

CENTRO UNIVERSITÁRIO FEI
EMIGDIO BERTOLO RIZARDI
FÁBIO DE PROENÇA EDUETA
GUSTAVO RYUJI SANOMIA
JAQUELINE FREITAS JARDIM
JÉSSICA TRAJANO MATHEUS BENEDITO
WILLIAM RODRIGUES DELMANTO

CARREGADOR *WIRELESS* POR LPT

São Bernardo do Campo

2021

EMIGDIO BERTOLO RIZARDI
FÁBIO DE PROENÇA EDUETA
GUSTAVO RYUJI SANOMIA
JAQUELINE FREITAS JARDIM
JÉSSICA TRAJANO MATHEUS BENEDITO
WILLIAM RODRIGUES DELMANTO

CARREGADOR *WIRELESS* POR LPT

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado ao Centro Universitário FEI, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica. Orientado pelo Prof. Dr. Victor Sonnenberg.

São Bernardo do Campo

2021

Ficha catalográfica

Folha de aprovação

Essa é a dedicatoria

AGRADECIMENTOS

Gostaríamos de agradecer todo o corpo docente do Centro Universitário FEI pelo apoio, paciência, dedicação, amor ao ensino e à excelência. A jornada de nossa graduação nos ensinou que não há nada que não possamos aprender se nos dedicarmos corretamente. Agradecemos profundamente aos Professores, Mestres e Doutores por nos mostrar o quão importante e lindo é o papel do engenheiro em nossa sociedade. Também gostaríamos de agradecer aos nossos orientadores Prof. Dr. Marcelo Parada e Prof. Dr. Victor Sonnenberg pelas dúvidas respondidas no decorrer deste trabalho, pela calma e pela tranquilidade na condução de nosso grupo.

RESUMO

De tomada a bateria, de desktop a notebook, de telefone a celular, a palavra portabilidade vem ganhando cada vez mais força no cotidiano das pessoas. Sob essa perspectiva, a energia elétrica sem fio (wireless) chama cada vez mais atenção de pesquisadores e empresas ao redor do mundo, de modo a permitir ainda mais conforto no momento do carregamento destes dispositivos, sem a necessidade da utilização de cabos. O objetivo central do trabalho é abordar, analisar e desenvolver sobre o tema do carregador wireless, focando especialmente na tecnologia LPT (Laser Power Transmission), bem como o impacto desse modelo nos indivíduos, nas organizações e na sociedade como um todo. Propõe-se, assim, apresentar um produto transmissor e receptor de energia via LPT ressaltando suas limitações, diferenciações e singularidades deste método de carregamento a distância.

Palavras-chave: Carregador *Wireless*; LPT; *Laser Power Transmission*.

ABSTRACT

From socket to battery, from desktop to notebook, from telephone to cellphone, the portability word has been gaining more strength in people's daily lives. From this perspective, wireless electricity draws even more attention from researchers and companies all around the world, in order to allow even more comfort when charging these devices, without the need to use cables. The main objective of this study is to approach, analyze and develop on the wireless charger topic, focusing especially on LPT technology (Laser Power Transmission), as well as the impact of this model on people, organizations and society as a whole. Therefore, the proposal is to present a product that transmits and receives energy via LPT emphasizing its limitations, differences and singularities of this distance charging method.

Keywords: Carregador Wireless; LPT; Laser Power Transmission.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	–	Optica do feixe	16
Figura 2	–	Ângulo de divergência	18
Figura 3	–	Intervalo do Espectro Eletromagnético onde o Laser atua	18
Figura 4	–	Efeitos biológicos da Radiação Laser	19
Figura 5	–	Retrorefletor	22
Figura 6	–	Diagrama do sistema DLC	22
Figura 7	–	Etapas de desenvolvimento	24
Figura 8	–	Optica do feixe	26
Figura 9	–	Optica do feixe	27
Figura 10	–	Resposta espectral	28

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	–	Principais comprimentos de onda	14
Tabela 2	–	Máxima exposição permitida	20
Tabela 3	–	Comparativo dos modelos selecionados	26

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	Objetivo	10
1.2	Justificativa	10
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	11
2.1	LASER	11
2.1.1	Contexto histórico	11
2.1.2	Teoria	12
2.1.3	Propriedades	14
2.1.3.1	<i>Monocromático</i>	14
2.1.3.2	<i>Feixe Gaussiano</i>	15
2.1.4	Largura de feixe	16
2.1.4.1	<i>Ângulo de divergência</i>	17
2.1.4.2	<i>Profundidade de foco</i>	17
2.1.5	Segurança	18
2.1.5.1	<i>MPE</i>	19
2.2	<i>Wireless Power Transmission</i>	21
2.2.1	<i>DLC - Distributed Laser Charging</i>	21
2.2.2	Dispositivos LPT disponíveis	23
2.2.2.1	<i>PowerLight Technologies</i>	23
2.2.2.2	<i>PTROL (Power Transmitted Over Laser) Project</i>	23
3	DESENVOLVIMENTO	24
3.1	Parâmetros iniciais de projeto	24
3.2	Sistema	25
3.2.1	Laser	25
3.2.1.1	<i>Possibilidade para transferir energia através da atmosfera</i>	25
3.2.1.2	<i>Possibilidade para transferir a energia o maior tempo possível</i>	25
3.2.1.3	<i>Laser Diodo</i>	26
3.2.2	Painel Fotovoltaico	27
4	CONCLUSÃO	29

1 INTRODUÇÃO

1.1 OBJETIVO

Compreender e aplicar o conceito da tecnologia LPT (*Laser Power Transmission*) a fim de desenvolver um dispositivo móvel capaz de transmitir energia sem fio, que seja compacto e seguro, para atender as mais diversas aplicações de baixo consumo energético, baseando-se em estudos já existentes.

