



**Universidade da Madeira
Centro de Competência de Ciências Exatas e da
Engenharia**

Controlo do Diagrama de Radiação em meios com Desvanecimento

Juan Carlos de Abreu Bort

Dissertação submetida à Universidade da
Madeira para a obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia de Telecomunicações e Redes

Orientador: Prof. Joaquim Amândio Rodrigues Azevedo

2016

Resumo

O principal objetivo desta dissertação de mestrado foi o estudo de várias soluções de modo a controlar o diagrama de radiação de um agrupamento de antenas em meios com desvanecimento. Inicialmente obtiveram-se os parâmetros essenciais das antenas utilizadas, nomeadamente o diagrama de radiação e o ganho. Desenvolveu-se um sistema para medir os diagramas de radiação de forma automática e com uma resolução abaixo de 2° através de um servo motor. Uma aplicação implementada em MatLab realiza o controlo do motor e desenha o diagrama de radiação em tempo real.

Para as medições realizadas na câmara anecoica, bem como para as medições de propagação do sinal no meio com vegetação, desenvolveu-se um sistema que interliga a antena recetora com o computador portátil de forma a obter os valores de potência do analisador de espectro.

Tendo-se o conhecimento dos parâmetros das antenas, realizaram-se as medições no meio com vegetação, caracterizado por troncos e folhas no percurso da propagação do sinal. Foram realizadas medições para 5 distâncias diferentes 20, 40, 60, 80 e 100 metros com ganhos a variar desde os 3 até os 15,6 dBi. As medições foram realizadas com uma antena monopolo como emissora para uma frequência de 2,42 GHz.

Através dos resultados obtidos aferiu-se um aumento da atenuação à medida que se passa por meios mais obstruídos, sendo que para a distância de 20 metros os diagramas obtidos aproximam-se aos diagramas obtidos na situação de espaço livre. Também verificou-se para as distâncias de 60, 80 e 100 metros um grande aumento da atenuação à medida que o ganho da antena recetora aumenta. Desta forma, o melhor tipo de antena para estas distâncias podem ser as antenas omnidirecionais devido a que conseguem receber maior potência em relação às antenas diretivas.

Foram estudadas várias topologias de deslocadores de fase, bem como algumas soluções que derivam da mesma. De modo a controlar o diagrama de radiação desenvolveu-se um sistema de comunicação mecânico e um eletrónico, para uma frequência de operação de 2,42 GHz. O sistema de comunicação mecânico é constituído para um motor de passo e uma antena suspensa, sendo o controlo do mesmo realizado através de um microcontrolador. O sistema de comunicação eletrónico é constituído por um agrupamento de 4 antenas suspensas ligadas a uma malha de alimentação. O estado de ativação de cada antena é realizado através de díodos PIN os quais são controlados por um microcontrolador. Os sistemas foram testados de forma a avaliar o seu desempenho, sendo que o sistema mecânico apresentou menor perdas de inserção em relação ao sistema eletrónico.

Palavras-chaves: Propagação do sinal, ganho, diagrama de radiação, deslocadores de fase, malha de alimentação.

Abstract

The main objective of this master's thesis was the study of various solutions in order to control the radiation pattern of an antenna array in environments with fading. Initially it was obtained the essential parameters of the used antennas, namely the radiation pattern and the gain. It was developed a system capable of automatically measuring the radiation pattern using a *servo motor*. An application implemented in MatLab performs the control of the engine and draws the radiation pattern in real time.

For measurements performed in an anechoic chamber as well as the signal propagation in environments with vegetation, a system was developed to connect the receiver antenna with the laptop in order to obtain the power values of the spectrum analyzer.

Having the knowledge of the parameters of the antennas it was held measurements in environment with vegetation characterized by trunks and leaves the in order to check the propagation signal path. Measurements were performed for five different distances 20, 40, 60, 80 and 100 meters with gain varying from 3 to 15,6 dBi. Measurements were made with a monopole antenna and emitting at a frequency of 2,42 GHz

The results obtained showed an increase of attenuation as it passes through more clogged environment, and for the 20 meters distance the diagrams obtained are similar to the diagrams obtained in the free space situation. Also it appears that for the distances of 60, 80 and 100 meters a large attenuation increase as the gain of the receiver antenna increases. Thus, the best type of antennas is the omnidirectional because they can receive more power in relation to the directive antennas.

Various topologies of phase shifters were studied and some solutions were derived. In order to control the radiation pattern it was developed a mechanical and an electronic communication system, for the 2,42 GHz frequency.

The mechanical communication system is constituted by a step motor and a suspended antenna, and its control is performed by a microcontroller. The electronic communication system comprises four suspended antennas connected to a power grid. Each antenna activation state is accomplished by PIN diodes which are controlled by a microcontroller. The systems were tested to assess their performance, and the mechanical system presented lower insertion losses in relation to the electronic system.

Keywords: Signal Propagation, gain, radiation pattern, phase shifters, power mesh

Agradecimentos

A realização deste trabalho representa, para mim, mais uma etapa alcançada na minha vida, na qual não seria possível sem o contributo de algumas pessoas importante para mim, que aproveito para agradecer:

Em primeiro lugar quero agradecer aos meus pais, as pessoas mais importantes na minha vida, mesmo estando longe de mim sempre estiveram presentes com seu amor, apoio, conselhos, e por cada telefonema realizado para me incentivarem a concluir meu percurso académico.

As minhas irmãs, que apesar de estarem longe de mim, sempre me apoiaram.

Ao professor Doutor Joaquim Amândio Azevedo, orientador deste trabalho, por todo o apoio, ajuda, paciência, conhecimentos, e disponibilidade em ajudar e aconselhar ao longo não só deste trabalho mas do percurso académico.

A minha namorada Vanessa Nascimento, por todo o amor, carinho, paciência, apoio, força, motivação e ajuda prestada ao longo do percurso académico.

Ao engenheiro Filipe Santos, pelos conselhos, ajuda e disponibilidade que permitiram-me ultrapassar diversos obstáculos na realização deste trabalho.

