

Universidade Federal do ABC
Graduação em Engenharia de Informação

EVIEN BARBOSA DE OLIVEIRA
VICTOR MAGRI

TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA SEM FIO

Santo André - SP
2019

EVIEN BARBOSA DE OLIVEIRA
VICTOR MAGRI

TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA SEM FIO

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Bender Perotoni

Santo André – SP
2019

RESUMO

O presente trabalho descreve as técnicas e teorias que possibilitam a transmissão de energia elétrica sem a utilização de fios, cuja aplicação foca no dimensionamento de potência (*Wireless Power Transmission- WPT*).

Estes métodos são classificados através da utilização de micro-ondas, ressonância magnética ou laser, sendo que o primeiro, foi eleito para aplicação prática, cuja montagem e simulação compõem este documento. O sistema conta com a utilização de uma *rectenna* do tipo *Split-Ring Resonator* (SRR) para receber potência na faixa de 900MHz transmitida por uma antena monopolo e uma antena guia de onda, devido ao maior ganho para essa faixa de frequências.

Palavras-Chave: Transmissão de energia sem fio, anel ressoador dividido, micro-ondas, antenas

ABSTRACT

The present work describes how theory and techniques that allow wireless power transmission (WPT), whose application focuses on power sizing.

These methods are classified in 3 main kinds: microwaves, magnetic resonance or laser, and the first one was chosen for experimental practice, whose simulation and construction is part of this document. The system uses a split-ring resonator type rectenna to receive power in 900 MHz's range transmitted by a monopole and waveguide antenna due to their gain in this range of frequencies

Key words: Wireless power transmission, split ring resonator, microwaves, antennas

SUMÁRIO

1. Introdução	10
1.1. Justificativa	11
1.2. Ressonância Magnética	12
1.3. Micro-ondas	13
1.4. Lasers.....	15
2. Objetivo	17
2.1. Objetivos Específicos.....	17
3. Metodologia.....	17
3.1. SRR: funcionamento e dimensionamento	17
3.2. Circuito Retificador Greinacher.....	21
3.3. Ensaio Práticos.....	22
3.3.1 Modelagem antena receptora – SRR	22
3.3.2. Protótipos – SRR.....	24
3.3.3. Definição da antena transmissora.....	26
3.3.4 Sistema com antena monopolo e SRR com componentes comuns.....	26
3.3.5 Sistema com Antena Monopolo e SRR com componentes SMD	29
3.3.6. Sistema com arranjo das <i>rectennas</i> comum e SMD.....	31
3.3.7. Sistemas com Guia de Onda e SRR.....	32
3.3.7.1. Sistema com Guia de Onda e SRR SMD.....	34
3.3.7.2. Sistema com Guia de Onda e SRR's em série	35
CONCLUSÃO	38
REFERÊNCIAS.....	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dimensões físicas do SRR calculado [6].....	22
Tabela 2 - Dimensões Calculadas para a antena guia de onda para frequência de 900MHz [6]	24
Tabela 3 – Lista de componentes [6]	25

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Transmissão por Ressonância Magnética [6]	12
Figura 3 - Espectro de radiação eletromagnética [8].	13
Figura 3 – Sistema Proposto pela JAXA [6].....	15
Figura 4 – Diagrama do sistema de transmissão à Laser [6].	16
Figura 5 – a) Características elétricas e magnéticas do material são definidas pela configuração atômica e molecular. b) Características elétricas e magnéticas do metamaterial são definidas pela estrutura de construção do mesmo[6].....	18
Figura 6 - a) SRR quadrado com um <i>gap</i> b) SRR quadrado com dois <i>gaps</i> [6]	18
Figura 7 – SRR quadrado e seu circuito LC equivalente [6].....	19
Figura 8 – Esquema de um circuito retificador Greinacher [6]	21
Figura 9 – Coeficiente de reflexão do SRR para as dimensões da tabela 1 [6]	23
Figura 10 – a) Distribuição dos campos elétricos e b) distribuição dos campos magnéticos a 900 MHz [6].....	23
Figura 11 – Distribuição do campo distante [6]	24
Figura 12 – protótipo <i>rectenna</i> com circuito retificador com componentes de encapsulamento comum [6]	25
Figura 13 – <i>Rectenna</i> SRR para 900MHz com circuito retificador SMD[6]	26
Figura 14 – Esquema de transmissão antena monopolo e SRR com componentes de encapsulamento comum [6]	27
Figura 15 - Potência recebida por frequência transmitida (MHz) [6]	27
Figura 16 - Potência recebida e distância entre antenas [6].....	28
Figura 17 – Definição dos eixos de rotação [6]	29
Figura 18 - Potência recebida e rotação da antena a 15cm [6]	29
Figura 19 - Potência recebida por frequência transmitida (MHz) [6]	30
Figura 20 - Potência recebida pela distância entre antenas [6].....	31
Figura 21 - Potencia recebida pela distância entre antenas [6].....	31
Figura 22 - Arranjo das <i>rectennas</i> com componentes comuns e SMD [6].....	32
Figura 23 - Arranjo das <i>rectennas</i> com componentes comuns e SMD [6].....	32
Figura 24 - Dimensões da antena Guia de Onda em função da frequência de operação [6]	33
Figura 25 – Antena Guia de Onda simulada para frequências de 900 MHz a) Vista lateral e b) Vista Frontal [6].....	33
Figura 26 – Setup do sistema com Guia de onda [6].....	34
Figura 27 - Resposta do SRR SMD com guia de onda com distância entre antenas [6].....	35
Figura 28 – configuração com guia de onda a) sem refletor b) com refletor [6].....	35
Figura 29 – Setup do Sistema guia de onda e <i>rectennas</i> em série [6]	36

Figura 30 - Curva de saída da <i>rectenna</i> SMD na frequência de 830MHz [6]	36
Figura 31 - Curva de saída das <i>rectennas</i> em série na frequência de 855MHz [6]	37

LISTA DE ABREVIATURAS UTILIZADAS

MIT – Massachussets

SHARP – Stationary High Altitude Relay Platform

WPT – Wireless Power Transmission

JAXA – Japan Aerospace Exploration Agency

SRR – Split Ring Resonator

PCB – Printed Circuit Board

SMD – Surface Mount Tecnology

1. Introdução

O primeiro registro de transmissão de energia sem fio foi assinado por Nicola Tesla, cujas teorias foram propostas no final do século XIX e uma de suas exibições envolvia acender remotamente as luzes no chão em sua estação experimental em Colorado Springs. Desde então, os pesquisadores desenvolveram várias técnicas para mover eletricidade sem fios, tais como ressonância magnética, uso de micro-ondas ou de lasers [1].

Um dos exemplos associados ao legado de Tesla aconteceu em 2006, no MIT, liderado por Marin Soljacic. Foi desenvolvido um sistema capaz de alimentar uma lâmpada de 60 Watts, alimentadas por bobinas separadas por pouco mais de 2 metros, por ressonância magnética [2].

Outro estudo marcante é relacionado a um avião chamado de SHARP (*Stationary High Altitude Relay Platform* - plataforma estacionária de transmissão em grande altitude), que utilizava micro-ondas para transmissão de cerca de 30 kW a uma distância de 1,5km, com eficiência de 84% [3].

Atualmente a teoria fundamental de Tecnologia WPT é utilizada em vários campos, como em automóveis elétricos, na medicina e em dispositivos celulares [4].

1.1. Justificativa

A sociedade atual está cada vez mais livre de fios para transmitir informação, porém quando se trata de energia elétrica, a realidade é diferente, pois neste caso o que se transmite é potência (*Wireless Power Transmission-WPT*), que é altamente dispersa nas transmissões sem fio, visto que não é guiada por condutores. Isso faz com que eficiência na transmissão ganhe maior relevância, pois a energia dissipada na transmissão gera custo, diferentemente de quando se transmite informação, a qual pode ser recuperada por sistemas de correção de erros e redundância, por exemplo. A utilização da radiofrequência exemplifica o fato de que na transmissão de informação, o objetivo principal é que o receptor receba o sinal com potência suficiente para que seja possível distingui-lo do ruído do canal (relação sinal-ruído). Assim, a eficiência da transmissão não é a principal preocupação.

Deste modo, a maior utilização de transmissão de energia sem fio ocorre em aplicações em que o transmissor e receptor estão à poucos centímetros, o que diminui o impacto da dispersão, mas exige um posicionamento fixo para o equipamento durante o processo de carga, como no caso de celulares carregados por indução eletromagnética, por exemplo.

1.2. Ressonância Magnética

Ressonância magnética consiste na utilização de bobinas na indução de corrente através de um campo magnético. A maneira como isso ocorre é princípio de funcionamento do transformador, que consiste em uma bobina denominada primária, por onde circula uma corrente variável que produz o campo magnético no espaço em torno da mesma, o qual interage com a bobina secundária e produz uma corrente induzida. [5]

Para transmissão de energia através de ressonância, as bobinas atuam como antenas de curto alcance através de indutância mútua. Esse tipo de estrutura é construído para frequências específicas, em geral da ordem de kHz e poucos MHz, levando em conta a dimensão dos componentes, quantidade de espiras das bobinas, dependendo da aplicação necessária. A Figura 2 mostra o funcionamento desse sistema de transmissão.