1.2 JUSTIFICATIVA

Portabilidade tem sido uma das grandes evoluções da tecnologia nos últimos 30 anos principalmente em relação aos celulares, notebooks e mais recentemente a tablets. Seguindo a evolução dos telefones fixos para os celulares e dos computadores desktop para os notebooks de apenas 1kg, nota-se que mobilidade se tornou uma característica chave de nossas tecnologias [1]. Quando os primeiros celulares chegaram ao Brasil em 1990 eram apenas 667 de aparelhos, já em 2010 passaram a ser 197,53 milhões [2] e em 2020 passaram a ser 230 milhões [3]. Os novos celulares, tablets e notebooks têm sido lançados com baterias mais duráveis e com circuitos cada vez mais energeticamente eficientes, porém ainda é necessário o carregamento da bateria destes dispositivos uma vez por dia. Outro ponto a ser considerado é a degradação notória das baterias por conta do uso contínuo [4]. Nota-se também a grande tendência do mundo wireless (sem fio), a grande maioria das marcas já estão oferecendo fones bluetooth e celulares com carregadores indutivos, porém estes necessitam estar perto de uma tomada. O próximo passo da portabilidade desses aparelhos está relacionado completamente à forma como vamos carregar suas baterias, com isso a tecnologia LPT mostra-se como uma possível solução de wireless charging para esta questão. No mercado já existem produtos de wireless charging, um deles sendo da empresa israelita Wi-Charge, criada em 2012, onde seus produtos são focados para aplicações de baixa potência como celulares, torneiras elétricas automáticas e aparelhos de smart home [5].

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

No presente capítulo será discorrido a revisão bibliográfica do sistema de transmissão de energia sem fio apresentando o conceito, funcionamento, produtos disponíveis no mercado e, também, a teoria dos principais componentes utilizados no projeto.

2.1 LASER

Sinônimo de alta tecnologia e considerado uma das maiores invenções do século XX o *Laser* (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) é um dispositivo que possibilita a amplificação da luz por emissão estimulada de radiação, essa característica o diferencia de fontes luminosas comuns proporcionando uma vasta gama de aplicações nas mais diversas áreas da indústria, medicina, militar, telecomunicações etc.

2.1.1 Contexto histórico

Em 1900, Max Planck, o “Pai da Física Quântica”, descobriu que “A radiação é absorvida ou emitida por um corpo aquecido através de pequenos ‘pacotes’ de energia, mas não sob a forma de ondas”. Esses ‘pacotes’, denominados quantum, são os fótons da energia eletromagnética que, segundo o físico dinamarquês Niels Bohr, também podem ser caracterizados como quantidade de energia absorvida ou emitida pelo elétron nas suas transições de órbitas.

A compreensão de que a luz é uma forma de partícula foi fundamental para o estudo de Einstein sobre emissão estimulada apresentado no “The Quantum Theory of Radiation” [6] que foi a primeira publicação sobre o conceito de radiação a laser.

A teoria de Albert Einstein diz que, um átomo perturbado por um fóton que incide sobre ele, emite um outro fóton de mesma fase, frequência, polarização e direção do original, esse processo ocorre como efeito cascata. A luz é gerada somente quando os fótons emitidos forem maiores do que os absorvidos.

Em uma época em que a exploração do espectro magnético era limitada, um grupo de cientistas norte-americanos e russos (Charles Townes, Jim Gordon, Nicolay Basov e Aleksander Prokhorov) desenvolveram separadamente, em 1954, um dispositivo que amplifica as micro-ondas, chamado de MASER (Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation), ou seja, amplificação de micro-ondas pela emissão estimulada de radiação.

Utilizando amônia como meio ativo, o funcionamento deste dispositivo ocorre ao ser excitado por um agente externo, a molécula de amônia entra em vibração com uma frequência de micro-ondas e essa emissão estimulada gera um feixe coerente de micro-ondas. Essa descoberta é considerada o precursor do laser, o que lhes concedeu o prêmio Nobel de Física em 1964.

O primeiro laser foi apresentado em 16 de maio de 1960, pelo físico estadunidense Theodore Maiman, sendo o cristal de rubi o meio ativo do dispositivo.

Uma fonte de luz, na forma do poderoso clarão de uma lâmpada, irradiou um cristal de rubi sintético [com duas faces paralelas cobertas de prata], que absorveu energia sobre uma ampla banda de frequências. Essa energia ótica excitou os átomos até um estado de maior energia, do qual a energia foi irradiada novamente em uma estreita banda de frequências. Os átomos excitados foram acoplados a um ressonador óptico e estimulados a emitir juntos a radiação. (T. H. Maiman Nature 187, 493–494; 1960).

Nas décadas seguintes, este instrumento passou a ser cada vez mais presente no cotidiano das pessoas e tornou-se fundamental nas mais diversas atividades, sendo utilizado em soldagens, impressoras, cirurgias, holografia, equipamentos de cirurgia dentária, leitores de CD e DVD, leitores de código de barra, ciência biomédica etc.

2.1.2 Teoria

Sabe-se que o fóton é emitido quando um átomo em um estado excitado “cai” para um estado de energia inferior, sendo que esse estado dura alguns nanossegundos. Átomos e moléculas podem também absorver fótons, efetuando então uma transição de um nível energético inferior para um superior. Quanto maior a temperatura, maior a probabilidade de ocorrer colisões, sendo que estas provocam transições para níveis energéticos superiores. [8]

Como foi mencionado no contexto histórico de Albert Einstein, baseando-se na mecânica quântica, teorizou o princípio do funcionamento do raio laser, no qual partia da emissão estimulada:

Se um átomo no estado excitado é iluminado por um fóton que tem a mesma energia da transição que ocorreria espontaneamente, o átomo pode ser estimulado a voltar ao estado de mais baixa energia e simultaneamente emitir um fóton com a mesma energia da transição e mesma direção do fóton incidente. Assim, um único fóton que interage com um átomo excitado pode resultar então em dois fótons. Se usarmos a descrição ondulatória da luz, a emissão estimulada terá a frequência da luz incidente e estará em fase (coerente), resultando em amplificação da intensidade da onda de luz original.[8]

Segundo Zilio (2009, p.213) na ausência de colisões, as moléculas tendem a permanecer no estado energético mais baixo disponível. Ou seja, estados de energia alta são sempre menos povoados que o estado fundamental, sendo a absorção superior à emissão estimulada.