Aos meus amigos, em especial, Yasmina Chatterley, bem como ao Diogo Gouveia, Beto Silva, Jorge Lopes, Fábio Mendonça e Victor Pinto, por toda a sua ajuda e conhecimentos partilhados.

Índice

1	Introdução.....	1
1.1	Motivação	1
1.2	Objetivos.....	2
1.3	Estrutura	2
2	Estado da arte	3
2.1	Modelos de propagação	3
2.1.1	Modelos de propagação para meios urbanos.....	3
2.1.2	Modelos de propagação para meio rural	6
2.2	Controlo do feixe.....	8
2.2.1	Deslocadores de fase	8
2.2.2	Topologia linha comutada.....	8
2.2.3	Deslocador de fase com díodo	10
2.2.4	Matriz de Butler.....	10
2.3	Combinadores/Distribuidores de potência	12
2.4	Exemplos de deslocadores de fase	13
2.4.1	Deslocador de fase de 4 bit	13
2.4.2	Controlo do feixe de um agrupamento de antenas usando díodos PIN	15
3	Sistemas de medições.....	19
3.1	Sistema de medição do diagrama de radiação.....	19
3.1.1	Desenvolvimento do sistema	19
3.1.2	Motor	20
3.1.3	Controlador.....	21
3.1.4	Medidor de sinal	22
3.1.5	Software	28
3.2	Sistema de comunicação com controlo mecânico	31
3.2.1	Motor	32
3.2.2	Arduíno FIO	34
3.2.3	Driver A4998.....	34
3.2.4	Conversor DC/DC	36
3.2.5	Circuito e programação	37
3.2.6	Antena	40
3.2.7	Alimentação e consumo energético.....	42
3.3	Sistema de comunicação com controlo eletrónico.....	44

3.3.1	Díodos PIN	44
3.3.2	Malha de alimentação.....	45
3.3.3	Desenvolvimento do sistema.....	47
3.3.4	Alimentação e programação	52
4	Análises de resultados.....	55
4.1	Antenas utilizadas.....	55
4.1.1	Ganho das antenas	58
4.2	Medições para o estudo da propagação do sinal	59
4.2.1	Análise das medições para 20 metros.....	60
4.2.2	Análise das medições no meio florestal para 40 metros de distância.....	64
4.2.3	Análise das medições no meio florestal para 60 metros de distância.....	68
4.2.4	Análise das medições no meio florestal para 80 metros de distância.....	71
4.2.5	Análise das medições no meio florestal para 100 metros de distância.....	75
4.3	Estudo da variação do sinal ao longo do tempo	78
4.4	Comparação entre antenas	82
4.5	Sistema de comunicação mecânico	86
4.6	Sistema de comunicação eletrônico	87
5	Conclusão e trabalhos futuros	93
5.1	Conclusões.....	93
5.2	Trabalhos futuros.....	94
6	Bibliografia	95
7	Anexos.....	99
	Anexo A Código implementado no microcontrolador para controlar a velocidade do servo motor.....	99
	Anexo B Código implementado em ambiente MatLab para a medição do diagrama de radiação	102
	Anexo C Código implementado em ambiente MatLab para definir às escalas dos diagramas de radiação.....	105
	Anexo D Código implementado em ambiente MatLab para desenhar os diagramas de radiação normalizados	109
	Anexo E Código implementado no microcontrolador para o sistema de comunicação mecânico.....	110
	Anexo F Código implementado no microcontrolador para o sistema de comunicação mecânico.....	114

Anexo G Sistema de medição implementado para obtenção dos diagramas de radiação	115
Anexo H Diagramas de radiação obtidos manualmente na câmara anecoica.	116
Anexo I Diagramas de radiação obtidos no interior da Universidade da madeira entre o corredor e o laboratório.....	118

Índice de figuras

Figura 2.1 – (a) Cenário para o modelo Walfisch-Ikegami; (b) Orientação da rua em relação ao móvel.	5
Figura 2.2 Esquema do modelo reflexão na superfície da terra [4].	5
Figura 2.3 Comutador de fase linha-paralela com N linhas selecionáveis [12]. .	9
Figura 2.4 Comutador de fase de 4 bits em cascata de quantização $\lambda(16)$ [12].	9
Figura 2.5 Deslocador de fase com topologia linha carregada [14].	10
Figura 2.6 Acoplador direcional de 3 dB formando dois lóbulos de um conjunto de dois elementos [13].	11
Figura 2.7 Esquema básico de uma Matriz de Butler para 8 lóbulos, utilizando 8 comutadores de fase fixa e 12 acopladores direcionais [13].	12
Figura 2.8 (a) Divisor. (b) Combinador de potência [16].	12
Figura 2.9 Combinador/Divisor de Wilkinson: (a) em circuito impresso; (b) circuito equivalente [15].	13
Figura 2.10 Deslocador integrado de para N bit [17].	13
Figura 2.11 Protótipo fabricado para deslocador de fase convencional integrado de 4 bits [17].	13
Figura 2.12. Perda de retorno do protótipo implementado para o deslocador de fase convencional integrado de 4 bits [17].	14
Figura 2.13 Perda de inserção do protótipo implementado para o deslocador de fase convencional integrado de 4 bits [17].	14
Figura 2.14 Deslocamento de fase do protótipo implementado para o deslocador de fase convencional integrado de 4 bits [17].	15
Figura 2.15 Esquema utilizado no projeto: (a) Esquemático do projeto, (b) Esquemático implementado visto de frente, (c) Esquemático implementado vista posterior.	16
Figura 2.16 Resultados para os três estados de comutação, (a) modo DD, modo RD, (c) modo DR [18].	17
Figura 3.1. Sistema utilizado para a medição do diagrama de radiação.	19
Figura 3.2. Motor RCA VH126N.	20
Figura 3.3. Modelo do sistema implementado para obter os diagramas de radiação.	21

