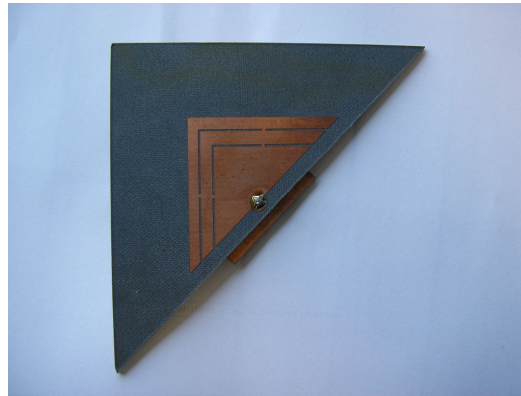




INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO  
Universidade Técnica de Lisboa



## **Antenas Impressas Activas Multibanda para Comunicações Móveis**

**Ridwan Sulemangi Gulamo Nabi**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
**Engenharia Electrotécnica e de Computadores**

### **Júri**

Presidente: Prof. António Castelo Branco Rodrigues

Orientador: Prof. Carlos Cardoso Fernandes

Professor Acompanhante: Prof. Jorge Rodrigues da Costa

Vogal: Prof. António Alves Moreira

**Novembro de 2007**



## **Agradecimentos**

Aos Professores Carlos Fernandes e Jorge Costa pela orientação do projecto. Ao Sr. Carlos Brito e Sr. Vasco Fred pelo fabrico das antenas e ao Sr. António Almeida pela medição das antenas. À Eng.<sup>a</sup> Carla Medeiros pelo esclarecimento de várias dúvidas sobre detalhes do projecto.

À minha família, amigos e colegas de curso por todo o apoio ao longo deste trabalho e durante todo o curso.

Trabalho desenvolvido no âmbito do projecto que decorre no Instituto de Telecomunicações R-META, POSC/EEA-CPS/61887/2004, financiado pela FCT através do Programa POSC.



## **Resumo**

Esta dissertação está inserida no projecto R-Meta, Antenas Reconfiguráveis de baixo perfil utilizando Metamateriais, financiado pela Fundação de Ciência e Tecnologia, FCT e tem como objectivo estudar antenas reconfiguráveis multibanda de tamanho reduzido.

Começou-se por desenvolver uma antena quadrada com dois elementos parasitas, de modo a permitir o seu funcionamento alternadamente em três bandas de frequência. De seguida foi estudada a antena triangular obtida através do corte da antena quadrada ao longo da diagonal que contém a alimentação. Deste modo obteve-se uma nova configuração com características de funcionamento semelhantes mas com dimensões menores do que a antena quadrada inicial.

Inicialmente, as antenas foram projectadas com interruptores ideais, sendo estes representados por tiras de metal. Os correspondentes protótipos foram fabricados e os resultados experimentais foram comparados com os simulados apresentando uma concordância razoável

Posteriormente, estas antenas foram reajustadas para funcionar com interruptores reais, neste caso com díodos PIN. Esta parte específica do trabalho foi feita apenas com recurso a simulações, embora utilizando as matrizes de transmissão dos díodos medidas no Laboratório de RF do Instituto de Telecomunicações.

Como resultado deste trabalho, foi obtido um novo conceito de miniaturização de antenas que é aplicável a várias geometrias e que é compatível com estratégias de reconfiguração das frequências de funcionamento da antena.

## ***Palavras-chave***

Antenas reconfiguráveis; antenas multibanda; antenas de tripla banda; antenas *microstrip*; miniaturização; elemento parasita.



## **Abstract**

This thesis is in the framework of R-Meta project, Reconfigurable Low-profile Antennas Using Metamaterials, funded by *Fundação de Ciência e Tecnologia*, FCT, and the goal is to study small size multiband reconfigurable antennas.

Initially, a square antenna with two parasitic elements was studied, to work in three frequency bands. Then, a triangular antenna, obtained by cutting the square antenna by its diagonal line that contains the feeding, was studied. This way, it was obtained a new configuration with similar working characteristics, but smaller size than the initial square antenna.

On the beginning, the antennas are designed with ideal switches, on this case, the switches are metal strips. The correspondent prototypes were fabricated and the measured results shown reasonable agreement with simulations.

After that, the antennas are readjusted for operating with real switches that on this case are PIN diodes. This specific part of the work was made only with simulations although using the transmission matrix of the diodes measured on the RF laboratory of *Instituto de Telecomunicações*.

As result of this work it was obtained a new miniaturization concept that can be applied in many configurations and is compatible with antenna frequency reconfiguration strategies.

## **Keywords**

Reconfigurable antennas; multiband antennas; triple band antennas; microstrip antennas; miniaturization; parasitic element.





# Índice

<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	<b>I</b>
<b>RESUMO</b> .....	<b>III</b>
PALAVRAS-CHAVE .....	III
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>V</b>
KEYWORDS .....	V
<b>ÍNDICE</b> .....	<b>VII</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>IX</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	<b>XIV</b>
<b>LISTA DE SIGLAS</b> .....	<b>XV</b>
<b>LISTA DE PROGRAMAS</b> .....	<b>XVI</b>
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
1.1 CONTEXTO E DESCRIÇÃO DO TRABALHO .....	1
1.2 ESTADO DA ARTE .....	2
1.2.1 Antenas passivas para multi-sistemas.....	3
1.2.2 Antenas reconfiguráveis.....	3
1.3 ESTRUTURA DO RELATÓRIO.....	5
<b>2 CONFIGURAÇÕES DE TESTE</b> .....	<b>7</b>
2.1 OBJECTIVOS .....	7
2.2 ANTENA QUADRADA COM ALIMENTAÇÃO CENTRALIZADA .....	7
2.2.1 Descrição da antena.....	7
2.2.2 Simulação da antena .....	9
2.3 ANTENA QUADRADA COM ALIMENTAÇÃO DIAGONAL.....	13
2.3.1 Descrição da antena.....	13
2.3.2 Simulação da antena .....	14
2.4 ANTENA TRIANGULAR.....	18
2.4.1 Descrição da antena.....	18
2.4.2 Simulação da antena .....	19
2.5 ANTENA CIRCULAR .....	23
2.5.1 Descrição da antena.....	23
2.5.2 Simulação da antena .....	24
2.6 CONCLUSÕES.....	28
<b>3 ANTENAS DE TRIPLA BANDA COM INTERRUPTORES IDEAIS</b> .....	<b>29</b>
3.1 OBJECTIVOS .....	29
3.2 ANTENA QUADRADA COM INTERRUPTORES IDEAIS.....	30
3.2.1 Descrição da antena.....	30
3.2.2 Simulação da antena .....	32

3.3	ANTENA TRIANGULAR COM INTERRUPTORES IDEAIS .....	42
3.3.1	<i>Descrição da antena</i> .....	42
3.3.2	<i>Simulação da antena</i> .....	44
3.3.3	<i>Resultados Experimentais</i> .....	55
3.4	CONCLUSÕES.....	62
<b>4</b>	<b>ANTENA DE TRIPLA BANDA COM INTERRUPTORES REAIS.....</b>	<b>63</b>
4.1	OBJECTIVOS .....	63
4.2	ESTUDO DO COMPORTAMENTO DOS DÍODOS PIN.....	63
4.3	SIMULAÇÃO DA ANTENA TRIANGULAR COM DÍODOS PIN .....	68
4.3.1	<i>Descrição da antena</i> .....	68
4.3.2	<i>Simulação da antena</i> .....	69
4.3.3	<i>Comparação dos ganhos das antenas</i> .....	76
4.4	CONCLUSÕES.....	77
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>78</b>
	<b>ANEXO .....</b>	<b>79</b>
	<b>A. ANTENA COM PLANO DE TERRA PEQUENO .....</b>	<b>80</b>
	<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>84</b>

## Lista de Figuras

Figura 1.1. Tipos de configurações das diversas antenas pesquisadas.....	1
Figura 2.1. Geometria da antena quadrada com alimentação centralizada e da versão cortada pelo eixo de simetria.....	8
Figura 2.2. Perdas de retorno da antena de teste quadrada e da versão cortada.	9
Figura 2.3. Intensidade da corrente na antena de teste quadrada com alimentação centralizada para 1.911 GHz. ....	10
Figura 2.4. Intensidade da corrente na antena de teste cortada para 1.91 GHz.	11
Figura 2.5. Diagramas de radiação no plano E para a antena de teste quadrada com alimentação centralizada e para a versão cortada. ....	12
Figura 2.6. Diagramas de radiação no plano H para a antena de teste quadrada com alimentação centralizada e para a versão cortada. ....	12
Figura 2.7. Geometria da antena quadrada com alimentação diagonal e da versão cortada pelo eixo de simetria.....	13
Figura 2.8. Perdas de retorno da antena de teste quadrada com alimentação diagonal e da versão cortada. ....	14
Figura 2.9. Intensidade da corrente na antena de teste quadrada com alimentação diagonal para 1,91 GHz.....	15
Figura 2.10. Intensidade da corrente na antena de teste cortada para .... GHz..	16
Figura 2.11. Diagramas de radiação no plano E para a antena de teste quadrada com alimentação diagonal e para a versão cortada. ....	17
Figura 2.12. Diagramas de radiação no plano H para a antena de teste quadrada com alimentação diagonal e para a versão cortada. ....	17
Figura 2.13. Geometria da antena triangular inteira e da versão cortada pelo eixo de simetria .....	18
Figura 2.14. Perdas de retorno para a antena de teste triangular inteira e para a versão cortada. ....	19
Figura 2.15. Intensidade da corrente na antena de teste triangular inteira para 1.91 GHz. ....	20
Figura 2.16. Intensidade da corrente na antena de teste triangular cortada para 1.91 GHz. ....	21
Figura 2.17. Diagramas de radiação no plano E para a antena de teste triangular inteira e para a versão cortada.....	22
Figura 2.18. Diagramas de radiação no plano H para a antena de teste triangular inteira e para a versão cortada.....	22
Figura 2.19. Geometria da antena circular e da versão cortada. ....	23
Figura 2.20. Comparação das perdas de retorno da antena circular e da versão cortada. ....	24
Figura 2.21. Distribuição da intensidade da corrente na antena circular inteira a 1.91 GHz. ....	25
Figura 2.22. Distribuição da intensidade da corrente na antena cortada a 1.91 GHz. ....	26
Figura 2.23. Diagramas de radiação da antena circular e da versão cortada no plano E a 1.9096 GHz. ....	27

Figura 2.24. Diagramas de radiação da antena circular e da versão cortada no plano H a 1.9096 GHz. ....	27
Figura 3.1. Geometria da configuração 1, com o plano de terra. ....	30
Figura 3.2. Detalhes da configuração 1, em cima e à esquerda; da configuração 2, em cima e à direita; e da configuração 3, em baixo. ....	31
Figura 3.3. Variáveis usadas na sintonia da antena quadrada com interruptores ideais, e variáveis que indicam a simetria da antena ( $e_1, e_2, e_3, e_4$ ). ....	32
Figura 3.4. Banda UMTS-TDD da antena quadrada de tripla banda. ....	33
Figura 3.5. Banda Bluetooth da antena quadrada de tripla banda. ....	34
Figura 3.6. Banda WiMax da antena quadrada de tripla banda. ....	34
Figura 3.7. Distribuição da intensidade da corrente na frequência central da banda UMTS-TDD da antena quadrada de tripla banda. ....	36
Figura 3.8. Distribuição da intensidade da corrente na frequência central da banda Bluetooth da antena quadrada de tripla banda. ....	36
Figura 3.9. Distribuição da intensidade da corrente na frequência central da banda WiMax da antena quadrada de tripla banda. ....	37
Figura 3.10. Diagramas de radiação no plano E para a frequência central da banda UMTS-TDD da antena quadrada de tripla banda. ....	38
Figura 3.11. Diagramas de radiação no plano H para a frequência central da banda UMTS-TDD da antena quadrada de tripla banda. ....	38
Figura 3.12. Diagramas de radiação no plano E para a frequência central da banda Bluetooth da antena quadrada de tripla banda. ....	39
Figura 3.13. Diagramas de radiação no plano H para a frequência central da banda Bluetooth da antena quadrada de tripla banda. ....	39
Figura 3.14. Diagramas de radiação no plano E para a frequência central da banda WiMax da antena quadrada de tripla banda. ....	40
Figura 3.15. Diagramas de radiação no plano H para a frequência central da banda WiMax da antena quadrada de tripla banda. ....	40
Figura 3.16. Comparação dos diagramas de radiação para as três bandas, no plano E da antena quadrada de tripla banda. ....	41
Figura 3.17. Comparação dos diagramas de radiação para as três bandas, no plano H da antena quadrada de tripla banda. ....	41
Figura 3.18. Geometria da configuração 1 da antena triangular de tripla banda com o plano de terra e a linha <i>microstrip</i> . ....	42
Figura 3.19. Detalhes das configurações 1, à esquerda e 2, à direita, para a antena triangular de tripla banda (a linha <i>microstrip</i> e o plano de terra foram omitidos para maior clareza do desenho). ....	43
Figura 3.20. Detalhes da configuração 3 da linha <i>microstrip</i> para a antena triangular de tripla banda. ....	43
Figura 3.21. Variáveis usadas na sintonização da antena triangular com interruptores ideais e variáveis que indicam a diferença na espessura dos elementos parasitas ( $e_1, e_2, e_3, e_4$ ). ....	44
Figura 3.22. Bandas de funcionamento da antena triangular de tripla banda com interruptores ideais. ....	45
Figura 3.23. Comparação entre as perdas de retorno das duas antenas de tripla banda com interruptores ideais, para a banda UMTS-TDD. ....	46

Figura 3.24. Parte real e imaginária da impedância da antena triangular de tripla banda com interruptores ideais, na banda UMTS-TDD.....	46
Figura 3.25. Comparação entre as perdas de retorno das duas antenas de tripla banda com interruptores ideais, para a banda Bluetooth.....	47
Figura 3.26. Parte real e imaginária da impedância da antena triangular de tripla banda com interruptores ideais, na banda Bluetooth.....	47
Figura 3.27. Comparação entre as perdas de retorno das duas antenas de tripla banda com interruptores ideais, para a banda WiMax.....	48
Figura 3.28. Parte real e imaginária da impedância da antena triangular de tripla banda com interruptores ideais, na banda WiMax.....	48
Figura 3.29. Intensidade da corrente na frequência central da banda UMTS-TDD para a antena triangular de tripla banda com interruptores ideais.....	49
Figura 3.30. Intensidade da corrente na frequência central da banda Bluetootha para a antena triangular de tripla banda com interruptores ideais.....	50
Figura 3.31. Intensidade da corrente na frequência central da banda WiMax para a antena triangular de tripla banda com interruptores ideais.....	50
Figura 3.32. Diagramas de radiação no plano E para a frequência central da banda UMTS-TDD para a antena triangular de tripla banda com interruptores ideais.....	51
Figura 3.33. Diagramas de radiação no plano H para a frequência central da banda UMTS-TDD para a antena triangular de tripla banda com interruptores ideais.....	51
Figura 3.34. Diagramas de radiação no plano E para a frequência central da banda Bluetooth para a antena triangular de tripla banda com interruptores ideais.....	52
Figura 3.35. Diagramas de radiação no plano H para a frequência central da banda Bluetooth para a antena triangular de tripla banda com interruptores ideais.....	52
Figura 3.36. Diagramas de radiação no plano E para a frequência central da banda WiMax para a antena triangular de tripla banda com interruptores ideais.....	53
Figura 3.37. Diagramas de radiação no plano H para a frequência central da banda WiMax para a antena triangular de tripla banda com interruptores ideais.....	53
Figura 3.38. Comparação dos diagramas de radiação para as três bandas, no plano E para as duas antenas de tripla banda com interruptores ideais.....	54
Figura 3.39. Comparação dos diagramas de radiação para as três bandas, no plano H para as duas antenas de tripla banda com interruptores ideais.....	54
Figura 3.40. Fotografia do protótipo usado para a banda UMTS-TDD (configuração 1) da antena triangular de tripla banda com interruptores ideais..	55
Figura 3.41. Fotografia do protótipo usado para a banda Bluetooth (configuração 2) da antena triangular de tripla banda com interruptores ideais.....	55
Figura 3.42. Fotografia do protótipo usado para a banda WiMax (configuração 3) da antena triangular de tripla banda com interruptores ideais.....	56

Figura 3.43. Fotografia da face inferior da antena, onde se localiza a linha <i>microstrip</i> e o cabo coaxial da antena triangular de tripla banda com interruptores ideais. ....	56
Figura 3.44. Comparação das perdas de retorno medidas com os resultados da simulação para a banda UMTS-TDD da antena triangular de tripla banda com interruptores ideais. ....	57
Figura 3.45. Comparação das perdas de retorno medidas com os resultados da simulação para a banda Bluetooth da antena triangular de tripla banda com interruptores ideais. ....	57
Figura 3.46. Comparação das perdas de retorno medidas com os resultados da simulação para a banda WiMax da antena triangular de tripla banda com interruptores ideais. ....	58
Figura 3.47. Diagramas de radiação no plano E para a frequência central da banda UMTS-TDD da antena triangular de tripla banda com interruptores ideais. ....	59
Figura 3.48. Diagramas de radiação no plano H para a frequência central da banda UMTS-TDD da antena triangular de tripla banda com interruptores ideais. ....	59
Figura 3.49. Diagramas de radiação no plano E para a frequência central da banda Bluetooth da antena triangular de tripla banda com interruptores ideais. ....	60
Figura 3.50. Diagramas de radiação no plano H para a frequência central da banda Bluetooth da antena triangular de tripla banda com interruptores ideais. ....	60
Figura 3.51. Diagramas de radiação no plano E para a frequência central da banda WiMax da antena triangular de tripla banda com interruptores ideais. ....	61
Figura 3.52. Diagramas de radiação no plano H para a frequência central da banda WiMax da antena triangular de tripla banda com interruptores ideais. ....	61
Figura 4.1. Díodo PIN BAR50-02V. ....	63
Figura 4.2. Medição das amplitudes dos parâmetros $s$ da linha de transmissão. ....	64
Figura 4.3. Medição das fases dos parâmetros $s$ da linha de transmissão. ....	64
Figura 4.4. Medição das amplitudes dos parâmetros $s$ da linha de transmissão com o díodo desligado inserido. ....	65
Figura 4.5. Medição das fases dos parâmetros $s$ da linha de transmissão com o díodo desligado inserido. ....	65
Figura 4.6. Medição das amplitudes dos parâmetros $s$ da linha de transmissão com o díodo ligado inserido. ....	66
Figura 4.7. Medição das fases dos parâmetros $s$ da linha de transmissão com o díodo ligado inserido. ....	66
Figura 4.8. Amplitudes dos parâmetros da matriz $s$ do díodo desligado, extraídas das medidas. ....	67
Figura 4.9. Fases dos parâmetros $s$ do díodo desligado. ....	67
Figura 4.10. Amplitudes dos parâmetros $s$ do díodo ligado, extraídas das medidas. ....	68
Figura 4.11. Fases dos parâmetros $s$ do díodo ligado, extraídas das medidas. ....	68
Figura 4.12. Geometria da antena estudada (à esquerda) e detalhe dos interruptores usados na simulação (à direita) da antena triangular de tripla banda com interruptores reais. ....	69

Figura 4.13. Comparação das bandas da antena triangular de tripla banda com interruptores reais e ideais para a banda UMTS-TDD.....	70
Figura 4.14. Comparação das bandas da antena triangular de tripla banda com interruptores reais e ideais para a banda Bluetooth.....	71
Figura 4.15. Comparação das bandas da antena triangular de tripla banda com interruptores reais e ideais para a banda WiMax.....	71
Figura 4.16. Distribuição da corrente para a frequência central da banda UMTS-TDD para a antena triangular com interruptores reais.....	72
Figura 4.17. Distribuição da corrente para a frequência central da banda Bluetooth para a antena triangular com interruptores reais.....	73
Figura 4.18. Distribuição da corrente para a frequência central da banda WiMax para a antena triangular com interruptores reais.....	73
Figura 4.19. Diagramas de radiação no plano E para a frequência central da banda UMTS-TDD para a antena triangular com interruptores reais.....	74
Figura 4.20. Diagramas de radiação no plano H para a frequência central da banda UMTS-TDD para a antena triangular com interruptores reais.....	74
Figura 4.21. Diagramas de radiação no plano E para a frequência central da banda Bluetooth para a antena triangular com interruptores reais.....	75
Figura 4.22. Diagramas de radiação no plano H para a frequência central da banda Bluetooth para a antena triangular com interruptores reais.....	75
Figura 4.23. Diagramas de radiação no plano E para a frequência central da banda WiMax para a antena triangular com interruptores reais.....	76
Figura 4.24. Diagramas de radiação no plano H para a frequência central da banda WiMax para a antena triangular com interruptores reais.....	76
Figura A.1. Configurações da antena triangular com plano de terra pequeno: em cima à esquerda – configuração 1, em cima, à direita – configuração 2, e em baixo – configuração 3.....	80
Figura A.2. Banda UMTS-TDD da antena triangular com plano de terra pequeno.....	81
Figura A.3. Banda Bluetooth da antena triangular com plano de terra pequeno.....	82
Figura A.4. Banda WiMax da antena triangular com plano de terra pequeno.....	82

## Lista de Tabelas

Tabela 1.1. Plano de frequência e larguras de banda de alguns serviços de comunicações móveis. ....	2
Tabela 2.1. Dimensões da antena de teste quadrada com alimentação centralizada e da versão cortada. ....	8
Tabela 2.2. Comparação entre a banda pretendida e as alcançadas pela antena de teste quadrada com alimentação centralizada e pela versão cortada. ....	9
Tabela 2.3. Dimensões da antena de teste quadrada com alimentação diagonal e da versão cortada. ....	14
Tabela 2.4. Comparação entre a banda pretendida e as alcançadas pela antena de teste quadrada com alimentação diagonal e pela versão cortada. ....	15
Tabela 2.5. Dimensões da antena de teste triangular inteira e pela versão cortada. ....	19
Tabela 2.6. Comparação entre a banda pretendida e as alcançadas pela antena de teste triangular inteira e pela versão cortada. ....	20
Tabela 2.7. Dimensões da antena circular e da versão cortada. ....	23
Tabela 2.8. Comparação entre a banda pretendida e as alcançadas pela antena circular e pela versão cortada. ....	24
Tabela 3.1. Comparação entre as bandas e tamanhos das antenas do capítulo anterior. ....	29
Tabela 3.2. Dimensões da antena quadrada de tripla banda. ....	33
Tabela 3.3. Comparação dos objectivos (serviços) e resultados (configurações) da antena quadrada de tripla banda. ....	35
Tabela 3.4. Dimensões da antena triangular de tripla banda. ....	45
Tabela 3.5. Comparação entre as duas antenas de tripla banda com interruptores ideais. ....	49
Tabela 3.6. Comparação entre as bandas obtidas por simulação e as medidas da antena triangular de tripla banda com interruptores ideais. ....	58
Tabela 4.1. Dimensões da da antena triangular de tripla banda com interruptores reais. ....	70
Tabela 4.2. Comparação entre as bandas das antenas triangulares com interruptores ideais e reais. ....	72
Tabela 4.3. Comparação dos ganhos (em dB) obtidos por simulação da antena triangular com tiras de metal e da antena triangular com díodos. ....	77
Tabela A.1. Dimensões da antena triangular com plano de terra pequeno. ....	81
Tabela A.2. Comparação dos objectivos e resultados da antena triangular com plano de terra pequeno. ....	83



## **Lista de Siglas**

FCT – Fundação de Ciência e Tecnologia  
FDD – “Frequency Division Duplex”  
IT – Instituto das Telecomunicações  
LHCP – “Left Hand Circular Polarization”  
MEMS – “Micro Electro Mechanical Systems”  
MIMO – “Multiple Input, Multiple Output”  
PASS – “Patch Antenna with Switchable Slots”  
PIFA – “Planar Inverted F Antenna”  
PIN – “p-type, intrinsic, n-type”  
RF – Radiofrequência  
RHCP – “Righth Hand Circular Polarization”  
R-Meta – “Reconfigurable Low-profile Antennas Using Metamaterials”  
TDD – “Time Division Duplex”  
UMTS – “Universal Mobile Telecommunications System”  
UWB – “Ultra Wide Bandwidth”  
VSWR – “Voltage Standing Wave Ratio”  
WiMAX – “Worldwide Interoperability for Microwave Access”

## Lista de Programas

- *Ansoft Designer*- Ferramenta que possibilita o desenho e simulação de estruturas planares utilizadas nas frequências das microondas e radiofrequência.
- WIPL-D – Programa comercial para simulação e modelação de estruturas para análise electromagnética de alta frequência baseado no Método dos Momentos.
- Wiplmask – Programa para impressão das máscaras usadas na fabricação das antenas.

# 1 Introdução

## 1.1 Contexto e descrição do trabalho

Esta dissertação está inserida no projecto R-Meta<sup>1</sup>, Antenas Reconfiguráveis de Baixo Perfil Utilizando Metamateriais, financiado pela Fundação de Ciência e Tecnologia, FCT. Tem como objectivo obter novas geometrias de antenas impressas multibanda reconfiguráveis de tamanho reduzido, para mais tarde serem integradas com superfícies metamateriais usadas como substrato, para permitir melhorar as características de radiação da antena impressa.

Nos sistemas de comunicações móveis e por satélite as antenas impressas têm-se revelado muito atraentes devido ao seu baixo perfil, peso leve e facilidade de fabricação. Destas, as antenas reconfiguráveis receberam recentemente atenção significativa por permitirem ajustar, mediante as necessidades dos sistemas, as suas características de funcionamento tais como: a frequência de funcionamento, a polarização e o diagrama de radiação.

Comparadas com as antenas de banda larga, as antenas reconfiguráveis oferecem as vantagens de tamanho compacto, diagrama de radiação semelhantes para todas as bandas, uso eficiente do espectro electromagnético e sobretudo selectividade na frequência, que é útil para a redução dos efeitos adversos da interferência e do *jamming*. São usados interruptores para ligar ou isolar alternadamente subestruturas num elemento da antena planar, criando um radiador geometricamente distinto para cada combinação de posições dos interruptores.

Na Tabela 1.1 encontram-se vários serviços móveis, as suas bandas de frequência e respectivas larguras de banda. Os sistemas escolhidos para implementação na antena multibanda deste trabalho são UMTS<sup>2</sup>, *Bluetooth* e *WiMax*<sup>3</sup>. Neste trabalho, diz-se que a antena está sintonizada quando apresenta um coeficiente de reflexão abaixo dos -10 dB e um dos objectivos é que os diagramas de radiação apresentem características semelhantes para as três bandas de funcionamento.

Com o objectivo de familiarização com os conceitos e configurações existentes é realizada uma revisão na literatura na secção seguinte, na qual são pesquisados vários tipos de antenas impressas.

---

<sup>1</sup> Reconfigurable Low-profile Antennas Using Metamaterials

<sup>2</sup> Acrónimo Anglo-saxónico para “*Universal Mobile Telecommunication System*”

<sup>3</sup> Acrónimo Anglo-saxónico para “*Worldwide Interoperability for Microwave Access*”

	Bandas de frequência (MHz)		f <sub>0n</sub> (MHz)	Largura de banda	
				(MHz)	(%)
<b>GSM900</b>	890-915 + 935-960		925	70	7,57
<b>GSM1800</b>	1710-1785 + 1805-1880		1795	170	9,47
<b>UMTS</b>	TDD	1900-1920 + 2010-2025	2035	270	13,27
	FDD	1920-1980 + 2110-2170			
<b>Bluetooth IEEE 802.11b</b>	2400-2483,5		2441,75	83,5	3,42
<b>HiperLAN2 IEEE 802.11a</b>	5150-5350 <sup>4</sup>		5250	200	3,81
<b>WiMax IEEE 802.16e</b>	3443-3457 + 3543-3557 <sup>5</sup>		3500	114	3,26

**Tabela 1.1. Plano de frequência e larguras de banda de alguns serviços de comunicações móveis.**

## **1.2 Estado da arte**

Os principais parâmetros que caracterizam o funcionamento de uma antena são os seguintes:

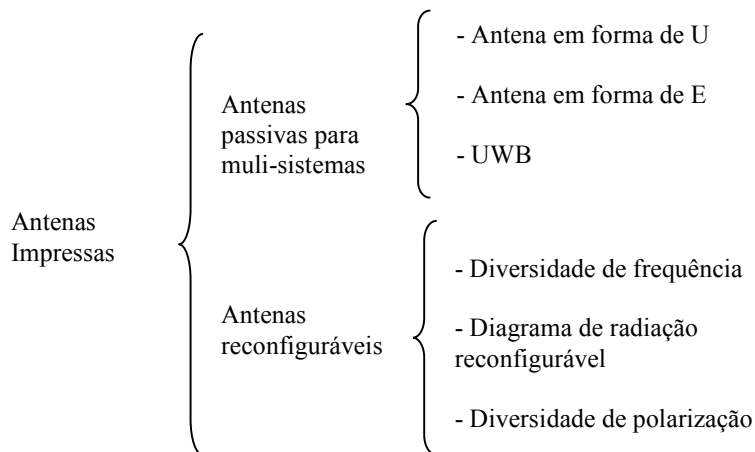
- A frequência de ressonância e a largura de banda
- O diagrama de radiação: directividade e orientação
- A polarização
- A eficiência

As várias configurações de antenas impressas podem ser organizadas conforme a Figura 1.1. Há antenas que se encaixam em mais de uma categoria.

---

<sup>4</sup> Sub-banda para espaços interiores, por vezes a sub-banda de 5470-5725 MHz para espaços exteriores também é considerada.

<sup>5</sup> Frequências de teste do WiMax em Portugal



**Figura 1.1. Tipos de configurações das diversas antenas impressas pesquisadas.**

### 1.2.1 Antenas passivas multibanda

Estas antenas têm uma configuração fixa, mas pela sua forma especial proporcionam mais de uma banda de funcionamento. Foram encontradas várias soluções de antenas passivas, descritas em [1], onde se pode encontrar antenas com fendas que podem ter a forma de U ou antenas em forma de E (similares às antenas em C-duplo), ou ainda uma antena com uma fenda rectangular de modo a permitir um funcionamento UWB<sup>6</sup>. Em [2] são descritas antenas passivas com 3 ou 4 frequências, mas com um critério de especificação de ressonância menos restritivo ( $VSWR^7 < 2$  em vez de  $VSWR < 3$  usado nas comunicações móveis).

Não se aprofunda a revisão da literatura sobre este tipo de antenas por não ser relevante para o tema desta tese.

### 1.2.2 Antenas reconfiguráveis

As antenas reconfiguráveis apresentam a vantagem de aumento de funções com uma área reduzida. A reconfigurabilidade é obtida na maior parte dos casos através de interruptores. Nestas antenas conseguem-se vários comportamentos diferentes ao alterar o estado dos interruptores. Pode-se alterar a frequência de funcionamento, o diagrama de radiação e a polarização de acordo com os objectivos de cada antena.

<sup>6</sup> Acrónimo Anglo-saxónico para “Ultra Wide Bandwidth”

<sup>7</sup> Acrónimo Anglo-saxónico para “Voltage Standing Wave Ratio”

As **antenas com diversidade de polarização** permitem obter polarizações ortogonais, sejam lineares ou circulares. Estas características podem ser encontradas em [3], onde se apresenta uma PASS<sup>8</sup> com diversidade de frequência e de polarização. As polarizações são RHCP<sup>9</sup> e LHCP<sup>10</sup> e foram obtidas em duas frequências de operação, o que permite melhorar a capacidade do canal e reduzir o nível de acoplamento cruzado nas comunicações; em [4], trata-se de uma PASS com polarizações circulares ortogonais e duas frequências de ressonância, em que se usa um díodo *pin* e alimentação diagonal; em [5], encontra-se uma antena quadrada compacta com uma fenda hexagonal, reconfigurável electronicamente através de díodos varactores, com alimentação única, com operação em duas frequências e duas polarizações; esta configuração permite atingir rácios de frequência de 1.1 a 1.37; em [6], é descrita uma antena com polarização reconfigurável usando interruptores MEMS<sup>11</sup>; e em [7], faz-se uma revisão das várias geometrias existentes para antenas de polarização ágil.

Soluções de **antenas com diversidade de frequência** podem ser encontradas em vários artigos. Esta é o tipo de diversidade mais usada, porque permite que uma antena funcione em vários serviços. Antenas de dupla frequência são as mais comuns: pode-se encontrar em [8] uma PASS triangular que usa díodos PIN, em [9] uma antena rectangular com interruptores MEMS integrados, em [10] uma antena quadrada com elemento parasita, em [11] uma antena com polarização circular usando interruptores MEMS integrados, em [12] um agregado de antenas com interruptores independentes, em [13] uma PASS com duas fendas controladas por díodos e com dois stubs, em [14] um antena baseada em fractais, com uma geometria com fendas baseadas nas curvas de Hilbert que possui diagramas de radiação diferentes para cada ressonância, e em [15] uma antena triangular controlada por MEMS.

Uma antena de tripla banda usando MEMS encontra-se em [16], onde são usados interruptores independentes. Nesta antena a alimentação é feita com uma linha microstrip e possui uma fenda. Foram encontrados também artigos em que se consegue obter 5 frequências de operação, mas com bandas estreitas.

Antenas triangulares são em geral mais compactas que as rectangulares e têm características de desempenho comparáveis. As geometrias triangulares são também mais aptas para projectos de radiadores reconfiguráveis, multibanda e compactos. Em [17] encontra-se uma antena triangular com MEMS.

---

<sup>8</sup> Acrónimo Anglo-saxónico para *"Patch Antenna with Switchable Slots"*

<sup>9</sup> Acrónimo Anglo-saxónico para *"Right Hand Circular Polarization"*

<sup>10</sup> Acrónimo Anglo-saxónico para *"Left Hand Circular Polarization"*

<sup>11</sup> Acrónimo Anglo-saxónico para *"Micro-Electro-Mechanical Systems"*

Em [18] é descrita uma antena baseada na rede fractal *Sierpinski gasket* complementar.

As **antenas com diversidade no diagrama de radiação** podem ser usadas para evitar fontes de ruído ou *jamming*<sup>12</sup> intencional, melhorar a segurança dirigindo os sinais só para os utilizadores pretendidos, servir como um sistema de diversidade comutado, e expandir as capacidades de controlo de feixe de grandes agregados desfasados.

Foram encontradas duas soluções a funcionar no modo *leaky*: em [19] é descrita uma antena totalmente reconfigurável electronicamente usando díodos PIN e em [20] é descrito um agregado multibanda que também pode funcionar como radar.

Em [21] é descrita uma antena empilhada (*stacked*) que, para além de ter o diagrama de radiação reconfigurável, funciona também em duas frequências e com duas polarizações. Em [22] é descrito um agregado *quasi-Yagi* e em [23] é descrita uma antena fractal baseada nas curvas de Hilbert, ambas com dois diagramas de radiação.

Foram também encontradas antenas que podem ser usadas em sistemas MIMO<sup>13</sup>: em [24] e [25] são descritas matrizes de antenas quadradas de dimensão 3×3 e 8×8 elementos respectivamente, e em [26] é descrito um agregado de 3 antenas dobradas; um artigo que explica o funcionamento e fabricação dos MEMS [27] e outro que descreve um novo tipo de dispositivo RF MEMS: são implementadas membranas do plano de terra para controlar a constante dieléctrica efectiva do substrato [28].

### **1.3 Estrutura do relatório**

No capítulo 2 estudam-se três configurações simples que servem para testar um conceito modificado de miniaturização de antenas impressas. As geometrias escolhidas são a quadrada (com dois tipos de alimentação), a triangular e a circular.

No capítulo 3 apresenta-se a análise de antenas de tripla banda, uma quadrada e outra triangular obtidas através do corte da estrutura inicial pela diagonal que contém a alimentação.

---

<sup>12</sup> Transmissão de sinais para perturbar as comunicações através da diminuição da relação sinal-ruído

<sup>13</sup> Acrónimo Anglo-saxónico para “*Multiple Input Multiple Output*”

As antenas são simuladas com interruptores ideais, constituídos por tiras de metal. É analisado em detalhe o protótipo da antena triangular de tripla banda.

No capítulo 4 faz-se a simulação da antena triangular de tripla banda usando interruptores reais. Os interruptores são díodos PIN que são caracterizados experimentalmente antes da sua inserção na antena.

No anexo encontra-se a simulação de uma versão da antena triangular de tripla banda discutida em pormenor neste trabalho, com o plano de terra alterado para dimensões mais reduzidas.



## **2 Configurações de teste**

### **2.1 Objectivos**

Para testar uma técnica de miniaturização, que consiste em cortar a antena impressa pelo eixo de simetria, testam-se quatro configurações simples diferentes: duas antenas quadradas (uma com a alimentação centralizada e outra com a alimentação diagonal), uma triangular e uma circular, e as respectivas versões cortadas. Na abordagem inicial, a intenção do corte da antena foi o de obter uma PIFA<sup>14</sup> [29], mas verificou-se que a antena funcionava bem mesmo sem os tradicionais pinos de ligação ao plano de terra. Uma PIFA é uma antena em que os pinos curto-circuitados no bordo da antena permitem emular um plano de terra capaz de assegurar uma “imagem” da antena para aumentar virtualmente as suas dimensões. Assim, através desta técnica é possível obter frequências de ressonância mais baixas mantendo o tamanho da antena.

Para efeito de teste da estratégia modificada acima referida, começa-se por tratar o caso de antenas com uma única frequência de ressonância. Neste capítulo opta-se pela banda mais baixa TDD do serviço UMTS.