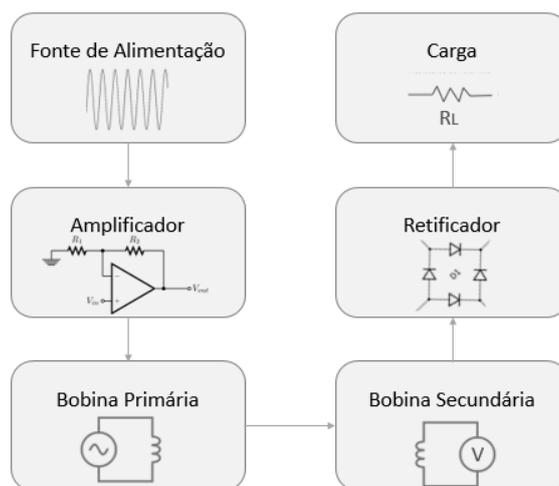


Figura 1 – Transmissão por Ressonância Magnética [6]

Este método pode ser facilmente utilizado para carregar dispositivos de baixa potência, como celulares e *tablets*. Ele é o de mais simples implementação além de ser o mais barato entre os estudados, porém também é o de menor eficiência por haver desperdício de energia devido à interferência de qualquer equipamento metálico próximo e além disso, sua utilização é limitada a curtas distâncias comparada aos outros métodos [4].

1.3. Micro-ondas

Os micro-ondas encontram-se na faixa de 300 MHz e 300 GHz. A Figura 3 mostra a região no espectro correspondente. Dado seu comprimento de onda, usualmente menores que 1 metro no espaço livre, o sistema eletrônico deve ser menor em relação ao usuais aplicados por exemplo em sinais de áudio, para evitar efeitos indesejados causados por linhas de transmissão ou antenas [7]. Isso ocorre porque as medidas de antenas e linhas de transmissão são proporcionais ao comprimento de onda utilizado, conhecido como comprimento elétrico.

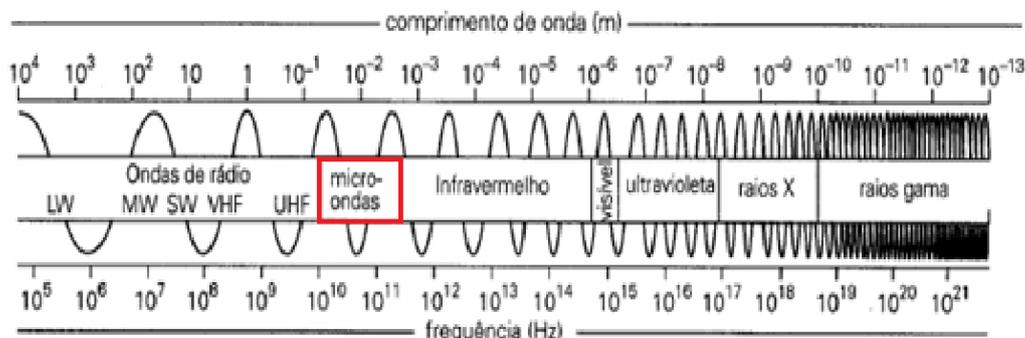


Figura 2 - Espectro de radiação eletromagnética [8].

Outros problemas encontrados na utilização desta radiação são suscetibilidades à atenuação por obstáculos e intempéries, além dos custos de infraestrutura que podem ser elevados. Apesar desses efeitos, o uso de micro-ondas é vantajoso pois possibilita altos valores de ganho e diretividade das antenas, proporcionando exatidão na localização de objetos e na transmissão de informação, portanto é possível que uma grande quantidade de informação seja transmitida. Outra vantagem é que viabiliza comunicações por satélite, já que não reflete na ionosfera, como no caso de altas frequências [9].

Para transmissão das micro-ondas através do ar, seja para informação ou para envio de potência, tema principal deste trabalho, é necessária a transformação da energia elétrica comum para ondas eletromagnéticas e posteriormente na recepção, uma nova transformação de energia no caminho

inverso. Para isso é necessário o uso de antenas. Quando se trata desta faixa de frequências, as antenas mais utilizadas são as parabólicas, guias de onda com fenda e as antenas de microlinha [10].

No envio da energia pela antena emissora, é necessário a geração de energia elétrica na frequência que irá ser utilizada na transmissão e para isso, usualmente é utilizado um dispositivo denominado *Magnetron*, que é um tipo tubo de vácuo de micro-ondas.

Na recepção, além da antena é necessário um circuito retificador que transforme a alta frequência em corrente contínua ou, em alguns casos, numa frequência que possa ser utilizada em equipamentos comerciais (60Hz para energia por exemplo), onde um inversor eletrônico pode ser usado. Para isso, geralmente utilizam-se diodos retificadores para retirar ou inverter polaridades negativas e capacitores para suavizar o sinal e torna-lo contínuo. Diodos convencionais tem limitações em frequências altas, principalmente pelo tempo de resposta e de recuperação, que são suficientes para distorcer os sinais. Por outro lado, Diodos Schottky, pela sua construção, conseguem atingir frequências de micro-ondas, além de terem menor queda de tensão na polarização direta e por isso, são os mais utilizados para estas aplicações. [11]

Também existe várias aplicações propostas para este tipo de transmissão. A maior aplicação desse método foi realizada na Califórnia, em 1975 no qual uma matriz de 4590 *rectennas* foram conectadas para uma transmissão de mais de 1,5 km de distância no qual foi possível transmitir mais de 30 kW a uma eficiência de 80%. [12]

1.4. Lasers

Lasers são partículas de luz (fótons) concentradas e emitidos num feixe contínuo e coerente. Essa energia é focalizada em uma cavidade que estimula átomos a um nível mais alto de energia, e ao retornar ao estado natural emitem um fóton. Com auxílio de espelhos numa cavidade, concentra-se essa energia e cria-se um feixe direcionado. Os conversores mais eficientes no mercado são os diodos laser de estado sólido.

Este método consiste em um transmissor composto por um raio laser e um receptor que transforma a energia luminosa em energia elétrica. A eficiência desse tipo de transmissão depende muito da qualidade dos equipamentos e de forma geral o custo de aplicação de um sistema útil é bastante cara, tanto na construção do Laser como no conversor na carga [13].

Existem muitas aplicações propostas com esse modelo e dentre as mais recentes está um sistema baseado em lasers solares em grandes escalas, da JAXA (Agência Japonesa de Exploração Aeroespacial), ilustrado na Figura 5, capaz de entregar até 1GW de potência [14].

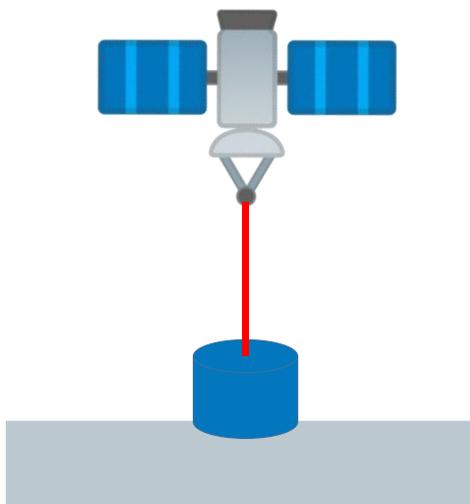


Figura 3 – Sistema Proposto pela JAXA [6].

Na aplicação proposta pela *JAXA*, o sistema é bem parecido com o sistema de micro-ondas, as principais diferenças ficam por conta da geração do *Laser*, além de um sistema de conversão fotovoltaica para transformar a energia luminosa do laser em energia elétrica para a base do satélite, que substitui a antena de emissão e recepção, respectivamente [15]. O diagrama do sistema proposto pode ser visto na Figura 6.

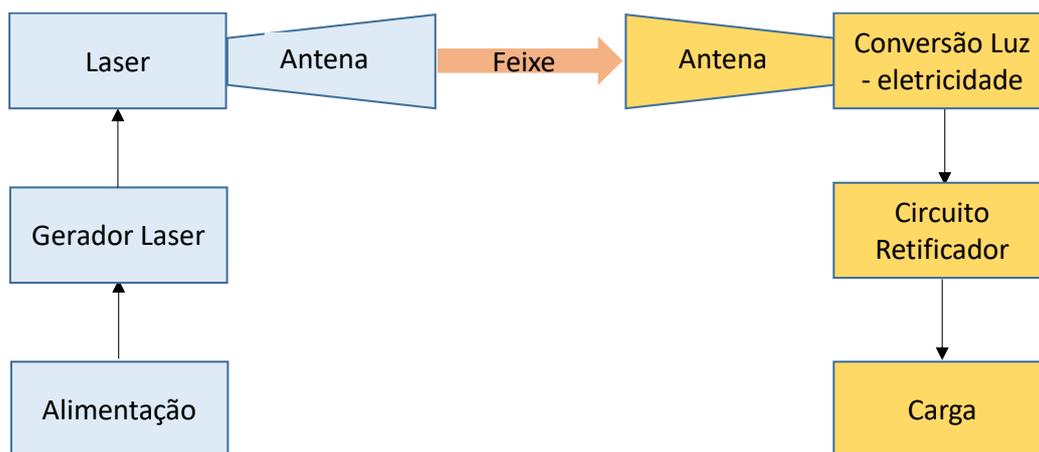


Figura 4 – Diagrama do sistema de transmissão à *Laser* [6].

