



INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA

ÁREA DEPARTAMENTAL DE ENGENHARIA DE ELECTRÓNICA DE
TELECOMUNICAÇÕES E DE COMPUTADORES

ANTENA MIMO PARA TERMINAIS MÓVEIS

Fábio Manuel Martins de Almeida

(Licenciado em Engenharia de Eletrónica de Telecomunicações e de
Computadores)

TRABALHO FINAL DE MESTRADO PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE
EM ENGENHARIA DE ELECTRÓNICA E TELECOMUNICAÇÕES

Orientador:

Prof. Doutor Pedro Renato Tavares Pinho, Professor Adjunto do Instituto Superior de Engenharia de Lisboa

Coorientador:

Engº Ricardo Gonçalves, Instituto de Telecomunicações

Júri:

Presidente:

Prof. Doutor Mário Pereira Véstias, Professor Coordenador do Instituto Superior de Engenharia de Lisboa

Vogais:

Prof. Doutor Nuno Miguel Gonçalves Borges de Carvalho, Professor Catedrático da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor Pedro Renato Tavares Pinho, Professor Adjunto do Instituto Superior de Engenharia de Lisboa

Dezembro de 2015

Para a minha família.

“It is hard to fail, but it is worse never to have tried to succeed.” (Theodore Roosevelt)

Agradecimentos

Em primeiro lugar um agradecimento ao Engenheiro Pedro Pinho pela orientação, disponibilidade e apoio na realização desta dissertação.

Ao Ricardo Gonçalves pela ajuda que me deu nos primeiros passos de utilização do simulador *CST Studio Suíte*.

Ao Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, ISEL, que me permitiu chegar até aqui e me ajudou a ser a pessoa que sou hoje.

Aos meus colegas da Associação de Estudantes do ISEL, AEISEL, que sempre me apoiaram e incentivaram, numa fase inicial, a avançar e concluir esta dissertação.

Aos meus amigos Carlota Faria, Luis Reis e Ana Catarina que embora não saibam na prática o que se fala nesta dissertação sempre se dispuseram a ajudar-me, principalmente na reta final, onde os momentos de maior aperto começam a ganhar força.

Aos meus pais, principalmente, pelo esforço, pelo carinho, pela amizade, pelas palavras que me deram e ajudaram a tomar a direção que aqui finda, pelos dias consecutivos que não me viam e principalmente pela compreensão, o meu obrigado eterno.

Ao meu irmão que sempre mostrou interesse no andamento desta dissertação e na sua aprovação, o meu grande agradecimento.

A todos, que de uma forma direta ou de uma forma não tão direta, me ajudaram a concretizar esta dissertação e me ajudaram nos momentos mais difíceis por que passei, o meu mais sincero agradecimento.

Resumo

Esta dissertação surge no âmbito da finalização do Mestrado de Engenharia Eletrónica e Telecomunicações. O tema escolhido consiste, principalmente, no estudo de antenas MIMO (*Multiple Input Multiple Output*) para terminais móveis.

Com o avançar dos anos cada vez mais se procura uma melhor qualidade de serviço, maiores débitos binários e uma grande eficiência nos terminais móveis. Surge assim o conceito de sistema MIMO que aplicado em antenas de terminais móveis permite cumprir tal objetivo.

Pretende-se dimensionar uma antena MIMO com pelo menos dois elementos, com o intuito de adaptar a mesma a uma frequência de ressonância escolhida com base no que já foi dimensionado até hoje, reduzindo o acoplamento que exista entre os elementos que compõem a antena MIMO, através de técnicas de desacoplamento ou diferentes tipos de elementos ao nível das suas características e dimensões.

Palavras-chave: MIMO, antena, terminais móveis

Abstract

This work comes as part of the completion of Engineering in Telecommunications and Computers Master degree. The theme mainly consists in the study of MIMO antennas (Multiple Input Multiple Output) for mobile terminals.

As the advancing years are increasingly looking for a better quality of service, more bit rates and a large efficiency in mobile terminals. The concept of MIMO antenna system that applied in mobile devices allows fulfilling this goal.

Is intended to dimension a MIMO antenna with two elements at least in order to adapt a resonant frequency chosen based on what has been dimensioned to date, reducing the coupling that exists between the elements that compose the MIMO antenna, via coupling techniques or different elements at the level of its characteristics and dimensions.

Keywords: MIMO, antenna, mobile devices

Índice

AGRADECIMENTOS	III
RESUMO	V
ABSTRACT	VII
ÍNDICE	IX
LISTA DE FIGURAS	XI
LISTA DE TABELAS	XV
LISTA DE ACRÓNIMOS	XVII
CAPÍTULO 1	- 1 -
INTRODUÇÃO	- 1 -
1.1. MOTIVAÇÃO	- 3 -
1.2. OBJETIVOS	- 4 -
1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	- 4 -
CAPÍTULO 2	- 7 -
ESTADO DA ARTE	- 7 -
2.1. EVOLUÇÃO DAS COMUNICAÇÕES MÓVEIS	- 9 -
2.2. SISTEMAS MIMO	- 10 -
2.3. ANTENAS QUE UTILIZAM SISTEMAS MIMO	- 11 -
2.3.1. Monopolos Impressos Simples	- 11 -
2.3.2. Antenas MIMO de Frequência Única	- 12 -
2.3.3. Antenas MIMO de Dupla Banda	- 13 -
2.3.4. Antenas MIMO reconfiguradas de Dupla Banda	- 14 -
2.3.5. Redução do acoplamento em uma antena MIMO	- 14 -

CAPÍTULO 3 **- 17 -**

DIMENSIONAMENTO E IMPLEMENTAÇÃO DE MONOPOLOS SIMPLES **- 17 -**

- 3.1. MONPOLO IMPRESSO SIMPLES - 19 -
- 3.2. MONPOLO IMPRESSO *L-SHAPED* - 21 -
- 3.3. MONOPOL IMPRESSO *SNAKE SHAPED* - 23 -
- 3.4. MONPOLO IMPRESSO *C-SHAPED* - 26 -

CAPÍTULO 4 **- 29 -**

DIMENSIONAMENTO E IMPLEMENTAÇÃO DE ANTENAS MIMO **- 29 -**

- 4.1. ANTENA MIMO COM DOIS MONOPOLOS IMPRESSOS SIMPLES - 31 -
- 4.2. ANTENA MIMO COM DOIS MONOPOLOS IMPRESSOS *L-SHAPED* - 34 -
- 4.3. ANTENA MIMO COM DOIS MONOPOLOS IMPRESSOS *SNAKE SHAPED* - 38 -
- 4.4. ANTENA MIMO COM DOIS MONOPOLOS IMPRESSOS *C-SHAPED* - 42 -

CAPÍTULO 5 **- 49 -**

CONCLUSÕES **- 49 -**

- 5.1. RESULTADOS OBTIDOS - 51 -
- 5.2. TRABALHO FUTURO - 53 -

REFERÊNCIAS **- 55 -**

Lista de Figuras

Figura 1 – Dispositivo móvel convencional [1].	- 3 -
Figura 2 – Sistema MIMO simplificado. [5]	- 11 -
Figura 3 – Monopolo Impresso Simples (Frente e Verso).	- 19 -
Figura 4 – Parâmetro S_{11} do monopolo impresso simples com porto discreto (Vermelho) e contínuo (Azul).	- 20 -
Figura 5 – Parte real da impedância de entrada vista do porto de alimentação do monopolo impresso simples com porto discreto (Vermelho) e contínuo (Azul).	- 20 -
Figura 6 – Parte imaginária da impedância de entrada vista do porto de alimentação do monopolo impresso simples com porto discreto (Vermelho) e contínuo (Azul).	- 20 -
Figura 7 – Plano XoY referente ao monopolo impresso simples, utilizando um porto de alimentação discreto.	- 21 -
Figura 8 – Plano YoZ referente ao monopolo impresso simples, utilizando um porto de alimentação discreto.	- 21 -
Figura 9 – Monopolo Impresso <i>L-Shaped</i> (Frente e Verso).	- 21 -
Figura 10 – Parâmetro S_{11} do monopolo impresso <i>L-Shaped</i> com porto discreto (Vermelho) e contínuo (Azul).	- 22 -
Figura 11 – Parte real da impedância de entrada vista do porto de alimentação do monopolo impresso <i>L-Shaped</i> com porto discreto (Vermelho) e contínuo (Azul).	- 22 -
Figura 12 – Parte imaginária da impedância de entrada vista do porto de alimentação do monopolo impresso <i>L-Shaped</i> com porto discreto (Vermelho) e contínuo (Azul).	- 22 -
Figura 13 – Plano XoY referente ao monopolo impresso <i>L-Shaped</i> , utilizando um porto de alimentação discreto.	- 23 -
Figura 14 – Plano YoZ referente ao monopolo impresso <i>L-Shaped</i> , utilizando um porto de alimentação discreto.	- 23 -
Figura 15 – Monopolo impresso simples <i>Snake-Shaped</i> (Frente e Verso).	- 23 -
Figura 16 – Parâmetro S_{11} do monopolo impresso <i>Snake-Shaped</i> com porto discreto (Vermelho) e contínuo (Azul).	- 24 -
Figura 17 – Parte real da impedância de entrada vista do porto de alimentação do monopolo impresso <i>Snake-Shaped</i> com porto discreto (Vermelho) e contínuo (Azul).	- 25 -

Figura 18 – Parte imaginária da impedância de entrada vista do porto de alimentação do monopolo impresso <i>Snake-Shaped</i> com porto discreto (Vermelho) e contínuo (Azul).	25 -
Figura 19 – Plano XoY referente ao monopolo impresso <i>Snake-Shaped</i> , utilizando um porto de alimentação discreto.....	26 -
Figura 20 – Plano YoZ referente ao monopolo impresso <i>Snake-Shaped</i> , utilizando um porto de alimentação discreto.....	26 -
Figura 21 – Monopolo impresso simples <i>C-Shaped</i> (Frente e Verso).....	27 -
Figura 22 – Parâmetro S_{11} do monopolo impresso <i>C-Shaped</i> com porto discreto (Vermelho) e contínuo (Azul).	27 -
Figura 23 – Parte real da impedância de entrada vista do porto de alimentação do monopolo impresso <i>C-Shaped</i> com porto discreto (Vermelho) e contínuo (Azul).	27 -
Figura 24 – Parte imaginária da impedância de entrada vista do porto de alimentação do monopolo impresso <i>C-Shaped</i> com porto discreto (Vermelho) e contínuo (Azul).....	28 -
Figura 25 – Plano XoY referente ao monopolo impresso <i>C-Shaped</i> , utilizando um porto de alimentação discreto.....	28 -
Figura 26 – Plano YoZ referente ao monopolo impresso <i>C-Shaped</i> , utilizando um porto de alimentação discreto.....	28 -
Figura 27 – Antena MIMO composta por dois monopolos impressos simples, partilhando o plano de massa (Frente e Verso).....	31 -
Figura 28 – Parâmetro S_{11} e/ou S_{22} da antena MIMO com dois monopolos impressos simples usando o mesmo plano de massa à distância de λ (Vermelho), $\lambda/2$ (Verde) e $\lambda/4$ (Azul).	32 -
Figura 29 – Parâmetro S_{12} e/ou S_{21} da antena MIMO com dois monopolos impressos simples usando o mesmo plano de massa à distância de λ (Vermelho), $\lambda/2$ (Verde) e $\lambda/4$ (Azul).	32 -
Figura 30 – Antena MIMO composta por dois monopolos impressos simples, com planos de massa distintos (Frente e Verso).	33 -
Figura 31 – Parâmetro S_{11} e/ou S_{22} da antena MIMO com dois monopolos impressos simples usando planos de massa distintos à distância de λ (Vermelho), $\lambda/2$ (Verde) e $\lambda/4$ (Azul), após realizar alteração no plano de massa.	33 -
Figura 32 – Parâmetro S_{11} e/ou S_{22} da antena MIMO com dois monopolos impressos simples usando planos de massa distintos à distância de λ (Vermelho), $\lambda/2$ (Verde) e $\lambda/4$ (Azul).....	34 -
Figura 33 – Parâmetro S_{12} e/ou S_{21} da antena MIMO com dois monopolos impressos simples usando planos de massa distintos à distância de λ (Vermelho), $\lambda/2$ (Verde) e $\lambda/4$ (Azul).....	34 -
Figura 34 – Antena MIMO composta por dois monopolos impressos <i>L-Shaped</i> , partilhando o plano de massa (Frente e Verso).	35 -
Figura 35 – Parâmetro S_{11} e/ou S_{22} da antena MIMO com dois monopolos impressos <i>L-Shaped</i> usando o mesmo plano de massa à distância de λ (Vermelho), $\lambda/2$ (Verde) e $\lambda/4$ (Azul).	35 -

Figura 36 – Parâmetro S_{12} e/ou S_{21} da antena MIMO com dois monopolos impressos *L-Shaped* usando o mesmo plano de massa à distância de λ (Vermelho), $\lambda/2$ (Verde) e $\lambda/4$ (Azul). - 36 -

Figura 37 – Antena MIMO composta por dois monopolos impressos *L-Shaped*, com planos de massa distintos (Frente e Verso). - 36 -

Figura 38 – Parâmetro S_{11} e/ou S_{22} da antena MIMO com dois monopolos impressos *L-Shaped* usando planos de massa distintos à distância de λ (Vermelho), $\lambda/2$ (Verde) e $\lambda/4$ (Azul). - 37 -

Figura 39 – Parâmetro S_{12} e/ou S_{21} da antena MIMO com dois monopolos impressos simples usando planos de massa distintos à distância de λ (Vermelho), $\lambda/2$ (Verde) e $\lambda/4$ (Azul). - 38 -

Figura 40 – Antena MIMO composta por dois monopolos impressos *Snake-Shaped*, partilhando o plano de massa (Frente e Verso). - 38 -

Figura 41 – Parâmetro S_{11} e/ou S_{22} da antena MIMO com dois monopolos impressos *Snake-Shaped* usando o mesmo plano de massa à distância de λ (Vermelho), $\lambda/2$ (Verde) e $\lambda/4$ (Azul). - 39 -

Figura 42 – Parâmetro S_{12} e/ou S_{21} da antena MIMO com dois monopolos impressos *Snake-Shaped* usando o mesmo plano de massa à distância de λ (Vermelho), $\lambda/2$ (Verde) e $\lambda/4$ (Azul). - 39 -

Figura 43 – Antena MIMO composta por dois monopolos impressos *Snake-Shaped*, com planos de massa distintos (Frente e Verso). - 40 -

Figura 44 – Parâmetro S_{11} e/ou S_{22} da antena MIMO com dois monopolos impressos *Snake-Shaped* usando planos de massa distintos à distância de λ (Vermelho), $\lambda/2$ (Verde) e $\lambda/4$ (Azul). - 41 -

Figura 45 – Parâmetro S_{12} e/ou S_{21} da antena MIMO com dois monopolos impressos *Snake-Shaped* usando planos de massa distintos à distância de λ (Vermelho), $\lambda/2$ (Verde) e $\lambda/4$ (Azul). - 41 -

Figura 46 – Parte real da impedância de entrada Z_{11} e/ou Z_{22} da antena MIMO com dois monopolos impressos *Snake-Shaped* usando planos de massa distintos à distancia de λ (Vermelho), $\lambda/2$ (Verde) e $\lambda/4$ (Azul). - 42 -

Figura 47 – Parte imaginária da impedância de entrada Z_{11} e/ou Z_{22} da antena MIMO com dois monopolos impressos *Snake-Shaped* usando planos de massa distintos à distancia de λ (Vermelho), $\lambda/2$ (Verde) e $\lambda/4$ (Azul). - 42 -

Figura 48 – Antena MIMO composta por dois monopolos impressos *C-Shaped*, partilhando o plano de massa (Frente e Verso). - 43 -

Figura 49 – Parâmetro S_{11} e/ou S_{22} da antena MIMO com dois monopolos impressos *C-Shaped* usando o mesmo plano de massa à distância de λ (Vermelho), $\lambda/2$ (Verde) e $\lambda/4$ (Azul). - 43 -

Figura 50 – Parâmetro S_{12} e/ou S_{21} da antena MIMO com dois monopolos impressos *C-Shaped* usando o mesmo plano de massa à distância de λ (Vermelho), $\lambda/2$ (Verde) e $\lambda/4$ (Azul). - 44 -

Figura 51 – Antena MIMO composta por dois monopolos impressos *C-Shaped*, com planos de massa distintos (Frente e Verso). - 44 -

Figura 52 – Parâmetro S_{11} e/ou S_{22} da antena MIMO com dois monopolos impressos *C-Shaped* usando planos de massa distintos à distância de λ (Vermelho), $\lambda/2$ (Verde) e $\lambda/4$ (Azul). - 45 -

Figura 53 – Parâmetro S_{12} e/ou S_{21} da antena MIMO com dois monopolos impressos *C-Shaped* usando planos de massa distintos à distância de λ (Vermelho), $\lambda/2$ (Verde) e $\lambda/4$ (Azul).....- 45 -

Figura 54 – Parte real da impedância de entrada Z_{11} e/ou Z_{22} da antena MIMO com dois monopolos impressos *C-Shaped* usando planos de massa distintos à distancia de λ (Vermelho), $\lambda/2$ (Verde) e $\lambda/4$ (Azul).- 46 -

Figura 55 – Parte imaginaria da impedância de entrada Z_{11} e/ou Z_{22} da antena MIMO com dois monopolos impressos *C-Shaped* usando planos de massa distintos à distancia de λ (Vermelho), $\lambda/2$ (Verde) e $\lambda/4$ (Azul).....- 46 -

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Valores de ganho e eficiência [17].	- 14 -
Tabela 2 – Dimensionamento do Monopolo impresso utilizando as duas abordagens.	- 19 -
Tabela 3 – Dimensionamento do Monopolo impresso <i>L-Shaped</i> utilizando as duas abordagens. -	21 -
Tabela 4 – Dimensionamento do Monopolo impresso <i>Snake-Shaped</i> utilizando as duas abordagens. -	24 -
Tabela 5 – Dimensionamento do Monopolo impresso <i>C-Shaped</i> utilizando as duas abordagens. -	26 -
Tabela 6 – Dimensão do substrato das antenas MIMO consoante o espaçamento existente entre elementos.	- 31 -
Tabela 7 – Comprimento dos elementos utilizados conforme distanciamento entre os mesmos e resultados dos parâmetros S_{11} , S_{12} , S_{21} e S_{22} para a antena MIMO apresentada na Figura 35.....	- 32 -
Tabela 8 – Comprimento dos elementos utilizados conforme distanciamento entre os mesmos e resultados dos parâmetros S_{11} , S_{12} , S_{21} e S_{22} para a antena MIMO apresentada na Figura 38.....	- 33 -
Tabela 9 – Comprimento dos elementos utilizados conforme distanciamento entre os mesmos e resultados dos parâmetros S_{11} , S_{12} , S_{21} e S_{22} para a antena MIMO apresentada na Figura 41.....	- 35 -
Tabela 10 – Comprimento dos elementos utilizados conforme distanciamento entre os mesmos e resultados dos parâmetros S_{11} , S_{12} , S_{21} e S_{22} para a antena MIMO apresentada na Figura 44.....	- 37 -
Tabela 11 – Comprimento dos elementos utilizados conforme distanciamento entre os mesmos e resultados dos parâmetros S_{11} , S_{12} , S_{21} e S_{22} para a antena MIMO apresentada na Figura 47.....	- 38 -
Tabela 12 – Comprimento dos elementos utilizados conforme distanciamento entre os mesmos e resultados dos parâmetros S_{11} , S_{12} , S_{21} e S_{22} para a antena MIMO apresentada na Figura 50.....	- 40 -
Tabela 13 – Comprimento dos elementos utilizados conforme distanciamento entre os mesmos e resultados dos parâmetros S_{11} , S_{12} , S_{21} e S_{22} para a antena MIMO apresentada na Figura 55.....	- 43 -
Tabela 14 – Comprimento dos elementos utilizados conforme distanciamento entre os mesmos e resultados dos parâmetros S_{11} , S_{12} , S_{21} e S_{22} para a antena MIMO apresentada na Figura 58.....	- 45 -
Tabela 15 – Comparação das impedâncias de entradas entre duas antenas MIMO com planos de massa distintos.	- 46 -

Lista de Acrónimos

A

AMTS *Advance Mobile Telephone System*

D

DCS *Digital Celular Service*

DGS *Defect Ground Structure*

F

FDTD *Finite Difference Time Domain*

I

IEEE *Institute of Electrical and Electronics Engineers*

IMTS *Improved Mobile Telephone Service*

IP *Internet Protocol*

IPD *Integrated Passive Device*

L

LTE *Long Term Evolution*

M

MIMO *Multiple Input Multiple Output*

MISO *Multiple Input Single Output*

MTS *Mobile Telephone System*

P

PCB *Printed Circuit Board*

PCS *Personal Communications Services*

PIFA *Planar Inverted-F Antenna*

PSTN *Public Switched Telephone Networks*

PTT *Push-to-Talk*

R

RF *Radio Frequency*

S

SDR *Software Define Radio*

SIMO *Single Input Multiple Output*

SISO *Single Input Single Output*

SNR *Signal-Noise Ratio*

U

UMTS *Universal Mobile Telecommunications System*

W

WLAN *Wireless Local Area Network*

Capítulo 1

Introdução

Neste capítulo é feita uma breve introdução ao tema abordado e são apresentadas as motivações que levaram a elaboração desta dissertação, bem como a estruturação da mesma. Pretende-se com este capítulo iniciar a elaboração do relatório final, explicando de forma direta e concisa os pontos a atingir e os resultados esperados.