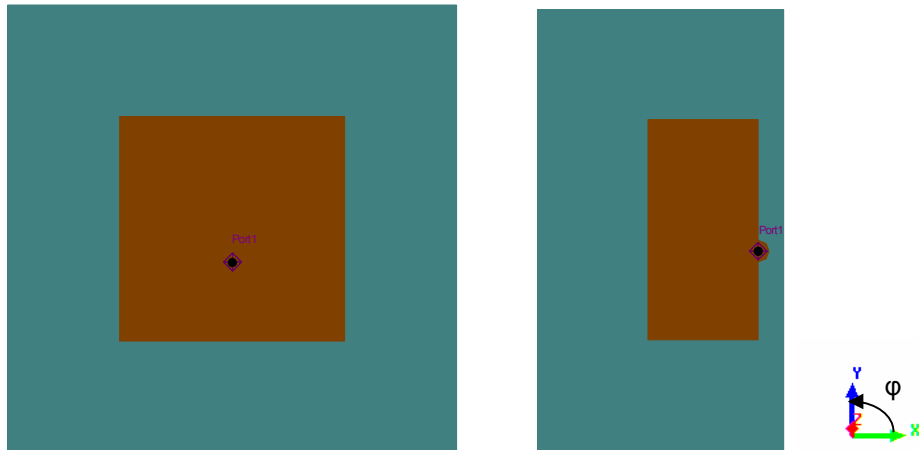
### **2.2 Antena quadrada com alimentação centralizada**

#### **2.2.1 Descrição da antena**

Na Figura 2.1 encontra-se a geometria das antenas usadas nesta secção. Nesta figura pode-se observar dois quadrados e dois rectângulos, em que o menor representa a metalização da face superior da antena e o maior representa o plano de terra. O lado do plano de terra tem o dobro da dimensão do lado antena. O pequeno marcador representa a posição de alimentação.

---

<sup>14</sup> Planar Inverted F antenna



**Figura 2.1. Geometria da antena quadrada com alimentação centralizada e da versão cortada pelo eixo de simetria.**

Nas antenas cortadas, neste trabalho, houve a necessidade de introduzir um semi-círculo junto do ponto de alimentação do cabo coaxial da alimentação; o semi-círculo tem um raio de 2,5 mm, este valor foi escolhido porque é suficientemente grande para que se possa efectuar uma soldadura num possível protótipo futuro. O plano de terra, depois do corte teve de ser prolongado 6 mm para a direita, para poder abranger a área do semi-círculo da alimentação. O plano E corta o plano da antena com um ângulo  $\varphi = 90^\circ$  e o plano H tem um ângulo  $\varphi = 0^\circ$ . O ângulo  $\varphi$  é medido no plano xy, a partir do eixo x, no sentido directo.

Os parâmetros da antena encontram-se na Tabela 2.1. Para a alimentação utilizou-se um cabo coaxial com raio do condutor interno de 0.46 mm e uma impedância de 50  $\Omega$ . O plano terra é na antena original um quadrado de cobre com 103 mm de lado e na antena cortada é um rectângulo com 105,1 mm no lado maior e 58,55 mm no lado menor. O dieléctrico é o Rogers RT/duroid 5880 <sup>TM</sup> ( $\epsilon_r = 2.2$ ) e a metalização é de cobre.

Lado da antena inteira	51,5 mm
Lado maior da antena cortada	52,55 mm
Lado menor da antena cortada	26,275 mm
Centro da antena inteira e do lado que contém a alimentação na antena cortada	(0; 0) mm
Posição da alimentação da antena inteira	(0; -7,55) mm
Posição da alimentação da antena cortada	(0; -5,1) mm

**Tabela 2.1. Dimensões da antena de teste quadrada com alimentação centralizada e da versão cortada.**

## 2.2.2 Simulação da antena

As simulações das antenas são feitas no programa Ansoft Designer, que usa o método dos momentos. Na Figura 2.2 e na Tabela 2.2 encontra-se a comparação entre a antena cortada e a inteira em termos de largura de banda. O rectângulo azul representa a especificação da banda mais baixa do serviço UMTS-TDD.

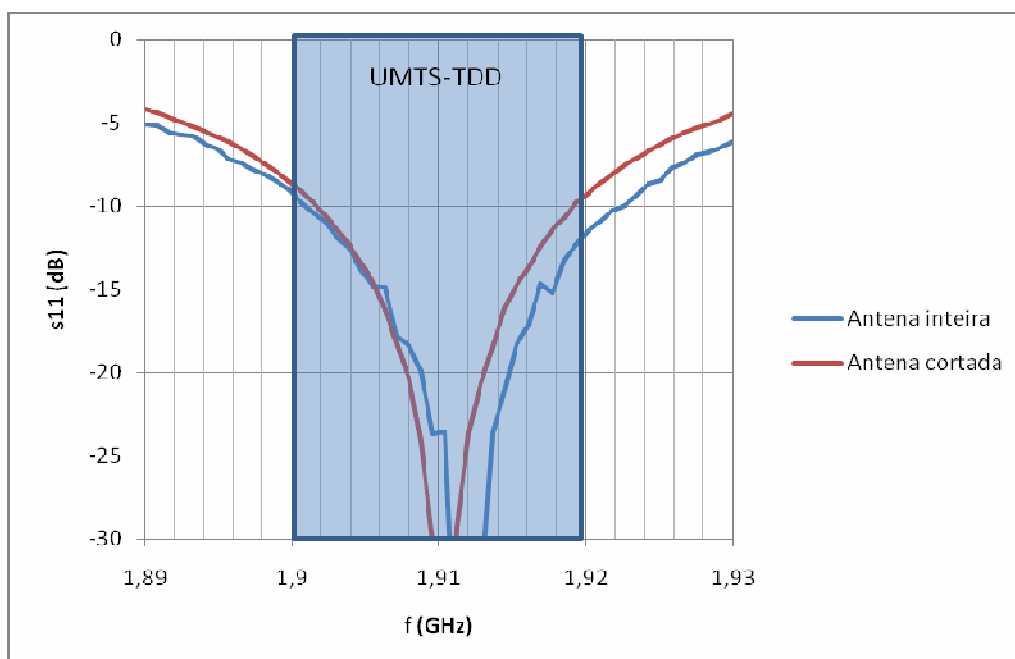


Figura 2.2. Perdas de retorno da antena de teste quadrada e da versão cortada.

	Bandas de frequência (MHz)	$f_c$ (MHz)	Largura de banda	
			(MHz)	(%)
UMTS – TDD (banda inferior)	1900-1920	1910	20	1,05
Antena inteira	1901 – 1922	1911,5	21	1,1
Antena cortada	1902 – 1919	1910,5	17	0,89

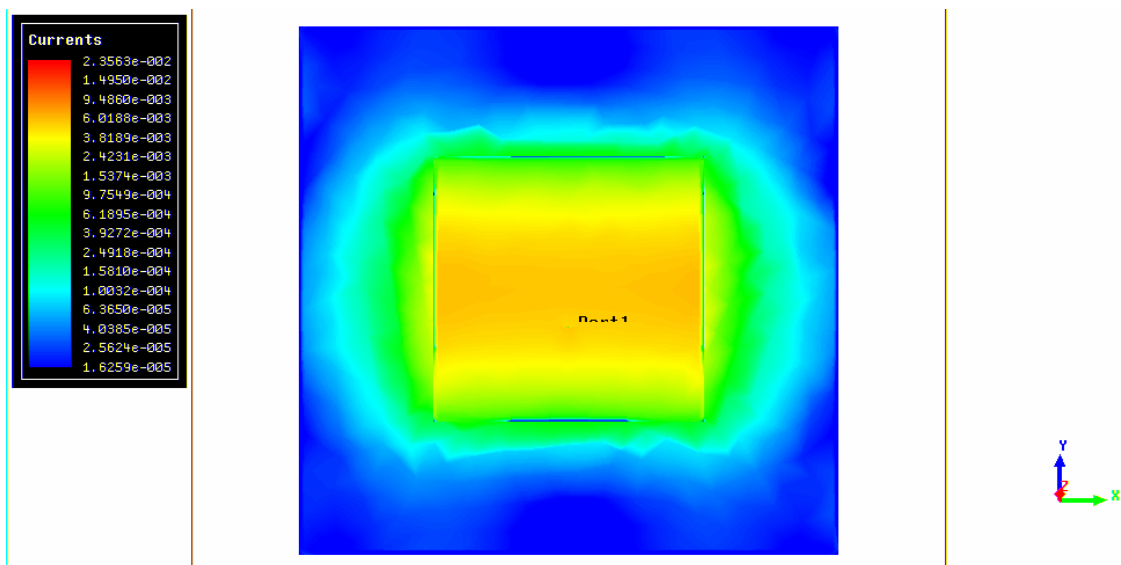
Tabela 2.2. Comparação entre a banda pretendida e as alcançadas pela antena de teste quadrada com alimentação centralizada e pela versão cortada.

Pela Figura 2.2 e pela Tabela 2.2 podemos concluir que houve uma pequena diminuição da banda útil ao cortar a antena mas em contrapartida tem-se uma grande redução de tamanho da antena.

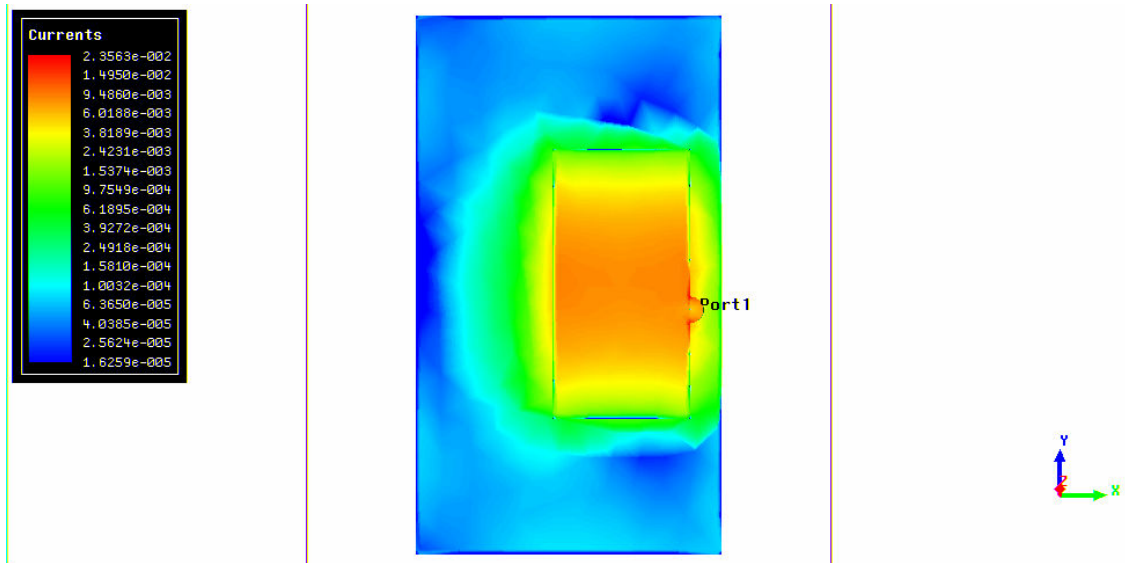
Na Figura 2.3 e na Figura 2.4 encontram-se as distribuições da intensidade da corrente superficial nas duas antenas projectadas. A intensidade da corrente representada nas figuras desta dissertação é o valor instantâneo da amplitude no instante de intensidade máxima na superfície da antena, numa escala logarítmica. A sua análise permite verificar se o comportamento da antena está de acordo com o pretendido e diagnosticar possíveis problemas.

Pode-se verificar que a distribuição é semelhante, tendo maior intensidade nos lados paralelos ao eixo de simetria no caso da antena inteira e no lado maior, oposto ao que contém a alimentação na antena cortada. A intensidade da corrente é maior na antena cortada porque tendo a mesma alimentação, toda a energia é concentrada em metade da área.

A distribuição da corrente na antena devia ser simétrica, mas devido ao método de simulação usado pelo programa usado, surge uma ligeira diferença. O simulador divide a estrutura em pequenos triângulos e realiza os cálculos da corrente em cada um desses triângulos. A simetria é perdida porque a distribuição automática dos triângulos feita pelo programa não é simétrica. Esta perda de simetria pode ter efeito em parâmetros como o  $s_{11}$ .



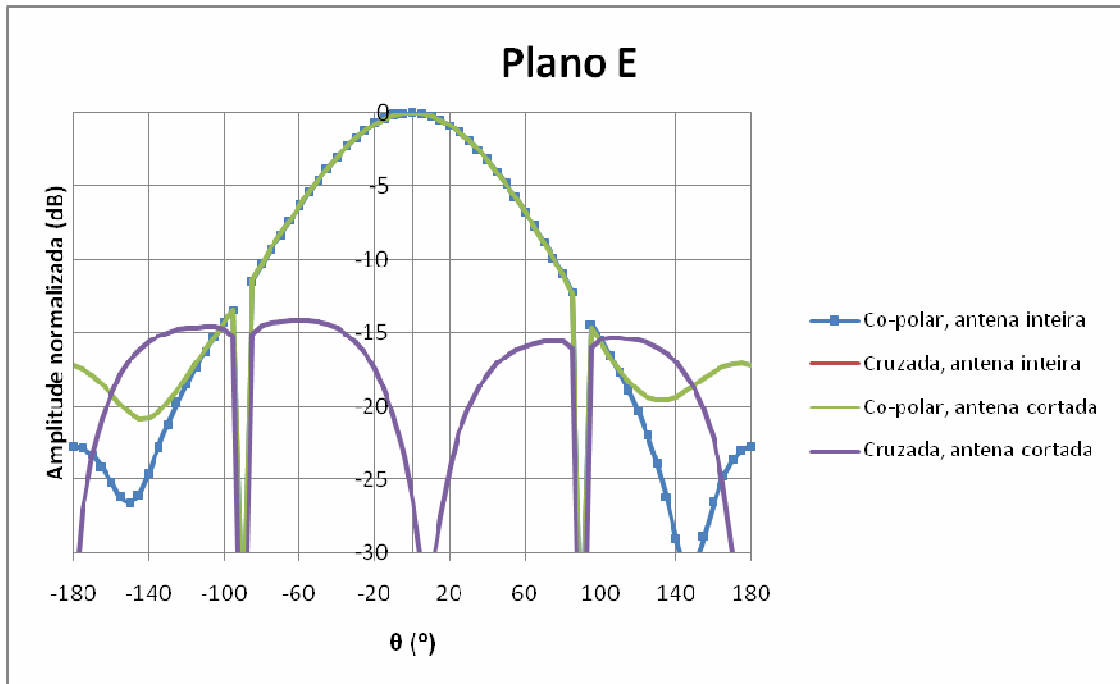
**Figura 2.3. Intensidade da corrente na antena de teste quadrada com alimentação centralizada para 1.911 GHz.**



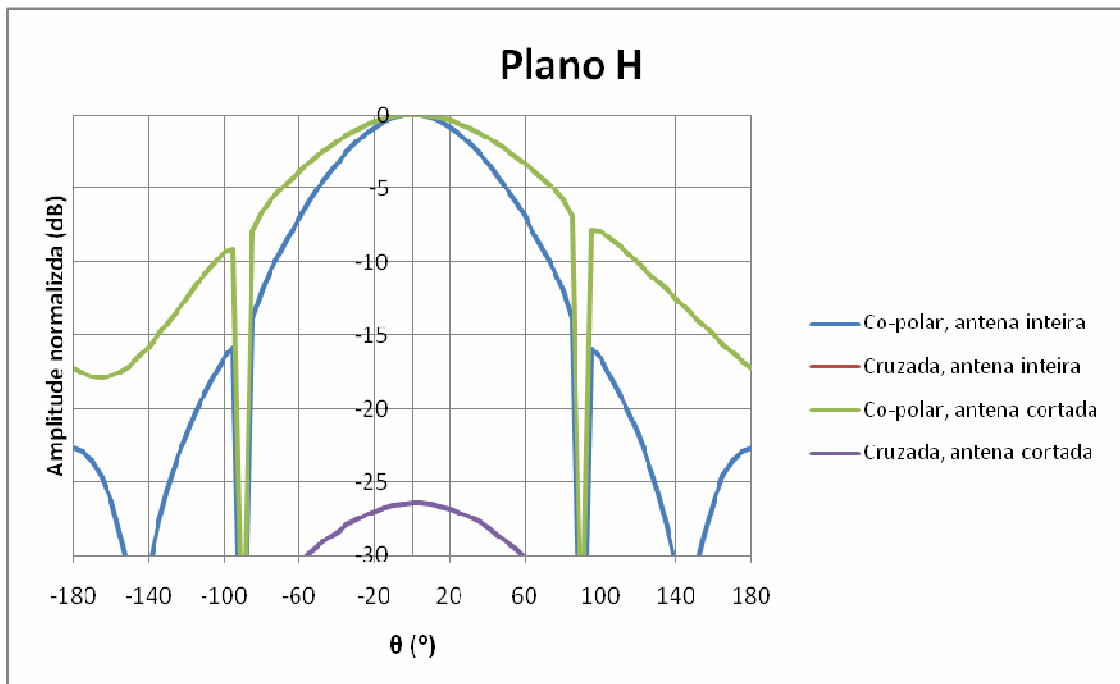
**Figura 2.4. Intensidade da corrente na antena de teste cortada para 1.91 GHz.**

Os diagramas de radiação para as duas antenas, nos planos E e H, encontram-se na Figura 2.5 e na Figura 2.6.

No plano E a largura de feixe a -3 dB corresponde a cerca de 75° nas duas antenas. A polarização cruzada atinge um máximo de cerca de -43 dB e -14dB abaixo da co-polarização na antena inteira e cortada, respectivamente. No plano H a largura de feixe é de cerca de 80° na antena inteira e 110° na antena cortada. Este aumento da largura de feixe resulta naturalmente da redução da largura da antena neste plano. Neste caso a polarização cruzada atinge um máximo de -34 dB abaixo da co-polarização na antena inteira e -26 dB na antena cortada. Nota-se que o isolamento entre as duas componentes da polarização diminui ao cortar a antena porque ela perde a sua simetria que permitia o cancelamento da polarização cruzada, mas a polarização em geral não é muito importante nos terminais móveis.



**Figura 2.5.** Diagramas de radiação no plano E para a antena de teste quadrada com alimentação centralizada e para a versão cortada.



**Figura 2.6.** Diagramas de radiação no plano H para a antena de teste quadrada com alimentação centralizada e para a versão cortada.

## 2.3 Antena quadrada com alimentação localizada na sua diagonal

### 2.3.1 Descrição da antena

Na Figura 2.7 encontra-se a geometria das antenas usadas nesta secção. Ao contrário do caso anterior, o corte passa a ser feito segundo a diagonal. Utiliza-se o mesmo código de cores para representar a metalização da face superior patch e o plano de terra. O lado do plano de terra tem o dobro da dimensão do lado antena. O pequeno marcador representa a posição de alimentação.

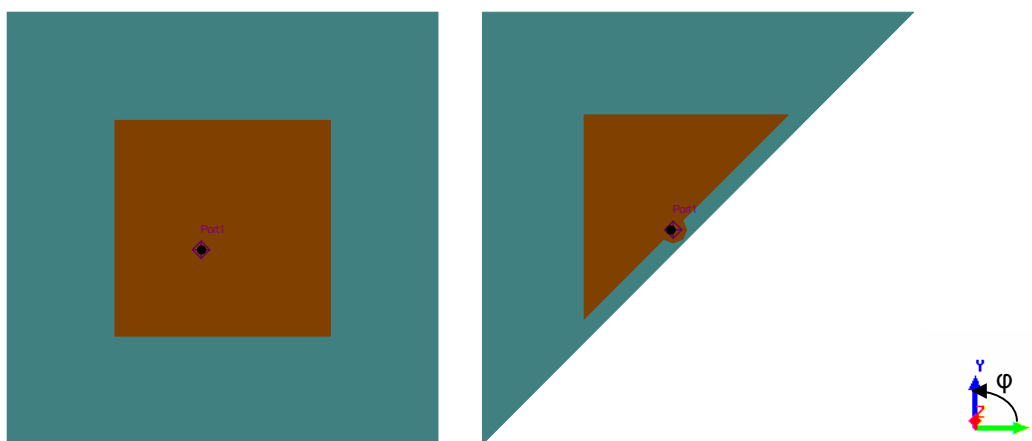


Figura 2.7. Geometria da antena quadrada com alimentação diagonal e da versão cortada pelo eixo de simetria.

O plano de terra, depois do corte teve de ser prolongado 6 mm em cada cateto, para poder abranger a área do semi-círculo da alimentação. O plano E corta o plano da antena com um ângulo  $\varphi = 45^\circ$  e o plano H tem um ângulo  $\varphi = 135^\circ$ . Isto acontece devido à localização da alimentação ao longo da diagonal.

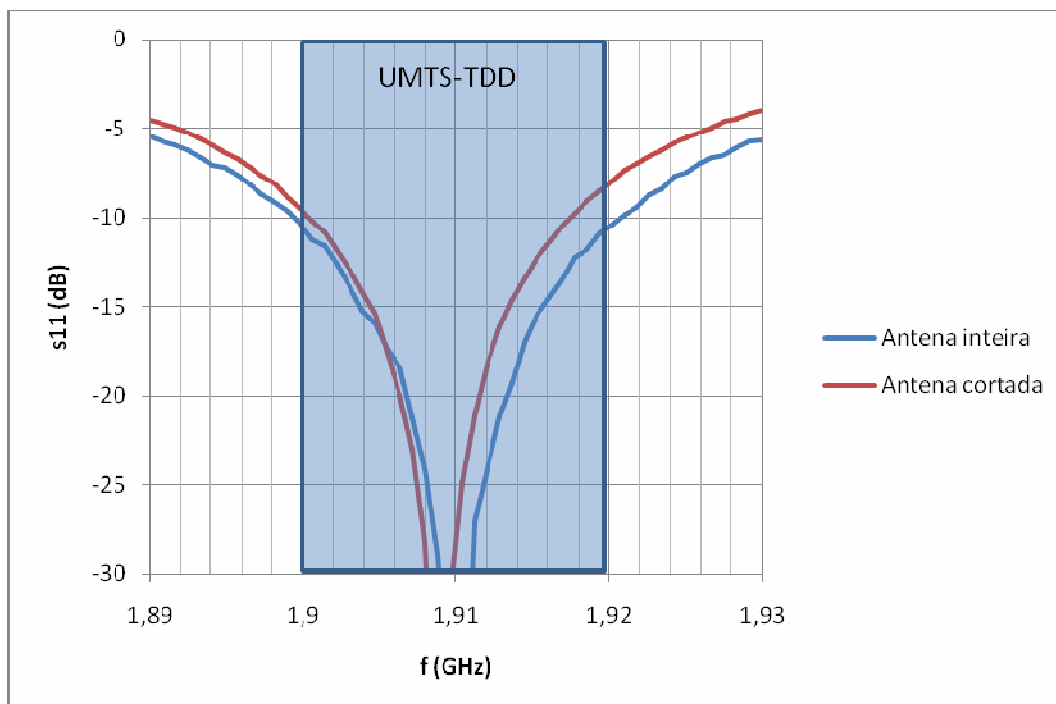
Os parâmetros da antena encontram-se na Tabela 2.3 e a alimentação é feita por um cabo coaxial com raio do condutor interno de 0.46 mm e uma impedância de 50  $\Omega$ . O plano terra é na antena original, tal como na secção anterior, um quadrado de cobre com 103,0 mm de lado. Note-se que difere da antena anterior pelo facto de o ponto de alimentação estar colocado sobre a diagonal. A antena cortada é um triângulo com 109,558 mm nos dois catetos. O dieléctrico é o Rogers RT/duroid 5880 <sup>TM</sup> ( $\epsilon_r = 2.2$ ) e a antena impressa é de cobre.

Lados da antena inteira	51,5 mm
Catetos da antena cortada	51,779 mm
Centro da antena inteira e da hipotenusa da antena cortada	(0; 0) mm
Posição da alimentação da antena inteira	(-5,2 ; -5,2) mm
Posição da alimentação da antena cortada	(-3,38; -3,38) mm

**Tabela 2.3. Dimensões da antena de teste quadrada com alimentação diagonal e da versão cortada.**

### 2.3.2 Simulação da antena

Na Figura 2.8 e na Tabela 2.4 encontra-se a comparação entre a antena cortada e a inteira em termos de largura de banda.



**Figura 2.8. Perdas de retorno da antena de teste quadrada com alimentação diagonal e da versão cortada.**

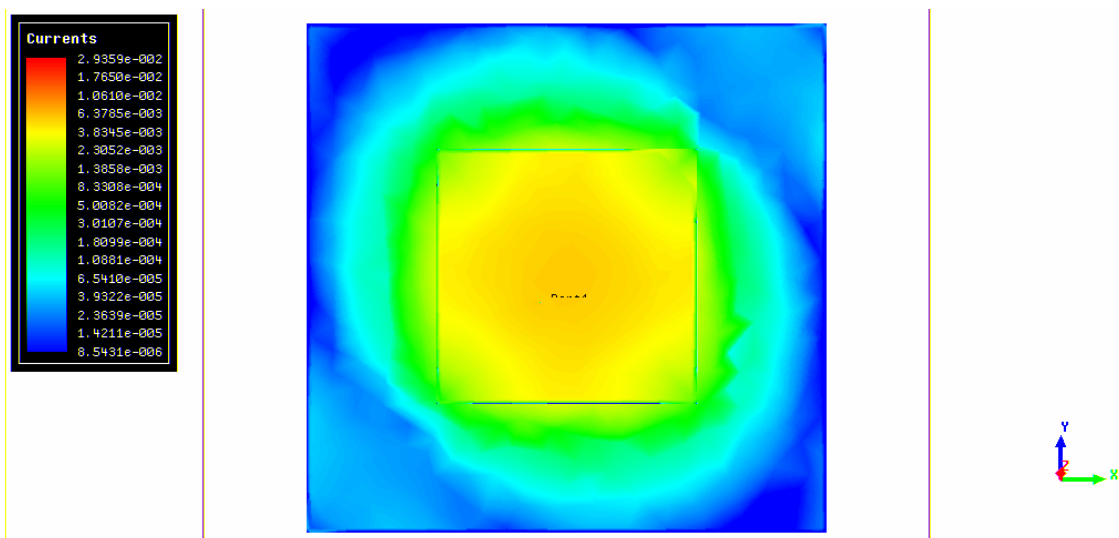


	Bandas de frequência (MHz)	f <sub>c</sub> (MHz)	Largura de banda	
			(MHz)	(%)
UMTS – TDD (banda inferior)	1900 – 1920	1910	20	1,05
Antena inteira	1899 – 1921	1910	22	1,15
Antena cortada	1900 – 1917	1908,5	17	0,89

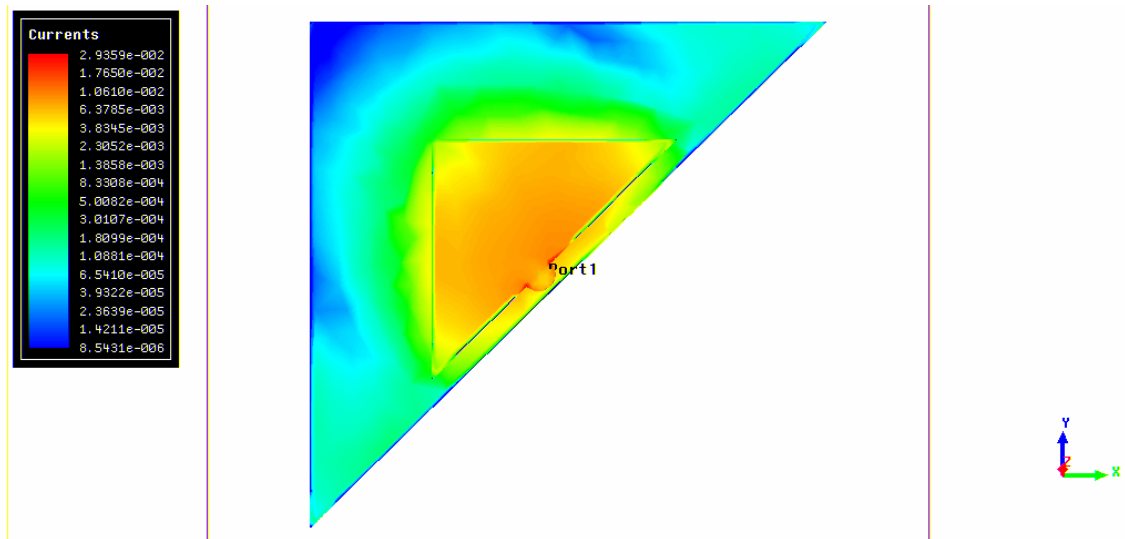
**Tabela 2.4. Comparação entre a banda pretendida e as alcançadas pela antena de teste quadrada com alimentação diagonal e pela versão cortada.**

Pela Figura 2.8 e pela Tabela 2.4 podemos concluir que se repete o mesmo comportamento da diminuição da largura de banda verificada na secção anterior, apenas com a diferença de mais 1 MHz na banda da antena inteira.

Na Figura 2.9 e na Figura 2.10 encontram-se as distribuições da intensidade da corrente nas duas antenas projectadas. Pode-se verificar que a distribuição na antena quadrada apresenta a esperada simetria em relação à diagonal que contém a alimentação.



**Figura 2.9. Intensidade da corrente na antena de teste quadrada com alimentação diagonal para 1,91 GHz.**



**Figura 2.10. Intensidade da corrente na antena de teste cortada para 1.909 GHz.**

Os diagramas de radiação para as duas antenas, nos planos E e H, encontram-se na Figura 2.11 e na Figura 2.12.

No plano E a largura de feixe a -3 dB corresponde a cerca de 70° nas duas antenas. A polarização cruzada atinge um máximo de cerca de -21 dB e -17 dB abaixo da componente co-polar na antena inteira e cortada, respectivamente. No plano H a largura de feixe é de cerca de 90° na antena inteira e 120° na antena cortada. A perda de simetria do diagrama de radiação neste plano tem naturalmente origem na quebra de simetria da antena cortada. Neste caso a polarização cruzada atinge um máximo de -21 dB abaixo da co-polarização na antena inteira e -29 dB na antena cortada.

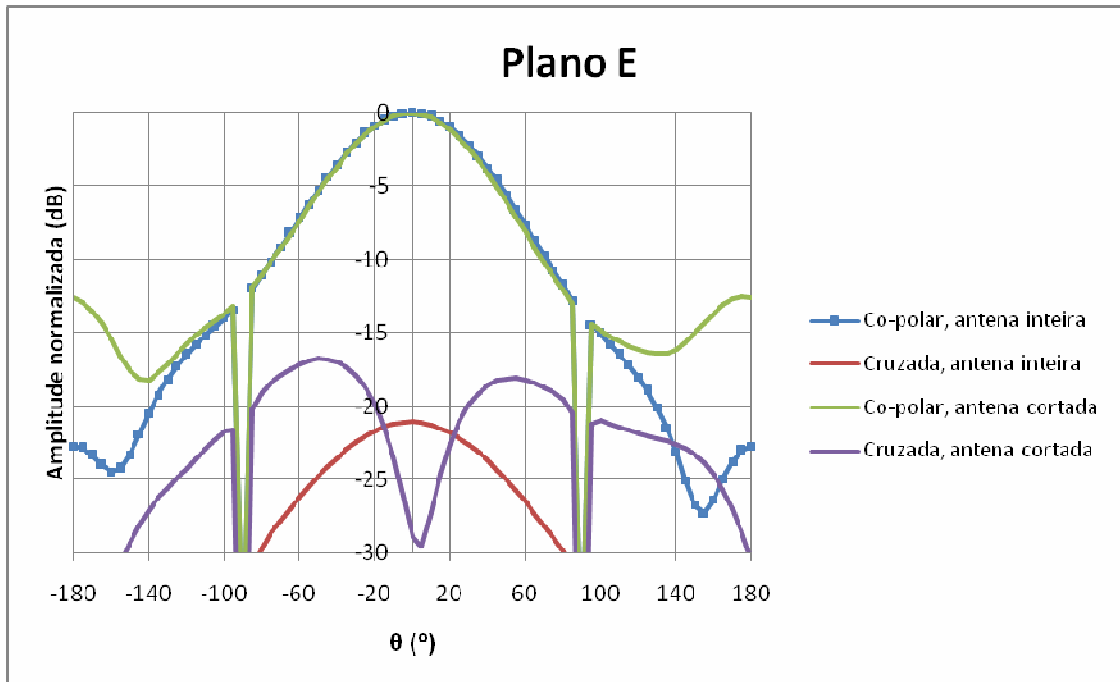


Figura 2.11. Diagramas de radiação no plano E para a antena de teste quadrada com alimentação diagonal e para a versão cortada.

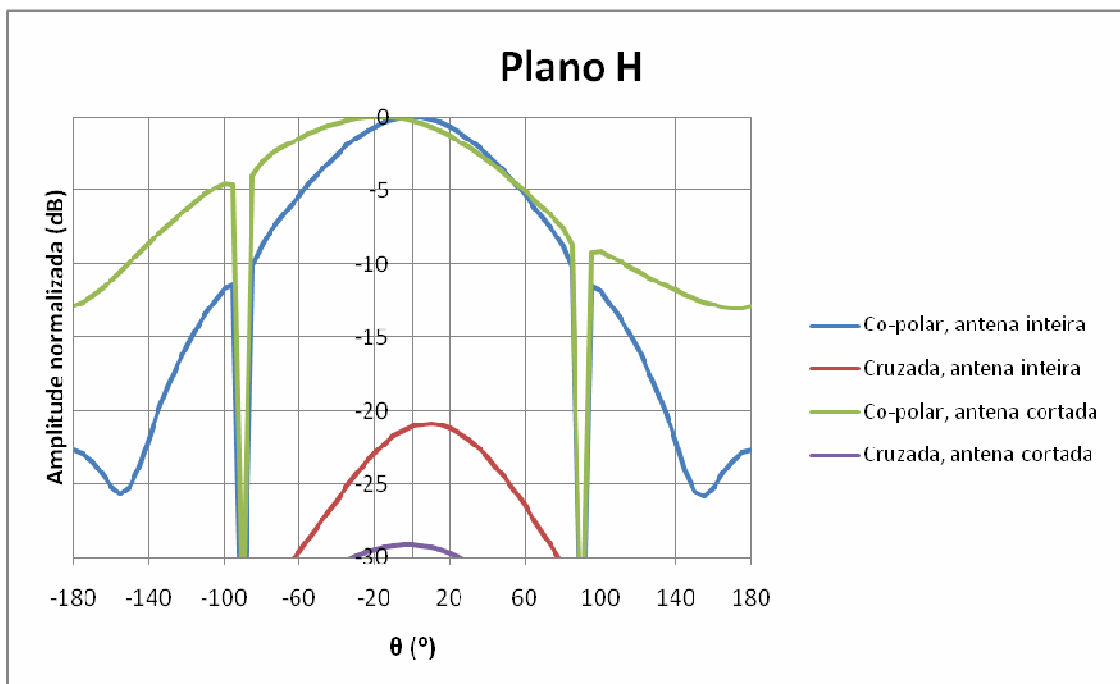
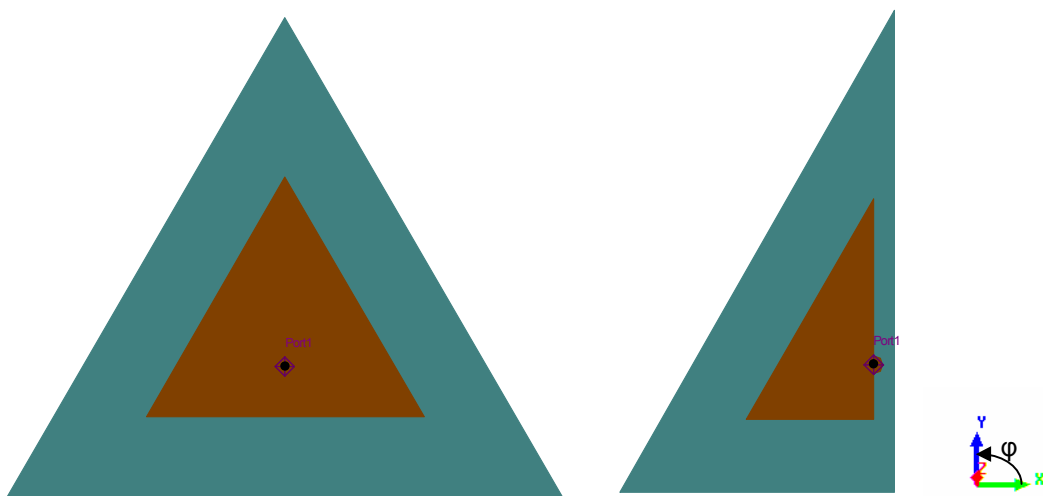


Figura 2.12. Diagramas de radiação no plano H para a antena de teste quadrada com alimentação diagonal e para a versão cortada.

## 2.4 Antena triangular

### 2.4.1 Descrição da antena

A Figura 2.13 mostra a geometria das duas antenas a estudar nesta secção. Tal como na secção anterior, e em todas as representações gráficas das antenas neste trabalho, a forma exterior representa o plano de terra, a interior representa a antena e o pequeno marcador representa a posição de alimentação. O lado do plano de terra tem o dobro da dimensão do lado antena.