“A probabilidade da emissão estimulada é idêntica à probabilidade da absorção estimulada.”
(A. Einstein Phys. Z. 18, 121, 1917)

...como o número de átomos no estado excitado é muito pequeno com relação ao do estado fundamental, o fóton emitido tem uma probabilidade muito maior de ser re-absorvido, fazendo a emissão estimulada insignificante quando comparada com a emissão espontânea (no equilíbrio termodinâmico). O mecanismo pelo qual a emissão estimulada pode se tornar dominante é ter mais átomos no estado excitado que no estado fundamental, de forma que os fótons emitidos têm maior probabilidade de estimular a emissão do que serem absorvidos. Como esta condição é o inverso do que ocorre na situação de equilíbrio normal, ela é denominada de inversão de população. Havendo mais átomos num estado excitado que no fundamental, a emissão estimulada pode dominar, resultando numa cascata de fótons. O primeiro fóton emitido estimulará a emissão de mais fótons, que estimularão a emissão de ainda mais fótons, e assim por diante. A cascata resultante de fótons cresce, produzindo a amplificação da luz emitida. Se a inversão de população termina (a população do estado fundamental domina), a emissão espontânea se tornará novamente o processo favorecido.(Zilio, 2009, p.213)

Para que a excitação do meio ativo ocorra é necessário utilizar uma fonte de excitação externa, ou seja, um mecanismo de bombeamento que varia conforme o meio escolhido, podendo ser lâmpadas flash, lâmpadas de arco, outro laser e etc.

No laser, a emissão de luz acontece somente quando o ganho supera as perdas, sendo que este ocorre quando há inversão de população, para que este fenômeno aconteça é necessário que os fótons fiquem confinados em uma cavidade ressonante, de forma a serem utilizados para desencadear mais processos de emissão estimulada, caso contrário, o sistema irradia para todas as direções.

A cavidade ressonante óptica é rodeada por dois espelhos, um parcialmente e o outro totalmente refletor, o que torna o processo de emissão estimulada maximizado, pois o feixe resultante é forçado a atravessar ciclicamente o meio ativo provocando o aumento da intensidade a cada volta completa (“round trip”). Além disso, esse processo faz com que a emissão ocorra em uma mesma fase, a propriedade de vibração em fase chama-se coerência espacial (RIBEIRO, 2000; SVELTO, 2010).

Portanto, o dispositivo necessita satisfazer três condições fundamentais para operação:

- a) Meio ativo: sólido, líquido ou gasoso;
- b) Mecanismo de excitação ou bombeamento;
- c) Ressonador ou cavidade ressonante.

As outras fontes luminosas são emitidas espontaneamente sem nenhuma intervenção externa apresentando ondas com diferentes comprimentos e frequência, de forma a viajar no espaço e tempo incoerentemente.

2.1.3 Propriedades

As suas características proporcionam propriedades diferenciadas em relação às outras demais fontes de luz. Assim, Bagnato (2001, p.9) aponta os principais aspectos:

2.1.3.1 Monocromático

A radiação ocorre em um único movimento de onda ou cor, portanto, possui um estreito intervalo de comprimento de onda. O brilho gera uma grande quantidade de luz, o feixe se propaga na mesma direção, havendo o mínimo de dispersão e a onda possui mesmo comprimento e fase. A tabela 1 mostra os comprimentos de onda para alguns tipos de laser.

Tabela 1 – Principais comprimentos de onda

Laser	Cor	λ (nm)
Ar	Azul	488
	Verde	514,5
He-Ne	Verde	594,5
	Vermelho	632,8
Kr	Verde	530,8
	Amarelo	568,2
	Vermelho	647,1
Rubi	Vermelho	694,1
GaAsAl	Infravermelho	790
	Infravermelho	830
	Infravermelho	904
Nd:YAG	Infravermelho	1064
CO ₂	Infravermelho	10600

Fonte: Adaptado de

http://pelicano.ipen.br/PosG30/TextoCompleto/Martha%20Simoes%20Ribeiro_D.pdf.

Acessado em: 22/05/2021

2.1.3.2 Feixe Gaussiano

Em condições ideais, a luz de um laser assume a forma de um Feixe Gaussiano, ou seja, a luz pode ser transportada e confinada na forma de feixe, apresentando mínima divergência. (SALEH; TEICH, 1991, p.81)

As principais características deste tipo de feixe óptico são:

- a) A concentração de potência do feixe encontra-se dentro de um cilindro que envolve o eixo do feixe.
- b) A distribuição de intensidade em qualquer plano transversal é uma função gaussiana circularmente simétrica centrada em torno do feixe.
- c) A largura desta função é mínima na cintura do feixe e tornando-se gradualmente maior à medida que as distâncias entre a cintura aumentam nos dois sentidos.
- d) As frentes de ondas são aproximadamente planar perto da cintura do feixe, gradualmente se curva com o aumento da distância para a cintura, e em última instância, torna-se aproximadamente esférica longe da cintura.
- e) A divergência angular das normais de frente de onda assume o valor mínimo permitido pela equação de onda para uma determinada largura de feixe. Sob condições ideais, a partir de muitos tipos de laser, a luz toma a forma de um feixe de Gauss.

O modo gaussiano transversal fundamental (TEM) é o mais usado na maioria das aplicações lasers, sendo a amplitude complexa do feixe Gaussiano expressa em $U_{(r)}$ (SALEH; TEICH, 1991, p.83).

$$U_{(r)} = A_0 \frac{W_0}{W_{(z)}} \exp \left[-jkz - jk \frac{\rho^2}{2R_{(z)}} + j\xi_{(z)} \right] \quad (1)$$

$$k = 2\frac{\pi}{\lambda} \quad (2)$$

Onde ρ é a distância radial ao eixo do feixe, z distância axial a partir do foco do feixe, k número de onda por comprimento de onda, U amplitude do campo elétrico, W raio do qual a amplitude tem decaimento de $1/e$, $W_{(0)}$ tamanho da cintura, R raio de curvatura da frente de onda e ξ é a fase de Gouy.