1.1. Motivação

Nas últimas décadas, o mercado de negócios das telecomunicações tem assistido a um grande crescimento econômico devido ao incrível desenvolvimento tecnológico a que tem sido submetido. Responsável por novas tendências e vícios, tem influenciado novos hábitos e ampliou a capacidade, mas também a necessidade de conectividade entre pessoas, empresas e da Internet.

Num mundo que se torna a cada dia mais digital, começou a ser quase obrigatório ter acesso à informação através de um dispositivo móvel. Devido à facilidade com que se regista a aquisição de *smartphones* nos dias de hoje fez com que cada pessoa tivesse pelo menos um telemóvel, tornou a largura de banda que rede de serviço pequena e apresentasse alguma debilidade, contudo com o aparecimento de com novas tecnologias e novos *hardwares* esse problema em parte solucionou-se.

O número de tecnologias de comunicação sem fios que surgiu nas últimas duas décadas é vasta, sendo imperativo nos dias de hoje continuar a estudar novos métodos de integração e interoperabilidade entre dispositivos. Como se pode ver na Figura 1, um *smartphone* convencional é muito utilizado nos dias de hoje e alberga todas as tecnologias ali indicadas.



Figura 1 – Dispositivo móvel convencional [1].

A eletrónica desenvolvida para dispositivos sem fios vai no intuito de encolher e tornar estes dispositivos o mais pequenos possível e num só circuito integrado. Também os *softwares* e *firmwares* nas unidades de processamento estão a desenvolver-se de forma a serem mais rápidos e menos consumidores de energia. Contudo outro elemento do sistema que pode ser melhorado é a interface rádio e mais concretamente as antenas destes dispositivos.

Segundo [1], existem várias soluções diferentes para solucionar a capacidade de interoperabilidade das antenas. Desde antenas multi-banda a antenas de banda larga sendo que várias abordagens foram apresentadas nos últimos anos. Contudo este tipo de antenas apresenta desvantagens, sendo que as antenas multi-banda não são versáteis, difíceis de projetar e nem sempre apresentam um bom desempenho para todas as bandas que cobrem. Além disso não são antenas de pequenas dimensões o que não servem actualmente. Quanto às antenas banda larga estas podem cobrir grandes larguras de banda com aparente bom desempenho, contudo não é um desempenho bom em particular levando a ganhos médios/baixos apresentando dimensões igualmente grandes.

Ainda segundo [1] existe duas maneiras para obter a versatilidade mencionada antes dimensionando antenas reconfiguráveis permitindo diminuir o número de antenas presentes em um determinado dispositivo móvel. Pode igualmente ser integrado em sistemas mais complexos tais como MIMO (*Multiple-Input Multiple-Output*) e/ou sistemas cognitivos, também conhecidos como SDR (*Software Define Radio*).

1.2. Objectivos

O objectivo desta dissertação é o dimensionamento de antenas MIMO que sejam ressonantes na banda WLAN, *Wireless Local Area Network*, mais concretamente à frequência dos 2400 MHz, tendo pelo menos dois elementos colocados à menor distância possível.

Outro objectivo desta dissertação é encontrar formas e métodos que permitam reduzir o acoplamento que existe entre elementos de uma antena MIMO quando estes se apresentam bem próximos um do outro.

1.3. Estrutura da Dissertação

A organização desta dissertação é feita da seguinte forma. No primeiro capítulo é apresentada uma introdução e um enquadramento do trabalho a desenvolver juntamente com alguns trabalhos relacionados com o tema a fim de avançar com o desenvolvimento da presente dissertação.

O segundo capítulo apresenta um breve estudo sobre a evolução das comunicações móveis em Portugal e no Mundo assim como o modo funcional dos sistemas MIMO. Neste segundo capítulo é apresentada o estudo realizado sobre trabalhos relacionados com o dimensionamento de antenas MIMO.

No terceiro capítulo são apresentados quatro monopolos impressos simples, tomando diferentes figuras geométricas, proporcionando uma análise singular do funcionamento destas antenas ao nível da adaptação à frequência de ressonância e impedância de entrada, bem como a visualização do seu

diagrama de radiação. Estas antenas foram dimensionadas também com o intuito de serem utilizadas no capítulo seguinte e o seu dimensionamento foi feito com o objectivo de obter o menor acoplamento possível quando integram um sistema MIMO.

O quarto capítulo, apresenta o dimensionamento de quatro antenas MIMO compostas por dois elementos. Como já referido esses elementos são os monopolos impressos dimensionados no capítulo anterior e analisar a influência que os elementos apresentam entre si, tendo sido estudada e implementado uma forma de reduzir essa influência o mais possível.

No quinto e último capítulo são apresentadas as conclusões do trabalho realizado e são sugeridas algumas possibilidades de trabalho futuro tendo em conta o trabalho até agora desenvolvido.

Capítulo 2

Estado da Arte

Neste capítulo descreve-se a evolução das comunicações móveis até aos dias de hoje. Posteriormente, realiza-se uma breve análise aos sistemas MIMO bem como os sistemas variantes que lhe deram origem. Realiza-se uma análise das antenas MIMO já existentes e quais as soluções em antenas MIMO que já se aplicaram.

2.1. Evolução das Comunicações Móveis

Em 1940 é desenvolvido pela Motorola um dispositivo móvel de nome *The Handie-Talkie SCR536 Radio*. Este dispositivo era de grande tamanho, comparando com os actuais, contudo teve importante uso na segunda guerra mundial. [2]

Entre os anos de 1946 e 1964 foi desenvolvida uma rede pré-celular. O interesse nas comunicações móveis tinha crescido e como tal surgiram várias redes como o PTT (*Push-to-Talk*), o MTS (*Mobile Telephone System*), o IMTS (*Improved Mobile Telephone Service*) e o AMTS (*Advance Mobile Telephone System*). Estes serviços estavam disponíveis comercialmente através das PSTN (*Public Switched Telephone Networks*) [2].

Em 1973 é efectuada a primeira chamada num telemóvel. Embora a Motorola e os Laboratórios *Bell* disputassem a construção do primeiro telefone realmente portátil, foi *Martin Cooper* que realizou a primeira chamada utilizando um protótipo “*DynaTAC cellular phone*” no dia 3 de Abril de 1973. Posteriormente em 1977 surge a primeira rede celular, situada em Chicago, Estados Unidos da América, com 1300 utilizadores. Nesta altura as maiores barreiras eram os níveis de cobertura limitados e a alternância entre operadores dentro da mesma célula. A partir de então, com todo este avanço tecnológico, começa a ouvir-se falar em “Gerações” [2].

Entre os anos de 1977 e 1990 o desenvolvimento da rede celular durante esta era ficou conhecido por Primeira Geração, 1G, ficando marcada pela criação de pequenas redes, nos países escandinavos, Reino Unido, Canadá, México, Washington e Boston [2].

Entre os anos de 1991 e 2001 surge a Segunda Geração, 2G. Nesta altura a utilização do telemóvel é marcada pela inclusão da transmissão digital na rede. Também permitiu que telefones mais pequenos fossem fabricados levando a extinção dos antigos “blocos ou caixas”. Neste período acontecem alguns marcos importantes, como o primeiro *smartphone* a nível mundial (1992), na Finlândia surge a primeira mensagem curta enviada de pessoa para pessoa (1993), possibilidade de realizar *download* de toques através do dispositivo móvel (1998) e no Japão é lançado o primeiro serviço completo de internet (1999). No final dos anos 90 surgem os primeiros planos pré pagos tornando as comunicações móveis mais acessíveis para toda a população [2].

Em 2001 surge a Terceira Geração, 3G, prolongando-se até ao ano 2009. Depois de ser lançado o primeiro serviço completo de internet móvel, o tráfego de dados móveis cresce exponencialmente, fazendo com que a comutação de circuitos tenha sido preterida face à comutação de pacotes, diga-se a maior diferença entre as tecnologias 2G e 3G. Isto fez com que as taxas de transmissão de dados

tenham aumentado, permitindo *streaming* de conteúdo de multimédia e mudando a forma de interacção entre os utilizadores e telemóveis. Serviços como navegação *Web*, configuração da caixa de correio electrónico, câmara fotográfica, serviço de teleconferência, entre outros começam a ser oferecidos aos utilizadores [2].

Desde 2009 começa a febre da 4ª Geração, 4G, sendo ainda uma tecnologia demasiadamente nova marca a passagem da comutação de pacotes para transmissão totalmente por IP (*Internet Protocol*), tendo a potencialidade de aumentar em dez vezes o débito das redes 3G. Começam então a surgir os primeiros dispositivos que suportam esta geração de comunicação, contudo muitos utilizadores ainda estão ligados à rede 3G.

2.2. Sistemas MIMO

Os sistemas de comunicações sem fio tradicionais são baseados na utilização de uma única antena, no lado do transmissor e do receptor, também conhecidos por sistemas SISO (*Single Input Single Output*). Sendo apenas um dos terminais equipado com um agregado de antenas SIMO (*Single Input Multiple Output*) e MISO (*Multiple Input Single Output*) permite a exploração parcial do domínio espacial, podendo ser obtido ganhos de diversidade espacial, por exemplo.

Os sistemas que utilizam diversas antenas no transmissor e no receptor (ver Figura 2), designam-se por sistemas MIMO e permitem a exploração total do domínio espacial. Os sistemas MIMO permitem obter ganhos de diversidade, de formação de feixe e de capacidade. Podendo caracterizar o ambiente com a existência de um elevado número de componentes multipercorso que são independentes, tem-se uma capacidade de transmissão de informação muito superior que qualquer outro sistema de comunicação móvel. O conceito de multiplexagem espacial é fundamental permitindo que as características de propagação das componentes multipercorso sejam vistas como forma a criar múltiplos canais virtuais de transmissão paralelos.

Neste caso, o desafio de aumentar a taxa de transmissão e a fiabilidade da informação, envolve várias adversidades. Segundo Shannon e Hartley o aumento de capacidade em um canal de transmissão (*bps*) é necessário o aumento da largura de banda ou da SNR (*Signal-Noise Ratio*) [3]. A utilização do espectro de frequência é limitada devido a ser um recurso caro e escasso, sendo que por outro lado o aumento da SNR está directamente ligado ao aumento da potência de transmissão, o que se torna pouco concebido num dispositivo móvel.

Os sistemas MIMO realizam uma forma de diversidade espacial, logo apresentam um ganho de diversidade que permite combater o desvanecimento e melhorar a fiabilidade da informação recebida.

A tecnologia MIMO aumenta a taxa de transmissão sem existir a necessidade de aumentar a largura de banda e/ou a potência de transmissão [4].



Figura 2 – Sistema MIMO simplificado. [5]

2.3. Antenas que utilizam Sistemas MIMO

Neste ponto são apresentados alguns trabalhos elaborados nos últimos anos onde foram dimensionadas antenas MIMO. Inicialmente estudou-se documentação relacionada com monopolos impressos simples, posteriormente antenas MIMO que apenas apresentavam uma frequência de ressonância e por fim antenas MIMO com duas ou mais frequências de ressonância.

São analisados também dois trabalhos que mostram técnicas de redução de acoplamento entre elementos e ainda um trabalho onde são lançados desafios sobre a elaboração de antenas MIMO em terminais de pequenas dimensões.

2.3.1. Monopolos Impressos Simples

Em [6] é apresentada uma antena monopolo multi-banda que opera em três gamas de frequência, 2,45 GHz, 5,2 GHz e 5,8 GHz. Esta antena tem a forma de um 'T' com dois braços, um maior que o outro. Dependendo do comprimento relativo destes braços pode sintonizar-se a frequência de ressonância e/ou a largura de banda. A largura de banda pode também ser sintonizada pelo ajuste do tamanho do plano de terra.

Em [7] um novo e simples tipo de antena impressa multi-banda é proposto. A antena consiste na existência de um monopolo em forma de 'G' e uma linha de alimentação numa placa impressa, utilizada em aplicações WLAN, proporcionando duas bandas de frequência ressonantes, 2,4 GHz e 5,2 GHz. O compromisso entre alta impedância de entrada e largura de banda, bem como padrões de radiação fiáveis foram estudados e simulados igualmente.

O artigo apresentado em [8] apresenta o desenho e o fabrico de uma antena monopolo para aplicações WLAN. A antena apresentada combina uma linha curva e a geometria fractal, sendo muito simples e fácil de fabricar de forma a obter característica de operação multi-banda. A antena apresenta uma largura de banda entre as frequências de 300 MHz à frequência central de 2400 MHz e de

800 MHz à frequência central de 5 GHz abrangendo a banda necessária para as normas WLAN 802.11 a/b/g. Verifica-se igualmente que o ganho desta antena situa-se nos 1,8 dBi com uma eficiência de 95% na primeira banda e um ganho de 2,4 dBi com uma eficiência de 94% na segunda banda, respectivamente.

2.3.2. Antenas MIMO de Frequência Única

Em [9] pode ver-se várias multi-antena para UMTS (*Universal Mobile Telecommunications System*) com elementos radiantes de alto isolamento, alta eficiência e baixo coeficiente de correlação. Um dos agregados consiste na colocação de duas antenas com a forma de um 'F', bem próximas na parte superior de um plano de massa da dimensão de um telemóvel. Neste artigo é proposto um melhoramento no isolamento e na eficiência total.

Em [10] são apresentados dois monopolos em forma de 'C' para aplicações WLAN. São utilizadas técnicas de neutralização para conseguir um isolamento alto entre os dois elementos quando estes estão espaçados em $0,09\lambda$ quando o agregado é radiante à frequência de 2,4 GHz. Verifica-se também uma largura de banda de aproximadamente 200 MHz e um isolamento entre elementos a atingir os -12 dB. Esta antena apresenta um tamanho razoável sendo aplicada em vários dispositivos sem fios.

Em [11] realizou-se um estudo de uma antena MIMO integrada num módulo sem fios a operar à frequência de 2,4 GHz para aplicações de *Pen's* USB banda larga. Baseia-se na conceção e implementação da antena MIMO em uma PCB (*Printed Circuit Board*) com quatro camadas e assente em um plano de massa realista. Foi garantido um maior isolamento entre as duas antenas MIMO espaçadas em uma área restrita e introduzida uma forma de T por forma a aumentar o isolamento. Adotando uma estrutura de fenda para os elementos que são radiantes, foi conseguido um alto isolamento entre as antenas dentro da área específica. Foram atingidos débitos em *downlink* de 139,45 Mbps e débitos em *uplink* de 63,59 Mbps sendo cumpridos os requisitos da norma IEEE 802.11n 1T2R.

Em [12] é apresentado o desenho de uma antena MIMO multimodo. Esta antena tem a particularidade de ser composta por um anel metálico operando com diferentes modos ortogonais, cujo desempenho é semelhante aos agregados de antenas, sendo assim obtida uma antena MIMO compacta ideal para terminais móveis. São analisados quais os modos radiantes da antena e um conjunto de configurações de alimentação é proposto para excitação dos modos. Havendo a particularidade dos modos terem que operar na mesma banda de frequências foi utilizada uma técnica de carga a fim de mudar a frequência de ressonância dos modos para a banda adequada.

Em [13] é apresentada uma abordagem para construção de uma antena MIMO de pequenas dimensões tendo por base um IPD (*Integrated Passive Device*). Os dispositivos IPD utilizam um substrato de vidro, uma película fina, que permite obter baixas perdas nas componentes RF (*Radio Frequency*). A utilização de uma película fina, o número de camadas limitadas e considerações tomadas em relação a dimensões torna-se um desafio no *design* da antena, especialmente quando se tenta implementar uma antena que tem por base o sistema MIMO. Resulta igualmente em um factor de qualidade elevado causando uma banda estreita na antena convencional. Para tal é desenvolvido nesta abordagem elementos de antenas que incorporam um acoplamento em forma de ‘T’. Os resultados obtidos mostram que a antena apresenta um ganho de 1,4 *dBi* e uma eficiência de 60% para a banda da norma IEEE 802.11A, 5,15 *GHz* e 5,825 *GHz*.

2.3.3. Antenas MIMO de Dupla Banda

Em [14] é apresentada uma antena denominada *Compact Dual-Band Planar Antenna Array*. Foram simulados e medidos dois tipos de agregados, um primeiro com três elementos e um outro com dois elementos. O primeiro agregado está adaptado ressonante nas bandas de 2,4 *GHz* e 5 *GHz*, apresentando perdas de retorno melhores que -10dB . Para este agregado o pico de eficiência atinge valores superiores a 70% em ambas as bandas. O segundo agregado consiste na utilização de duas antenas em forma de ‘L’ que são o espelho uma da outra ao serem colocadas numa PCB. Tal como o primeiro agregado, este funciona igualmente nas duas bandas referidas apresentando perdas de retorno melhores que -10dB e um isolamento na ordem do -9dB . Este agregado tem um pico de eficiência de 58% na banda dos 2,4 *GHz* e de 70% na banda dos 5 *GHz*.

Em [15] é apresentada um agregado denominado *Printed Coplanar Two-Antenna Element Suite* que opera nas bandas de 2,4 *GHz* e 5 *GHz*. As antenas que compõem este agregado são distintas, pois estamos perante um monopolo e uma antena PIFA (*Planar Inverter-F Antenna*). Durante a obtenção de resultados consegue obter-se outro modo ressonante à frequência de 3,4 *GHz*, contudo este é atribuído na sua totalidade à antena monopolo. É igualmente verificado que para a antena a operar na banda dos 2,4 *GHz* o ganho é de 4*dBi* com uma eficiência acima dos 75%. Em relação à antena a operar na banda dos 5 *GHz* verifica-se valores de ganho entre os 2*dBi* e os 4*dBi* com uma eficiência a variar entre os 70% e os 80%. Posteriormente é apresentado um sistema MIMO composto por dois agregados iguais ao que foi apresentado anteriormente, sendo verificado que o isolamento entre os dois agregados é menores que -15dB .

Em [16] é proposta uma antena MIMO utilizando tecnologia planar para sistemas de comunicações móveis de LTE (*Long Term Evolution*). A antena é constituída por dois monopolos simétricos e impressos em paralelo numa PCB de $14 \times 45 \text{ mm}^2$, semelhante ao lado de um telemóvel. Os dois

monopolos geram duas bandas de frequência e utilizando um elemento parasita uma largura de banda, principalmente na banda superior pode ser obtida. Através dos resultados obtidos conclui-se que a antena MIMO consegue cobrir as bandas de frequência DCS-1800 (*Digital Celular Service-1800*), PCS-1900 (*Personal Communications Service*), UMTS-2100, *Wireless Broadband*, WLAN-2,4GHz e a banda superior de *WiMax*. Para melhoramento do isolamento entre os elementos do agregado é aberta uma fenda a meio do solo da PCB. Verificam-se valores de ganho e eficiência para esta antena aceitáveis (ver Tabela 1).

