de Usinagem do Departamento de Engenharia Mecânica da UFPR no ano de 2021, que tem por seu coordenador o Prof. Dr. Dalberto Dias da Costa.

Fica como sugestão de futuros trabalhos a realização de ensaios com diferentes ligas metálicas, chapas de diferentes espessuras, buscando aprimorar técnicas e recomendar parâmetros de corte para obter máxima qualidade de aresta aliada com uma produtividade relevante à aplicação industrial, ensaios válidos para máquinas de corte a laser de fibra de 750W, têm grande atratividade para pequenas e médias indústrias por sua imensa versatilidade. Reunir sugestões de parâmetro de corte que se apliquem ao corte a laser de fibra é relevante pois trata-se de uma tecnologia que se difundiu sobretudo na última década, sendo que a literatura existente sobre o corte a laser é muito extensa, porém a maior parte foi publicada quando sequer existia emissão a laser de fibra ótica. Conforme estudos consultados e referenciados sobretudo no Capítulo 8 - LASER DE FIBRA - a tecnologia de amplificação da radiação no sistema laser utilizado pode representar significativas alterações de comportamento e resultado do corte entre as principais tecnologias referenciadas - laser a gás, laser de estado sólido e laser a fibra.

13 BIBLIOGRAFIA

- AFANASIEVA, L. E., BARABONOVA, I. A., RATKEVICH, G. V., NOVOSELOVA, M. V., M., & R., G. (2016). Surface micromorphology and abrasive wear resistance of tool steel after gas-laser cutting. *Journal of Surface Investigation. X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, 10, 1231–1238.
- AGGOUNE, S., AMARA, E., & DEBIANE, M. (2012). Effects of velocity and nature of the inert assist gas on the stainless steel laser cut quality. *6ª Conferência Internacional sobre Teoria e Aplicações da Engenharia Térmica*. Istambul, Turquia.
- Albert Einstein – Prêmio Nobel de Física de 1921*. (1921). Fonte: NobelPrize.org
Nobel Media AB:
<https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1921/einstein/facts/>
- ARBULU, R., & RIGUES, R. (26 de 08 de 2021). *SpaceX cumpre promessa e adiciona lasers aos satélites da Starlink*. Fonte: Olhar Digital:
<https://olhardigital.com.br/2021/08/25/ciencia-e-espaco/spacex-leva-tecnologia-a-laser-para-a-starlink/>
- Arthur Holly Compton – Prêmio Nobel de Física de 1927*. (1927). Fonte: NobelPrize.org.
Nobel Media AB:
<https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1927/compton/facts/>
- ASHOORI, V., SHAYGANMANESH, M., & RADMARD, S. (31 de Outubro de 2012). *Heat Generation and Removal in Solid State Lasers*. Fonte: IntechOpen Limited:
<https://www.intechopen.com/books/an-overview-of-heat-transfer-phenomena/heat-generation-and-removal-in-solid-state-lasers>
- ASTARITA, A., GENNA, S., LEONE, C., MINUTOLO, C., PARADISO, V., & SQUILACCE, A. (2014). Laser Cutting of Aluminium Sheets with a Superficial Cold Spray Titanium Coating. . . 10. *Key Engineering Materials*, 611-612 , 794-803.
- Atlas Copco. (Maio de 2019). 2.2 Fluxo de ar. Em *Manual de Instruções dos Compressores de Parafuso Rotativo com Injeção de Óleo G2-7* (p. 11).
- BADONIYA, P. (2018). CO2 Laser Cutting of Different Materials – A Review. *International Journal of Engineering and Technical Research*. 5., 2103-2115. .
- BASOV, N. G., & PROKHOROV, A. M. (1954). Application of molecular beams to the radio spectroscopic study of the rotation spectra of molecules. *Zhurnal Eksperimentalnoi i Teoreticheskoi Fiziki*, 27, p. 431.
- BEYER, E., MAHRLE, A., LÜTKE, M., STANDFUSS, J., & BRUECKNER, F. (2012). Innovation in high power fiber laser applications. *Progress in Biomedical Optics and Imaging - Proceedings of SPIE*, vol. 8237, 26-.

- BLOEMBERGEN, N. (2001). Laser: The Inventor, the Nobel Laureate, and the Thirty-Year Patent War. SCHUSTER, Nick Taylor Simon. *Physics Today*, 54, 9, 56–56.
- BOHR, N. (1934). *Atomic Theory and the Description of Nature*. Cambridge, R.U.: Cambridge University Press.
- BROD, D., BRASIER, R. E., & PARKS, J. (Agosto de 1969). A powerful CO2 cutting tool. *Laser Focus*, p. 36.
- CANNING, J. (2006). Fiber lasers and related technologies. *Optics Lasers Eng* 2006;44(7):647 –76.] e [Nilsson J, Clarkson WA, Selvas R, Sahu JK, Turner PW, Alam S-U, Grudinin AB. High-power wavelength-tunable cladding-pumped rare-earth-doped silica fiber lasers. *Optics and Lasers in Engineering Journal* 44(7), 647 –676.
- CARISTAN, C. L. (2004). Capítulo 12 - Safety and Environment. Em C. L. CARISTAN, *Laser Cutting Guide for Manufacturing* (pp. 301-311). Dearborn, MI, E. U. A.: Society of Manufacturing Engineers (SME).
- CARISTAN, C. L. (2004). Capítulo 3 - Materials. Em C. L. CARISTAN, *Laser Cutting Guide for Manufacturing* (pp. 55-82). Dearborn, MI, E. U. A.: Society of Manufacturing Engineers (SME).
- CARISTAN, C. L. (2004). Capítulo 5 - Methods . Em C. L. CARISTAN, *Laser Cutting Guide for Manufacturing* (pp. 209-244). Dearborn, MI, E. U. A.: Society of Manufacturing Engineers (SME).
- CARISTAN, C. L. (2004). Capítulo 9 - Quality. Em C. L. CARISTAN, *Laser Cutting Guide for Manufacturing* (pp. 209-244). Dearborn, MI, E. U. A.: Society of Manufacturing Engineers (SME).
- CARISTAN, C. L. (2004). *Laser Cutting Guide for Manufacturing*. Dearborn, MI, E. U. A.: Society of Manufacturing Engineers (SME).
- CARVALHO, J. C. (29 de Outubro de 2020). *Luz e cor - Como se faz a interação da luz com a matéria?* Fonte: UOL Educação: <https://educacao.uol.com.br/disciplinas/quimica/luz-e-cor-2-como-se-faz-a-interacao-da-luz-com-a-materia.htm>
- CASEY, H. C., & PANISH, M. B. (1994). *Heterostructure Lasers Part A and B*. Nova Iorque, E. U. A.: Academic Press.
- CHALK, S. J. (2019). Glossary of terms used in photochemistry, 3a edição. Em A. D. McNAUGHT, & A. WILKINSON, *IUPAC. Compendium of Chemical Terminology, the "Gold Book". 2a edição, 1997.* (p. 293). Oxford, R. U.: Blackwell Scientific Publications. Fonte: <https://goldbook.iupac.org/>
- CHEN, G., DING, Z., HSU, S.-B., KIM, M., & ZHOU, J. (Fevereiro de 2006). Mathematical analysis of a Bohr atom model. *Journal of Mathematical Physics* 47.

