



Sérgio Tiago Silva Araújo

# Transferência de potência sem fios

Fevereiro 2015



UNIVERSIDADE DE COIMBRA



**Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra**

**Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores**

Dissertação de Mestrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores

# **Transferência de potência sem fios**

**Sérgio Tiago Silva Araújo**

**Júri:**

Professor Doutor Henrique José Almeida da Silva (Presidente)

Professor Doutor Mário Gonçalo Mestre Veríssimo Silveirinha (Orientador)

Professora Doutora Maria do Carmo Raposo de Medeiros (Vogal)

**Fevereiro 2015**

# Agradecimentos

*Agradeço de um modo especial ao Prof. Doutor Mário Silveirinha pelo constante acompanhamento, disponibilidade, interesse e apoio que me transmitiu ao longo de todo este trabalho. Agradeço também a todos os elementos do Laboratório de Microondas por toda a ajuda, motivação, conselhos e companhia transmitidos ao longo destes últimos meses.*

*Um profundo agradecimento à minha família, principalmente aos meus pais Conceição e António por todo o esforço, amor, carinho e dedicação com que sempre me presentearam. Sem vós nada disto seria possível.*

*Um agradecimento especial à Filipa, por todo o amor, carinho, companheirismo e apoio incondicional, sem ela tudo seria mais difícil.*

*Por último quero deixar um agradecimento a todos os meus amigos, colegas e companheiros de “guerra” que tive o prazer de conhecer neste meu percurso académico, jamais vos esquecerei.*

*A todos vós, um muito obrigado!*

## Resumo

O grande avanço tecnológico que se foi verificando com o decorrer dos anos com o surgimento de novos equipamentos electrónicos tais como telefones móveis, tablets, laptops, etc., veio despertar um grande interesse na transmissão de energia sem fios, algo que já há muitos anos foi objecto de estudo por parte de Nikola Tesla mas que não obteve bons resultados.

A transferência de energia sem fios pode ser alcançada, no campo próximo, através de ressonâncias magnéticas fortemente acopladas. Contudo, neste tipo de sistemas a antena transmissora está fracamente acoplada ao campo de radiação, de modo que a radiação de campo distante é insignificante e apenas as trocas de energia relevantes são através do campo próximo de acoplamento das antenas transmissora e receptora.

Nesta tese, eu descrevo o desenvolvimento de um novo sistema de transferência de energia sem fios via antenas helicoidais fortemente acopladas alimentadas pelo ponto central. É mostrado que este sistema pode transferir energia com uma eficiência de até 31.24% e com uma distância de até 94 cm quando a antena receptora está conectada a um LED (Light Emitting Diode).

**Palavras-chave:** transmissão de energia sem fios, antenas, adaptação, campo próximo, ressonâncias magnéticas.

# Abstract

The huge technology progress that one has witnessed over the last few decades has created new paradigms for communication and information based on new electronic devices such as mobile phones, tablets and laptops. These developments came to awake a significant interest on wireless power transmission, something that Nikola Tesla had studied in his pioneering works, but with no satisfactory results..

Wireless power transfer can be achieved via strongly coupled magnetic resonances in the near-field. Interestingly, in this type of systems the transmitting antenna is weakly coupled to the radiation field, so that the far-field radiation is negligible and the only relevant exchanges of energy are through near-field coupling of the transmitting and receiving antennas.

In this thesis, I describe the development of a new wireless power transfer via strongly coupled helical antennas fed by the center point. It is shown that this system can transfer energy with an efficiency up to 31.24% and to a distance up to 94 cm when the receiving antenna is connected to a light emitting diode.

**Keywords:** wireless power transmission, antennas, matching, near-field, magnetic resonance.

# Índice

1.1 Motivação.....	1
1.2 Objectivos.....	2
1.3 Organização da Dissertação .....	2
Capítulo 2 – Contextualização .....	3
2.1 Breve Resenha .....	3
2.2 Ressonância Magnética.....	3
2.2.1 Frequência de ressonância e factor de qualidade.....	3
2.3 Matriz-S .....	5
2.4 Considerações sobre efeitos na saúde humana.....	8
2.5 Estado da arte.....	9
Capítulo 3 - Novo sistema de transmissão de potência sem fios.....	11
3.1 Dimensionamento do sistema.....	11
3.2 Simulações com recurso a simulador electromagnético .....	15
3.3 Simulação antena transmissora com antena receptora ligada a um LED .....	23
3.4 Comparação em ambiente de simulação do novo sistema de transmissão de potência sem fios e o proposto pelo MIT.....	25
Capítulo 4 – Resultados.....	31
4.1 Introdução .....	31
4.2 Configuração do sistema e Testes.....	31
4.2.1 Simulação do novo sistema de transferência de potência sem fios alimentando a antena transmissora no ponto central e colocando a carga nas pontas da antena receptora.....	40
4.3 Eficiência e comparações .....	41
Capítulo 5 – Conclusões .....	45
Referências .....	47

# Lista de Figuras

Figura 2.1 – Exemplo de um circuito ressonante RLC série.....	4
Figura 2.2 – Esquema da rede de dois portos.....	5
Figura 2.3 – Rede de dois portos conectada a um gerador e a uma carga.....	6
Figura 2.4 – Sistema do MIT para transferência de potência sem fios.....	10
Figura 3.1 – Representação geométrica de uma antena helicoidal [11].....	12
Figura 3.2 - Representação tridimensional normalizada dos padrões da amplitude linear da potência radiada para o modo normal e para o modo axial.....	13
Figura 3.3 - Representação esquemática de uma antena.....	13
Figura 3.4 - Representação da antena fabricada.....	15
Figura 3.5 – Representação do parâmetro S11 da antena.....	16
Figura 3.6 – Representação da componente imaginária da impedância Z11 da antena.....	16
Figura 3.7 – Representação do diagrama de radiação de potência da antena para a frequência de 12.2 MHz.....	17
Figura 3.8 – Representação do campo magnético à frequência de ressonância de 12.2 MHz.....	17
Figura 3.9 - Representação do sistema em ambiente de simulação.....	18
Figura 3.10 - Representação do coeficiente de reflexão (parâmetro S11) e de transmissão (parâmetro S21) do sistema com as antenas afastadas uma da outra 25cm.....	18
Figura 3.11 - Representação das linhas de campo magnético induzido na antena receptora.....	19
Figura 3.12 - Representação do diagrama de radiação de potência do sistema para a frequência de 12.2 MHz.....	20
Figura 3.13 - Representação dos parâmetros S11 e S21 do sistema com as antenas afastadas 50cm entre si.....	20
Figura 3.14 - Representação das linhas de campo magnético induzido na antena receptora.....	21

Figura 3.15 - Representação do diagrama de radiação de potência do sistema para a frequência de 12.2 MHz.....	21
Figura 3.16 - Representação dos parâmetros S11 e S21 do sistema com as antenas afastadas 75cm entre si.....	22
Figura 3.17 - Representação das linhas de campo magnético induzido na antena receptora.....	23
Figura 3.18 - Representação do parâmetro S11 da antena transmissora.....	24
Figura 3.19 - Representação das linhas de campo magnético no sistema.....	24
Figura 3.20 - Representação do diagrama de radiação de potência do sistema.....	24
Figura 3.21 - Representação do sistema do MIT em ambiente de simulação.....	26
Figura 3.22 - Representação dos parâmetros S11 do sistema proposto pelo MIT e pelo novo sistema desenvolvido, ambos com uma distância entre antenas de 25cm e com portos de 50 Ohm.....	26
Figura 3.23 - Representação dos parâmetros S11 do sistema proposto pelo MIT e pelo novo sistema desenvolvido, ambos com uma distância entre antenas de 25cm e com portos de 50 Ohm.....	27
Figura 3.24 - Representação das linhas de campo magnético no sistema do MIT.....	28
Figura 3.25 - Representação das linhas de campo magnético no novo sistema.....	28
Figura 3.26 - Representação do diagrama de radiação de potência do sistema do MIT.....	28
Figura 3.27 - Representação do diagrama de radiação de potência do novo sistema.....	29
Figura 4.1 – Sistema de adaptação de impedâncias Delta Match.....	32
Figura 4.2 – Representação da curva do parâmetro S11 da antena transmissora na presença da antena receptora com a carga (o LED) ligada nas pontas junto da mesma.....	33
Figura 4.3 – Posição de teste inicial para a medição.....	34
Figura 4.4 – Representação da onda de tensão aos terminais do LED quando as antenas estão juntas.....	35
Figura 4.5 – Representação da onda de tensão aos terminais do LED quando as antenas estão a 25 cm de distância uma da outra.....	35

Figura 4.6 – Representação da onda de tensão aos terminais do LED quando as antenas estão a 50 cm de distância uma da outra.....	36
Figura 4.7 – Representação da onda de tensão aos terminais do LED quando as antenas estão a 75 cm de distância uma da outra.....	36
Figura 4.8 – Representação da onda de tensão aos terminais do LED quando as antenas estão a 94 cm de distância uma da outra.....	37
Figura 4.9 – Representação da curva característica do LED.....	38
Figura 4.10 - Representação da curva do parâmetro S11 da antena transmissora na presença da antena receptora com a carga (o LED) ligada nas extremidades da mesma.....	30



## Lista de Tabelas

Tabela 3.1 – Determinação dos parâmetros para a construção das bobinas.....	14
Tabela 4.1 - Determinação da potência média aos terminais do LED para as variadas distâncias.....	39
Tabela 4.2 – Determinação da largura de banda para cada distância de teste.....	39
Tabela 4.3 – Determinação da eficiência experimental e simulada para cada distância de teste...	41



# Glossário

<b>AC</b>	Alternate Current
<b>CST</b>	Computer Simulation Technology
<b>DC</b>	Direct Current
<b>DEEC</b>	Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores
<b>EMF</b>	Electromagnetic Field
<b>ICNIRP</b>	International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection
<b>IEEE</b>	Institute of Electrical and Electronic Engineers
<b>IT</b>	Instituto de Telecomunicações
<b>LED</b>	Light Emitting Diode
<b>MIT</b>	Massachusetts Institute of Technology
<b>OMS</b>	Organização Mundial de Saúde
<b>RC</b>	Acoplamento Ressonante
<b>RF</b>	Radio Frequency
<b>RT</b>	Transferência Radiativa
<b>TI</b>	Transferência Indutiva
<b>VNA</b>	Vector Network Analyzer



# Capítulo 1 - Introdução

## 1.1 Motivação

A transmissão de potência sem fios suscitou recentemente bastante interesse no mundo científico devido ao grande avanço tecnológico que se foi verificando (aparecimento de dispositivos electrónicos, como por exemplo, telemóveis, computadores portáteis, tablets, robots, etc.) e vários foram os investigadores que começaram a investigar e a tentar aprofundar o sistema que Nikola Tesla [1] no início do século XX descobriu para transmitir potência sem fios, mas que não teve grande sucesso devido aos indesejados campos eléctricos de grande intensidade que eram produzidos.

Existem três tipos de transmissão de potência sem fios: Transferência Radiativa (RT), Transferência Indutiva (TI) e Acoplamento Ressonante (RC). A Transferência Radiativa sendo perfeitamente adequada para a troca de informação tem um grande problema para este tipo de transferência de potência, pois apenas pode transferir potências muito baixas já que a maioria da energia é dissipada no espaço aberto e a eficiência da transferência de potência é bastante baixa se a radiação for omnidireccional. Por outro lado, no caso de radiação unidireccional é necessário existir uma linha ininterrupta de visão e tem efeitos prejudiciais ao ser humano. A Transferência Indutiva por sua vez, ao contrário da Transferência Radiativa, pode transferir potências muito altas mas em distâncias pequenas (poucos centímetros). Por último, o Acoplamento Ressonante pode transferir potências a médias distâncias (alguns metros) [2].

Recentemente um grupo de investigadores do Massachusetts Institute of Technology (MIT) propôs um novo esquema baseado em ressonâncias magnéticas fortemente acopladas [3], que representa um grande avanço para a transferência de potência a distâncias intermédias. A transferência de energia implementada desta maneira pode ser omnidireccional e eficiente com pequenas interferências e baixas perdas em objectos ambientais, independentemente da geometria do espaço circundante do sistema.

Tendo por base esse sistema seria interessante criar um novo modelo para transferir energia sem fios, utilizando o mesmo princípio de funcionamento.

## **1.2 Objectivos**

O objectivo principal desta tese de mestrado foi o desenvolvimento de um novo sistema para transferir energia sem fios.

Efectuámos um estudo do sistema anteriormente descrito e desenvolvemos um novo modelo equivalente para transferir potência via ressonâncias magnéticas fortemente acopladas. Este novo modelo assenta no mesmo modo de funcionamento, diferindo a estrutura, a frequência de ressonância e a eficiência, em relação ao modelo proposto pelo grupo de investigadores do MIT. Os parâmetros do modelo foram obtidos por medições, e o modelo foi justificado com base em simulações feitas utilizando o software CST Microwave Studio 2014 (Computer Simulation Technology) e em experiências.

## **1.3 Organização da dissertação**

A dissertação está organizada em cinco capítulos principais. Neste primeiro capítulo de introdução onde nos encontramos é feita uma pequena motivação sobre o assunto que iremos abordar e explicamos qual o nosso objectivo com a realização desta tese. No capítulo dois é feita a contextualização do trabalho desenvolvido, o estado da arte, são apresentados alguns conceitos e definições, e são apresentadas considerações sobre o impacto do nosso projecto na saúde humana. No capítulo três, explicamos como foi dimensionado o nosso sistema, onde identificamos todos os parâmetros com recurso ao simulador electromagnético CST Microwave Studio 2014 (Computer Simulation Technology), nomeadamente os parâmetros de dispersão do sistema na frequência de ressonância e a monitorização do campo distante, e as diferentes simulações realizadas. No capítulo 4, todos os resultados obtidos experimentalmente são mostrados e comparados com os obtidos nas simulações. Por último, no capítulo cinco são destacadas conclusões do trabalho realizado e enunciadas algumas sugestões para trabalho futuro.

# Capítulo 2 - Contextualização

## 2.1 Breve resenha

Na secção 2.2 é descrito o que é uma ressonância magnética que é um dos conceitos principais utilizados na realização deste trabalho, juntamente com a frequência de ressonância e o factor de qualidade explicados na secção 2.2.1. Para percebermos como se conseguem obter os coeficientes de reflexão e de transmissão utilizando a matriz-S, bem como efectuar o cálculo da eficiência do nosso sistema utilizando os parâmetros da matriz-S, na secção 2.3 essa matriz é introduzida. Tratando-se de um sistema em que há radiação electromagnética a propagar-se pelo ar é importante verificar se existem ou não implicações na saúde humana, o que é discutido na secção 2.4. Termina-se com a secção 2.5 onde se dá a conhecer o estado da arte da transferência de potência sem fios.

## 2.2 Ressonância magnética

A ressonância é um fenómeno que ocorre na natureza em diferentes formas. Em geral, a ressonância envolve energia oscilando entre dois modos. Um bom exemplo disso mesmo é o típico pêndulo mecânico em que a energia oscila entre a forma de energia cinética e energia potencial. Em física, ressonância é a tendência de um sistema a oscilar em máxima amplitude em certas frequências conhecidas como frequências de ressonância ou frequências naturais do sistema. Num sistema em ressonância, é possível ter uma grande concentração de energia armazenada enquanto existe apenas uma fraca excitação no sistema. Esse acumular de energia ocorre se a taxa de energia injectada no sistema for maior que a taxa de energia dissipada pelo sistema.

### 2.2.1 Frequência de ressonância e factor de qualidade

O comportamento de um ressoador isolado pode ser descrito por dois parâmetros fundamentais, a frequência de ressonância  $\omega_0$  e a taxa de perdas intrínsecas  $\Gamma$ . A relação entre estes dois parâmetros define o factor de qualidade  $Q$  do ressoador, que é um valor que mostra o quão bem o ressoador armazena energia.

Na figura 2.1 é mostrado um circuito electromagnético constituído por uma resistência, um condensador e um indutor.