Tabela 1 - Valores de ganho e eficiência [17].

Frequency	0.77 GHz	1.8 GHz	2.4 GHz	2.6 GHz
	Gain [dBi]			
1º Elemento	0,47	3,13	4,32	3,69
2º Elemento	0,43	3,10	4,23	3,66
	Efficiency [%]			
1º Elemento	57,18	68,60	57,47	51,70
2º Elemento	56,92	66,49	57,34	51,94

2.3.4. Antenas MIMO reconfiguradas de Dupla Banda

Em [17] é apresentado um agregado composto por dois monopolos que operam na banda dos 700 MHz, que em conjunto atingem a banda do LTE ou seja nos 2500 MHz. Os dois monopolos são colocados na PCB relativamente perto, sendo utilizado uma linha de neutralização que permite melhorar o seu isolamento na banda dos 700 MHz. Ao nível da performance de capacidade verifica-se melhoramentos que podem ir dos 12% até aos 46%.

Em [18] é apresentada um agregado de nome *Compact Printed Monopole Antenna Array* que opera sobre a banda de frequências para aplicações WLAN (2,4 GHz e 5,2 GHz). Os resultados indicaram que o agregado proposto cobre as frequências necessárias para aplicações WLAN de dupla banda. Ainda segundo os resultados obtidos neste artigo, o isolamento entre os elementos foi maior que 15 dB em ambas as bandas. Este isolamento foi obtido utilizando a técnica de neutralização, inicialmente implementado numa *Printed Monopole Antenna* e posteriormente com dois monopolos em forma de 'C' unidos de uma linha de neutralização aumentando o isolamento.

2.3.5. Redução do acoplamento em uma antena MIMO

Em [19] é utilizada a técnica DGS, *Defect Ground Structure*, com o objetivo de reduzir o acoplamento entre os elementos de um agregado. Ao plano de massa é aplicado um defeito, deixando o agregado com uma forma idêntica a um alter, entre os dois elementos (composto pelo substrato e antena)

criando um *bandgap* na frequência de ressonância da antena, permitindo também eliminar frequências parasitas que provocam baixo acoplamento entre os elementos do agregado. Esta antena DGS foi analisada utilizando o método FDTD (*Finite Difference Time Domain*), sendo que o acoplamento reduz-se em aproximadamente 18 *dB* sem existir grandes deformações do diagrama de radiação.

Em [20] é apresentado uma breve introdução sobre os desafios que envolvem a elaboração de antenas para sistemas MIMO em terminais de pequenas dimensões. A investigação é baseada no parâmetro fundamental da correlação cruzada das funções de transferência da antena. São tidas algumas considerações quanto à correlação entre os elementos que compõem o sistema MIMO, implementado num terminal de pequenas dimensões, que é afetado pelas deficiências de integração e da própria plataforma.

Capítulo 3

Dimensionamento e Implementação de Monopolos Simples

Neste capítulo pretende-se apresentar a parte inicial do trabalho desenvolvido no âmbito desta dissertação. Dimensionam-se várias antenas impressas, *microstrip*, com apenas um único elemento, que servirá de base para todo o trabalho desenvolvido posteriormente. Em cada um dos monopolos apresentados neste capítulo foram utilizadas duas abordagens, primeiro utilizando um porto de alimentação discreto e posteriormente um porto de alimentação contínuo ou *waveguide port*.

O primeiro passo a tomar foi o dimensionamento de monopolos impressos simples utilizando para isso o simulador computacional *CST Studio Suite*. Para tal e para efeitos de simulação utilizou-se o substrato denominado *Rogers RT880* com uma altura de 0,787 milímetros, uma permitividade relativa, $\epsilon_r = 2,2$ e uma tangente de perdas, $Tan(\delta) = 0,0009$. As dimensões físicas, $W_s = 33,5 \text{ mm}$ e $L_s = 45 \text{ mm}$, respectivamente a largura e altura do substrato, foram escolhidas tendo em conta as dimensões reais de um telemóvel convencional dos dias de hoje.

3.1. Monopolo Impresso Simples

Considera-se o monopolo impresso apresentado na Figura 3, cujo dimensionamento é apresentado na Tabela 2. Partindo do princípio que a frequência de ressonância é de 2400 MHz e que o λ (comprimento de onda) é de 125 mm , é espectável que o monopolo tenha um comprimento próximo de $\frac{1}{4}$ de λ , as dimensões escolhidas foram de encontro a esse requisito.

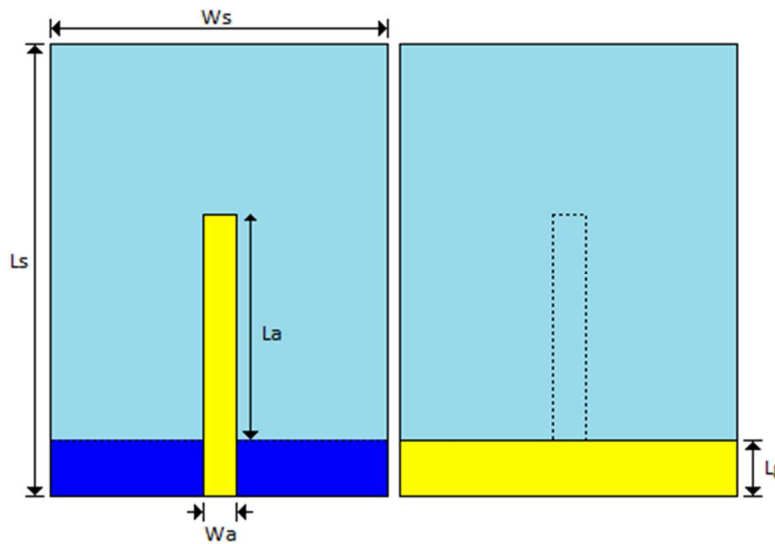


Figura 3 – Monopolo Impresso Simples (Frente e Verso).

Tabela 2 – Dimensionamento do Monopolo impresso utilizando as duas abordagens.

Parâmetro	c/ Porto Discreto	c/ Porto Contínuo	Descrição
La [mm]	38,8337	38,1197	Comprimento do Elemento
Lg [mm]	5,578	5,757	Comprimento do Plano de Massa
La'=La-Lg [mm]	33,2557	32,3627	Comprimento do Monopolo
Wa [mm]	3,317	3,0405	Largura do Monopolo

Utilizando as dimensões apresentadas e conforme esperado este monopolo apresenta uma frequência de ressonância de 2400 MHz usando as duas abordagens conforme mostra o parâmetro S_{11} (ver

Figura 4) e encontra-se igualmente adaptado como mostra a Figura 5 e Figura 6 que representam a impedância de entrada vista do porto de alimentação.

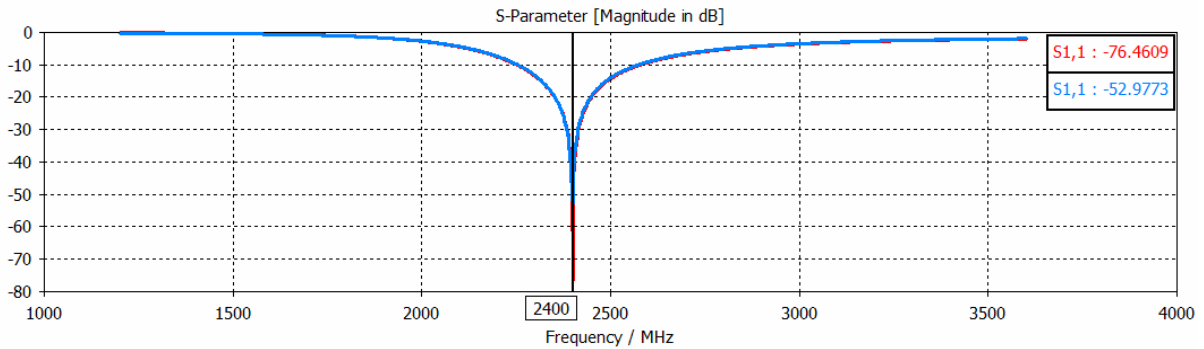


Figura 4 – Parâmetro S_{11} do monopolo impresso simples com porto discreto (Vermelho) e contínuo (Azul).

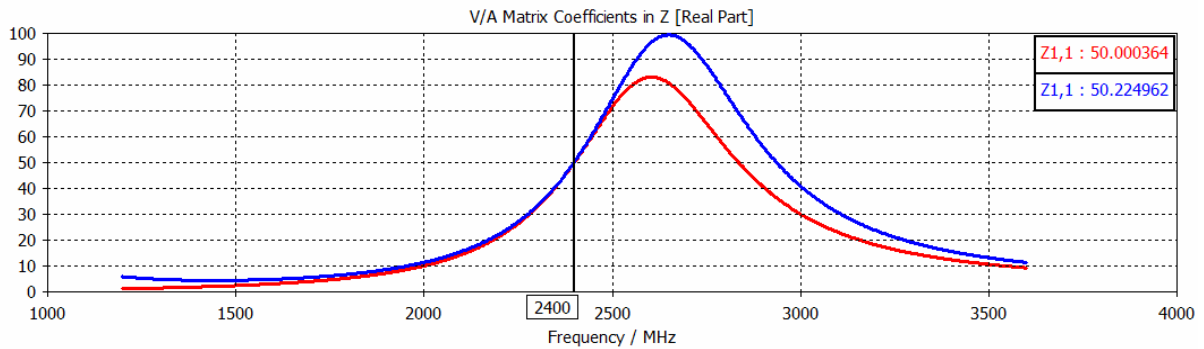


Figura 5 – Parte real da impedância de entrada vista do porto de alimentação do monopolo impresso simples com porto discreto (Vermelho) e contínuo (Azul).

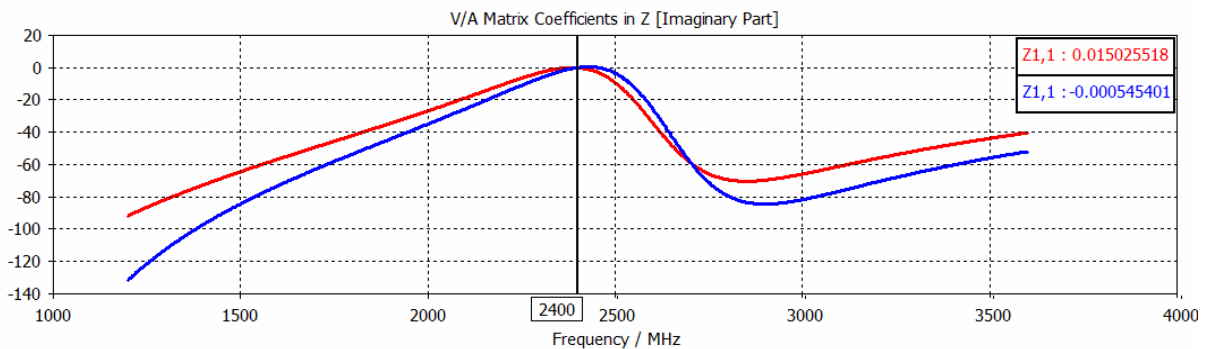


Figura 6 – Parte imaginária da impedância de entrada vista do porto de alimentação do monopolo impresso simples com porto discreto (Vermelho) e contínuo (Azul).

Igualmente observando o digrama de radiação verifica-se um comportamento omnidirecional do monopolo impresso, pelas duas abordagens feitas e contado com uma amplitude do lobo central de $1,88dBi$, tal como se observa na Figura 7 e Figura 8.

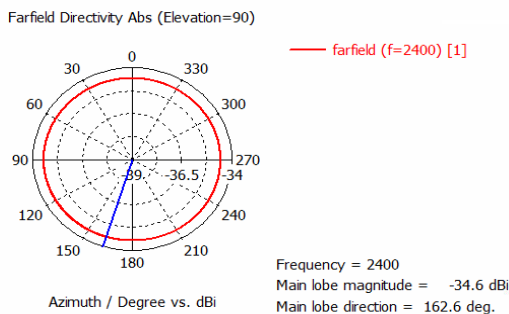


Figura 7 – Plano XoY referente ao monopolo impresso simples, utilizando um porto de alimentação discreto.

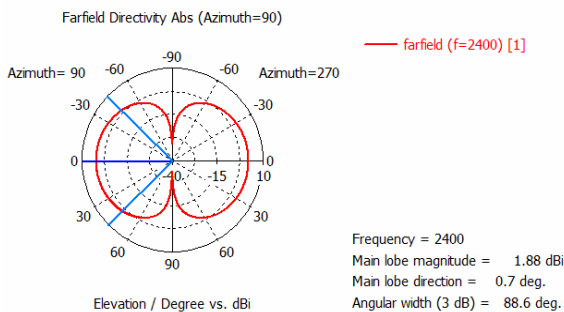


Figura 8 – Plano YoZ referente ao monopolo impresso simples, utilizando um porto de alimentação discreto.

3.2. Monopolo Impresso *L-Shaped*

De acordo com [1] resolveu-se alterar a forma do monopolo impresso simples tornando-o em um ‘L’ invertido (ver Figura 9). Individualmente esta alteração deverá notar-se no diagrama de radiação verificando-se uma rotação do mesmo. Contudo este monopolo foi dimensionado com o intuito de obter um acoplamento menor quando colocado em uma antena MIMO.

Tabela 3 – Dimensionamento do Monopolo impresso *L-Shaped* utilizando as duas abordagens.

Parâmetro	c/ Porto Discreto	c/ Porto Contínuo	Descrição
La [mm]	33,85	33,425	Comprimento do Elemento
La1 [mm]	12	12	Comprimento do Elemento
Lg [mm]	13,428	13,428	Comprimento do Plano de Massa
La'=La+La1-Lg [mm]	32,422	31,807	Comprimento do Monopolo
Wa [mm]	3,317	3,231	Largura do Monopolo

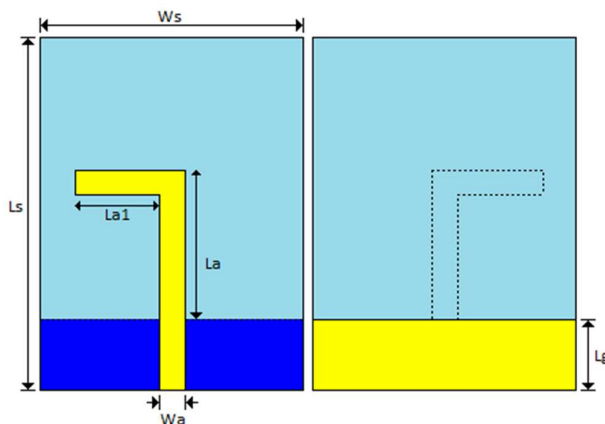


Figura 9 – Monopolo Impresso *L-Shaped* (Frente e Verso).

Seguindo a mesma metodologia do monopolo impresso apresentado anteriormente deve o valor referente ao comprimento do monopolo ser próximo de $\frac{1}{4}$ de λ (ver Tabela 3).

O dimensionamento deste monopolo impresso foi bem-sucedido, utilizando os dois tipos de abordagem já indicado, estando ressonante à frequência de 2400 MHz (ver Figura 10).

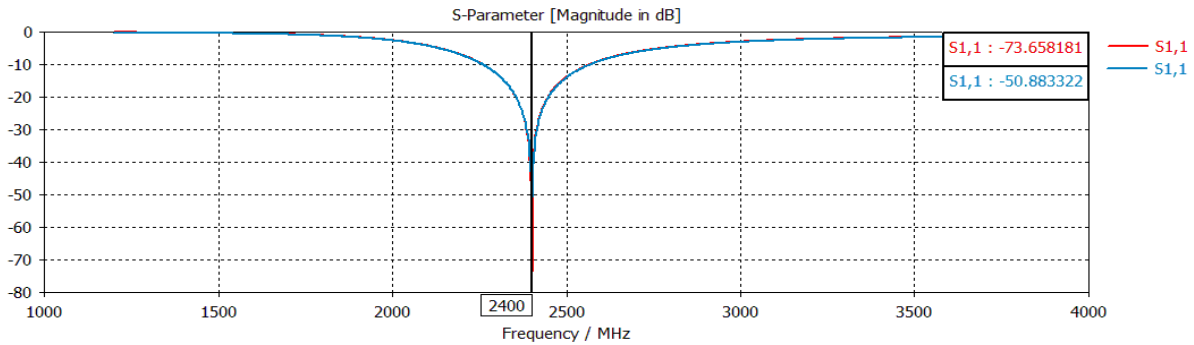


Figura 10 – Parâmetro S_{11} do monopolo impresso L -Shaped com porto discreto (Vermelho) e contínuo (Azul).

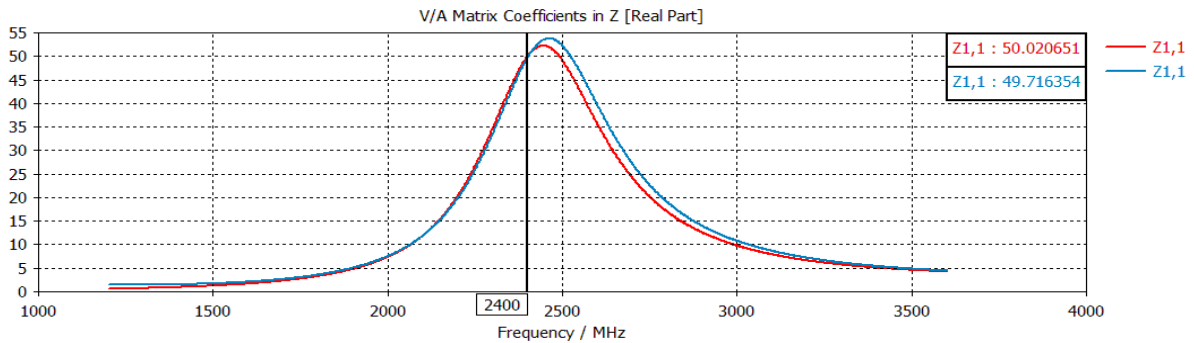


Figura 11 – Parte real da impedância de entrada vista do porto de alimentação do monopolo impresso L -Shaped com porto discreto (Vermelho) e contínuo (Azul).

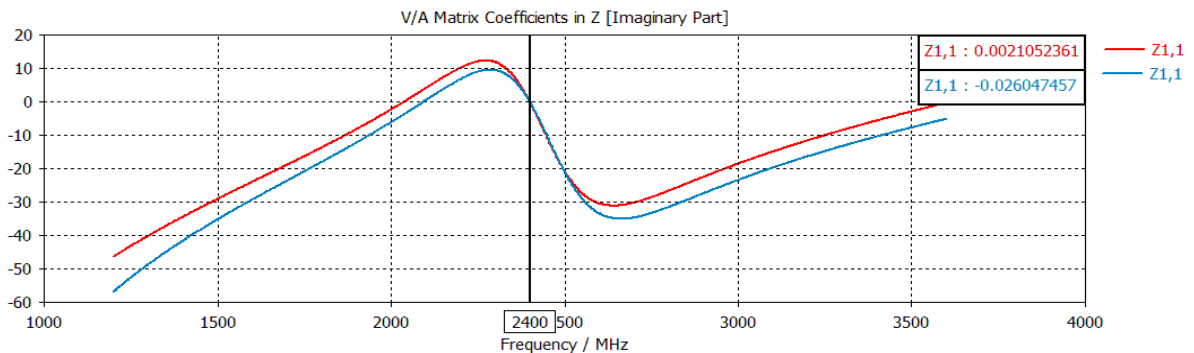


Figura 12 – Parte imaginária da impedância de entrada vista do porto de alimentação do monopolo impresso L -Shaped com porto discreto (Vermelho) e contínuo (Azul).

Este monopolo encontra-se igualmente adaptado quando se observa a impedância de entrada vista do porto de alimentação (ver Figura 11 e Figura 12). Fazendo uma comparação com o monopolo

apresentado em 3.1, verifica-se uma maior proximidade no andamento da impedância de entrada nas duas abordagens realizadas no monopolo impresso *L-Shaped*.