- CHEN, L., YAMASHITA, S., HAMASAKI, M., MANAKA, H., & OBARA, K. (13 de Junho de 2014). Formation Processes of Zinc Excimer Thin Films Due to Ion-Recombination Processes. *Journal of Applied Mathematics and Physics*, Vol.2 No.7, pp. 903-974.
- CHEN, S. L. (1999). Effects of high-pressure assistant-gas flow on high-power CO₂ laser cutting. *Journal of Materials Processing Technology*, 88, 57-66.
- CLAPAUD, A. (20 de Fevereiro de 2018). *Les lasers industriels à l'heure de la maturité*. Fonte: INDUSTRIE TECHNOLOGIES: <https://www.industrie-techno.com/article/les-lasers-industriels-a-l-heure-de-la-maturite.52348>
- COELHO, B. N., LIMA, M. S., & COSTA, A. R. (2013). Soldagem do aço inoxidável AISI 316 com laser à fibra de alta potência: influência dos parâmetros operacionais na micro dureza e na susceptibilidade à corrosão eletrolítica dos cordões de solda. *Revista Matéria*, v. 18, n.3, 1338-1349.
- DAURELIO, G. (1985). Processo di Taglio a Laser CO₂ di Laminati di Rame : Stato dell'Arte e Nuove Possibilità. *Meccanica*, 45 - 57.
- DAVIDOVICH, L. (Dezembro de 2015). Os quanta de luz e a ótica quântica. *Revista Brasileira de Ensino da Física*, v. 37, n. 4, 4205-1 - 4205-12. Fonte: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1806-11172015000400205&lng=en&nrm=iso
- DAVIS, C. C. (2014). Capítulo 7 - Control of laser oscillators. Em C. C. DAVIS, *Lasers and Electro-optics: Fundamentals and Engineering* (pp. 132-152). Cambridge, R. U.: Cambridge University Press.
- DAY, C. (22 de Janeiro de 2015). *Cutting Reflective Metals – Overcoming Issues with Laser Cutting*. Fonte: DAY Steel - Cutting & Profiling Guides, Laser, Waterjet.: <https://www.daysteel.co.uk/news/category/cutting-profiling-guides/>
- DEACON, D. A., ELIAS, L. R., MADEY, J. M., RAMIAN, G. J., SCHWETTMAN, H. A., & SMITH, T. I. (1977). First Operation of a Free-Electron Laser. *Physical Review Letters*, 38, 892.
- DEMIRBAS, U., & ACAR, D. A. (2016). Continuous-wave, quasi-continuous-wave, gain-switched, and femtosecond burst-mode operation of multi-mode diode-pumped Cr:LiSAF lasers. *ResearchGate*, pp. 2105-2113.
- DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA DA UFPR. (s.d.). *LABORATÓRIO DE USINAGEM DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA DA UFPR*. Fonte: Labusig: <http://www.labusig.ufpr.br/>
- DICKEY, F. M., & HOLSWADE, S. C. (2000). Gaussian Beam Shaping: Diffraction Theory and Design. Em F. M. DICKEY, & S. C. HOLSWADE, *Laser beam shaping: theory and techniques* (p. (Optical Science and Engineering)). Nova Iorque, NY, E. U. A.: Marcell Dekker, Inc.
- EINSTEIN, A. (1917). Zur Quantentheorie der Strahlung. *Physikalische Zeitschrift*, 18, pp. 121–128.

- EISBERG, R., & RESNICK, R. (1979). Cap.3 O postulado de De Broglie – Propriedades ondulatórias das partículas. Em R. EISBERG, & R. RESNICK, *Física Quântica – Átomos, Moléculas, Sólidos, Núcleos e Partículas*. Rio de Janeiro: Elsevier Editora.
- EISBERG, R., & RESNICK, R. (1979). Cap.4 O modelo de Bohr para o átomo. Em R. EISBERG, & R. RESNICK, *Física Quântica – Átomos, Moléculas, Sólidos, Núcleos e Partículas*. Rio de Janeiro: Campus.
- EKSPONG, G. (Março de 1999). The Dual Nature of Light, as Reflected in the Nobel Archive. *Proceedings of the American Philosophical Society*, 143, pp. 42-49.
- ESAB. (s.d.). *What is cutting kerf?* Fonte: ESAB KNOWLEDGE CENTER: <https://www.esabna.com/us/en/education/blog/what-is-cutting-kerf.cfm>
- European Data Relay Satellite System (EDRS) Overview*. (s.d.). Fonte: European Space Agency: <https://artes.esa.int/edrs/overview>
- FEIN, G. S. (8 de Abril de 2011). MLD Test Moves Navy a Step Closer to Lasers for Ship Self-Defense. Arlington, Virgínia, E.U.A. Fonte: Office of Naval Research Corporate Strategic Communications: <https://www.onr.navy.mil/en/Media-Center/Press-Releases/2011/Maritime-Laser-MLD-Test>
- FIERET, J., TERRY, M., & WARD, B. (1986). Aerodynamic interactions during laser cutting. Em W. W. DULEY, & R. WEEKS, *Laser Processing: Fundamentals, Applications, and Systems Engineering* (pp. 53-62). Québec, Québec, Canadá: SPIE.
- FRANCK, J., & REICHE, F. (1920). Über Helium und Parhelium. *Zeitschrift für Physik*, 1, 154–160.
- Friendess Co., Ltd. (28 de 04 de 2021). *CypCut Laser Cutting Software V6.3.763.10*. Fonte: Friendess Co., Ltd.: <https://www.fscut.com/en/soft/cypcut/>
- GARCÍA-LÓPEZ, E., MEDRANO-TELLES, A., IBARRA-MEDINA, J., SILLER, H., & RODRIGUEZ, C. (26 de Dezembro de 2017). Experimental Study of Back Wall Dross and Surface Roughness in Fiber Laser Microcutting of 316L Miniature Tubes. *Micromachines vol. 9*, 1-4.
- GORDON, J. P., ZEIGER, H. J., & TOWNES, C. H. (1955). The maser – new type of microwave amplifier, frequency standard, and spectrometer. *Physical Review*, 99, pp. 1264 – 1274.
- GOSWAMI, G., & KUMAR, D. (1988). Laser materials processing. . *Bulletin of Materials Science*, 11, 213–224.
- GRAND VIEW RESEARCH. (Março de 2017). *Laser Processing Market Size, Share & Trends Analysis Report By Product (Gas, Solid-state, Fiber), By Process (Material Processing, Marking, Micro-Processing), By Application And Segment Forecasts, 2018 - 2025*. Fonte: Grand View Research: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/laser-processing-market>