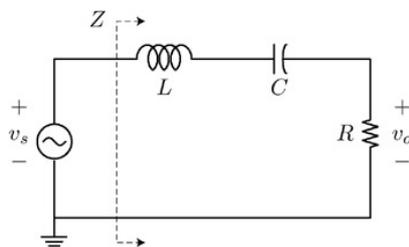


Figura 2.1 – Exemplo de um circuito ressonante RLC série.

Neste circuito, a energia oscila à frequência de ressonância entre o condensador (a energia armazenada no campo eléctrico) e o indutor (a anergia armazenada no campo magnético) e é dissipada na resistência. A sua frequência de ressonância é dada por

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (1)$$

e o factor de qualidade é

$$Q = \frac{\omega_0}{2\Gamma} = \sqrt{\frac{L}{C}} \frac{1}{R} = \frac{\omega_0 L}{R} \quad (2)$$

ou

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{1}{Q} \quad (3)$$

Esta expressão para Q [eq. (2)] mostra que diminuindo as perdas no circuito aumenta o factor de qualidade do sistema.

Em sistemas para transferência de potência sem fios, o factor de qualidade tem de ser muito elevado para se poder transferir eficientemente energia. Os ressoadores com alto factor de qualidade são geralmente constituídos com condutores e componentes com baixas perdas de absorção, baixas perdas de radiação e com estreitas larguras de frequência de ressonância. Por último, os ressoadores têm de ser projectados para reduzir as suas interações com objectos estranhos não ressonantes.

## 2.3 Matriz de dispersão

O esquema de transmissão de potência sem fios pode ser analisado com a teoria da rede de dois portos, que está formulada na figura 2.2. Algumas redes podem ser caracterizadas por vários parâmetros do circuito equivalente, tais como a matriz de transferência, a matriz de impedâncias em (4) e a matriz de dispersão (matriz-S) em (5).

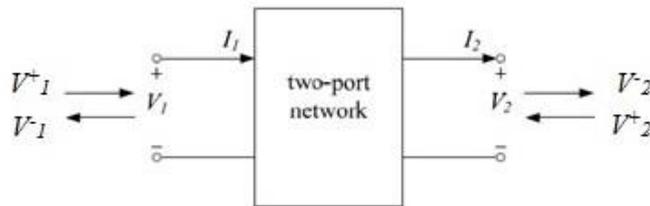


Figura 2.2 – Esquema da rede de dois portos.

A matriz de transferência é dada por (4)a, e a matriz de impedâncias por (4)b

$$\text{a) } \begin{bmatrix} V_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_2 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad \text{b) } \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ -I_2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

onde  $V_1$  e  $V_2$  são as tensões de entrada e de saída da rede e similarmente  $I_1$  e  $I_2$  são as correntes de entrada e de saída, respectivamente, com direcção especificada na figura 2.2. A matriz-S relaciona as ondas reflectidas ( $V_{1,2}^-$ ) com as ondas incidentes ( $V_{1,2}^+$ ) da rede de dois portos.

$$\begin{bmatrix} V_1^- \\ V_2^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1^+ \\ V_2^+ \end{bmatrix} \quad (5)$$

Na análise de circuitos eléctricos, as matrizes de transferência e de impedâncias são bastante utilizadas, mas a medição dos respectivos coeficientes torna-se difícil a altas frequências. Em vez disso, a matriz-S é preferida devido à existência de analisadores vectoriais de rede, que podem calcular os parâmetros da matriz-S numa larga gama espectral. Utilizando o conceito da rede de dois portos, a eficiência da transferência de potência entre o gerador e a carga pode ser calculada.

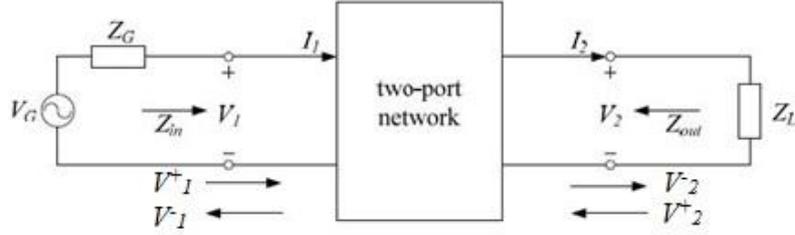


Figura 2.3 – Rede de dois portos conectada a um gerador e a uma carga.

A partir da análise da matriz-S, as expressões para as tensões e correntes em termos das variáveis das ondas podem ser como em (6).

$$\begin{aligned}
 V_1 &= V_1^+ + V_1^- & V_2 &= V_2^+ + V_2^- \\
 I_1 &= \frac{1}{Z_0}(V_1^+ - V_1^-) & I_2 &= \frac{-1}{Z_0}(V_2^+ - V_2^-)
 \end{aligned} \tag{6}$$

onde  $Z_0$  é o valor da impedância de referência (normalmente escolhido para ser  $50\Omega$ ). Considerando a figura 2.3 e [eq. (6)] é possível definir as equações da matriz-S como (7).

$$\begin{aligned}
 V_1 &= Z_{in} I_1 & V_1^- &= \Gamma_{in} V_1^+ \\
 & & & \Leftrightarrow \\
 V_2 &= Z_L I_2 & V_2^+ &= \Gamma_L V_2^-
 \end{aligned} \tag{7}$$

onde  $Z_{in}$  é a impedância de entrada na rede e  $\Gamma_{in}$  e  $\Gamma_L$  são os coeficientes de reflexão dados por (8).

$$\begin{aligned}
 \Gamma_{in} &= \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0} \\
 \Gamma_L &= \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0}
 \end{aligned} \tag{8}$$

A partir das equações (6), (7) e (8) é possível definir os coeficientes de reflexão em termos dos parâmetros da matriz-S.

$$\Gamma_{in} = S_{11} + \frac{S_{12} S_{21} \Gamma_L}{1 - S_{22} \Gamma_L} \tag{9}$$

Seguindo o formalismo da referência [8], é útil definir os coeficientes de reflexão:

$$\Gamma_{out} = S_{22} + \frac{S_{12}S_{21}\Gamma_G}{1 - S_{11}\Gamma_G} \quad \Gamma_G = \frac{Z_G - Z_0}{Z_G + Z_0} \quad (10)$$

Define-se a impedância de saída  $Z_{out}$  como sendo:

$$\Gamma_{out} = \frac{Z_{out} - Z_0}{Z_{out} + Z_0} \quad (11)$$

A eficiência da transferência de energia sem fios pode ser deduzida através de  $P_{in}$  (potência entregue pelo gerador à rede de dois portos) e  $P_{out}$  (potência de saída vinda da rede de dois portos para a carga). Do sistema da figura 2.3, pela referência [8] a potência de entrada e de saída podem ser definidas como

$$P_{in} = \frac{1}{2} \frac{|V_G|^2 R_{in}}{|Z_{in} + Z_G|^2} \quad (12)$$

$$P_{out} = \frac{1}{2} \frac{|V_G|^2 R_L |Z_{21}|^2}{|(Z_{11} + Z_G)(Z_{out} + Z_L)|^2}$$

onde  $R_{in} = \text{Re}\{Z_{in}\}$  e  $R_L = \text{Re}\{Z_L\}$ . “Re” significa parte real do número complexo. A partir de (12), a condição necessária para que a potência entregue pelo gerador ao sistema seja máxima é dada por (13).

$$Z_{in} = Z_G^* \quad (13)$$

Similarmente a máxima potência de saída que poderá ser entregue à carga acontece quando  $Z_L$  satisfaz a seguinte condição em (14).

$$Z_L = Z_{out}^* \quad (14)$$

Então em termos dos parâmetros-S, a eficiência da transferência de energia sem fios de acordo com a referência [8] pode ser escrita como:

$$\eta_1 = \frac{(1 - |\Gamma_G|^2) |S_{21}|^2 (1 - |\Gamma_L|^2)}{|(1 - S_{11}\Gamma_G)(1 - S_{22}\Gamma_L) - S_{12}S_{21}\Gamma_G\Gamma_L|^2} \quad (15)$$

Aqui, se a impedância do gerador e da carga estão adaptadas com a impedância de referência (i.e.  $Z_G = Z_L = Z_0$ ), então a partir de (10) e (11) os coeficientes de reflexão podem ser escritos como se segue:

$$\Gamma_L = \Gamma_G = 0 \text{ e } \Gamma_{in} = S_{11}, \Gamma_{out} = S_{22} \quad (16)$$

Substituindo (16) em (15) a fórmula da eficiência reduz-se a:

$$\eta_1 = |S_{21}|^2 \quad (17)$$

## 2.4 Considerações sobre efeitos na saúde humana

Uma das grandes questões sobre os sistemas de transferência de energia sem fios usando ressonâncias magnéticas fortemente acopladas relaciona-se com o facto de poderem ou não ser prejudiciais à saúde. Provavelmente esta questão surge pelo facto de as pessoas pensarem que ao transferir a energia sem fios a “electricidade anda pelo ar” e que isso possa afectar a sua saúde estando em contacto com grandes e perigosos campos electromagnéticos.

Obviamente que não iríamos criar um sistema em que puséssemos em risco a saúde dos seres humanos. Como o nosso sistema funciona com ressonâncias magnéticas, usa a oscilação dos campos magnéticos para mediar a troca de energia sem fios. Dessa forma os campos eléctricos e magnéticos parasitas podem ser mantidos abaixo dos limites de segurança estabelecidos e que regulam todos os dispositivos electromagnéticos, tais como por exemplo, os telemóveis, os transmissores rádio, os routers sem fios, etc. O alto factor de qualidade deste tipo de sistema tem baixas taxas de perdas e portanto pode armazenar energia eficientemente e transferi-la a médias distâncias com uma grande eficiência, mesmo quando a magnitude dos campos magnéticos é muito pequena.

Com base em provas científicas sobre o impacto dos campos electromagnéticos na saúde humana, foram determinados limites de segurança no que toca à exposição humana a radiação electromagnética. É esperado que em breve a Organização Mundial de Saúde (OMS) crie uma regulamentação guia para a exposição humana aos campos electromagnéticos, mas enquanto isso não acontece a OMS recomenda que sejam seguidas as directrizes de exposição humana a radiação electromagnética determinados pelo *Institute of Electrical and Electronic Engineers* (IEEE) e pela *International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection* (ICNIRP).

Como podemos verificar, a regulamentação guia para a exposição humana aos campos electromagnéticos do IEEE [5] e do ICNIRP [6] são semelhantes:

*“The main objective of this publication is to establish guidelines for limiting EMF (electromagnetic field) exposure that will provide protection against known adverse health*

*effects. An adverse health effect causes a detectable impairment of the health of the exposed individual or of his or her offspring; a biological effect on the other hand, may or may not result in an adverse health effect.” [ICNIRP]*

*“The purpose of this standard is to provide exposure limits to protect against established adverse health effects to human health induced by exposure to RF (radio frequency) electric, magnetic, and electromagnetic fields over the frequency range of 3 kHz to 300 GHz.” [IEEE]*

Com base nos estudos e na literatura científica desta área, tanto o IEEE como o ICNIRP concluíram que não há evidências de como a exposição humana aos campos electromagnéticos possa causar cancro. Porém a exposição a radiação electromagnética pode aumentar a temperatura do corpo humano, aquecer os tecidos do corpo, ou até mesmo estimular os tecidos musculares e nervosos. Por isso, o IEEE e o ICNIRP recomendam limitar a exposição dos seres humanos a intensidades de campo electromagnético bem abaixo aqueles que provocam os efeitos referidos acima. Nesse sentido, projectámos o nosso sistema para funcionar de acordo com estas directrizes, ou seja, na gama de frequências até ao valor máximo de 300 GHz.

## **2.5 Estado da arte**

O novo modelo referido na secção 1.1 veio despertar o interesse sobre este tema e consequentemente vários estudos foram feitos para tentar melhorar a eficiência de transferência de energia sem fios.

Para termos noção o princípio fundamental deste novo esquema é que dois objectos ressonantes com a mesma frequência de ressonância tendem a trocar energia eficientemente, dissipando pouca energia na presença de objectos não ressonantes. Este esquema transfere 60W de potência com uma frequência de ressonância de 9.9MHz, com uma eficiência ponta-a-ponta do sistema de 15% e com uma eficiência de acoplamento RF-to-RF de 40% a uma distância de 2m o que é sensivelmente quase mais que três vezes o diâmetro das bobinas. Facilmente percebemos que à medida que a distância entre a bobina fonte e a bobina receptora aumenta a eficiência diminui.

Hoje em dia, os modelos mais avançados e comercializados são os da Witricity, empresa essa fundada e liderada pelo líder da equipa de investigadores do MIT que propuseram o modelo acima falado, o Doutor Marin Soljačić. Witricity já tem várias parcerias com empresas líderes no

mercado da tecnologia, como é o caso da Intel Corporation, a TDK, a Toyota, etc., e está a entrar com toda a força no mercado, com modelos para carregamento de baterias de automóveis, para carregamento de telemóveis, etc.

A nossa proposta para a transferência de potência sem fios vem juntar-se a outros tipos de sistemas, o que mostra que existem várias alternativas e formas de dimensionar o sistema utilizando o mesmo princípio de funcionamento.

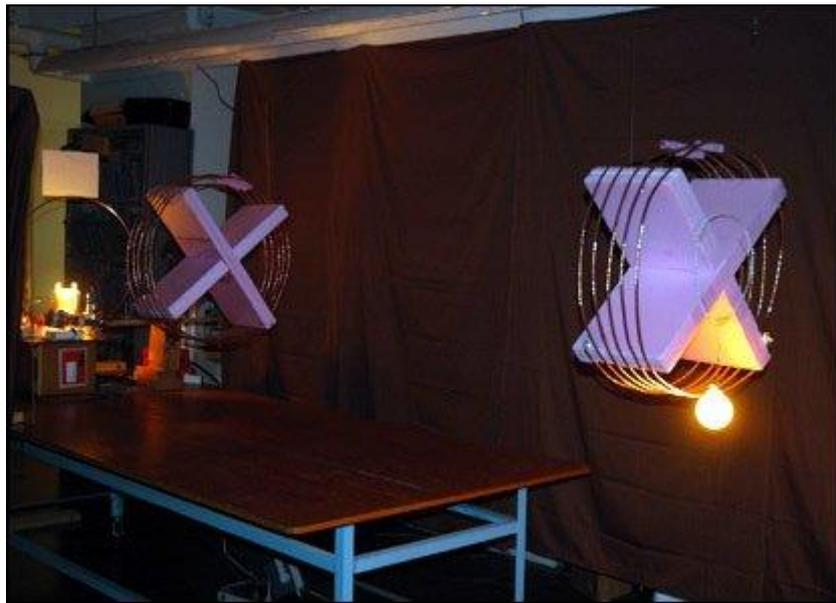


Figura 2.4 – Sistema do MIT para transferência de potência sem fios

# Capítulo 3 - Novo sistema de transmissão de potência sem fios

## 3.1 Dimensionamento do sistema

Este sistema surge da ideia de querer tentar criar um sistema diferente do referido na secção 2.5. Com base nesse mesmo sistema, decidimos descartar os dois loops que estavam ligados ao gerador e à carga, efectuando a ligação do gerador e da carga directamente nas antenas helicoidais transmissora e receptora nos seus pontos centrais. Isto deve-se ao facto de o Vector Network Analyzer (VNA) disponível no Laboratório de Microondas ter uma gama de frequências dos 10 MHz aos 20 GHz e a frequência usada no sistema do MIT ser de 9.9 MHz. Alimentando-as então nos seus pontos centrais a frequência de ressonância aumenta para os 12.2 MHz, pelo que já se enquadra na gama de frequências do nosso VNA. Para simular computacionalmente o comportamento desta antena e do sistema usou-se o software de simulação electromagnética CST Microwave Studio <sup>TM</sup> [9] que permite uma simulação rápida e precisa de problemas a alta-frequência. Este software permite resolver numericamente as equações de Maxwell usando o método das diferenças finitas no domínio do tempo, levando à caracterização electromagnética completa da estrutura simulada.

No contexto do nosso trabalho seleccionaram-se algumas das funcionalidades deste programa: cálculo dos parâmetros de dispersão do sistema na frequência [10], denominados parâmetros S e monitorização do campo distante.