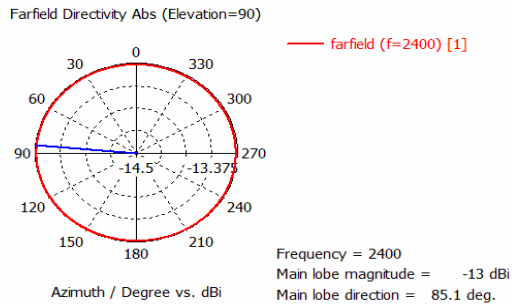


Figura 13 – Plano XoY referente ao monopolo impresso *L-Shaped*, utilizando um porto de alimentação discreto.

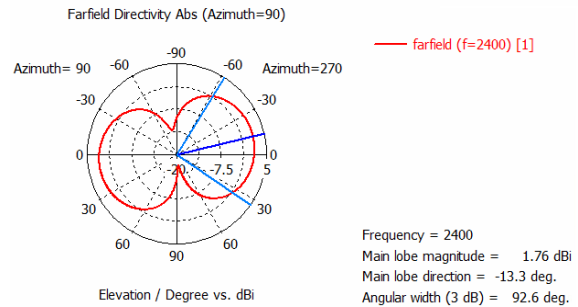


Figura 14 – Plano YoZ referente ao monopolo impresso *L-Shaped*, utilizando um porto de alimentação discreto.

Observando o digrama de radiação (Figura 13 e Figura 14) verifica-se um comportamento omnidirecional do monopolo impresso *L-Shaped* contando com a ligeira rotação que era esperada no diagrama de radiação, pelas duas abordagens feitas e contando com uma amplitude do lobo central de $1,77dBi$, tal como se observa nas figuras apresentadas em cima.

3.3. Monopol Impresso *Snake Shaped*

O monopolo impresso aqui apresentado teve um dimensionamento assente nos dois monopolos apresentados anteriormente. Acreditou-se que uma nova deformação no monopolo impresso *L-Shaped* apresentaria vantagens, respeitantes à diminuição do acoplamento entre elementos, quando aplicado em uma antena MIMO (ver Figura 15).

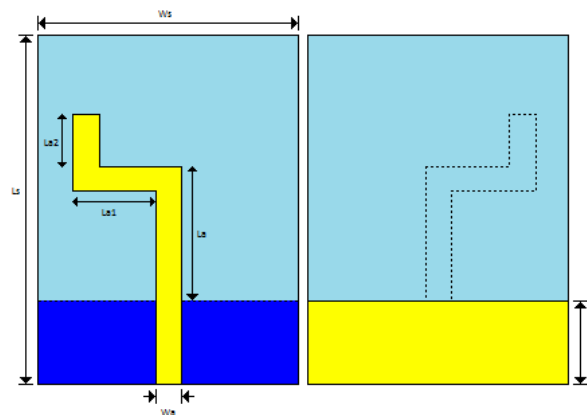


Figura 15 – Monopolo impresso simples *Snake-Shaped* (Frente e Verso).

Tabela 4 – Dimensionamento do Monopolo impresso *Snake-Shaped* utilizando as duas abordagens.

Parâmetro	c/ Porto Discreto	c/ Porto Contínuo	Descrição
La [mm]	29,85	29,485	Comprimento do Elemento
La1 [mm]	12	12	Comprimento do Elemento
La2 [mm]	7,054	7,056	Comprimento do Elemento
Lg [mm]	14,798	14,768	Comprimento do Plano de Massa
La'=La+La1+La2-Lg [mm]	34,106	33,773	Comprimento do Monopolo
Wa [mm]	3,317	3,241	Largura do Monopolo

Assim como nos monopolos impressos já apresentados, o comprimento do monopolo deve ser aproximadamente $\frac{1}{4}$ de λ (ver Tabela 4). Este monopolo impresso, em concordância com os anteriores, apresenta uma frequência de ressonância de 2400 MHz (ver Figura 16) e encontra-se adaptado nesta frequência como se pode observar pelos gráficos da impedância de entrada vista do porto de alimentação (ver Figura 17 e Figura 18).

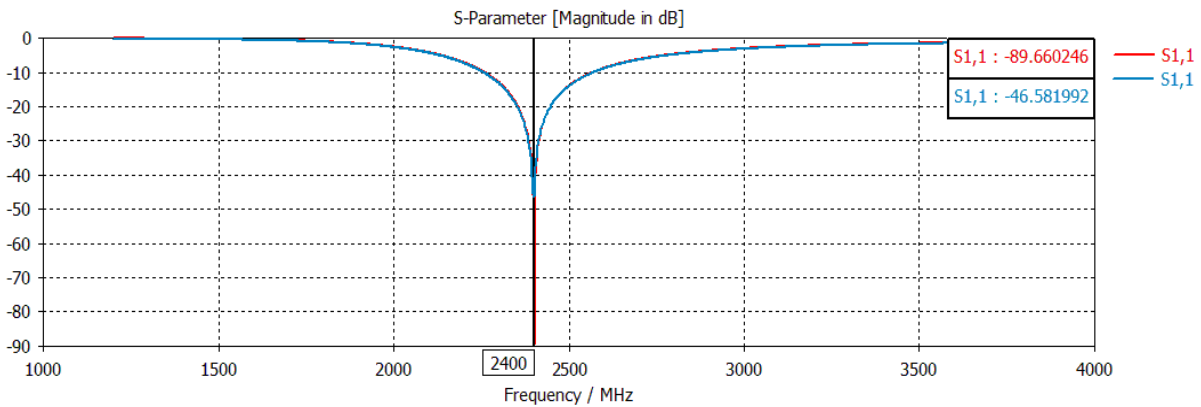


Figura 16 – Parâmetro S_{11} do monopolo impresso *Snake-Shaped* com porto discreto (Vermelho) e contínuo (Azul).

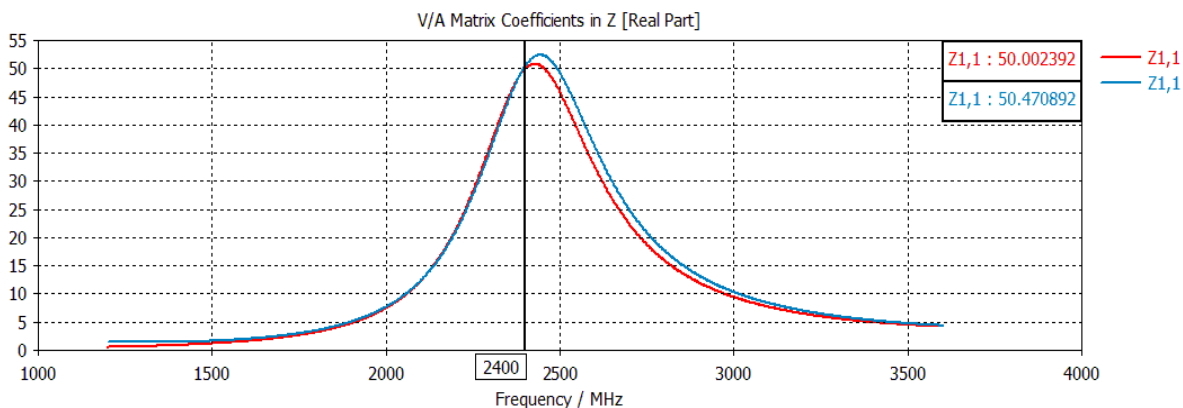


Figura 17 – Parte real da impedância de entrada vista do porto de alimentação do monopolo impresso *Snake-Shaped* com porto discreto (Vermelho) e contínuo (Azul).

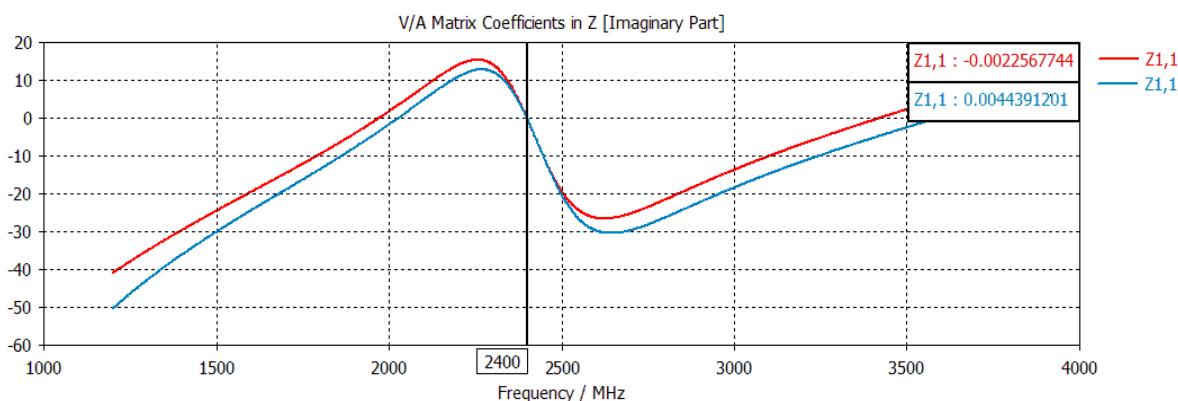


Figura 18 – Parte imaginária da impedância de entrada vista do porto de alimentação do monopolo impresso *Snake-Shaped* com porto discreto (Vermelho) e contínuo (Azul).

Este monopolo apresenta uma adaptação melhor que os dois até então apresentados, verificando-se uma proximidade quase perfeita entre a utilização de um porto de alimentação contínuo e um porto de alimentação discreto (impedância de entrada fixa nos 50Ω).

Observando o digrama de radiação verifica-se um comportamento omnidirecional do monopolo impresso *Snake-Shaped* existindo uma ligeira rotação do diagrama de radiação, face ao monopolo apresentado em 3.2, usando os dois tipos de abordagens e contado com uma amplitude do lobo central de 1,84dBi, tal como se observa na Figura 19 e Figura 20.

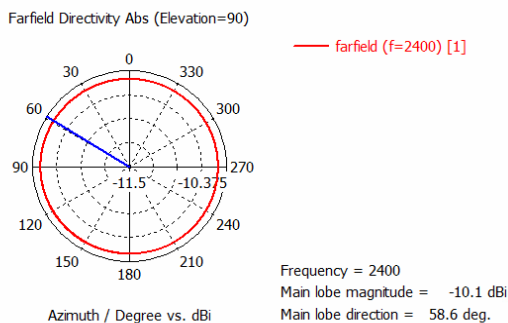


Figura 19 – Plano XoY referente ao monopolo impresso Snake-Shaped, utilizando um porto de alimentação discreto.

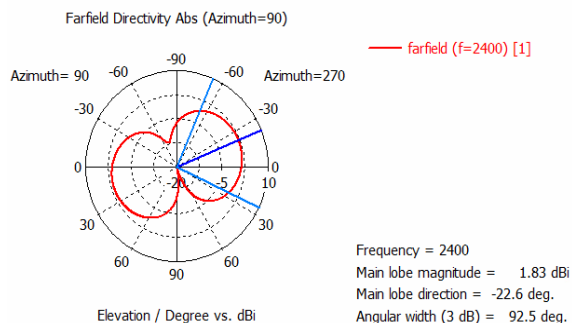


Figura 20 – Plano YoZ referente ao monopolo impresso Snake-Shaped, utilizando um porto de alimentação discreto.

3.4. Monopolo Impresso C-Shaped

Segundo observação feita em [1] decidiu-se dimensionar um monopolo impresso em forma de ‘C’ como mostra a Figura 21. De igual forma que todos os monopolos impressos apresentados neste capítulo, este deve apresentar um comprimento de aproximadamente $\frac{1}{4}$ de λ (ver Tabela 5).

Tabela 5 – Dimensionamento do Monopolo impresso C-Shaped utilizando as duas abordagens.

Parâmetro	c/ Porto Discreto	c/ Porto Contínuo	Descrição
La [mm]	29,85	29,409	Comprimento do Elemento
La1 [mm]	12	12	Comprimento do Elemento
La2 [mm]	6,814	6,814	Comprimento do Elemento
La3 [mm]	5	5	Comprimento do Elemento
Lg [mm]	17,691	17,491	Comprimento do Plano de Massa
La'=La+La1+La2-Lg [mm]	35,973	35,732	Comprimento do Monopolo
Wa [mm]	3,317	3,197	Largura do Monopolo

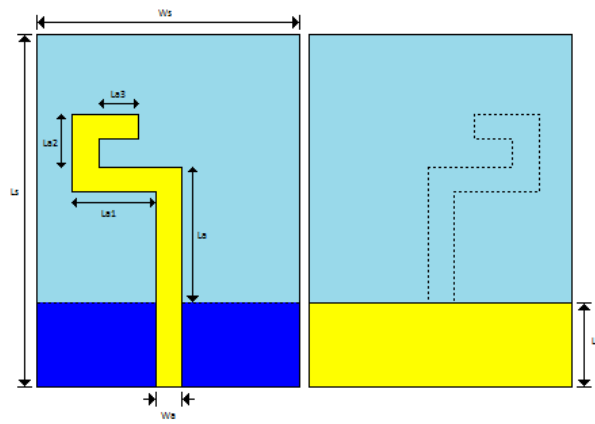


Figura 21 – Monopolo impresso simples *C-Shaped* (Frente e Verso).

Com o dimensionamento deste monopolo esperava-se uma frequência de ressonância de 2400 MHz (ver Figura 22) e uma adaptação nesta frequência ao nível da impedância de entrada (ver Figura 23 e Figura 24).

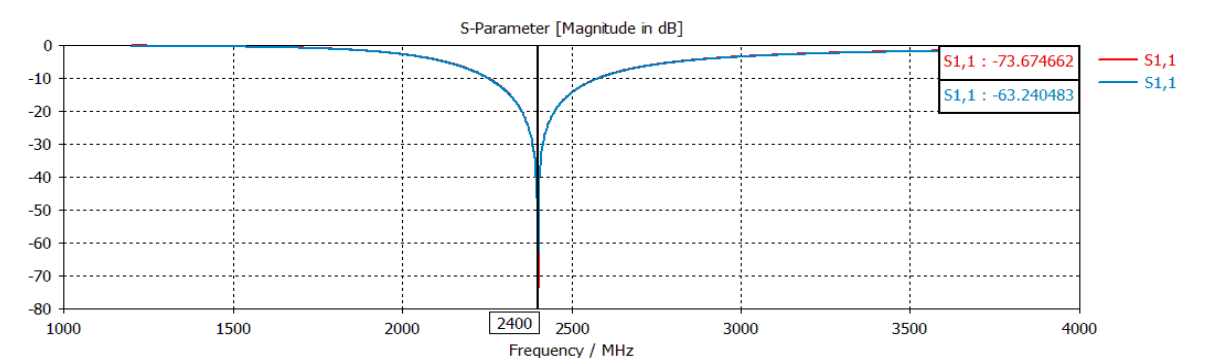


Figura 22 – Parâmetro S_{11} do monopolo impresso *C-Shaped* com porto discreto (Vermelho) e contínuo (Azul).

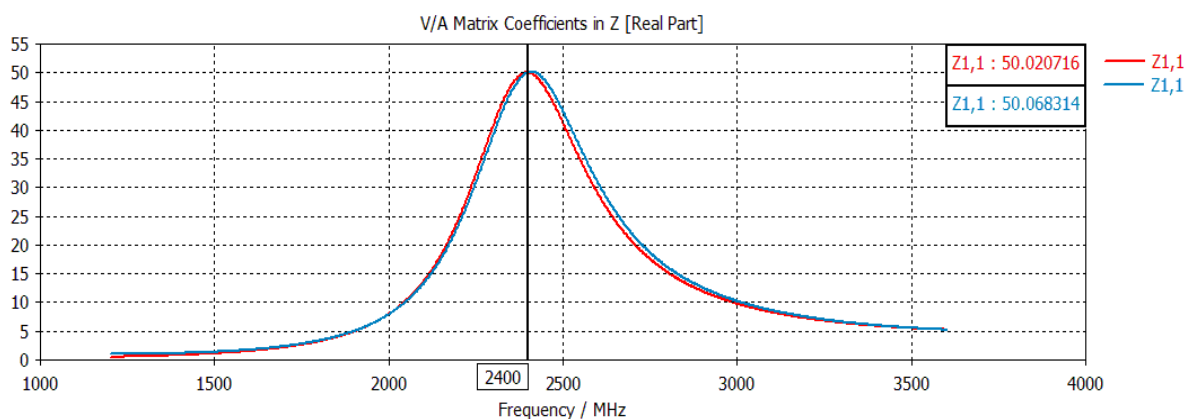


Figura 23 – Parte real da impedância de entrada vista do porto de alimentação do monopolo impresso *C-Shaped* com porto discreto (Vermelho) e contínuo (Azul).

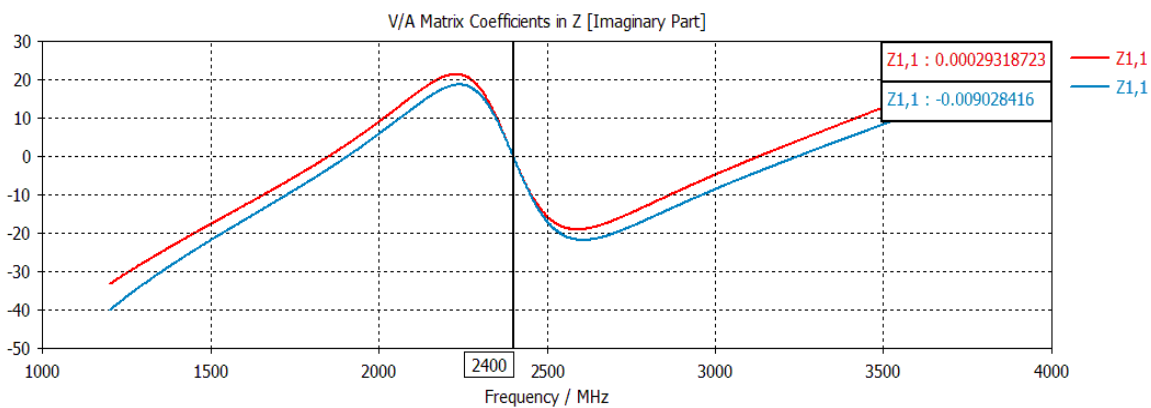


Figura 24 – Parte imaginária da impedância de entrada vista do porto de alimentação do monopolo impresso *C-Shaped* com porto discreto (Vermelho) e contínuo (Azul).

O monopolo impresso *C-Shaped* é o que apresenta melhor adaptação, nas duas abordagens tomadas, à frequência de 2400 MHz tanto ao nível da impedância de entrada como do próprio parâmetro S_{11} . Como se observa na Figura 23 e Figura 24, o andamento que o parâmetro S_{11} e a impedância de entrada apresentam é ótimo tendo em conta que a impedância de entrada é praticamente real, nas duas situações apresenta o valor de 50Ω e uma parta imaginária nula, à frequência de 2400 MHz.

Observando o digrama de radiação verifica-se um comportamento omnidirecional do monopolo impresso *C-Shaped* sendo este diagrama muito similar ao verificado no monopolo impresso apresentado em 3.3. Usando os dois tipos de abordagens e contado com uma amplitude do lobo central de $1,84dBi$, tal como se observa na Figura 25 e Figura 26.

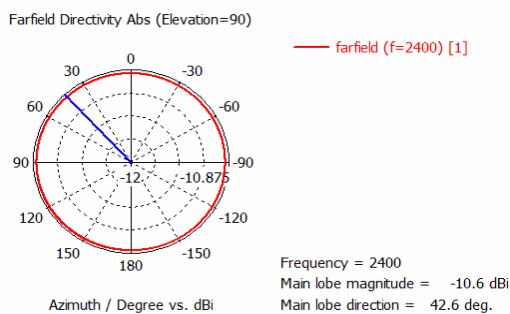


Figura 25 – Plano XoY referente ao monopolo impresso *C-Shaped*, utilizando um porto de alimentação discreto.