Figura 3.4. (a) Circuito sensor ótico; (b) Esquema de montagem do sensor ótico.....	21
Figura 3.5. Fluxograma do funcionamento do microcontrolador.	22
Figura 3.6. Verificação da biblioteca VISA no MatLab 2013a.	23
Figura 3.7. Verificação da versão da biblioteca VISA.....	23
Figura 3.8. Janela APPS, ícone (<i>Instrument Control</i>).....	23
Figura 3.9. Descrição específica da função ConfigureFrequency Center.	24
Figura 3.10. Procedimento para a ligação do analisador de espectro com o MatLab.	25
Figura 3.11. Opções escolhidas na janela <i>New Objects Creation</i> na ligação entre o MatLab 2013a e o analisador de espectro.	25
Figura 3.12. Janela com as funções do driver no instrumento MatLab. Uso dos botões de conectar e desligar.	26
Figura 3.13. Instrução para executar o comando <i>mex-setup</i>	26
Figura 3.14. Localização para alteração da porta COM.	27
Figura 1.1. Código referente ao comando *IDN?.....	27
Figura 3.16. Interface gráfica do programa desenvolvido.	28
Figura 3.17. Fluxograma do programa desenvolvido para a medição do diagrama de radiação.....	29
Figura 3.18. Ficheiro Excel .XLS, com as amostras e tempo entre amostras. .	30
Figura 3.19. Excerto do código para o desenho do diagrama de radiação.	31
Figura 3.20. Exemplo do diagrama de radiação polar da antena Biquad, obtido com o programa desenvolvido.	31
Figura 3.21. Tipo de motores de passo: (a) Bipolar, (b) unipolar [20].	32
Figura 3.22. Motor passo a passo ASTROSYN modelo Y-129.	33
Figura 3.23. Motor unipolar- representação do rotor [22].	33
Figura 3.24. Placa Arduíno FIO.....	34
Figura 3.25, Driver A4988 da Allegri MicroSystems.	35
Figura 3.26. Esquema de ligação para o controlo de um motor de passo através do driver A4988 [25].	35
Figura 3.27. Conversor DC/DC: (a) R-783.3-0.5 da RECOM, (b) Circuito implementado.....	36
Figura 3.28. Caixa estanque com circuito elétrico implementado.	37

Figura 3.29. Fluxograma para o sistema mecânico: (a) Código principal; (b) Função Execute ().	38
Figura 3.30. Caixa estanque para proteção do motor de passo: (a) visto do topo, (b) vista de perfil, (c) tampa da caixa.	39
Figura 3.31. Caixa estanque para a proteção do motor passo a passo.	39
Figura 3.32. Antena suspensa com as medidas pretendidas [27].	40
Figura 3.33. Antena de referência utilizada.	40
Figura 3.34. Antena suspensa: (a) SWR e impedância da antena, (b) Diagrama de radiação.	41
Figura 3.35. <i>Redome</i> : (a) Interior; (b) Antena vedada.	42
Figura 3.36. (a) SWR e impedância da antena; (b) Diagrama de radiação.	42
Figura 3.37. Protótipo final: (a) vista frontal; (b) vista lateral.	44
Figura 3.38. Circuito de polarização para díodos PIN: (a) díodo em serie com a pista de transmissão; (b) díodo em paralelo com a pista de transmissão [29].	45
Figura 3.39. Díodo BAR64 da Infineon Technologies.	45
Figura 3.40. Malha de alimentação em serie: (a) deslocador de fase percurso principal e os elementos radiantes; (b) deslocador de fase colocado no percurso principal.	46
Figura 3.41. Malha de alimentação em paralelo [34].	46
Figura 3.42. Dimensão da malha de alimentação para $\epsilon_r = 4,4$.	48
Figura 3.43. Radial <i>stub</i> em pista impressa [35].	48
Figura 3.44. Desenho da malha de alimentação <i>no software NI Utilboard</i> .	49
Figura 3.45. Malha de alimentação construída em FR4: (a) vista frontal; (b) vista posterior.	49
Figura 3.46. Esquemático do circuito implementado na construção da malha de alimentação.	50
Figura 3.47. Cabos coaxiais construído e soldados a malha de alimentação e a antena suspensa.	51
Figura 3.48. Sistema de medição com controlo mecânico: (a) vista frontal, (b) vista superior, (c) vista inferior.	52
Figura 3.49. <i>Redome</i> : (a) Interior; (b) Antena vedada.	52
Figura 3.50. Fluxograma do funcionamento do microcontrolador.	53
Figura 3.51. Protótipo final: (a) vista frontal; (b) vista lateral.	53

Figura 4.1. Diagrama de radiação das antenas: (a) monopolo; (b) suspensa; (c) omnidireccional; (d) yagi; (e) corneta; (f) painel; (g) biquad	57
Figura 4.2. Esquema de montagem para medição do ganho das antenas.	58
Figura 4.3. Esquema de medição.....	59
Figura 4.4. Representação do local de medição.	60
Figura 4.5. Resultados obtidos para os 20 metros de distância no meio florestal: (a) monopolo; (b) suspensa; (c) Omnidireccional; (d) yagi; (e) corneta; (f) painel; (g) biquad.	63
Figura 4.6. Local de medição para à antena recetora aos 42 metros de distância.	64
Figura 4.7. Resultados obtidos para os 42 metros de distância no meio florestal: (a) monopolo; (b) suspensa; (c) omnidireccional; (d) yagi; (e) corneta; (f) painel; (g) biquad.	67
Figura 4.8. Resultados obtidos para os 62 metros de distância no meio florestal: (a) monopolo; (b) suspensa; (c) omnidireccional; (d) yagi; (e) corneta; (f) painel; (g) biquad.	70
Figura 4.9. Resultados obtidos para os 80 metros de distância no meio florestal: (a) monopolo; (b) suspensa; (c) omnidireccional; (d) yagi; (e) corneta; (f) painel; (g) biquad.	74
Figura 4.10. Resultados obtidos para os 100 metros de distância no meio florestal: (a) monopolo; (b) suspensa; (c) omnidireccional; (d) yagi; (e) corneta; (f) painel; (g) biquad.	77
Figura 4.11. Variação do nível de sinal nos 60 metros para o ângulo de 15°: (a) painel;(b) biquad.....	79
Figura 4.12. Variação das amostras nos 80 metros: (a) painel 60°; (b) painel 300°; (c) corneta 60°; (d) corneta 300°.	81
Figura 4.13. Variação das amostras nos 100 metros: (a) corneta 60°; (b) corneta 300°.	81
Figura 4.14. Comportamento das antenas no meio florestal para 0°.	82
Figura 4.15. Comportamento das antenas para a distância de 60 metros no ângulo de 15°.	83
Figura 4.16. Posicionamento da antena recetora para os 62 metros juntamente e visualização da árvore provocadora das reflexões.....	84