O cálculo da equação (16) determina as propriedades do feixe gaussiano [11]. Nas equações são considerados os parâmetros A_0 e Z_0 determinados pelas condições de fronteira e λ que é o comprimento de onda.

2.1.4 Largura de feixe

Dentro de qualquer plano transversal, a intensidade do feixe, assume seu valor de pico no eixo e tem um fator de decaimento aproximadamente 0,135 na distância radial, ρ , conforme equação (3), sendo que 86% da energia é transportada dentro de um círculo de raio $W_{(z)}$, considerando $W_{(z)}$ como o feixe do raio (também chamado de largura do feixe), equação (5). A largura RMS (*Root Mean Squared*), σ , da distribuição de intensidade é dada pela equação (4). [12]

$$\rho = W_{(z)} \quad (3)$$

$$\sigma = 1/2W_{(z)} \quad (4)$$

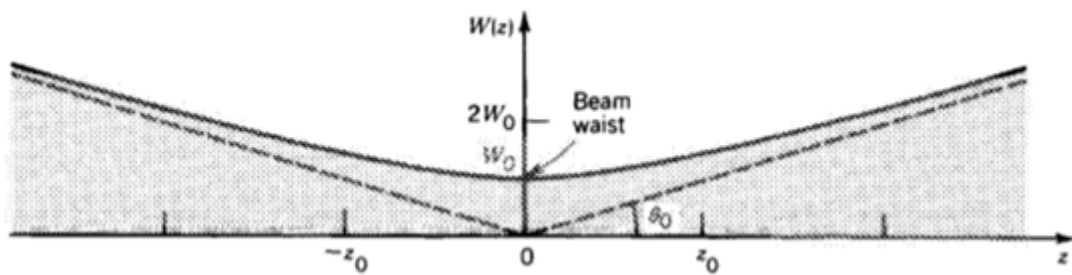
$$W_{(z)} = W_0 \left[1 + \left(\frac{z}{z_0} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (5)$$

Assume-se valor mínimo W_0 no plano $z = 0$, denominado cintura do feixe. Assim W_0 é o raio da cintura. O diâmetro da cintura $2W_0$ é chamado de tamanho do ponto. (SALEH; TEICH, 1991, p.85)

$$W_0 = \left(\frac{\lambda z_0}{\pi} \right)^{1/2} \quad (6)$$

$$W_{(z)} = \frac{\lambda z_0}{\pi} z = \theta_0 z \quad (7)$$

Figura 1 – Optica do feixe



[scale=1]

Fonte: SALEH, Bahaa E. A.; TEICH, Malvin Carl. Fundamentals of Photonics. 1.ed. Wiley-Interscience, 1991.

Legenda: O raio do feixe $W_{(z)}$ tem seu valor mínimo no ponto eixo ($z = 0$), ele atinge $\sqrt{2}W_0$ quando $z = \pm z_0$, e aumenta linearmente com z para valores de z elevado.

$$R_{(z)} = z \left[1 + \left(\frac{z}{z_0} \right)^2 \right] \quad (8)$$

$$\xi_{(z)} = \tan^{-1} \left(\frac{z}{z_0} \right) \quad (9)$$

$$P = \frac{1}{2} I_0 (\pi W_0^2) \quad (10)$$

$$I_0 = \frac{E_0^2}{2\eta} \quad (11)$$

$$\eta = \eta_0 \approx 377\Omega \quad (12)$$

Sendo o Raio de curvatura representado na equação (8), Fase de *Gouy* representado na equação (9), potência representado na equação (10) de acordo com e intensidade do eixo representado na equação (11), sendo η a impedância característica do meio, para o espaço livre (vide equação (12)). Feixes ópticos são usualmente caracterizados pela potência P , então é útil escrever I_0 em termos de P , equação (13) [11].

$$\eta = \eta_0 \approx 377\Omega \quad (13)$$

2.1.4.1 Ângulo de divergência

Longe do centro do feixe, o raio aumenta linearmente com z , definindo um cone com meio ângulo 80° , Figura 2, cerca de 86% da potência do feixe é confinada dentro deste cone, sendo θ ângulo de divergência teta zero do feixe.

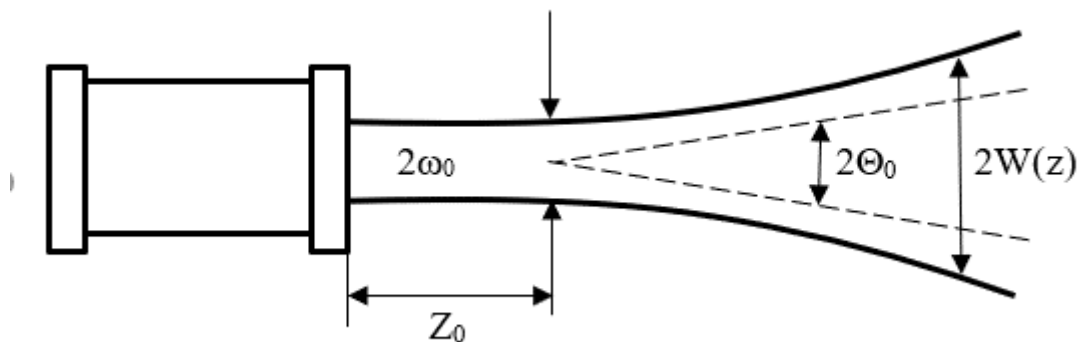
$$\theta_0 = \frac{2}{\pi} \frac{\lambda}{2W_0} \quad (14)$$

2.1.4.2 Profundidade de foco

A profundidade de foco Z_0 , é dada pela equação 15, onde λ é o comprimento de onda e W_0 é o raio do feixe na saída.

$$2z_0 = \frac{1\pi W_0^2}{\lambda} \quad (15)$$

Figura 2 – Ângulo de divergência



[scale=1]

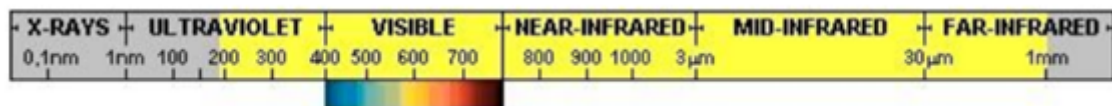
Fonte: SALEH, Bahaa E. A.; TEICH, Malvin Carl. Fundamentals of Photonics. 1.ed. Wiley-Interscience, 1991.