- HECHT, J. (01 de Outubro de 2007). *PHOTONIC FRONTIERS: PHOTONIC-CRYSTAL LASERS - Photonic crystals make nanocavity lasers*. Fonte: Laser Focus World: <https://www.laserfocusworld.com/optics/article/16552847/photonic-frontiers-photonicc>
- HECHT, J. (1 de Dezembro de 2009). *PHOTONIC FRONTIERS: FIBER LASERS: Fiber lasers ramp up the power*. Fonte: Laser Focus World: <https://www.laserfocusworld.com/fiber-optics/article/16551164/photonic-frontiers-fiber-lasers-fiber-lasers-ramp-up-the-power>
- HECHT, J. (1 de Abril de 2012). *FIBER LASERS: Fiber lasers: The state of the art*. Fonte: Laser Focus World: <https://www.laserfocusworld.com/test-measurement/spectroscopy/article/16549567/fiber-lasers-fiber-lasers-the-state-of-the-art>
- HECHT, J. (02 de Junho de 2020). *Laser*. Fonte: Encyclopædia Britannica: <https://www.britannica.com/technology/laser/History>
- HERNÁNDEZ-CASTAÑEDA, J. C., KURSAD SEZER, H., & LI, L. (2011). The effect of moisture content in fibre laser cutting of pine wood. *Optics and Lasers in Engineering*, 49(9-10), 1139–1152.
- HERZIGER, G., KREUTZ, E. W., & WISSENBAACH, K. (12 de Novembro de 1986). Fundamentals Of Laser Processing Of Materials. *Laser Processing: Fundamentals, Applications, and Systems Engineering Vol.668*, pp. 53-62.
- HILLTON, P. A. (20-22 de Agosto de 2007). *The early days of laser cutting*. Fonte: The Welding Institute: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/published-papers/the-early-days-of-laser-cutting-august-2007>
- HO, C., & WEI, P. (2001). Absorption in a paraboloid of revolution-shaped welding or drilling cavity irradiated by a polarized laser beam. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 32, 603-614.
- HODGSON, N., & WEBER, H. (2005). Stable Resonators; Resonators on the Stability Limits; Unstable Resonators. Em N. HODGSON, & H. WEBER, *Laser Resonators and Beam Propagation, Fundamentals, Advanced Concepts and Applications* (pp. 219 – 337). Springer Science.
- HOULDCROFT, P. T. (1970). *Estados Unidos da América Patente Nº US3612814A*.
- HÜGEL, H. (2000). New solid-state lasers and their application potentials. *Optics and Lasers in Engineering*, 34(4-6), 213–229.
- IMADA, M., NODA, S., CHUTINAN, A., & TOKUDA, T. (Maio de 1999). Coherent two-dimensional lasing action in surface-emitting laser with triangular-lattice photonic crystal structure. *Applied Physics Letters* 75, pp.316 , 316. Kyoto, Japão: Department of Electronic Science and Engineering.

- ION, J. C. (2005). Capítulo 14 - Cutting. Em J. C. ION, *Laser Processing of Engineering Materials* (pp. 347-383). Oxônia, Reino Unido: Butterworth-Heinemann.
- ION, J. C. (2005). Capítulo 16 - Keyhole Welding. Em J. C. ION, *Laser Processing of Engineering Materials* (pp. 395-455). Oxônia, Reino Unido: Butterworth-Heinemann.
- ION, J. C. (2005). Capítulo 5 - Engineering Materials. Em J. C. ION, *Laser Processing of Engineering Materials* (pp. 139-177). Oxônia, Reino Unido: Butterworth-Heinemann.
- IPG Photonics. (10 de Maio de 2010). *Materials Processing: Single mode fiber lasers, Multi mode fiber lasers*. Fonte: IPG Photonics: http://www.ipgphotonics.com/apps_materials.htm
- ISO 9013. (2017). *Corte térmico - Classificação dos cortes térmicos, especificação geométrica dos produtos e tolerâncias relativas à qualidade*. Genebra, Suíça: Comitê Europeu de Normalização.
- ITAYA, K., SUGAWARA, H., & HATAKOSHI, G.-i. (2 de Abril de 1994). InGaAlP visible light laser diodes and light-emitting diodes. *Journal of Crystal Growth, Volume 138, Edições 1-4*, pp. 768-775.
- JARMAN, R. H. (1996). Novel optical fiber lasers. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 1(2), 199-203.
- JAVAN, A., & BENNET Jr, W. R. (1960). *Estados Unidos da América Patente Nº 3.149.290*.
- JAVAN, A., BENNET Jr., W. R., & HERRIOTT, D. R. (1961). Population Inversion and Continuous Optical Maser Oscillation in a Gas Discharge Containing a He-Ne Mixture. *Physical Review Letters* 6, 106-110.
- JELÍNKOVÁ, H., & ŠULC, J. (2013). 2 Laser characteristics. Em H. JELÍNKOVÁ, & J. ŠULC, *Lasers for Medical Applications* (pp. 17-46). Praga, Tchêquia.: Woodhead Publishing.
- JEONG, Y., SAHU, J. K., PAYNE, D. N., & NILSSON, J. (2004). Ytterbium-doped large-core fiber laser with 1.36 kW continuous-wave output power. *Optics Express*, 12(25), 6088-6092.
- JONES, N. (12 de Setembro de 2018). How to stop data centres from gobbling up the world's electricity. *Nature Magazine*, 163-166 . Fonte: Nature, 561: <https://www.nature.com/articles/d41586-018-06610-y>
- KANNATEY-ASIBU JR., E. (2009). Capítulo 1 - Laser Generation. Em E. KANNATEY-ASIBU JR., *Principles of Laser Materials Processing* (pp. 3-25). Hoboken, NJ, E. U. A.: John Wiley & Sons, Inc.
- KANNATEY-ASIBU JR., E. (2009). Capítulo 11 - The Microstructure. Em E. KANNATEY-ASIBU JR., *Principles of Laser Materials Processing* (p. 302). Hoboken, NJ, E. U. A.: John Wiley & Sons, Inc.