O estudo dos parâmetros S (discutido na secção 2.3) é extremamente importante na análise do nosso esquema de transmissão de energia sem fios, pois como se trata de uma rede de dois portos teremos o valor de  $S_{11}$  e de  $S_{21}$ , que é o coeficiente de reflexão, ou seja, define a quantidade de potência devolvida ao gerador em relação à potência incidente no porto 1 e o coeficiente de transmissão, que define a razão entre a potência recebida pelo receptor (porto 2) e a potência enviada pelo transmissor (porto1), respectivamente, quando o sistema é terminado com uma carga adaptada.

Interessa portanto que à frequência desejada, 12.2 MHz o valor do parâmetro  $S_{11}$  seja bastante negativo em dB, para que seja entregue o máximo de potência transmitida pela antena transmissora à antena receptora e que o valor do parâmetro  $S_{21}$  seja muito próximo de 0 dB para que seja recebida o máximo de potência na antena receptor enviada pela antena transmissora.

Como testamos o nosso sistema com as antenas a variadas distâncias uma da outra, a monitorização dos valores  $S_{11}$  e  $S_{21}$  na frequência de ressonância é muito importante para se ter noção da eficiência do nosso sistema (referido na secção 2.3).

A monitorização do campo distante é útil para avaliar a polarização das antenas, bem como da directividade das mesmas, e para saber os modos de oscilação que determinam a radiação das ondas electromagnéticas.

O nosso sistema tem uma resposta muito idêntica ao de uma antena helicoidal, pelo que para se perceber os resultados convém compreender como esta antena se comporta.

Uma antena helicoidal tem o seguinte aspecto [11]:

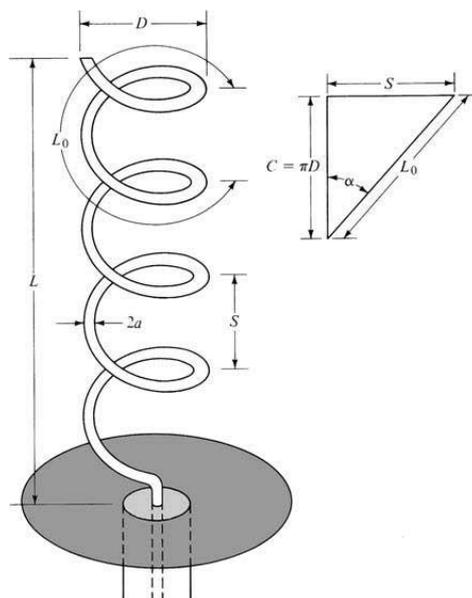


Figura 3.1 – Representação geométrica de uma antena helicoidal [11].

onde  $N$  representa o número de espiras,  $D$  o diâmetro e  $S$  o espaçamento entre cada volta. O comprimento total da antena é  $L = N S$  enquanto que o comprimento total do condutor é  $L_n = N L_0 = N \sqrt{S^2 + C^2}$  onde  $L_0 = \sqrt{S^2 + C^2}$  é o comprimento do condutor entre cada volta e  $C = \pi D$  é a circunferência da hélice.

A antena helicoidal pode operar em diferentes modos, no entanto os dois principais são o modo normal (broadside) e o modo axial (end-fire). Um diagrama tridimensional representativo com os padrões da amplitude linear da potência radiada no modo normal e axial é mostrada na figura 3.2 com base na referência [11]:

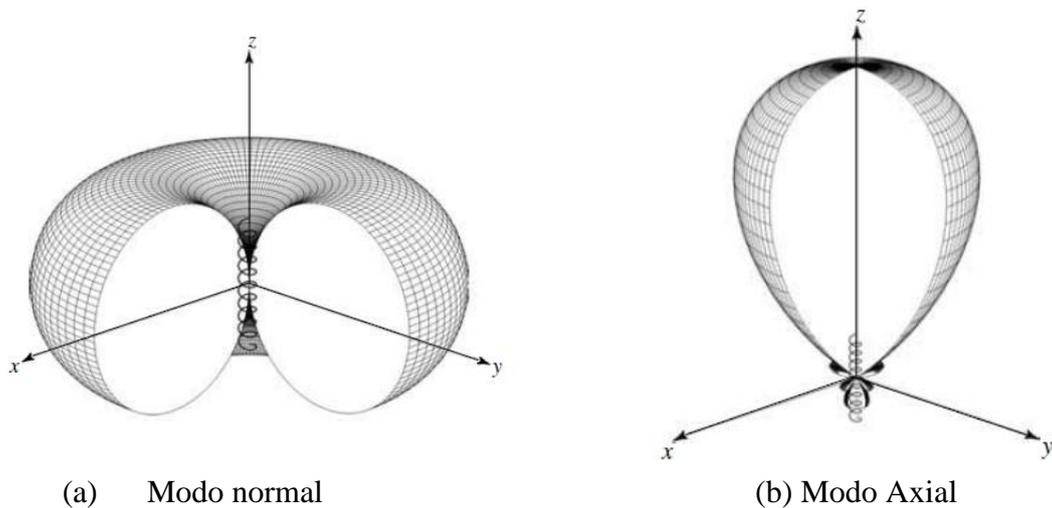


Figura 3.2 - Representação tridimensional normalizada dos diagramas de potência radiada para o modo normal e para o modo axial.

O nosso sistema vai ter um diagrama de radiação muito idêntico ao do modo normal da antena helicoidal, representado na figura 3.2 que por sua vez é também muito idêntico ao diagrama de radiação de um dipolo  $\frac{\lambda}{2}$ , e mais à frente justificaremos o porquê de ser assim.

A estrutura da antena está de acordo com o seguinte esquema:

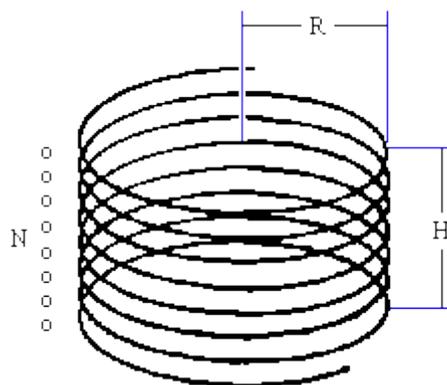


Figura 3.3 - Representação esquemática de uma antena.

Para proceder à construção deste modelo foi feito um estudo aprofundado ao sistema proposto pelo MIT tendo em vista obter vários parâmetros para construir as antenas para a transmissão de energia sem fios. Ambas as antenas são feitas com fio de cobre pois é um

excelente condutor eléctrico, e à frequência que o sistema vai operar apresenta perdas muito residuais. Com base na referência [3], definimos os valores para a construção das antenas, os quais são mostrados na tabela seguinte:

<b>Parâmetros das duas antenas helicoidais idênticas</b>	
R (Raio)	30 cm
H (Altura)	20 cm
N (Número de voltas)	5.25
a (Diâmetro da espessura do fio de cobre)	4.5 mm

Tabela 3.1 – Determinação dos parâmetros para a construção das antenas.

Como carga para colocar na antena receptora foi escolhido um LED (Light Emitting Diode) de 5mm e cor vermelha [12].

O protótipo desta antena foi realizado com recursos disponíveis pelo IT/DEEC (todos os procedimentos descritos em baixo foram realizados duas vezes, visto serem feitas 2 réplicas):

1. Corte do fio de cobre de 4.5mm de espessura com o tamanho de 9.896m de comprimento para construir a antena.
2. Enrolamento do fio em volta de uma estrutura em madeira produzida propositadamente para dar estabilidade mecânica à antena.
3. Corte no ponto central da antena para ser colocada a alimentação/carga.

No final de fabricada a antena tinha o seguinte aspecto:



Figura 3.4 - Representação da antena fabricada

### 3.2 Simulações com recurso a simulador electromagnético

Como foi dito anteriormente foram efectuados estudos com o simulador electromagnético CST e nesta secção vamos analisar os resultados obtidos. Foram feitas diversas simulações, tanto com uma única antena, como com o sistema completo a variadas distâncias para se observar a resposta em frequência do valor do coeficiente de reflexão (parâmetro  $S_{11}$ ), do coeficiente de transmissão (parâmetro  $S_{21}$ ) e o diagrama de radiação. O tratamento de algumas figuras foi efectuado utilizando o software Wolfram Mathematica 9 [13].

A primeira simulação realizada foi a de uma única antena helicoidal alimentada pelo ponto central por um porto de  $50 \Omega$ . O resultado do seu coeficiente de reflexão (parâmetro  $S_{11}$ ) está ilustrado na figura 3.1:

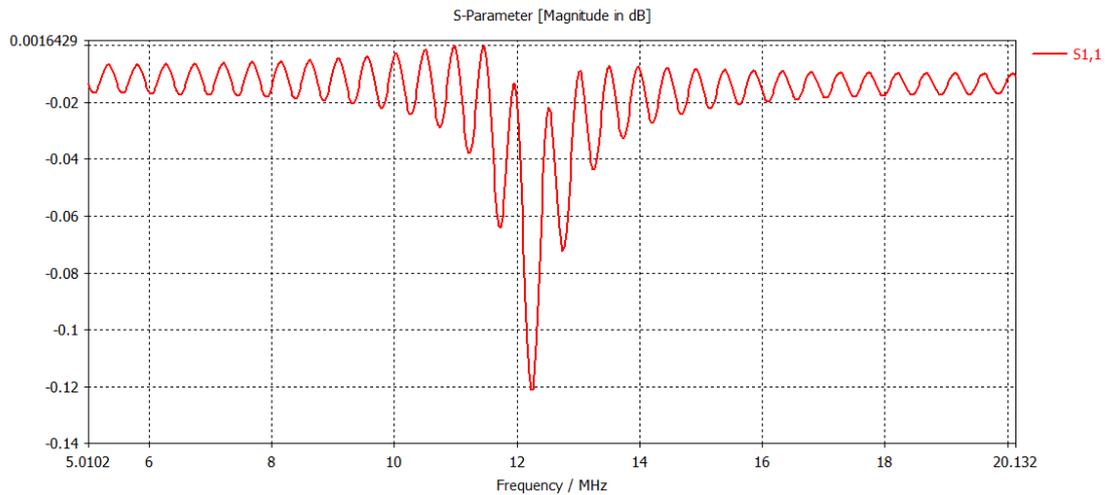


Figura 3.5 – Representação do parâmetro  $S_{11}$  da antena.

A antena tem uma ressonância com um factor de qualidade muito baixo à frequência de aproximadamente 12.2 MHz, derivado da impedância interna do gerador não estar adaptada à impedância da antena. De facto, da análise da componente imaginária do parâmetro  $Z_{11}$  (auto-impedância da antena) podemos confirmar que existe mesmo uma ressonância nessa frequência, já que a parte imaginária atravessa a origem e a parte real do parâmetro  $Z_{11}$  nessa mesma ressonância tem o valor de  $0.337 \Omega$ .

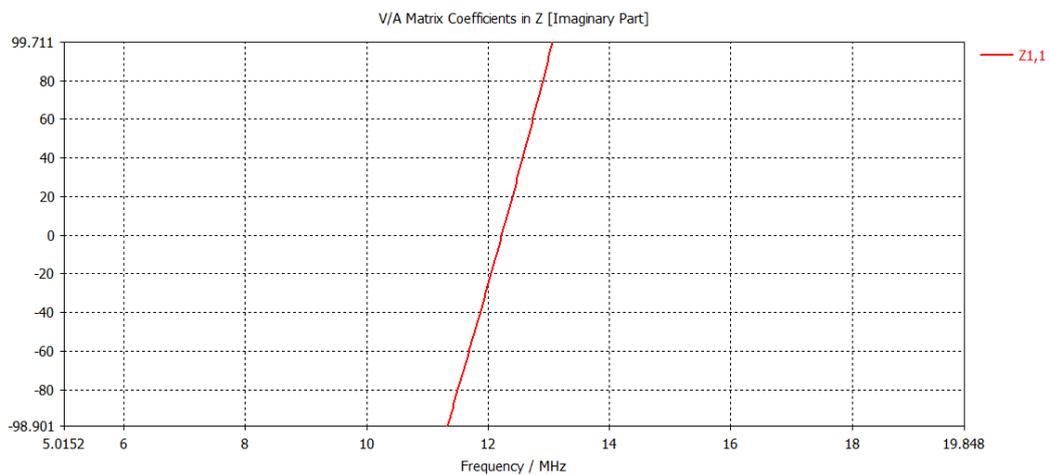


Figura 3.6 – Representação da componente imaginária da impedância  $Z_{11}$  da antena.

Em relação ao diagrama de radiação desta antena, o resultado é muito idêntico ao diagrama de radiação de uma antena helicoidal como foi referido anteriormente. Teoricamente o diagrama de radiação de potência deveria de ser mais parecido com o do modo axial da antena helicoidal,

pois interessa-nos que a direcção da radiação seja a do eixo da antena mas tal não acontece devido à dimensão da estrutura pois o comprimento total da antena ( $L_0$ ) é de 9.9 m, e à frequência de ressonância de 12.2 MHz, o comprimento de onda ( $\lambda$ ) é 24.6 m, o que é muito maior que o comprimento total da antena, pelo que estes valores estão enquadrados na condição de operação no modo normal,  $L_0 \ll \lambda_0$ . Eis o diagrama de radiação de potência da antena:

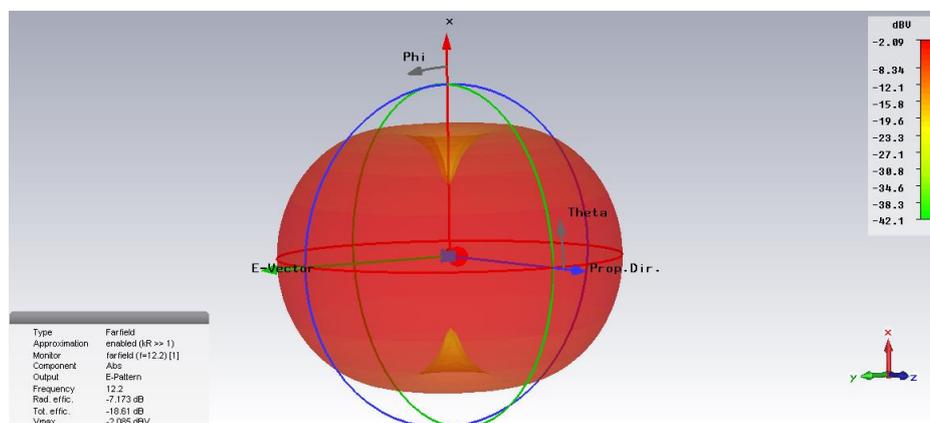


Figura 3.7 – Representação do diagrama de radiação de potência da antena para a frequência de 12.2 MHz.

Pela figura 3.7 podemos inferir que o campo electromagnético é fortemente reactivo e é dominado pelo campo próximo, já que a antena praticamente não radia, devido à desadaptação de impedâncias discutida antes.

Quanto as linhas de campo magnético obtemos a seguinte figura:

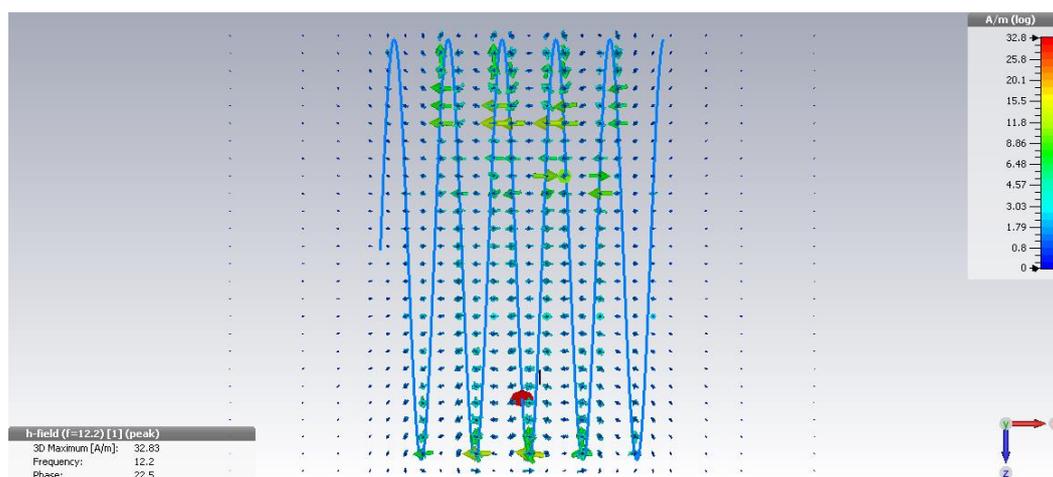


Figura 3.8 – Representação do campo magnético à frequência de ressonância de 12.2 MHz.