Figura 4.17. Comportamento das antenas na vegetação para a distância 80-100 m para os ângulos 60°.....	84
Figura 4.18. Encosta causadora de reflexões para o ângulo de 60°.....	85
Figura 4.19. Comportamento das antenas na vegetação para a distância 80-100 m para os ângulos 300°-330°.....	85
Figura 4.20. Edifício da Universidade da Madeira visto do meio florestal na posição de 100 metros causando reflexões nos ângulos 300° e 330°.....	86
Figura 4.21. Sistema de comunicação mecânico nos 80 metros.....	86
Figura 4.22. Resultados do sistema de comunicação mecânico.....	87
Figura 4.23. (a) SWR e impedância do Agrupamento de antena; (b) Diagrama de radiação.....	88
Figura 4.24. (a) SWR e impedância da antena; (b) Diagrama de radiação.....	89
Figura 4.25. Sistema de comunicação eletrônico nos 80 metros.....	90
Figura 4.26. Resultados do sistema de comunicação mecânico.....	90

Índice de tabelas

Tabela 2.1 Parâmetro para os modelos COST 235 e FITU-R.....	7
Tabela 2.2 Diferentes estados de comutação para a configuração dos díodos PIN [18].	16
Tabela 2.3. Valores obtidos na simulação e pratica para os diferentes estados de comutação [18].....	17
Tabela 3.1 Configurações possíveis para o controlo de passo do motor.	36
Tabela 3.2. Distâncias entre o acrílico e PVC à antena.	41
Tabela 3.3. Consumo energético dos componentes.	43
Tabela 3.4. Característica do substrato utilizado FR4.....	47
Tabela 4.1.Tabela dos ganhos das antenas.	58
Tabela 4.2. Valor para os 20 metros em relação a potência em espaço livre. .	63
Tabela 4.3. Valor para os 42 metros em relação a potência em espaço livre. .	67
Tabela 4.4. Valor para os 62 metros em relação a potência em espaço livre. .	71
Tabela 4.5. Valor para os 80 metros em relação a potência em espaço livre. .	74
Tabela 4.6. Valor para os 100 metros em relação a potência em espaço livre.	78

Lista de acrónimos

FTDI	<i>Future Technology Devices International</i>
LAN	<i>Local Area Network</i>
LED	<i>Light Emitting Diode</i>
LOS	<i>Line-Of-Sight</i>
MIMO	<i>Multiple Input Multiple Output</i>
NLOS	<i>Non-Line-Of-Sight</i>
PCS	<i>Personal Communications Service</i>
PIN	<i>Positive Intrinsic Negative</i>
PCI	<i>Peripheral Component Interconnect</i>
PVC	<i>Polyvinyl Chloride</i>
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
RF	<i>Radio Frequency</i>
SWR	<i>Standing Wave Ratio</i>
TDU	<i>Time Delay Units</i>
USB	<i>Universal Serial Bus</i>
VISA	<i>Virtual Instrument Software Architecture</i>
WIM	<i>Walfisch-Ikegami</i>

1 Introdução

Nas últimas décadas as tecnologias sem fios tiveram uma grande evolução. Estas tecnologias têm-se desenvolvido cada vez mais e atualmente são utilizadas em aplicações tanto a nível pessoal como empresarial.

A enorme procura de dados por parte dos utilizadores leva a que estas tecnologias tenham de evoluir e permitam que os congestionamentos da rede sejam encarados de modo a otimizar o sistema. O *beamforming* (controlo de feixe) é uma técnica que promete solucionar o aumento do tráfego de dados. É uma técnica de processamento de sinal usada para a transmissão de um sinal numa determinada direção. Isto é conseguido através da combinação de elementos de um agrupamento de antenas. Com a tecnologia MIMO (*Multiple Input Multiple Output*), os dados são enviados e recebidos usando múltiplas antenas para melhorar a velocidade transmissão e o alcance.

O *beamforming* pode ser usado para ondas de rádio ou de som, e pode ser aplicado em radares, comunicações sem fio, radioastronomia, biomedicina, entre outras aplicações.

1.1 Motivação

Muitas das aplicações, como estações de base, radares ou ligações via satélite, necessitam de antenas com diretividade elevada e controlável, o que pode ser conseguido combinando vários elementos de antenas numa só estrutura. A diretividade de um agrupamento de antenas, além da distribuição espacial, da distância e do tipo de antenas pode ser definida através do controlo eletrónico dos sinais de excitação, o que é robusto e dinâmico. Com o aumento da capacidade e baixos custos dos processadores, este controlo tem-se destacado nos sistemas de comunicação sem fios, principalmente o celular, permitindo aumentar a qualidade do sinal recebido, e a supressão de interferências. Por sua vez, otimiza o desempenho do sistema, permitindo proporcionar uma maior cobertura e gerar vários feixes para acompanhar as estações móveis.

O controlo do diagrama de radiação pode ser realizado através de um sistema mecânico ou de um sistema eletrónico. O sistema mecânico implica a utilização de um motor que faça direcionar o feixe da antena para o ângulo de maior radiação, enquanto no sistema eletrónico são utilizados circuitos RF para a transmissão de sinal em alta frequência que direcionem o feixe numa determinada direção de interesse e criem nulos noutras direções. Para isto é necessário a utilização de deslocadores de fase (*phase shifters*), bem como de uma malha de alimentação para obter os resultados pretendidos.