2.1.5 Segurança

A colimação do feixe é o que difere a radiação do laser em relação aos outros tipos conhecidos de radiação, o comprimento de onda é o fator determinante para que o laser possa ser caracterizado como prejudicial. [12]

Na Figura ??, a parte amarela compreende o intervalo de comprimento de onda da atuação do laser.

Figura 3 – Intervalo do Espectro Eletromagnético onde o Laser atua



[scale=1]

Fonte: Laser Institute of America, Laser Safety Information Bulletin, May 24, 2002.

Carroll [13] afirma que, em certas partes do corpo, tais como o globo ocular e os testículos, a conexão térmica com os tecidos circundantes é mínima e o fornecimento de sangue é inadequado para conduzir a energia desenvolvida pela exposição local ao laser. Quando estes órgãos estão expostos a tal tipo de radiação, podem produzir-se graves danos nos tecidos profundos dentro dos mesmos, onde há um grave risco de que causem cegueira ou esterilidade.

A periculosidade dos lasers infravermelhos se dá, principalmente, pelo fato da radiação invisível impossibilitar a resposta protetora de aversão ao brilho do corpo (“reflexo de piscar”), podendo causar danos imediatos na visão. Os demais efeitos biológicos da radiação podem ser consultados na Figura ??.

Figura 4 – Efeitos biológicos da Radiação Laser

Espectro Eletromagnético		Efeito nos Olhos	Efeito na Pele
Ultravioleta C	0,200 - 0,280 μm	Fotoqueratite	Eritema e Câncer de Pele
Ultravioleta B	0,280 - 0,315 μm		Envelhecimento Precoce e Aumento da Pigmentação
Ultravioleta A	0,315 - 0,400 μm	Catarata Fotoquímica	Escurecimento do Pigmento
Visível	0,400 - 0,780 μm	Dano Termal e Fotoquímico da Retina	Reações Fotosensitivas
Infravermelho A	0,780 - 1,400 μm	Catarata e Queima da Retina	Queimaduras
Infravermelho B	1,400 - 3,000 μm	Catarata e Queima da Córnea	
Infravermelho C	3,000 - 1.000 μm	Queima da Córnea	

[scale=1]

Fonte: Laser Institute of America, Laser Safety Information Bulletin, May 24, 2002.

A maioria dos danos provocados pela radiação laser se deve ao aquecimento dos tecidos que a absorvem. Os lasers visíveis são particularmente perigosos, pois o olho humano focaliza o feixe na retina e esta pode sofrer queimaduras. A densidade de potência do ponto laser focalizado na retina é cerca de 100.000 vezes a densidade de potência incidente na córnea. Assim, embora seja relativamente seguro expor a pele a lasers visíveis de baixa potência, é sempre perigoso observar o feixe diretamente. [13]

Para realizar a avaliação dos riscos da exposição da radiação do laser, deve-se levar em conta as seguintes características:

- Comprimento de onda;
- Potência;
- Duração e taxa de repetição;
- Diâmetro do feixe;
- Divergência.

2.1.5.1 MPE

A MPE (*Maximum Permissible Exposure*) mede os níveis máximos permitidos de exposição levando em consideração a maior potência ou densidade de energia (W/cm^2 ou J/cm^2) de uma fonte de luz que possa ser considerada segura. Essa medida é feita na córnea do

olho humano ou pele, considerando o comprimento de onda, coerência temporal e coerência espacial. Na Tabela 2 pode-se observar o tempo máximo permitido de exposição em relação a alguns comprimentos de onda.

Tabela 2 – Máxima exposição permitida

<i>Laser type</i>	Wavelength	MPE level (W/cm^2)			
	(μ)	0.25 sec	10 sec	600 sec	30,000 sec

Fonte: Adaptado de RIBEIRO, Martha Simões. INTERAÇÃO DA RADIAÇÃO LASER LINEARMENTE POLARIZADA DE BAIXA INTENSIDADE COM TECIDOS VIVOS: EFEITOS NA ACELERAÇÃO DE CICATRIZAÇÃO TISSULAR EM LESÕES DE PELE. 2000. 200 f. TCC

2.2 WIRELESS POWER TRANSMISSION

Como o próprio nome já induz, essa tecnologia faz referência a uma forma eficiente de transferir energia elétrica sem o uso de qualquer substância ou fio. O intuito dela é ser usada em locais inacessíveis ou inconvenientes para utilização de outros meios físicos. Dentro dessa tecnologia, os meios mais comuns para fazer a transmissão de energia são o laser, ondas milimétricas ou micro-ondas.

Historicamente falando, essa tecnologia vem tentando ser aplicada desde 1897 quando Nikola Tesla deu início ao seu experimento com a “*World Wireless*”, que mais tarde foi patenteada como “*World Wireless System*”. O Primeiro eventual sucesso com a tecnologia *Wireless Power Transmission* (WPT) só se deu em 1963 através da *Raytheon Company*.

Quanto ao desenvolvimento do WPT, partindo do princípio de Lavoisier (1743-1794) “Na Natureza, nada se cria, nada se perde, tudo se transforma”, o primeiro passo é entender que a energia deve estar tratada de uma forma adequada para viajar pelo ar e, posteriormente, entender que isso nos levará ao desenvolvimento de um sistema para transmissão e recepção compatíveis para essa energia.