A componente do campo magnético da antena transmissora que é predominante é a  $H_x$ , ou seja, a componente na direcção axial pelo que este campo magnético vai gerar uma corrente na antena receptora, sendo possível com uma carga ligada a esta antena receptora receber essa corrente.

Finalizada a análise da antena transmissora estamos em condições de proceder à análise do sistema completo, a várias distâncias e verificar os coeficientes de reflexão (parâmetro  $S_{11}$ ) e transmissão (parâmetro  $S_{21}$ ), a eficiência de transmissão de energia, a polarização e os campos eléctrico e magnético. Estabelecemos como ponto de partida, a distância entre a antena transmissora e a antena receptora como 25 cm e variamos a distância de transmissão em múltiplos de 25 cm até a eficiência de transmissão ser quase nula.

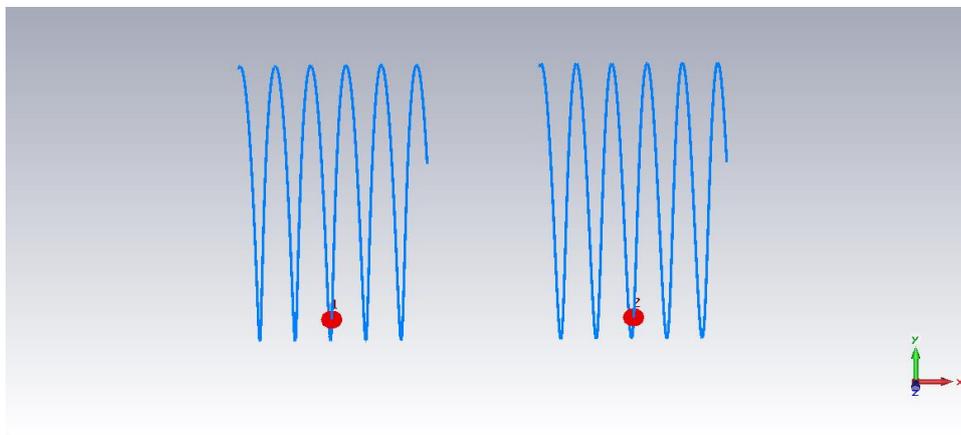


Figura 3.9 - Representação do sistema em ambiente de simulação.

A figura mostra o sistema completo utilizado nas simulações, em que a vermelho vemos os portos de  $50 \Omega$  e a azul as antenas com as características referidas acima.

Começando então pela simulação do sistema com as antenas transmissora e receptora a 25 cm de distância uma da outra, procedemos à análise dos coeficientes de reflexão (parâmetro  $S_{11}$ ) e transmissão (parâmetro  $S_{21}$ ), cujos seus gráficos estão representados na figura seguinte:

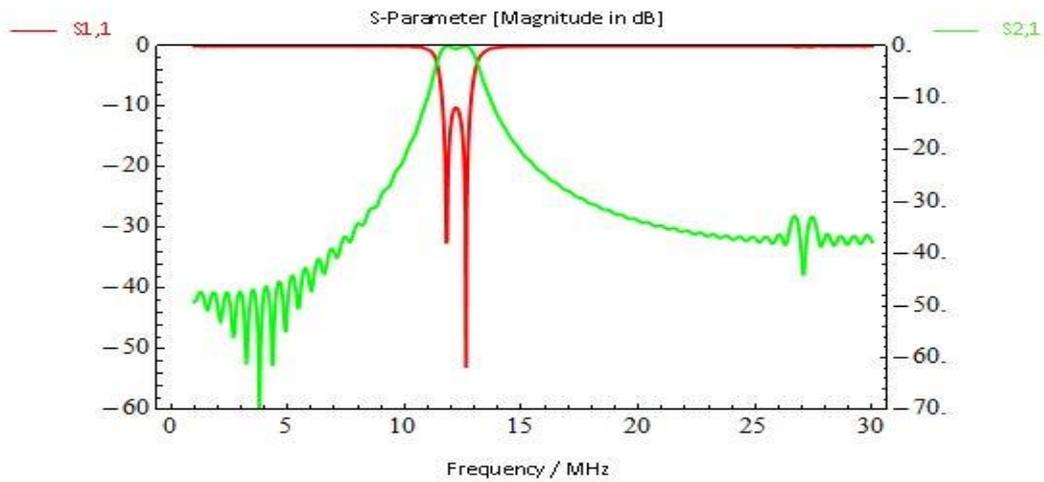


Figura 3.10 - Representação do coeficiente de reflexão (parâmetro  $S_{11}$ ) e de transmissão (parâmetro  $S_{21}$ ) do sistema com as antenas afastadas uma da outra 25cm.

Existem dois picos bem definidos no parâmetro  $S_{11}$ , resultantes da hibridização das ressonâncias individuais de cada antena, sendo o mais forte aproximadamente na frequência de ressonância de 12.2 MHz com um valor de mais de -50 dB. No parâmetro  $S_{21}$  verificamos que o valor à frequência de ressonância é aproximadamente 0 dB, o que significa que praticamente toda a energia que a antena transmissora transmite é recebida pela carga (neste caso de simulação pelo porto de 50  $\Omega$ ), ou seja, o sistema com as antenas a esta distância apresenta uma eficiência de transmissão muito próxima dos 99.8 %. Temos então um sistema robusto, com perdas muito residuais e um factor de qualidade a -3 dB de aproximadamente 7.22.

Quanto à direcção do campo magnético nas antenas, podemos verificar que existe uma forte componente axial do campo magnético  $H_x$  da antena transmissora induzido na antena receptora que gera uma corrente na mesma.

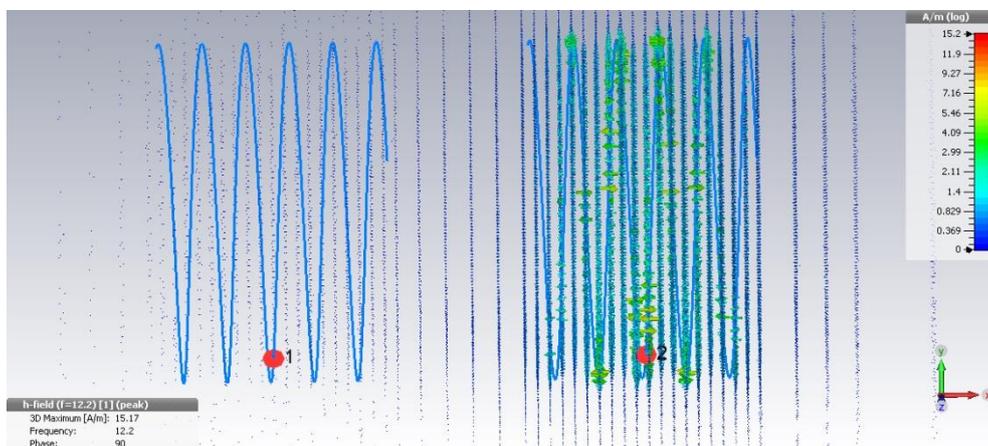


Figura 3.11 - Representação das linhas de campo magnético induzido na antena receptora

A componente absoluta do diagrama de radiação de potência do sistema é muito semelhante ao da antena transmissora, apresentado atrás. Tem a mesma forma idêntica ao da antena helicoidal no modo normal e da antena de dipolo e como podemos verificar pela figura seguinte, no campo próximo tem um valor máximo de  $-6.47$  dBV (tendo uma excitação de  $V_{gerador} = 1$  V) o que é sensivelmente mais baixo que o anterior.

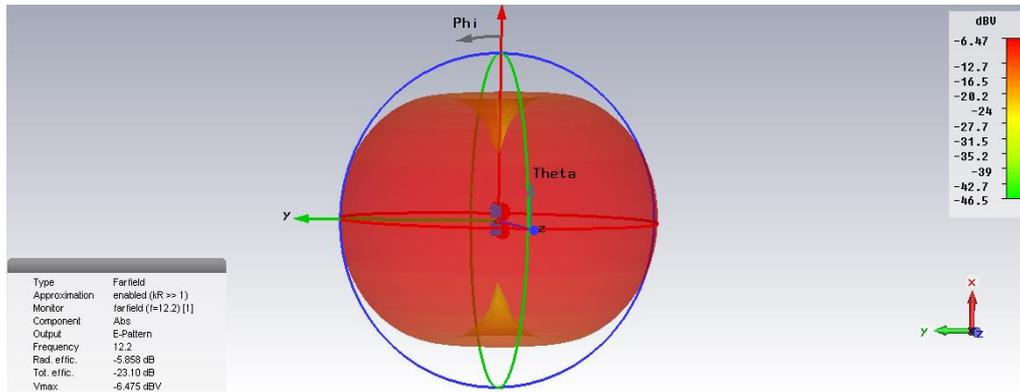


Figura 3.12 - Representação do diagrama de radiação de potência do sistema para a frequência de 12.2 MHz.

De seguida utilizou-se uma distância entre as duas antenas de 50 cm e eis os resultados obtidos na seguinte sucessão de figuras.

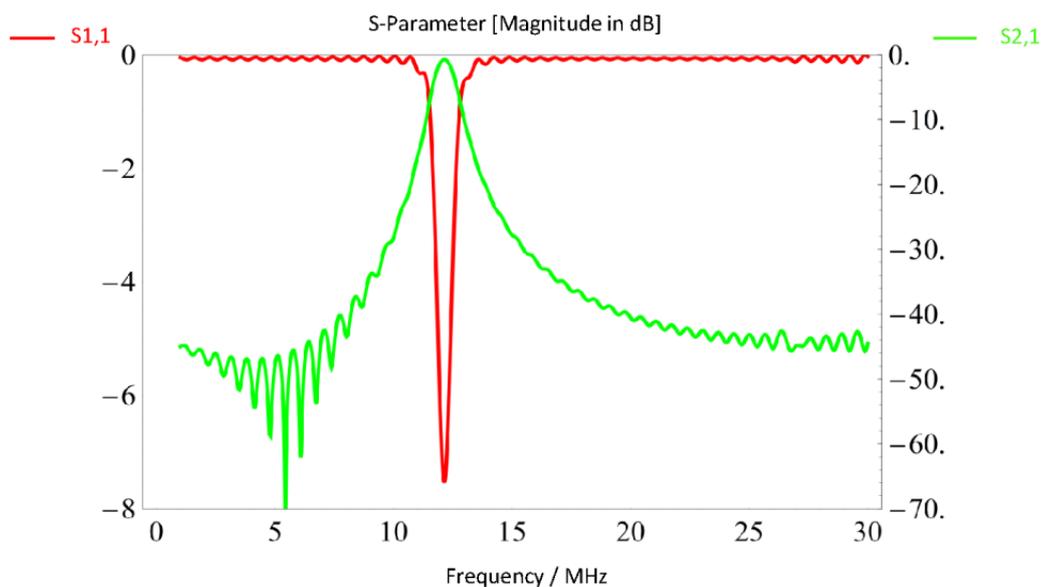


Figura 3.13 - Representação dos parâmetros  $S_{11}$  e  $S_{21}$  do sistema com as antenas afastadas 50cm entre si.

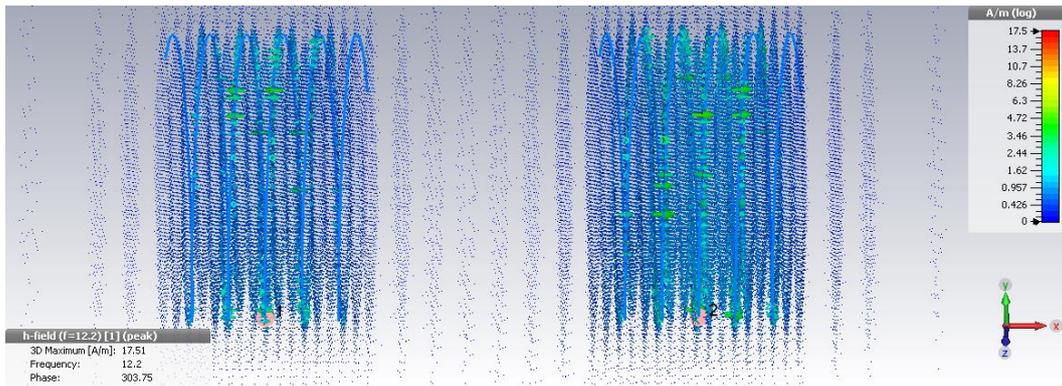


Figura 3.14 - Representação das linhas de campo magnético induzido na antena receptora.

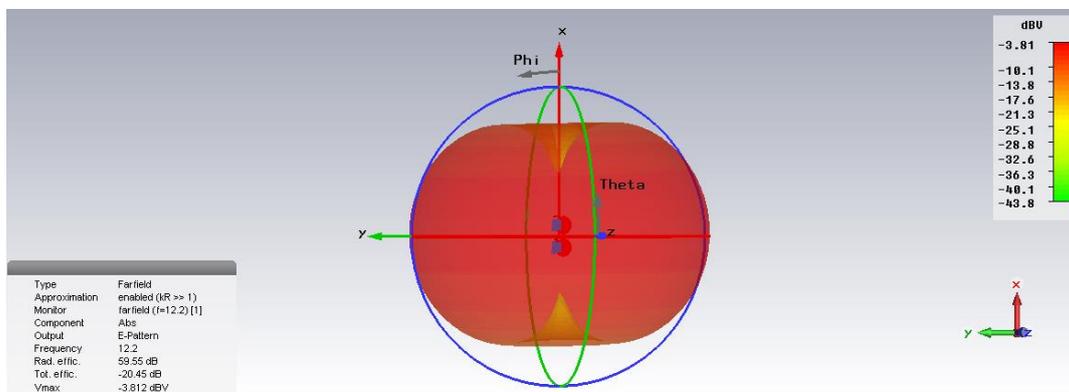


Figura 3.15 - Representação do diagrama de radiação de potência do sistema para a frequência de 12.2 MHz.

Pela análise das figuras apresentadas, verificamos que para a distância de 50cm entre antenas a resposta do sistema de transmissão de energia sem fios é boa pois continuamos a observar a ressonância muito bem definida, aproximadamente na frequência de 12.2 MHz, com um coeficiente de reflexão (parâmetro  $S_{11}$ ) ainda com um valor razoavelmente bom, mas que em comparação com o mesmo no sistema de 25cm de distância teve uma grande diminuição pelo que significa que é mais susceptível a pequenas interferências. O parâmetro  $S_{21}$  indica-nos que há uma boa adaptação das duas antenas e que para este sistema a esta distância a eficiência de transmissão está muito próxima dos 83.76%.

Quanto às linhas de campo magnético que são induzidas pela antena transmissora na antena receptora, voltamos a constatar que a direcção das linhas de campo magnético são predominantemente axiais, ou seja, a componente de campo magnético  $H_x$  (na direcção de

transmissão) é a que é mais forte sendo em comparação com a componente  $H_x$  do sistema de 25cm de distância menos densa, o que significa que existe menos fluxo de corrente induzido na antena receptora levando a que a potência recebida seja menor, daí a redução da eficiência de transmissão.

O diagrama de radiação de potência para este sistema segue o mesmo modelo dos anteriores, ou seja o da antena helicoidal no modo normal e o da antena de dipolo, variando apenas o valor máximo do campo eléctrico.

Passemos agora para o sistema de transferência de energia sem fios com a distância entre as duas antenas de 75cm.