A principal motivação desta dissertação é controlar os diagramas de radiação com sistemas mecânicos e eletrónicos, de modo a encontrar a

topologia que proporciona um melhor controlo do diagrama de radiação, melhor eficiência, baixos custos e redução das perdas.

1.2 Objetivos

Com a importância que o controlo do diagrama de radiação de um agrupamento de antenas tenderá no futuro dos sistemas de telecomunicações sem fios, esta dissertação tem como objetivo estudar a influência da utilização de agrupamentos de antenas com controlo do diagrama de radiação. Para tal é realizado um estudo do efeito do meio na perda de percurso em meios com desvanecimento e para diferentes combinações de antenas de diferentes ganhos.

De modo a atingir este objetivo foi necessário, analisar diversas antenas com diferentes ganhos para uma frequência de 2,4 GHz. Para a medição do diagrama de radiação foi desenvolvido um sistema autónomo capaz de facilitar o processo de medição e obter as características desejadas de cada antena.

Por último, serão estudados um sistema de controlo mecânico e um sistema de controlo eletrónico. Depois de estudadas as melhores soluções, essas serão desenvolvidas e testadas, de modo a verificar qual proporciona melhor desempenho, menores perdas e baixos custos.

1.3 Estrutura

O presente trabalho encontra-se dividido em cinco capítulos, organizados da seguinte forma:

1. Introdução - Este capítulo apresenta as motivações que levaram à realização do trabalho bem como os objetivos a serem atingidos.
2. Estado da arte - Este capítulo apresenta um estudo sobre os pontos principais a desenvolver neste trabalho e o estudo realizado por diversos autores sobre controlo do feixe principal de um agrupamento de antenas.
3. Sistema de medições – Este capítulo apresenta os sistemas desenvolvidos para a medição do diagrama de radiação, sistema de comunicação com controlo mecânico e o sistema de comunicação com controlo eletrónico.
4. Análise de resultados - Neste capítulo apresenta-se o método de análise utilizado, bem como o local de medição e os resultados obtidos.
5. Conclusão e trabalhos futuros – Este capítulo apresenta as conclusões finais do presente trabalho e são, ainda, expostas algumas propostas para trabalhos futuros.

2 Estado da arte

Pretende-se com este capítulo apresentar alguns dos modelos de propagação mais comuns em ambientes com vegetação. Tendo em consideração os objetivos do trabalho descrevem-se os sistemas para controlo do diagrama de radiação de um agrupamento de antenas, focando os sistemas mais utilizados. Por fim, são referidos alguns sistemas existentes no âmbito deste projeto.

2.1 Modelos de propagação

A maior parte dos modelos de propagação proporcionam o valor médio do sinal recebido no local de receção. Por isso, é necessário conhecer as estatísticas do sinal para obter a sua variância. Esta abordagem não pode ser realizada unicamente de modo determinístico. A avaliação correta e o desenvolvimento dos modelos implicam conhecer os fatores que influenciam a propagação nas comunicações móveis [1].

Para a determinação dos valores de atenuação são utilizados diversos tipos de modelos de propagação. Estes modelos devem ter em consideração o comportamento do sinal de propagação, isto é, os diferentes sinais vindos em diferentes percursos e instantes diferentes que irão atingir o recetor [1]. Os modelos de propagação podem ser utilizados para prever o comportamento no ambiente de propagação através de ferramentas computacionais.

Os modelos de propagação dividem-se em duas categorias:

- Empíricos: são modelos baseados em medidas, conduzem a equações que se adaptem às medições e têm a relevância de contabilizar todos os fatores que afetam a propagação. Precisam de ser avaliados para locais, frequências e condições distintas à dos ambientes de medida.
- Teóricos: precisam da base de dados topográficos, não contabilizam todos os fatores de propagação. Possibilitam uma fácil modificação dos valores dos parâmetros e dependem das definições da base de dados geográficas [1].

2.1.1 Modelos de propagação para meios urbanos

Devido à demanda nas comunicações móveis celulares foi necessário desenvolver novos modelos de perdas de propagação, para a predição da potência recebida em qualquer área de cobertura da célula. Para meios urbanos a propagação é dependente da frequência, da polarização, da geometria dos edifícios, do material e das alturas das antenas. Existem diversos modelos para meios urbanos de modo a obter as perdas de percurso em função da distância.

2.1.1.1 Modelo Cost 231

O modelo de Cost 231 [2], também denominado de extensão PCS (*Personal Communications Service*) do modelo Okumura-Hata [2] foi obtido como consequência de medições nas faixas UHF até 2 GHz. Para valores acima desta frequência este modelo não apresenta a exatidão requerida [2]. O desenvolvimento deste modelo foi realizado por investigadores europeus que utilizaram as equações de Hata de forma a adaptá-las empiricamente para as faixas de alta frequência, o qual é válido entre os 1500 e 2000 MHz. A perda de percurso média para o modelo Cost 231 é dada através de

$$L(db) = 46,3 + 33,9 \log(f) - 13,82 \log(h_T) - a(h_R) \quad (2.1) \\ + [44,9 - 6,55 \log(h_T)] \log(d) + C$$

em que f é a frequência em MHz, h_T é a altura da antena emissora em metros, h_R é a altura da estação móvel em metros, $a(h_R)$ é o fator de correção da altura da antena, d é a distância entre a estação base e a estação móvel em km e C é igual a 0 dB para cidades médias ou suburbanas que possuam uma densidade média de árvores e, para centros urbanos ou metropolitanos é igual a 0 dB. É importante salientar que este modelo é limitado para aplicações onde a antena emissora está no cume dos telhados dos edifícios [1].

2.1.1.2 Modelo Walfisch-Ikegami

O modelo Walfisch-Ikegami (WIM) [3] é semi-empírico, sendo um ajuste para os dados medidos para a propagação com frequências a variar entre os 800 e 2000 MHz e para distâncias entre os 0,02 e 5 km [3]. Este modelo distingue dois casos, em linha de vista LOS (*line-of-sight*), e sem linha de vista, NLOS (*non-line-of-sight*).