2. Objetivo

A finalidade do estudo a ser apresentado consiste em testar a técnica de transmissão de energia elétrica sem fio através de micro-ondas, bem como verificar a aplicabilidade e eficiência desta tecnologia. Para tanto, o método de teste consiste num circuito prático que utiliza uma antena *split-ring resonator* (SRR).

2.1. Objetivos Específicos

- Simulação de antenas de micro-ondas
- Ensaio de sistemas de micro-ondas através de *rectenna* SRR
- Analisar eficiência do método testado

3. Metodologia

Os procedimentos necessários para a realização do estudo consistem na simulação, confecção e testes de eficiência para exemplares dos métodos de WPT.

3.1. SRR: funcionamento e dimensionamento

Split Ring Resonator (SRR) consiste em uma configuração estudada inicialmente pelo físico John Brian Pendry, baseada em metamateriais, cuja definição é a composição de estruturas artificiais que podem ser projetadas para ter uma propriedade eletromagnética desejada. As dimensões deste tipo de material são muito inferiores ao comprimento da onda de operação. A Figura 7 ilustra sua distinção com o material comum. [16]

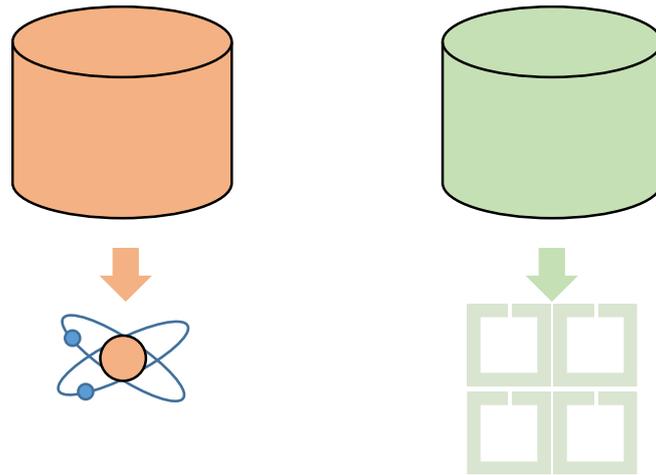


Figura 5 – **a)** Características elétricas e magnéticas do material são definidas pela configuração atômica e molecular. **b)** Características elétricas e magnéticas do metamaterial são definidas pela estrutura de construção do mesmo[6].

Pendry estruturou o SRR durante estudos para otimização da resposta magnética de um metamaterial. Isso foi possível com a inclusão de elementos capacitivos na sua estrutura através de anéis metálicos que funcionam como dipolos magnéticos macroscópicos. Com essa configuração, a resposta do material tem maior intensidade na frequência de ressonância da estrutura. A Figura 8 ilustra alguns exemplos desse material. [16]

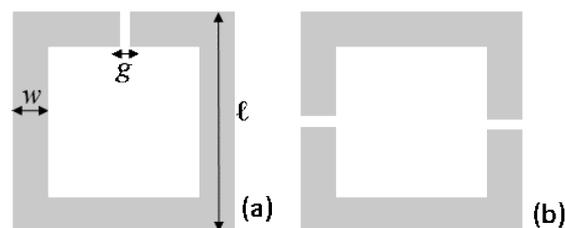


Figura 6 - **a)** SRR quadrado com um *gap* **b)** SRR quadrado com dois *gaps* [6]

Respeitada a condição de funcionamento do metamaterial, o SRR pode ser considerado um circuito LC dado que suas dimensões são muito menores que o comprimento da onda com a qual ele interage ($\approx 0,1 \cdot \lambda$), com L sendo a auto-indutância do anel e C a capacitância da fenda (*gap*) [16]. A Figura 9 mostra o circuito equivalente simplificado.

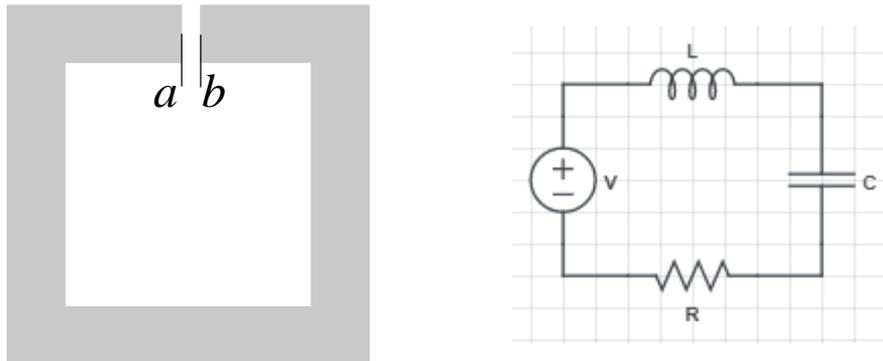


Figura 7 – SRR quadrado e seu circuito LC equivalente [6]

A interação do material com a onda e a variação do campo magnético induz uma tensão em seu enlace dada por [17]:

$$V = -j\omega \cdot \int_{A_{loop}} B_{inc} \cdot dA \quad (3.1)$$

Onde A é área do anel, B é o campo magnético e ω é a frequência angular da onda. Como o comprimento de onda é muito maior que as dimensões do SRR, o campo magnético é praticamente uniforme na distribuição espacial, o que simplifica a integral para:

$$V = \int_S B_{inc} \cdot dS \approx B_{inc} A_{loop} = \mu_0 H_{inc} A_{loop} \quad (3.2)$$

A frequência de ressonância do SRR dependem diretamente das dimensões da lateral do anel (a), da espessura da trilha (w), da altura da trilha (h) e da largura do gap (g) que podem ser identificadas na figura 8. Essas dimensões definem a indutância (L), a capacitância do gap (C_g) e a capacitância de superfície (C_{surf}) do circuito equivalente LC [18].

A partir do circuito equivalente, pode-se calcular a frequência de ressonância a partir da equação:

$$f_0 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}} \quad (3.3)$$

A indutância do circuito pode ser aproximada pela de um anel fechado:

$$L = \mu_0 a_m \cdot \left(\ln \left(\frac{8a_m}{h+w} \right) - 0,5 \right) \quad (3.4)$$

No qual μ_0 é a permissividade do espaço livre e a_m é o raio médio do anel

$$a_m = a + w/2 \quad (3.5)$$

A capacitância do gap pode ser calculada da seguinte forma:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_g} + \frac{1}{C_{surf}} \quad (3.6)$$

No qual a capacitância da fenda C_g é dada por:

$$C_g = \varepsilon_0 \cdot \left(\frac{wh}{g} + \frac{2\pi h}{\ln \left(\frac{2,4h}{w} \right)} \right) \quad (3.7)$$

E a capacitância da superfície é dada por:

$$C_{surf} = \frac{2\varepsilon_0 h}{\pi} \cdot \ln \frac{4a}{g} \quad (3.8)$$

Este material pode ser usado como uma antena nas faixas de micro-ondas. Uma antena capta o sinal em alta frequência e transforma em energia elétrica na mesma frequência [19]. Portanto, para que essa energia possa ser utilizada como fonte de energia em outros circuitos, é necessário converter essa energia para uma frequência menor, por exemplo 60 Hz ou para corrente contínua, que é o que será abordado a seguir.

3.2. Circuito Retificador Greinacher

Para conversão do sinal na frequência de micro-ondas em sinal contínuo, são utilizados circuitos retificadores[20]. Para recepção de energia sem fio, o circuito retificador Greinacher é um exemplar eficaz, pois tem uma das maiores eficiências em potência, com tensão de saída duas vezes maior que a tensão de entrada máxima, o que facilita as medições experimentais. Além disso, esse circuito permite trabalhos em frequências altas dado sua baixa capacitância efetiva, o que permite uma comutação mais rápida comparada a outros retificadores. Outra vantagem é que ele possui limite de tensão baixo, adequado para o tipo de aplicação estudado. [21]

A configuração desse retificador consiste em dois capacitores e dois diodos, dispostos como na Figura 11. Para aplicações em altas frequências, diodos Schottky são os mais utilizados, por conta de sua comutação rápida e sua baixa tensão de polarização.

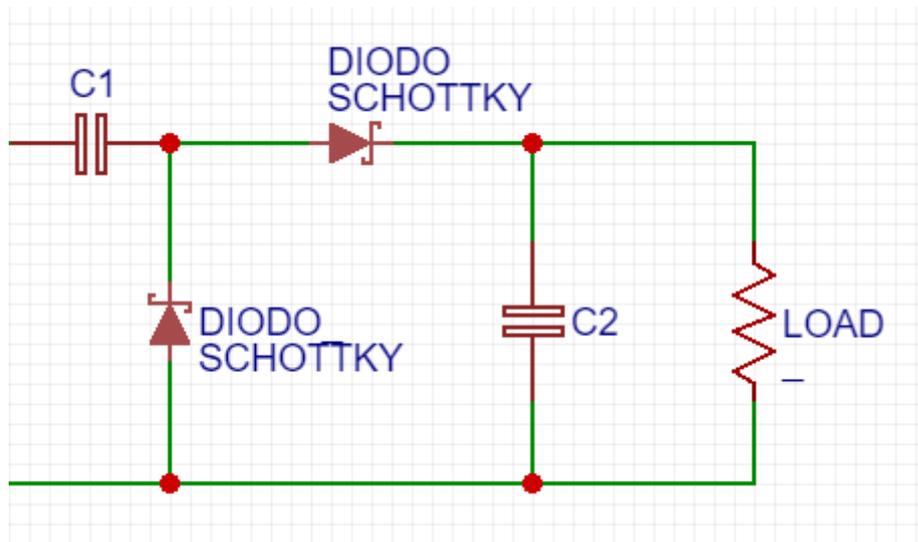


Figura 8 – Esquema de um circuito retificador Greinacher [6]

3.3. Ensaios Práticos

Para transmissão de energia através de micro-ondas, conforme descrito na metodologia, foi escolhida uma antena construída na modelagem de um *Split-Ring Resonator (SRR)*, que de acordo com suas dimensões, consegue captar determinada frequência. Esta escolha se deve ao fato de que o tamanho do anel é reduzido em comparação com guias de onda e dipolos, por exemplo, também à facilidade de confecção, através de placas PCB simples e componentes retificadores, como capacitores de diodos.