Com base na análise dos sistemas anteriores apresentados podemos prever que neste sistema a eficiência irá ser ainda mais reduzida, pois o nosso tipo de sistema tem como maior obstáculo a distância, ou seja, quanto maior é a distância menor irá ser a quantidade de fluxo de corrente induzida pela antena transmissora na antena receptora, logo menor será a eficiência de transmissão. Passaremos então à análise do sistema para esta distância.

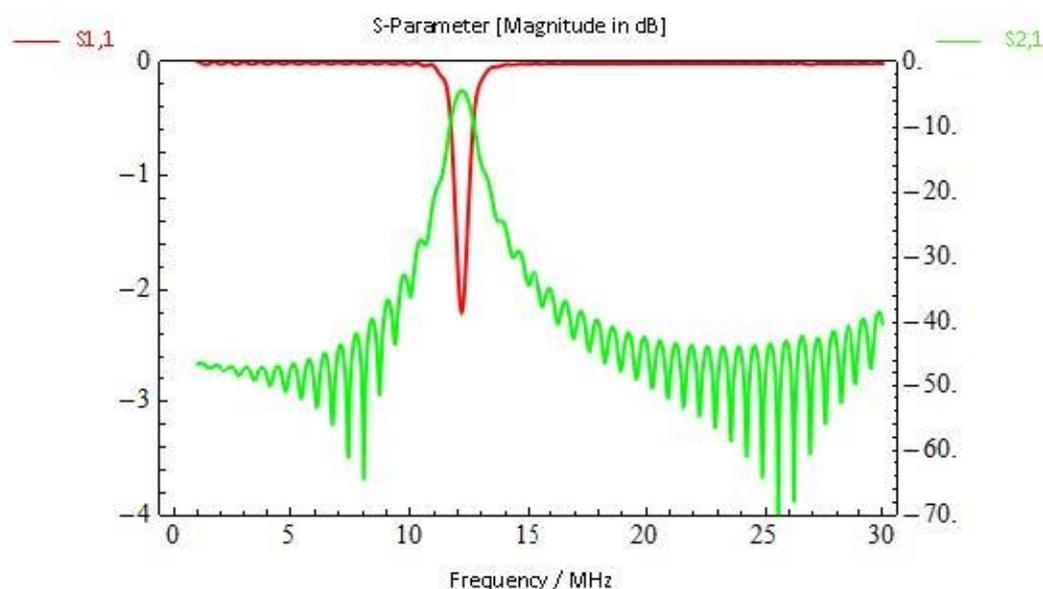


Figura 3.16 - Representação dos parâmetros  $S_{11}$  e  $S_{21}$  do sistema com as antenas afastadas 75cm entre si.

Começamos logo por observar que a ressonância mantém-se na mesma frequência de 12.2 MHz mas o seu coeficiente de reflexão (parâmetro  $S_{11}$ ) indica-nos que muita energia é reflectida, ou seja, existem muitas perdas pois o seu valor é muito baixo. Comparando com os parâmetros  $S_{11}$  dos sistemas anteriores verifica-se que este é o que tem o valor mais baixo, como seria de esperar. O parâmetro  $S_{21}$  contudo mostra que ainda assim existe uma adaptação das duas antenas,

contudo uma pequena adaptação, mas que ainda assim nos garante que exista uma eficiência de transmissão da ordem dos 36%.

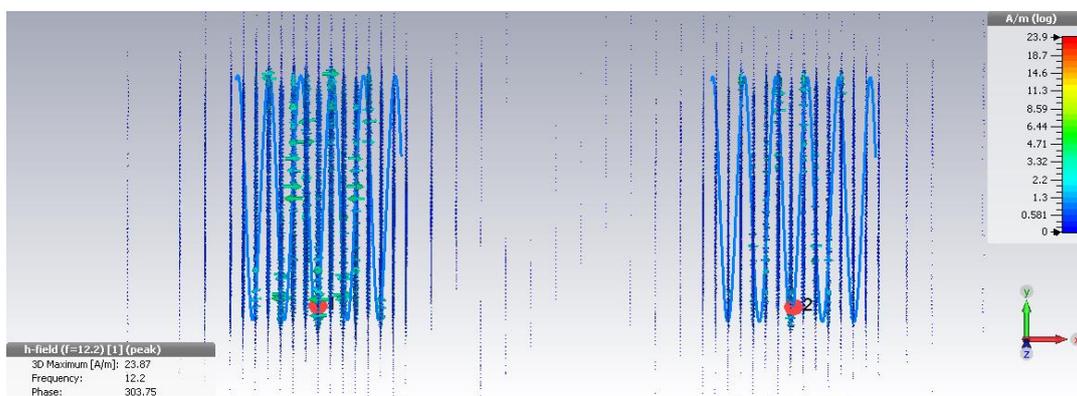


Figura 3.17 - Representação das linhas de campo magnético induzido na antena receptora.

Podemos comprovar pela figura que a esta distância continua a ser predominante a componente axial,  $H_x$ , mas o fluxo de corrente induzido pela antena transmissora na receptora já é muito baixo, provando assim o que foi dito acima, que quanto maior a distância menor é a quantidade de energia recebida pela antena receptora.

O diagrama de radiação de potência deste sistema é igual a todos os outros mostrados anteriormente variando apenas o valor máximo do campo eléctrico, que neste caso é de -2.57 dBV/m (tendo uma excitação de  $V_{gerador} = 1$  V).

### 3.3 Simulação da antena transmissora com a antena receptora ligada a um LED

Neste subcapítulo efectuou-se um estudo ao comportamento do sistema quando a antena receptora é terminada com uma carga com uma impedância igual à do LED utilizado na experiência real, impedância essa de valor  $Z_{LED} = 10 - j70 \Omega$  e a mesma frequência de ressonância. Com isto queremos verificar o comportamento da antena transmissora, mais concretamente o seu coeficiente de reflexão (parâmetro  $S_{11}$ ), as linhas do seu campo magnético e

a polarização. Para isso procedemos à simulação com as antenas transmissora e receptora afastadas uma da outra em 25cm. Eis os resultados obtidos:

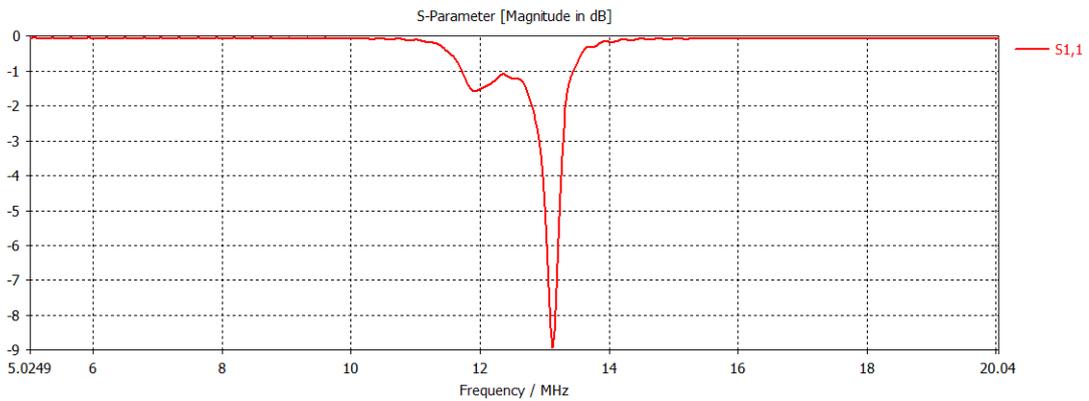


Figura 3.18 - Representação do parâmetro  $S_{11}$  da antena transmissora.

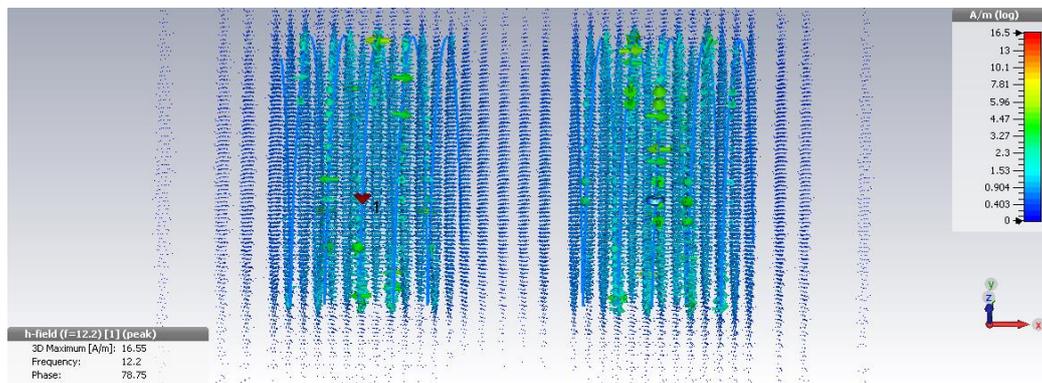


Figura 3.19 - Representação das linhas de campo magnético no sistema.

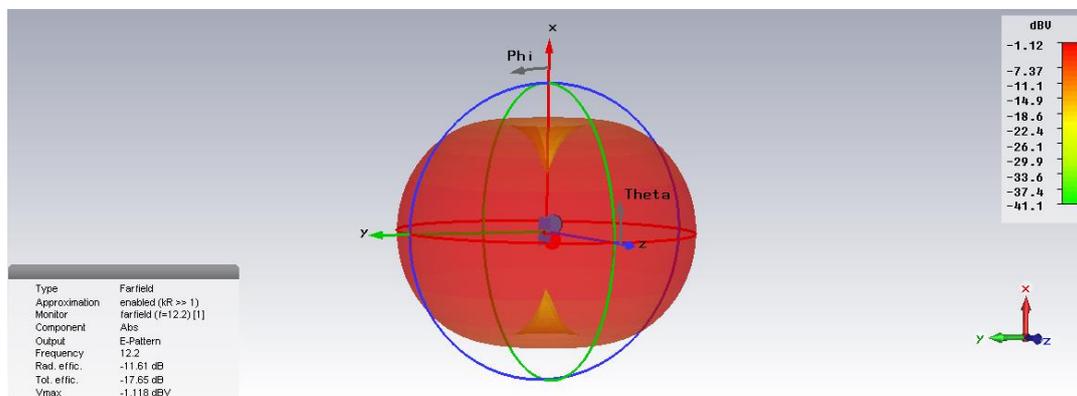


Figura 3.20 - Representação do diagrama de radiação de potência do sistema.

Pela sucessão de figuras apresentadas podemos reparar que pelo parâmetro  $S_{11}$  verificamos a existência de uma ressonância bem definida à frequência de aproximadamente 13 MHz, o que é bastante próxima da ressonância do sistema simulado com os dois portos de 50  $\Omega$ . Podemos também reparar que no que toca às linhas de campo magnético estas são predominantemente axiais, ou seja, a componente mais forte é o  $H_x$  e ao contrário da simulação do sistema com os dois portos de 50  $\Omega$  aqui as linhas de campo magnético na antena transmissora e receptora estão em fase umas com as outras. O diagrama de radiação de potência neste sistema é muito idêntico aos dos sistemas falados atrás, pelo que verificamos que no campo próximo o valor máximo do campo eléctrico é de aproximadamente -1.12 dBV. Como os resultados desta simulação são muito idênticos aos da simulação do sistema com os dois portos de 50  $\Omega$  podemos concluir que com a carga que escolhemos para fazer a experiência, o LED de 5mm vermelho, os resultados serão muito idênticos ao caso de termos uma carga de 50  $\Omega$ .

### **3.4 Comparação em ambiente de simulação do novo sistema de transmissão de potência sem fios e o proposto pelo MIT.**

Reproduzimos o modelo proposto pelo MIT para a transferência de potência sem fios de forma a podermos ter este como base de comparação com o novo sistema desenvolvido. Este sistema utiliza um loop de fio de cobre ligado ao gerador e que por sua vez está acoplado indutivamente à antena de transmissão e do outro lado simetricamente tem o mesmo, excepto que em vez do gerador tem-se a carga ligada ao loop de fio de cobre. Uma das razões que nos levou a alterar a estrutura foi que na fase experimental a ligação do loop de fio de cobre ao gerador de sinal correspondia a um curto-circuito, e conseqüentemente o gerador de sinal accionava a protecção para curtos circuitos e não emitia nenhum sinal. Os parâmetros das antenas são iguais aos do nosso protótipo fabricado, e os seus loops têm 25cm de raio. Utilizámos a distância de 25cm entre as antenas em ambos os sistemas, portos de 50  $\Omega$  como gerador e carga e procedemos então à comparação dos mesmos.

A figura seguinte mostra o modelo do sistema do MIT em ambiente de simulação.

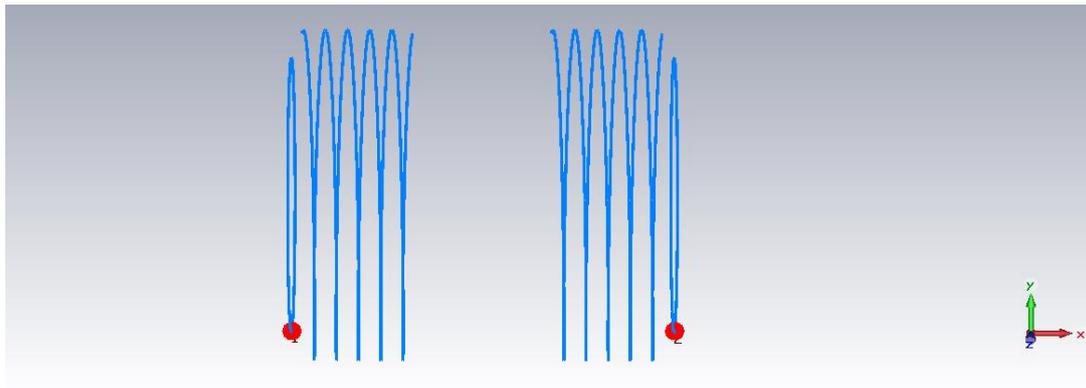


Figura 3.21 - Representação do sistema do MIT em ambiente de simulação.

Na figura o que vemos a vermelho são os portos de 50  $\Omega$  ligados aos loops de fio de cobre de 25cm de raio, estando estes acoplados indutivamente às antenas transmissora e receptora. O seu coeficiente de reflexão (parâmetro  $S_{11}$ ) é mostrado na seguinte figura, sobreposto ao coeficiente de reflexão (parâmetro  $S_{11}$ ) do nosso novo sistema.

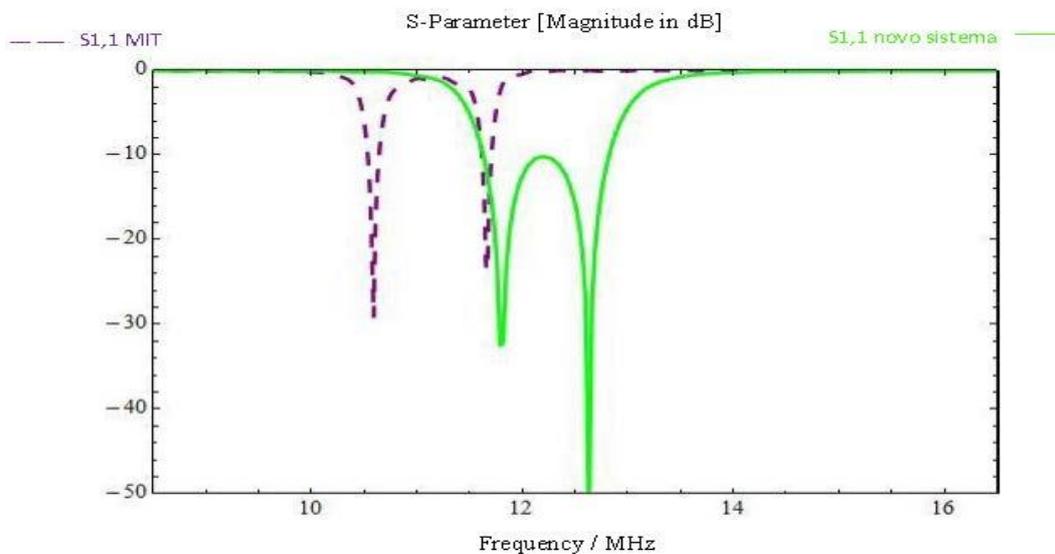


Figura 3.22 - Representação dos parâmetros  $S_{11}$  do sistema proposto pelo MIT e pelo novo sistema desenvolvido, ambos com uma distância entre antenas de 25cm e com portos de 50 Ohm.