No modelo WIM LOS não existe obstrução entre a antena emissora e a antena recetora [3] e as perdas de propagação, em dB, são dadas por

$$L_{LOS} = 42,64 + 26 \log(d) + 20 \log(f_{MHz}), \quad d_{km} \geq 0,02 \quad (2.2)$$

Para o modelo WIM NLOS, consideram-se os seguintes parâmetros: altura do edifício h_{roof} , largura da rua (w), separação entre os edifícios (b), orientação da rua em relação à direção da emissão(φ) [2], tal como pode ser observado na figura 2.1 a) e b).

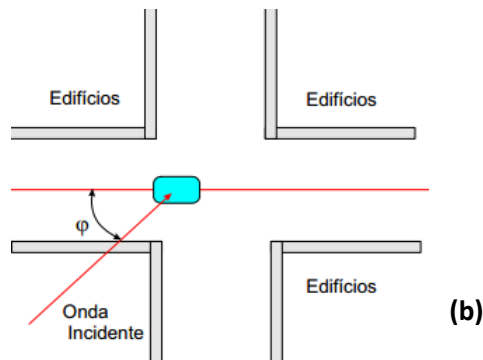
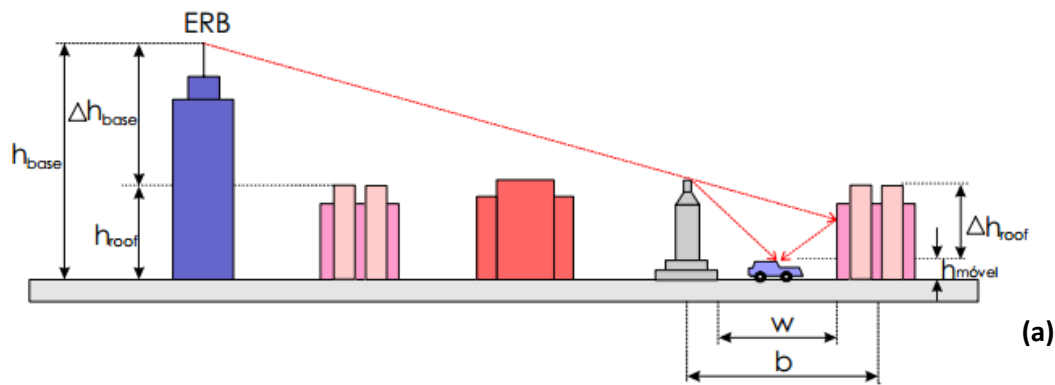


Figura 2.1 – (a) Cenário para o modelo Walfisch-Ikegami; (b) Orientação da rua em relação ao móvel.

2.1.1.3 Modelo de dois raios (reflexão na superfície na terra)

A maioria dos sistemas de comunicação terrestre não opera num ambiente de espaço livre, devendo-se ter em consideração o efeito da superfície da terra na propagação. Existem dois efeitos principais: reflexão no solo ou a difração. Quando o percurso de propagação está próximo da terra e paralelo à mesma, o desvanecimento deve-se à reflexão no solo, como mostra a figura 2.2 [4].

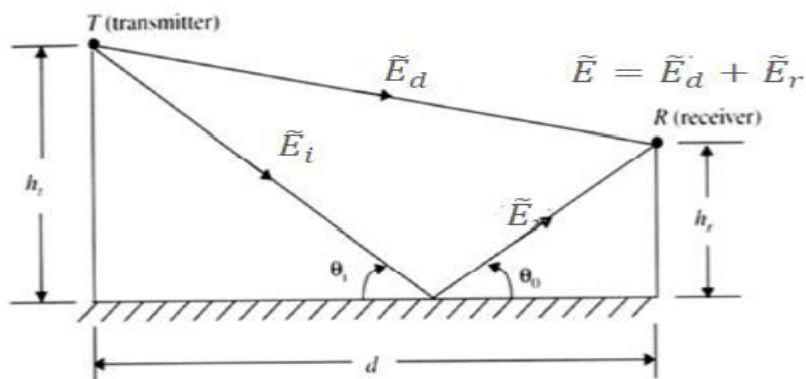


Figura 2.2 Esquema do modelo reflexão na superfície da terra [4].

Na figura 2.3 encontra-se representado a altura da antena emissora h_{Tx} , altura da antena recetora h_{Rx} e a distância entre o emissor e o recetor definida por d . O sinal que atinge a antena recetora resulta da sobreposição de duas componentes de onda, uma componente direta \tilde{E}_d e uma componente refletida na superfície da terra \tilde{E}_r . A expressão da potência recebida fica [5]

$$P_R \cong 4P_t \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 G_t G_r \sin^2 \theta \left(\frac{2\pi h_{Rx} h_{Tx}}{\lambda d} \right) \quad (2.3)$$

onde P_R é a potência recebida em dB, P_t a potência transmitida em dB, $G_t G_r$ são os ganhos das antenas de transmissão e receção (dB) e λ é o comprimento de onda.

2.1.2 Modelos de propagação para meio rural

Os sistemas de comunicação terrestre em ambiente rural podem ter os sinais a propagarem-se através da vegetação. Existem diversos modelos para este tipo de meio de propagação, os quais permitem determinar uma aproximação de atenuação do sinal devido à folhagem [6].

2.1.2.1 Modelo de Weissberger

O modelo Weissberger [2] foi um dos primeiros modelos a ser implementado para se obter as perdas do sinal devido à vegetação. Esta perda é dada por

$$L_{(dB)} = \begin{cases} 0,45f^{0,248}d_f, & d_f < 14 \text{ m} \\ 1,33f^{0,248}d_f^{0,588} & 14 < d_f < 400 \text{ m} \end{cases} \quad (2.4)$$

onde d_f corresponde à profundidade da vegetação ao longo do percurso em linha de vista, em metros, e f é a frequência em GHz. À atenuação assim obtida é somada a perda do espaço livre. O modelo é aplicado a frequências entre os 230 MHz e os 95 GHz.