A faixa de operação esperada para o experimento é de 900 MHz, motivada por dois principais pontos: frequência na faixa de micro-ondas e dentro da faixa de trabalho dos aparelhos disponíveis em laboratório para medição.

3.3.1 Modelagem antena receptora – SRR

Para definir as dimensões da antena, foi calculada a frequência teórica a partir das fórmulas do tópico 3.1 através do *software* Matlab (Apêndice 1). A frequência mais próxima do valor escolhido é com as dimensões da Tabela 1, com 1 GHz de frequência esperada.

Espessura da Cobre (h)	0.1 mm
Lateral do SRR (L)	40 mm
Espessura da trilha (w)	1 mm
GAP (g)	1.2 mm

Tabela 1 - Dimensões físicas do SRR calculado [6]

Para ser um pouco mais preciso na frequência utilizada, foram realizadas simulações com o auxílio de softwares da *Altair Engineering Inc.:* *CadFeko* para construção e *POSTFEKO* para análise, considerando a permissividade relativa do material (ϵ_r) de 4,4. Para a frequência desejada, foi necessário diminuir o GAP para 1 mm, resultando na resposta em frequência disponível na Figura 12, dentro dos 900 MHz esperado.

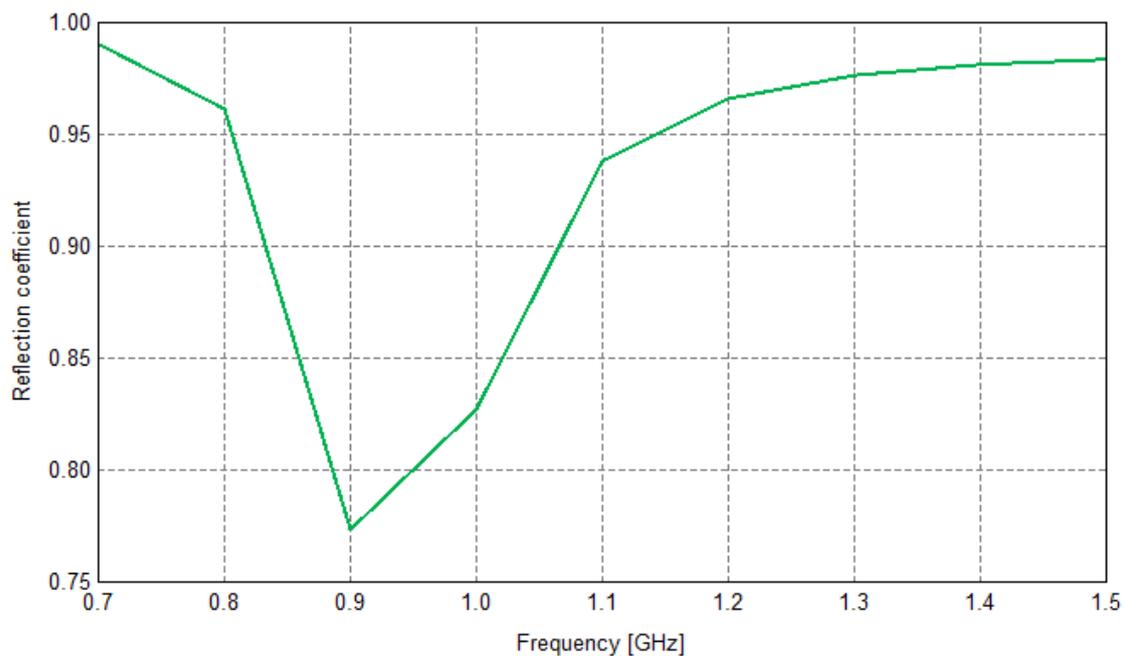


Figura 9 – Coeficiente de reflexão do SRR para as dimensões da tabela 1 [6]

A distribuição dos campos elétrico e magnético para a mesma antena também pode ser visualizada na Figura 13.

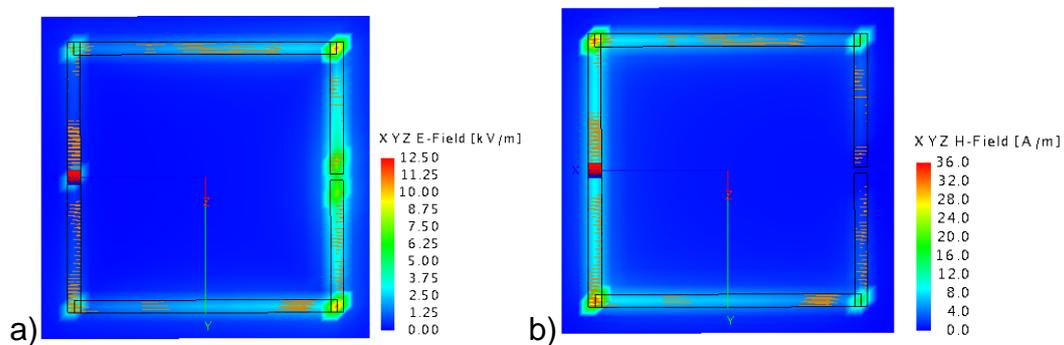


Figura 10 – a) Distribuição dos campos elétricos e b) distribuição dos campos magnéticos a 900 MHz [6]

Além disso, na Figura 14, tem-se distribuição de campo distante da antena (*Far Field*), medida que auxilia a entender para quais direções a antena tem melhor desempenho, o que será também analisado na construção do protótipo analisado.

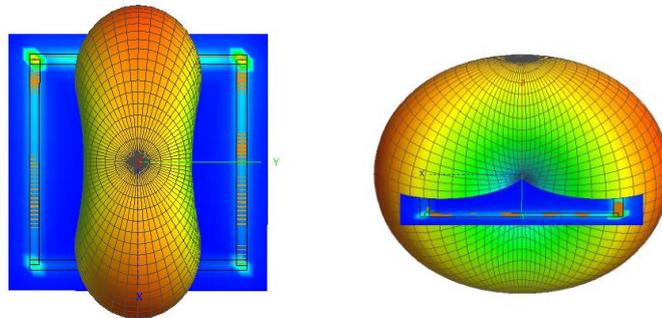


Figura 11 – Distribuição do campo distante [6]

3.3.2. Protótipos – SRR

Para dar início aos procedimentos práticos, o primeiro passo foi a definição dos componentes listados na tabela 2 para a antena com componentes.

Placa FR-4 5x5 cm ²	1
Capacitor cerâmico disco 100nF	2
Diodo Schottky Hitachi SS106	2
Resistor de 10kΩ	1

Tabela 2 - Dimensões Calculadas para a antena guia de onda para frequência de 900MHz [6]

O protótipo da antena com o circuito retificador dobrador de tensão está disponível na Figura 15. Com esta antena, foram realizadas medidas para encontrar a melhor frequência, diretividade e perda por atenuação. Esses dados estão disponíveis no item 3.3.4.

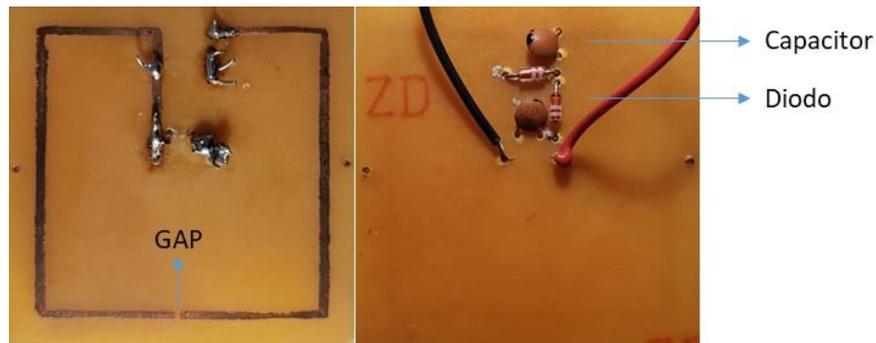


Figura 12 – protótipo *rectenna* com circuito retificador com componentes de encapsulamento comum [6]

Com objetivo de testar a eficiência da *rectenna* com componentes SMD – sigla em inglês para *Surface Mount Device*, componentes com tamanho reduzido e que são mais indicados para aplicações em frequências altas, a mesma antena foi prototipada com este método. A lista de componentes está na tabela 3.

Placa FR-4 5x5	1
Capacitor SMD 0805 100nF	2
Diodo Schottky RB751S40	2
Resistor de 10k Ω	1

Tabela 3 – Lista de componentes [6]

Com a definição do circuito SMD, foram realizadas as mesmas medidas do circuito com componentes comuns, para entender se há ganho de eficiência por conta da utilização de componentes menores. O protótipo pode ser visto na Figura 16.