**Figura 2.13. Geometria da antena triangular inteira e da versão cortada pelo eixo de simetria**

O plano E corta o plano da antena com um ângulo  $\varphi = 90^\circ$  e o plano H tem um ângulo  $\varphi = 0^\circ$  no caso da antena inteira. No caso da antena cortada há uma alteração na direcção da polarização, neste caso o plano E tem um ângulo  $\varphi = 60^\circ$  e o plano H tem um ângulo  $\varphi = 150^\circ$ .

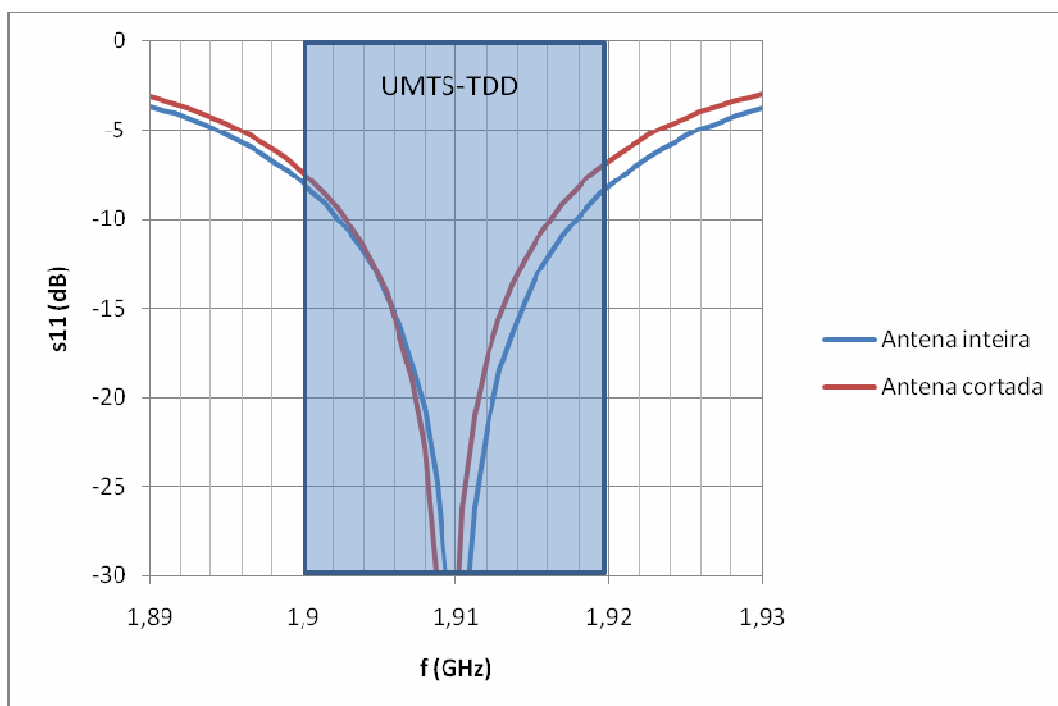
Os parâmetros da antena encontram-se na Tabela 2.5 e para se efectuar a alimentação no simulador utilizou-se um cabo coaxial com raio do condutor interno de 0.46 mm e uma impedância de 50  $\Omega$ . O plano terra é na antena inteira um triângulo equilátero de cobre com 137.6 mm de lado e na antena cortada é um triângulo rectângulo com 136.0112 mm no cateto maior e 77.6 mm no cateto menor. O dieléctrico é o Rogers RT/duroid 5880 <sup>TM</sup> ( $\epsilon_r = 2.2$ ) e a antena impressa é de cobre.

Lado da antena inteira	68,8 mm
Cateto maior da antena cortada	62,0056 mm
Cateto menor da antena cortada	35,8 mm
Centro da antena inteira e do lado que contém a alimentação na antena cortada	(0; 0) mm
Posição da alimentação da antena inteira	(0; -7,18) mm
Posição da alimentação da antena cortada	(0; -5,35) mm

**Tabela 2.5. Dimensões da antena de teste triangular inteira e pela versão cortada.**

## 2.4.2 Simulação da antena

Na Figura 2.14 e na Tabela 2.6 encontra-se a comparação entre a antena cortada e a inteira em termos de largura de banda.



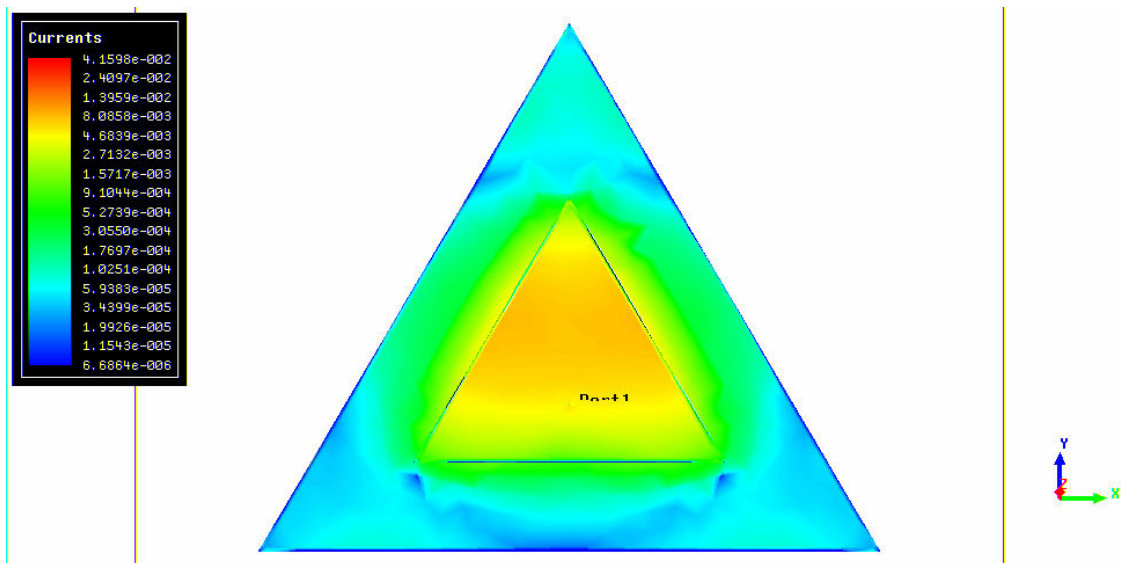
**Figura 2.14. Perdas de retorno para a antena de teste triangular inteira e para a versão cortada.**

	Bandas de frequência (MHz)	f <sub>c</sub> (MHz)	Largura de banda	
			(MHz)	(%)
UMTS – TDD (banda inferior)	1900-1920	1910	20	1,05
Antena inteira	1902 – 1917	1909,5	15	0,79
Antena cortada	1903 – 1916	1909,5	13	0,68

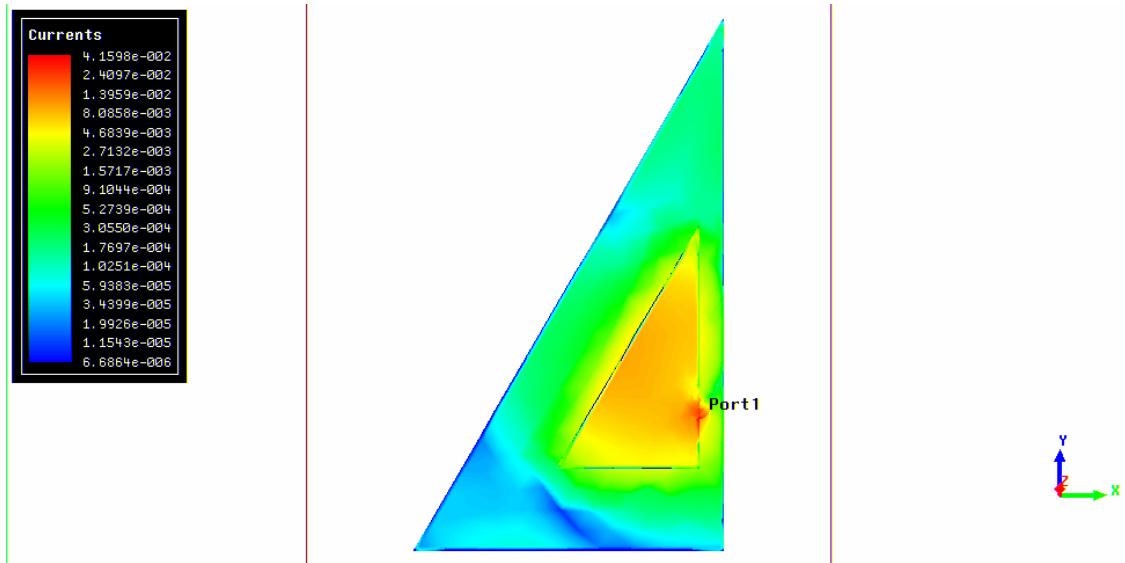
**Tabela 2.6. Comparação entre a banda pretendida e as alcançadas pela antena de teste triangular inteira e pela versão cortada.**

Observa-se que acontece o mesmo fenómeno de diminuição da largura de banda verificada nas secções anteriores, mas neste caso as bandas são mais estreitas.

Na Figura 2.15 e na Figura 2.16 encontram-se as distribuições da intensidade da corrente nas duas antenas projectadas. Pode-se verificar o mesmo comportamento da secção anterior, em que há semelhanças entre as distribuições da intensidade da corrente, apenas com um deslocamento em amplitude: no caso da antena cortada há uma menor amplitude.



**Figura 2.15. Intensidade da corrente na antena de teste triangular inteira para 1.91 GHz.**



**Figura 2.16.** Intensidade da corrente na antena de teste triangular cortada para 1.91 GHz.

Os diagramas de radiação para as duas antenas, nos planos E e H, encontram-se na Figura 2.17 e na Figura 2.18.

No plano E a largura de feixe a -3 dB corresponde a cerca de 75° na antena inteira e 80° na cortada. A polarização cruzada atinge um máximo de cerca de -39 dB e -11 dB abaixo da co-polarização na antena inteira e cortada, respectivamente. No plano H a largura de feixe é de cerca de 90° na antena inteira e 110° na antena cortada. Neste caso a polarização cruzada atinge um máximo de -14 dB abaixo da co-polarização na antena inteira e -19 dB na antena cortada. Neste caso também se nota o mesmo comportamento de redução do isolamento das componentes ortogonais da polarização observada no capítulo 3, mas neste caso foi só no plano E.

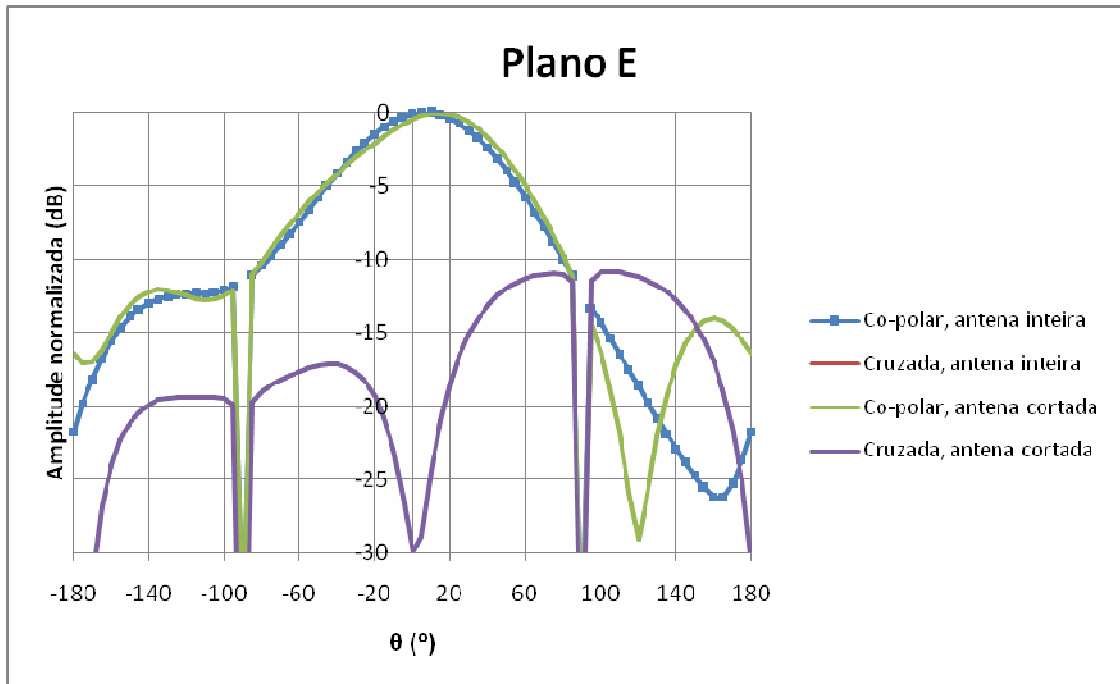


Figura 2.17. Diagramas de radiação no plano E para a antena de teste triangular inteira e para a versão cortada.

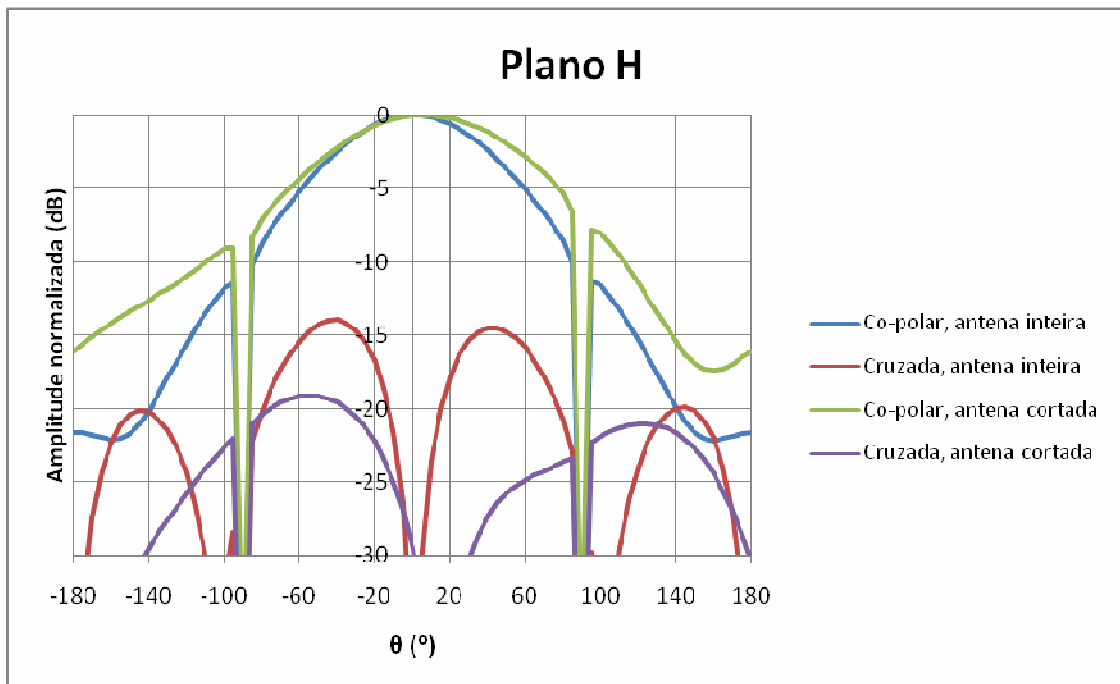


Figura 2.18. Diagramas de radiação no plano H para a antena de teste triangular inteira e para a versão cortada.



## 2.5 Antena circular

### 2.5.1 Descrição da antena

A Figura 2.19 mostra a geometria das duas antenas a estudar nesta secção. O raio do plano de terra tem o dobro da dimensão do raio antena.

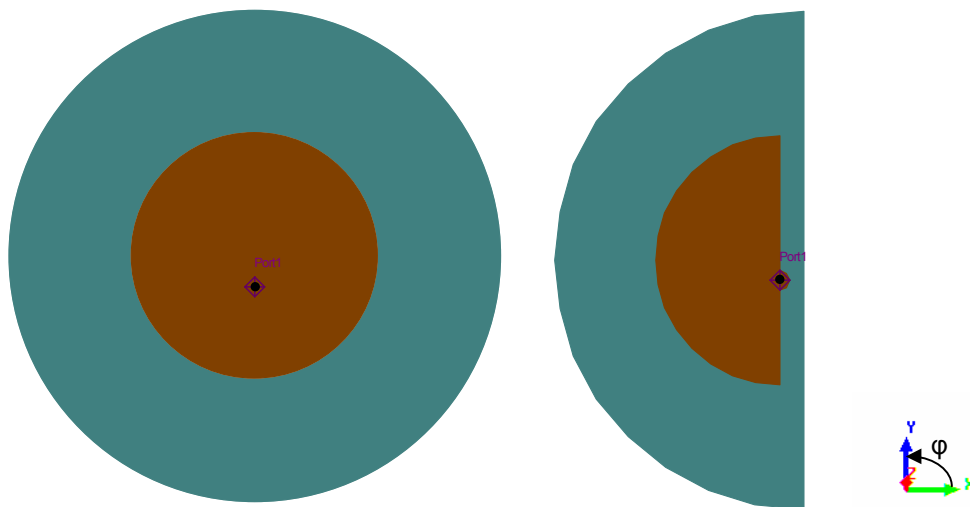


Figura 2.19. Geometria da antena circular e da versão cortada.

O plano E corta o plano da antena com um ângulo  $\phi = 90^\circ$  e o plano H tem um ângulo  $\phi = 0^\circ$  nas duas antenas.

Os parâmetros da antena encontram-se na Tabela 2.7. Para se efectuar a alimentação no simulador utilizou-se um cabo coaxial com raio do condutor interno de 0.46 mm e uma impedância de 50  $\Omega$ . O plano terra é na antena inteira círculo de cobre com 63.5 mm de raio e na antena cortada é um semi-círculo com 62.68 mm de raio. O dieléctrico é o Rogers RT/duroid 5880 <sup>TM</sup> ( $\epsilon_r = 2.2$ ) e a antena impressa é de cobre.

Raio da antena inteira	31,75 mm
Raio da antena cortada	31,34 mm
Centro da antena inteira e do lado que contém a alimentação na antena cortada	(0; 0) mm
Posição da alimentação da antena inteira	(0; -7,85) mm
Posição da alimentação da antena cortada	(0; -5,04) mm

Tabela 2.7. Dimensões da antena circular e da versão cortada.

## 2.5.2 Simulação da antena

Na Figura 2.20 e na Tabela 2.8 encontra-se a comparação entre a antena cortada e a inteira em termos de largura de banda.

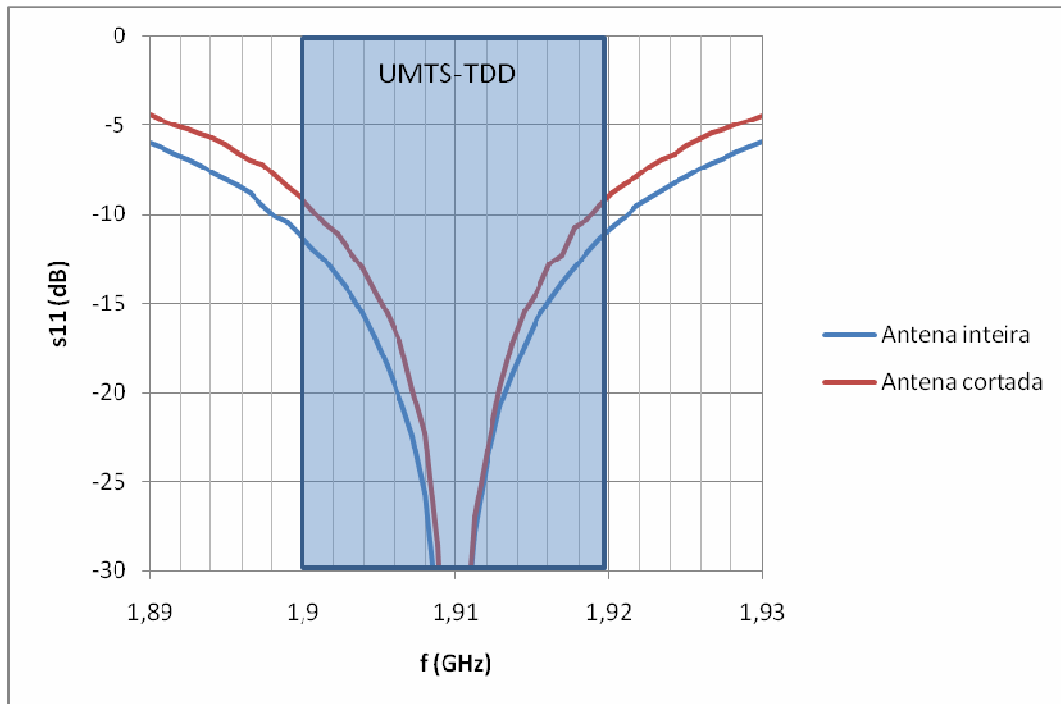


Figura 2.20. Comparação das perdas de retorno da antena circular e da versão cortada.

	Bandas de frequência (MHz)	$f_c$ (MHz)	Largura de banda	
			(MHz)	(%)
UMTS – TDD (banda inferior)	1900-1920	1910	20	1,05
Antena inteira	1898 – 1921	1909,5	23	1,20
Antena cortada	1901 – 1919	1910	18	0,94

Tabela 2.8. Comparação entre a banda pretendida e as alcançadas pela antena circular e pela versão cortada.

Neste caso, apesar de haver uma diminuição da largura de banda na antena cortada, esta apresenta maior largura do que as duas versões cortadas estudadas nas duas secções anteriores.

Na Figura 2.21 e na Figura 2.22 encontram-se as distribuições da intensidade da corrente nas duas antenas projectadas. Verifica-se o mesmo fenómeno das secções anteriores, em que há semelhanças entre as distribuições da intensidade da corrente, apenas com um deslocamento em amplitude: no caso da antena cortada há uma menor amplitude.

Neste caso é evidente a discretização usada pelo programa para simular a estrutura. O programa, para efeitos de simulação transforma os círculos em octógonos, independentemente do grau de discretização usado. Ao alterar o grau de discretização só se altera o tamanho dos triângulos que se o simulador constrói no interior. Isto faz com que os resultados sejam ligeiramente diferentes dos que seriam encontrados com a construção do protótipo.

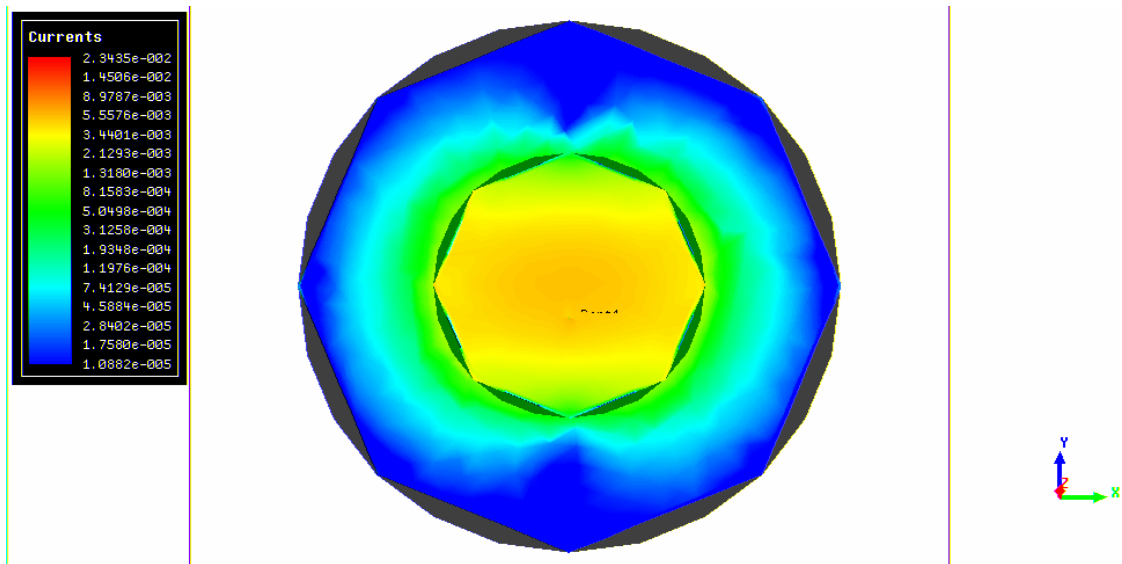
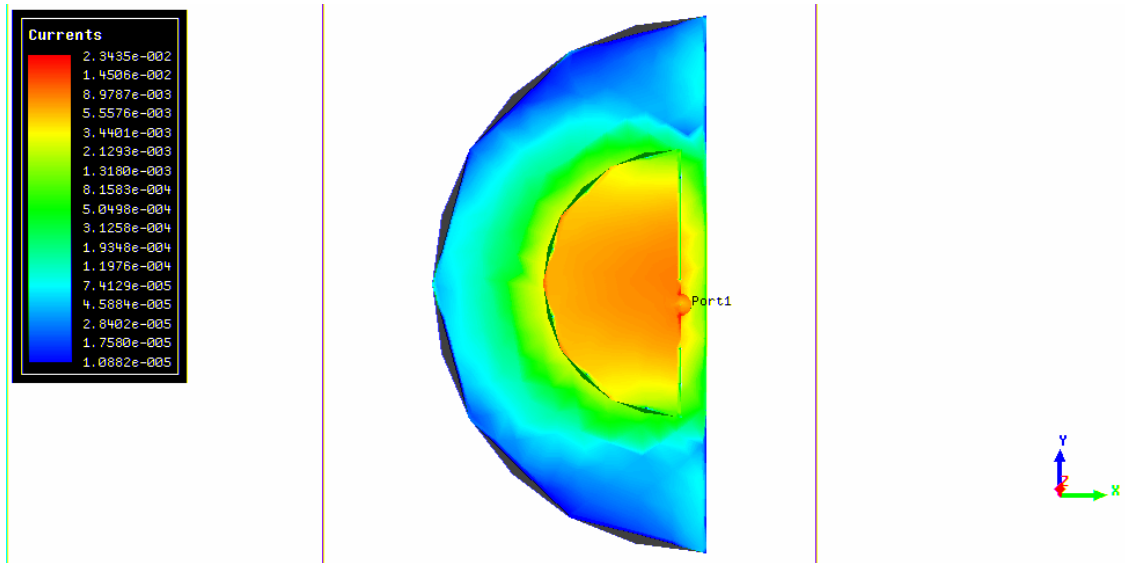


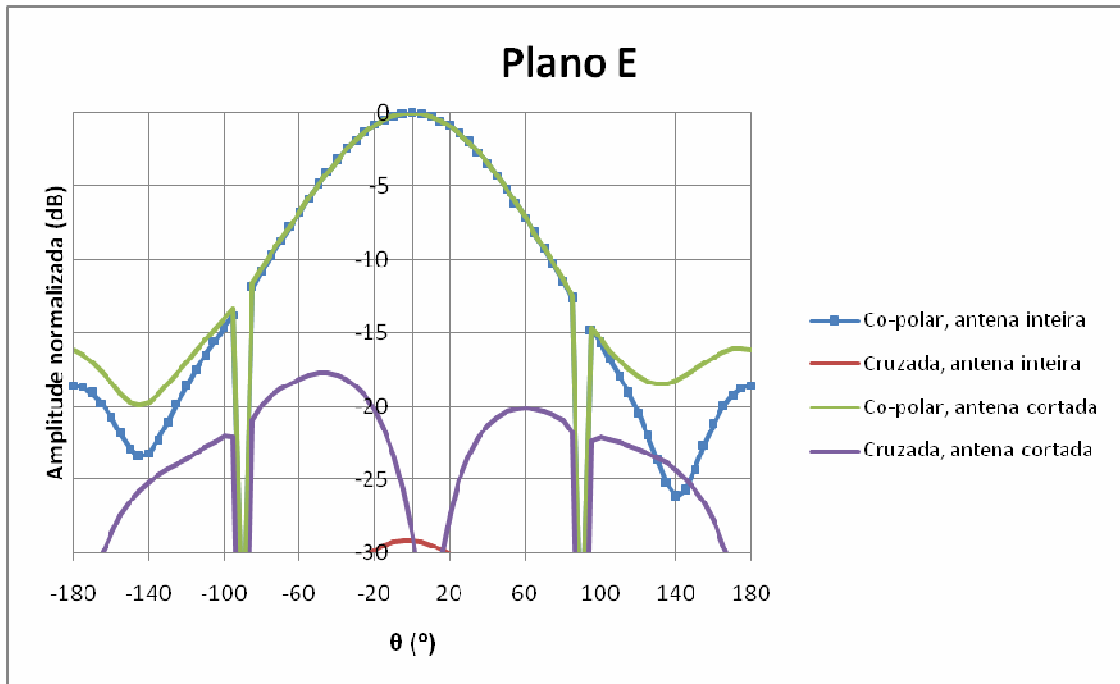
Figura 2.21. Distribuição da intensidade da corrente na antena circular inteira a 1.91 GHz.



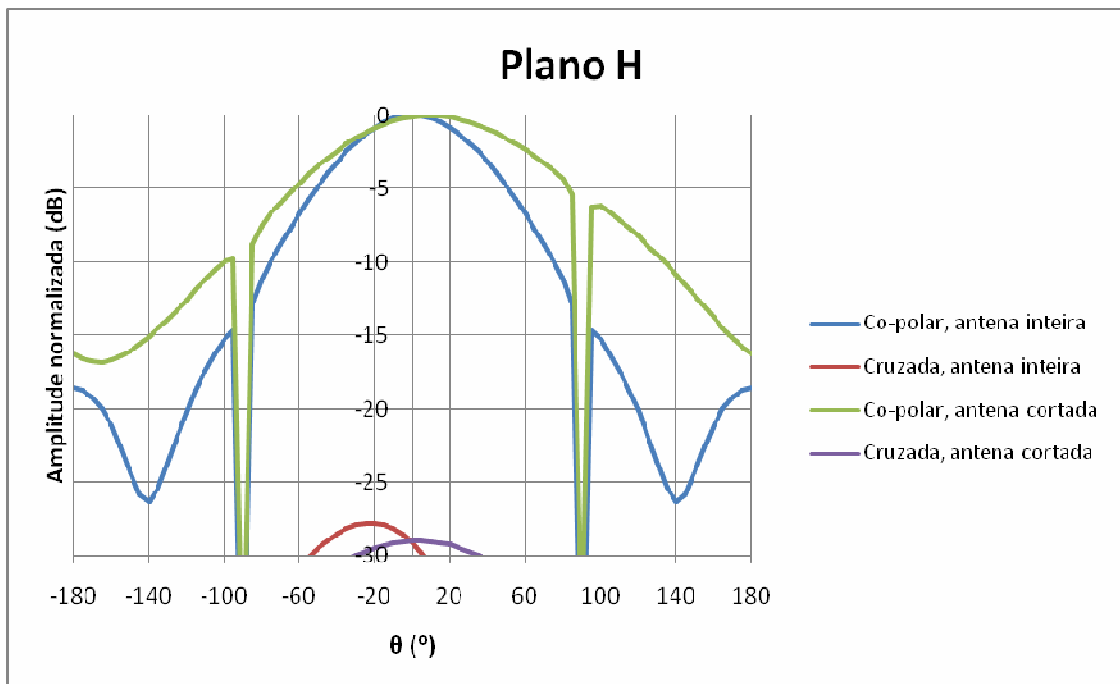
**Figura 2.22. Distribuição da intensidade da corrente na antena cortada a 1.91 GHz.**

Os diagramas de radiação para as duas antenas, nos planos E e H, encontram-se na Figura 2.23 e na Figura 2.24.

No plano E a largura de feixe a -3 dB corresponde a cerca de 80° nas duas antenas. A polarização cruzada atinge um máximo de cerca de -43 dB e -14 dB abaixo da co-polarização na antena inteira e cortada, respectivamente. No plano H a largura de feixe é de cerca de 80° na antena inteira e 110° na antena cortada. Neste caso a polarização cruzada atinge um máximo de -34 dB abaixo da co-polarização na antena inteira e -26 dB na antena cortada. Existe redução do isolamento das componentes ortogonais da polarização nos dois planos no caso da antena cortada.



**Figura 2.23. Diagramas de radiação da antena circular e da versão cortada no plano E a 1.9096 GHz.**



**Figura 2.24. Diagramas de radiação da antena circular e da versão cortada no plano H a 1.9096 GHz.**

## **2.6 Conclusões**

O conceito de corte pela diagonal sem utilização de pinos de curto-circuito é válido para as quatro configurações testadas. Foi possível uma redução de 47.9 %, 49.5%, 45.8% e 51.3% da área nas configurações quadrada com alimentação centralizada, quadrada com alimentação diagonal, triangular e circular, respectivamente, mantendo-se praticamente inalterado o valor da frequência de ressonância. Mas esta redução de tamanho tem um custo: por um lado a redução do isolamento entre as componentes ortogonais da polarização e por outro lado uma redução da directividade num dos planos, o que reduz o ganho da antena.

### 3 Antenas de tripla banda com interruptores ideais

#### 3.1 Objectivos

As antenas projectadas neste capítulo têm como objectivo verificar a possibilidade de conjugar a estratégia apresentada anteriormente com a possibilidade de funcionamento em três bandas comutáveis.

Os resultados das antenas do capítulo anterior, em termos de dimensões de antenas e larguras de bandas encontram-se sumarizados na Tabela 3.1. Nesta tabela observa-se que a antena quadrada com alimentação diagonal é a opção mais equilibrada em termos de área e largura de banda e por isso será a base para as antenas deste capítulo. Seguindo, numa primeira fase, o conceito de antena enquadrada por elementos parasitas, pretende-se obter uma antena com três bandas de funcionamento comutáveis.

	<i>Inteira</i>		<i>Cortada</i>	
	Área (mm <sup>2</sup> )	Largura de banda (MHz)	Área (mm <sup>2</sup> )	Largura de banda (MHz)
<b>Quadrada com alimentação centralizada</b>	2652,25	21	1380,75	17
<b>Quadrada com alimentação diagonal</b>	2652,25	22	1340,53	17
<b>Triangular</b>	1706,70	15	693,13	13
<b>Circular</b>	3166,92	23	1542,83	18

**Tabela 3.1. Comparação entre as bandas e tamanhos das antenas do capítulo anterior.**

O conceito de antena rodeada por elementos parasitas foi adoptado porque possibilita a obtenção das bandas através do uso de um número reduzido de variáveis, nomeadamente o tamanho da sub-antena<sup>15</sup> e a posição relativa da alimentação. A utilização destas variáveis está descrita na secção 3.2.2.

Numa segunda fase, de modo a obter um tamanho mais reduzido, corta-se a antena pela diagonal, obtendo-se como resultado uma antena triangular com propriedades muito próximas da

---

<sup>15</sup> Nesta dissertação designa-se sub-antena à parte da antena que se encontra activa (ligada à alimentação por um caminho metálico) em cada configuração.

antena quadrada, com cerca de metade do tamanho original e que é sintonizável da mesma forma que a versão quadrada.

## 3.2 Antena quadrada com interruptores ideais

### 3.2.1 Descrição da antena

Na sequência das simulações da antena quadrada com alimentação diagonal da secção 2.3. introduziram-se os elementos parasitas para obter o funcionamento em três bandas.

Posteriormente foi efectuado o corte na diagonal da antena, para se obter uma antena triangular. A antena quadrada de tripla banda encontra-se na Figura 3.1. De modo a obter um funcionamento em três bandas, optou-se por construir uma antena com dois elementos parasitas para que o funcionamento fosse o equivalente a três antenas com dimensões diferentes, e todas com a alimentação na sua posição óptima, ao longo da diagonal das sub-antenas. Os interruptores são modelados como tiras de metal de 1 mm de largura.