2.1.2.2 Modelo ITU-R

O modelo ITU-R [7] teve por base do seu desenvolvimento trabalhos Seville e Graig. Seville efetuou as medições nas frequências 11,2 GHz, 20 GHz e 37,5 GHz. No modelo ITU-R a atenuação suplementar devido à vegetação é dada pelo decaimento do sinal é obtido por

$$L = 0,2f^{0,3}d^{0,6} \quad (2.5)$$

com f em MHz e d em metros.

2.1.2.3 Modelo de propagação Log-normal

O modelo log-normal baseia-se na técnica de propagação log-normal e as perdas de percurso podem ser calculadas através de [8]

$$P_L(d) = P_L(d_o) + 10_n \log_{10} \left(\frac{d}{d_o} \right) + X_\sigma \quad (2.6)$$

em que n corresponde ao expoente de perda de percurso, $P_L(d_o)$ é a perda de percurso a uma determinada distância e X_σ é uma variável aleatória Gaussiana de média nula e variância σ . Assim sendo, o sinal recebido é dado como

$$P_r(d) = P_t - P_L(d) \quad (2.7)$$

em que P_t é a potência transmitida.

2.1.2.4 Modelo Chen e Kuo

O modelo Chen e Kuo [8] apresenta uma fórmula empírica em condições onde a frequência varia entre 1 e 100 GHz. É fundamentado na teoria geométrica da difração admitindo que as características ambientais estão divididas em quatro camadas: troncos, solo, ar e copa das árvores. As fórmulas empíricas para este modelo são as seguintes:

$$\begin{aligned} L_V &= (0,001f^{0,2})d + 0,5f + 3 && \text{Polarização vertical} \\ L_H &= (0,0002f^{0,2})d + 0,3f + 3 && \text{Polarização horizontal} \end{aligned} \quad (2.8)$$

com d em metros e f em GHz.

2.1.2.5 Modelo COST 235 e FITU-R

Os modelos Cost 235 [10] e FITU-R [9] são semelhantes ao modelo de Weissberger para o cálculo do decaimento do sinal [6], ou seja

$$L(dB) = A \times f^B \times d^C \quad (2.9)$$

em que A,B,C correspondem aos parâmetros ajustados para cada um dos modelos anunciados, f é a frequência em MHz e d a distância em metros. Os ajustes realizados dependem da frequência, do tipo de folhagem e dos mecanismos de propagação [9]. Na tabela 2.1 são apresentados os valores de cada um dos parâmetros envolvidos em cada modelo.

Tabela 2.1 Parâmetro para os modelos COST 235 e FITU-R.

Modelo	Parâmetros			Observações
	A	B	C	
COST 235	15,6	-0,009	0,26	Com folhas
	26,6	-0,2	0,5	Sem folhas
FITU-R	0,39	0,39	0,25	Com folhas
	0,37	0,18	0,59	Sem folhas

2.2 Controlo do feixe

2.2.1 Deslocadores de fase

Os deslocadores de fase são usados para alterar as fases da alimentação de um agrupamento de antenas e permitem controlar a direção do feixe. Estes deslocadores de fases consideram-se ideais quando proporcionam baixa perda de inserção e amplitude igual em todos os estados da fase. A maioria dos deslocadores de fase trabalha em sinais que passam em qualquer direção e podem ser controlados eletricamente, magneticamente ou mecanicamente [11].

Normalmente a variação total de fase de um comutador só precisa de ser 360° . Os sistemas que permitem estabelecer uma fase superior 360° são denominados por unidades de tempo de atraso (*Time Delay Units*, TDU) [11].

Os deslocadores de fase podem ser analógicos ou digitais. O deslocamento analógico de fase oferece uma fase contínua através de uma tensão controlada. Estes deslocadores controlados eletricamente podem ser realizados com díodos PIN (*Positive Intrinsic Negative*) que mudam de capacitância com a tensão, dielétricos não-lineares ou matérias ferro-elétricos. O deslocador de fase analógico controlado mecanicamente é apenas uma linha de transmissão alongada mecanicamente [11]. Os deslocadores de fase digitais são mais imunes ao ruído nas linhas de controlo de tensão, e proporcionam um conjunto de estados de fase controlados por bits de fase.

Os deslocadores de fase têm de ser capazes de mudar a sua fase rapidamente, de lidar com altas potências, requerem sinais de controlo com pouca energia, baixas perdas, peso leve, tamanho pequeno, vida longa, e ter um custo razoável [12]. De seguida apresentam-se alguns dos deslocadores de fase que existem.

2.2.2 Topologia linha comutada

Uma deslocação de fase pode ser obtida utilizando linhas de transmissão para obter o valor da fase desejada. Estas linhas de transmissão podem ser substituídas por deslocadores eletrónicos de alta velocidade. Os díodos semicondutores são os dispositivos normalmente utilizados digitalmente como deslocadores [12].

Existem dois métodos que permitem variar o comprimento de uma linha de transmissão. O primeiro método consiste em que o comprimento requerido pode ser selecionado dentro dos comprimentos disponíveis. Esta configuração denomina-se como linha-paralela. No segundo método o comprimento requerido é obtido combinando em série vários segmentos de linha. Este método denomina-se como linha-série ou cascata [12].

Na figura 2.3 tem-se a configuração linha-paralela onde o comprimento requerido é obtido através de um par de comutadores (1:N). Cada uma das N linhas possui comprimentos diferentes ($L_1, L_2, L_3 \dots L_n$). O número de linhas é

limitado pela qualidade do comutador, determinada pela diferença de impedância entre os estados OFF e ON. Com vários comutadores em paralelo, a impedância de cada estado OFF deverá ser alta, se a impedância combinada for maior que a impedância do estado ON. Uma configuração com linha-paralela com 16 alternativas de comprimento proporciona uma fase de 22,5 graus, supondo que a n -ésima linha tem comprimento de $n \lambda/16$ [12].