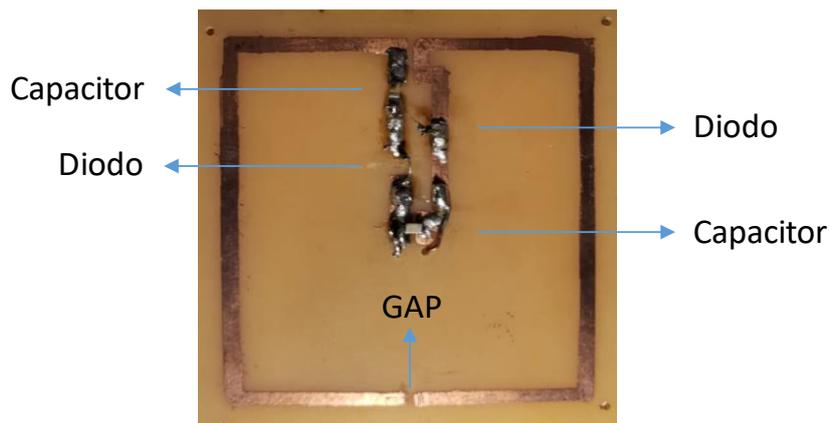


Figura 13 – *Rectenna* SRR para 900MHz com circuito retificador SMD[6]

3.3.3. Definição da antena transmissora

Há dois fatores importantes para definição da antena responsável por transmitir a energia à *rectenna*. O primeiro deles é a transmissão omnidirecional, pois o equipamento que receberá a energia pode ser móvel. Por conta disso, o primeiro sistema foi construído com uma antena telescópica do tipo monopolo, cujo diagrama de radiação é semelhante ao de uma antena de meia onda [22].

O segundo fator é a eficiência de transmissão e por isso, o mais indicado é utilizar-se de uma antena eficiente e direcional, pois menos energia se perde para o meio. Assim, um segundo sistema foi construído com transmissão por uma antena guia de onda [23].

3.3.4 Sistema com antena monopolo e SRR com componentes comuns

Para o teste prático, a antena telescópica, posicionada em seu tamanho mínimo (18 cm), foi alimentada através de um gerador de sinais RF Agilent N9310A, cuja frequência máxima de operação é de 3GHz.

O gerador foi configurado para operar com 900MHz e potência de 20dBm. A *rectenna* foi colocada a 15 cm de distância para que fossem iniciadas as medidas práticas. O circuito com antena monopolo está disposto na Figura 17.



Figura 14 – Esquema de transmissão antena monopolo e SRR com componentes de encapsulamento comum [6]

A primeira análise foi a frequência ótima do SRR. Para isso, as antenas foram colocadas frente a frente uma da outra, a 10 cm de distância, utilizando potência máxima (20dBm), uma carga de 10 k Ω . A partir disso a frequência foi variada a cada 5 MHz a partir da frequência 785MHz à 850 MHz. A melhor frequência para esta disposição ficou em 810MHz com 0,047mW (-13,28dBm) recebido. A Figura 18 expõe o detalhe das medidas

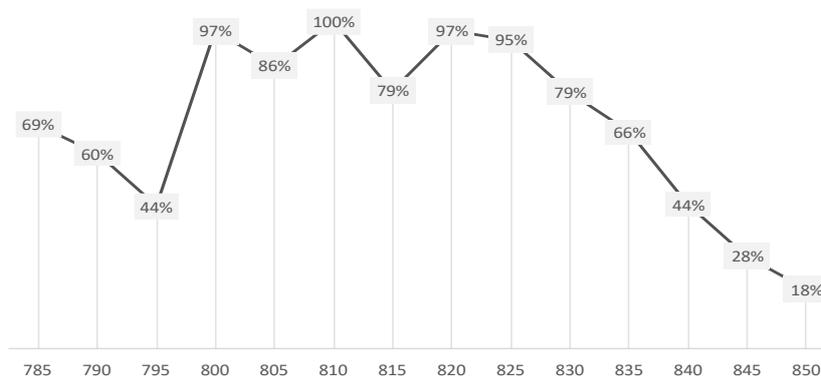


Figura 15 - Potência recebida por frequência transmitida (MHz) [6]

Com a frequência ótima, foi possível colocar em prática as medidas de desempenho. A primeira delas diz respeito a perda do meio. Com a frequência de 810MHz, foi medida a potência incidente para algumas distancias da antena, partindo-se de 5 cm até 45 cm. O resultado dessa medida por ser verificado na Figura 19, no qual a potência máxima, a 5 cm foi de 0,11mW (-9,58dBm). Há uma distância de 25cm da antena o sinal é quase imperceptível comparado ao sinal de referência.

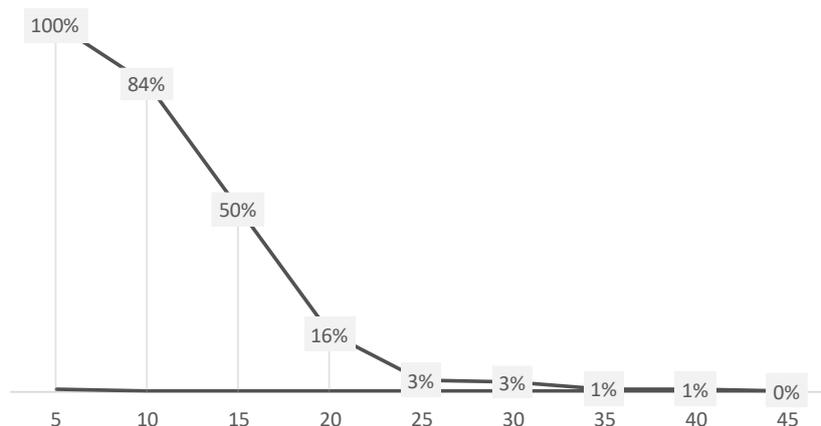


Figura 16 - Potência recebida e distância entre antenas [6]

Por fim, foi levantada a diferença na recepção do sinal em relação ao ângulo que a antena faz com a antena transmissora, para comparar com a simulação da Figura 20. Para isso, foram realizadas medidas variando-se o ângulo de rotação em torno dos eixos x e y, conforme a Figura 19, a 15 cm de distância da antena transmissora.

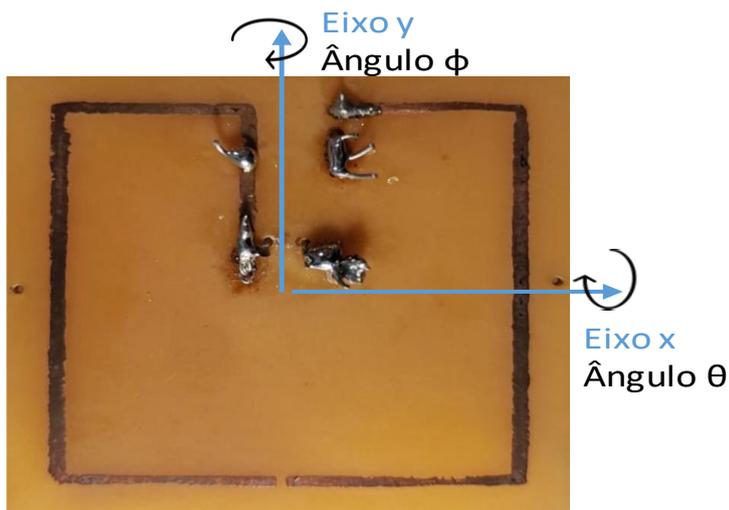


Figura 17 – Definição dos eixos de rotação [6]

Os resultados obtidos em ambos os eixos podem ser observados na Figura 21, na qual é possível constatar que o melhor resultado foi obtido à 90° (sinal de polarização cruzada). Nessa configuração, a carga recebeu 0,07 mW (-11,67dBm) de potência.

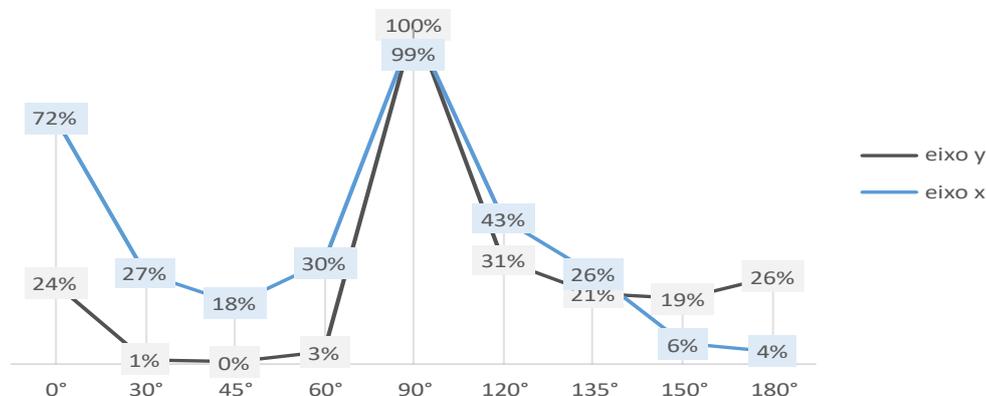


Figura 18 - Potência recebida e rotação da antena a 15cm [6]

3.3.5 Sistema com Antena Monopolo e SRR com componentes SMD

O sistema abordado neste tópico consiste em uma antena monopolo para transmissão do sinal de 20dBm e uma *rectenna* SRR retangular confeccionada com componentes SMD, atuando como receptora.