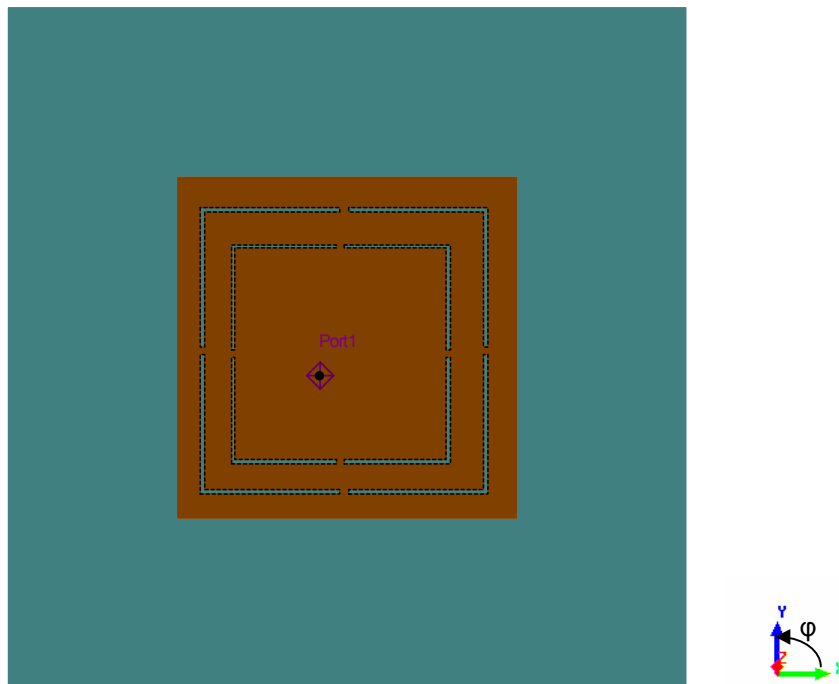
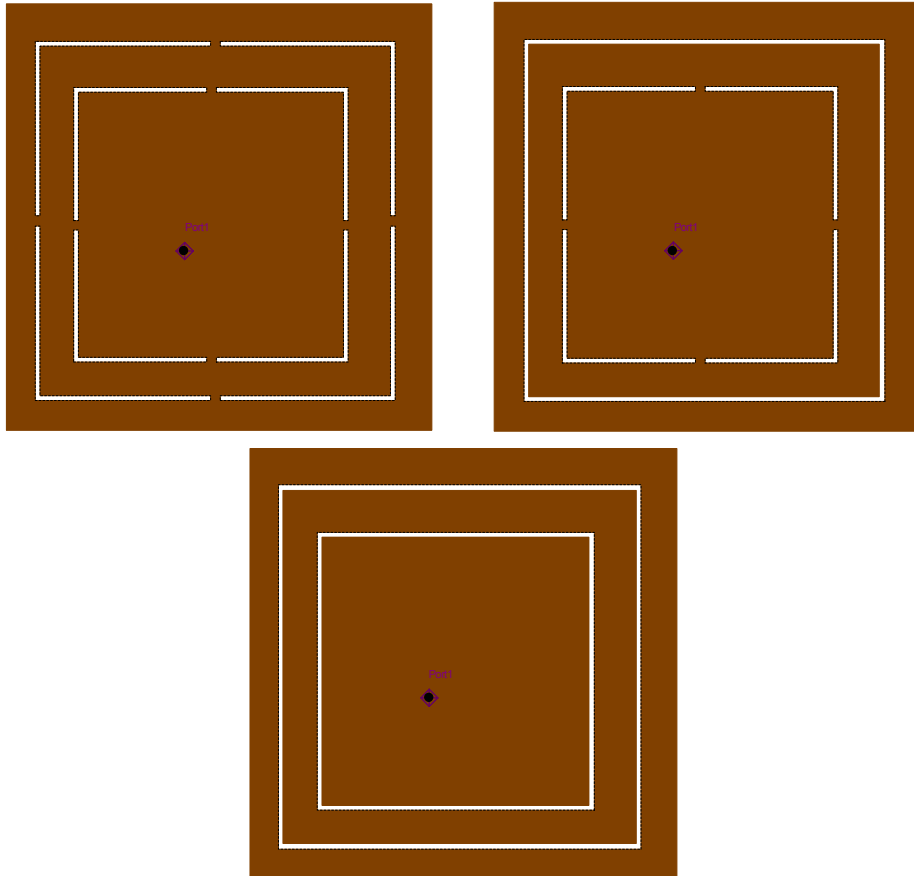


Figura 3.1. Geometria da configuração 1, com o plano de terra.



Os planos E e H cortam o plano da antena com ângulos  $\varphi = 45^\circ$  e  $\varphi = 135^\circ$ , respectivamente. A antena tem polarização linear a  $45^\circ$ .



**Figura 3.2. Detalhes da configuração 1, em cima e à esquerda; da configuração 2, em cima e à direita; e da configuração 3, em baixo.**

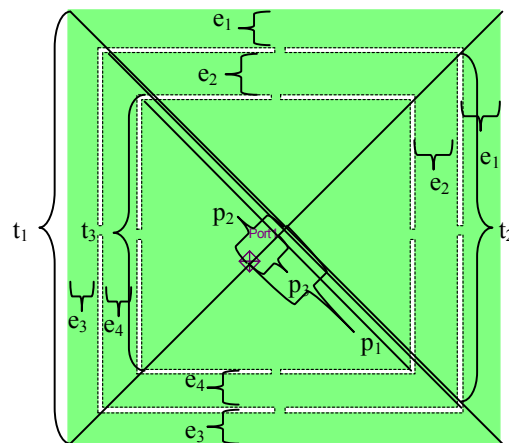
A configuração 1 corresponde a ter todos os interruptores ligados, a configuração 2 corresponde a ter apenas os interruptores interiores ligados e a configuração 3 corresponde a ter todos os interruptores desligados. O quadrado interior funciona na banda do serviço *WiMax*; quando os interruptores de dentro se encontram ligados temos a banda do serviço *Bluetooth*, e quando estão todos os interruptores ligados o funcionamento é na banda mais baixa TDD do serviço UMTS.

Ao ligar ou desligar os interruptores altera-se o caminho percorrido pela corrente, e quanto maior for o caminho percorrido pela corrente menor será a frequência de ressonância.

As fendas entre os três elementos desta antena, e as da antena triangular descrita na secção seguinte é de 0,5 mm. É um valor suficientemente grande para não haver um grande

acoplamento eléctrico e suficientemente pequeno para permitir flexibilidade no projecto – o valor escolhido inicialmente foi de 1 mm, mas verificou-se que limitava as alterações nas dimensões usadas para sintonizar a antena.

O princípio usado é o de aumentar ou diminuir as dimensões da antena para diminuir ou aumentar respectivamente a sua frequência de ressonância. Para alterar a profundidade da ressonância (no gráfico do módulo das perdas de retorno em dB) e a largura de banda é ajustada a posição relativa de alimentação ao longo da diagonal da antena. O processo de sintonia está descrito na secção seguinte, e as variáveis usadas encontram-se na Figura 3.3.



**Figura 3.3. Variáveis usadas na sintonia da antena quadrada com interruptores ideais, e variáveis que indicam a simetria da antena ( $e_1$ ,  $e_2$ ,  $e_3$ ,  $e_4$ )**

### 3.2.2 Simulação da antena

Os parâmetros da antena encontram-se na Tabela 3.2 e para se efectuar a alimentação no simulador utilizou-se o cabo coaxial EZ141-AL com raio do condutor interno de 0.46 mm e uma impedância de 50  $\Omega$ . O plano terra é um quadrado de cobre com 87.4 mm de lado, o dieléctrico é o Rogers RT/duroid 5880 <sup>TM</sup> ( $\epsilon_r = 2.2$ ) e a antena impressa é de cobre.

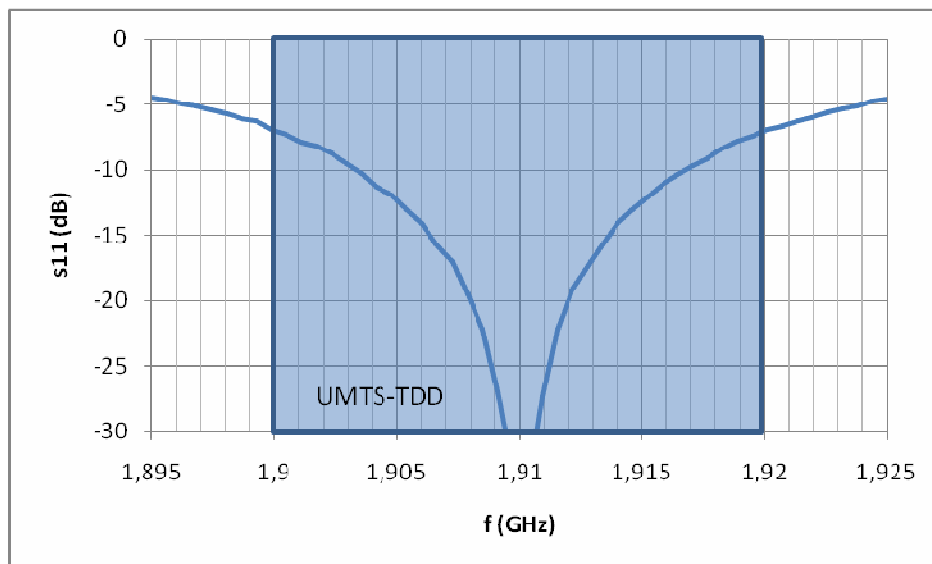
Lado do quadrado exterior ( $t_1$ )	43,7 mm
Centro do quadrado exterior	(0; 0) mm

Lado do quadrado intermédio ( $t_2$ )	35,9 mm
Centro do quadrado intermédio	(-0,39; -0,39) mm
Lado do quadrado interior ( $t_3$ )	27,2 mm
Centro do quadrado interior	(-0,81; -0,81) mm
Posição da alimentação	(-3,52; -3,52) mm

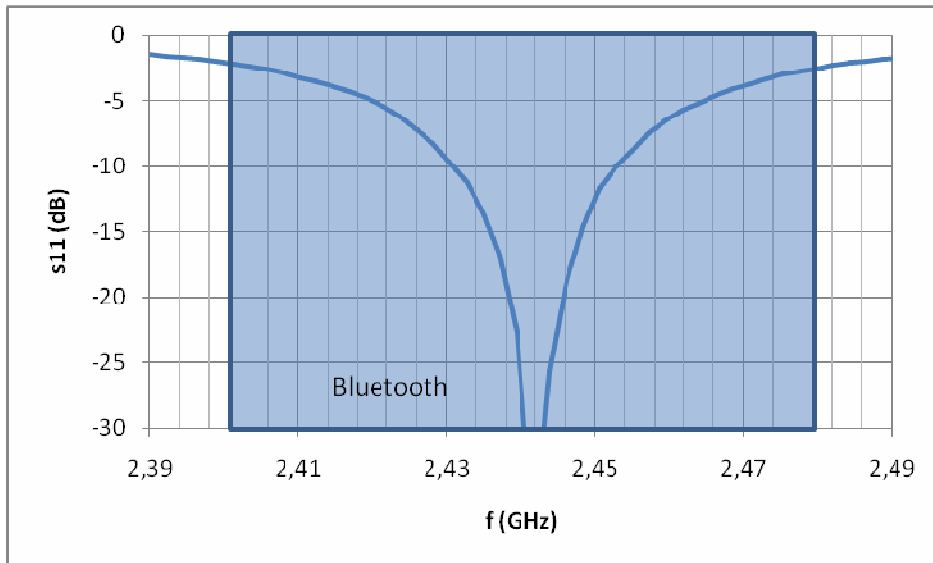
**Tabela 3.2. Dimensões da antena quadrada de tripla banda.**

Estas dimensões foram obtidas após optimização correndo várias simulações até obter as frequências de ressonância e as larguras de banda pretendidas. As simulações para cada uma das três bandas foram realizadas em paralelo, e os ajustes foram feitos iterativamente, de acordo com os resultados das simulações, ou seja, foram ajustadas primeiro as dimensões correspondentes às bandas mais deslocadas das frequências alvo.

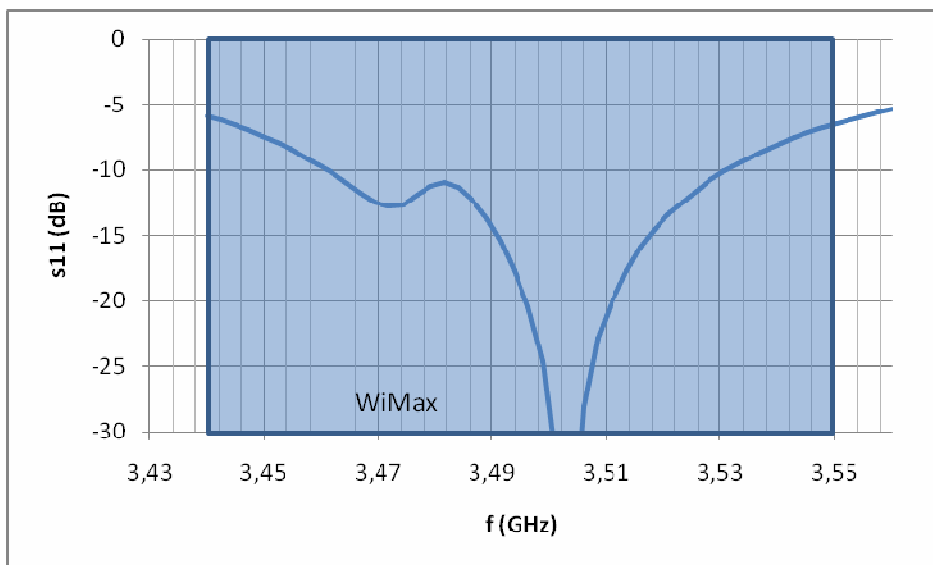
As perdas de retorno para as bandas UMTS-TDD, Bluetooth e WiMax encontram-se, respectivamente na Figura 3.4, na Figura 3.5 e na Figura 3.6. Apesar de as dimensões já estarem optimizadas, as bandas não são suficientemente grandes para cobrir os serviços propostos, mas o fundamental neste trabalho é provar o conceito de antenas reconfiguráveis de tripla banda.



**Figura 3.4. Banda UMTS-TDD da antena quadrada de tripla banda.**



**Figura 3.5. Banda Bluetooth da antena quadrada de tripla banda.**



**Figura 3.6. Banda WiMax da antena quadrada de tripla banda.**

Pela observação das figuras das bandas (da Figura 3.4 à Figura 3.6) nota-se que a banda alarga à medida que a frequência aumenta. Esta característica é mais acentuada na banda WiMax porque a corrente não tem que percorrer caminhos estreitos através dos interruptores como acontece nas outras bandas. Ao percorrer os interruptores, a corrente sofre uma grande restrição, e a banda de frequências compatível com essa restrição diminui.

Para obter as bandas de funcionamento certas nas simulações optimizam-se dois parâmetros para cada banda:

- a posição relativa de alimentação ( $p_n$ ), que é a distância entre a alimentação e o centro de cada quadrado, ambos na diagonal da antena;
- o tamanho de cada quadrado ( $t_n$ ).

O sub-índice  $n$  representa 1, 2 ou 3, conforme a sub-antena em questão.

Ao aumentar ou diminuir o valor de  $p_n$  aumenta-se ou diminui-se respectivamente os valores da parte real e imaginária da impedância, modificando assim a profundidade da ressonância e a largura de banda.

Ao aumentar ou diminuir o valor de  $t_n$  desloca-se a banda de funcionamento para frequências mais baixas ou mais altas respectivamente.

As relações entre estas variáveis e os seus efeitos não são biunívocas, ao alterar  $p$  há um ligeiro efeito na localização das bandas e ao alterar  $t$  há um ligeiro efeito na profundidade da ressonância. Para otimizar a antena deve-se ir alterando cada uma destas variáveis e verificar o seu efeito para cada uma das bandas, mas tudo em conjunto, o que torna o processo demorado, porque ao otimizar uma banda podemos estar a estragar as outras. Optou-se por uma optimização manual porque produzia bons resultados com um tempo mais reduzido do que a optimização automática disponível no simulador.

	Bandas de frequência (MHz)	$f_c$ (MHz)	Largura de banda	
			(MHz)	(%)
<b>UMTS – TDD (banda inferior)</b>	1900-1920	1910	20	1.05
<b>Configuração 1</b>	1903 – 1917	1910	14	0.73
<b>Bluetooth IEEE 802.11b</b>	2400-2483.5	2441.75	83.5	3.42
<b>Configuração 2</b>	2431 – 2453	2442	22	0.9
<b>WiMax IEEE 802.16e</b>	3443-3457 + 3543-3557	3500	114	3.26
<b>Configuração 3</b>	3462 – 3530	3496	68	1.95

**Tabela 3.3. Comparação dos objectivos (serviços) e resultados (configurações) da antena quadrada de tripla banda.**

As distribuições da intensidade da corrente superficial nas configurações 1, 2 e 3 encontram-se, respectivamente, na Figura 3.7, na Figura 3.8 e na Figura 3.9. Ao observar a distribuição da intensidade da corrente eléctrica ao longo da superfície da antena verifica-se que a corrente

percorre os interruptores quando estes estão fechados, alterando assim a dimensão útil da antena.

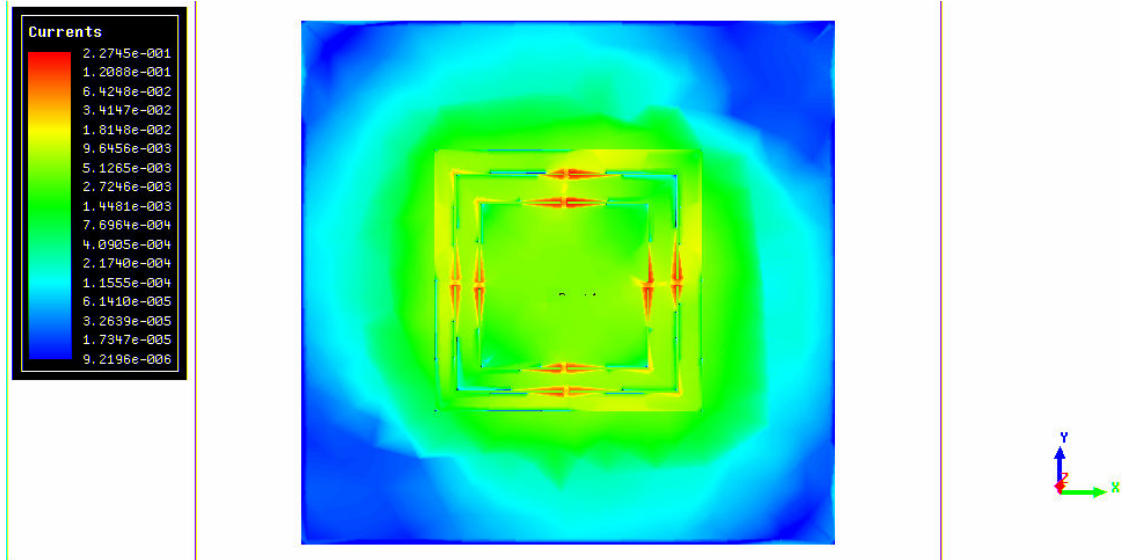


Figura 3.7. Distribuição da intensidade da corrente na frequência central da banda UMTS-TDD da antena quadrada de tripla banda.

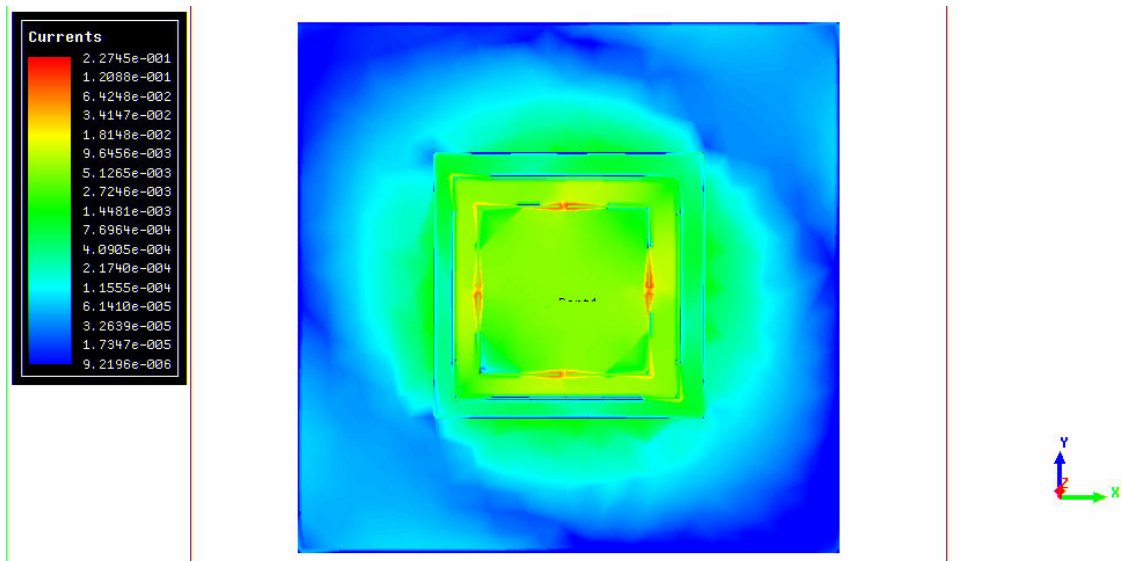
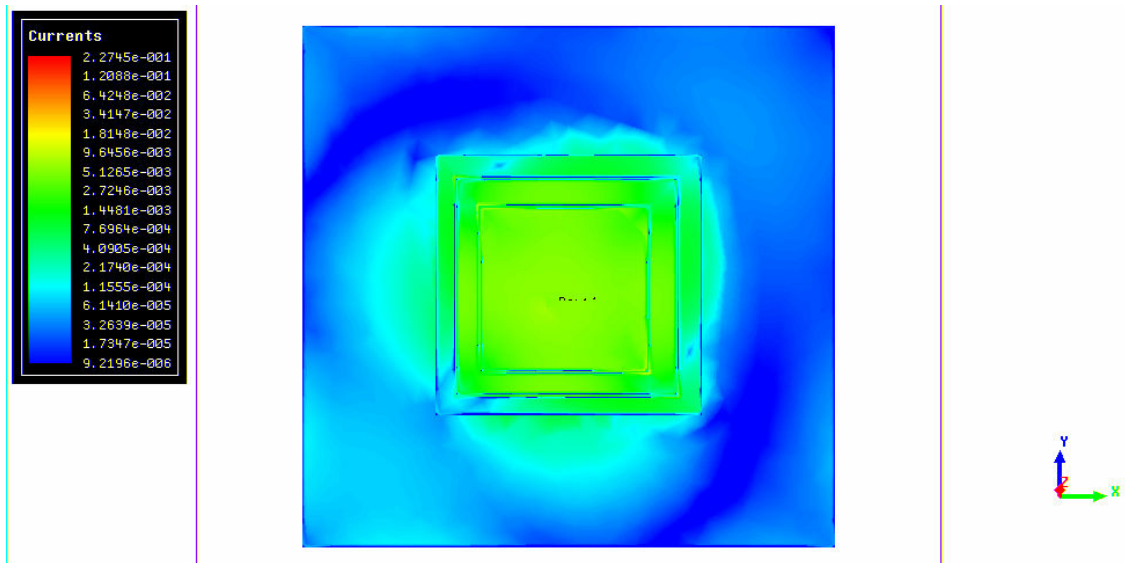


Figura 3.8. Distribuição da intensidade da corrente na frequência central da banda Bluetooth da antena quadrada de tripla banda.



**Figura 3.9. Distribuição da intensidade da corrente na frequência central da banda WiMax da antena quadrada de tripla banda.**

A tendência da corrente é espalhar-se uniformemente a partir da alimentação. Observa-se que nas configurações em que temos os interruptores fechados, a corrente nestes é muito intensa, por se tratar de uma passagem estreita que obriga à concentração da corrente num espaço pequeno.

Observa-se também que mesmo quando os interruptores não estão ligados, há uma grande intensidade de corrente induzida nos elementos parasitas porque as fendas têm uma largura pequena. Isto provoca o aumento da dificuldade de sintonia.

Da Figura 3.10 à Figura 3.15 temos os diagramas de radiação para as três bandas de funcionamento.

No plano E a largura de feixe a -3 dB corresponde a cerca de 75° a 1,91 GHz, 70° a 2,44 GHz, e 95° a 3,5 GHz. A polarização cruzada atinge um máximo de cerca de -22 dB, -20 dB e -30 dB abaixo da co-polarização a 1,91 GHz, 2,44 GHz e 3,5 GHz respectivamente. No plano H a largura de feixe é de cerca de 90° a 1,91 GHz e a 2,44 GHz, e 60° a 3,5 GHz. Neste caso a polarização cruzada atinge um máximo de -22 dB abaixo da co-polarização a 1,91 GHz, -20 dB a 2,44 GHz, e -19 dB a 3,5 GHz.

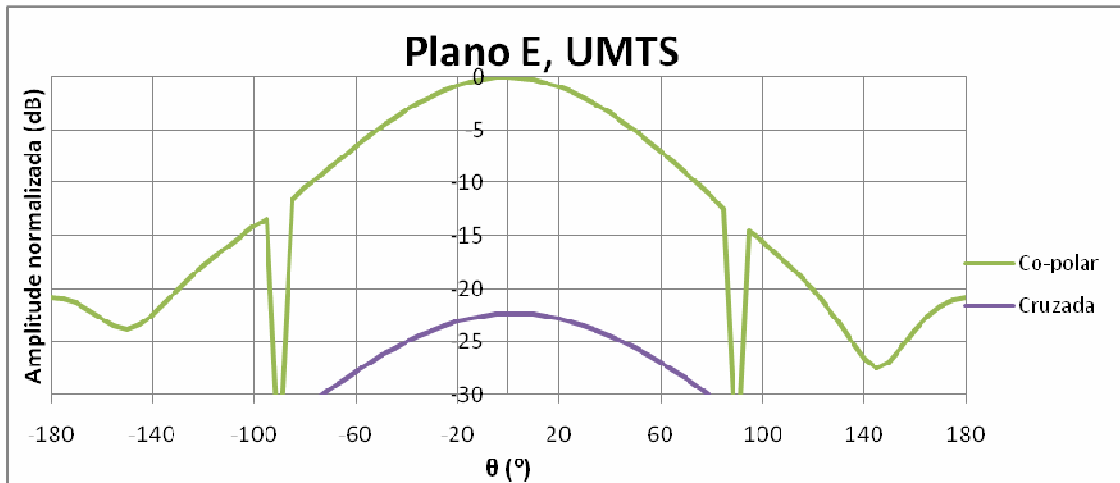


Figura 3.10. Diagramas de radiação no plano E para a frequência central da banda UMTS-TDD da antena quadrada de tripla banda.

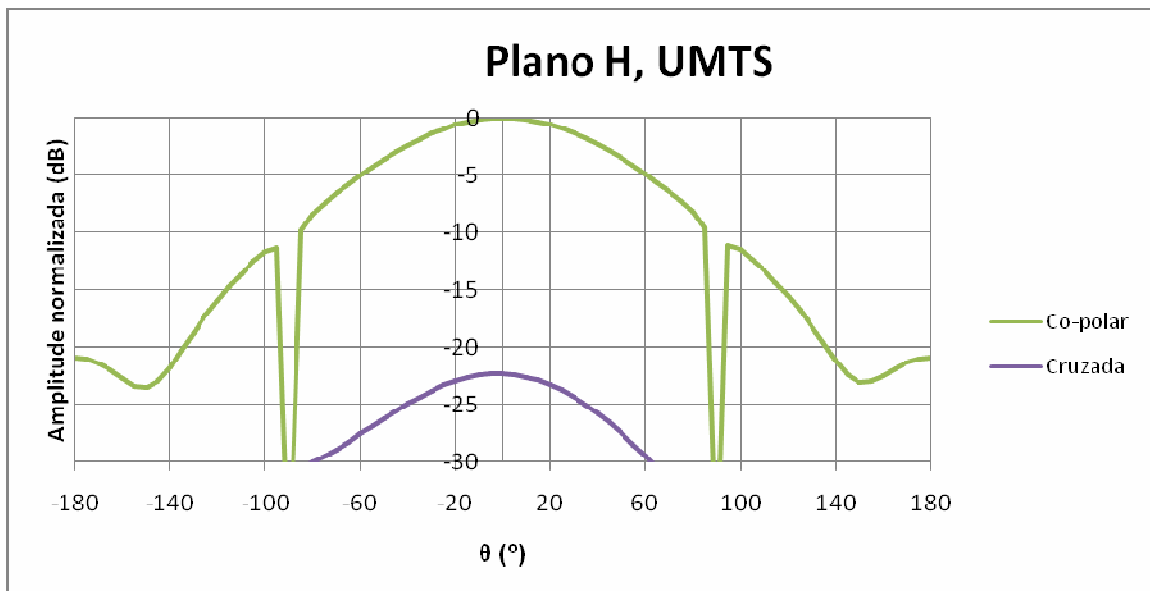
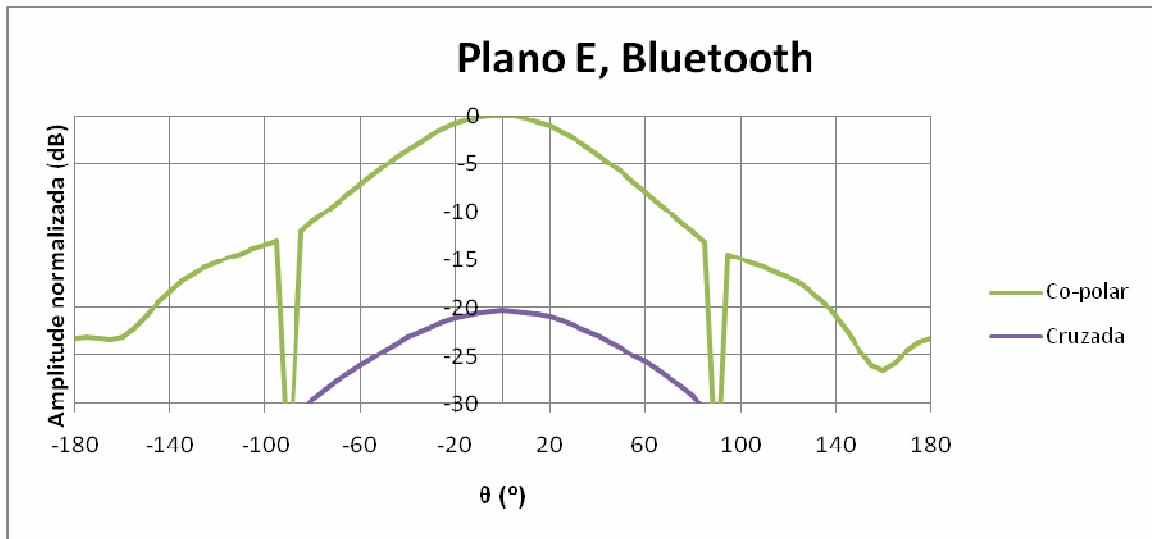
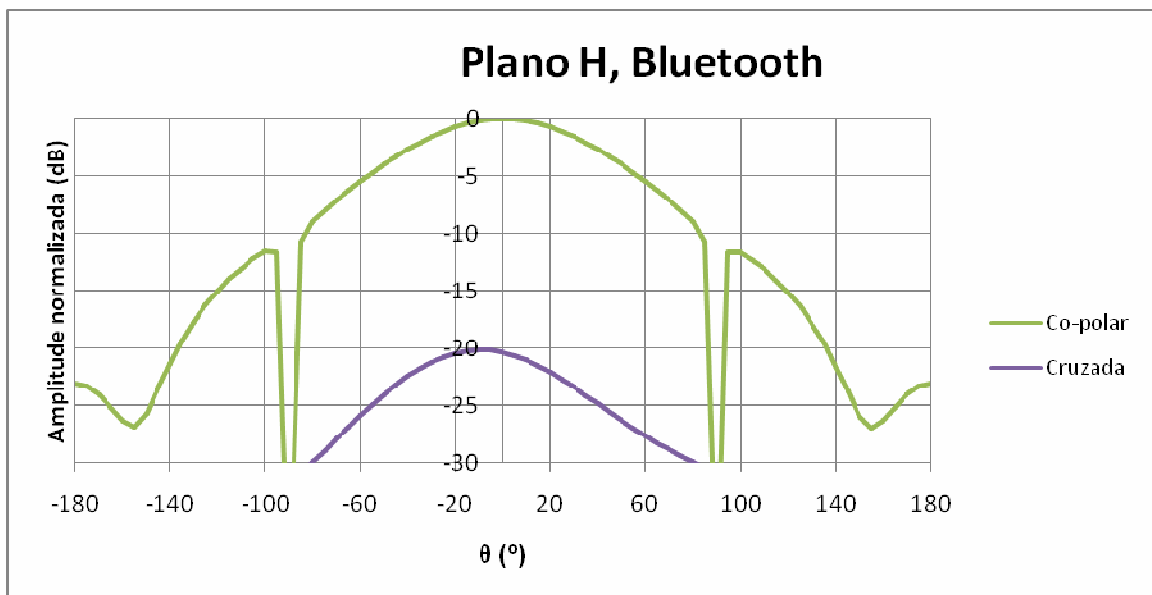


Figura 3.11. Diagramas de radiação no plano H para a frequência central da banda UMTS-TDD da antena quadrada de tripla banda.





**Figura 3.12. Diagramas de radiação no plano E para a frequência central da banda Bluetooth da antena quadrada de tripla banda.**



**Figura 3.13. Diagramas de radiação no plano H para a frequência central da banda Bluetooth da antena quadrada de tripla banda.**

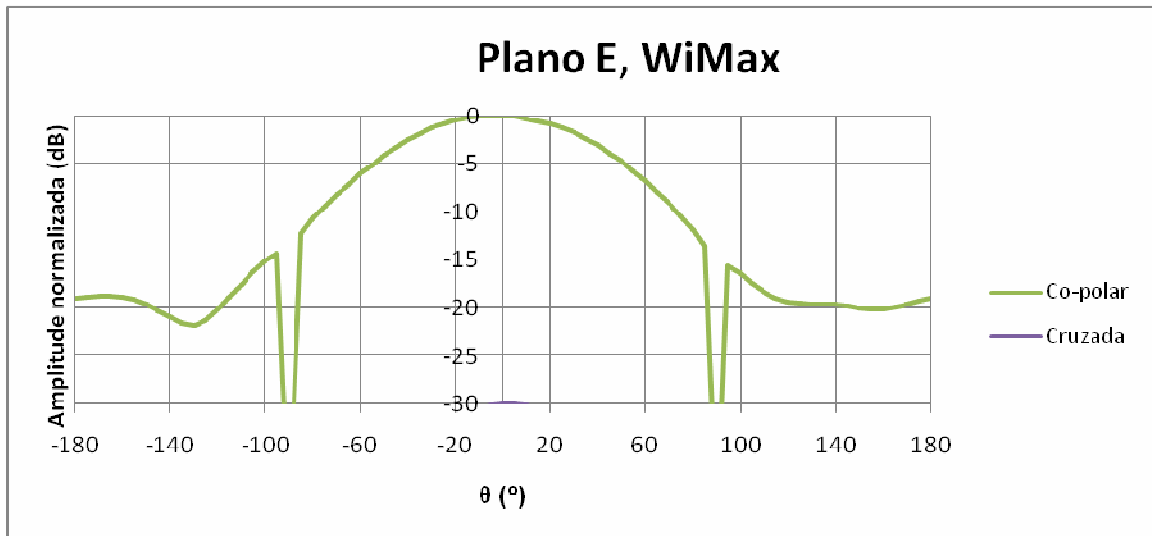


Figura 3.14. Diagramas de radiação no plano E para a frequência central da banda WiMax da antena quadrada de tripla banda.

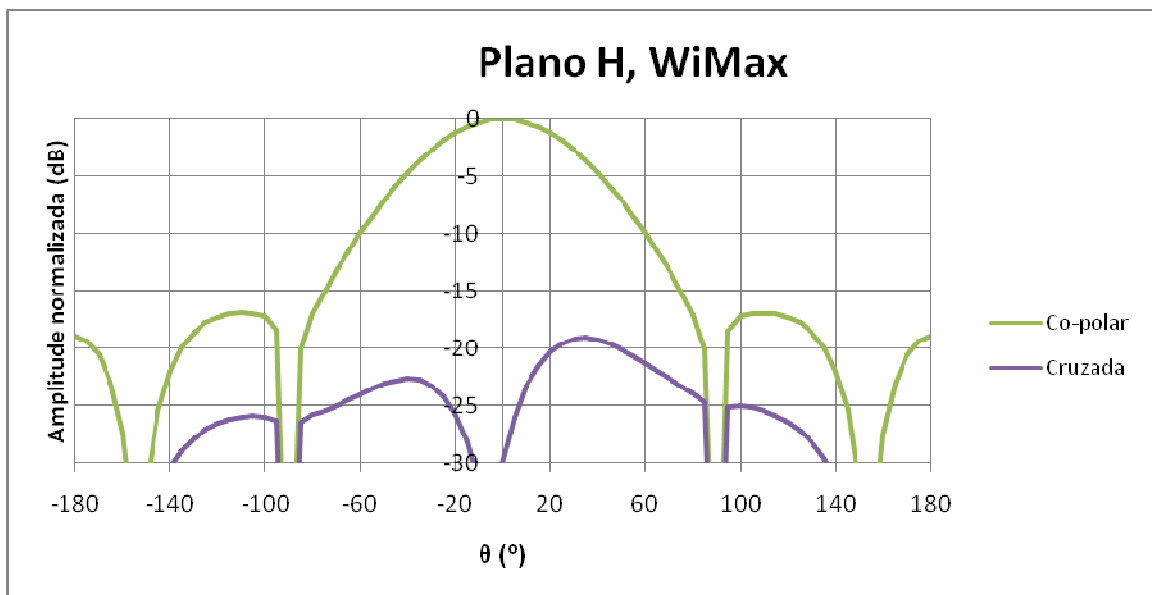
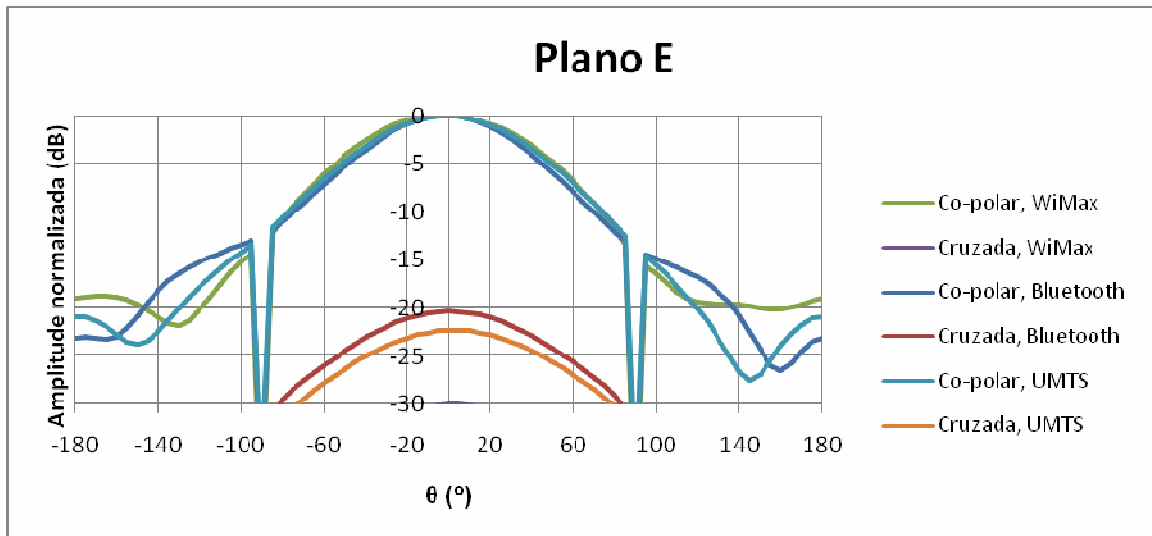
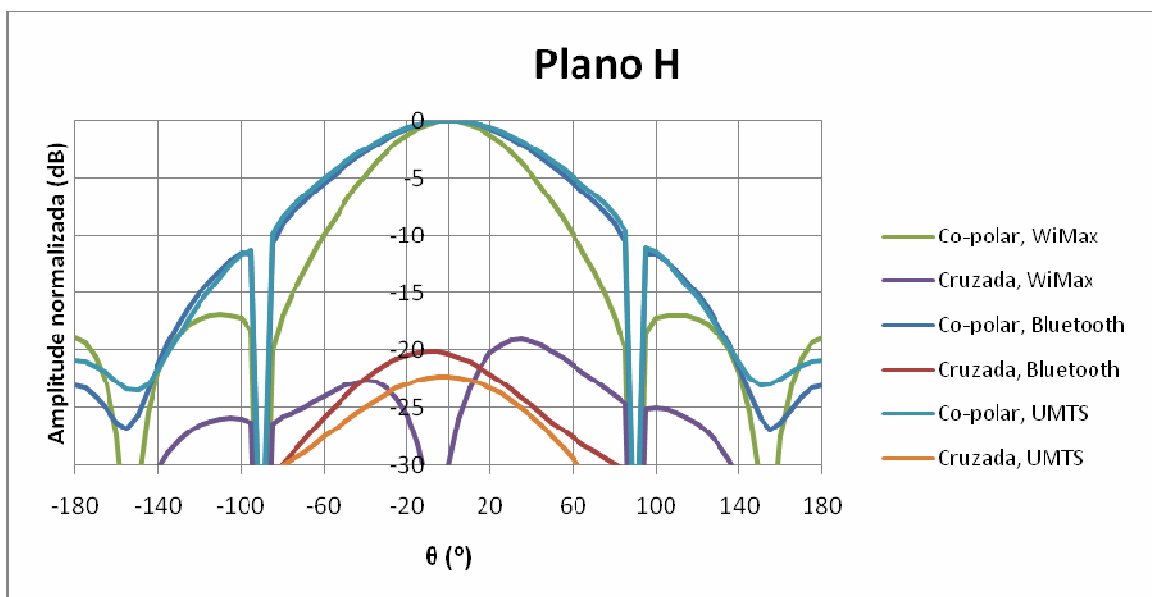


Figura 3.15. Diagramas de radiação no plano H para a frequência central da banda WiMax da antena quadrada de tripla banda.