Com foco maior no nosso projeto, dentro dessa tecnologia, optamos por trabalhar com o modelo LPT, ou seja, uma transmissão via laser, que é um dos meios de transmissão direta, onde é necessário possuir visada entre o transmissor e receptor, o que limitará a distância de aplicação, mas não a eficiência. Iremos discutir a frente o desenvolvimento desse modelo.

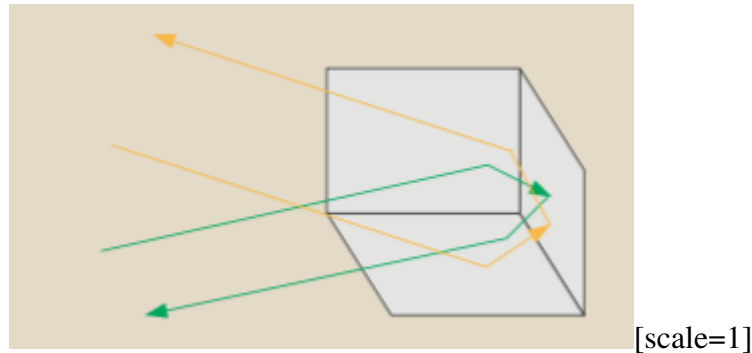
2.2.1 DLC - *Distributed Laser Charging*

O que diferencia o módulo DLC com os outros tipos de carregadores LPT é o sistema retrorrefletor que possibilita a segurança na transmissão de energia.

Utilizado em sinais de trânsito, bicicleta e automóveis, os retrorrefletores são “[...]sistemas ópticos que possuem a notável propriedade de, recebendo um raio luminoso, fazer com que ele retorne em uma direção paralela à de incidência com um mínimo de deslocamento.” [22]. Portanto, seu princípio de funcionamento engloba a Lei de Reflexão e a Lei da Refração.

No espelho de tela plana, a luz refletida é paralela a sua luz incidente somente quando o ângulo de incidência for vertical em relação ao espelho. Porém, no dispositivo, há três espelhos dispostos que, perpendicularmente, formam o retrorrefletor independentemente do seu ângulo de incidência, como mostra a figura ??.

Figura 5 – Retrorrefletor

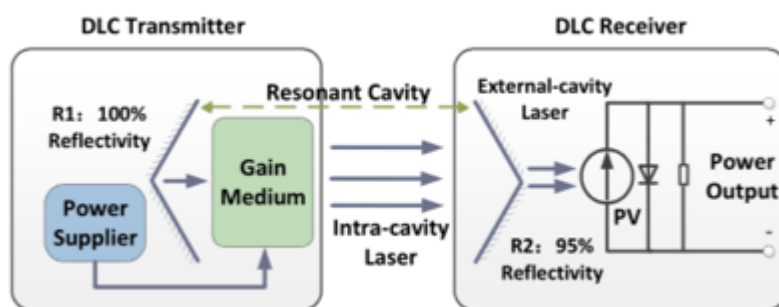


Fonte: ZHANG, FANGM KIU, WU, XIA, YANG: Distributed Laser Charging: A Wireless Power Transfer Approach. IEEE Internet of Things journal, vol 5, no 5, pp 3853-3864, 2018. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8398229/>. Acesso: 07 junho 2021.

DLC é uma tecnologia de *Wireless Power Transfer* baseada em Lasers ressonantes e distribuídos. Os componentes óticos são divididos em duas partes, transmissor e receptor, respectivamente.

A Figura 11 mostra o diagrama do sistema DLC. Um espelho retrorefletor R1 com uma refletância de 100% e um ganho médio estão presentes no transmissor. No receptor há um espelho R2 retrorefletor com uma refletância parcial de 95%. Os espelhos R1, R2 e o ganho médio formam a cavidade ressonante, onde os fótons são amplificados formando um laser ressonante de cavidade interna. Os fótons capazes de passar pelo espelho R2 formam o laser de cavidade externa. Este pode ser convertido em eletricidade através de uma célula fotovoltaica instalada atrás do espelho R2.

Figura 6 – Diagrama do sistema DLC



Fonte: ZHANG, FANGM KIU, WU, XIA, YANG: Distributed Laser Charging: A Wireless Power Transfer Approach. IEEE Internet of Things journal, vol 5, no 5, pp 3853-3864, 2018. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8398229/>. Acesso: 07 junho 2021.

No sistema DLC, fótons são amplificados sem a preocupação de seus ângulos de incidência, contanto que eles viajem dentro da linha de visão dos espelhos R1 e R2. Por isso, o laser

de cavidade interna gerado pelo ressonador pode se auto alinhar sem um posicionamento ou rastreamento. Essa característica possibilita que usuários carreguem seus dispositivos sem um posicionamento cauteloso do mesmo. O Sistema DLC é intrinsecamente seguro, pois caso um objeto esteja bloqueando a linha de visão do laser de cavidade interna, o objeto pode parar o laser imediatamente, cancelando a ressonância. Essas características oferecem ao sistema DLC a capacidade de carregar dispositivos a longa distância.

2.2.2 Dispositivos LPT disponíveis

2.2.2.1 *PowerLight Technologies*

A *PowerLight Technologies* é uma empresa americana de engenharia de transmissão de energia LPT que surgiu em 2006 com o nome de *LaserMotive* para concorrer na *Power Beam Challenge*, que faz parte da *Centennial Challenges da NASA*. Após vencer o concurso de 2009, a empresa foca no desenvolvimento da tecnologia para alimentar VANTs (Veículo Aéreo Não Tripulado) e atua em parceria com a NASA para criar uma arquitetura que permite utilizar lasers para o lançamento de foguetes e satélites. [23].

PowerLight Free-Space Power Beaming Em junho de 2012, a *LaserMotive* conseguiu alimentar um *Stalker Unmanned Aerial System* (UAS) da *Lockheed Martin* por mais de 48 horas, sendo considerado um recorde na época [23].