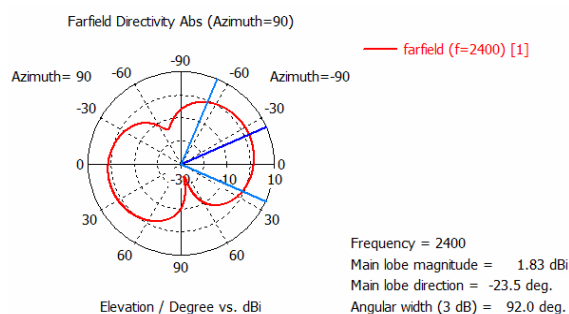


Figura 26 – Plano YoZ referente ao monopolo impresso *C-Shaped*, utilizando um porto de alimentação discreto.

Capítulo 4

Dimensionamento e Implementação de Antenas MIMO

Neste capítulo pretende-se analisar a influência de um monopolo simples sobre o seu adjacente e o acoplamento que os mesmos elementos provocam entre si. Foram simulados vários casos de antenas MIMO, utilizando os monopolos simples apresentados no capítulo anterior. Os resultados obtidos no desenvolvimento das antenas MIMO, as análises dos resultados e respectivas conclusões são apresentados neste capítulo.

Neste capítulo as antenas MIMO foram dimensionadas utilizando o simulador computacional *CST Studio Suite*. O substrato e respetivos materiais utilizados nas simulações foram os mesmos apresentados no capítulo anterior. Em relação às dimensões físicas da antena esta apresenta um comprimento fixo e uma largura variável consoante o distanciamento que exista entre os elementos que compõem a antena (ver Tabela 6).

Tabela 6 – Dimensão do substrato das antenas MIMO consoante o espaçamento existente entre elementos.

Distanciamento [mm]	Ws [mm]	Ls [mm]
$\lambda = 125$	161,541	45
$\lambda/2 = 62.5$	99,0405	45
$\lambda/4 = 31.25$	67,7905	45

Outro ponto a ter em conta é que foi utilizado duas abordagens no dimensionamento e análise das antenas MIMO, primeiro os elementos que compõem a antena MIMO partilham o plano de massa e numa segunda os mesmos elementos têm o seu próprio plano de massa. Em [18] os elementos que compõem a antena partilham o mesmo plano de massa e inicialmente a metodologia tomada foi a mesma. Posteriormente e para efeitos de redução do acoplamento existente entre elementos, estes deixam de partilhar o plano de massa.

4.1. Antena MIMO com dois Monopolos Impressos Simples

Com recurso ao monopolo impresso simples apresentado no ponto 3.1 dimensionou-se uma antena MIMO composta por dois destes monopolos (ver Figura 27).

O ponto de partida para as dimensões de cada elemento tem por base as dimensões apresentadas na Tabela 2, contudo e devido à influência que existe entre elementos existiu necessidade de alterar o comprimento dos monopolos impressos para que a antena MIMO apresente um parâmetro S_{11} e S_{22} com uma frequência de ressonância de 2400 MHz (ver Tabela 7).

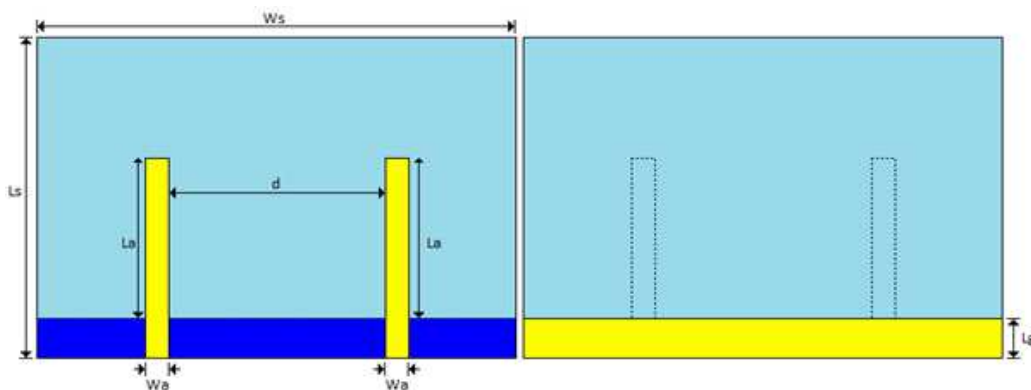


Figura 27 – Antena MIMO composta por dois monopolos impressos simples, partilhando o plano de massa (Frente e Verso).

Tabela 7 – Comprimento dos elementos utilizados conforme distanciamento entre os mesmos e resultados dos parâmetros S_{11} , S_{12} , S_{21} e S_{22} para a antena MIMO apresentada na Figura 27.

Distanciamento [mm]	L_a' [mm] (Inicial)	L_a' [mm] (Final)	S_{11} / S_{22} [dB]	S_{12} / S_{21} [dB]
$\lambda = 125$	32,3627	30,0627	-17,849511	-11,727442
$\lambda/2 = 62.5$	32,3627	30,5627	-25,134488	-10,634864
$\lambda/4 = 31.25$	32,3627	-	-	-

Como se verifica pela Figura 28 esta antena MIMO está adaptada à frequência de 2400 MHz apresentando um acoplamento entre elementos inferior a -10dB (ver Figura 29). Contudo não foi possível obter uma adaptação à frequência de 2400 MHz quando o distanciamento entre elementos se situava em $\frac{\lambda}{4}$. É de crer que a proximidade dos dois elementos e a existência de um plano de massa demasiado pequeno ($L_g = 5.757mm$) possa apresentar o efeito de um terceiro monopolo, influenciando a adaptação à frequência desejada.

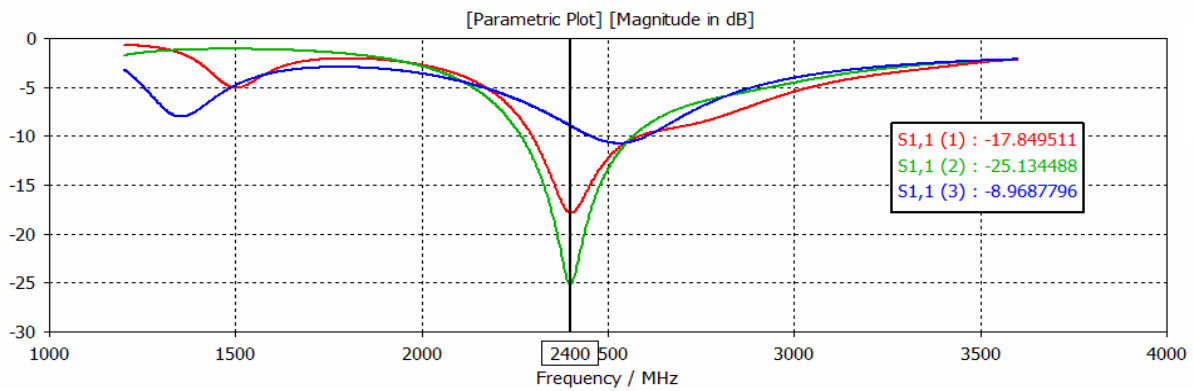


Figura 28 – Parâmetro S_{11} e/ou S_{22} da antena MIMO com dois monopolos impressos simples usando o mesmo plano de massa à distância de λ (Vermelho), $\lambda/2$ (Verde) e $\lambda/4$ (Azul).

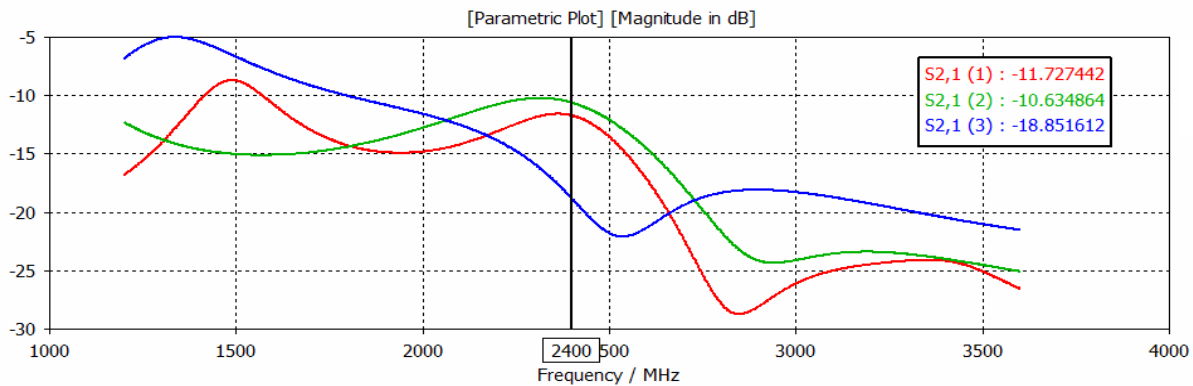


Figura 29 – Parâmetro S_{12} e/ou S_{21} da antena MIMO com dois monopolos impressos simples usando o mesmo plano de massa à distância de λ (Vermelho), $\lambda/2$ (Verde) e $\lambda/4$ (Azul).

A solução encontrada para resolver a problemática verificada quando o distanciamento entre elementos se situa a $\frac{\lambda}{4}$ foi a realização de um corte no plano de massa, conforme mostra a Figura 30. Esta solução permitiu que a antena MIMO apresenta-se uma adaptação aceitável à frequência de ressonância de 2400 MHz (ver Tabela 8). De realçar que esta alteração no plano de massa altera também a adaptação da antena que anteriormente se apresentava adaptada (Figura 31).

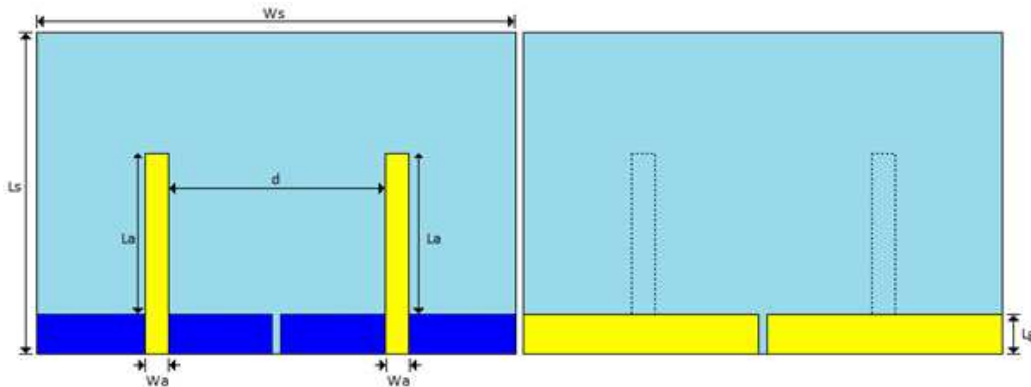


Figura 30 – Antena MIMO composta por dois monopólios impressos simples, com planos de massa distintos (Frente e Verso).

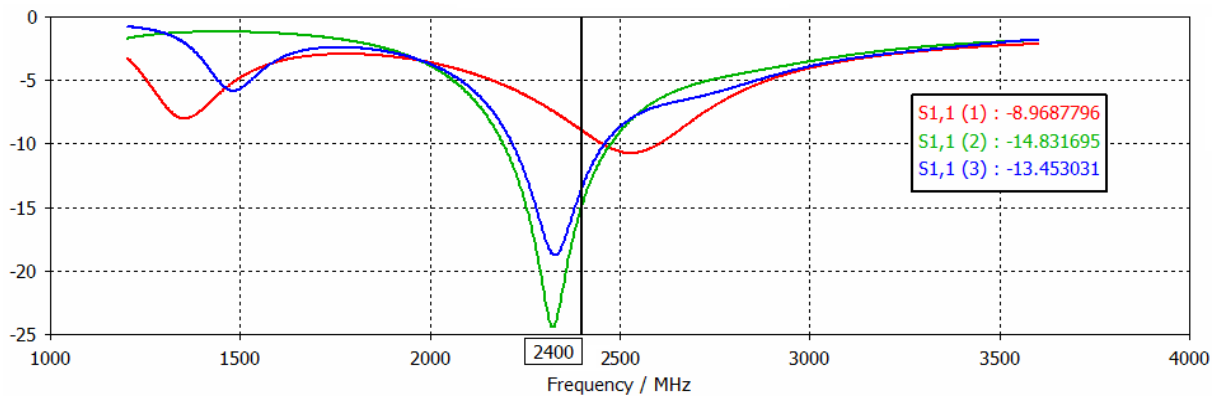


Figura 31 – Parâmetro S_{11} e/ou S_{22} da antena MIMO com dois monopólios impressos simples usando planos de massa distintos à distância de λ (Vermelho), $\lambda/2$ (Verde) e $\lambda/4$ (Azul), após realizar alteração no plano de massa.

Tabela 8 – Comprimento dos elementos utilizados conforme distanciamento entre os mesmos e resultados dos parâmetros S_{11} , S_{12} , S_{21} e S_{22} para a antena MIMO apresentada na Figura 30.

Distanciamento [mm]	La' [mm] (Inicial)	La' [mm] (Final)	S_{11} / S_{22} [dB]	S_{12} / S_{21} [dB]
$\lambda = 125$	32,3627	32,2627	-46,564815	-17,864873
$\lambda/2 = 62.5$	32,3627	32,6127	-35,111482	-12,881531
$\lambda/4 = 31.25$	32,3627	28,9627	-15,389753	-8,8994623

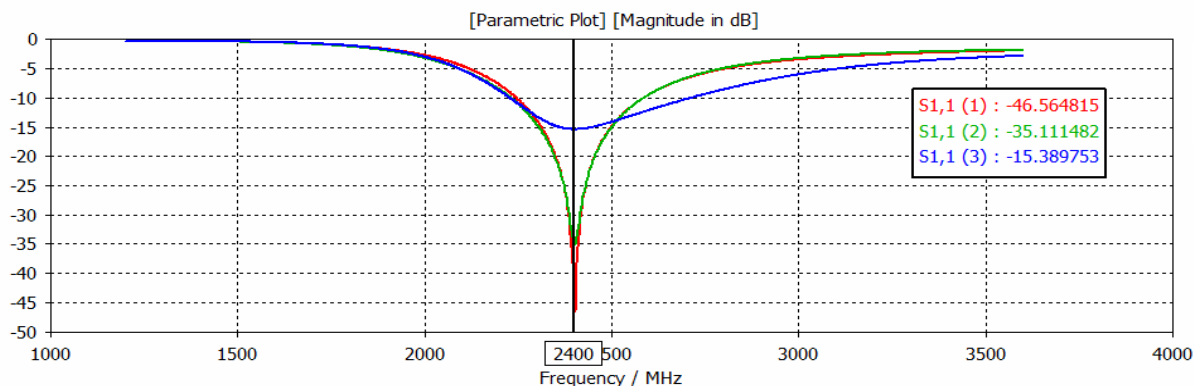


Figura 32 – Parâmetro S_{11} e/ou S_{22} da antena MIMO com dois monopolos impressos simples usando planos de massa distintos à distância de λ (Vermelho), $\lambda/2$ (Verde) e $\lambda/4$ (Azul).

Observando a Figura 32, comprova-se a adaptação da antena MIMO à frequência de ressonância desejada, utilizando os três distanciamentos indicados na tabela em cima. Quando o espaçamento entre elementos se situa a $\frac{\lambda}{4}$ esta antena encontra-se ressonante à frequência pretendida, mas com um acoplamento entre elementos considerável, aproximadamente -9dB, como se observa na Figura 33.

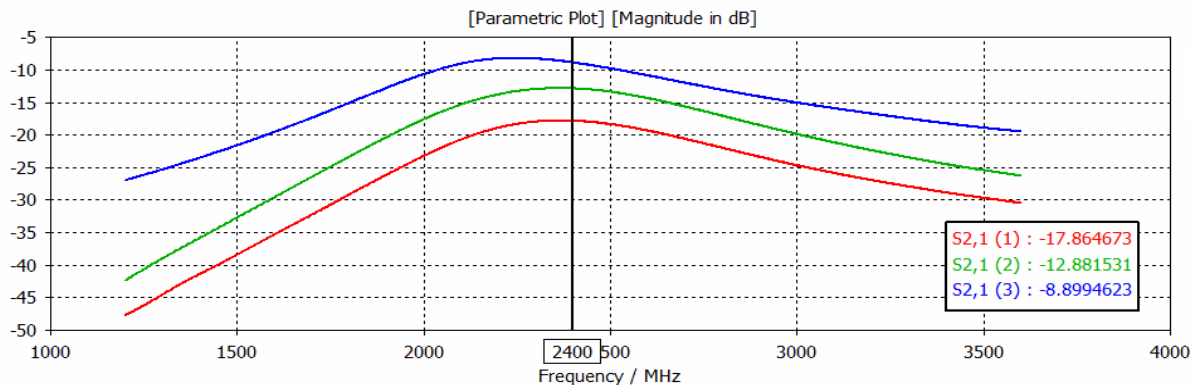


Figura 33 – Parâmetro S_{12} e/ou S_{21} da antena MIMO com dois monopolos impressos simples usando planos de massa distintos à distância de λ (Vermelho), $\lambda/2$ (Verde) e $\lambda/4$ (Azul).

4.2. Antena MIMO com dois Monopolos Impressos *L-Shaped*

Com recurso ao monopolo impresso simples apresentado no ponto 3.2 dimensionou-se uma antena MIMO composta por dois destes monopolos (ver Figura 34). Conforme foi indicado no ponto 3.2 é expectável que uma antena MIMO composta por dois monopolos deste tipo apresente um menor acoplamento entre ambos os elementos.

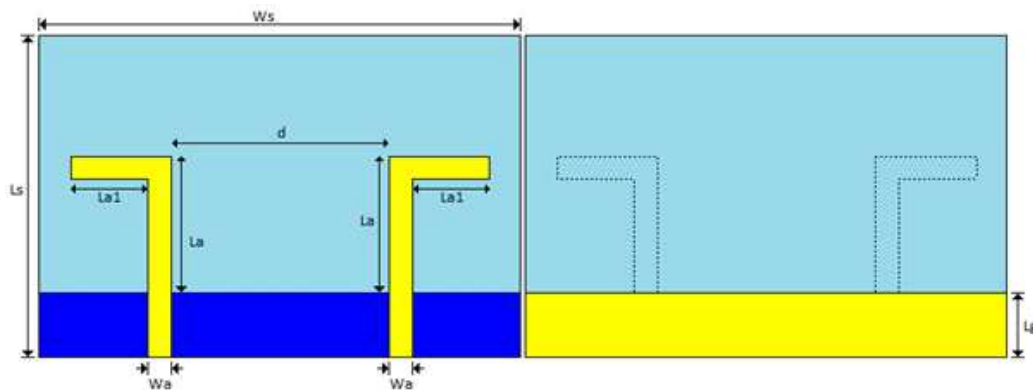


Figura 34 – Antena MIMO composta por dois monopolos impressos *L-Shaped*, partilhando o plano de massa (Frente e Verso).

Como verificado no ponto anterior volta-se a obter uma antena MIMO adaptada à frequência de ressonância desejada e o acoplamento existente entre elementos apresenta-se melhor nesta antena MIMO. Realizando uma análise comparativa da antena MIMO apresentada em 4.1 com a antena MIMO apresentada na Figura 34, considerando a abordagem com um plano massa comum, pode concluir-se que a utilização de monopolos *L-Shaped* apresenta um melhor acoplamento entre elementos (aproximadamente -24dB) quando estes estão distanciados entre si de $\frac{\lambda}{4}$ (ver Tabela 9).

Tabela 9 – Comprimento dos elementos utilizados conforme distanciamento entre os mesmos e resultados dos parâmetros S_{11} , S_{12} , S_{21} e S_{22} para a antena MIMO apresentada na Figura 34.