**Figura 3.16.** Comparação dos diagramas de radiação para as três bandas, no plano E da antena quadrada de tripla banda.



**Figura 3.17.** Comparação dos diagramas de radiação para as três bandas, no plano H da antena quadrada de tripla banda.

Os diagramas de radiação estão de acordo com o esperado. A antena apresenta uma polarização linear a 45 graus, com uma diferença razoável entre as duas componentes ortogonais do campo.

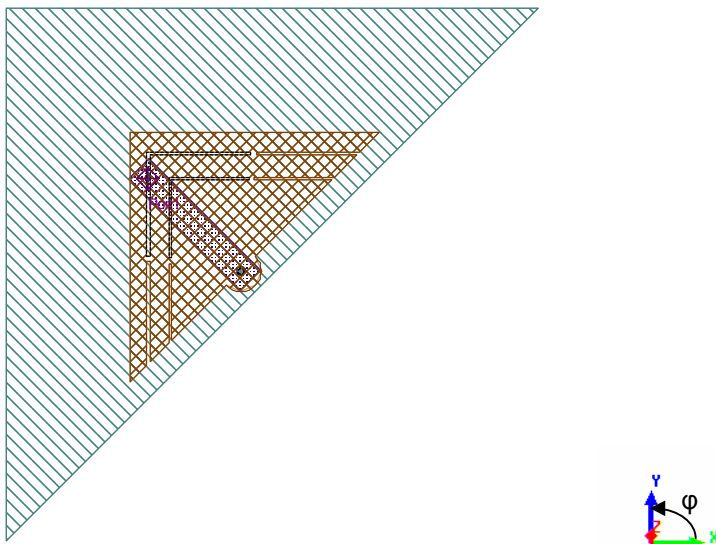
Para as várias frequências não há diferenças muito significativas nos diagramas, por isso a antena poderia funcionar bem nas três bandas desde que a largura de banda fosse suficiente.

### 3.3 Antena triangular com interruptores ideais

#### 3.3.1 Descrição da antena

O esquema da antena encontra-se na Figura 3.18. Os elementos parasitas serão ligados ao triângulo interior através de díodos PIN, que numa primeira fase são simulados com tiras de metal. A alimentação é feita de por uma sonda coaxial tal como no caso anterior, mas por razões que se explicam adiante, o cabo coaxial não liga directamente no ponto de alimentação, mas sim através de uma linha *microstrip* que corre por baixo do plano de terra da antena

No restante, o funcionamento da antena é igual ao da antena quadrada descrita na secção anterior.



**Figura 3.18. Geometria da configuração 1 da antena triangular de tripla banda com o plano de terra e a linha *microstrip*.**

O plano E corta o plano da antena com um ângulo  $\varphi = 45^\circ$ , e o plano H tem um ângulo  $\varphi = 135^\circ$ .



Figura 3.19. Detalhes das configurações 1, à esquerda e 2, à direita, para a antena triangular de tripla banda (a linha *microstrip* e o plano de terra foram omitidos para maior clareza do desenho).

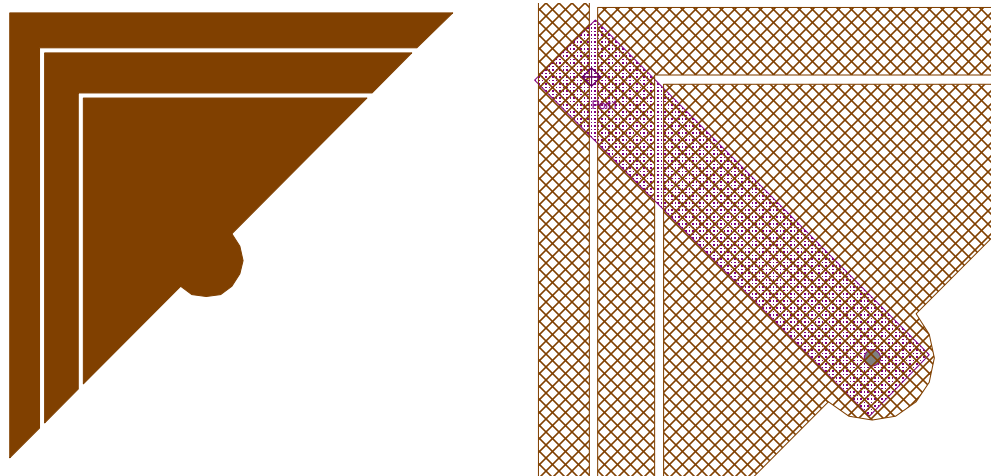
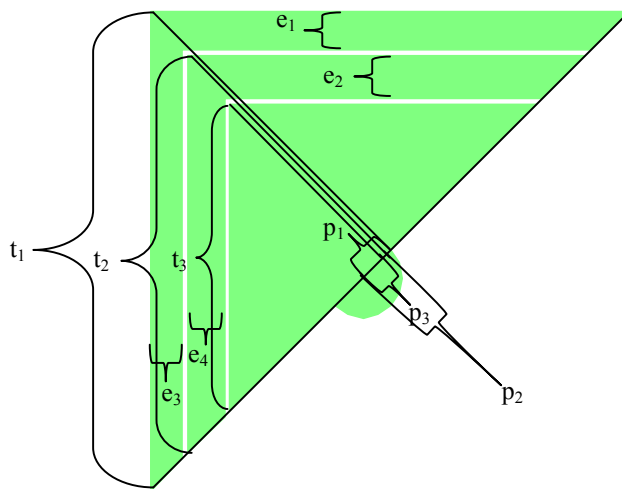


Figura 3.20. Detalhes da configuração 3 da linha *microstrip* para a antena triangular de tripla banda.



**Figura 3.21. Variáveis usadas na sintonização da antena triangular com interruptores ideais e variáveis que indicam a diferença na espessura dos elementos parasitas ( $e_1$ ,  $e_2$ ,  $e_3$ ,  $e_4$ ).**

Inicialmente, a alimentação foi feita apenas por um cabo coaxial. Mas a presença do cabo coaxial na fronteira do corte diagonal da antena induzia algum acoplamento de RF. Para minimizar essa influência do cabo coaxial foi introduzida uma linha *microstrip* por baixo do plano de terra. O cabo coaxial é ligado a essa linha que por sua vez conduz o sinal para o ponto de alimentação da antena onde se utiliza uma via. Os detalhes da alimentação podem ser observados na Figura 3.43.

O plano de terra tem pouco mais que o dobro do tamanho da antena, para que os resultados sejam próximos dos obtidos com um plano de terra infinito. Na antena quadrada o plano de terra tinha o dobro do tamanho da antena, mas com o corte, o semi-círculo (que contém a via por onde o sinal passa da linha *microstrip* para a antena) ficaria fora do espaço ocupado pelo plano de terra, pelo que foi necessário aumentar 6 mm em cada um dos catetos do plano de terra.

### 3.3.2 Simulação da antena

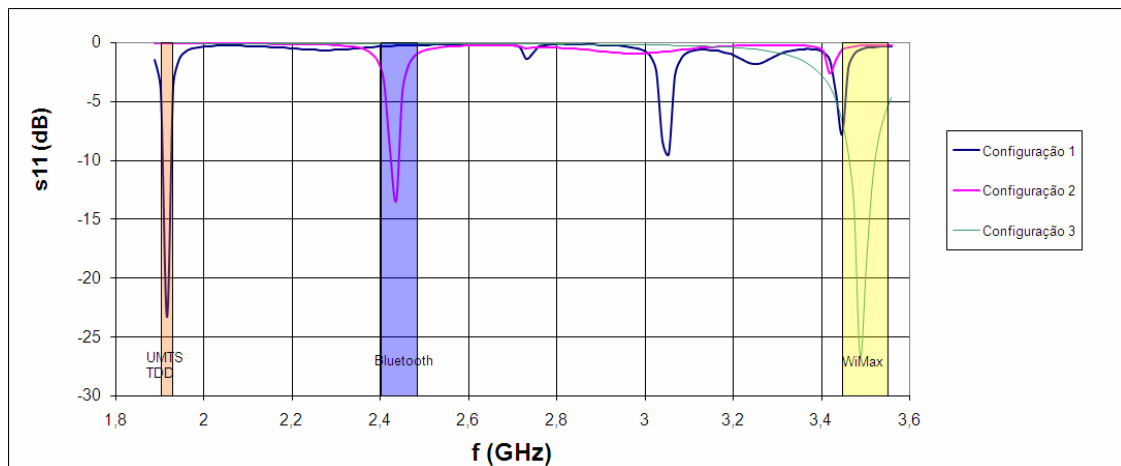
Os parâmetros da antena encontram-se na Tabela 3.4 e para se efectuar a alimentação no simulador utilizou-se o cabo coaxial EZ141-AL com raio do condutor interno de 0,46 mm e uma impedância de 50  $\Omega$ . O plano de terra é um triângulo rectângulo isósceles de cobre em que os

catetos medem 91,8 mm, o dieléctrico é o Rogers RT/duroid 5880™ ( $\epsilon_r=2.2$ ) e a antena impressa é de cobre.

Lado do triângulo exterior ( $t_1$ )	42,9 mm
Centro da hipotenusa do triângulo exterior	(0; 0) mm
Lado do triângulo intermédio ( $t_2$ )	35,6 mm
Centro da hipotenusa do triângulo intermédio	(-0,27; -0,27) mm
Lado do triângulo interior ( $t_3$ )	27,5 mm
Centro da hipotenusa triângulo interior	(-0,57; -0,57) mm
Posição da alimentação	(-2,41; -2,41) mm

**Tabela 3.4. Dimensões da antena triangular de tripla banda.**

A linha *microstrip* é um rectângulo com 27 mm num dos lados, e 4,82 mm no outro. O centro do rectângulo está em (5,59; 5,59) mm, e o rectângulo encontra-se rodado  $\varphi=135^\circ$  (com  $\varphi=0^\circ$  o lado maior está na posição horizontal).



**Figura 3.22. Bandas de funcionamento da antena triangular de tripla banda com interruptores ideais.**

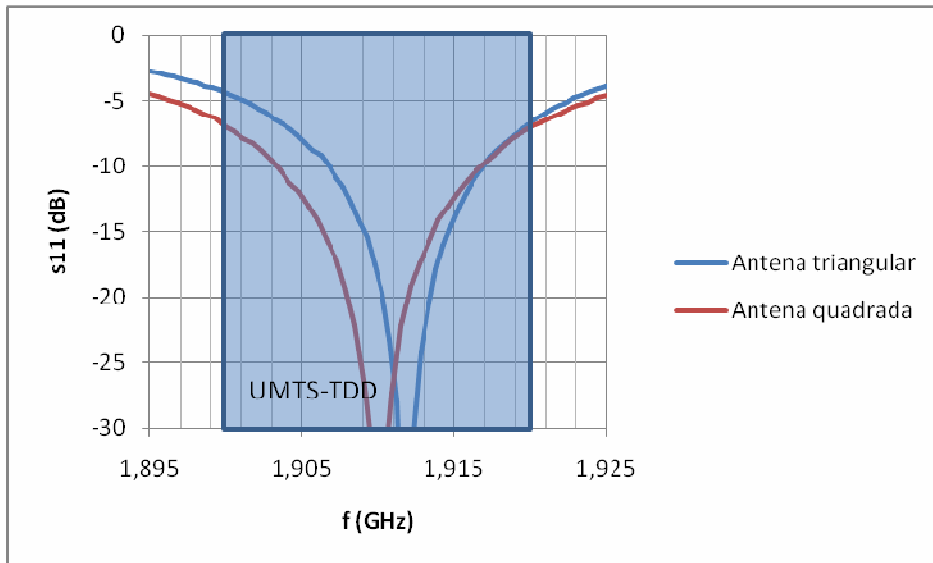


Figura 3.23. Comparação entre as perdas de retorno das duas antenas de tripla banda com interruptores ideais, para a banda UMTS-TDD.

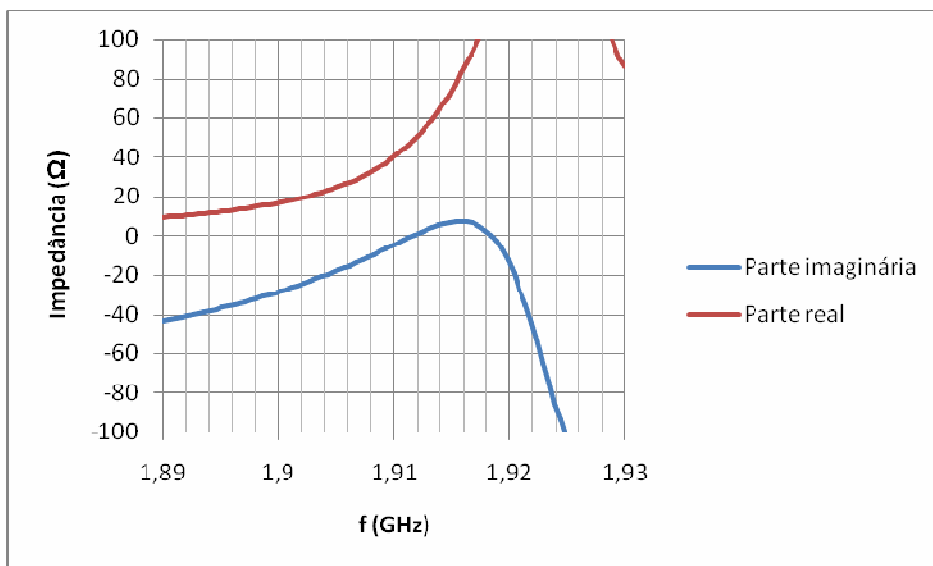


Figura 3.24. Parte real e imaginária da impedância da antena triangular de tripla banda com interruptores ideais, na banda UMTS-TDD.



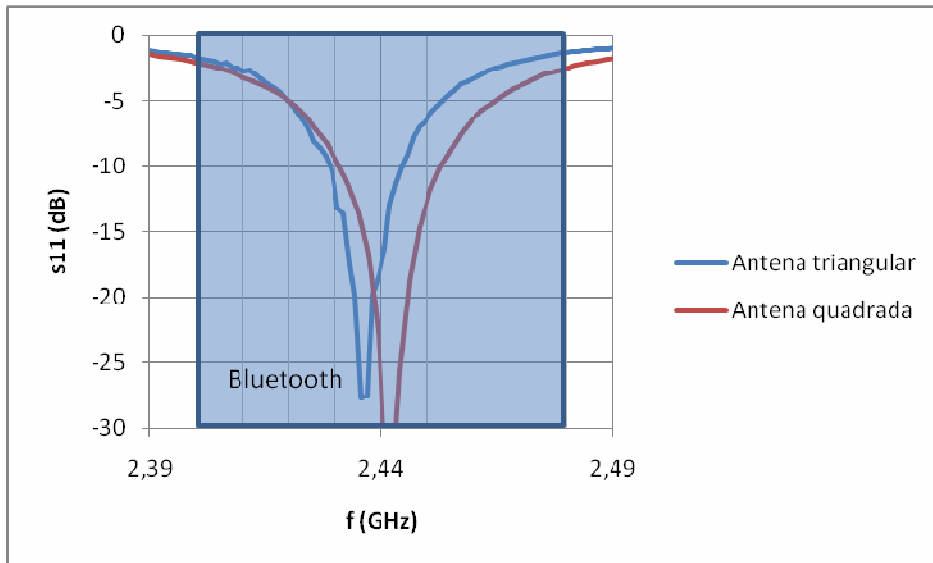


Figura 3.25. Comparação entre as perdas de retorno das duas antenas de tripla banda com interruptores ideais, para a banda Bluetooth.

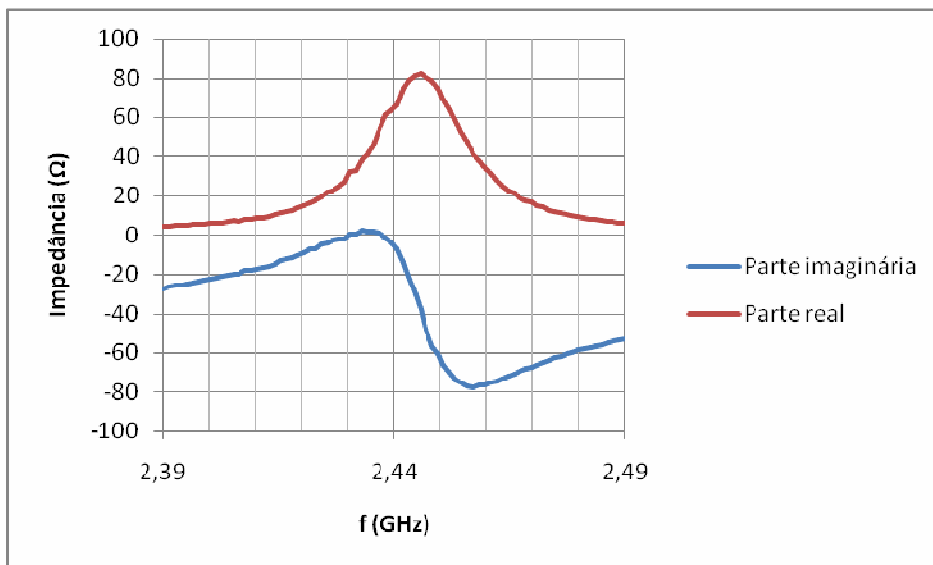


Figura 3.26. Parte real e imaginária da impedância da antena triangular de tripla banda com interruptores ideais, na banda Bluetooth.

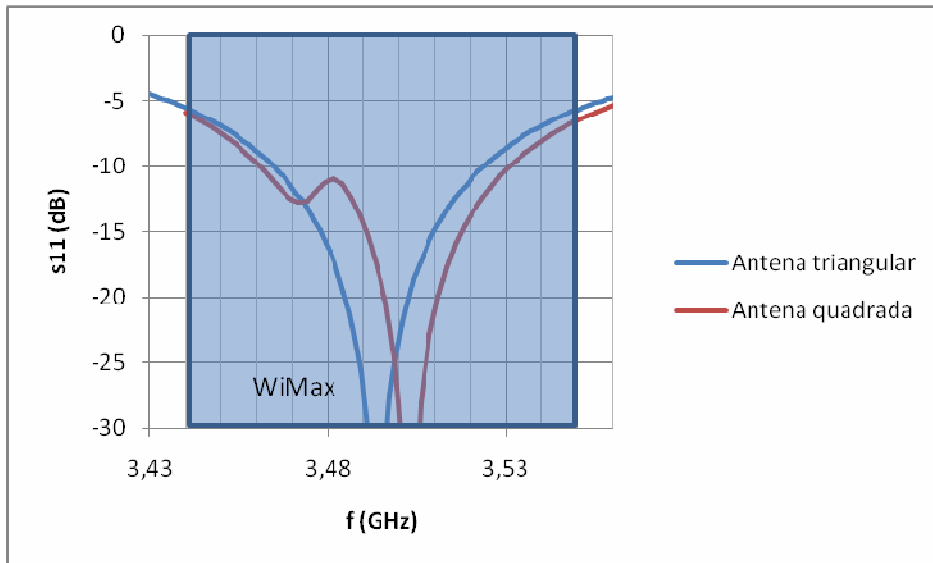


Figura 3.27. Comparação entre as perdas de retorno das duas antenas de tripla banda com interruptores ideais, para a banda WiMax.

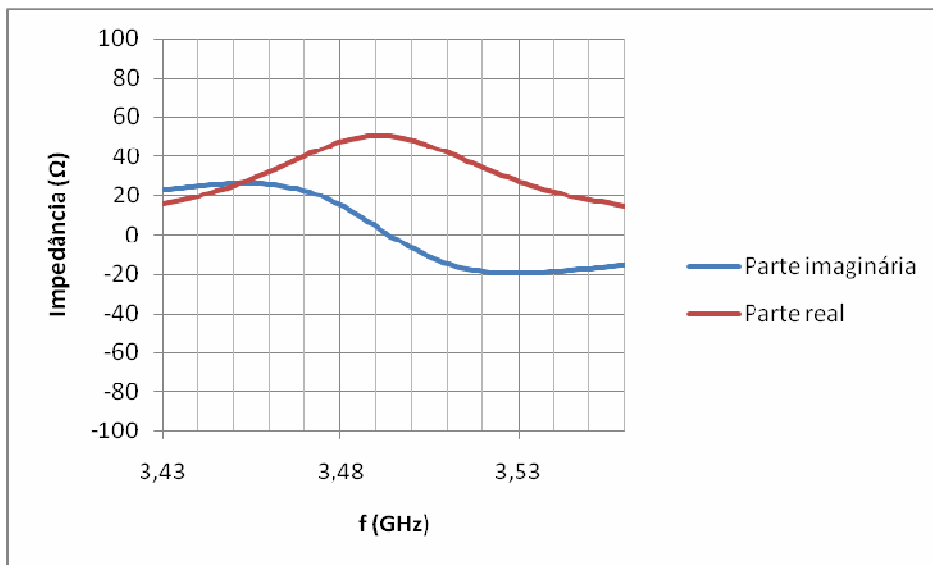


Figura 3.28. Parte real e imaginária da impedância da antena triangular de tripla banda com interruptores ideais, na banda WiMax.

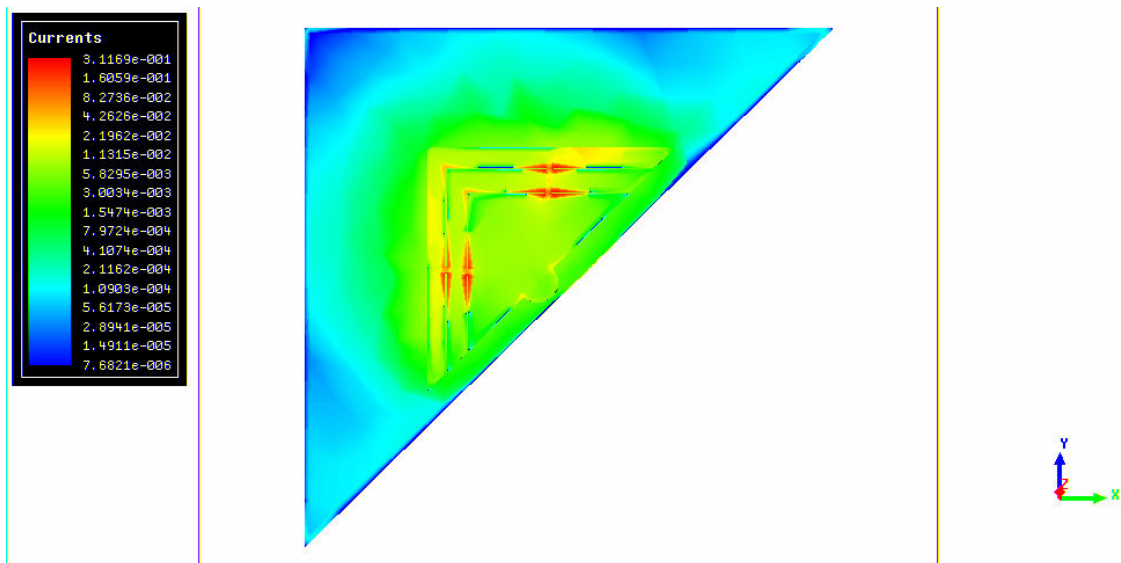
Nota-se que esta antena apresenta larguras de banda ligeiramente menores do que a antena quadrada de tripla banda, mas isto não é significativo se tomarmos em conta a grande redução (redução de 51.8%) de tamanho que se obtém com o corte da antena pela diagonal.

Configurações	Bandas de frequência (MHz)	f <sub>c</sub> (MHz)	Largura de banda	
			(MHz)	(%)
1, antena quadrada	1903 – 1917	1910	14	0,73
1, antena triangular	1904 – 1915	1909,5	11	0,58
2, antena quadrada	2431 – 2453	2442	22	0,9
2, antena triangular	2429 – 2447	2438	18	0,74
3, antena quadrada	3462 – 3530	3496	68	1,95
3, antena triangular	3470 – 3538	3504	68	1,94

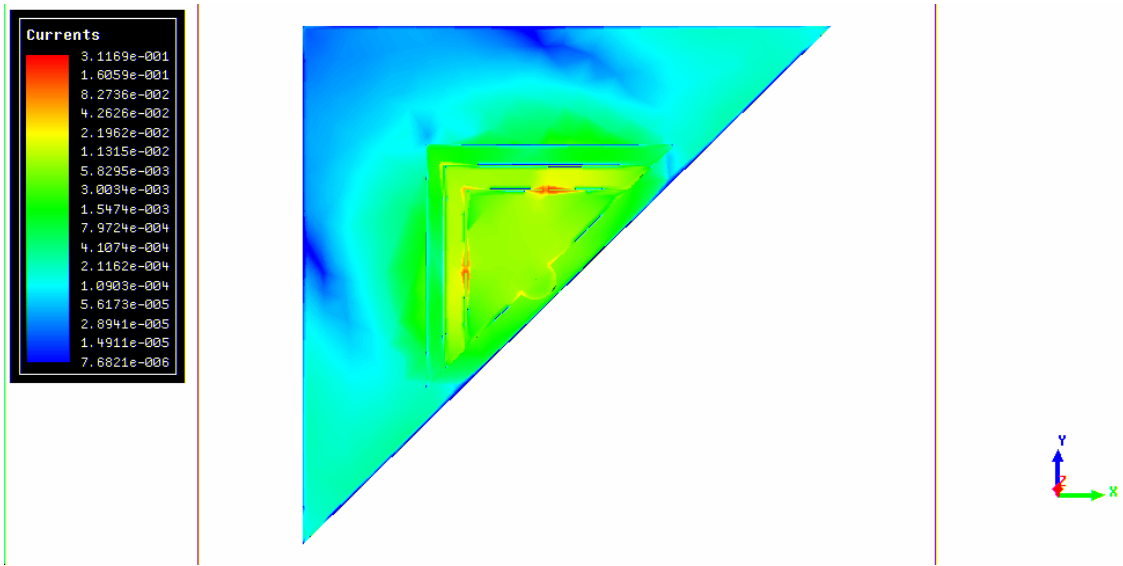
**Tabela 3.5. Comparação entre as duas antenas de tripla banda com interruptores ideais**

Na tabela pode-se observar que as diferenças em relação à configuração quadrada de tripla banda não são significativas.

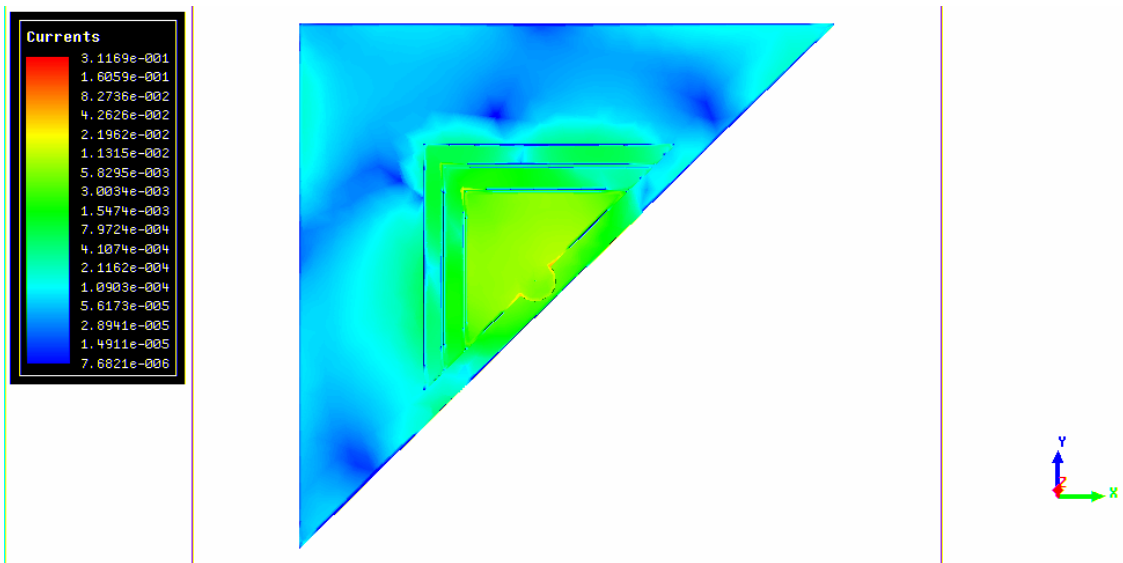
As distribuições das amplitudes máximas da corrente na banda UMTS, Bluetooth e WiMax estão representadas na Figura 3.29, na Figura 3.30 e na Figura 3.31 respectivamente. Observa-se que o comportamento da corrente está de acordo com o esperado, tal como aconteceu na antena quadrada na secção anterior.



**Figura 3.29. Intensidade da corrente na frequência central da banda UMTS-TDD para a antena triangular de tripla banda com interruptores ideais.**



**Figura 3.30. Intensidade da corrente na frequência central da banda Bluetootha para a antena triangular de tripla banda com interruptores ideais.**



**Figura 3.31. Intensidade da corrente na frequência central da banda WiMax para a antena triangular de tripla banda com interruptores ideais.**

Os diagramas de radiação para as várias bandas nos planos E e H encontram-se nas Figura 3.32 à 2.17.

No plano E a largura de feixe a -3 dB corresponde a cerca de 70° a 1,91 GHz e 2,44 GHz, e a cerca de 105° a 3,5 GHz. A polarização cruzada atinge um máximo de cerca de -16 dB, -18 dB e -12 dB abaixo da co-polarização a 1,91 GHz, 2,44 GHz e 3,5 GHz respectivamente. No plano H

a largura de feixe é de cerca de  $115^\circ$  a 1,91 GHz,  $110^\circ$  a 2,44 GHz e  $90^\circ$  a 3,5 GHz. Neste caso a polarização cruzada atinge um máximo de -24 dB abaixo da co-polarização a 1,91 GHz e 2,44 GHz, e -15 dB a 3,5 GHz.

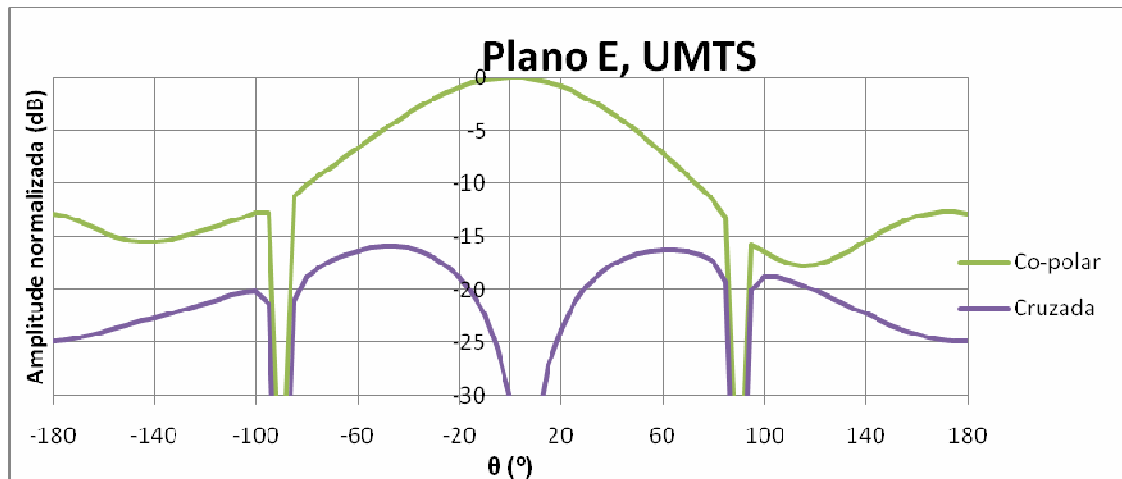


Figura 3.32. Diagramas de radiação no plano E para a frequência central da banda UMTS-TDD para a antena triangular de tripla banda com interruptores ideais.