Nessa montagem, o circuito teve melhor resposta na frequência 760MHz, com 0,08mW (-10,91dBm) de resposta, um pouco diferente do modelo anterior, devido a diferenças na largura das trilhas e do GAP, imperfeições geradas na confecção da antena. Apesar disso, a frequência é bem próxima do valor simulado para o circuito (900MHz). Esta resposta do circuito para frequências próximas da calculada está na Figura 22.

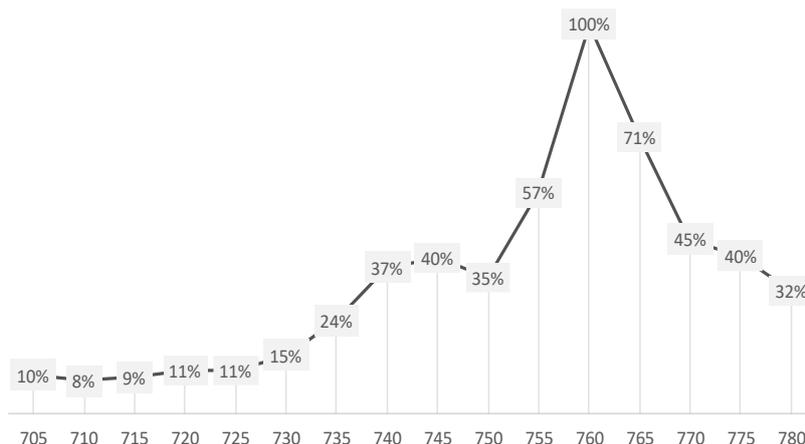


Figura 19 - Potência recebida por frequência transmitida (MHz) [6]

Além disso, a antena foi novamente simulada para pequenas distâncias para que fosse possível calcular o efeito de atenuação pela distância de transmissão. A resposta gráfica pode ser visualizada na Figura 23, no qual a maior medida foi de 0,32mW (-4,95dBm). Além disso, o sinal se torna muito pequeno à 35 cm de distância da antena transmissora, resposta um pouco melhor que a antena anterior.

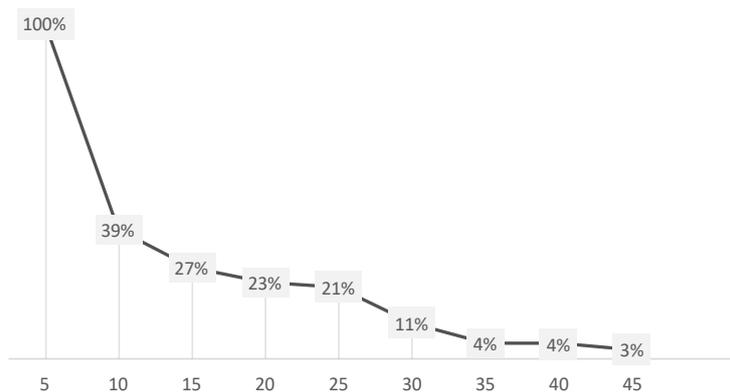


Figura 20 - Potência recebida pela distância entre antenas [6]

Por fim, para analisar a diferença na recepção com a antena em outras direções comparada à linha de transmissão, ela foi posicionada a uma distância fixa de 15 cm e rotacionada em ambos os eixos mostrados na Figura 19. A resposta pode ser vista na Figura 24. Novamente, o pico de transmissão ocorreu com a antena rotacionada em 90°.

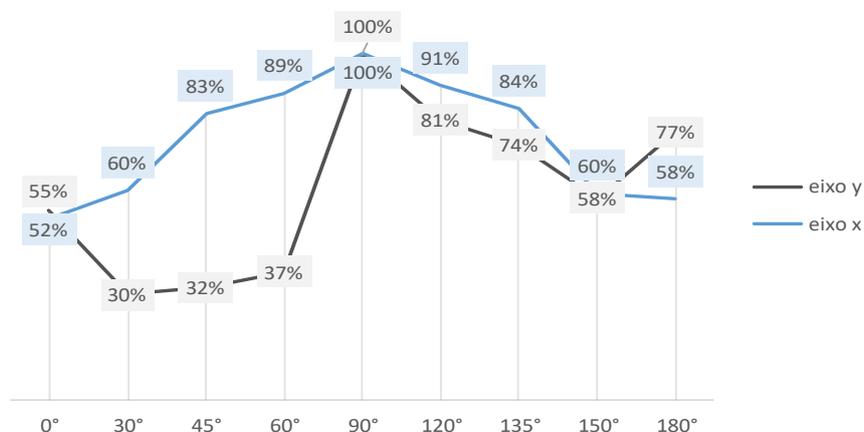


Figura 21 - Potencia recebida pela distância entre antenas [6]

3.3.6. Sistema com arranjo das *rectennas* comum e SMD

A terceira configuração utilizada consiste em um arranjo em série entre as duas *rectennas* construídas, que pode ser visualizado na Figura 25. Nela é possível verificar que o posicionamento do arranjo obedece a angulação com melhores resultados de potência na recepção ($\theta = 90^\circ$).



Figura 22 - Arranjo das *rectennas* com componentes comuns e SMD [6]

A resposta em frequência do arranjo, comparando os resultados individuais das antenas, pode ser visto na Figura 26. O resultado com o arranjo é mais que 2 vezes melhor que para valores individuais, chegando a 0,131mW (-8,83dBm) em 730MHz. Conforme esperado, utilizar arranjos de antenas aumenta a diretividade do sistema, o que aumenta a eficiência de recepção do sinal comparada às antenas individualmente. [24]

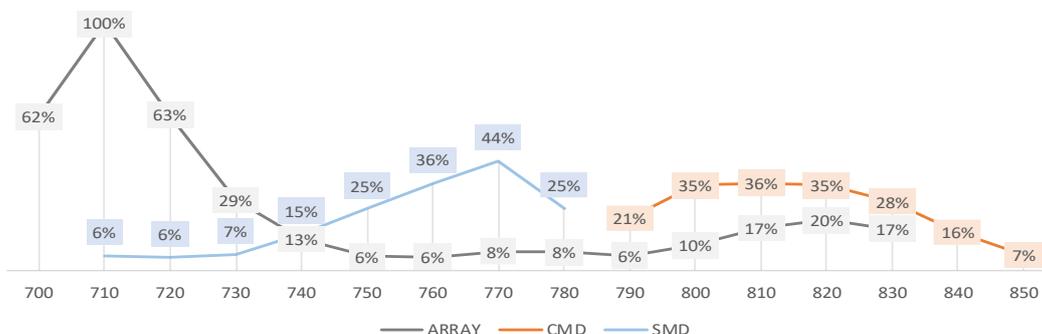


Figura 23 - Arranjo das *rectennas* com componentes comuns e SMD [6]

3.3.7. Sistemas com Guia de Onda e SRR

Para transmissão a partir do guia de onda, foi necessário calcular as dimensões da antena para construção. O cálculo foi baseado na frequência de 900MHz e para uma lata cilíndrica de 220 mm de diâmetro[25]. A Figura 27 ilustra

as dimensões da antena calculada e a tabela 2 expõe os valores calculados para a frequência desejada.

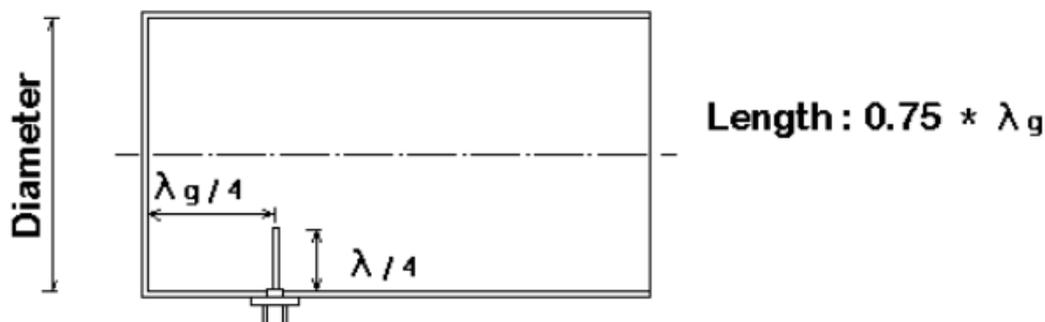


Figura 24 - Dimensões da antena Guia de Onda em função da frequência de operação [6]

Diâmetro do Guia de Onda [mm]	220
Frequência de corte para o modo TE ₁₁ [MHz]	798,63
Frequência de corte para o modo TM ₀₁ [MHz]	1046,11
Comprimento de Onda no Guia [mm]	130,21

Tabela 4 - Dimensões Calculadas para a antena guia de onda para frequência de 900MHz [6]

A antena foi simulada conforme a tabela 4, com os mesmos recursos utilizados na *rectenna*. O diagrama de transmissão *farfield* pode ser visto na Figura 28.