- KANNATEY-ASIBU JR., E. (2009). Capítulo 14 - Background on Laser Processing. Em E. KANNATEY-ASIBU JR., *Principles of Laser Materials Processing* (pp. 409-430). Hoboken, NJ, E. U. A.: John Wiley & Sons, Inc.
- KANNATEY-ASIBU JR., E. (2009). Capítulo 15 - Laser Cutting and Drilling. Em E. KANNATEY-ASIBU JR., *Principles of Laser Materials Processing* (pp. 431-501). Hoboken, NJ, E. U. A.: John Wiley & Sons, Inc.
- KANNATEY-ASIBU JR., E. (2009). Capítulo 2 - Optical Resonators. Em E. KANNATEY-ASIBU JR., *Principles of Laser Material Processing* (pp. 26-62). Hoboken, NJ, E. U. A.: John Wiley & Sons, Inc.
- KANNATEY-ASIBU JR., E. (2009). Capítulo 6 - Beam Modification. Em E. KANNATEY-ASIBU JR., *Principles of Laser Materials Processing* (pp. 96-117). Hoboken, NJ, E. U. A.: John Wiley & Sons, Inc.
- KANNATEY-ASIBU JR., E. (2009). Capítulo 8 - Types of Lasers. Em E. KANNATEY-ASIBU JR., *Principles of Laser Materials Processing* (pp. 135-187). Hoboken, NJ, E. U. A.: John Wiley & Sons, Inc.
- KANNATEY-ASIBU JR., E. (2009). Capítulo 9 - Beam Delivery. Em E. KANNATEY-ASIBU JR., *Principles of Laser Materials Processing* (pp. 188-230). Hoboken, NJ, E. U. A.: John Wiley & Sons, Inc.
- KAPLAN, A. F. (2002). *Theoretical analysis of laser beam cutting*. Aachen, Alemanha: Shaker Verlag, GmbH.
- KASPER, J. V., & PIMENTEL, G. C. (1965). HCl Chemical Laser. *Physical Review Letters*. 14 (10), 352–354.
- KATZIR, A. (1993). Capítulo 1 - Introduction. Em A. KATZIR, *Lasers and Optical Fibers in Medicine* (pp. 1-14). Tel Aviv, Israel: Universidade de Tel Aviv.
- KATZIR, A. (1993). Capítulo 9 - Clinical Applications of Fiberoptic Laser Systems. Em A. KATZIR, *Lasers and Optical Fibers in Medicine* (pp. 237–291). Tel Aviv, Israel: Universidade de Tel Aviv.
- KAWASUMI, H. (1990). Laser processing in Japan. Em M. R. LEVITT, D. BELFORTE, & L. BELLEVILLE, *Industrial Laser Annual Handbook* (pp. 141–143). Tulsa, OK, E. U. A.: Pennwell Books.
- KELLENS, K., RODRIGUES, G. C., DEWULF, W., & DUFLOU, J. (2014). Energy and Resource Efficiency of Laser Cutting Processes. *8th International Conference on Photonic Technologies LANE 2014*. (pp. 854–864). Leuven, Bélgica: Universidade Católica de Leuven, Departamento de Engenharia Mecânica.
- KLEPPNER, D. (2005). Relendo Einstein sobre radiação. *Revista Brasileira de Ensino Física* vol.27, n.1, 87-91.
- KOECHNER, W. (1999). *Solid-State Laser Engineering*. Berlim: Springer-Verlag .

- KOPFERMANN, H. L. (1928). Experimental Proof of 'Negative Dispersion". *Nature* 122, 438–439.
- KOSTRON, H., & HASAN, T. (2016). Photodynamic Medicine. Em H. KOSTRON, & T. HASAN, *Photodynamic Medicine From Bench to Clinic* (pp. VII - IX). Londres, Reino Unido: Royal Society of Chemistry.
- KUJANPÄÄ, V., & WANDERA, C. (2010). Characterization of the melt removal rate in laser cutting of thick-section stainless steel. *Journal of Laser Applications*. 22, 62-70.
- KUKREJA, L. M. (1988). Laser processing of polymers: an overview. *Bulletin of Materials Science*, 11, 225-238.
- LARCOMBE, D. (13 de Novembro de 2013). *Fiber versus CO2 laser cutting. Bystronic explains the different attributes of each laser for laser cutting and gives job shop examples*. Fonte: Industrial Laser Solutions for Manufacturing: <https://www.industrial-lasers.com/cutting/article/16486898/fiber-versus-co2-laser-cutting#:~:text=Briefly%2C%20fiber%20laser%20light%20is,the%20material%20to%20be%20cut>
- LASER RHÔNE ALPES. (Maio de 2019). *Le laser industriel: trois usages pour une technologie*. Fonte: Revista Laser Magazine: <https://www.laser-rhone-alpes.com/magazine/technologie-laser/usages-laser-industriel/>
- LIMPERT, J., SCHREIBER, T., LIEM, A., NOLTE, S., ZELLMER, H., . . . TÜNNERMANN, A. (2003). Thermo-optical properties of air-clad photonic crystal fiber lasers in high power operation. *Optics Express* 11(22), 2982–2990.
- LUKISHOVA, S. G. (2010). *Valentin A. Fabrikant: negative absorption, his 1951 patent application for amplification of electromagnetic radiation (ultraviolet, visible, infrared and radio spectral regions) and his experiments*. Fonte: Journal of the European Optical Society Vol.5: https://www.jeos.org/index.php/jeos_rp/article/view/10045s
- MachineMFG. (2 de Agosto de 2019). *The ultimate guide to fiber laser cutting*. Fonte: MachineMfg: <https://www.machinemfg.com/fiber-laser-cutting/>
- MAIMAN FOUNDATION. (31 de Outubro de 2020). *About Theodore Maiman*. Fonte: Laser Inventor. Creator of the world's first laser: <http://www.laserinventor.com/bio.html>
- MAIMAN, T. H. (1960). Optical and microwave- optical experiments in ruby . *Physical Review Letters*, 4 , 11 , 564 – 566.
- MAIMAN, T. H. (1960). Stimulated optical radiation in ruby. *Nature* , 187 , 4736, 493 – 494.
- MAIMAN, T. H. (1965). *Estados Unidos da América Patente Nº US3353115A*.
- MAIMAN, T. H. (2000). *The Laser Odyssey*. Laser Press.