Distanciamento [mm]	La' [mm] (Inicial)	La' [mm] (Final)	S_{11} / S_{22} [dB]	S_{12} / S_{21} [dB]
$\lambda = 125$	31,807	31,547	-29,906941	-18,921791
$\lambda/2 = 62.5$	31,807	31,597	-49,361814	-18,139515
$\lambda/4 = 31.25$	31,807	33,297	-16,229908	-24,885887

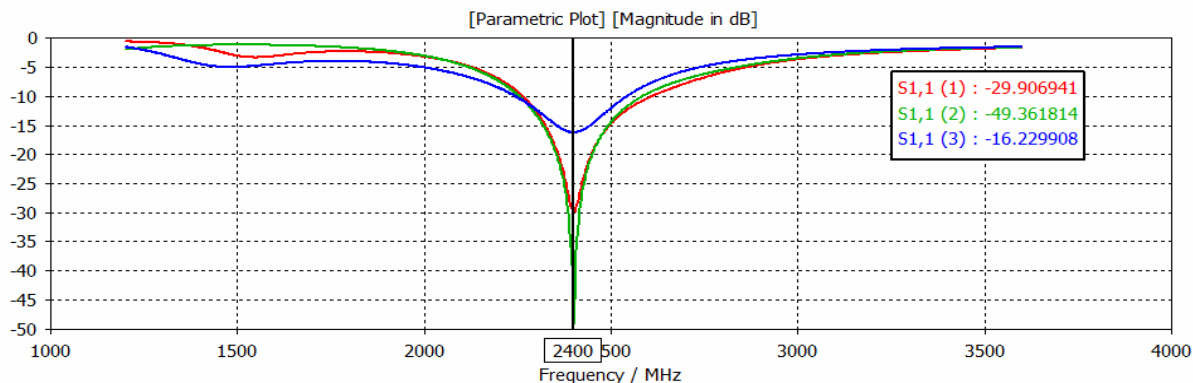


Figura 35 – Parâmetro S_{11} e/ou S_{22} da antena MIMO com dois monopolos impressos *L-Shaped* usando o mesmo plano de massa à distância de λ (Vermelho), $\lambda/2$ (Verde) e $\lambda/4$ (Azul).

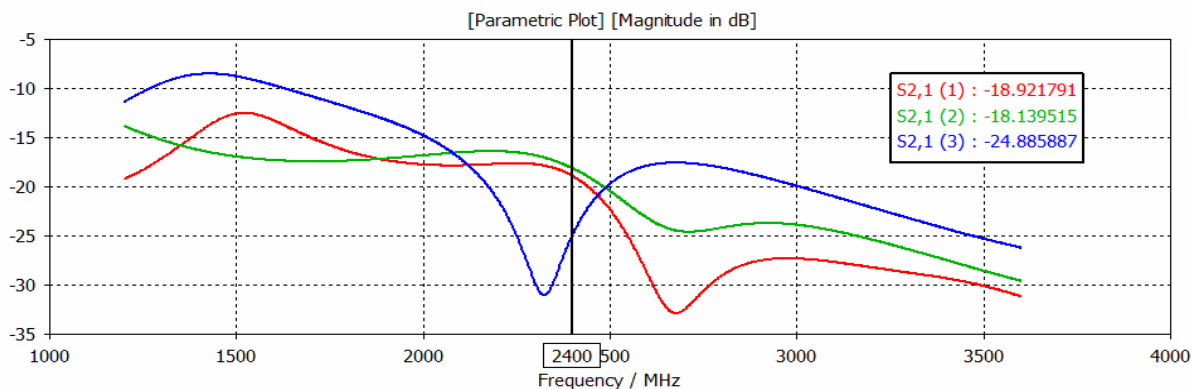


Figura 36 – Parâmetro S_{12} e/ou S_{21} da antena MIMO com dois monopolos impressos *L-Shaped* usando o mesmo plano de massa à distância de λ (Vermelho), $\lambda/2$ (Verde) e $\lambda/4$ (Azul).

De realçar que ao contrário do sucedido n ponto 4.1, foi possível com esta abordagem do plano de massa colocar ressonante esta antena à frequência de 2400 MHz existindo um distanciamento entre elementos de $\frac{\lambda}{4}$.

Com o intuito de obter melhor acoplamento entre os elementos nesta antena MIMO realizou-se um dimensionamento idêntico ao apresentado no ponto 4.1, ou seja optou-se pela mesma abordagem de realizar um corte no plano de massa ficando cada elemento com um plano de massa próprio (ver Figura 37).

É expectável que da mesma forma que foi verificado no ponto 4.1, exista uma melhoria do acoplamento entre elementos e uma melhor adaptação da antena à frequência de ressonância desejada, obtendo um valor de S_{11} menor. Contudo observando a Tabela 10, pode concluir-se que os valores de acoplamento e os valores do parâmetro S_{11} e S_{22} , face ao registado quando se utiliza um plano de massa comum aos dois elementos, refletiam um aumento.

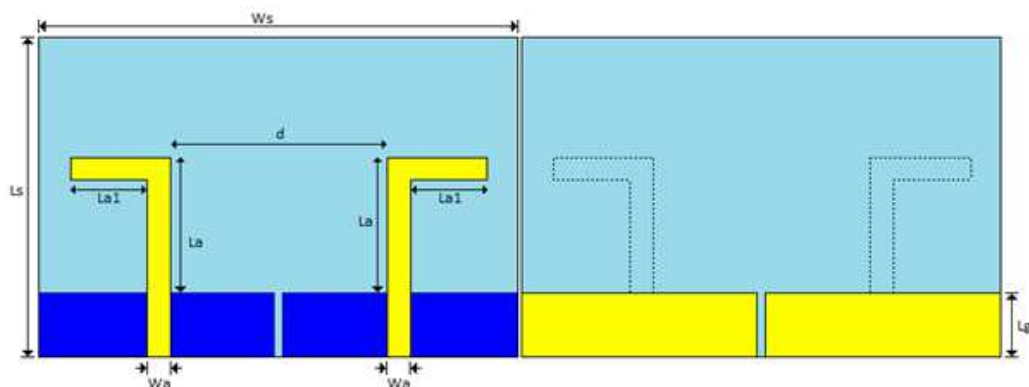


Figura 37 – Antena MIMO composta por dois monopolos impressos *L-Shaped*, com planos de massa distintos (Frente e Verso).

Tabela 10 – Comprimento dos elementos utilizados conforme distanciamento entre os mesmos e resultados dos parâmetros S_{11} , S_{12} , S_{21} e S_{22} para a antena MIMO apresentada na Figura 37.

Distanciamento [mm]	La' [mm] (Inicial)	La' [mm] (Final)	S_{11} / S_{22} [dB]	S_{12} / S_{21} [dB]
$\lambda = 125$	31,807	32,017	-27,636766	-19,14496
$\lambda/2 = 62.5$	31,807	32,197	-31,410973	-14,350251
$\lambda/4 = 31.25$	31,807	31,327	-20,362772	-13,945659

Observando a Figura 38 verifica-se melhorias no parâmetro S_{11} e S_{22} quando os elementos estão distanciados de $\frac{\lambda}{4}$ sendo que em sentido inverso os outros casos analisados (distanciamento entre elementos de λ e $\frac{\lambda}{2}$) apresentam uma subida dos valores de S_{11} e S_{22} face à abordagem do plano de massa comum.

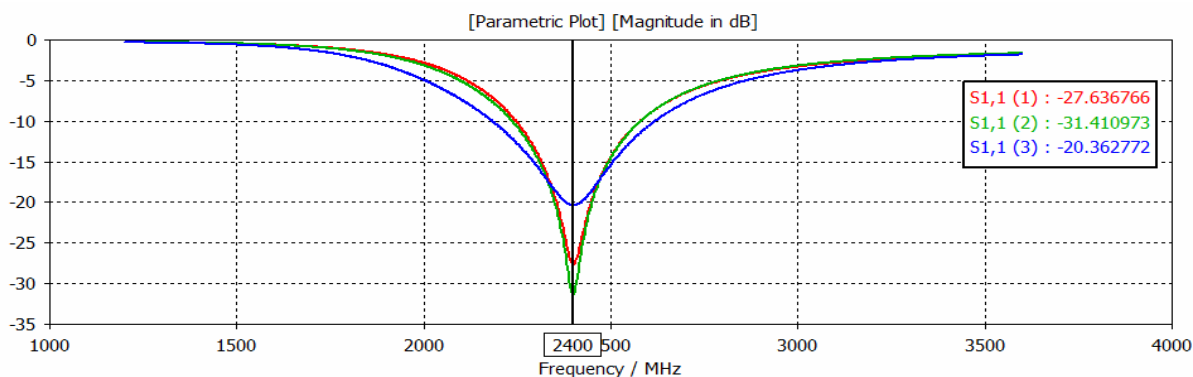


Figura 38 – Parâmetro S_{11} e/ou S_{22} da antena MIMO com dois monopolos impressos *L-Shaped* usando planos de massa distintos à distância de λ (Vermelho), $\lambda/2$ (Verde) e $\lambda/4$ (Azul).

Realizando uma comparação entre esta antena e aquela que foi apresentada em 4.1 com planos de massa distintos verificam-se melhorias no que respeita ao acoplamento que os elementos apresentam entre si. No que respeita ao parâmetro S_{11} o cenário é inverso, pois verificou-se uma melhoria, apenas, no cenário em que os elementos estão distanciados de $\frac{\lambda}{4}$.

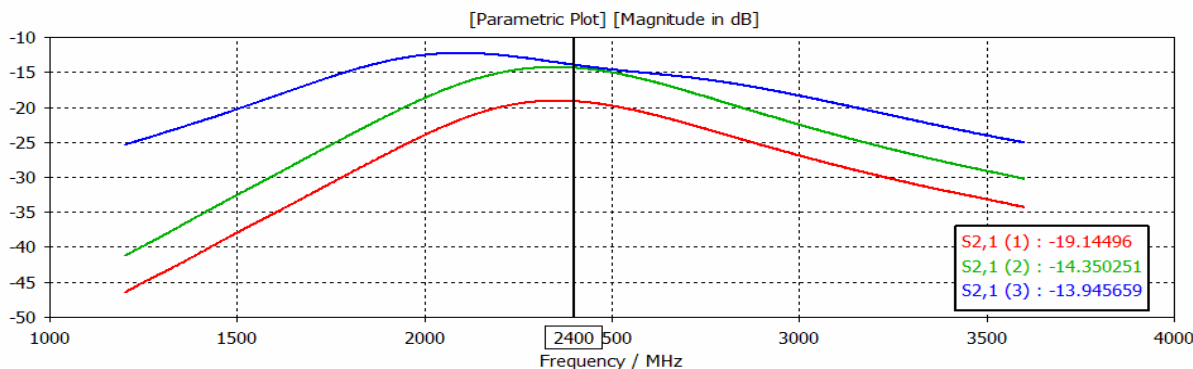


Figura 39 – Parâmetro S_{12} e/ou S_{21} da antena MIMO com dois monopolos impressos simples usando planos de massa distintos à distância de λ (Vermelho), $\lambda/2$ (Verde) e $\lambda/4$ (Azul).

4.3. Antena MIMO com dois Monopolos Impressos *Snake Shaped*

O dimensionamento apresentado neste ponto não tem grandes variações face ao apresentado nos pontos anteriores. Utiliza-se nesta situação monopolos impressos *Snake Shaped*, apresentados no ponto 3.3 e que espera-se apresentem novas melhorias no acoplamento entre elementos, com especial incidência no distanciamento de $\frac{\lambda}{4}$. Assim projetou-se a antena MIMO apresentada na Figura 40.

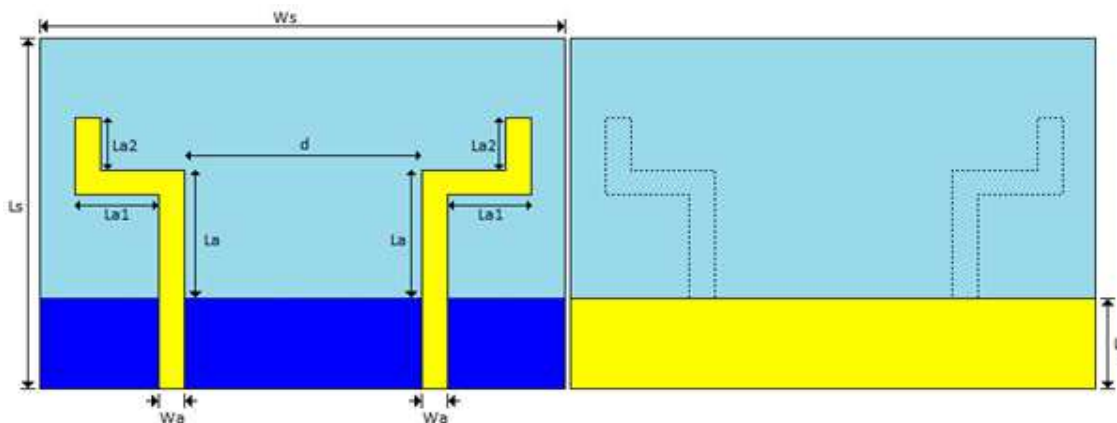


Figura 40 – Antena MIMO composta por dois monopolos impressos *Snake-Shaped*, partilhando o plano de massa (Frente e Verso).

Tabela 11 – Comprimento dos elementos utilizados conforme distanciamento entre os mesmos e resultados dos parâmetros S_{11} , S_{12} , S_{21} e S_{22} para a antena MIMO apresentada na Figura 40.

Distanciamento [mm]	La' [mm] (Inicial)	La' [mm] (Final)	S_{11} / S_{22} [dB]	S_{12} / S_{21} [dB]
$\lambda = 125$	33,773	33,643	-42,017314	-18,733955
$\lambda/2 = 62.5$	33,773	33,593	-33,037004	-19,169165
$\lambda/4 = 31.25$	33,773	35,273	-21,117619	-28,633755

Observando a Figura 41, pode verificar-se que a antena MIMO dimensionada está ressonante à frequência de 2400 MHz. Comparativamente com a antena MIMO dimensionada no ponto anterior, com a mesma abordagem do plano de massa comum, comprova-se melhoramentos no parâmetro S_{11} e S_{22} principalmente quando o distanciamento se situa em $\frac{\lambda}{4}$ (aproximadamente -21dB) como se observa na Tabela 11.

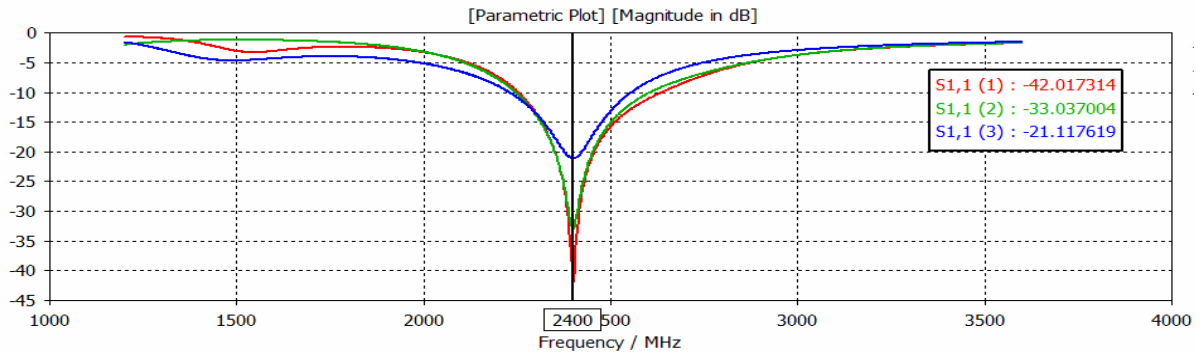


Figura 41 – Parâmetro S_{11} e/ou S_{22} da antena MIMO com dois monopolos impressos Snake-Shaped usando o mesmo plano de massa à distância de λ (Vermelho), $\lambda/2$ (Verde) e $\lambda/4$ (Azul).

No que respeita ao acoplamento entre elementos começa a ser notório um fenómeno particular quando os elementos que compõem a antena MIMO se aproximam (ver Figura 42). O caso onde se nota mais esse fenómeno pode ser observado quando os elementos estão espaçados de $\frac{\lambda}{4}$ onde se verifica uma quebra do parâmetro S_{12} e S_{21} próximo da frequência de ressonância da antena.

De certa forma este fenómeno, em particular no distanciamento entre elementos de $\frac{\lambda}{4}$ faz com que à frequência de ressonância a influência seja muito baixa com valores próximos dos -28dB. Realizando uma comparação com as antenas MIMO já apresentadas, suspeita-se que este fenómeno seja provocado pela existência de um plano de massa comum aos dois elementos e que apresentou-se um fenómeno mais visível a partir do momento em que o plano de massa apresenta um tamanho maior.

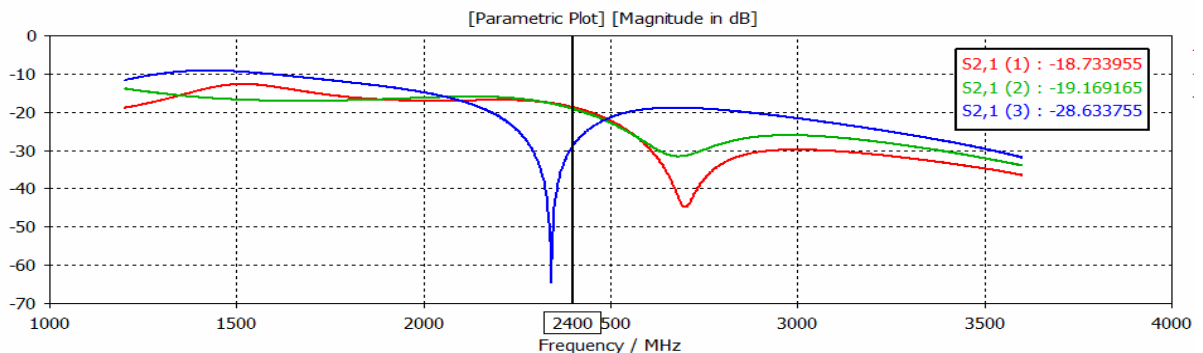


Figura 42 – Parâmetro S_{12} e/ou S_{21} da antena MIMO com dois monopolos impressos Snake-Shaped usando o mesmo plano de massa à distância de λ (Vermelho), $\lambda/2$ (Verde) e $\lambda/4$ (Azul).

No seguimento de todo o trabalho até aqui realizado, criou-se uma fenda no plano de massa tal e qual os casos apresentados anteriormente (ver Figura 43). Com os melhoramentos observados nas primeiras duas antenas MIMO e já tendo verificado as diferenças e evoluções que esta abordagem de planos de massa distintos provoca nos parâmetros ‘S’ percebeu-se que seria esperado que o parâmetro S_{11} e S_{22} apresenta-se melhorias quando os elementos se distanciavam de $\frac{\lambda}{4}$ ao invés do que se verifica com distanciamentos de λ e $\frac{\lambda}{2}$.

No que diz respeito ao parâmetro S_{12} e S_{21} aceitar-se-ia que o dito fenómeno que se havia verificado anteriormente desaparecesse e fizesse com que estes valores aumentassem, provocando um acoplamento maior entre elementos.

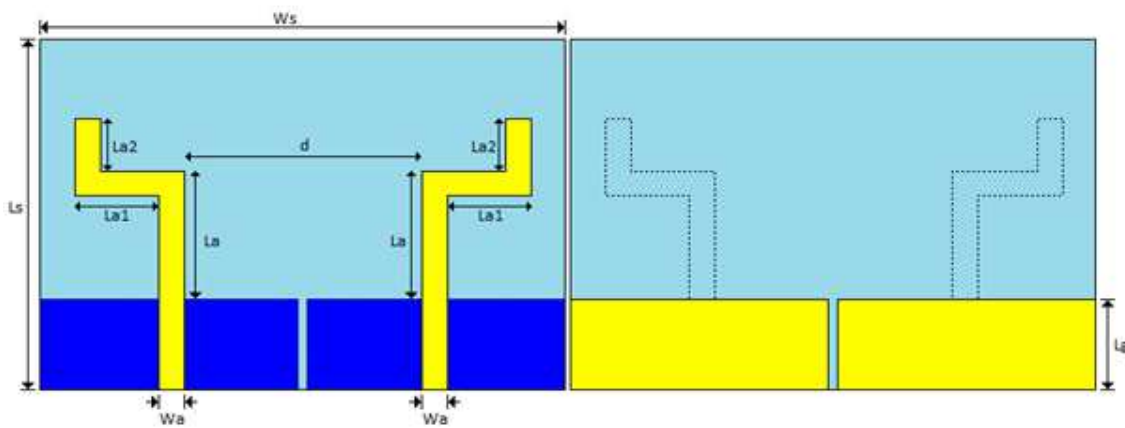


Figura 43 – Antena MIMO composta por dois monopolos impressos *Snake-Shaped*, com planos de massa distintos (Frente e Verso).