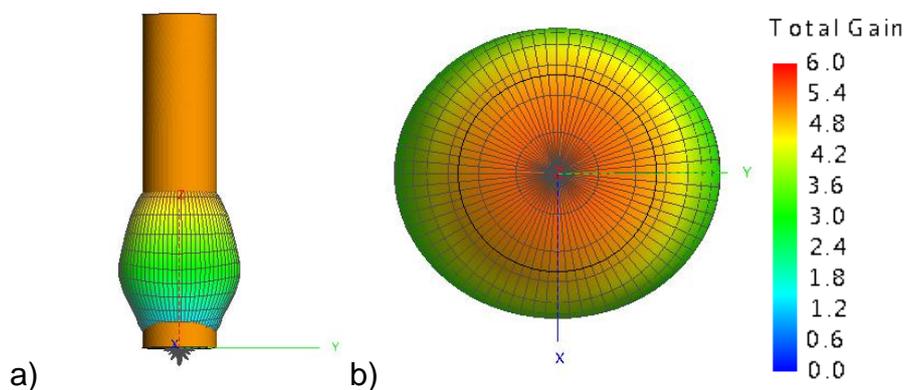


Figura 25 – Antena Guia de Onda simulada para frequências de 900 MHz a) Vista lateral e b) Vista Frontal [6]

Como o circuito de recepção não está casado em 50Ω , devido principalmente a utilização do circuito retificador, não é possível simular o coeficiente de reflexão da antena.

3.3.7.1. Sistema com Guia de Onda e SRR SMD

Seguindo a mesma lógica de decisão do tópico anterior, a *rectenna* selecionada para averiguar a saída de acordo com o afastamento do sinal transmitido foi a SMD, cujos resultados foram mais satisfatórios no sistema com a antena monopolo.

A *rectenna* foi posicionada a 15 cm do guia de onda e a saída foi medida com um multímetro em uma carga de $10k\Omega$ em tensão contínua. O *setup* pode ser visualizado na Figura 29.



Figura 26 – Setup do sistema com Guia de onda [6]

A experimentação consistiu em variar a distância da *rectenna* em relação ao guia de onda num intervalo entre 10cm e 50cm, enquanto se transmitia 20dBm na frequência de 830MHz (melhor resultado, melhor frequência de operação nesse sistema). As saídas normalizadas constam na Figura 30. A maior potência obtida foi de 0,3mW (-4,65dBm).

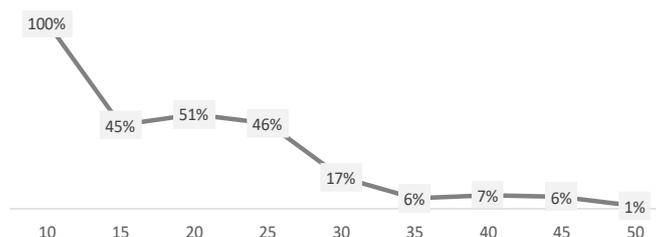


Figura 27 - Resposta do SRR SMD com guia de onda com distância entre antenas [6]

Para complementar a análise desse sistema, foram realizadas medidas com uma placa refletora na antena receptora com dois objetivos: notar melhora na recepção do sinal por interferência construtiva e identificar o comprimento de onda no espaço livre. Para a mesma frequência do item anterior, o comprimento teórico no vácuo é de 36,1 cm. O melhor resultado obtido na prática, foi há 21 cm da antena, o que significa que o comprimento de onda no meio medido foi de 42 cm, valor próximo do calculado. A Figura 31 demonstra as configurações e a resposta medida através de um multímetro.

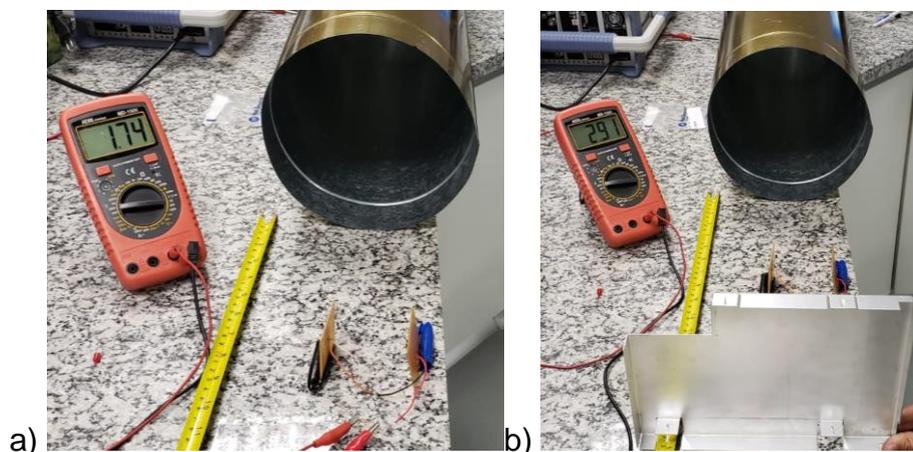


Figura 28 – configuração com guia de onda **a)** sem refletor **b)** com refletor [6]

3.3.7.2. Sistema com Guia de Onda e SRR's em série

Como os melhores resultados no caso da antena monopolo foram verificados no arranjo das *rectennas* em série, utilizou-se essa configuração para

os testes envolvendo o guia de onda como antena transmissora. O *setup* da montagem corresponde à Figura 32.



Figura 29 – Setup do Sistema guia de onda e rectennas em série [6]

Com o objetivo de identificar a melhor frequência de operação das *rectennas* nesta configuração, foram transmitidos sinais entre 800MHz e 880MHz. Na recepção foi adicionada uma carga de 10 k Ω e a potência obtida em cada caso foi normalizada em relação à maior medida e plotada no gráfico da Figura 33. A maior potência obtida foi de 3,43mW (5,35dBm) na frequência de 855MHz.

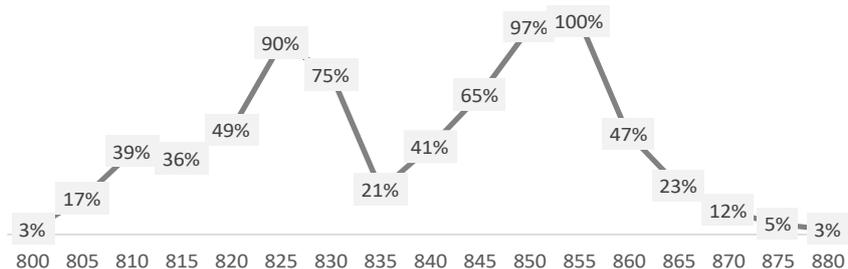


Figura 30 - Curva de saída da *rectenna* SMD na frequência de 830MHz [6]

Encontrada a melhor frequência de operação, o procedimento seguinte consistiu na averiguação da saída de acordo com a distância da *rectenna* em relação ao guia de onda num intervalo entre 10cm e 50cm. Conforme esperado,

o melhor resultado aconteceu na menor distância, com potência de 5,4mW (7,32dBm). A consolidação dos dados consta no gráfico da Figura 34.

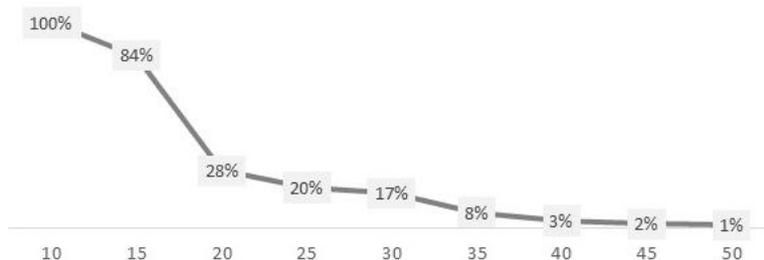


Figura 31 - Curva de saída das *rectennas* em série na frequência de 855MHz [6]

Verifica-se, portanto, proporcionalidade inversa entre a distância e a potência da saída.

Para essa comparação, foi utilizada a potência do sistema recebida pela carga utilizando o gerador e o circuito retificador, ou seja, valor teórico de transmissão ideal. Dessa forma, com 20 dBm na transmissão, a carga recebe 7,14 dBm. Nota-se que este é o melhor sistema dentre eles em recepção do sinal, conforme ilustra a Figura 35. Apesar disso, ele tem algumas desvantagens como já foi discutido, como o tamanho e necessidade de direcionamento do transmissor, além da necessidade de mais que uma antena no receptor para funcionamento, o que pode ser inviável fisicamente a depender do projeto.

Transmissão	Recepção	Potência normalizada (dBm)	Potência recebida (dBm)	Ganho
Monopolo	Comum	7,14	-13,28	-20,42
Monopolo	SMD	7,14	-10,91	-18,05
Monopolo	Arranjo	7,14	-8,83	-15,97
Guia de onda	SMD	7,14	-4,65	-11,79
Guia de onda	Arranjo	7,14	5,35	-1,79

Tabela 5 – Comparação de eficiência entre as transmissões testadas [6]

CONCLUSÃO

Neste trabalho foram realizados estudo teóricos e práticos sobre um tema que está começando a ser bastante explorado. As tecnologias de transmissão de energia elétrica sem fio ainda demandam aprofundamento considerável para que seja possível obter-se um modelo que seja eficiente e comercial. A maior dificuldade para aplicação desta tecnologia está na perda de energia na transmissão, cujo impacto no custo total da energia final é de grande relevância. Foi realizado um mapeamento de informações, projetos realizados e estudos que indicam a tendência sobre esse tipo de transmissão com objetivo de direcionar um aprofundamento nos temas mais desafiadores e oportunos.