2.2.2.2 *PTROL (Power Transmitted Over Laser) Project*

Em maio de 2019, a *PowerLight* transmitiu 400 watts via laser a uma distância de 325 metros. O receptor converte a energia do laser em DC passando por um inversor que alimenta luzes, laptops e uma cafeteira.

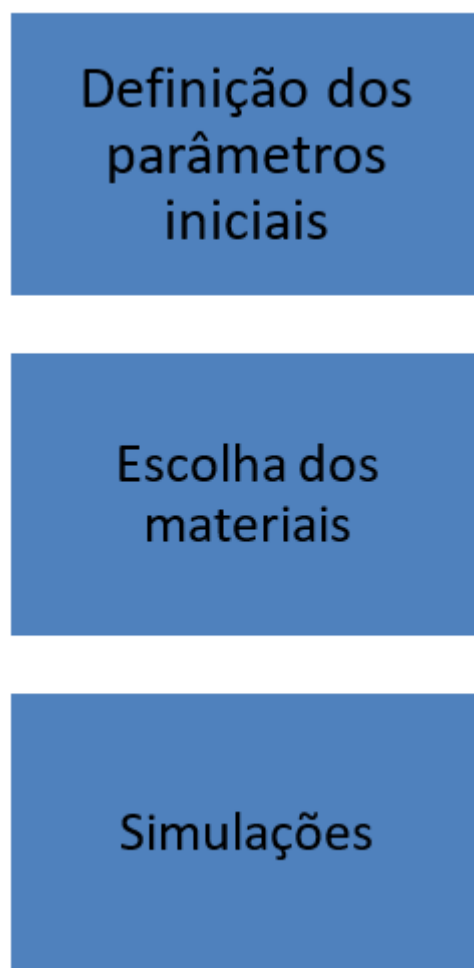
As células fotovoltaicas no receptor foram modificadas para conseguir uma melhor resposta em um comprimento de onda e, também, no equipamento constava um sistema de segurança que interrompia a transmissão em qualquer obstáculo colocado entre o emissor e o receptor. [24]

3 DESENVOLVIMENTO

A metodologia será baseada no método *Scrum*, “método ágil utilizado para a gestão e desenvolvimento de projetos que têm um curto prazo de entrega.”.[25] Este método foi aplicado ao coletar os pontos positivos e negativos do grupo e definir os papéis de cada colaborador, considerando o nível de complexidade do projeto e o tempo disponível para sua elaboração.

As etapas do desenvolvimento do projeto descritas na Figura 7 apresentam os parâmetros iniciais, escolha dos materiais e simulação.

Figura 7 – Etapas de desenvolvimento



Fonte: Autor

3.1 PARÂMETROS INICIAIS DE PROJETO

Os parâmetros iniciais de projeto foram determinados a partir das referências coletadas em artigos científicos e produtos disponíveis no mercado.

- a) $P_{out} = 5 \text{ W}$
- b) Distância de transmissão = 5 metros
- c) Eficiência > 50%

3.2 SISTEMA

O sistema de transferência de energia a laser, foi elaborado baseando-se no sistema DLC [26].

No ganho médio os retrorrefletores permitem refletir fótons na mesma direção, mas com sentido apostado e com uma pequena defasagem. No retorno, os fótons passam pelo ganho médio onde o feixe é formado e é refletido novamente. O retrorrefletor no receptor permite que parte da energia do laser chegue na célula solar. Essa abordagem faz com que qualquer obstáculo entre o transmissor e o receptor, interrompa o laser, pois os fótons não voltam para formar o laser no ganho médio.

3.2.1 Laser

Para a seleção do laser, foram considerados os parâmetros:

3.2.1.1 *Possibilidade para transferir energia através da atmosfera*

A fim de maximizar a eficiência na transferência de energia, os lasers devem operar em uma faixa de energia em que as placas fotovoltaicas possam ser mais otimizadas. A janela na região entre 780 e 1100 nm é particularmente relevante para a tecnologia de transmissão de energia sem fio.

3.2.1.2 *Possibilidade para transferir a energia o maior tempo possível*

O feixe do laser deve ser brilhante o suficiente para garantir que a energia possa ser transferida em um longo intervalo de tempo. O fluxo Φ entregue ao receptor na faixa inclinada L é dado pela equação.

$$\Phi = \frac{R_{source} A_{source} \eta_{trans}}{L^2} \quad (16)$$

Onde R_{source} é a radiância (potência por unidade de área) da fonte do laser, uma constante que indica a qualidade do feixe e não pode ser alterada por ótica passiva; A_{source} é a área total

da fonte do feixe, L é o alcance de transmissão e η_{trans} é a eficiência de transmissão através da atmosfera.

3.2.1.3 Laser Diodo

O laser diodo trabalhando no modo pulso, é a melhor opção para esse tipo de projeto, pois é o que apresenta melhor eficiência, confiabilidade e menor tamanho em relação aos outros tipos disponíveis no mercado [27].

A corrente injetada tem influência direta na eficiência de conversão que gira em torno de 50% [27].

Para uma análise preliminar foram selecionados componentes que apresentam potência de saída maior que a requerida do projeto, Figura 8 e Figura 9. Além disso, o tamanho também foi um dos pontos importantes para a seleção, sendo I_{SE} é o índice *Slope Efficiency*, $P_{out_{min}}$ potência mínima de saída, E_{min} eficiência mínima e λ é o comprimento de onda, Tabela 3.

Tabela 3 – Comparativo dos modelos selecionados

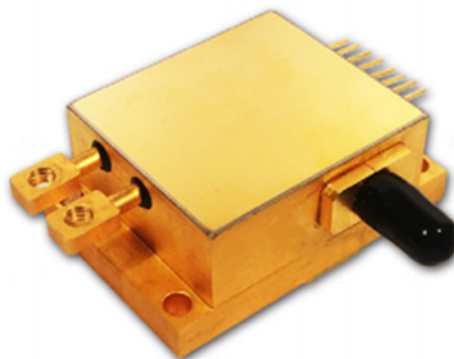
Laser	Modelo	$P_{out_{min}}$ (W)	I_{SE} (W/A)	E_{min} (%)	λ (nm)
Laser 1	RLS/LD-808NM-15W	15	1,8	40	808
Laser 2	K808DAECN-25.00W	25	4	40	808
Laser 3	RL915NM-10W	10	-	40	915

Fonte: Adaptado de

http://pelicano.ipen.br/PosG30/TextoCompleto/Martha%20Simoes%20Ribeiro_D.pdf.