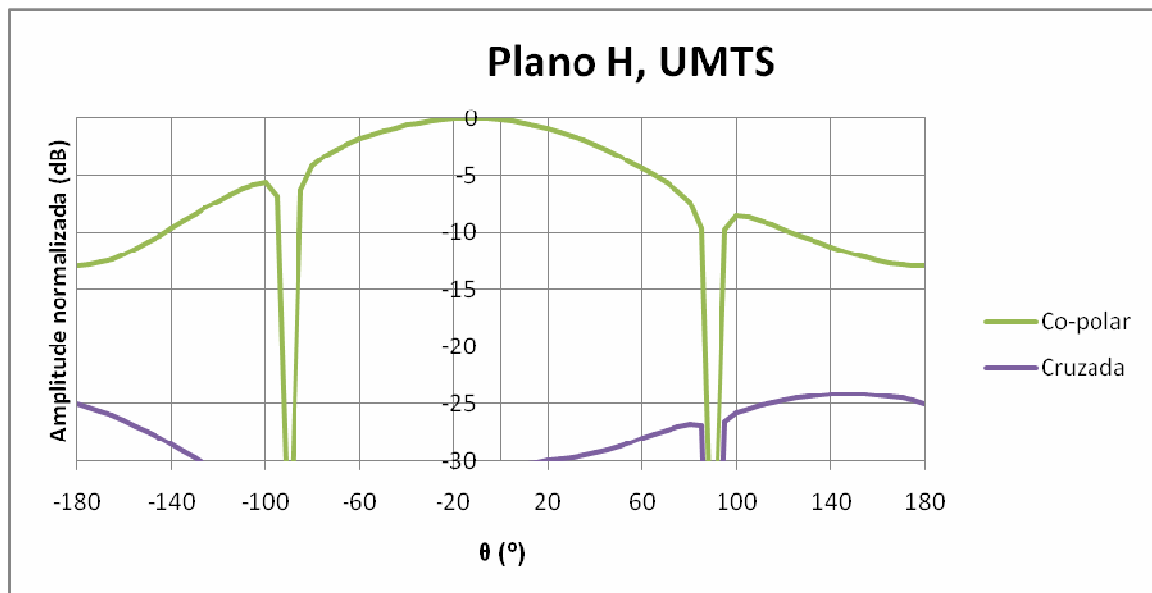
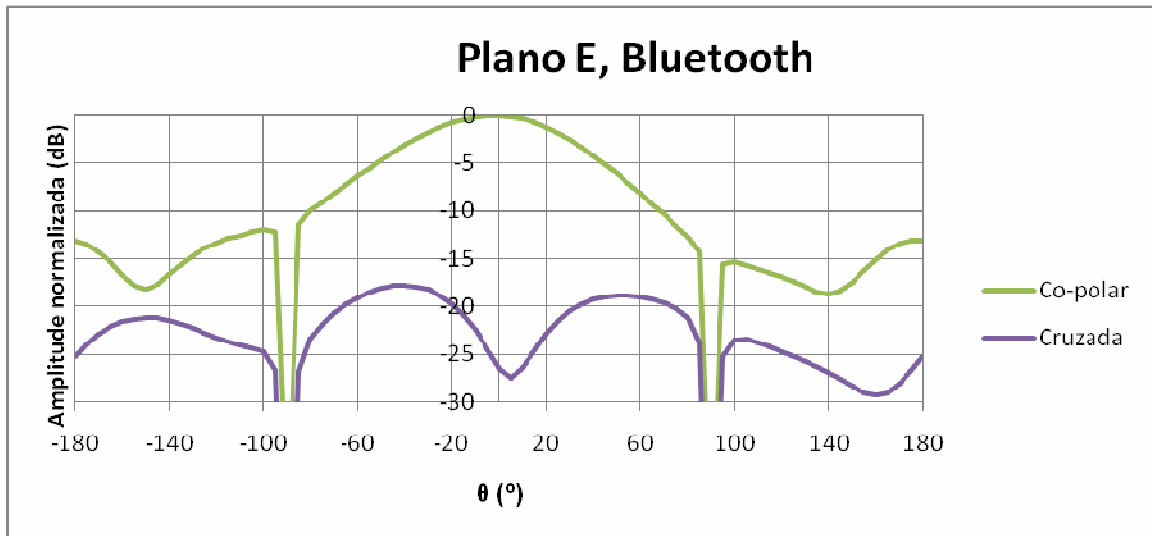
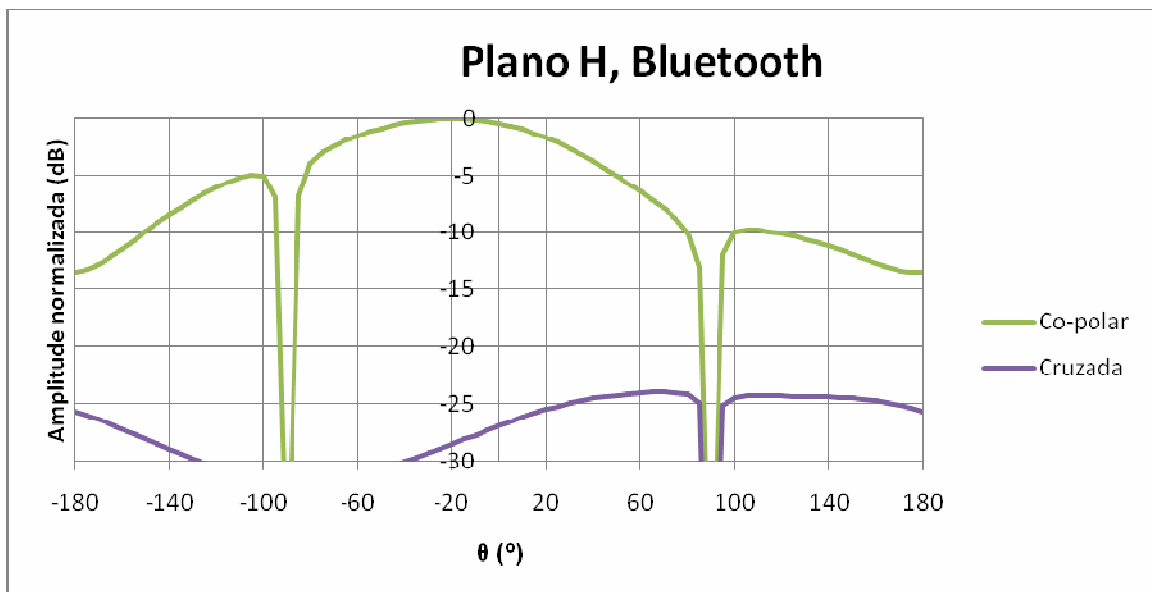


Figura 3.33. Diagramas de radiação no plano H para a frequência central da banda UMTS-TDD para a antena triangular de tripla banda com interruptores ideais.



**Figura 3.34.** Diagramas de radiação no plano E para a frequência central da banda Bluetooth para a antena triangular de tripla banda com interruptores ideais.



**Figura 3.35.** Diagramas de radiação no plano H para a frequência central da banda Bluetooth para a antena triangular de tripla banda com interruptores ideais.

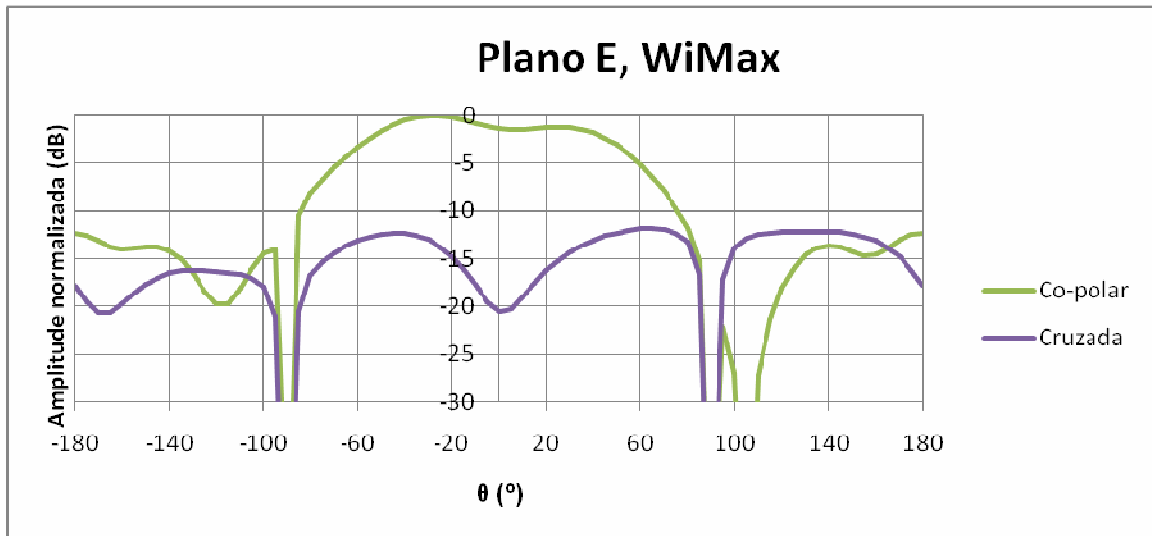


Figura 3.36. Diagramas de radiação no plano E para a frequência central da banda WiMax para a antena triangular de tripla banda com interruptores ideais.

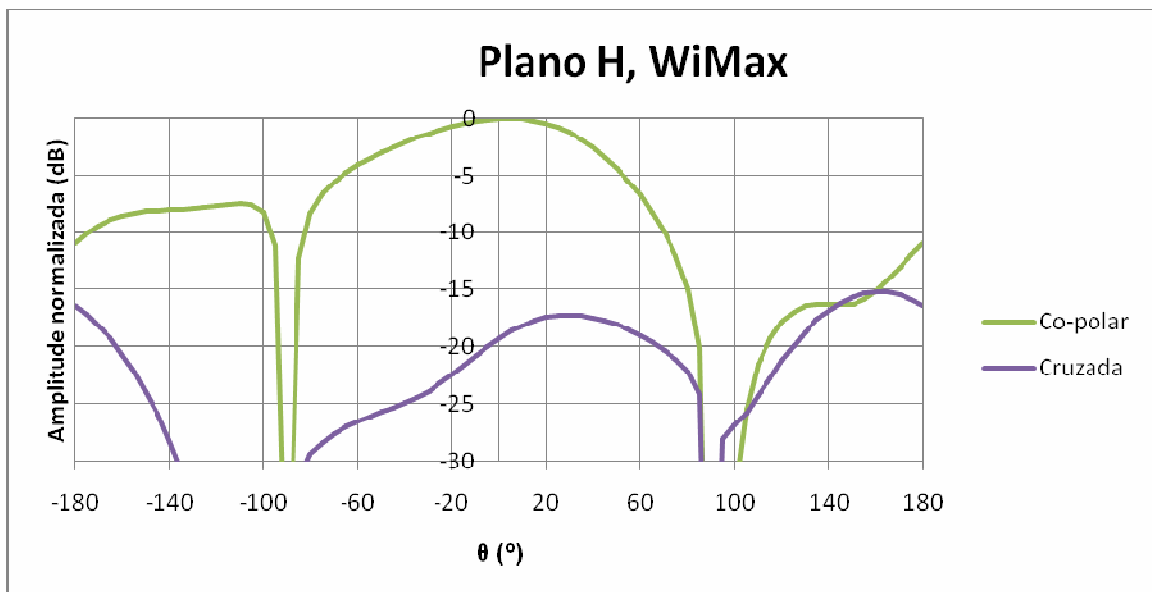
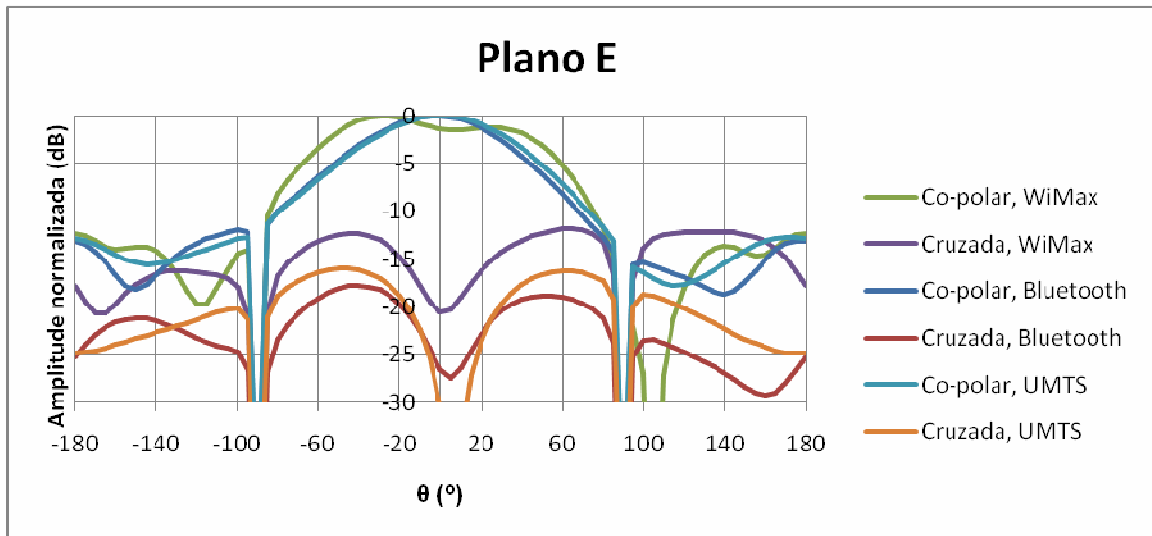
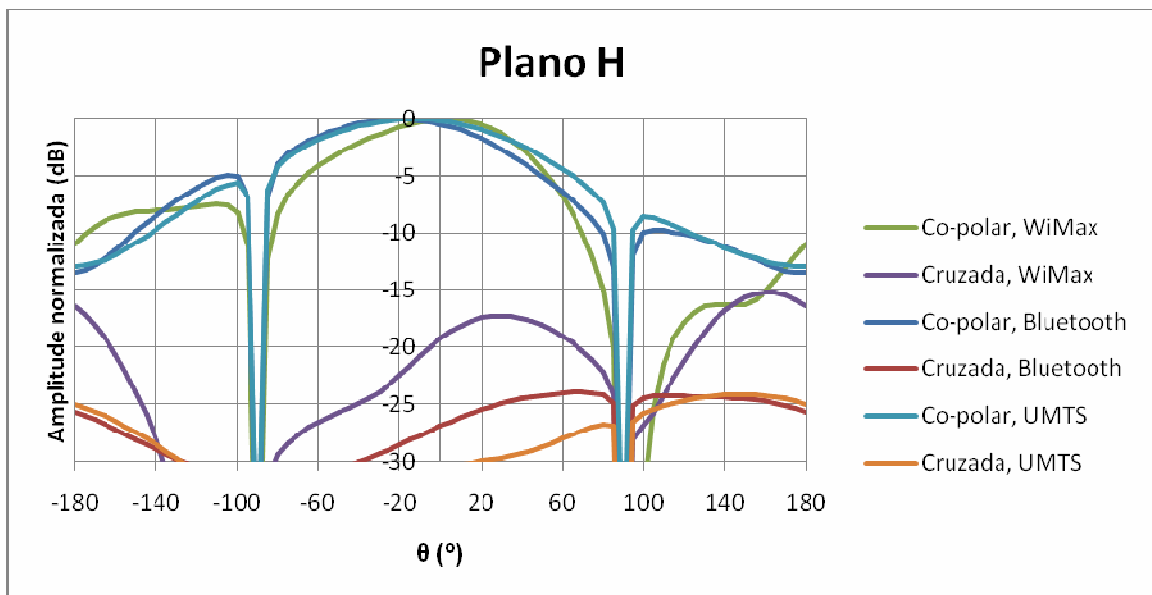


Figura 3.37. Diagramas de radiação no plano H para a frequência central da banda WiMax para a antena triangular de tripla banda com interruptores ideais.



**Figura 3.38. Comparação dos diagramas de radiação para as três bandas, no plano E para as duas antenas de tripla banda com interruptores ideais.**



**Figura 3.39. Comparação dos diagramas de radiação para as três bandas, no plano H para as duas antenas de tripla banda com interruptores ideais.**

Os diagramas de radiação estão de acordo com o esperado, e têm apenas ligeiras diferenças em relação à antena quadrada de tripla banda devido à eliminação da simetria da antena devido ao corte.



### 3.3.3 Resultados Experimentais

Com o objectivo de verificar o comportamento real da antena foram construídos três protótipos, correspondendo cada um a uma das três bandas de funcionamento.

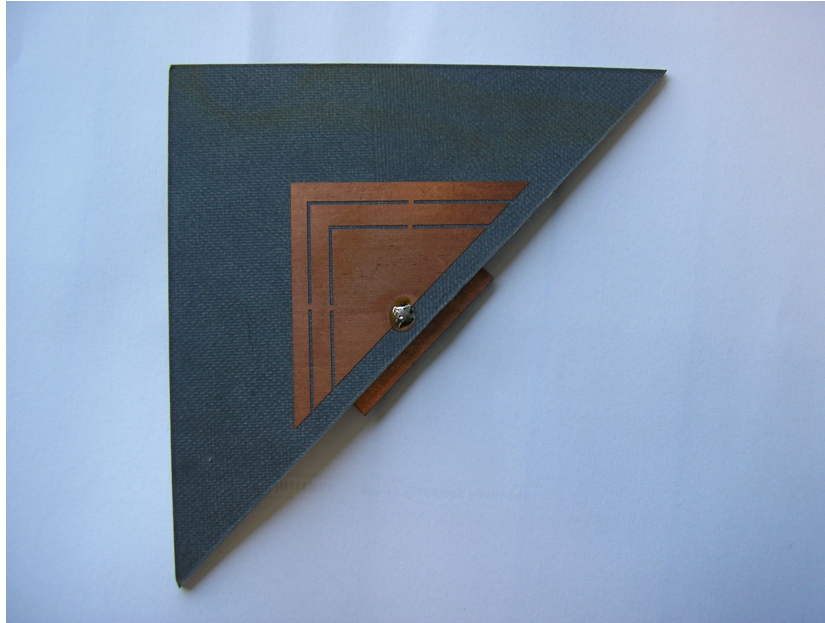


Figura 3.40. Fotografia do protótipo usado para a banda UMTS-TDD (configuração 1) da antena triangular de tripla banda com interruptores ideais.

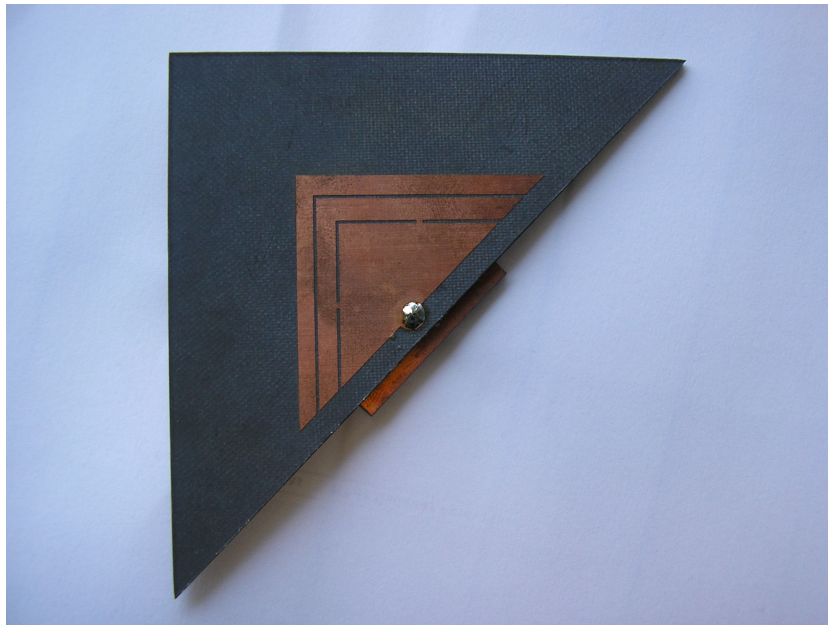


Figura 3.41. Fotografia do protótipo usado para a banda Bluetooth (configuração 2) da antena triangular de tripla banda com interruptores ideais.

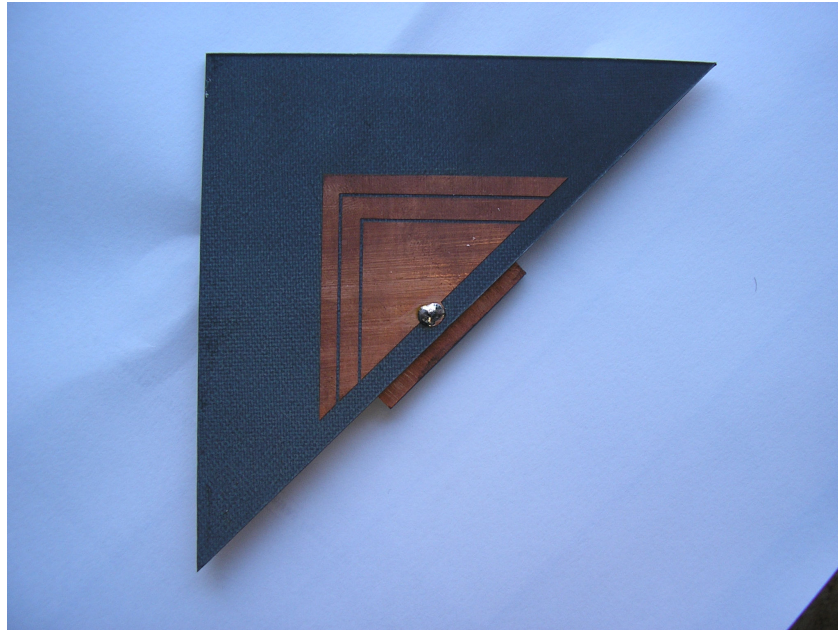


Figura 3.42. Fotografia do protótipo usado para a banda WiMax (configuração 3) da antena triangular de tripla banda com interruptores ideais.

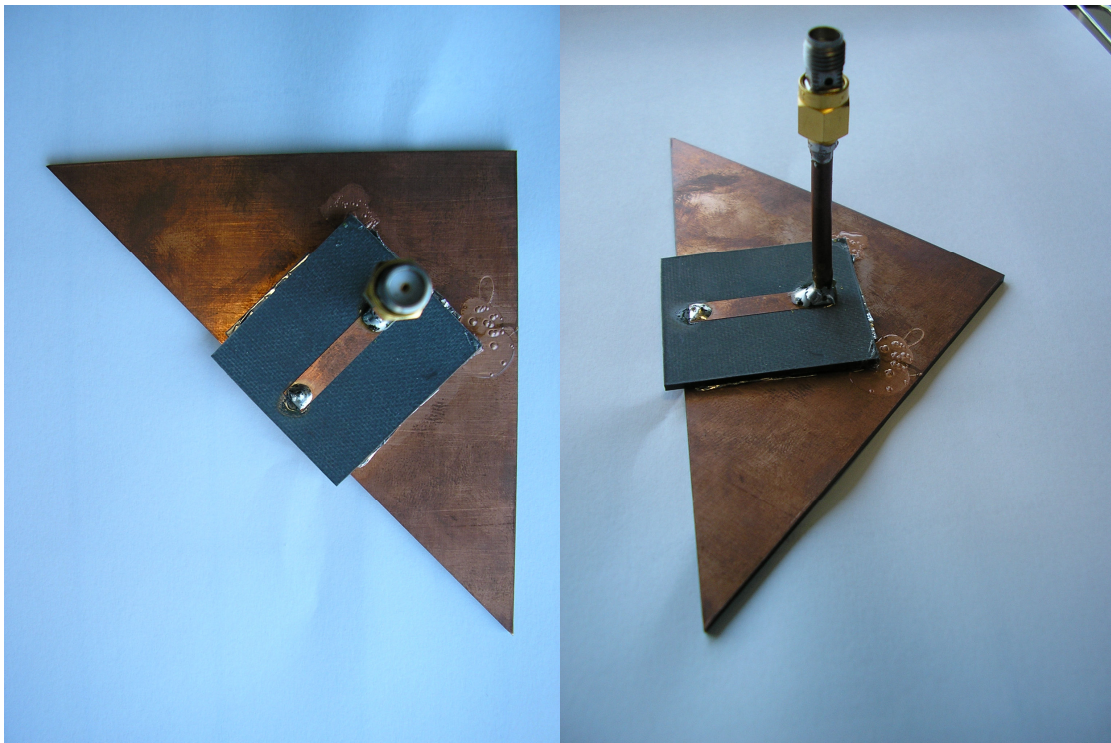
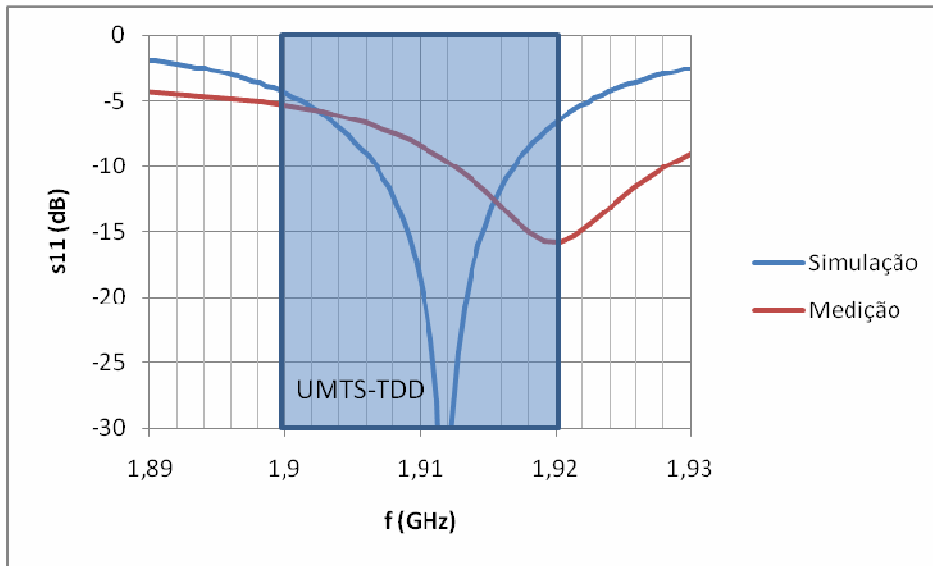
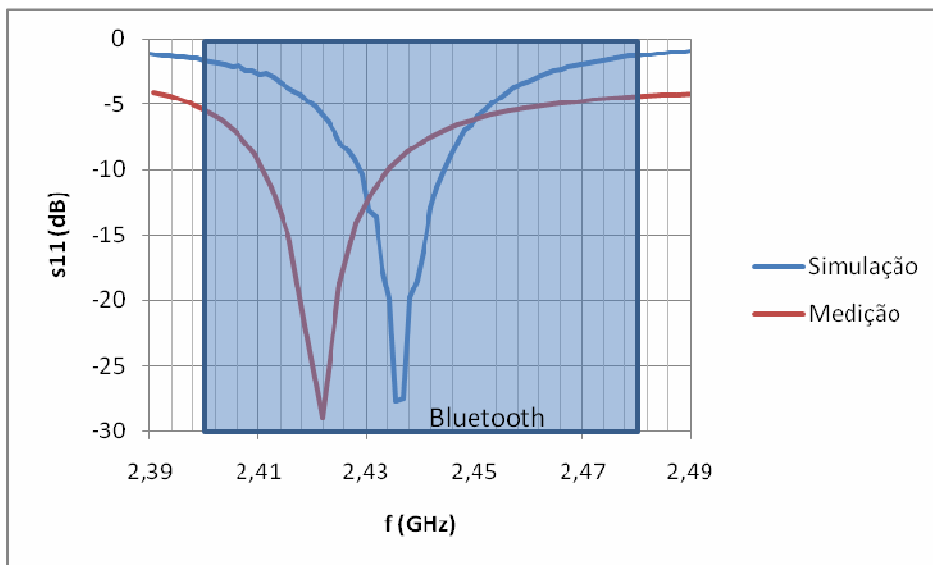


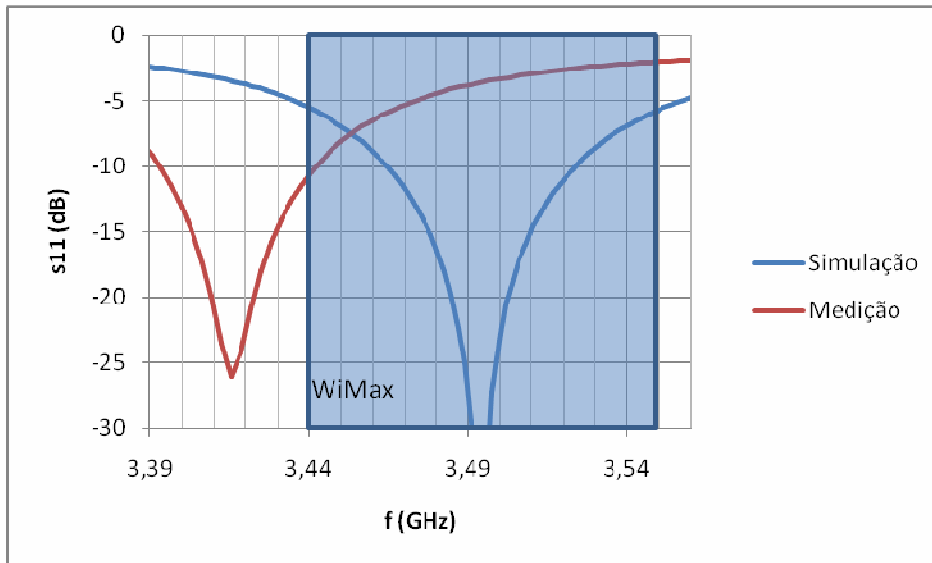
Figura 3.43. Fotografia da face inferior da antena, onde se localiza a linha *microstrip* e o cabo coaxial da antena triangular de tripla banda com interruptores ideais.



**Figura 3.44.** Comparação das perdas de retorno medidas com os resultados da simulação para a banda UMTS-TDD da antena triangular de tripla banda com interruptores ideais.



**Figura 3.45.** Comparação das perdas de retorno medidas com os resultados da simulação para a banda Bluetooth da antena triangular de tripla banda com interruptores ideais.



**Figura 3.46. Comparação das perdas de retorno medidas com os resultados da simulação para a banda WiMax da antena triangular de tripla banda com interruptores ideais.**

Observa-se um desvio da banda para frequências mais altas na banda UMTS-TDD, e um desvio para frequências mais baixas nas bandas Bluetooth e WiMax. Na Tabela 3.6 encontra-se a quantificação das diferenças entre simulações e medições.

Configurações	Bandas de frequência (MHz)	$f_c$ (MHz)	Desvio da $f_c$		Largura de banda		Diferença da largura de banda	
			MHz	%	MHz	%	MHz	%
<b>1 – Simulação</b>	1904 – 1915	1909.5			11	0.58		
<b>1 – Medição</b>	1912 – 1928	1920	+10.5	+0.55	16	0.83	+5	+45.5
<b>2 – Simulação</b>	2429 – 2447	2438			18	0.74		
<b>2 – Medição</b>	2410 – 2434	2422	-16	-0.66	24	0.99	+6	+33.3
<b>3 – Simulação</b>	3470 – 3538	3504			68	1.94		
<b>3 – Medição</b>	3393 – 3442	3417.5	-86.5	-2.47	49	1.43	-19	-27.9

**Tabela 3.6. Comparação entre as bandas obtidas por simulação e as medidas da antena triangular de tripla banda com interruptores ideais.**

Na Tabela 3.6 os desvios referidos são da medição em relação à simulação. O “+” e o “-” significam respectivamente para frequências mais altas e para frequências mais baixas no desvio da frequência central, e também significam respectivamente aumento e diminuição na diferença da largura de banda.

A comparação entre os diagramas de radiação medidos e simulados encontra-se a partir da Figura 3.47 até à Figura 3.50.

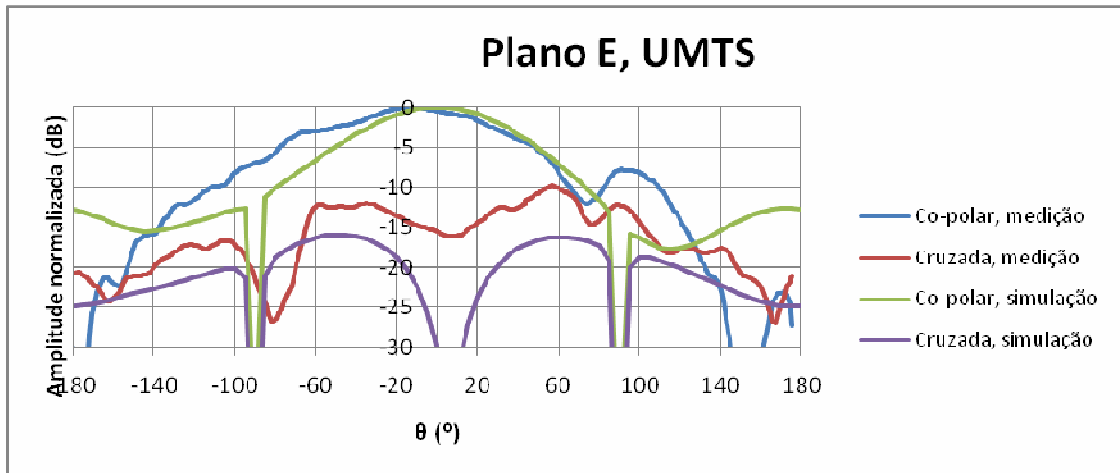


Figura 3.47. Diagramas de radiação no plano E para a frequência central da banda UMTS-TDD da antena triangular de tripla banda com interruptores ideais.

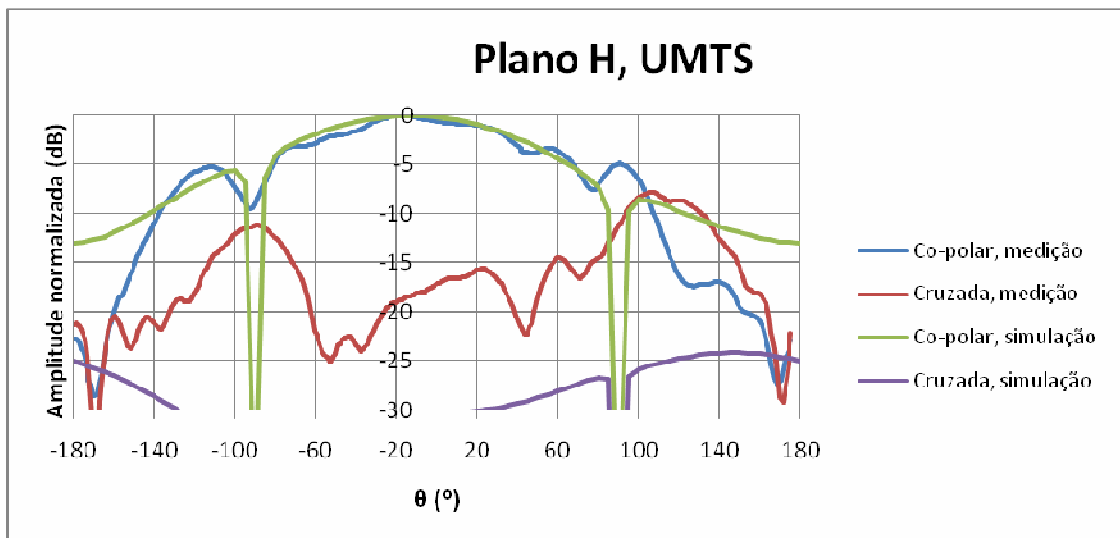
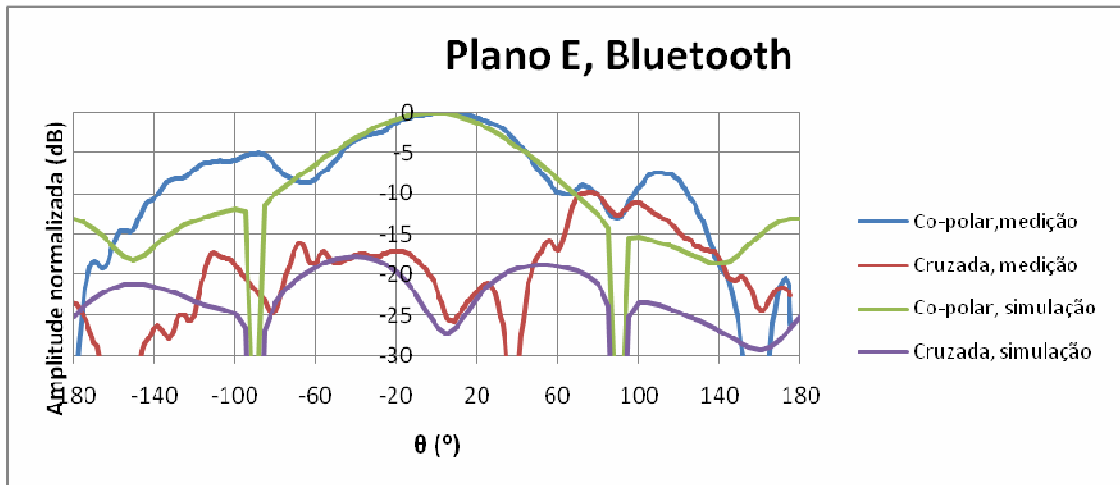
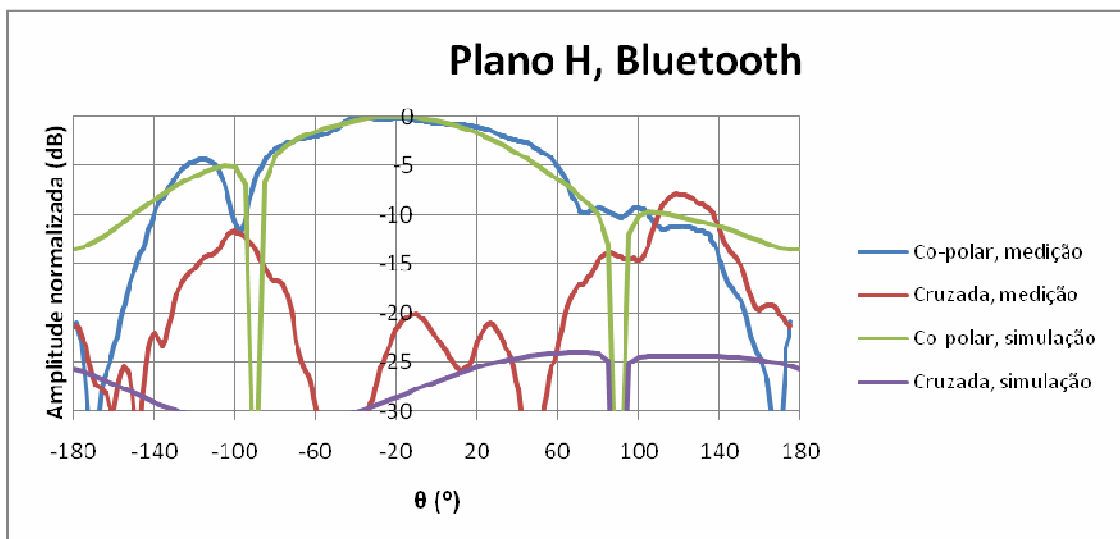


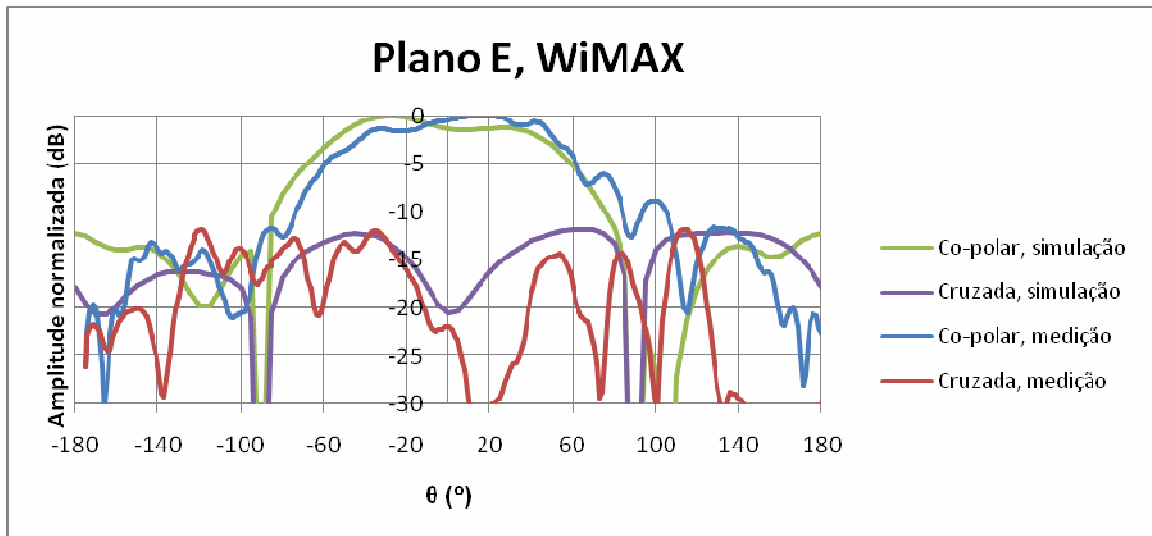
Figura 3.48. Diagramas de radiação no plano H para a frequência central da banda UMTS-TDD da antena triangular de tripla banda com interruptores ideais.