A partir daí uma antena de micro-ondas foi projetada para identificar oportunidades com baixo custo de montagem (o que não seria possível com técnicas com laser) e com potencial aumento da distância transmitida (não praticável com transmissão por ressonância magnética).

O protótipo foi projetado com auxílio de softwares de simulação que possibilitaram prever a faixa de frequência de operação de acordo com as dimensões adotadas. O Matlab foi essencial para otimizar o tempo dedicado à cálculos complexos e através dele foi possível prever uma frequência de operação 1 GHz. O POSTFEKO também foi essencial para prever as direções de melhor desempenho no campo distante tanto para as antenas receptoras, quanto para o guia de onda. Além disso este software possibilita a visualização das distribuições de campos elétrico e magnético através do SRR.

Validado o funcionamento através de cálculo e software de simulação, o próximo passo foi definir uma forma de mensurar a energia recebida. Para tal, fez-se necessário a utilização de um circuito retificador dobrador de tensão, principalmente devido à preocupação com a amplitude do sinal recebido e também por conta da dificuldade de se analisar sinais em frequências altas com equipamentos de bancada tradicionais.

Dadas estas definições, foram confeccionadas duas antenas semelhantes, sendo a primeira com componentes de encapsulamento comum e outra com componentes SMD, para também entender a influência do retificador do sinal medido. Os valores de frequência medidos ficaram próximos dos valores

calculados, mas com alguma diferença devido a imperfeições na confecção das antenas.

O melhor resultado se deu com as antenas conectadas em série com transmissão realizada por uma antena direcional guia de onda, onde o melhor resultado foi de cerca de 66% de eficiência na transmissão (5% no sistema), muito aquém da expectativa de uma transmissão de energia, mas muito melhor que apenas uma antena separadamente, ou comparada a uma transmissão não direcional.

Outros fatores também podem ter contribuído para que a eficiência não fosse mais relevante dizem respeito ao não casamento de impedâncias no retificador da antena, nas perdas nos componentes eletrônicos e cabos, além do substrato utilizado, dado que há outros no mercado com desempenho melhores.

Por fim, ainda é necessário algum avanço no projeto, como por exemplo a utilização de uma antena receptora que não perca tanta potência a depender da posição – rotação, porém com baixo custo de produção já foi possível obter uma eficiência relevante em curtas distâncias.

REFERÊNCIAS

[1] UNESP, Minhas invenções - A autobiografia de Nikola Tesla. [Internet], capítulo V. Editora Unesp, 2012.[Acesso em 2019 mar 16]. Disponível em: http://editoraunesp.com.br/Download/Minhas_invencoes_Miolo-135_205_EPDF.pdf

[2] Soljačić, M. et al. Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances. [Internet]. 2007. Science, Vol. 317, Edição 5834, p. 83-86. [Acesso em 2019 abr 13]. Disponível em: <<https://science.sciencemag.org/content/317/5834/83>>

[3] W. Jull, G Lillemark AM. Turner R. SHARP (Stationary High Altitude Relay Platform) Telecommunications missions and systems. (1985). p. 955-959. [Acesso em 2019 abr 13]. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/234302371_SHARP_Stationary_High_Altitude_Relay_Platform_Telecommunications_missions_and_systems>

[4] Uddin I, et al. A cost effective low power transmission system using WPT technology. 2017. 8th International Conference on Computing, Communication and Networking Technologies (ICCCNT). [Acesso em 2019 mai 05]. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8204057>>

[5] Mahmood A., et al. A Comparative Study of Wireless Power Transmission Techniques. [Internet]. 2014. [Acesso em 2019 abr 30]. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/263243465_A_Comparative_Study_of_Wireless_Power_Transmission_Techniques>.

[6] Autoria Própria

[7] ASTRONOO. Astronoo: O universo em todas suas formas, [Internet]. 2013. Astronomia, Astrofísica, Evolução e Ciências da Terra. [Acesso em 2019 abr 08]. Disponível em: <<http://www.astronoo.com/pt/artigos/espectro-eletromagnetico.html>>.

[8] Leite DO, Prado RJ. Espectroscopia no infravermelho: uma apresentação para o Ensino Médio. Rev. Bras. Ensino Fís., São Paulo, v. 34, n. 2, p. 1-9, [Internet]. 2012. [Acesso em 2019 abr 13] Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1806-11172012000200015&lng=en&nrm=iso>.

[9] Ribeiro JAJ. Engenharia de Micro-ondas - Fundamentos e Aplicações; Érica, 2008.

[10] Tomar A, Gupta S. Wireless power Transmission: Applications and Components. International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), Delhi, Vol. 1, [Internet]. Jul. 2012. [Acesso em 2019 abr 13]. Disponível em: <https://www.academia.edu/5561926/Wireless_power_Transmission_Applications_and_Components>.

[11] Laughton, MA. Electrical engineer's reference book. 16 edição. Editora Newnes, 2002.

[12] Dickinson R, M. Performance of a High-Power, 2.388-GHz Receiving Array in Wireless Power Transmission Over 1.54 km, [Internet]. [Acesso em 2019 dez 05]. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/1123672>>.

[13] Mahmood A., et al. A General Review of different methods for Wireless Power Transmission, [Internet]. [Acesso em 2019 abr 30]. Disponível em: <<http://worldcomp-proceedings.com/proc/p2013/ICW2794.pdf>>.

[14] Summerer L., Purcell O. Concepts for wireless energy transmission via laser. [Internet]. HOLANDA, Noordwijk. [Acesso em 2019 abr 30]. Disponível em: <<https://www.esa.int/gsp/ACT/doc/POW/ACT-RPR-NRG-2009-SPS-ICSOS-concepts-for-laser-WPT.pdf>>.

[15] Shi D., et al. Research on Wireless Power transmission system between satellites, [Internet], 2016. IEEE Wireless Power Transfer Conference (WPTC). [Acesso em 2019 mai 05]. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/7498851>>.

[16] Pendry, J.B. Photonics: Metamaterials in the sunshine. Nat. Mat. 5, 599, [Internet], 2006. [Acesso 2019 ago 2019]. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/6905499_Pendry_JB_Photonics_Metamaterials_in_the_sunshine_Nat_Mat_5_599>

[17] Hand, T. H. Design and applications of frequency tunable and reconfigurable metamaterials. Duke: Dissertação (Doutorado em Filosofia), 2009. [Acesso em 2019 ago 18]. Disponível em: <<https://pdfs.semanticscholar.org/f4c5/7233c60ed16706e221c60efafc142d220e23.pdf>>

[18] Vani H. R. DESIGN AND ANALYSIS OF SQUARE SPLIT RING RESONATOR METAMATERIAL FOR MICROWAVE FREQUENCY RANGE International Journal of Advanced Research in Engineering and Technology (IJARET) vol. 9, Issue 6 – Dec 2018 pp 196-201 [Internet]. [Acesso em 2019 jul 27]. Disponível em: <<http://www.iaeme.com/IJARET/issues.asp?JType=IJARET&VType=9&IType=6>>

[19] IEEE standard definitions of terms for antennas. (1969). IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 17(3), 262–269.

[20] Hosain, M. K., & Kouzani, A. Z. (2013). Design and analysis of efficient rectifiers for wireless power harvesting in DBS devices. 2013 IEEE 8th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA). [Internet] Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/6566448>>

[21] Hawkes A. M., et al. A microwave metamaterial with integrated power harvesting functionality [Internet], 2013. [Acesso em 2019 jul 27]. Disponível em: <<https://doi.org/10.1063/1.4824473>>

[22] Roger, L.L.B. Experiência 1 – Reconhecendo os diversos tipos de antenas – Antena Telescópica [internet], 2019. [Acesso em 2019 nov 11]. Disponível em: <<https://www.ft.unicamp.br/~leobravo/TT501/Kit%20Did%20tico%20de%20Antenas%20-%20Pr%20ticas.pdf>>

[23] https://www.cisco.com/c/pt_br/support/docs/wireless-mobility/wireless-lan-wlan/82068-omni-vs-direct.html

[24] Araújo, N. M. S., Vieira, M. S. Estudo e Simulação de Arranjo de Antenas, [Internet]. Universidade Presbiteriana Mackenzie. [Acesso em: 2019 nov 03]

[25] Antenna Calculator. [Acesso em 2019 abr 30] Disponível em: <<https://www.changpuak.ch/electronics/antenna.php>>

Apêndice 1

Cálculo para definição da frequência de operação da *rectenna*:

```

1      % w => espessura da trilha = 1 mm no texto 'w' e 'c'
2      % a => tamanho do anel, raio no texto 'a'
3      % h => altura da trilha, menor valor, no texto 'h'
4      % g => tamanho do GAP, no texto 'g'
5      % eps relativo ao fr4 = 4.4
6
7 -    e0 = 8.85418781761e-12;
8 -    eps = 4.4 * e0;
9 -    mi_0 = 1.2566e-6;
10 -   h = 0.0001;
11 -   a = 0.04;
12 -   w = 0.001;
13 -   g = 0.0012;
14
15 -   Cg = eps*(w*h/g + ((2*pi()*h)/(log(2.4*h/w))));
16 -   Csurf = (2*h*eps/pi()) * log(4*a/g);
17 -   Cinv = 1/Cg + 1/Csurf;
18 -   C = 1/Cinv;
19
20 -   am = a + w/2;
21 -   L = mi_0*am*(log(8*am/(h+w))-0.5);
22 -   f_0 = 1/(2*pi()*sqrt(L*C))

```