Acessado em: 22/05/2021

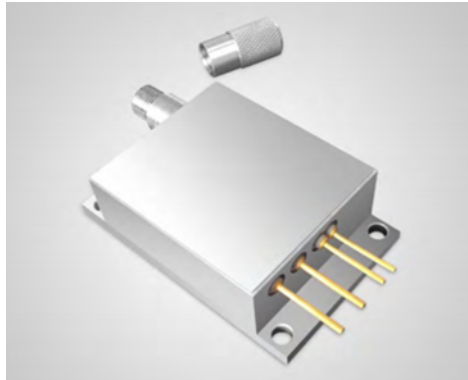
Figura 8 – Optica do feixe



Fonte: Laser Diode Source. Disponível em:

https://www.laserdiodesource.com/files/pdfs/laserdiodesource_com/4776/808nm_25W_Detachable_Fiber_Diode_Laser_BWT-1609445237.pdf. Acesso em: 30 maio 2021.

Figura 9 – Optica do feixe



Fonte: Laser Diode Source. Disponível em:

https://www.laserdiodesource.com/files/pdfs/laserdiodesource_com/4776/808nm_25W_Detachable_Fiber_Diode_Laser_BWT-1609445237.pdf. Acesso em: 30 maio 2021.

3.2.2 Painel Fotovoltaico

Nas células fotovoltaicas, para gerar eletricidade, os fótons devem ter energia maior ou igual ao intervalo de banda do material. Uma vez que a energia de um fóton é proporcional à sua frequência, as células PV respondem a determinadas frequências de luz correspondentes ao intervalo de banda da célula energética.

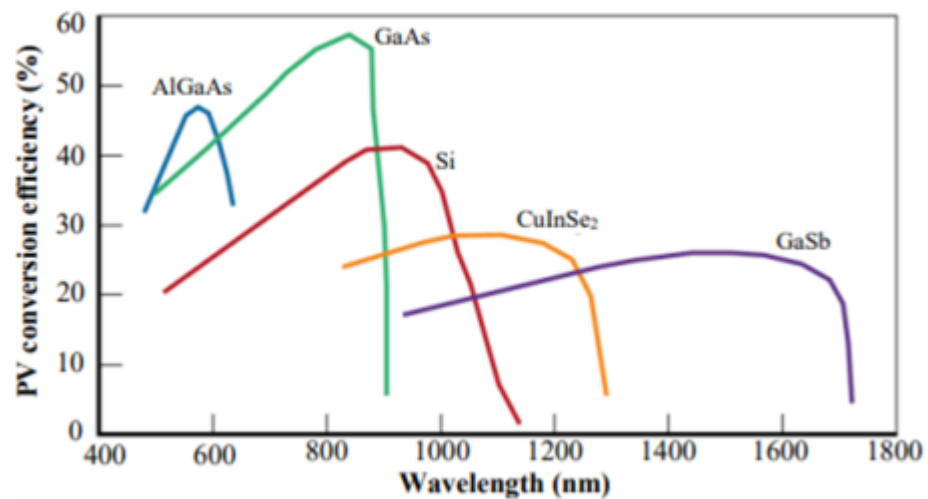
Os principais fatores a serem considerados para que a potência possa ser efetivamente convertida em eletricidade são:

- a) Potência do laser;
- b) Comprimento de onda;
- c) Temperatura;
- d) Material das células

As curvas de resposta espectral para alguns materiais de PV diferentes são ilustradas na Figura 10.

Percebe-se que a célula fotovoltaica de Arseneto de Gálio (GaAs) apresenta uma melhor eficiência em relação ao comprimento de onda entre 800nm e 850nm. Porém, seu alto custo o torna inviável para utilização. Portanto, as células de Silício (Si) que apresentam uma melhor aplicação entre 850 nm e 1064 nm serão as utilizadas no projeto.

Figura 10 – Resposta espectral



Fonte: JIN, Ke; ZHOU, Weiyang. Wireless Laser Power Transmission: a review of recent progress. Ieee Transactions On Power Electronics, [s. l], v. 34, n. 4, p. 3842-3859, 05 jul. 2018. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8404085>. Acesso em: 09 maio 2021.

4 CONCLUSÃO

Inicialmente o projeto foi idealizado com o objetivo de transferir energia utilizando um laser comercial. Entretanto, a necessidade de desenvolver um sistema de segurança impossibilitou a utilização de um laser convencional, o que aumentou consideravelmente a complexidade do trabalho sendo necessário o desenvolvimento de uma cavidade de ressonância externa para que o projeto pudesse ser concebido.

A dificuldade em realizar uma simulação relaciona-se com a necessidade do ganho médio, outro fator de grande dificuldade e que afetou o desenvolvimento da simulação do projeto foi a limitação dos softwares disponíveis no mercado. Além disso, essa nova forma de transmissão é muito recente e não há bibliografias específicas sobre o assunto disponíveis, apenas poucos artigos científicos.

Os resultados obtidos demonstram que o dispositivo apresenta uma baixa eficiência em decorrência de uma alta densidade de potência focada na célula da placa que afetou negativamente o desempenho da célula, entretanto pode-se confirmar que a perda em relação a distância é praticamente nula, o que mostra que raios lasers podem ser utilizados para transferir energia em grandes distâncias.

Apesar dos dados abaixo do esperado, o projeto continua sendo promissor, pois a ideia de transmitir energia de forma sem fio ainda é muito atrativa, principalmente em ambientes de smart home, lojas e shoppings. Além de haver espaço para o desenvolvimento de novas e melhores placas fotovoltaicas, aumentando a eficiência do conjunto.