Pela visualização desta figura podemos desde já afirmar que a teoria de que alterando a estrutura das antenas cortando-as nos seus pontos centrais e efectuar as ligações através desse corte iriamos aumentar a frequência de ressonância verifica-se. Facilmente reparamos que os parâmetros  $S_{11}$  de ambos os sistemas são razoavelmente idênticos, apenas estando o parâmetro

$S_{11}$  do novo sistema deslocado mais para a direita, ou seja, tem ressonância a uma frequência um pouco mais alta. Uma conclusão acerca disto é que pela figura nota-se que a ressonância aos 12.2 MHz é mais forte que a do sistema do MIT simulado nas mesmas condições que é de aproximadamente 10.6 MHz (valor teórico é de 9.9 MHz) o que nos diz que no novo sistema a esta distância o acoplamento é melhor e tem uma melhor largura de banda.

Em relação aos coeficientes de transmissão (parâmetros  $S_{21}$ ), verificamos que acontece o mesmo que ao parâmetro  $S_{11}$ , ou seja, são muito idênticos os parâmetros  $S_{21}$  de ambos os sistemas apenas diferem na localização da frequência de ressonância, estando bem acopladas as duas antenas nos dois sistemas, tendo o sistema do MIT uma eficiência de transmissão de aproximadamente 94.09% e o nosso novo sistema uma eficiência de transmissão muito próxima dos 99.8%. Quanto ao factor de qualidade a -3dB do sistema do MIT apresenta um valor de aproximadamente 35.33 e o novo sistema de aproximadamente 7.21 o que é mais baixo que o do sistema do MIT devido à maior largura de banda.

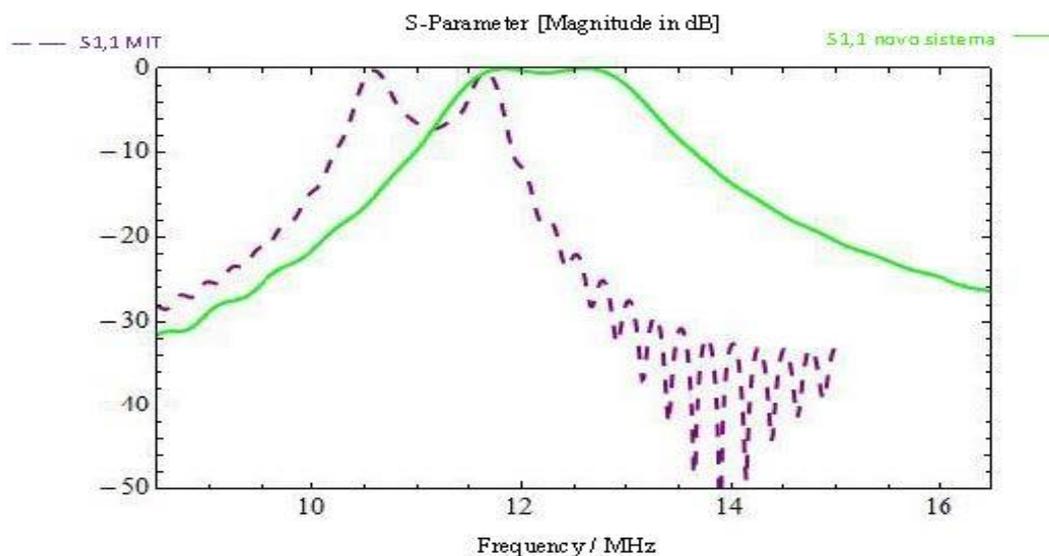


Figura 3.23 - Representação dos parâmetros  $S_{11}$  do sistema proposto pelo MIT e pelo novo sistema desenvolvido, ambos com uma distância entre antenas de 25cm e com portos de 50 Ohm.

Tomaremos como pontos de análise agora as linhas de campo magnético e o diagrama de radiação de potência dos dois sistemas. Em seguida segue uma sucessão de figuras com os resultados obtidos para esta matéria tanto no novo sistema como no sistema do MIT.

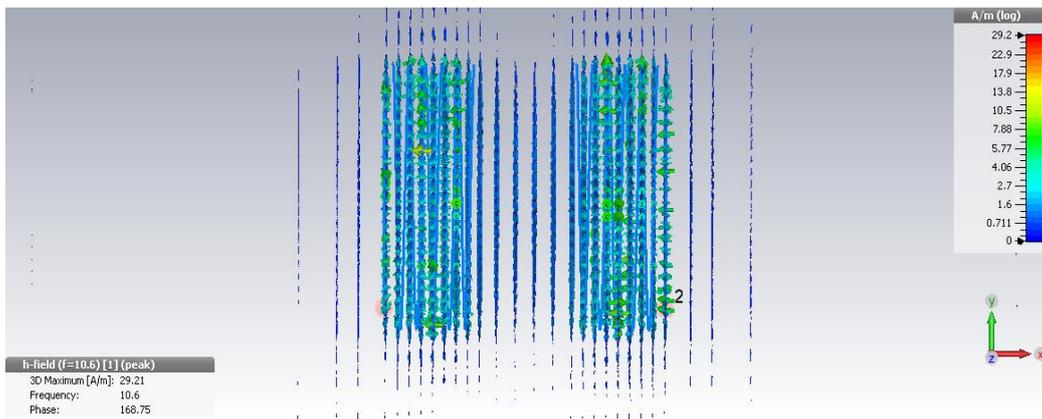


Figura 3.24 - Representação das linhas de campo magnético no sistema do MIT.

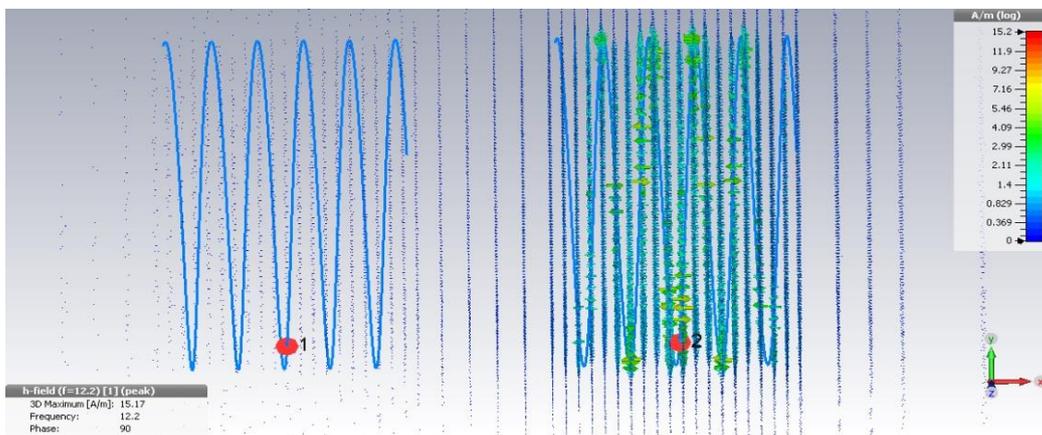


Figura 3.25 - Representação das linhas de campo magnético no novo sistema.

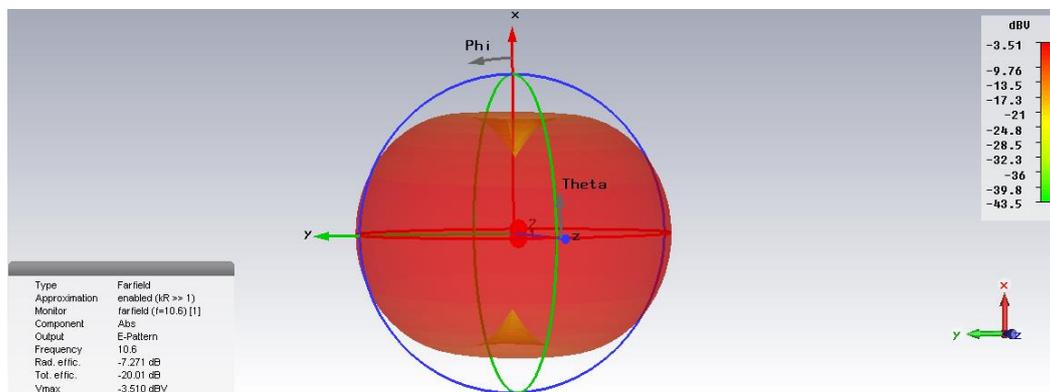


Figura 3.26 - Representação do diagrama de radiação de potência do sistema do MIT.

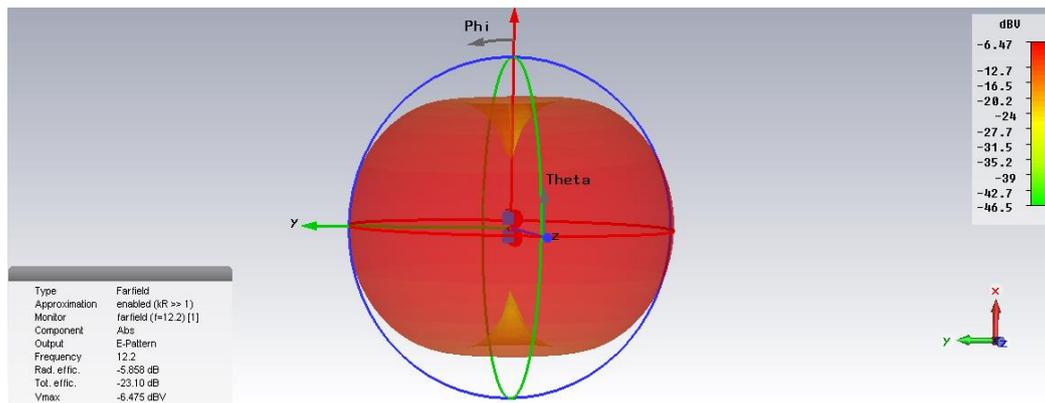


Figura 3.27 - Representação do diagrama de radiação de potência do novo sistema.

As linhas de campo magnético no sistema do MIT são tal como no nosso sistema predominantemente axiais, ou seja, a componente  $H_x$  é a dominante na região de campo próximo, sendo induzido um fluxo de corrente pela antena transmissora na antena receptora. Curiosamente, estando as linhas de campo magnético em ambas as antenas estão fase, enquanto no novo sistema estão desfasadas de  $90^\circ$ .

Quanto ao diagrama de radiação de potência do sistema do MIT também ele é muito semelhante ao diagrama de radiação de potência do novo sistema, tendo o formato muito semelhante ao do diagrama de radiação da antena helicoidal no modo normal. No campo próximo o modelo do MIT tem um valor máximo de campo eléctrico de  $-3.51$  dBV que é maior que o do novo modelo, para uma excitação igual.



# Capítulo 4 – Resultados

## 4.1 Introdução

O presente capítulo mostrará os resultados obtidos com o nosso novo sistema de transferência de potência sem fios. Inicialmente como referimos no capítulo anterior, pensamos em reproduzir o modelo proposto pelos investigadores do MIT, mas devido ao facto de o nosso gerador de sinal entrar em curto-circuito quando ligado ao loop de fio de cobre de 25cm, optamos por dimensionar o sistema de forma diferente de modo a podermos com o material disponível realizar a experiência. Passemos então à configuração e montagem do novo sistema para posteriormente apresentarmos os nossos resultados.

## 4.2 Configuração do sistema e testes

O nosso novo sistema é constituído por duas bobinas de fio de cobre, com os parâmetros das mesmas já definidos no capítulo anterior.

Inicialmente começámos por verificar o parâmetro  $S_{11}$  da bobina transmissora na presença da bobina receptora com a carga (o LED) ligada no seu ponto central junto da mesma utilizando um aparelho apropriado para o efeito, denominado por Vector Network Analyzer (VNA) [14]. Para tal começámos por calibrar o VNA e de seguida efectuamos a ligação à nossa bobina transmissora, colocando o cabo do aparelho ligado no seu ponto central. O resultado obtido não nos mostrava nenhuma ressonância bem definida na gama de frequências dos 10 MHz aos 50 MHz, devido à resposta não linear do LED e ao facto deste estar completamente desadaptado do sistema de transferência de potência. Além disso, as duas antenas construídas por nós não são totalmente iguais pois o fio de cobre sendo de 4.5 mm de diâmetro não é muito maleável à mão o que causa que não fiquem círculos perfeitos enrolados em volta da estrutura de madeira por forma a termos as duas antenas iguais. Tendo estes factores em mente decidimos efectuar testes para adaptação de impedâncias das duas antenas.

Ao efectuar testes com o VNA ligado à antena transmissora, verificou-se que quando se curto circuita o ponto central da bobina receptora e liga o LED nas extremidades da mesma existia uma ressonância razoavelmente boa perto dos 10 MHz, possivelmente numa frequência

mais baixa, mas como o VNA tem uma gama de frequências entre 10 MHz e 20 GHz não nos foi possível verificar a frequência exacta. Optamos então por utilizar este esquema.

Esta ideia de colocar o ponto central da bobina receptora em curto-circuito e o LED ligado nas extremidades da mesma vem do facto da estrutura helicoidal ter um comportamento indutivo e o LED uma resposta essencialmente capacitiva, e portanto a colocação do LED nas extremidades da hélice deve apenas conduzir a um ligeiro reajustar da frequência de ressonância para valores mais baixos.

Podemos dizer que fizemos uma adaptação da antena usando o método standard de adaptação de impedâncias de antenas denominado por Delta Match.

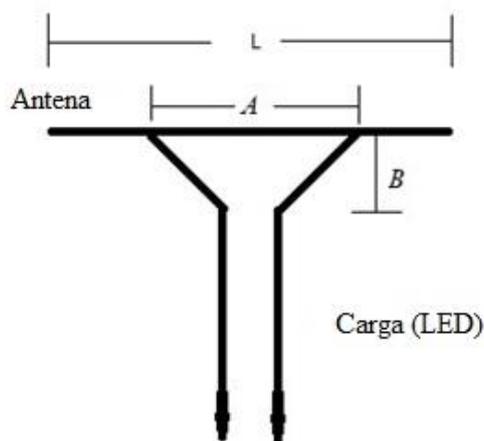


Figura 4.1 – Sistema de adaptação de impedâncias Delta Match.

Como podemos ver pela figura acima, está representada uma antena de comprimento  $L$  ligada a uma linha de transmissão. Este método experimental é baseado no facto empírico que a impedância de entrada de um dipolo em curto-circuito depende das dimensões de  $A$  e  $B$  [15]. Portanto, de forma experimental, tentámos otimizar o valor das distâncias  $A$  e  $B$  entre o LED e a bobina transmissora até conseguirmos encontrar uma ressonância bem definida para podermos então efectuar a nossa experiencia de transmissão de potência sem fios.

A imagem seguinte mostra-nos então o parâmetro  $S_{11}$  obtido:

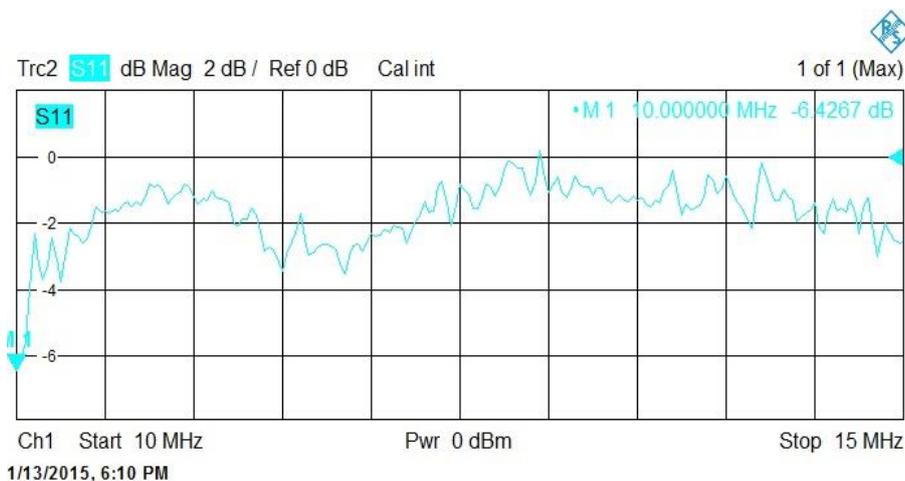


Figura 4.2 – Representação da curva do parâmetro  $S_{11}$  da antena transmissora na presença da antena receptora com a carga (o LED) ligada nas extremidades da mesma

Como podemos verificar pela figura 4.2, existe uma ressonância na vizinhança da frequência de 10 MHz.