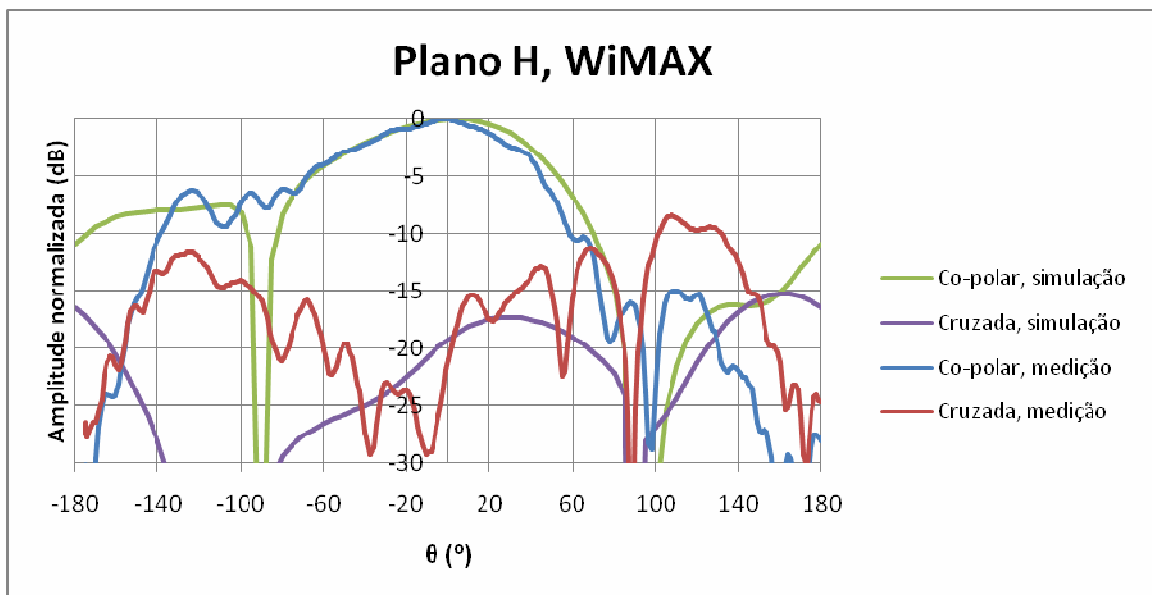
**Figura 3.49.** Diagramas de radiação no plano E para a frequência central da banda Bluetooth da antena triangular de tripla banda com interruptores ideais.



**Figura 3.50.** Diagramas de radiação no plano H para a frequência central da banda Bluetooth da antena triangular de tripla banda com interruptores ideais.



**Figura 3.51. Diagramas de radiação no plano E para a frequência central da banda WiMax da antena triangular de tripla banda com interruptores ideais.**



**Figura 3.52. Diagramas de radiação no plano H para a frequência central da banda WiMax da antena triangular de tripla banda com interruptores ideais.**

A correspondência entre a simulação e os resultados experimentais é bastante satisfatória na componente co-polar, atendendo a que o simulador não contabiliza a influência da estrutura do cabo coaxial no diagrama de radiação. Isso justifica uma diferença razoável na componente cruzada. Mas o diferencial entre a componente co-polar e a contrapolar é sempre melhor do que 13 dB o que leva a concluir que temos realmente uma polarização linear a 45°.

Nos diagramas nota-se uma redução da intensidade do campo medido em relação ao simulado para  $120^\circ < \theta < 180^\circ$  e  $-180^\circ < \theta < -120^\circ$ . Isto acontece devido ao efeito de sombra provocado pelo posicionador da antena durante a medição.

### **3.4 Conclusões**

Demonstra-se que o conceito proposto para a antena de banda tripla cortada pelo plano diagonal apresenta o comportamento esperado e pode possivelmente ser expandido para  $n$  bandas. Mas deverá haver um estudo para o alargamento das bandas de funcionamento, caso contrário não poderá ser utilizada nos serviços pretendidos. O alargamento da banda poderá, no futuro, ser obtida usando um metamaterial como plano de terra.

O conceito de antena com elementos parasitas, em que se sintoniza cada banda da mesma forma é bastante interessante pelo facto de haver a possibilidade de alargar o conceito para um número maior de bandas mantendo a geometria de base da antena e a relativa facilidade de sintonia.



## 4 Antena de tripla banda com interruptores reais

### 4.1 Objectivos

Neste capítulo estuda-se a inserção de elementos activos na antena triangular de tripla banda. Os elementos escolhidos para substituírem os interruptores ideais são os díodos PIN<sup>16</sup> porque têm boas características de comutação em RF, dimensões relativamente reduzidas e baixo custo. Após a análise do seu comportamento [1] os díodos (díodos PIN BAR50-02V da *Infineon*), Figura 4.1, foram inseridos e simulados na antena. Devido ao comportamento não ideal dos díodos, surgem efeitos indesejados que obrigam ao redimensionamento da antena de modo a voltar repor as bandas nas frequências certas.

### 4.2 Estudo do comportamento dos díodos PIN

Para caracterizar o comportamento dos díodos PIN no domínio da frequência foram realizadas medições com o objectivo de obter a sua matriz de dispersão. Foram realizadas medições da matriz de dispersão do díodo inserido numa linha *microstrip*, e da linha *microstrip* sem o díodo para depois se realizar a extracção dos parâmetros do díodo através do processo descrito em [1].

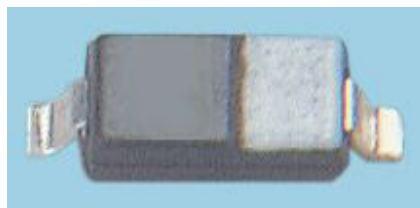


Figura 4.1. Díodo PIN BAR50-02V.

---

<sup>16</sup> Acrónimo Anglo-saxónico para “*p-type, intrinsic, n-type*”

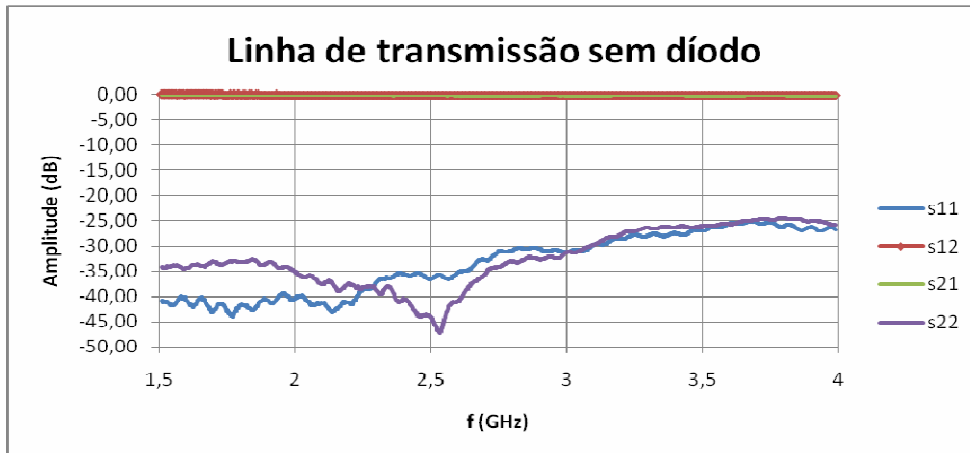


Figura 4.2. Medição das amplitudes dos parâmetros s da linha de transmissão.

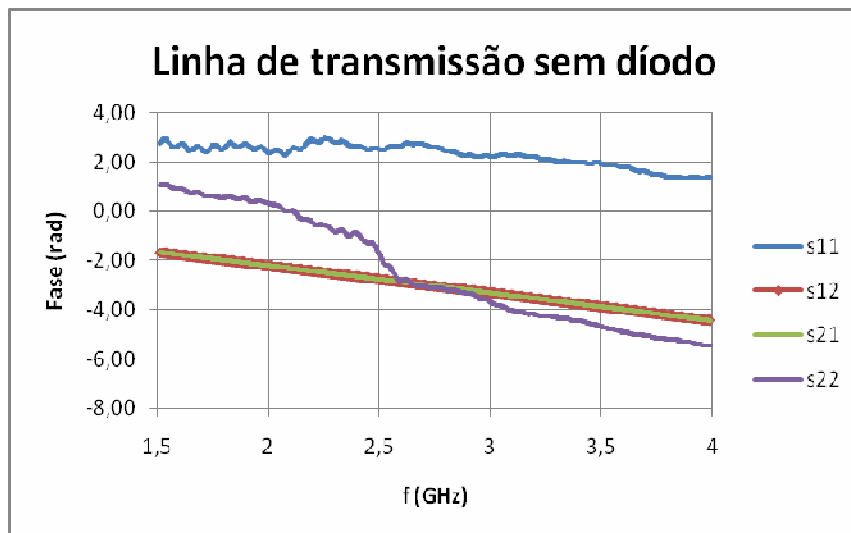


Figura 4.3. Medição das fases dos parâmetros s da linha de transmissão.

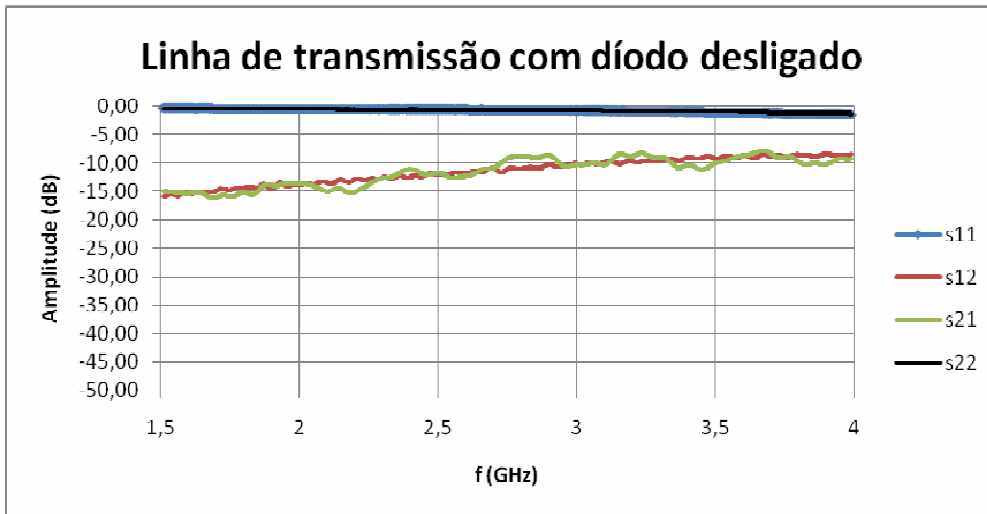


Figura 4.4. Medição das amplitudes dos parâmetros s da linha de transmissão com o díodo desligado inserido.

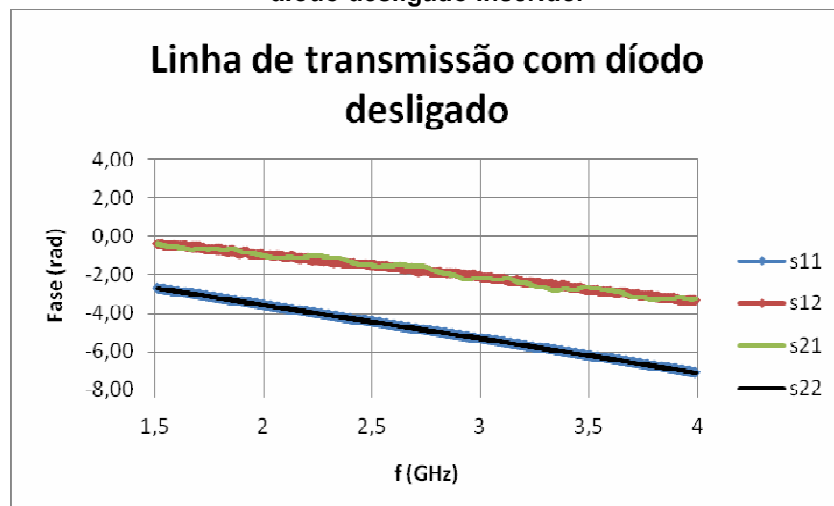


Figura 4.5. Medição das fases dos parâmetros s da linha de transmissão com o díodo desligado inserido.

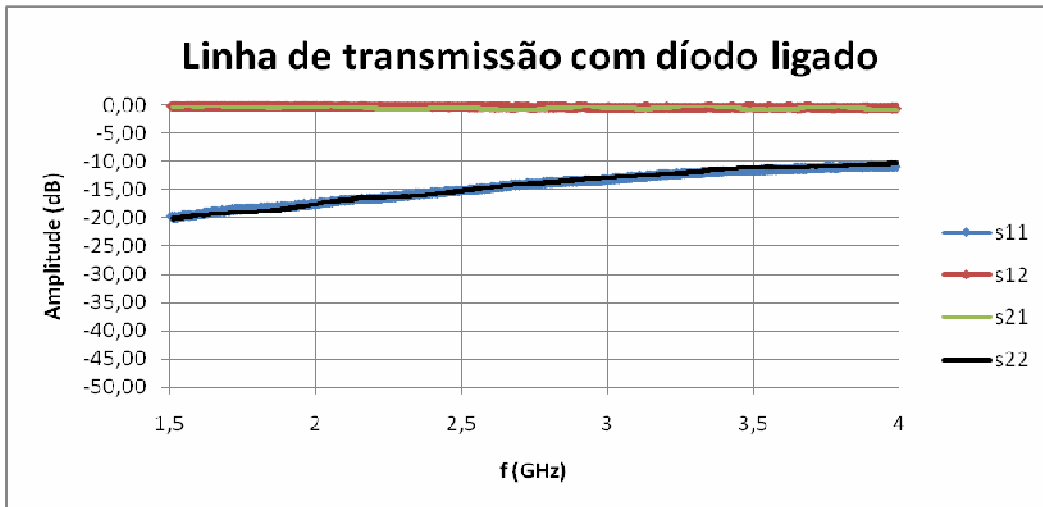


Figura 4.6. Medição das amplitudes dos parâmetros s da linha de transmissão com o diodo ligado inserido.

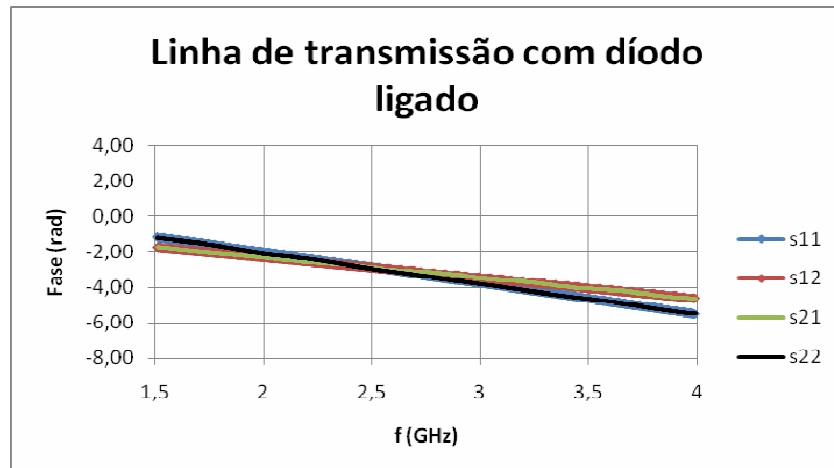


Figura 4.7. Medição das fases dos parâmetros s da linha de transmissão com o diodo ligado inserido.

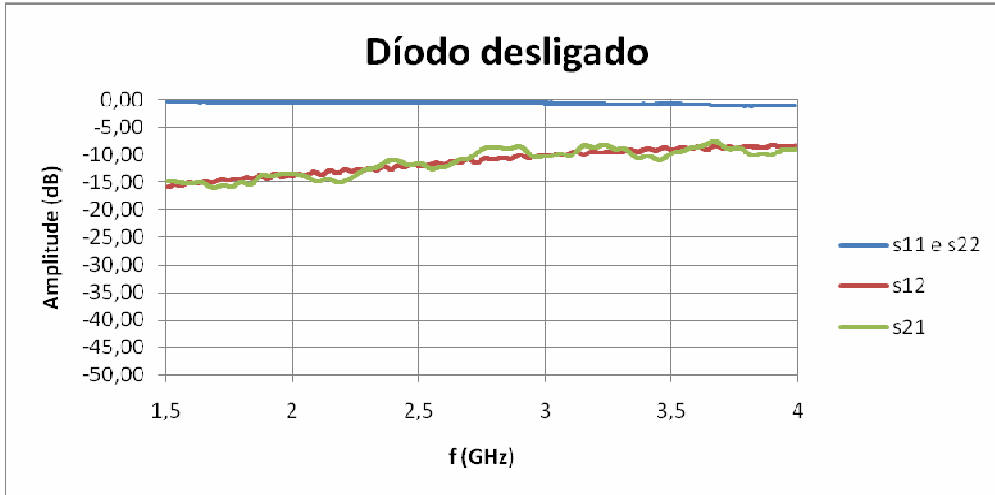


Figura 4.8. Amplitudes dos parâmetros da matriz s do díodo desligado, extraídas das medidas.

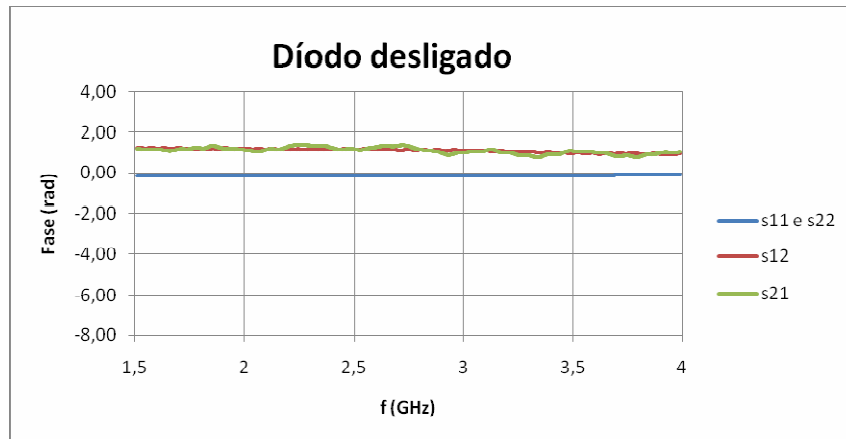


Figura 4.9. Fases dos parâmetros s do díodo desligado.

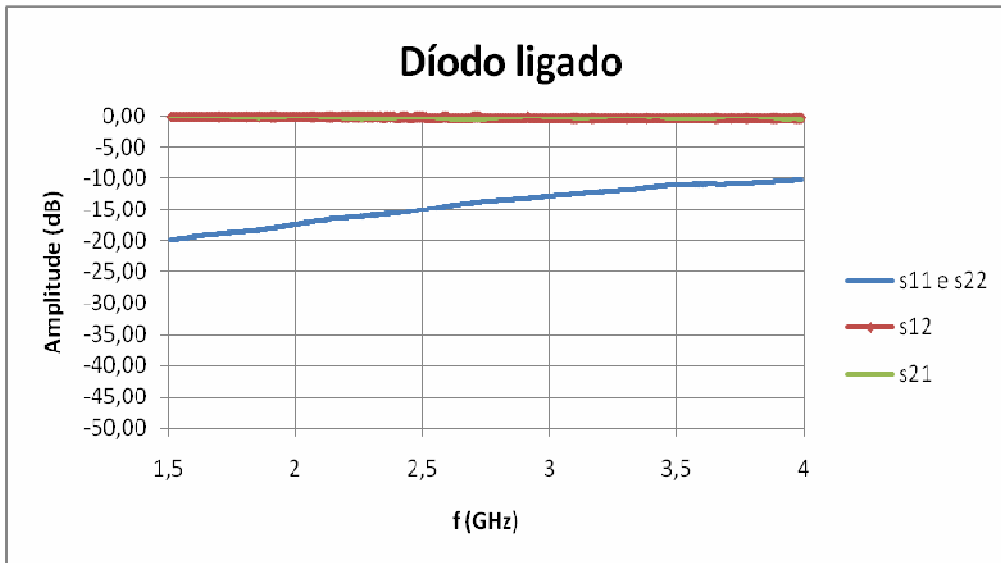


Figura 4.10. Amplitudes dos parâmetros s do díodo ligado, extraídas das medidas.

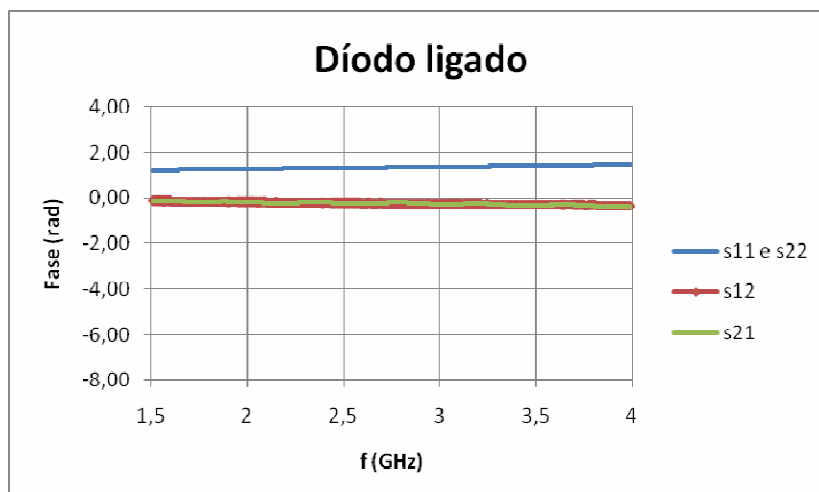
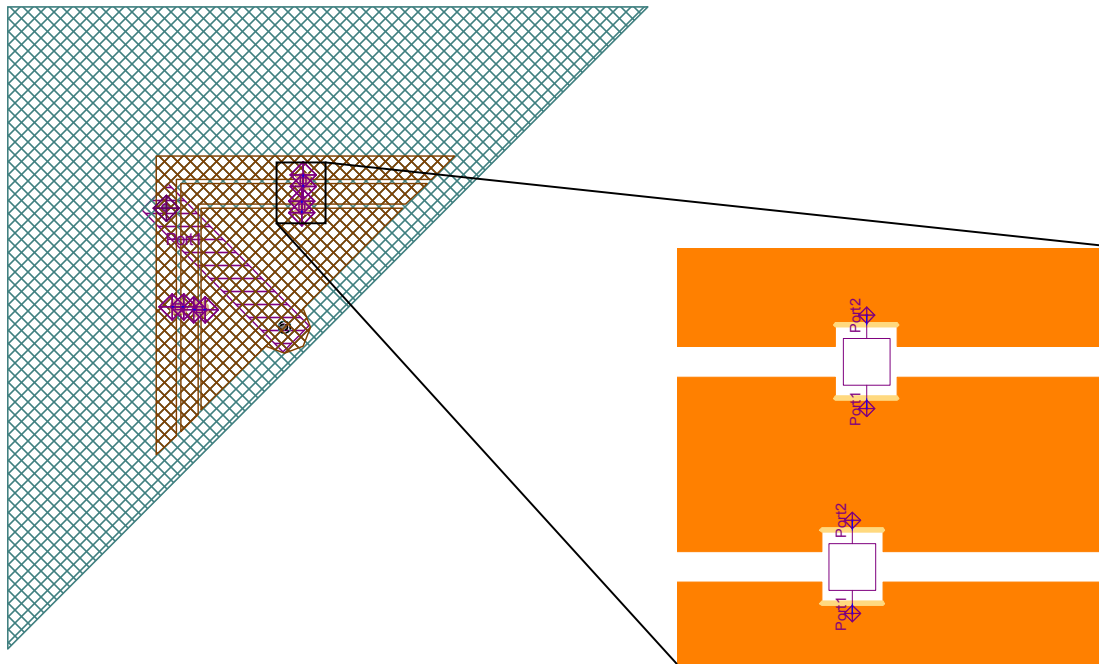


Figura 4.11. Fases dos parâmetros s do díodo ligado, extraídas das medidas.

### 4.3 Simulação da antena triangular com díodos PIN

#### 4.3.1 Descrição da antena

A antena estudada nesta secção encontra-se na Figura 4.12. Devido à influência dos díodos foi necessário reajustar as dimensões da antena para que as suas bandas de funcionamento voltassem para a coincidir com as bandas dos serviços pretendidos.



**Figura 4.12. Geometria da antena estudada (à esquerda) e detalhe dos interruptores usados na simulação (à direita) da antena triangular de tripla banda com interruptores reais.**

O planos E e H cortam o plano da antena com ângulos  $\varphi = 25^\circ$  e  $\varphi = 115^\circ$ , respectivamente, na banda UMTS-TDD; com ângulos  $\varphi = 35^\circ$  e  $\varphi = 125^\circ$  respectivamente, na banda Bluetooth, e com com ângulos  $\varphi = 30^\circ$  e  $\varphi = 120^\circ$  respectivamente, na banda WiMax.

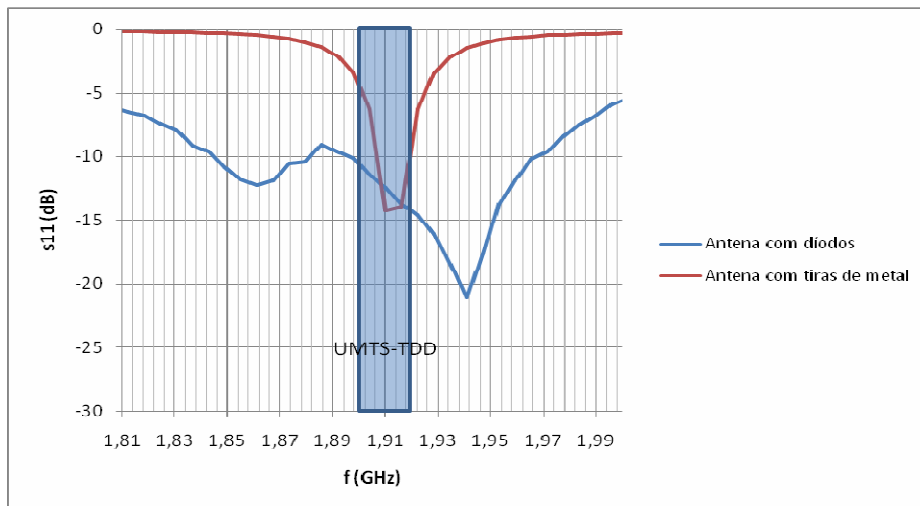
### 4.3.2 Simulação da antena

Os parâmetros da antena encontram-se na Tabela 4.1 e para se efectuar a alimentação no simulador utilizou-se o cabo coaxial EZ141-AL com raio do condutor interno de 0,46 mm e uma impedância de 50  $\Omega$ . O plano terra é um triângulo rectângulo isósceles de cobre em que os catetos medem 86,4 mm, o dieléctrico é o Rogers RT/duroid 5880 <sup>TM</sup> ( $\epsilon_r=2.2$ ) e a antena impressa é de cobre.

Lado do triângulo exterior	40,2 mm
Centro da hipotenusa do triângulo exterior	(0; 0) mm
Lado do triângulo intermédio	33,4 mm
Centro da hipotenusa do triângulo intermédio	(-0,25; -0,25) mm
Lado do triângulo interior	27,15 mm
Centro da hipotenusa triângulo interior	(-0,48; -0,48) mm
Posição da alimentação	(-2,9; -2,9) mm

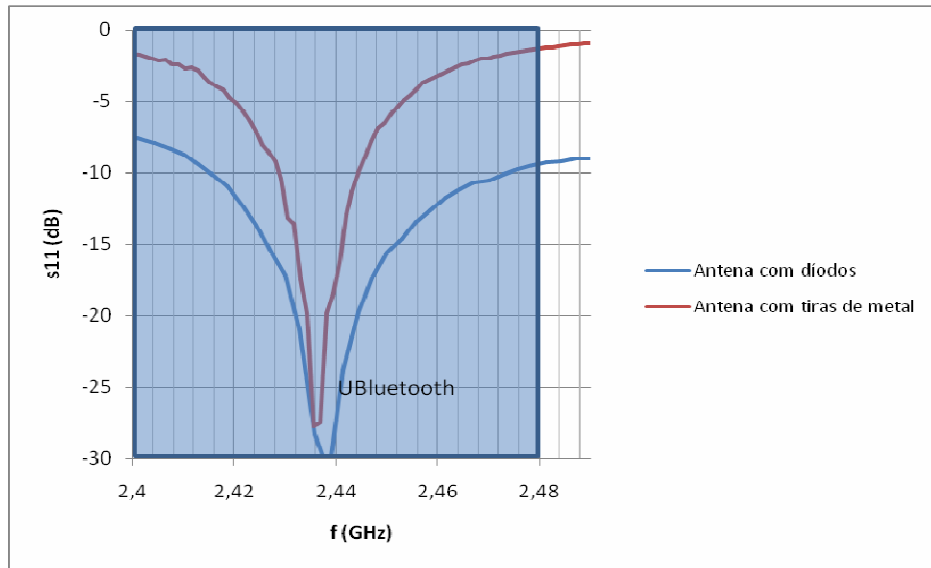
**Tabela 4.1. Dimensões da da antena triangular de tripla banda com interruptores reais.**

As perdas de retorno da antena estudada encontram-se na Figura 4.13, na Figura 4.14 e na Figura 4.15.

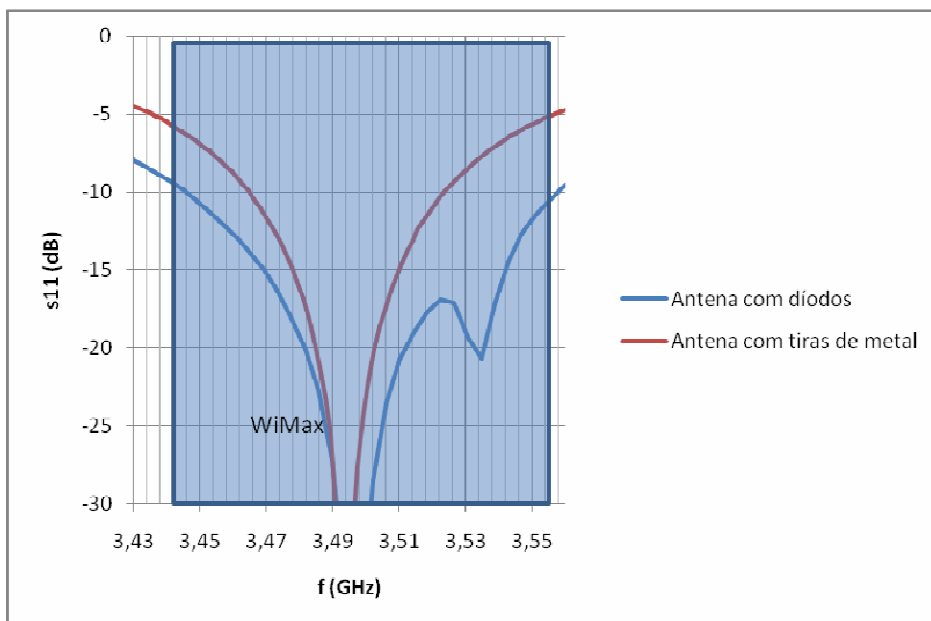


**Figura 4.13. Comparação das bandas da antena triangular de tripla banda com interruptores reais e ideais para a banda UMTS-TDD.**





**Figura 4.14. Comparação das bandas da antena triangular de tripla banda com interruptores reais e ideais para a banda Bluetooth.**



**Figura 4.15. Comparação das bandas da antena triangular de tripla banda com interruptores reais e ideais para a banda WiMax.**

Verifica-se um aumento da largura de banda nas três bandas que surge à custa de uma redução do ganho. A banda UMTS-TDD encontra-se totalmente preenchida pela banda da antena, e a banda WiMax encontra-se quase totalmente preenchida, ou seja, faltam apenas cerca de 2 MHz para o preenchimento total. No caso da banda Bluetooth ainda há necessidade de aumento da largura.

Configurações	Bandas de frequência (MHz)	f <sub>c</sub> (MHz)	Largura de banda	
			(MHz)	(%)
1, antena com interruptores ideais	1904 – 1915	1909.5	11	0,58
1, antena com interruptores reais	1897 – 1965	1931	68	3,52
2, antena com interruptores ideais	2429 – 2447	2438	18	0,74
2, antena com interruptores reais	2415 – 2473	2444	58	2,37
3, antena com interruptores ideais	3470 – 3538	3504	68	1,94
3, antena com interruptores reais	3445 – 3559	3502	114	3,26

Tabela 4.2. Comparação entre as bandas das antenas triangulares com interruptores ideais e reais.

As distribuições das amplitudes máximas da corrente na banda UMTS, Bluetooth e WiMax estão representadas na Figura 4.16, na Figura 4.17 na Figura 4.18, respectivamente. Observa-se que o comportamento da corrente está de acordo com o esperado, tal como aconteceu nas antenas das secções anteriores.

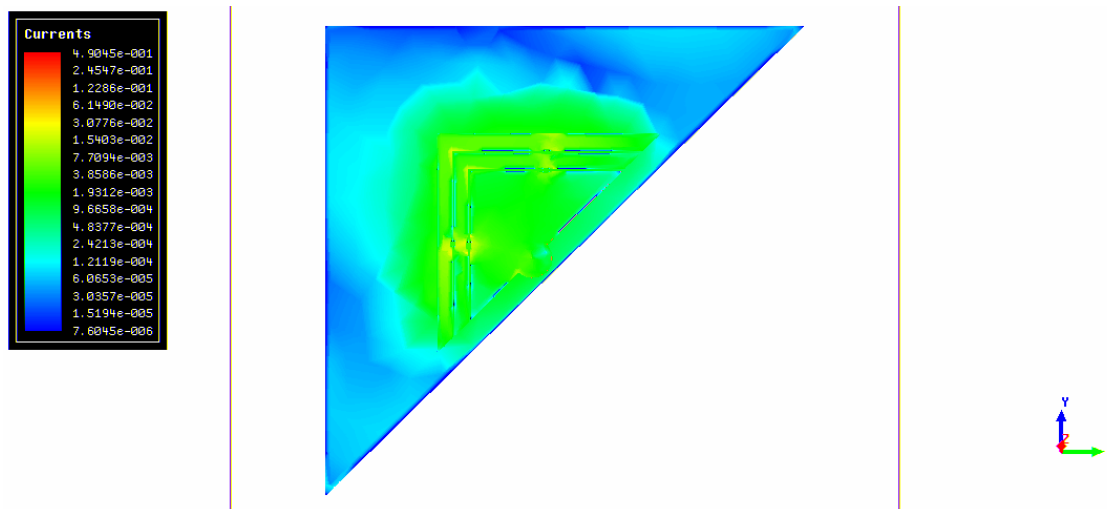


Figura 4.16. Distribuição da corrente para a frequência central da banda UMTS-TDD para a antena triangular com interruptores reais.

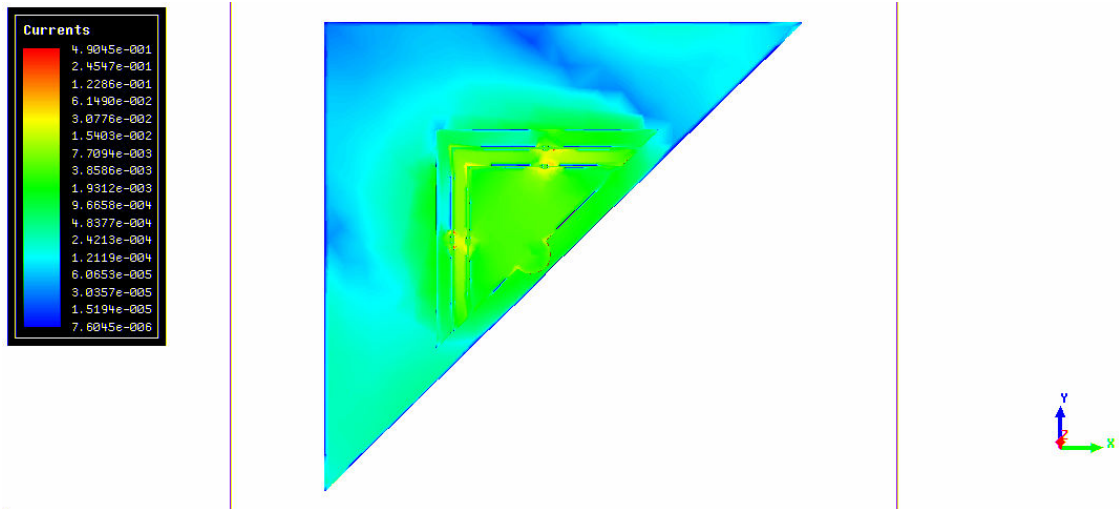


Figura 4.17. Distribuição da corrente para a frequência central da banda Bluetooth para a antena triangular com interruptores reais.