Tabela 12 – Comprimento dos elementos utilizados conforme distanciamento entre os mesmos e resultados dos parâmetros S_{11} , S_{12} , S_{21} e S_{22} para a antena MIMO apresentada na Figura 43.

Distanciamento [mm]	La' [mm] (Inicial)	La' [mm] (Final)	S_{11} / S_{22} [dB]	S_{12} / S_{21} [dB]
$\lambda = 125$	33,773	33,843	-22,52395	-20,286963
$\lambda/2 = 62.5$	33,773	33,963	-23,019285	-15,658675
$\lambda/4 = 31.25$	33,773	33,803	-23,311166	-16,552371

Assim como era espectável o parâmetro S_{11} e S_{22} apresentam um comportamento similar ao que se verificou nas duas antenas MIMO apresentadas anteriormente. Quando os elementos se encontram distanciados de $\frac{\lambda}{4}$ verifica-se uma melhoria face à abordagem com um plano de massa comum (ver Tabela 12). Comparando todas as antenas e todas as abordagens dimensionadas e realizadas até este ponto o parâmetro S_{11} e S_{22} têm vindo a melhorar gradualmente (ver Figura 44).

À partida poderia pensar-se que não seria coerente realizar uma comparação entre todas as antenas MIMO até agora apresentadas, o que é errado. Embora os elementos utilizados sejam diferentes de antena MIMO para antena MIMO, estas apresentam sempre dois elementos de iguais características, o que permite verificar qual a influência que a escolha do dimensionar dos quatro monopolos impressos, indicados no capítulo 3, tem na adaptação e na redução de acoplamento existente entre esses mesmos elementos.

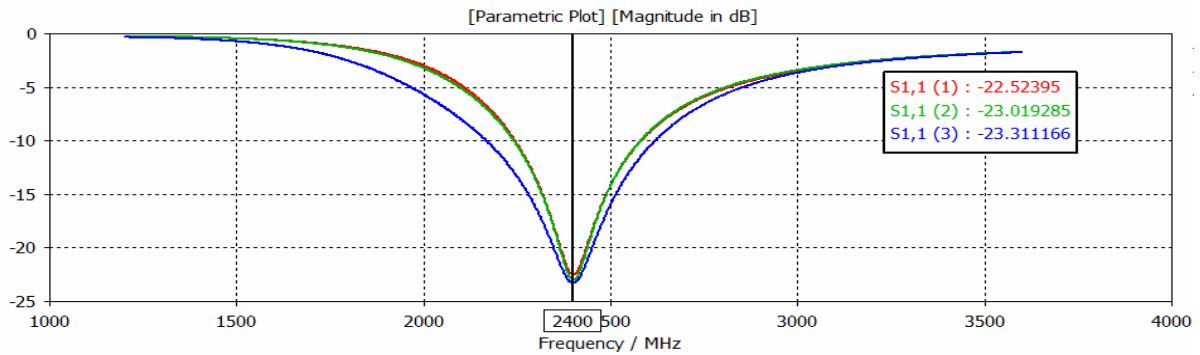


Figura 44 – Parâmetro S_{11} e/ou S_{22} da antena MIMO com dois monopolos impressos *Snake-Shaped* usando planos de massa distintos à distância de λ (Vermelho), $\lambda/2$ (Verde) e $\lambda/4$ (Azul).

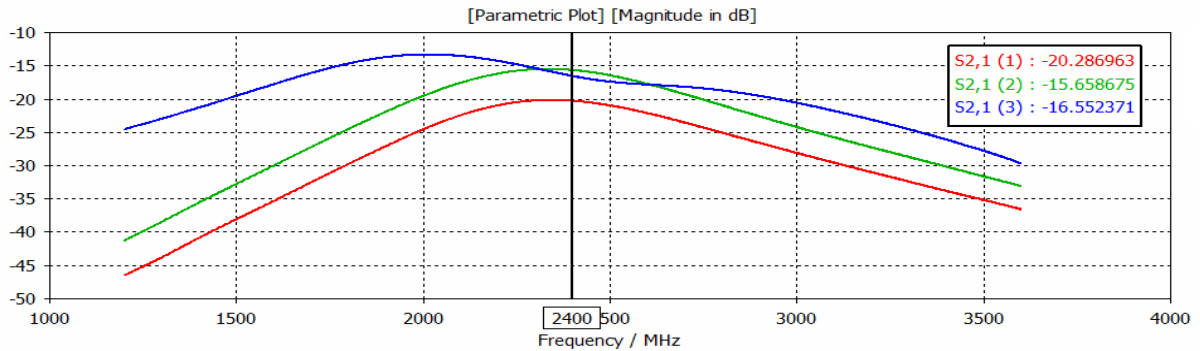


Figura 45 – Parâmetro S_{12} e/ou S_{21} da antena MIMO com dois monopolos impressos *Snake-Shaped* usando planos de massa distintos à distância de λ (Vermelho), $\lambda/2$ (Verde) e $\lambda/4$ (Azul).

Esta antena MIMO apresenta a parte real da impedância de entrada, em cada um dos elementos, muito próxima dos 50Ω , em cada caso de distanciamento dimensionado (ver Figura 46 e Figura 47).

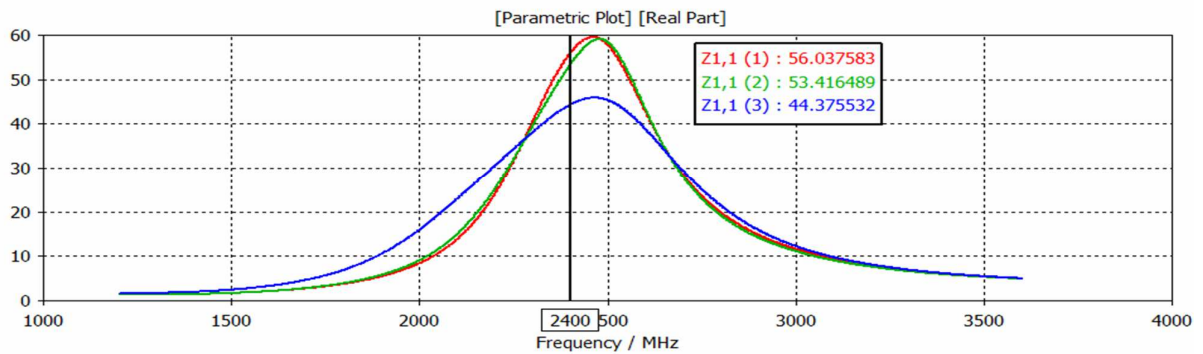


Figura 46 – Parte real da impedância de entrada Z_{11} e/ou Z_{22} da antena MIMO com dois monopolos impressos *Snake-Shaped* usando planos de massa distintos à distancia de λ (Vermelho), $\lambda/2$ (Verde) e $\lambda/4$ (Azul).

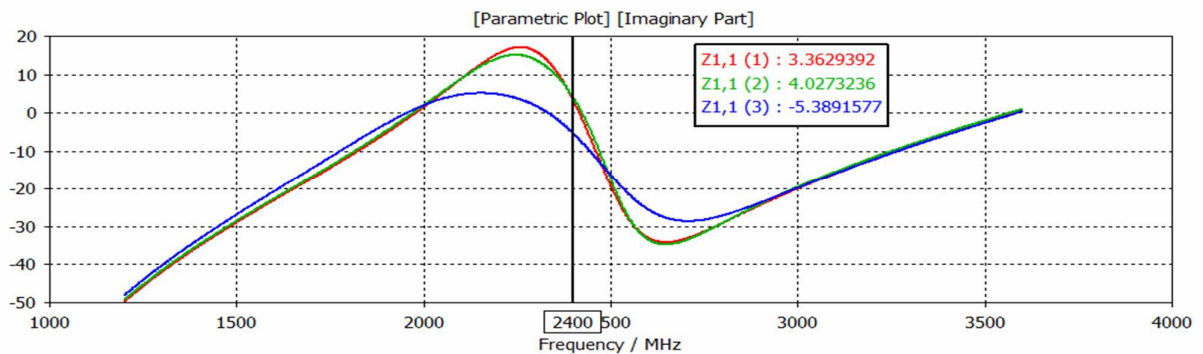


Figura 47 – Parte imaginária da impedância de entrada Z_{11} e/ou Z_{22} da antena MIMO com dois monopolos impressos *Snake-Shaped* usando planos de massa distintos à distancia de λ (Vermelho), $\lambda/2$ (Verde) e $\lambda/4$ (Azul).

Idealmente era esperado que a parte imaginária acompanha-se a performance da parte real, contudo isso não foi verificado.

4.4. Antena MIMO com dois Monopolos Impressos *C-Shaped*

Finalmente, a fim de fechar o dimensionamento de antenas MIMO com elementos de iguais características, foi dimensionada uma antena MIMO com dois monopolos impressos *C-Shaped* como se pode observar na Figura 48.

Teoricamente e seguindo o mesmo paradigma até este ponto, acreditou-se que esta antena MIMO seria a que melhor performance apresentaria respeitante a adaptação do parâmetro S_{11} e S_{22} à frequência de ressonância, bem como do melhor acoplamento possível nos três casos de estudo quando era variado o distanciamento entre elementos.

Observando a Tabela 13 pode concluir-se que com monopolos impressos desta dimensão e afastados a uma distancia de λ não houve a necessidade de alterar as dimensões iniciais dos elementos.

Tabela 13 – Comprimento dos elementos utilizados conforme distanciamento entre os mesmos e resultados dos parâmetros S_{11} , S_{12} , S_{21} e S_{22} para a antena MIMO apresentada na Figura 48.

Distanciamento [mm]	La' [mm] (Inicial)	La' [mm] (Final)	S_{11} / S_{22} [dB]	S_{12} / S_{21} [dB]
$\lambda = 125$	35,732	35,732	-36,249136	-19,800537
$\lambda/2 = 62.5$	35,732	35,672	-38,82368	-19,957798
$\lambda/4 = 31.25$	35,732	37,132	-22,392836	-26,427048

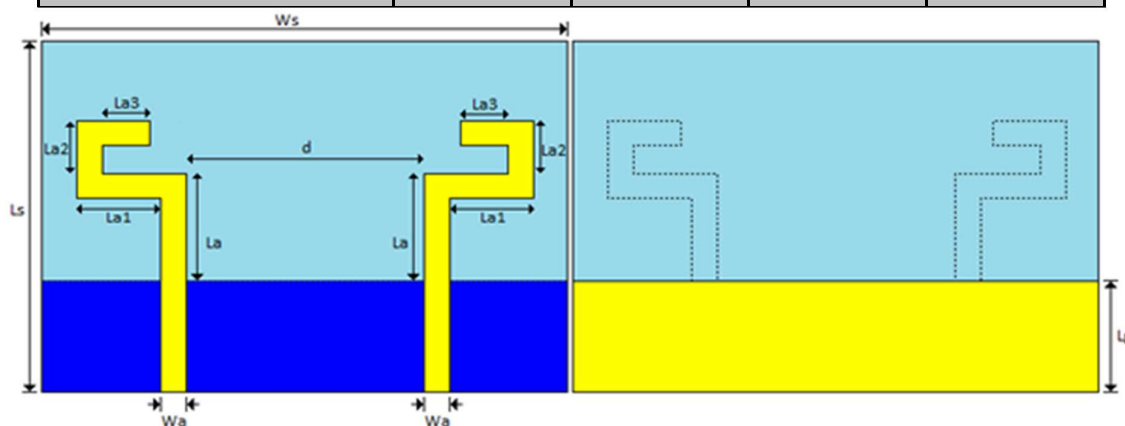


Figura 48 – Antena MIMO composta por dois monopolos impressos *C-Shaped*, partilhando o plano de massa (Frente e Verso).

À imagem do que se verificou nas antenas MIMO anteriormente dimensionadas, esta que agora se apresenta encontra-se ressonante à frequência de 2400 MHz. Igualmente nesta antena as melhorias que se registam é quando os elementos se encontram afastados de $\frac{\lambda}{4}$ onde se obteve o melhor resultado de todas as antenas MIMO dimensionas até ao momento (ver Figura 49).

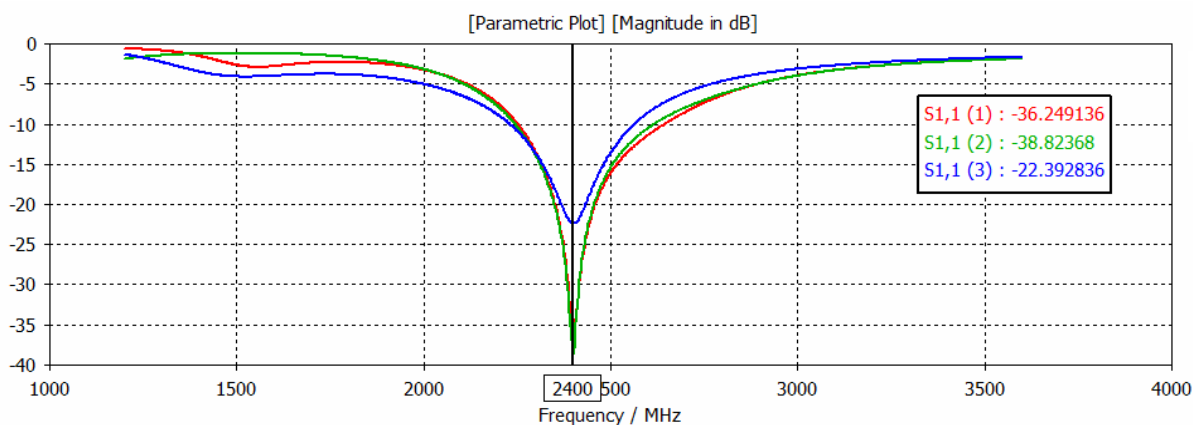


Figura 49 – Parâmetro S_{11} e/ou S_{22} da antena MIMO com dois monopolos impressos *C-Shaped* usando o mesmo plano de massa à distância de λ (Vermelho), $\lambda/2$ (Verde) e $\lambda/4$ (Azul).

Igualmente importante foi verificar novamente o fenómeno no andamento do parâmetro S_{12} e S_{21} , indicado anteriormente e que neste dimensionamento se verificou mais acentuado não só quando os

elementos estão afastados de $\frac{\lambda}{4}$ mas verifica-se igualmente quando existe um distanciamento de $\frac{\lambda}{2}$ e λ (ver Figura 50).

Resumindo, não se verificam grandes melhorias em termos de redução do acoplamento entre elementos, contudo verificou-se que um comportamento na mesma ordem, verificado nas antenas MIMO anteriores.

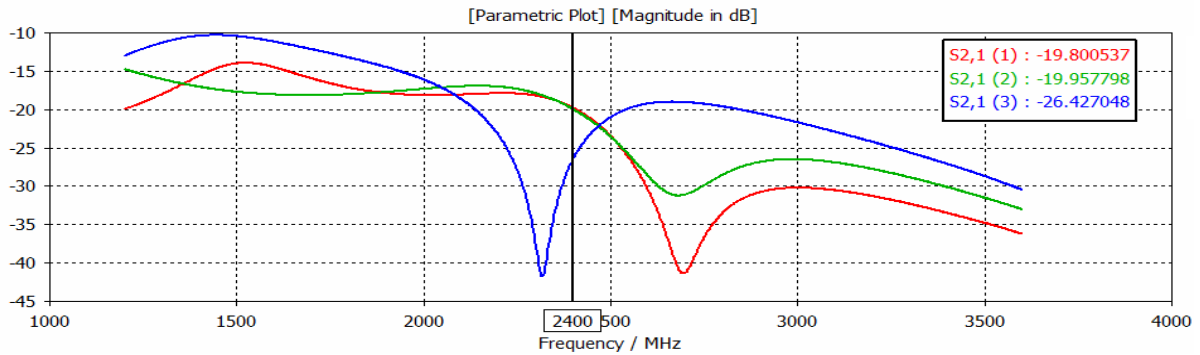


Figura 50 – Parâmetro S_{12} e/ou S_{21} da antena MIMO com dois monopolos impressos *C-Shaped* usando o mesmo plano de massa à distância de λ (Vermelho), $\lambda/2$ (Verde) e $\lambda/4$ (Azul).

Conforme realizado em todas as outras antenas MIMO decidiu-se realizar um corte no plano de massa a fim de perceber se o comportamento dos parâmetros ‘S’ seguia na mesma ordem (ver Figura 51). Como já foi indicado anteriormente é esperado que o parâmetro S_{11} e S_{22} continue a apresentar melhores valores, principalmente na situação em que os elementos estão espaçados de $\frac{\lambda}{4}$, quando se inclui este corte no plano de massa.

No que diz respeito ao parâmetro S_{12} e S_{21} é esperado que o dito fenómeno que ocorre perto da frequência de ressonância desapareça com esta abordagem de planos de massa distintos visto ter sido concluído que a existência de um plano de massa comum podia provocar esse fenómeno.

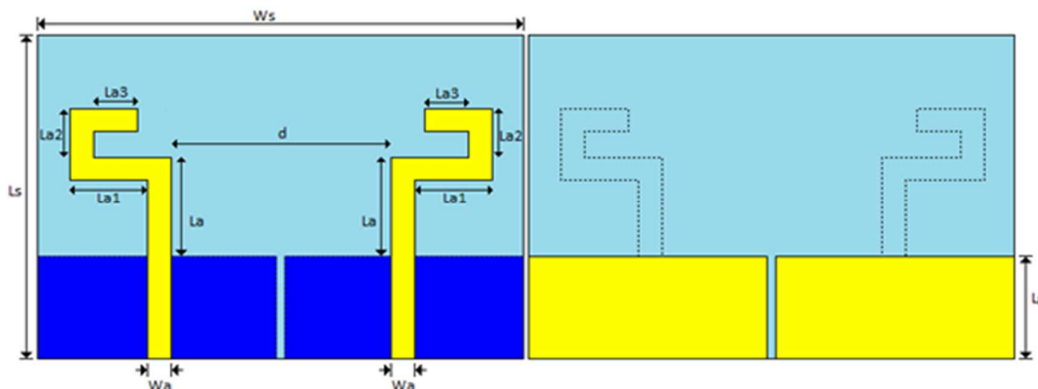


Figura 51 – Antena MIMO composta por dois monopolos impressos *C-Shaped*, com planos de massa distintos (Frente e Verso).

Tabela 14 – Comprimento dos elementos utilizados conforme distanciamento entre os mesmos e resultados dos parâmetros S_{11} , S_{12} , S_{21} e S_{22} para a antena MIMO apresentada na Figura 51.

Distanciamento [mm]	La' [mm] (Inicial)	La' [mm] (Final)	S_{11} / S_{22} [dB]	S_{12} / S_{21} [dB]
$\lambda = 125$	33,773	35,802	-25,043179	-20,325567
$\lambda/2 = 62.5$	33,773	35,942	-25,046319	-15,701704
$\lambda/4 = 31.25$	33,773	36,032	-22,453936	-16,982701

Foi conseguida a adaptação desta antena à frequência de 2400 MHz tal como proposto inicialmente, em concordância com todas as antenas MIMO até agora dimensionadas. Fazendo uma comparação com todas as antenas MIMO que apresentam planos de massa distintos esta apresentada neste ponto reúne uma adaptação do parâmetro S_{11} e S_{22} (ver Figura 52) e um acoplamento entre elementos, S_{12} e S_{21} , muito similar apresentada no ponto 4.3 (ver Figura 53).