- MAJUMDAR, . K. (2005). Free-space laser communication performance in the atmospheric channel. *Journal of Optical and Fiber Communications Reports*, 2(4), 345–396.
- MAS, C., FABBRO, R., & GOUÉDARD, Y. (2003). Steady-state laser cutting modeling. *Journal of Laser Applications*, 15, 145–152.
- MASHIKHI, S., POWELL, J., KAPLAN, A., & VOISEY, K. (2011). Heat affected zones and oxidation marks in fiber laser–oxygen cutting of mild steel. *Journal of Laser Applications*. 23.
- MASSIMO, A. R., & MAJED, C. (2007). The European X-ray free-electron laser. Technical design report. Hamburgo , Alemanha: DESY XFEL Project Group; European XFEL Project Team; Deutsches Elektronen-Synchrotron (DESY).
- MCCLUNEY, R. (2003). Radiometry and Photometry. *Encyclopedia of Physical Science and Technology*, 731–758.
- MELO, M., SOUSA, J. M., BERENDT, M. O., HENDOW, S. T., & SALCEDO, J. R. (2011). Lasers de Fibra Óptica de Alta Potência: conceito, limitações e aplicações. *Revista Para os físicos e amigos da física*. vol.34-n .1, 22-26. Fonte: www.gazetadefisica.spf.pt
- MEUNIER, P.-M. (13 de Novembro de 2015). Lasers à usage militaire : où en sont les développements? *Revista ENDERI - Entreprise Défense Relations Internationales*.
- MICRONORA. (Janeiro de 2012). Le laser s'invite dans tous les secteurs de l'industrie. *Revista Micronora Informations*, 127 - *Revue du Salon International des Microtechniques*. Besançon, França: Imprimerie de Champagne/Langres. Fonte: Micronora: https://www.micronora.com/micronora_infos/127.pdf
- MIYAMOTO, I., & MARUO, H. (1991). Mechanism of laser cutting. *Welding in the World, Le Soudage Dans Le Monde*. 29, 283-294.
- MORDON, S. (1995). Actions thermiques des lasers. Em J. P. CHAVOIN, *Éd. Encyclopédie des Lasers en médecine et en chirurgie* (pp. 199-214). Pádua, Itália: Piccin Nuova Libreria SpA.
- MORDON, S. (2010). Applications médicales du laser. *Reflets de la physique*, 65-69.
- MÜLLER, H.-R., KIRCHHOF, J., REICHEL, V., & UNGER, S. (2006). Fibers for high-power lasers and amplifiers. *Comptes Rendus Physique* 7(2), 154 –62.
- MUTHUKRISHNAN, A., SCULLY, M., & ZUBAIRY, M. (2003). The concept of the photon - Revisited. *Optics and Photonics News*. 14, 18-27.
- NASSAR, A., NASSAR, E., & YOUNIS, M. (2016). Effect of laser cutting parameters on surface roughness of stainless steel 307. *Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies*. 15., 127-136.

- NELSON, D., COLLINS, R., & KAISER, W. (Dezembro de 2009). *Bell Labs and the ruby laser*. Fonte: *Physics Today* 63: <https://physicstoday.scitation.org/doi/10.1063/1.3293412>
- NILSSON, J., CLARKSON, W. A., SELVAS, R., SAHU, J. K., ALAM, S.-U., & GRUNDININ, A. B. (2004). High-power wavelength-tunable cladding-pumped rare-earth-doped silica fiber lasers. *Optical Fiber Technology* 10 (1), 5 –30.
- NISAR, S., LI, L., & SHEIKH, M. (2013). Laser Glass Cutting Techniques - A Review. *Journal of Laser Applications*. 25, 11.
- NIZIEV, V., & NESTEROV-MUELLER, A. (1999). Influence of beam polarization on laser cutting efficiency. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 32., 1455.
- NODA, S., YOKOYAMA, M., IMADA, M., CHUTINAN, A., & MOCHIZUKI, M. (10 de Agosto de 2001). Polarization Mode Control of Two-Dimensional Photonic Crystal Laser by Unit Cell Structure Design. *Science*, pp. 1123-1125.
- O'NEILL, W., SPARKES, M., VARNHAM, M. H., BIRCH, M., WOODS, S., & HARKER, A. (2004). High Power High Brightness Industrial Fiber Laser Technology. *ICALEO 2004 23rd International Congress on Laser Materials Processing and Laser Microfabrication*. San Francisco, CA, E. U. A.: Laser Institute of America ICALEO® 2004: .
- OLSEN, F. (2006). An evaluation of the cutting potential of different types of high power lasers. *ICALEO® 2006: 25th International Congress on Laser Materials Processing and Laser Microfabrication*, (pp. 188–196). Scottsdale, AZ, E. U. A.
- OLSEN, F. O., & ALTING, L. (1989). Cutting Front Formation in Laser Cutting. *CIRP Annals, Volume 38, Edição 1*, 215-218.
- OLSON, M. (2012). History of Laser Weapon Research. *Leading Edge, Volume 7, Edição 4*, 26-35.
- ORISHICH, A. M., KOVALEV, O., ZAITSEV, A. V., MALIKOV, A. G., YUDIN, P. V., & SHULYATYEV, V. (2008). Double-nozzle control of a subsonic gas flow in the conditions of gas-laser cutting. *ICALEO 2008 - 27º Congresso Internacional de Aplicações de Lasers e Eletro-Óptica, Anais do Congresso*, (pp. 611-614). Temecula, Califórnia, E. U. A.
- OVERTON, G. (16 de Março de 2019). *2019 Market for Lasers report now available from SU and Laser Markets Research*. Fonte: *Revista LaserFocusWorld Magazine*: <https://www.laserfocusworld.com/lasers-sources/article/16566775/2019-market-for-lasers-report-now-available-from-su-and-laser-markets-research>
- PALANDI, J., FIGUEIREDO, D. B., DENARDIN, J. C., & MAGNAGO, P. R. (2010). *Física Moderna (Caderno Didático)*. Santa Maria: Departamento de Física/CCNE/UFSM.