Para alimentar a antena transmissora utilizamos um gerador de sinal [16] com uma gama de frequências dos 9 kHz aos 3.2 GHz e uma potência máxima de saída de 19 dBm (aproximadamente 79.43 mW).

Visto termos já todos os elementos necessários à realização da nossa experiência, passaremos ao procedimento de teste que é bastante simples e consiste em colocar as duas antenas alinhadas axialmente uma com a outra, com as duas estruturas juntas uma à outra e a partir daí vai-se variando a distância entre elas registando-se o valor da tensão aos terminais do LED em cada uma dessas distâncias utilizando para tal um osciloscópio [17].

A posição de teste inicial está ilustrada na figura seguinte:

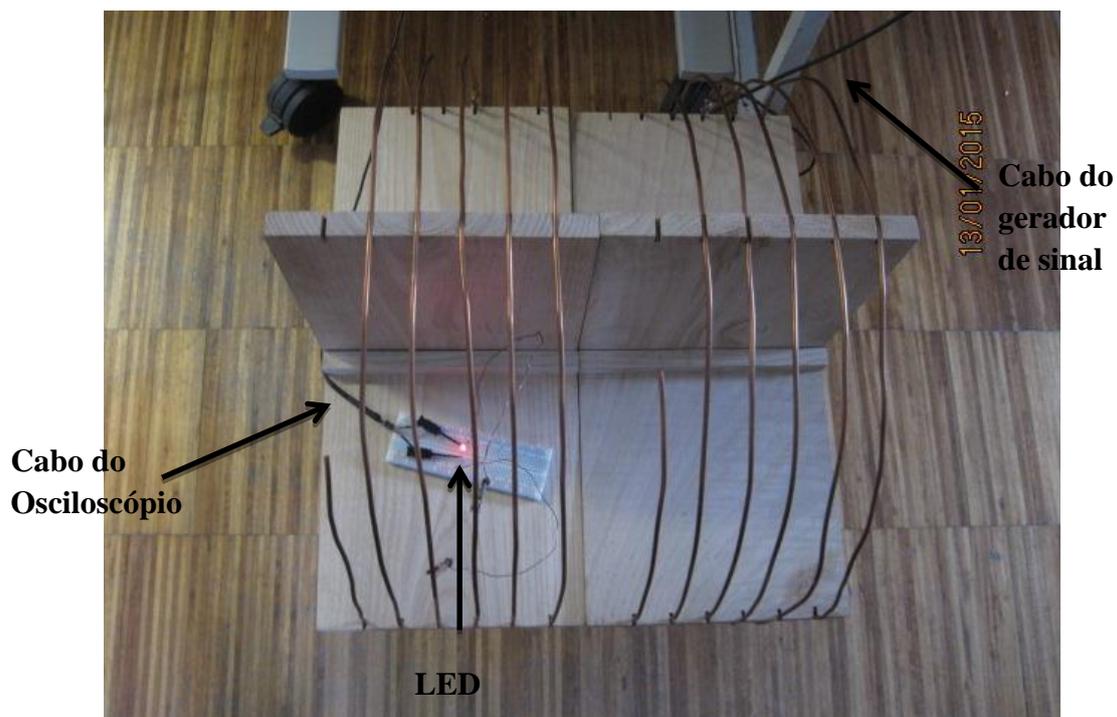


Figura 4.3 – Posição de teste inicial para a medição

Inicialmente variámos a frequência na zona dos 10 MHz para verificar se haveria uma ressonância melhor e como suspeitávamos a melhor resposta situava-se nos 9.3 MHz.

Escolhemos então a frequência de operação como sendo os 9.3 MHz e como distâncias a testar, 25 cm, 50 cm, 75 cm e 94 cm, esta última devido ao facto de ser a distância máxima em que o LED ainda recebe potência suficiente para emitir luz. Começamos então por analisar as ondas de tensão aos terminais do LED para todas estas distâncias. Segue uma sucessão de figuras com todas essas ondas de tensão.

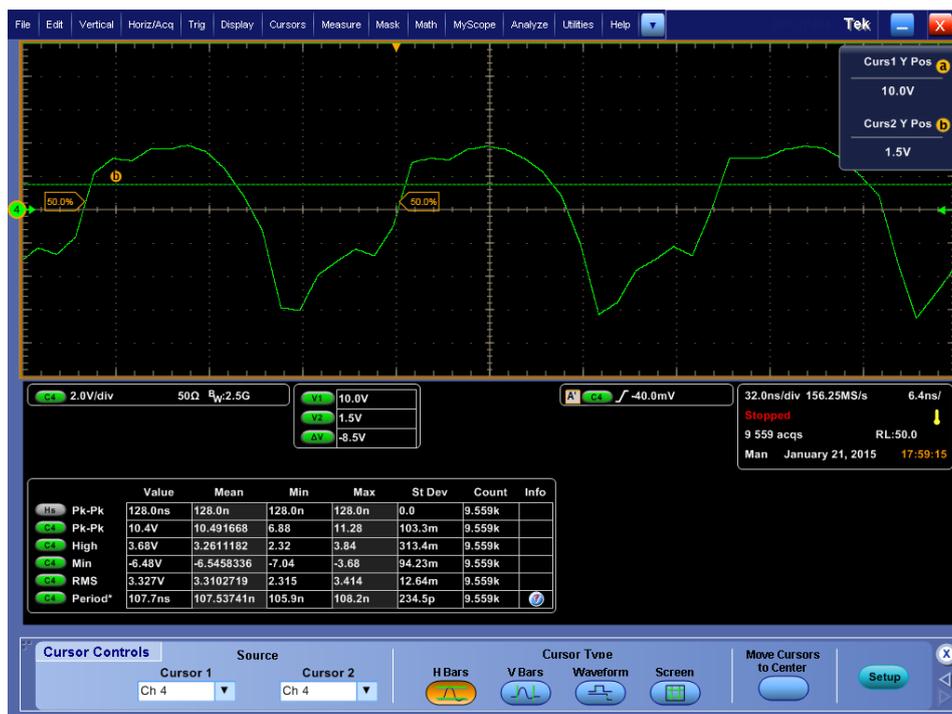


Figura 4.4 – Representação da onda de tensão aos terminais do LED quando as bobinas estão juntas.



Figura 4.5 – Representação da onda de tensão aos terminais do LED quando as bobinas estão a 25 cm de distância uma da outra.

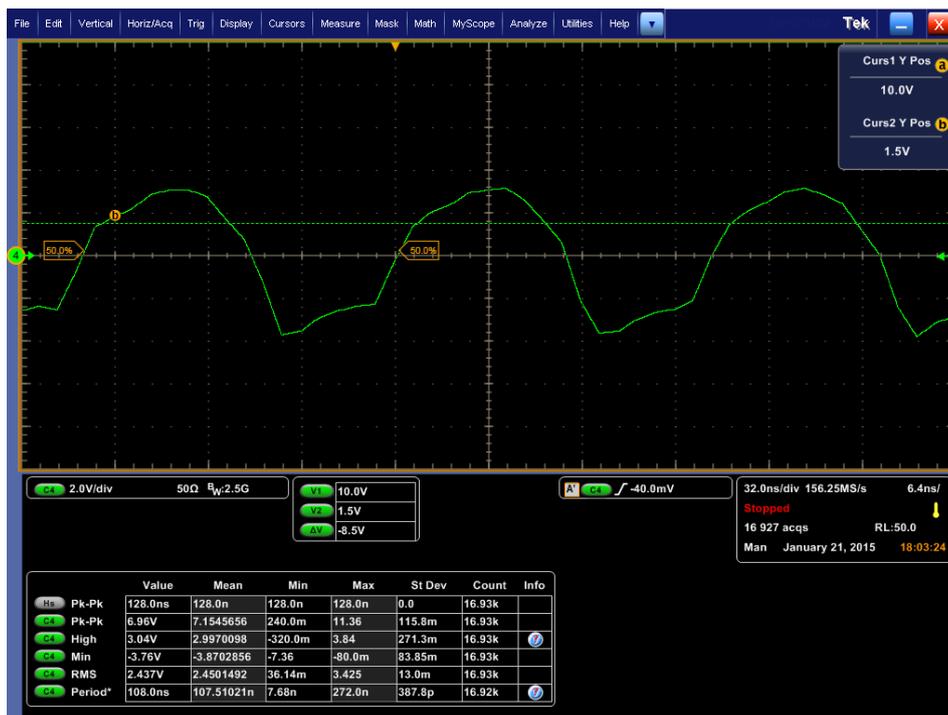


Figura 4.6 – Representação da onda de tensão aos terminais do LED quando as bobinas estão a 50 cm de distância uma da outra

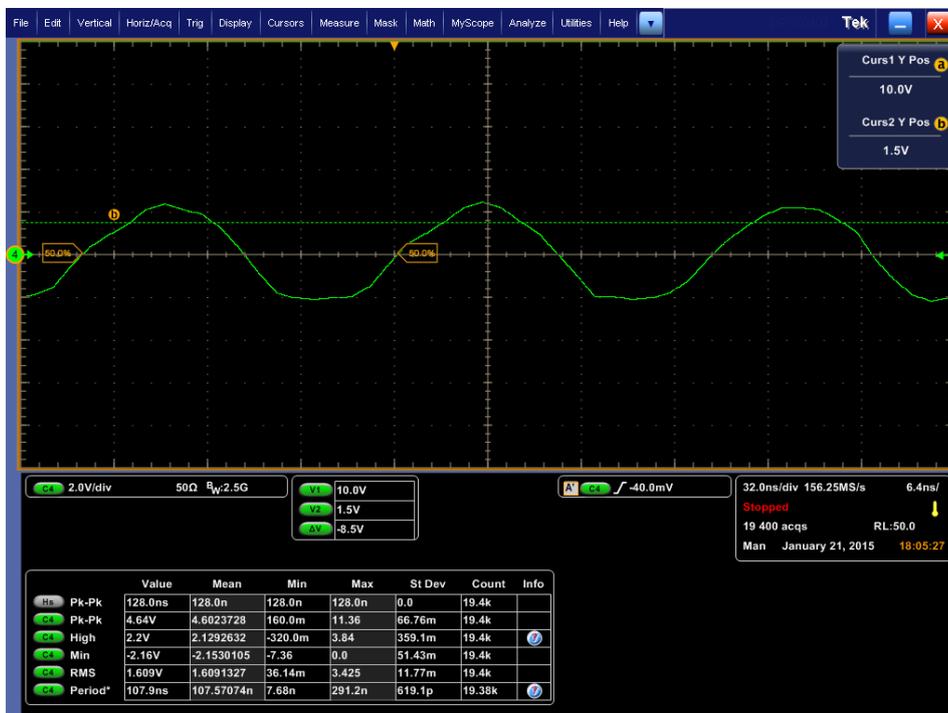


Figura 4.7 – Representação da onda de tensão aos terminais do LED quando as bobinas estão a 75 cm de distância uma da outra.

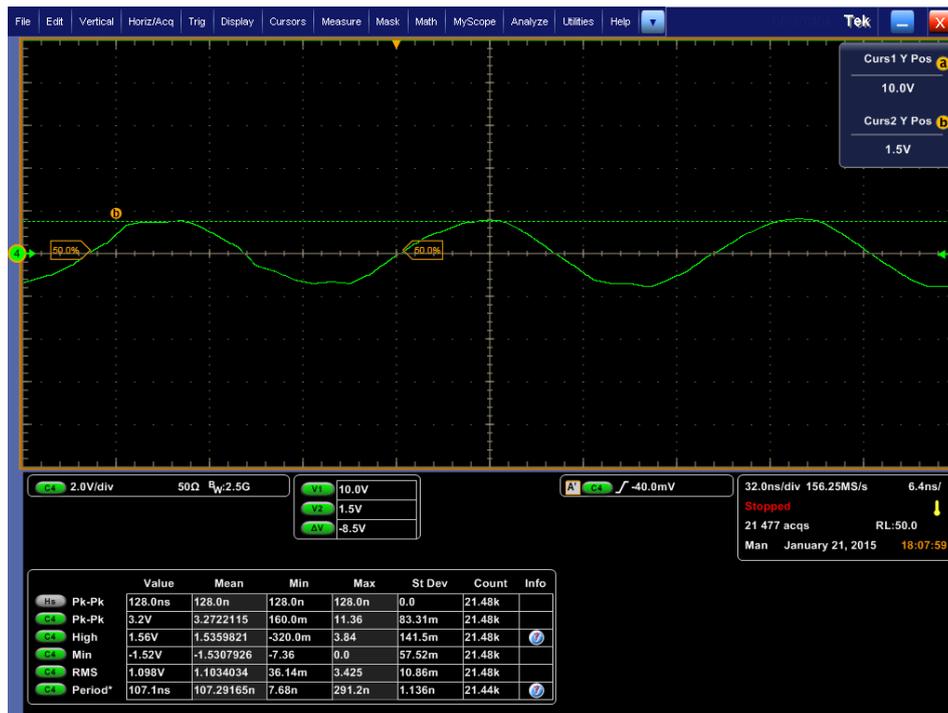


Figura 4.8 – Representação da onda de tensão aos terminais do LED quando as bobinas estão a 94 cm de distância uma da outra.

Pela sucessão de figuras acima apresentadas, podemos desde logo verificar que a onda de tensão aos terminais do LED para as distâncias consideradas não é uma sinusóide perfeita, pois o nosso sistema não tem uma resposta linear devido à presença do LED. Podemos também verificar que como seria de esperar, à medida que a distância aumenta, o valor da tensão diminui.

Para procedermos ao cálculo da potência entregue ao LED como função da distância poderíamos simplesmente utilizar um multímetro para obter os valores da corrente, mas como o multímetro disponível no Laboratório de Microondas só funciona para correntes e tensões AC até uma frequência máxima de 300 kHz, adoptamos o procedimento descrito de seguida. Em concreto, calculou-se a potência média usando a equação:

$$P_{med} = \frac{E}{T} \cong V_{max} I \frac{\Delta t}{T} \quad (15)$$

onde  $E$  é a energia dissipada no LED,  $T$  é o período de oscilação,  $V_{\max}$  é o valor máximo da onda de tensão aos terminais do LED,  $I$  a corrente para esse valor de tensão obtida da curva de transferência do LED, e  $\Delta t$  é o período de tempo em que a onda de tensão está acima do valor limiar de condução do LED, que no nosso caso é cerca de 1.5 V.

A curva de transferência  $I$ - $V$  do LED foi obtida da forma padrão: alimentamos o LED com uma tensão DC  $V$  e com o multímetro verificamos qual o valor da corrente que circulava no LED. Com estes valores de corrente utilizando a equação (15) podemos obter um valor muito aproximado do valor real da potência média aos terminais do LED.