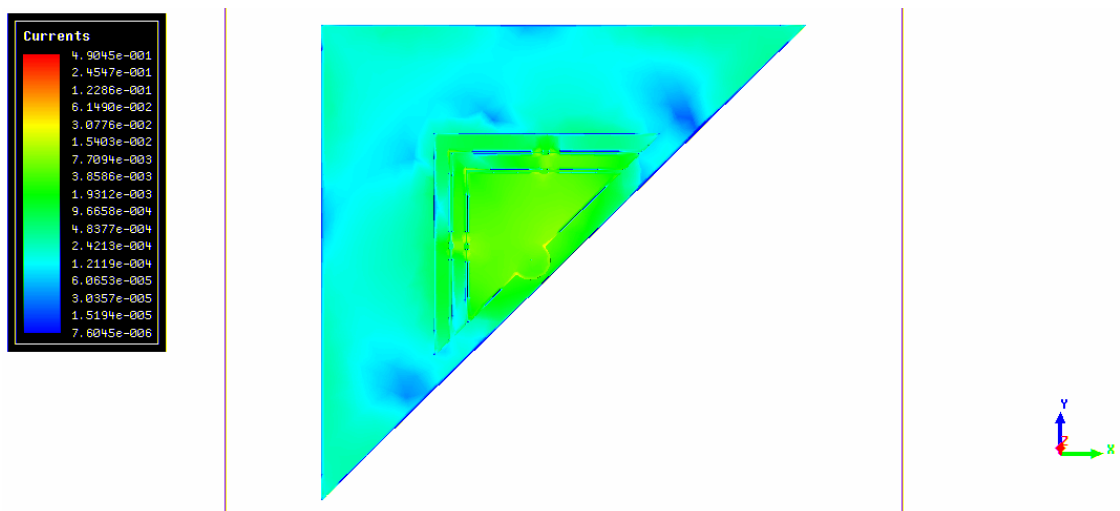


Figura 4.18. Distribuição da corrente para a frequência central da banda WiMax para a antena triangular com interruptores reais.

Os diagramas de radiação para as duas bandas em estudo encontram-se desde a Figura 4.19 até à Figura 4.24.

No plano E a largura de feixe a -3 dB corresponde a cerca de  $80^\circ$  a 1,94 GHz, e 2,44 GHz e a cerca de  $55^\circ$  a 3,5 GHz. A polarização cruzada atinge um máximo de cerca de -7,8 dB, -9,2 dB e -6,3 dB abaixo da co-polarização a 1,94 GHz, 2,44 GHz e 3,5 GHz, respectivamente. No plano H a largura de feixe é de cerca de  $125^\circ$  a 1,94 GHz,  $95^\circ$  a 2,44 GHz e  $85^\circ$  a 3,5 GHz. Neste caso a polarização cruzada atinge um máximo de -11,6 dB abaixo da co-polarização a 1,94 GHz, -14 dB a 2,44 GHz e -11,1 dB a 3,5 GHz.

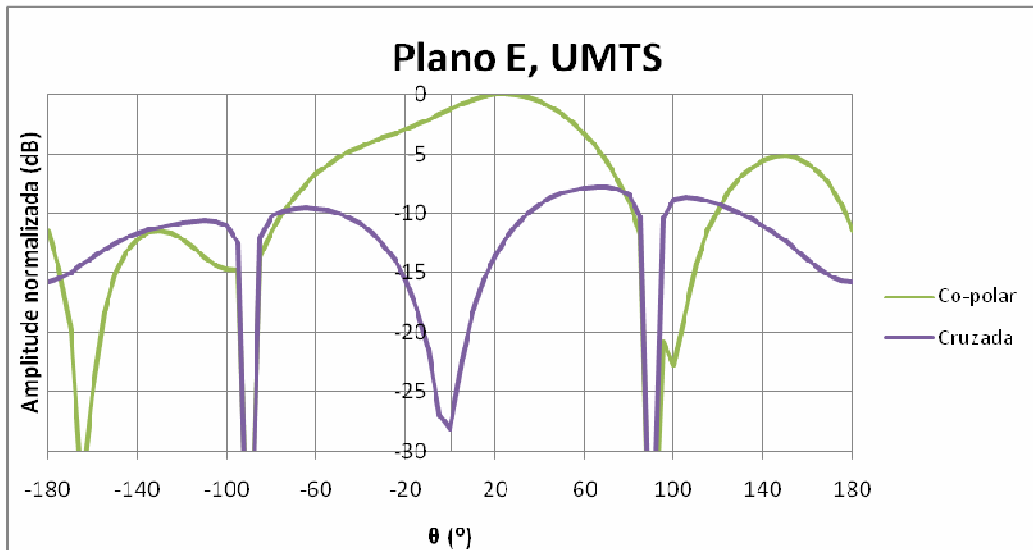


Figura 4.19. Diagramas de radiação no plano E para a frequência central da banda UMTS-TDD para a antena triangular com interruptores reais.

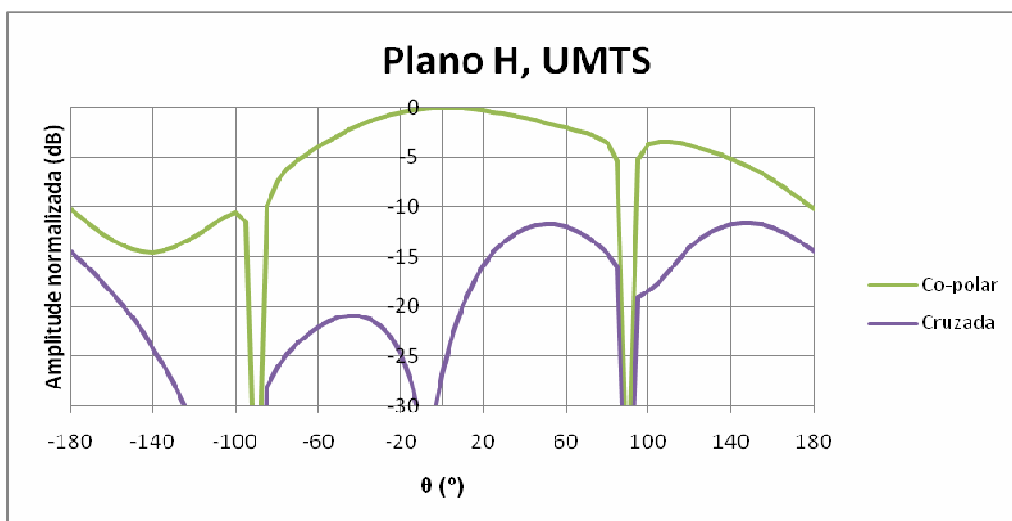


Figura 4.20. Diagramas de radiação no plano H para a frequência central da banda UMTS-TDD para a antena triangular com interruptores reais.

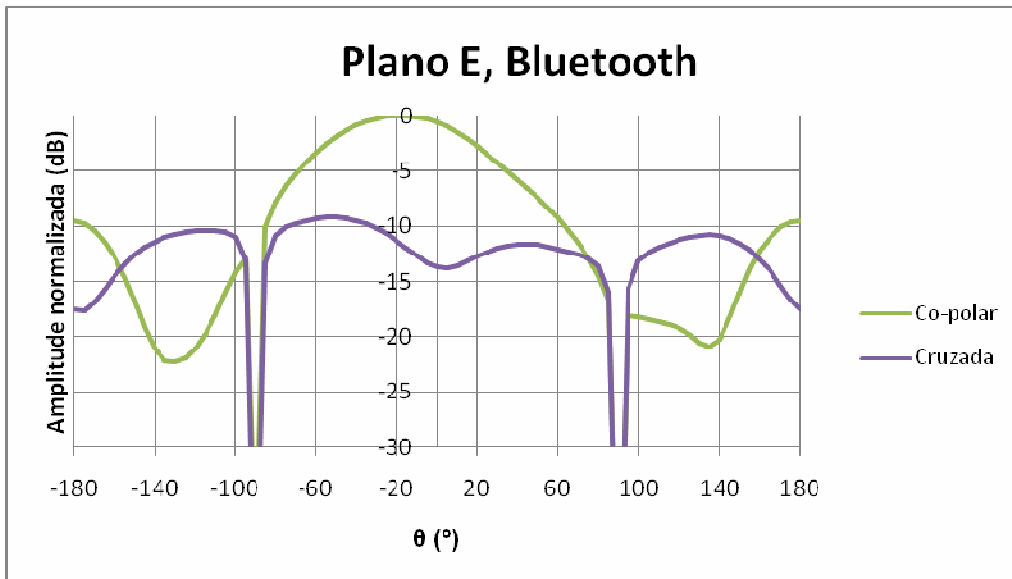


Figura 4.21. Diagramas de radiação no plano E para a frequência central da banda Bluetooth para a antena triangular com interruptores reais.

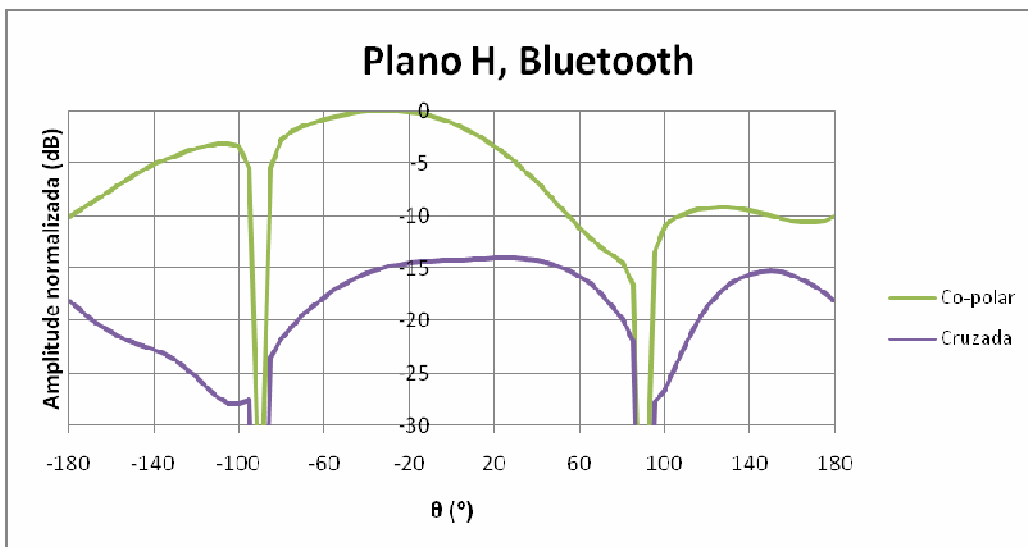


Figura 4.22. Diagramas de radiação no plano H para a frequência central da banda Bluetooth para a antena triangular com interruptores reais.

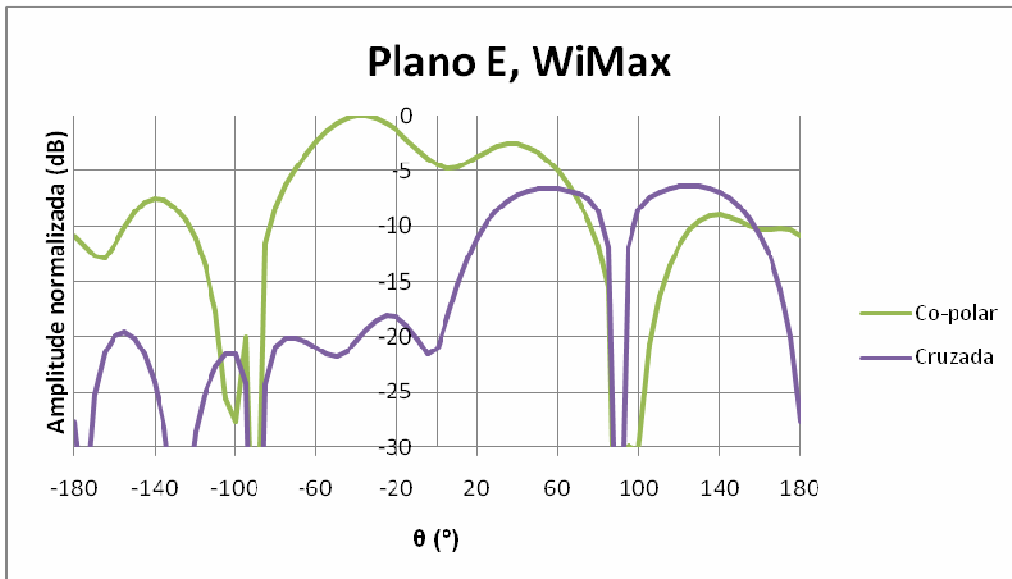


Figura 4.23. Diagramas de radiação no plano E para a frequência central da banda WiMax para a antena triangular com interruptores reais.

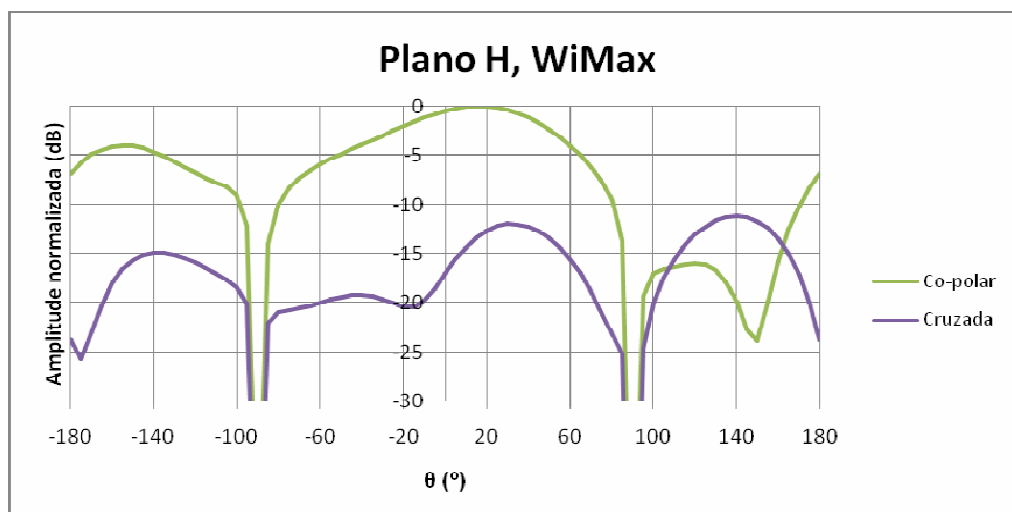


Figura 4.24. Diagramas de radiação no plano H para a frequência central da banda WiMax para a antena triangular com interruptores reais.

### 4.3.3 Comparação dos ganhos das antenas

Na Tabela 4.3 encontra-se a comparação dos ganhos das antenas triangulares com interruptores reais e ideais. Observa-se que o aumento da largura de banda obtido com a inserção dos díodos foi conseguido à custa das perdas introduzidas pelos díodos que causam uma diminuição da eficiência da antena. A diferença dos ganhos deve-se, para além das perdas nos díodos, a uma diminuição da directividade da antena que acontece ao introduzir os díodos.

	Antena com tiras de metal	Antena com díodos
Configuração 1	4,20	-3,80
Configuração 2	5,15	0,52
Configuração 3	5,14	5,66

**Tabela 4.3. Comparação dos ganhos (em dB) obtidos por simulação da antena triangular com tiras de metal e da antena triangular com díodos.**

#### **4.4 Conclusões**

Neste capítulo estudou-se a inserção de díodos PIN como interruptores na antena reconfigurável de tripla banda e conclui-se que a transição de interruptores ideais para reais leva a uma certa alteração nas bandas da antena. Por isso estas simulações são imprescindíveis antes de se realizar a fabricação do protótipo com interruptores reais.

Houve um grande aumento da banda UMTS-TDD, estando esta agora totalmente preenchida. A banda Bluetooth também foi aumentada mas ainda não preenche as especificações, e terá de haver no futuro um estudo para o seu aumento. A banda WiMax encontra-se quase totalmente preenchida.

## 5 Conclusões

Nesta tese estudou-se a viabilidade de conjugar o conceito de antenas reconfiguráveis de banda tripla com uma estratégia de redução de dimensões da antena. Para testar se o novo conceito de redução da área das antenas (que consiste em cortar a antena pelo seu eixo de simetria) é válido foram testadas três geometrias básicas: o quadrado, o triângulo e o círculo. Os resultados foram satisfatórios, obtendo-se reduções para aproximadamente metade das áreas das antenas embora com alguma penalização do isolamento entre as duas componentes ortogonais da polarização.

A partir do estudo anterior em que uma antena impressa convencional era enquadrada por um elemento parasita para funcionamento em dupla banda, foi estendido o conceito para uma antena de tripla banda. Confirmado o seu funcionamento, passou-se à estrutura que deriva desta por corte ao longo da diagonal que contém a alimentação. Depois de otimizada a estrutura, esta foi fabricada e medida usando um modelo ideal para os interruptores em que o estado “ligado” corresponde a uma fina tira metálica unindo os dois portos do “interruptor”. Os resultados experimentais confirmaram as simulações feitas para as mesmas condições, ficando validado o conceito proposto.

As simulações foram repetidas, substituindo os interruptores ideais por outros representados pelas matrizes de dispersão medidas no Laboratório. Também neste caso a antena apresenta-se viável, havendo mesmo uma melhoria da largura de banda em cada uma das três bandas de funcionamento, mas à custa da redução no ganho na antena por dissipação nos díodos. Não foi possível realizar o modelo experimental correspondente a esta parte do trabalho.

O trabalho futuro para este projecto consiste em substituir os díodos PIN por interruptores com melhor isolamento e melhores perdas de inserção e que apresentam, de uma forma geral melhores características de comutação, os denominados RF MEMS. Também se pretende que a banda *Bluetooth*, seja cumprida na totalidade.

Pode-se dizer que um dos objectivos deste trabalho foi conseguido, dado que se obteve uma nova antena de tripla banda, mas o objectivo de construir um protótipo experimental com elementos activos ficou por alcançar. Em compensação surgiu um novo conceito de miniaturização que pode ser explorado em outras configurações de antenas.



# Anexo

## A. Antena com plano de terra pequeno

É possível reduzir o tamanho do plano de terra até uma dimensão muito próxima da dimensão da antena.

Com o ajuste das dimensões obtém-se um comportamento muito próximo do obtido com o plano de terra grande. O protótipo foi construído com o plano de terra grande para evitar interferência por parte do cabo coaxial.

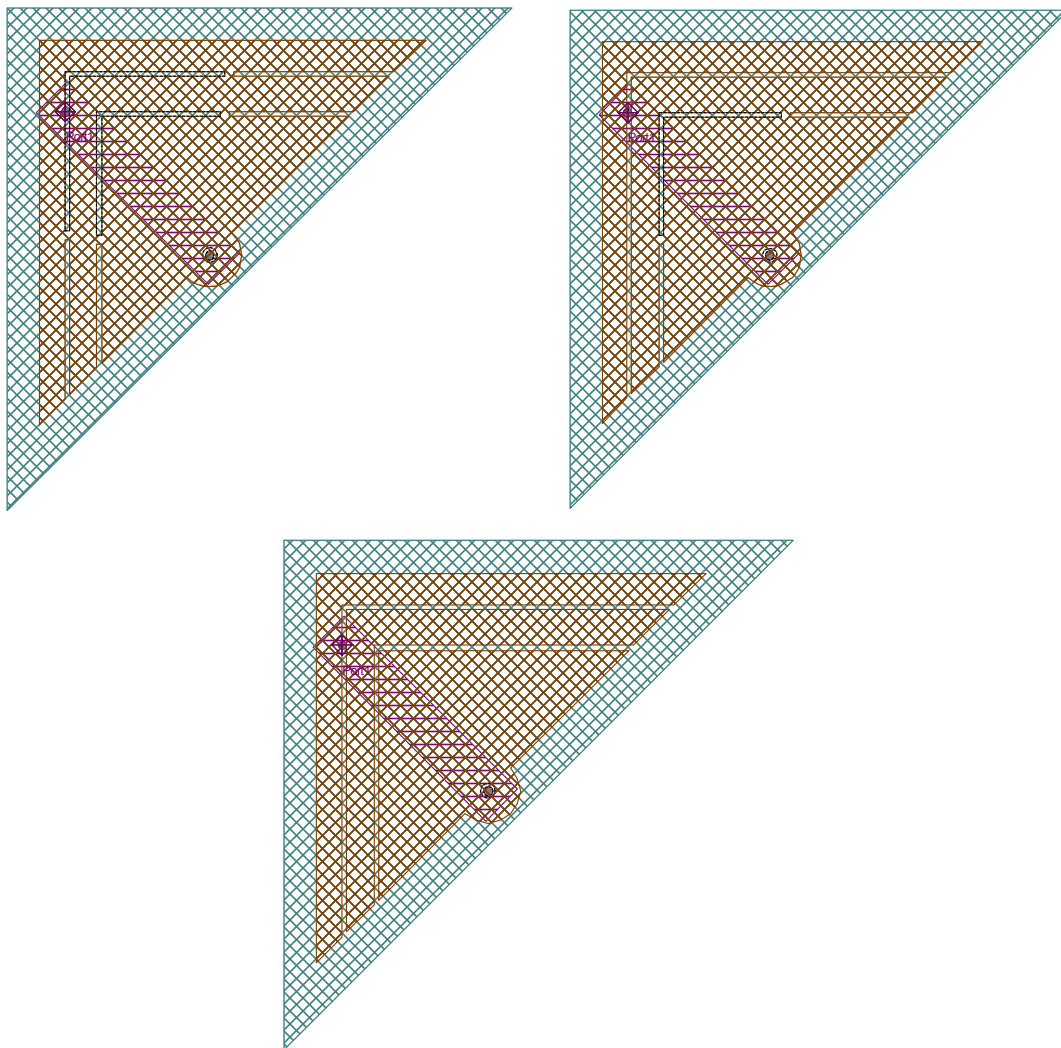
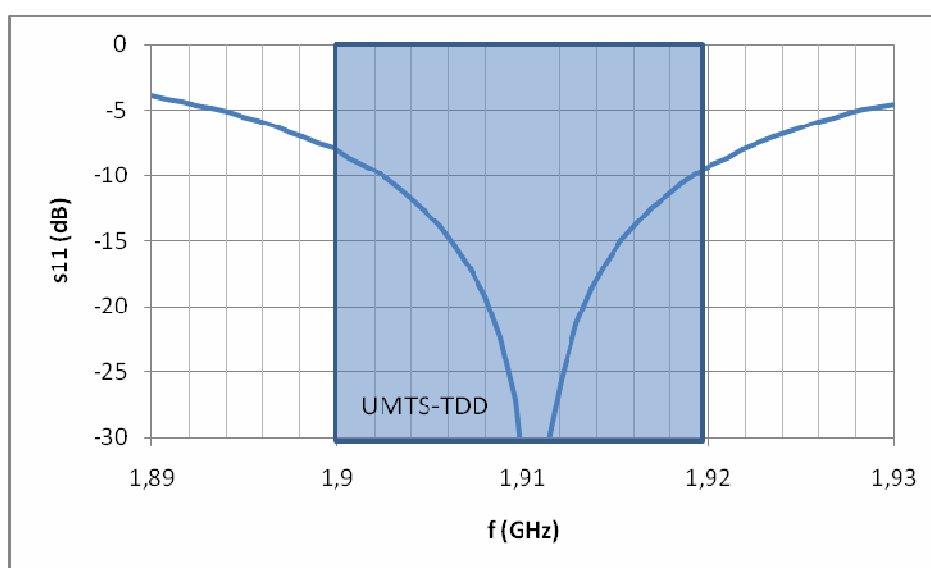


Figura A.1. Configurações da antena triangular com plano de terra pequeno: em cima à esquerda – configuração 1, em cima, à direita – configuração 2, e em baixo – configuração

3.

Lado do triângulo exterior	42,85 mm
Centro da hipotenusa do triângulo exterior	(0; 0) mm
Lado do triângulo intermédio	35,5 mm
Centro da hipotenusa do triângulo intermédio	(-0,34; -0,34) mm
Lado do triângulo interior	27,5 mm
Centro da hipotenusa triângulo interior	(-0,8; -0,8) mm
Posição da alimentação	(-2,55; - 2,55) mm

**Tabela A.1. Dimensões da antena triangular com plano de terra pequeno.**



**Figura A.2. Banda UMTS-TDD da antena triangular com plano de terra pequeno.**

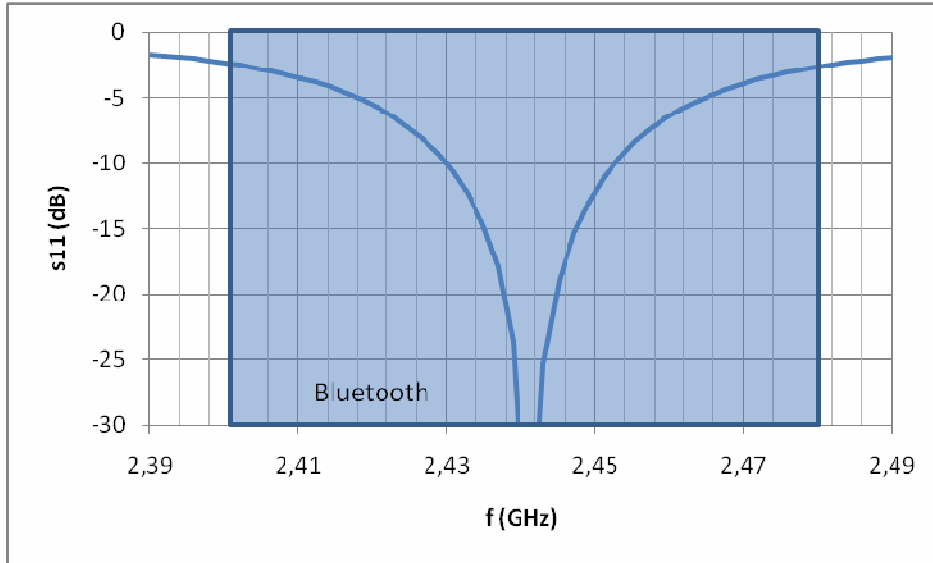


Figura A.3. Banda Bluetooth da antena triangular com plano de terra pequeno.

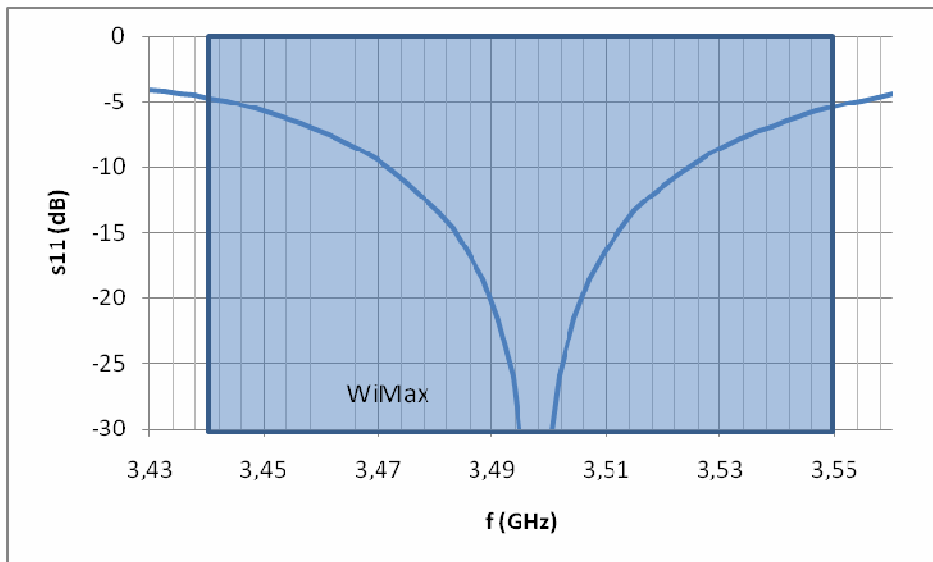


Figura A.4. Banda WiMax da antena triangular com plano de terra pequeno.

	Bandas de frequência (MHz)	f <sub>c</sub> (MHz)	Largura de banda	
			(MHz)	(%)
<b>UMTS – TDD (banda inferior)</b>	1900-1920	1910	20	1,05
<b>Configuração 1</b>	1902 – 1919	1910,5	17	0,89
<b>Bluetooth IEEE 802.11b</b>	2400-2483,5	2441,75	83,5	3,42
<b>Configuração 2</b>	2430 – 2452	2441	22	0,9
<b>WiMax IEEE 802.16e</b>	3443-3457 + 3543-3557	3500	114	3,26
<b>Configuração 3</b>	3472 – 3525	3498,5	53	1,51

**Tabela A.2. Comparação dos objectivos e resultados da antena triangular com plano de terra pequeno.**

Com a redução do plano de terra houve alterações nas bandas, sendo a banda superior a mais prejudicada. Porém o seu comportamento é aceitável, e dada a redução de tamanho já poderia ser implementada num telemóvel.

## Bibliografia

[1] Ana Matilde Castela, Carla Medeiros.

Trabalho Final de curso: "Antenas Reconfiguráveis para Multi-serviços".

[2] Martinez-Vazquez, M.; Litschke, O.; Geissler, M.; Heberling, D.; Martinez-Gonzalez, A.M.; Sanchez-Hernandez, D.

"Integrated planar multiband antennas for personal communication handsets".

Antennas and Propagation, IEEE Transactions on.

Volume 54, Issue 2, Part 1, Feb. 2006 Page(s):384 – 391.

[3] Nanbo, Jin, Yang, F., Rahmat-Samii, Y.

"A Novel Reconfigurable Patch Antenna with both frequency and polarization diversities for wireless communication".

Antennas and Propagation Society International Symposium, 2004,IEEE, Vol. 2, 20-25 June 2004, pp.1796 – 1799.

[4] Jin, N.; Fan Yang; Rahmat-Samii, Y.

"A novel patch antenna with switchable slot (PASS): dual-frequency operation with reversed circular polarizations".

Antennas and Propagation, IEEE Transactions on.

Volume 54, Issue 3, March 2006 Page(s):1031 – 1034.

[5] Shynu, S. V., Augustin, G., Aanandan, C. K., Mohanan, P., Vasudevan, K.

"Development of a varactor-controlled dual-frequency reconfigurable microstrip antenna".

*Microwave and Optical Technology Letters*, Vol.46, No. 4, 20 August 2005, pp.375-377 .

[6] Simons, R.N.; Donghoon Chun; Katehi, L.P.B.

"Polarization reconfigurable patch antenna using microelectromechanical systems (MEMS) actuators".

Antennas and Propagation Society International Symposium, 2002. IEEE.

Volume 2, 16-21 June 2002 Page(s):6 - 9 vol.2.

[7] Gao, S.; Sambell, A.; Zhong, S.S.

"Polarization-agile antennas".

Antennas and Propagation Magazine, IEEE.

Volume 48, Issue 3, June 2006 Page(s):28 – 37.

[8] Sung, Y.J., Kim, B.Y., Jang, T.U., Kim, Y.-S.

“Switchable triangular microstrip patch antenna for dual-frequency operation”.

Antennas and Propagation Society International Symposium, 2004. IEEE, Vol. 1, 20-25 June 2004, pp. 265 – 268.

[9] Onat, S., Alatan, L., Demir, S., Unlu, M., Akin, T.

“Design of a Re-Configurable Dual Frequency Microstrip Antenna with Integrated RF MEMS Switches”.

Antennas and Propagation Society International Symposium, 2005. IEEE, Vol. 2A, 3-8 July, pp. 384 – 387.

[10] Lee, A.W.M., Kagan, S.K., Wong, M., Singh, R.S., Brown, E.R.

“Measurement and FEM modeling of a reconfigurable-patch antenna for use in the wideband gapfiller satellite system”.

Antennas and Propagation Society International Symposium, 2003. IEEE, Vol. 1, 22-27 June 2003, pp. 379 – 382.

[11] Liu, S., Lee, M., Jung, C., Li, G.P., Flaviis, F.

“A Frequency-Reconfigurable Circularly Polarized Patch Antenna by Integrating MEMS Switches”.

Antennas and Propagation Society International Symposium, 2005. IEEE, Vol. 2A, 3-8 July, pp. 413 – 416.

[12] Simons, R.N.; Donghoon Chun; Katehi, L.P.B.

“Reconfigurable array antenna using microelectromechanical systems (MEMS) actuators”.

Antennas and Propagation Society International Symposium, 2001. IEEE.

Volume 3, 8-13 July 2001 Page(s):674 - 677 vol.3.

[13] F. Yang and Y. Rahmat-Samii.

“Switchable dual-band circularly polarised patch antenna with single feed”.

Electronics Letters.

Volume 37, Issue 16, 2 Aug. 2001 Page(s):1002 – 1003.

[14] Xue-Song Yang; Bing-Zhong Wang; Yong Zhang.

“A reconfigurable Hilbert curve patch antenna”.

Antennas and Propagation Society International Symposium, 2005 IEEE.  
Volume 2B, 3-8 July 2005 Page(s):613 - 616 vol. 2B.

[15] R. Al-Dahleh, C. Shafai, L. Shafai.

“Frequency-agile microstrip patch antenna using a reconfigurable MEMS ground plane”.  
Microwave and Optical Technology Letters.

Volume 43, Issue 1, Date: 5 October 2004, Pages: 64 – 67.

[16] Onat, S.; Alatan, L.; Demir, S.

“Design of triple-band reconfigurable microstrip antenna employing RF-MEMS switches”.

Antennas and Propagation Society International Symposium, 2004. IEEE.

Volume 2, 20-25 June 2004 Page(s):1812 - 1815 Vol.2.

[17] Feldner, L.M.; Nordquist, C.D.; Christodoulou, C.G.

“RF MEMS reconfigurable triangular patch antenna”.

Antennas and Propagation Society International Symposium, 2005 IEEE.

Volume 2A, 3-8 July 2005 Page(s):388 - 391 vol. 2A.

[18] Manimegalai, B.; Periyasamy, V.; Vishwanathan, L.; Raju, S.; Abhaikumar, V.

“A novel MEMS based fractal antenna for multiband wireless applications”.  
Microwave Conference Proceedings, 2005. APMC 2005. Asia-Pacific Conference Proceedings.

Volume 2, 4-7 Dec. 2005 Page(s):3 pp.

[19] Chang, B.C.C.; Qian, Y.; Itoh, T.

“A reconfigurable leaky mode/patch antenna controlled by PIN diode switches”.

Antennas and Propagation Society International Symposium, 1999. IEEE.

Volume 4, 11-16 July 1999 Page(s):2694 - 2697 vol.4.

[20] Qian, Y.; Chang, B.C.C.; Chang, M.F.; Itoh, T.

“Reconfigurable leaky-mode/multifunction patch antenna structure”.

Electronics Letters.

Volume 35, Issue 2, 21 Jan. 1999 Page(s):104 – 105.

[21] Kunda, V.K.; Ali, M..

“Reconfigurable stacked patch antenna for satellite and terrestrial applications”.

Wireless Communication Technology, 2003. IEEE Topical Conference on.

15-17 Oct. 2003 Page(s):152 – 153.



- [22] Xue-Song Yang; Bing-Zhong Wang; Weixia Wu.  
“Pattern reconfigurable patch antenna with two orthogonal quasi-Yagi arrays”.  
Antennas and Propagation Society International Symposium, 2005 IEEE.  
Volume 2B, 3-8 July 2005 Page(s):617 - 620 vol. 2B.
- [23] Yong Zhang; Bing-Zhong Wang; Xue-Song Yang; Weixia Wu.  
“A fractal Hilbert microstrip antenna with reconfigurable radiation patterns”.  
Antennas and Propagation Society International Symposium, 2005 IEEE.  
Volume 3A, 3-8 July 2005 Page(s):254 - 257 vol. 3A.
- [24] Weedon, W.H., Payne, W.J., Rebeiz, G.M.  
“MEMS-switched reconfigurable antennas”.  
Antennas and Propagation Society International Symposium, 2001. IEEE. Vol. 3, 8-13 July 2001,  
pp. 654 – 657.
- [25] Cetiner, B.A., Jafarkhani, H., Jiang-Yuan Qian, Hui Jae Yoo, Grau, A., De Flaviis, F.  
“Multifunctional reconfigurable MEMS integrated antennas for adaptive MIMO systems”.  
*Communications Magazine, IEEE*, Vol. 42, No. 12, Dec. 2004, pp.62 – 70..
- [26] Yujiang Wu; Nie Zaiping.  
“A novel compact multi-antenna design for handheld terminals”.  
Antennas and Propagation Society International Symposium, 2005 IEEE. Page(s): 446- 449 vol.  
2A.
- [27] Rose, J.; Roy, L.; Tait, N.  
“Development of a MEMS microwave switch and application to adaptive integrated antennas”.  
Electrical and Computer Engineering, 2003. IEEE CCECE 2003. Canadian Conference on.  
Volume 3, 4-7 May 2003 Page(s):1901 - 1904 vol.3.
- [28] Shafai, C.; Shafai, L.; Al-Dahleh, R.; Chrusch, D.D.; Sharma, S.K.  
“Reconfigurable ground plane membranes for analog/digital microstrip phase shifters and  
frequency agile antenna”.  
MEMS, NANO and Smart Systems, 2005. Proceedings. 2005 International Conference on.  
24-27 July 2005 Page(s):287 – 289.

[29] Jung, M., Kim, Y., and Lee, B..  
“Dual frequency meandered PIFA for Bluetooth and WLAN applications”.  
IEEE AP-S Int. Symp., Columbus, OH, USA, 2003.