- Pentagon beams over military laser test Laser U.S. wants to determine vulnerability of satellites. (20 de Outubro de 1997). Fonte: CNN.com U.S. News: <https://web.archive.org/web/20071230052044/http://www.cnn.com/US/9710/20/pentagon.laser/>
- PETRING, D., SCHNEIDER, F., WOLF, N., & NAZERY, V. (2008). The relevance of brightness for high power laser cutting and welding. *ICALEO 2008 ICALEO® 2008: 27th International Congress on Laser Materials Processing, Laser Microprocessing and Nanomanufacturing*, (pp. 95–103). Temecula, CA, E. U. A.
- PHIPPS, C. R. (2011). *Laser ablation and its applications*. Londres, Reino Unido: Springer.
- POLANYI, J. C. (1961). Proposal for an Infrared Maser Dependent on Vibrational Excitation. *Journal of Chemical Physics*. 34, 347–348.
- POWELL, J., FRASS, K., MENZIES, I. A., & FUHR, H. (1989). CO2 Laser Cutting Of Non-Ferrous Metals. High Power CO2 Laser Systems and Applications. *SPIE 1988 Intl Congress on Optical Science and Engineering* (pp. 156-163). Hamburgo, Alemanha: SPIE Proceedings.
- POWELL, J., IVARSON, A., KAMALU, J., BRODÉN, G., & MAGNUSSON, C. (1992). The role of oxygen purity in laser cutting of mild steel. *International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics* (p. 433). Orlando, FL, E. U. A.: Laser Institute of America ICALEO®.
- POWELL, J., PETRING, D., KUMAR, R., MASHIKHI, S., KAPLAN, A., & VOISEY, K. (2008). Laser-oxygen cutting of mild steel: The thermodynamics of the oxidation reaction. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 42.
- Prêmio Nobel em física 1964 - Charles Hard Townes, Nicolay Gennadiyevich Basov, Aleksandr Mikhailovich Prokhorov. (1964). *NobelPrize.org Nobel Media AG*, p. <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1964/summary/>.
- Prince Louis-Victor Pierre Raymond de Broglie - Prêmio Nobel de Física 1929. (1929). Fonte: NobelPrize.org Nobel Media AB: <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1929/summary/>
- Pura Física. (10 de Outubro de 2017). *Ondas e luz: Polarização da luz [Arquivo de vídeo]*. Fonte: YouTube: <https://www.youtube.com/watch?v=AiAOFnVq0Yo>
- QUAZI, M. M., FAZAL, M. A., HASEEB, A. S., YUSOF, F., MASJUKI, H. H., & ARSLAN, A. (2015). Laser-based Surface Modifications of Aluminum and its Alloys. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, 41, 106–131.
- READY, J. F., & FARSON, D. F. (2001). Capítulo - Laser cutting. Em J. F. READY, & D. F. FARSON, *LIA Handbook of Laser Materials Processing* (pp. 425-470). Orlando, FL, E. U. A.: Laser Institute of America.
- READY, J. F., & FARSON, D. F. (2001). *LIA Handbook of Laser Materials Processing*. Orlando, FL, E. U. A.: Laser Institute of America.

- Reliablelaser, C. (22 de Novembro de 2020). *Cypcut software tutorial* . Fonte: YouTube: <https://www.youtube.com/playlist?list=PLenSq5aEVJlxfHDhQhIqvV9JyXlg1SN2o>
- RIVEIRO, A., QUINTERO, F., BOUTINGUIZA, M., DEL VAL, J., COMESAÑA, R., LUSQUIÑOS, F., & POU, J. (2019). Laser Cutting: A Review on the Influence of Assist Gas. Vigo, Galícia, Espanha: Departamento de Física Aplicada da Universidade de Vigo.
- RIVEIRO, A., QUINTERO, F., LUSQUIÑOS, F., COMESAÑA, R., DEL VAL, J., & POU, J. (2011). The Role of the Assist Gas Nature in Laser Cutting of Aluminum Alloys. . *Physics Procedia*, 12, 548–554.
- ROSO, N. A., MOREIRA, R. d., & OLIVEIRA, J. E. (Setembro de 2014). High Power Laser Weapons and Operational Implications. *Journal of Aerospace Technology and Management*, v. 6, n. 3, 231-236. São José dos Campos, SP, Brasil.
- SALEH, B. E., & TEICH, M. C. (1991). *Fundamentals of Photonics, 2 Volume Set, 3rd Edition*. Nova Iorque, EUA: Wiley.
- SANTOS, R. (8 de Setembro de 2017). *Ondas longitudinais e transversais [Arquivo de vídeo]*. Fonte: YouTube: <https://www.youtube.com/watch?v=2-F-BaqJ61U>
- SARRI, G. (12 de Agosto de 2015). *World's most powerful laser is 2,000 trillion watts – but what's it for?* Fonte: The Conversation: <https://theconversation.com/worlds-most-powerful-laser-is-2-000-trillion-watts-but-whats-it-for-45891>
- SCHAWLOW, A. L., & TOWNES, C. H. (1958). Infrared and Optical Masers. *Physical Review*, 112, edição 6, 1940-1949.
- SCHULZ, W., BECKER, D., FRANKE, J., KEMMERLING, R., & HERZINGER, G. (1993). Heat conduction losses in laser cutting of metals. *Journal of Physics D: Applied Physics*, Volume 26, Número 9, 1357-1363.
- SCHULZ, W., KOSTRYKIN, V. N., MICHEL, J., PETRING, D., & KREUTZ, E. W. (1999). Dynamics of ripple formation and melt flow in laser beam cutting. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 32, 1219–1228.
- Scientific American. (4 de Janeiro de 1999). *The Laser at (About) 40*. Fonte: Scientific American: <https://www.scientificamerican.com/article/the-laser-at-about-40/>
- SENFENG. (2017). *Original Instructions no.1 - User Manual V6.17 - 1313G-Series Fiber Laser Cutting Machine*. Jinan, China.
- SENFENG. (2017). *Original Instructions no.2 - Maintenance Manual V7.19 - 1313G-Series Fiber Laser Cutting Machine*. Jinan, China.
- SENFENG. (2017). *Original Instructions no.3 - Operation Manual - 1313G-Series Fiber Laser Cutting Machine*. Jinan, China.