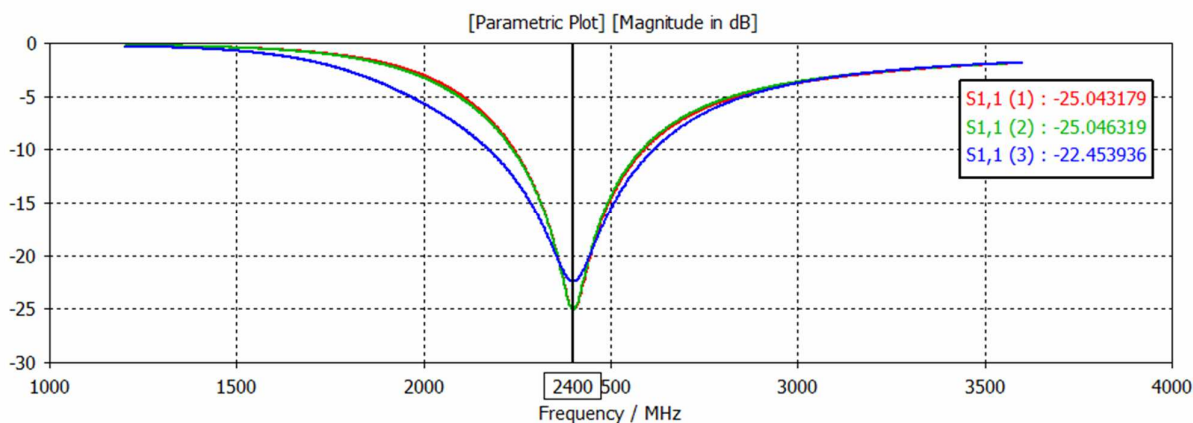


Figura 52 – Parâmetro S_{11} e/ou S_{22} da antena MIMO com dois monopolos impressos *C-Shaped* usando planos de massa distintos à distância de λ (Vermelho), $\lambda/2$ (Verde) e $\lambda/4$ (Azul).

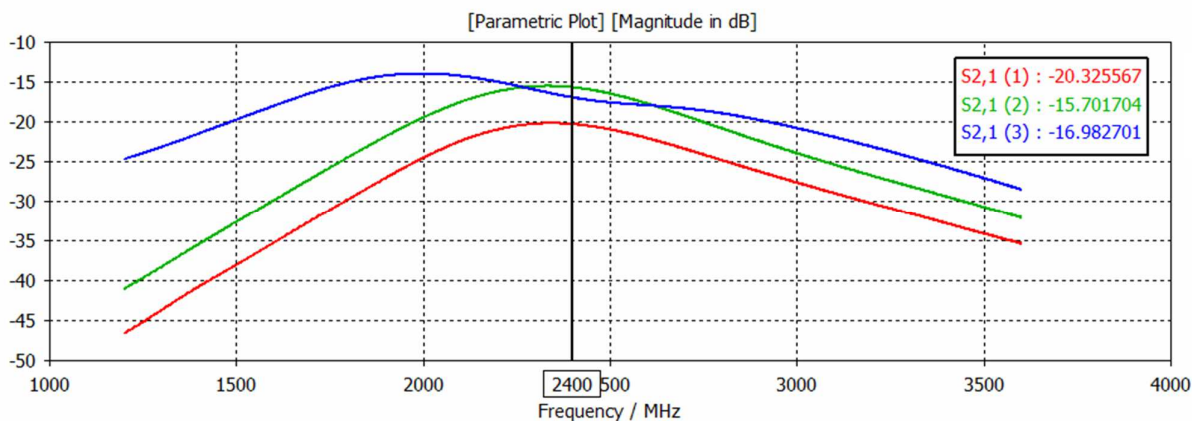


Figura 53 – Parâmetro S_{12} e/ou S_{21} da antena MIMO com dois monopolos impressos *C-Shaped* usando planos de massa distintos à distância de λ (Vermelho), $\lambda/2$ (Verde) e $\lambda/4$ (Azul).

Contudo esta antena MIMO apresenta uma melhor impedância de entrada, Z_{11} e Z_{22} , face à antena apresentada na Figura 43. Comparando apenas a parte real da impedância de entrada (ver Figura 54), em cada um dos elementos, verifica-se que o andamento é semelhante. Em relação à parte imaginária consegue-se verificar melhorias significativas de uma antena face à outra (ver Figura 55 e Tabela 15).

Tabela 15 – Comparação das impedâncias de entradas entre duas antenas MIMO com planos de massa distintos.

	Antena MIMO - Figura 43	Antena MIMO - Figura 51
Distanciamento [mm]	$Z_{11} / Z_{22} [\Omega]$	$Z_{11} / Z_{22} [\Omega]$
$\lambda = 125$	$56,04 + j*3,36$	$55,09 + j*1,47$
$\lambda/2 = 62.5$	$53,42 + j*4,03$	$54,51 + j*3,50$
$\lambda/4 = 31.25$	$44,38 - j*5,29$	$41,99 - j*2,81$

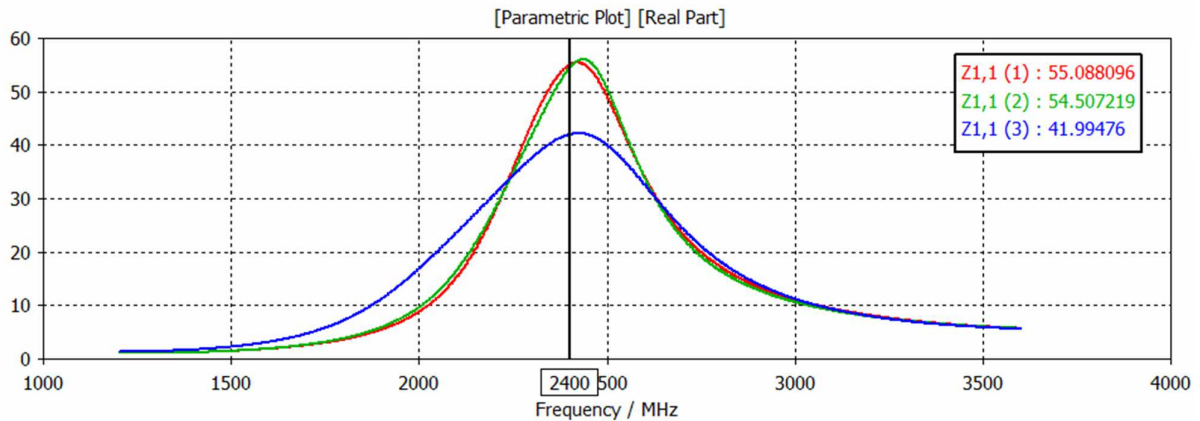


Figura 54 – Parte real da impedância de entrada Z_{11} e/ou Z_{22} da antena MIMO com dois monopolos impressos *C-Shaped* usando planos de massa distintos à distancia de λ (Vermelho), $\lambda/2$ (Verde) e $\lambda/4$ (Azul).

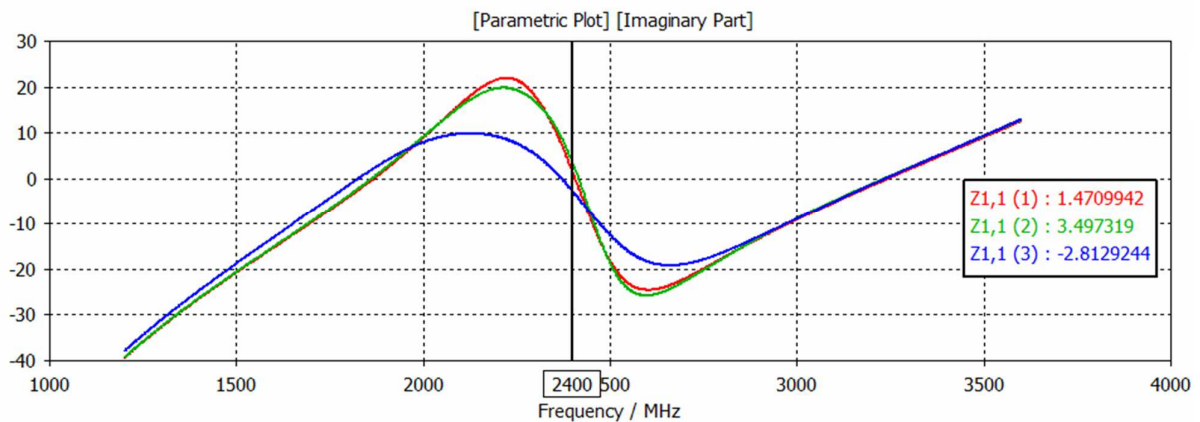


Figura 55 – Parte imaginaria da impedância de entrada Z_{11} e/ou Z_{22} da antena MIMO com dois monopolos impressos *C-Shaped* usando planos de massa distintos à distancia de λ (Vermelho), $\lambda/2$ (Verde) e $\lambda/4$ (Azul).

Em termos geométricos os elementos da segunda antena apresentam um braço horizontal tomando a forma de um 'C'. Era esperado mais diferenças entre as duas antenas MIMO, contudo apenas foi vislumbrado este pormenor da parte imaginária da impedância de entrada, fazendo desta antena a melhor opção e com melhor performance de todas as antenas apresentadas até agora.

Capítulo 5

Conclusões

Neste capítulo pretende-se retirar conclusões dos resultados obtidos, quais as melhores formas de implementação e *design* de antenas com múltiplos elementos e qual o trabalho futuro que pode ser realizado após esta dissertação.

5.1. Resultados Obtidos

Esta dissertação tem na sua base de desenvolvimento a implementação de antenas MIMO composta por dois monopolos impressos simples.

Inicialmente foram desenvolvidas quatro monopolos simples com uma estrutura geométrica diferente em cada um deles, adaptados à frequência de 2400 MHz e com uma impedância de entrada de 50Ω , apresentando todas as antenas um diagrama de radiação é omnidirecional. Foram utilizadas duas abordagens neste dimensionamento, com um porto discreto e um porto contínuo a alimentar a antena. A utilização do porto discreto permitiu obter uma ideia quase exacta das dimensões que o monopolo deveria apresentar visto apresentar uma impedância de entrada invariável, 50Ω .

Segundo as referências consultadas apresentadas atempadamente, conseguiu-se dimensionar estes monopolos que serviram de base às antenas MIMO dimensionadas no capítulo seguinte. Prevendo que com um monopolo desenhado geometricamente de uma determinada forma, quando colocado em um sistema MIMO com outro monopolo de iguais características, apresenta-se baixo acoplamento.

Como referido, utilizando os monopolos impressos simples dimensionados, realizou-se o desenho de quatro antenas MIMO compostas, cada uma, por dois elementos de igual forma geométrica e de iguais características. Foram realizados dois tipos de abordagem; Na primeira os elementos partilhavam o mesmo plano de massa e uma segunda abordagem em que os elementos tinham planos de massa distintos.

Neste ponto, nas duas abordagens tomadas, seria esperado que existisse uma desadaptação da impedância de entrada e um desvio da frequência de ressonância, como se comprovou atempadamente, devido sobretudo à influência que um elemento exerce sobre o adjacente, o que obrigou a um reajuste nas dimensões dos elementos por forma a encontrar nova adaptação à frequência de 2400 MHz.

Depois de realizada esta readaptação à frequência de ressonância analisou-se a influência de um elemento sobre o seu adjacente recorrendo à análise do parâmetro S_{11} e S_{22} que neste caso em particular serão iguais visto que os monopolos utilizados são de iguais características e dimensões.

As antenas MIMO apresentadas no ponto 4.1 e 4.2 apresentam uma desadaptação maior devido ao plano de massa utilizado, pois este possuía uma dimensão muito perto da dimensão dos monopolos, sendo que em simulação este plano de massa é assumido como um terceiro elemento da antena. Estas antenas, quando os elementos partilham o plano de massa, não apresentam uma boa adaptação à frequência de ressonância pretendida, verificando-se um acoplamento aceitável, quando os elementos

estão distanciados de $\frac{\lambda}{4}$, apresentando valores na ordem dos -18dB e -24dB. Comparando apenas as antenas da Figura 27 e Figura 34, apresentadas no capítulo 4, pode concluir-se que os melhores resultados foram da segunda antena quando os elementos estavam distanciados de λ . Quando os elementos ficam independentes (ver Figura 30 e Figura 37, do capítulo 4), ou seja sem partilhar o plano de massa, a adaptação ficou facilitada, tendo sido mais pratica a adaptação independente de cada elemento, embora o acoplamento entre elementos aumentou, apresentando valores de -8dB e -13dB respectivamente a cada uma das antenas.

Nas antenas MIMO dimensionadas no ponto 4.3 e 4.4 a desadaptação, embora mantendo-se, foi menos significativa pois o plano de massa é maior devido à dimensão da antena ser igualmente maior o que não provocou um desvio na frequência de ressonância tão grande. Verifica-se uma melhor adaptação das antenas apresentadas na Figura 40 e Figura 48, já depois de feito o reajuste nas dimensões dos elementos que as compõem. Verifica-se igualmente um menor acoplamento entre os dois elementos e principalmente quando os elementos estão próximos (distancia igual a $\frac{\lambda}{4}$) verificam-se valores aproximados de -28dB e -26dB, respectivamente. À imagem do que se verificou nas antenas anteriores, quando se passou a ter um plano de massa distinto por elementos, a adaptação à frequência de ressonância ficou facilitada, embora se verifique novamente um aumento nos valores de acoplamento entre elementos, situando-se esses valores em -16dB nas duas antenas, quando os elementos se distanciavam de $\frac{\lambda}{4}$.

Foi retirada outra conclusão em relação as duas ultimas antenas MIMO, apresentadas no ponto 4.3 e ponto 4.4, quando os planos de massa são distintos. A impedância de entrada em cada um dos elementos que compõem estas antenas são dispares, pois verificou-se que na antena MIMO apresentada na Figura 51 a impedância de entrada tem melhores resultados, apresentando valores de parte real próximos dos 50Ω e a parte imaginárias reduziu para valores mais próximos de zero, o que leva a acreditar que esta antena MIMO é a que melhores resultados apresenta de todas as antenas dimensionadas.

A forma escolhida para minimizar o acoplamento entre os elementos que compõem as antenas MIMO dimensionadas não terá sido a melhor. Pode concluir-se que para elementos relativamente maiores, como o Monopolo Impresso *Snake-Shaped* e o Monopolo Impresso *C-Shaped* a colocação de um plano de massa distinto por elemento, não surte os melhores efeitos no acoplamento entre elementos, S_{12}/S_{21} , e no parâmetro S_{11}/S_{22} apresentando em ambos os valores um aumento face à abordagem com um plano de massa comum.

Tal como esperado, a quando do dimensionamento dos monopolos simples, verificou-se uma melhoria no parâmetro S_{11}/S_{22} e S_{12}/S_{21} , das antenas MIMO dimensionadas quando se trocava de elementos, permitindo concluir neste ponto que se realizou uma boa escolha nos monopolos impressos simples dimensionados. Esta terá sido a forma mais assertiva quanto às melhorias que se pretendia relativamente ao acoplamento entre elementos.

5.2. Trabalho Futuro

Esta dissertação pode ser base para algum trabalho futuro que venha a ser desenvolvido no âmbito de melhoramentos que possam existir no acoplamento entre elementos de uma antena MIMO.

Nesta dissertação foram implementadas antenas MIMO, sendo que a análise recaiu sobre a influência que um elemento tem sobre o seu adjacente. Tentou-se colmatar e reduzir este acoplamento com a separação do plano de massa em dois de forma a minimizar a transferência de potência de um porto de alimentação para o outro. Este método não foi absolutamente conclusivo pois foi eficaz com um tipo de antenas e ineficaz em outros.

Acredita-se que algo mais pode ser feito para minimizar esse acoplamento mantendo a divisão dos planos de massa. Contudo, deve ser tido em conta que antenas MIMO com elementos relativamente grandes para estarem adaptados necessitem de um plano de massa maior, podendo utilizar um plano de massa conjunto e a partir daí caminhar para formas de melhoramento.

Nesta dissertação teve-se ideia de realizar antenas MIMO com elementos diferentes, de diferentes características e dimensões. Por exemplo uma antena MIMO composta por um monopolo impresso *Snake-Shaped* e um monopolo impresso *C-Shaped*, utilizando um plano de massa comum, poderia ser considerada uma boa antena, com uma baixa influencia entre elementos.

Referências

- [1] Ricardo Miguel Romão Gonçalves. Reconfigurable Antenna for Mobile Devices. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Setembro de 2012.
- [2] <http://pplware.sapo.pt/networking/tecnologias-1g-2g-2-5g-3g-e-4g-sabe-a-diferenca/>, Retrieved Junho de 2011.
- [3] http://en.wikipedia.org/wiki/Shannon%E2%80%93Hartley_theorem, Retrieved Outubro de 2013.
- [4] Nuno Balula de Almeida. Estudos de Modelos de Canal para Sistemas MIMO. Dissertação para obtenção do grau de Mestre. Departamento de Electrónica, Telecomunicações e Informática, Universidade de Aveiro, Aveiro, Junho de 2005.
- [5] www.telecomhall.com, Retrieved Setembro de 2011.
- [6] Jing-Hae Jiang. Meandered T-Shaped Monopole Antenna. Departamento de Engenharia Electrónica, Taipei, Taiwan, Dezembro de 2009.
- [7] Huang, C.-H., Horng, T.S.. A Novel Printed G-Shaped Monopole Antenna for Dual-Band WLAN Applications. Departamento de Engenharia Electrónica, Kaohsiung, Taiwan, Junho de 2004.
- [8] Qi Luo. Fractal monopole antenna for WLAN USB dongle. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Novembro de 2009.
- [9] Diallo, A. Enhanced Two Antenna Structures for Universal Mobile Telecommunications System Diversity Terminals. CNRS, University de Nice-Sophia Antipolis, Valbonne, França, Janeiro de 2011.
- [10] Qi Luo. Compact Printed Monopole Antenna Array for Dual-Band WLAN Application. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Junho de 2011.
- [11] Yu-Kai Tseng . Implementation of a MIMO antenna design for USB dongle applications. Departamento de Engenharia Electrónica, Kaohsiung, Taiwan, Maio de 2013.
- [12] Eva Antonino-Daviu. Design of a multimode MIMO antenna using characteristic modes. Instituto de Telecomunicações e Aplicações Multimédia (iTEAM), Universidade de Valencia, Valencia, Março de 2009.
- [13] Mohajer, M.. MIMO antenna design and optimization for mobile applications. Department of Electrical & Computer Engineering, University of Waterloo, Waterloo, ON, Canada, Junho de 2009.
- [14] Ajay Gummalla, Maha Achour, Gregory Poilasne, Vaneet Pathak. Compact Dual-Band Planar Metamaterial Antenna Arrays for Wireless LAN. Rayspan Corporation, San Diego, -.
- [15] Saou-Wen Su, Jui-Hung Chou, Yung-Tao Liu. Printed Coplanar Two-Antenna Element for 2.4/5 GHz WLAN Operation in a MIMO System. Department of Physics Republic of China Military Academy, Fengshan 83059, Taiwan, Outubro de 2007.
- [16] Di Wu. Design of a printed multiband MIMO antenna. Departamento de Engenharia Electrónica, Universidade da cidade Hong Kong, Hong Kong, China, Abril de 2013.
- [17] Ibra Dioum, Mark Clemente, Aliou Diallo, Cyril Luxey, Jean Pierre Rossi, Sidi Mohamed Farssi. Meandered Monopoles for 700 MHz LTE Handsets and Improved MIMO Channel Capacity Performance. CNRS, University de Nice-Sophia Antipolis, Valbonne, França, -.
- [18] Qi Luo. Printed C-Shaped Monopole Antenna Array with Isolation for MIMO Applications. Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores do Porto, Porto, Janeiro de 2011.

- Mohsen Salehi, Alireza Motevasselian, Ahad Tavakoli, Teimur Heidari. Mutual coupling reduction of microstrip antennas using defected ground structure. Department of Electrical Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran, Octubro de 2006.
- [19] Manteuffel, D.. MIMO antenna design challenges. Wireless Commun., University of Kiel, Kiel, Germany, Novembro de 2009.
- [20] <https://www.cst.com/Products/CSTDS>
- [21]