Utilizando estes valores experimentais da corrente e da tensão obtivemos uma curva característica do LED, que é mostrada na figura seguinte:

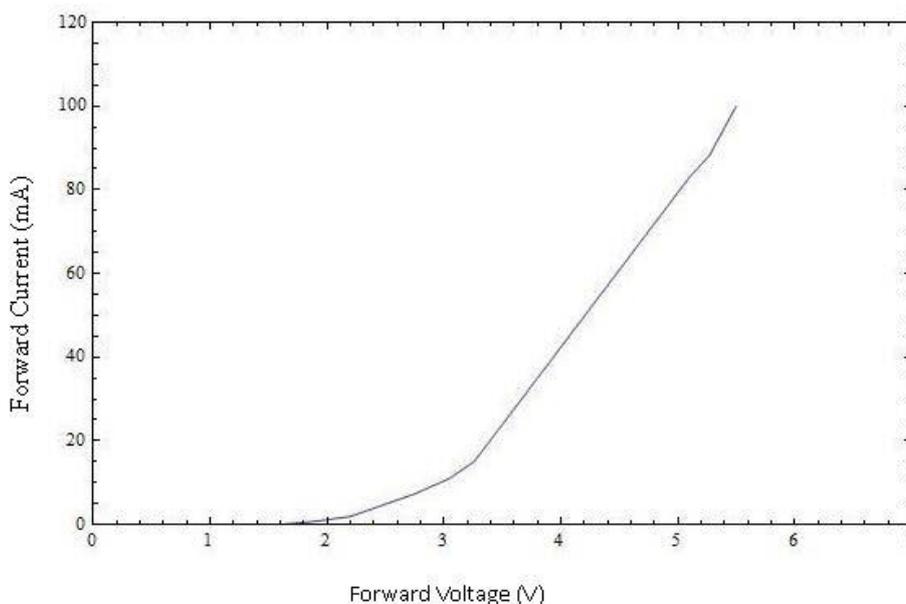


Figura 4.9 – Representação da curva característica do LED

A seguinte tabela mostra-nos os valores da potência média obtida pela equação (15) para cada uma das distâncias:

<b>Distância entre antenas</b>	<b>Tensão (<math>V_{max}</math>)</b>	<b>Corrente (<math>I</math>)</b>	<b>Período de tempo que <math>V_{max}</math> está acima do limiar do LED (<math>\Delta t</math>)</b>	<b>Período (<math>T</math>)</b>	<b>Potência Média (<math>P_{med}</math>)</b>
Juntas	3.68 V	15.1 mA	48 ns	107.52 ns	24.81 mW
25 cm	3.68 V	15.1 mA	48 ns		24.81 mW
50 cm	3.04 V	10.9 mA	44.16 ns		13.61 mW
75 cm	2.20 V	1.94 mA	28.16 ns		1.12 mW
94 cm	1.56 V	0.046 mA	17.92 ns		0.012 mW

Tabela 4.1 – Determinação da potência média aos terminais do LED para as várias distâncias.

Da análise desta tabela a primeira nota que se tira é que quer quando as antenas estão juntas quer quando estão a 25 cm a potência que o LED recebe da bobina receptora é a mesma. A partir desta distância percebe-se que a potência entregue ao LED decai acentuadamente e isto deve-se ao facto de como já foi referido no capítulo anterior o nosso sistema funcionar devido a um acoplamento de campo próximo.

Determinámos experimentalmente qual são as frequência mínima e máxima, para cada distância, para as quais o LED responde, e desta forma obtivemos uma estimativa da largura de banda de funcionamento. É apresentada de seguida uma tabela com os valores das larguras de banda de funcionamento obtidas:

<b>Distância entre antenas</b>	<b>Largura de banda (<math>\Delta f</math>)</b>
Juntas	4.7 MHz
25 cm	2.1 MHz
50 cm	1.4 MHz
75 cm	0.8 MHz
94 cm	0.3 MHz

Tabela 4.2 – Determinação da largura de banda para cada distância de teste.

## 4.2.1 Simulação do novo sistema de transferência de potência sem fios alimentando a antena transmissora no ponto central e colocando a carga nas pontas da antena receptora

Devido à necessidade de se modificar a configuração inicial e de colocar a carga nas pontas da antena receptora, como foi explicado anteriormente, efectuamos uma simulação desta nova configuração no simulador electromagnético.

A figura 4.10 mostra o coeficiente de reflexão (parâmetro  $S_{11}$ ) obtido:

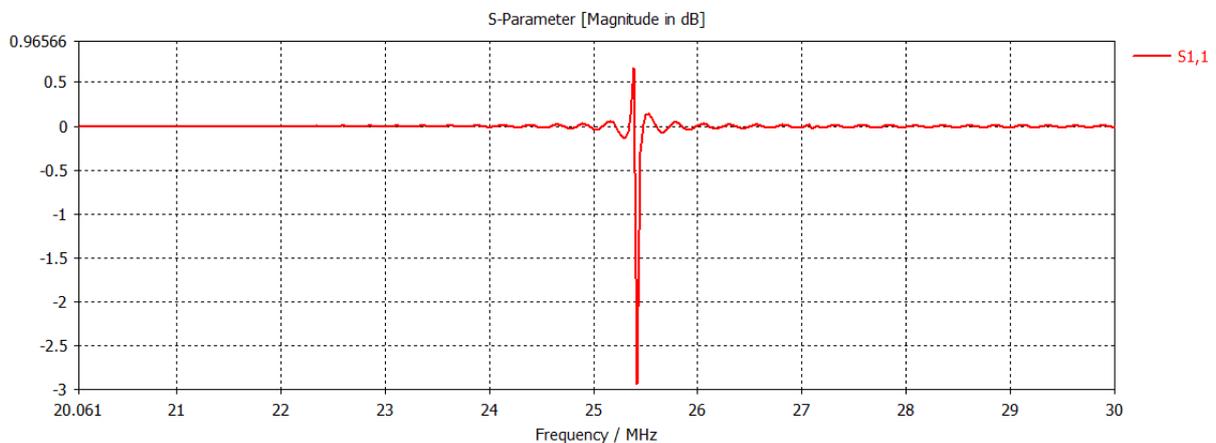


Figura 4.10 - Representação da curva do parâmetro S<sub>11</sub> da antena transmissora na presença da antena receptora com a carga (o LED) ligada nas extremidades da mesma.

Podemos verificar pela figura 4.10 que a pequena ressonância mostrada não é de todo a esperada, pois em vez de estar à frequência de 25.42 MHz deveria de estar por volta dos 9.3 MHz. Quanto ao diagrama de radiação, este continua a ser idêntico aos diagramas mostrados anteriormente para as diferentes simulações, mas em relação à componente de campo magnético induzido pela antena transmissora na antena receptora, esta é quase nula.

Estes resultados computacionais não foram os esperados, pois o nosso sistema tem uma resposta não linear e o valor da impedância do LED,  $Z_{LED}$ , foi apurada para uma determinada frequência de ressonância na qual na simulação essa frequência de ressonância não existe, daí os resultados não serem satisfatórios.

Tendo descrito todo procedimento experimental, resta discutir qual a eficiência do nosso sistema de transmissão de energia sem fios e compará-lo com as nossas simulações e com o sistema proposto pelo grupo de investigadores do MIT.

### 4.3 Eficiência e comparações

Uma das características mais importantes deste tipo de sistemas prende-se com a eficiência de transmissão. Teoricamente a eficiência desejada de qualquer sistema deste tipo é de 100 % mas na prática é quase impossível atingir este valor, pois existem sempre perdas nem que sejam residuais.

No nosso caso, podemos calcular a eficiência utilizando a seguinte equação:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (16)$$

onde  $P_{out}$  é a potência entregue à carga (LED) e  $P_{in}$  a potência à entrada do sistema. O gerador de sinal utilizado para alimentar a antena transmissora referido funcionou à potência máxima, ou seja, a potência disponível no gerador era de 19 dBm (79.43 mW) que é o valor utilizado para  $P_{in}$ . Com base nisto, calculamos a eficiência ponta a ponta do nosso sistema para as variadas distâncias, as quais passamos a apresentar na seguinte tabela juntamente com as eficiências obtidas por simulação e teoricamente:

<b>Distância entre bobinas</b>	<b>Eficiência experimental (<math>\eta</math>)</b>	<b>Eficiência simulada (para uma carga linear de 50 <math>\Omega</math>) (<math>\eta</math>)</b>	<b>Eficiência teórica (com o LED como carga) (<math>\eta</math>)</b>
Juntas	31.24 %		
25 cm	31.24 %	99.8 %	42.3 %
50 cm	17.13 %	83.76 %	35.44 %
75 cm	1.41 %	36 %	15.23 %
94 cm	0.015 %		

Tabela 4.3 – Determinação da eficiência experimental, simulada e teórica para cada distância de teste.

É importante referir que a discrepância de resultados mostrados na tabela 4.3 deve-se ao facto de que na simulação para além de as duas antenas serem exactamente iguais, estão perfeitamente adaptadas e utilizam portos de 50  $\Omega$  como gerador e como carga. Para além disso, o aspecto mais crítico é a não linearidade do LED pois como o LED só conduz nas excursões positivas de tensão, nunca poderemos ter mais que 50% de eficiência. Além disso, na nossa experiência temos problemas em ter uma perfeita adaptação para haver uma máxima transmissão de energia devido ao facto de, como já foi referido anteriormente, por culpa do fio de cobre não ser facilmente maleável é difícil garantir que as espiras das hélices são idênticas.

Em relação aos resultados experimentais obtidos, verificamos que mesmo com estas limitações conseguimos a 25cm de distância receber quase um terço da potência emitida pelo gerador de sinal. É normal a partir desta distância haver um decaimento de eficiência bastante grande pois o acoplamento magnético entre as duas antenas diminui de forma drástica.

Quanto à eficiência do sistema proposto pelos investigadores do MIT, a eficiência ponta a ponta que a referência [3] nos indica é de 15 % a uma distância de 2m. Não conseguimos obter com sucesso para uma distância tão grande resultados comparáveis, mas também o tipo de recursos utilizados pela equipa do MIT são diferentes dos nossos, já que de forma crucial a fonte por eles utilizada foi um oscilador de Colpitts a emitir uma potência de 400 W, enquanto o nosso gerador emite apenas uma potência de 79.43 mW.

No decorrer da experiência deparamo-nos com o facto de que à frequência de 8.6 MHz quando as pontas do osciloscópio estavam colocadas nos terminais do LED conseguíamos obter

uma distância máxima entre as antenas com o LED a funcionar de 133 cm. Pensamos que isso se deve ao facto de as pontas do osciloscópio poderem interferir com o nosso sistema e melhorarem a adaptação do sistema devido a algum tipo de reactância parasita associada aos pontos de ligação.

Também é de referir que numa fase inicial, antes de conseguirmos otimizar a resposta do sistema, tentámos efectuar testes onde a antena transmissora era alimentada pelo ponto central e a carga (LED) era colocada no ponto central da antena receptora. Para essa configuração, conseguimos a emissão de luz pré-polarizando o LEC um pouco abaixo da sua tensão limiar com uma fonte de tensão DC. Neste caso conseguimos uma boa resposta para distâncias superiores a 3 m.



## Capítulo 5 – Conclusões

Na nossa percepção, atingiu-se plenamente o objectivo principal deste trabalho que foi o desenvolvimento de um novo sistema de transferência de energia sem fios baseado no modelo proposto pelos investigadores do MIT.

Apesar de terem surgido vários obstáculos durante a execução do trabalho experimental, como o facto do gerador de sinal não funcionar com a estrutura inicialmente predefinida, ou mesmo o sistema não estar totalmente adaptado para que possa haver uma máxima transferência de energia, a meta de construir um sistema que transfira energia sem fios foi atingido com sucesso.

Os resultados obtidos experimentalmente comparam-se de forma satisfatória com os de simulação, tendo em conta as várias limitações discutidas no final do capítulo 4. É de realçar que apesar de a distância máxima de transmissão obtida ser de 94 cm, este valor corresponde a quase 50 % da distância máxima reportada pela equipa do MIT, o que para os recursos disponíveis pensamos ser um valor excelente.

Trabalho futuro deve-se focar em vários aspectos: o aperfeiçoamento da construção das antenas transmissora e receptora para poder haver uma perfeita adaptação entre elas e conseqüentemente uma maior transferência de energia sem fios a uma maior distância. Obter um sistema mais compacto poderá também ajudar no aumento da eficiência, podendo para isso por exemplo, ligar dois LED's com polaridades opostas em paralelo na antena receptora de modo a aproveitar melhor a potência disponível ou mesmo utilizando um rectificador de sinal de modo a poder-se utilizar outro tipo de carga com melhor resposta. No nosso sistema as duas antenas têm dimensões idênticas, mas poderá ser possível construir a antena receptora tão pequena quanto o necessário para poder ser inserida dentro de dispositivos portáteis sem diminuir a eficiência de transmissão.

Pessoalmente este trabalho foi muito gratificante e pedagógico, dado que para além de ser um tema que ainda não é muito do conhecimento da sociedade no meu ponto de vista é um tema bastante interessante e motivador e abrangeu diversas áreas tais como antenas, programação e electrónica. Para além disso, tenho a convicção de que brevemente este tipo de tecnologia irá estar presente no nosso quotidiano.



## Referências

- [1] N. Tesla, Apparatus for transmitting electrical energy, US patente number 1,119,793, issued in December 1914.
- [2] A. Kumar Sah, “Design of Wireless Power Transfer System via Magnetic Resonant Coupling at 13.56MHz”, Proceedings of IOE Graduate Conference, Vol. 1, pp. 202-210, Nov. 2013.
- [3] A. Kurs, A. Karalis, R. Moffatt, J. D. Joannopoulos, P Fisher, and M. Soljagic, “Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances”, Science, vol. 317, no. 5834, pp. 83-86, Jul. 2007.
- [4] Highly Resonant Wireless Power Transfer: Safe, Efficient, and over Distance, Dr. Morris Kesler, Witricity Corporation, 2013, <http://www.witricity.com/assets/highly-resonant-power-transfer-kesler-witricity-2013.pdf>.
- [5] World Health Organization, “Electromagnetic fields and public health”, Fact Sheet No. 304, May 2006.
- [6] “IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields, 3 kHz to 300 GHz”, IEEE Std. C95.1-2005.
- [7] “Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric, Magnetic and Electromagnetic Fields (Up to 300 GHz)”, ICNIRP Guidelines, International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, Health Physics, 74, no. 4, pp. 494-522, (1998).
- [8] S. J. Orfanidis “Electromagnetic waves and antennas”, ECE Department Rutgers University, NJ 08854-8058, 2008.
- [9] CST – Computer Simulation Technology,  
[www.cst.com](http://www.cst.com)
- [10] Pozar, D. M, Microwave Engineering, John Wiley, 2005.
- [11] Constantine A. Balanis, Antenna Theory Analysis and design, Third Edition, Wiley-Interscience

[12] Datasheet: LED 5mm vermelho,

[www.vishay.com/docs/83171/tlur640.pdf](http://www.vishay.com/docs/83171/tlur640.pdf)

[13] Wolfram Mathematica,

<http://www.wolfram.com/mathematica/>

[14] Manual de operações: Vector Network Analyzer ZBV20, Rohde & Schwarz,

<http://cdn.rohde->

[schwarz.com/pws/dl\\_downloads/dl\\_common\\_library/dl\\_manuals/gb\\_1/z/zva\\_2/ZVA\\_ZVB\\_ZVT\\_OperatingManual\\_en\\_25.pdf](http://cdn.rohde-schwarz.com/pws/dl_downloads/dl_common_library/dl_manuals/gb_1/z/zva_2/ZVA_ZVB_ZVT_OperatingManual_en_25.pdf)

[15] Kay Fong Lee, Principles of Antenna Theory, John Wiley & Sons, 1984.

[16] Manual de operações: Gerador de Sinal SMC100A, Rohde & Schwarz,

<http://cdn.rohde->

[schwarz.com/pws/dl\\_downloads/dl\\_common\\_library/dl\\_manuals/gb\\_1/s/smc/SMC100A\\_OperatingManual\\_en\\_06.pdf](http://cdn.rohde-schwarz.com/pws/dl_downloads/dl_common_library/dl_manuals/gb_1/s/smc/SMC100A_OperatingManual_en_06.pdf)

[17] Datasheet: Osciloscópio DPO70404, Tektronix,

[http://www.tek.com/sites/tek.com/files/media/media/resources/DPO-DSA-MSO70000-Oscilloscope-Datasheet-18\\_42.pdf](http://www.tek.com/sites/tek.com/files/media/media/resources/DPO-DSA-MSO70000-Oscilloscope-Datasheet-18_42.pdf)