- Senfeng Laser. (Version: V6.17). 4.3.4.2 Relationship between the Focus Position and the Cutting Section. Em *Original Instructions - User Manual no.1 - 1313G-Series Fiber Laser Cutting Machine* (pp. 66-67). Jinan, China.
- SENFENG USA Laser Technology Co. (30 de Novembro de 2021). *SF1313G – Small Fiber Laser Cutting Machine*. Fonte: SENFENG USA OFFICIAL WEBSITE: <https://www.senfenglaserusa.com/product/small-fiber-laser-cutting-machine/>
- SHARP, C. (1987). CO₂ laser cutting of highly reflective materials. *The 39th International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics (ICALEO® 1987)* (pp. 149-153). San Diego, CA. E. U. A.: Springer Verlag.
- SHEAHAN, M. (28 de Novembro de 2014). Europe's space-based, laser-powered data highway passes early test. *Reuters*. Fonte: Reuters: <https://cn.reuters.com/article/space-europe-laser/europes-space-based-laser-powered-data-highway-passes-early-test-idINL6N0TG1LG20141128>
- SHENG, P. S., & JOSHI, V. S. (1995). Analysis of heat-affected zone formation for laser cutting of stainless steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 53, 879–892.
- SHIN, J. S., YONG OH, S., PARK, H., CHUNG, C.-M., SEON, S., KIM, T.-S., . . . LEE, J. (Agosto de 2018). Cutting performance of thick steel plates up to 150 mm in thickness and large size pipes with a 10-kW fiber laser for dismantling of nuclear facilities. Daejeon, Coréia do Sul: Korea Atomic Energy Research Institute. Fonte: Science Direct: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306454918304407>
- SHIN, J. S., YONG OH, S., PARK, H., CHUNG, C.-M., SEON, S., KIM, T.-S., . . . MOON, J.-K. (2017). High-speed fiber laser cutting of thick stainless steel for dismantling tasks. *Optics & Laser Technology, Volume 94*, 244-247.
- SHINER, B. (2004). kW fibre lasers for material processing markets. 23. Fonte: AILU Association of Industrial Laser Users: http://www.ailu.org.uk/laser_technology/the_laser_user_magazine/articles/kw_fibre_lasers_for_material_processing_markets.html
- SIEGMAN, A. E. (1986). *Lasers*. Mill Valley, CA, EUA: University Science Books.
- SILFVAST, W. T. (2004). *Laser fundamentals*. Cambridge, R.U.: Cambridge University Press.
- SILVA JR., J. S. (17 de Outubro de 2020). *O que é polarização?* Fonte: Brasil Escola: <https://brasilecola.uol.com.br/o-que-e/fisica/o-que-e-polarizacao.htm>
- SILVA, D. C. (s.d.). *Interação Luz-Matéria*. Fonte: Site Mundo Educação: <https://mundoeducacao.uol.com.br/fisica/interacao-luzmateria.htm>
- SILVA, M. R. (Maio de 2018). LASER Femtosegundo: Evolução, eficácia e segurança na cirurgia da catarata. . Porto, Portugal: Ciências Biomédicas Abel Salazar da Universidade do Porto.

- SPARKES, M., GROSS, M., CELOTTO, S., ZHANG, T., & O'NEILL, W. (2008). Practical and theoretical investigations into inert gas cutting of 304 stainless steel using a high brightness fiber laser. *Journal of Laser Applications*, 20, 59–67.
- STEEN, W. M. (2003). Capítulo 2 - Basic Laser Optics. Em W. M. STEEN, *Laser Material Processing, Terceira Edição* (pp. 107-152). Londres, Reino Unido : Springer.
- STEEN, W. M. (2003). Capítulo 1 - Background and General Applications. Em W. M. STEEN, *Laser Materials Processing, Terceira Edição* (pp. 11-60). Londres, Reino Unido: Springer.
- STEEN, W. M. (2003). Capítulo 3 - Laser Cutting. Em W. M. STEEN, *Laser Material Processing, Terceira Edição* (pp. 107-152). Londres, Reino Unido: Springer.
- STEEN, W. M. (2003). Capítulo 4 - Laser Welding. Em W. M. STEEN, *Laser Material Processing, Terceira Edição* (pp. 157-199). Londres, Reino Unido: Springer.
- STEEN, W. M. (2003). Fusion Cutting - Melt and Blow. Em W. M. STEEN, *Laser Material Processing, Terceira Edição* (pp. 114-122, 137). Londres, Reino Unido: Springer.
- STRATEGIES UNLIMITED. (2018). *The Worldwide Market for Lasers: Market Review and Forecast 2020. The Worldwide Market for Lasers Trends and Five-Year Forecast (2019 – 2025)*. Nashua, NH, E. U. A.: PennWell.
- SULLIVAN, A. B., & HOULDCROFT, P. T. (Agosto de 1967). Gas-Jet Laser Cutting. *British Welding Journal*.
- SVELTO, O. (1970). Capítulo 5 - CW and Transient Laser Behavior. Em O. SVELTO, *Principi dei Laser* (pp. 145-200). Milão, Itália: Tamburini.
- SVELTO, O. (1970). Capítulo 8 - Laser Beam Transformation. Em O. SVELTO, *Principi dei Laser* (pp. 297-334). Milão, Itália: Tamburini.
- SVELTO, O. (1970). Capítulo 6 - Types of Lasers. Em O. SVELTO, *Principi dei Laser* (pp. 201-268). Milão, Itália: Tamburini.
- SVELTO, O. (1970). *Principi dei Laser*. Milão: Tamburini.
- SYED, A. A., MOHSIN, M., & ZUBAIR ALI, S. M. (2020). Survey and technological analysis of laser and its defense applications. *KeAi Defense Technology*.
- Technavio Research. (02 de Março de 2020). *Fiber Laser Market 2020-2024 | Demand for Additive Manufacturing to Boost Growth | Technavio*. Fonte: Business Wire: <https://www.businesswire.com/news/home/20200302005720/en/Fiber-Laser-Market-2020-2024-Demand-for-Additive-Manufacturing-to-Boost-Growth-Technavio>
- THOSS, A. (24 de Março de 2020). *Global laser markets: Insights & forecasts 2019 was a year with very mixed results for the laser manufacturing community*.

- Fonte: LaserFocusWorld: <https://www.laserfocusworld.com/lasers-sources/article/14168521/global-laser-markets-insights-forecasts>
- TOZER, B. A. (1986). The industrial laser annual handbook: edição 1986. *Optics & Laser Technology*, 18, 324.
- TRUMPF GROUP. (s.d.). *Sublimation cutting. High-quality edges for precision cutting.* Fonte: Trumpf Group: https://www.trumpf.com/en_CA/applications/laser-cutting/sublimation-cutting/
- TSAI, C.-H., & CHEN, H.-W. (2003). Laser cutting of thick ceramic substrates by controlled fracture technique. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 136, 229- 239.
- TÜNNERMANN, A., SCHREIBER, T., RÖSER, F., LIEM, A., HÖFER, S., ZELLMER, H., . . . LIMPET, J. (2005). The renaissance and bright future of fibre lasers. *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, vol. 38, no. 9, S681–S693.
- TÜNNERMANN, A., WREDE, K., & WELLEGEHAUSEN, B. (1990). Generation of high peak power excimer laser radiation by pulse shortening. *Applied Physics B*, 50, pp. 361–364.
- U.S. Navy Laser Versus UAVs... Laser Wins...* (24 de Junho de 2009). Fonte: Milsat Magazine, Satnews Daily: <http://www.satnews.com/story.php?number=1272864526>
- URQUHART, P. (1988). Review of rare earth doped fibre lasers and amplifiers. *IEE Proceedings - Optoelectronics*, 135(6), 385-407.
- VERHAEGHE, G., & HILTON, P. (14 e 15 de Julho de 2005). Battle of the Sources - Using a High-Power Yb-Fibre Laser for Welding Steel and Aluminium. Praga, Tchêquia. Fonte: TWI The Welding Institute: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/published-papers/battle-of-the-sources-using-a-high-power-yb-fibre-laser-for-welding-steel-and-aluminium-july-2005>
- VICANEK, M., & SIMON, G. (1987). Momentum and heat transfer of an inert gas jet to the melt in laser cutting. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 20, 1191–1196.
- VICANEK, M., SIMON, G., URBASSEK, H. M., & DECKER, I. (1987). Hydrodynamical instability of melt flow in laser cutting. *Journal of Physics D: Applied Physics*, Volume 20, Número 1, 481–488.
- WANDERA, C. (2016). Capítulo 18 - Fiber Lasers in Material Processing. Em M. PAUL, *Fiber Laser* (pp. 401-426). Londres, Reino Unido: IntechOpen Limited.
- WANDERA, C., & KUJANPÄÄ, V. (2010). Characterization of the melt removal rate in laser cutting of thick-section stainless steel. *Journal of Laser Applications*, 22, 62–70.
- WANDERA, C., KUJANPÄÄ, V., & SALMINEN, A. (2011). Laser power requirement for cutting of thicksection steel and effects of processing parameters on mild

- steel cut quality. *Journal of Engineering Manufacture, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers 2011;225*, 651–661.
- WANDERA, C., SALMINEN, A., & KUJANPÄÄ, V. (2009). Inert gas cutting of thick-section stainless steel and medium-section aluminum using a high power fiber laser. *Journal of Laser Applications*. 21.
- WANDERA, C., SALMINEN, A., OLSEN, F. O., & KUJANPÄÄ, V. (2006). Cutting of stainless steel with fiber and disk laser. *ICALEO 2006 International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics* (p. 404). Scottsdale, AZ, E. U. A.: Laser Institute of America.
- WATSON, J. (1992). Fundamentals of photonics. *Optics and Laser Technology*, 24, 177.
- WEBER, J. (1953). Amplification of microwave radiation by substances not in thermal equilibrium. *Transactions of the IRE Professional Group on Electron Devices*, 3, pp. 1-4.
- WEBER, M. J. (1999). *Handbook of Laser Wavelengths*. Boca Raton, FL, EUA.: CRC Press.
- WELCH, A. J., TORRES, J. H., & CHEONG, W. F. (1989). Laser physics and laser-tissue interaction. *Texas Heart Institute Journal*, 16, 141-149.
- Wikimedia Commons. (15 de Maio de 2008). *Electromagnetic spectrum*. Fonte: Wikimedia Commons - transferido por Penubag: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Electromagnetic-Spectrum.png>
- Wikimedia Commons, U. G. (3 de Julho de 2009). *Diagram of a ruby laser from LLNL document "Laser Programs, the first 25 years"*. Fonte: Wikimedia Commons : https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ruby_laser.jpg
- YARIV, A. (1989). *Quantum Electronics, 3a edição*. Nova Iorque, E. U. A.: Wiley.
- YILBAS, B. S. (1997). Laser heating process and experimental validation. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 40, 1131-1143.
- YILBAS, B., & SAHIN, A. (1995). Oxygen assisted laser cutting mechanism—a laminar boundary layer approach including the combustion process. *Optics and Laser Technology Journal*. 27, 175-184.
- YUAN, G., CHEN, Z., & LUZZI, D. (2017). Application of Laser Technology in Fashion Industry . *Springer Series in Fashion Business*, 43–56.
- ZAVECZ, T. E., SAIFI, M. A., & NOTIS, M. (1975). Metal reflectivity under high-intensity optical radiation. *Applied Physics Letters*, 26, 165–168.
- ZAVECZ, T. E., SAIFI, M. A., & NOTIS, M. (1975). Metal reflectivity under high-intensity optical radiation. *Applied Physics Letters*, 26, 165–168.
- ZENTENO, L. (1993). High-power double-clad fiber lasers. *Journal of Lightwave Technology*, 11(9), 1435–1446.

ZLATANOV, N. (2016). *Lasers and laser applications*. Washington, D.C., EUA: IEEE Computer Society.