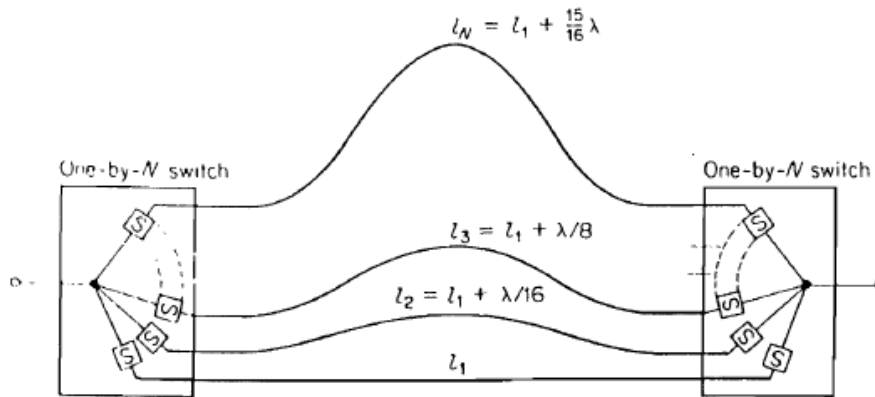


Figura 2.3 Comutador de fase linha-paralela com N linhas selecionáveis [12].

Uma das vantagens desta configuração linha-paralela é que o sinal passa através de dois comutadores, o que permite apresentar perdas de inserção mais baixas que a configuração em cascata. Uma desvantagem é o maior número de linhas e comutadores necessários para minimizar o erro. Esta configuração aplica-se quando é necessária uma alteração de fase maior a 2π radianos [12].

Os deslocadores em cascata têm mais aplicações que a configuração linha-paralela. Na figura 2.4 tem-se uma representação de comutadores de 4 bits formando um arranjo de quatro módulos em cascata. Cada módulo possui um comutador que realiza alterações de fase de 0 ou $360^\circ/2n$, onde $n= 1, 2, 3, 4$. Quando dois comutadores encontram-se no estado OFF, os restantes passam a estar no estado ON, e vice-versa. Para o estado “OFF” existe uma fase residual ϕ_0 .

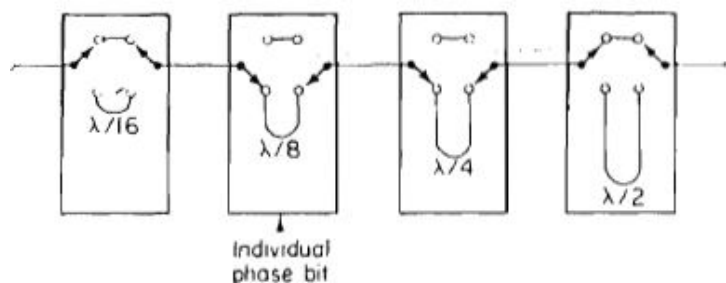


Figura 2.4 Comutador de fase de 4 bits em cascata de quantização $M(16)$ [12].

A desvantagem dos deslocadores de fase de 4 bits em cascata são as perdas de retorno. Também a inclusão de um maior número de bits proporciona maior perda por inserção e uma acumulação de erro de fase [12].

2.2.3 Deslocador de fase com diodo

As propriedades de um diodo semiconductor são importantes para os comutadores de fase, isto porque é possível modificar a impedância realizando modificações na polarização. Isto permite que o diodo funcione como um comutador. Os deslocadores baseados em diodos podem ser utilizados para alta e baixa potência, e podem passar rapidamente de um estado de fase a outro. São insensíveis a mudanças de temperatura, podem ser aplicados a diferentes valores de frequência e são de dimensão reduzida [12]. Existem três métodos que utilizam diodos semicondutores para controlo digital, sendo a escolha do diodo dependente do circuito usado para obter uma fase individual. Estes métodos são o deslocador de fase com acoplador híbrido, topologia de linha carregada e topologia de fase refletida [12].

No deslocador de fase de linha carregada normalmente é usado um deslocamento de fase igual ou superior a 45° . Um exemplo deste tipo de deslocador é o representado na figura 2.5. Verifica-se que as linhas de transmissão possuem susceptâncias capacitivas e indutivas (ZL) em paralelo com o percurso principal. Caso se pretenda introduzir um abrandamento ou incremento na velocidade da fase, as cargas devem ter um coeficiente de reflexão muito elevado, para poder minimizar as perdas. As cargas (ZL) não devem estar muito próximas umas das outras porque pode causar perdas extremas. O espaçamento deve ser de um quarto do comprimento de onda [11].

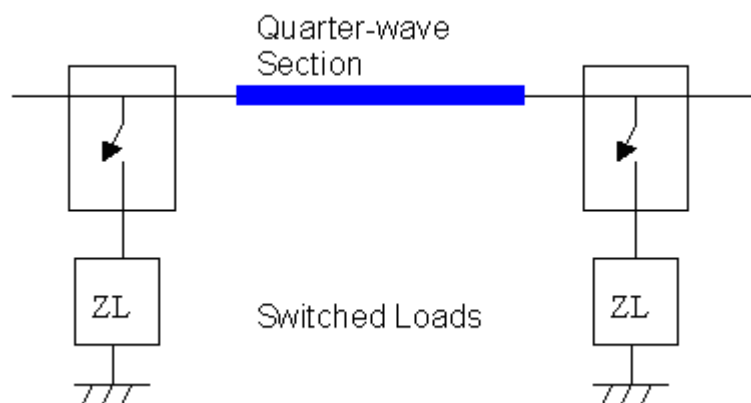


Figura 2.5 Deslocador de fase com topologia linha carregada [14].

2.2.4 Matriz de Butler

Existem diferentes métodos e dispositivos para implementar o direcionamento do feixe. Um dos métodos utiliza uma rede configurada em paralelo, denominada de Matriz de Butler, que utiliza acopladores direcionais de 3 dB, junções híbridas ou comutadores de fase fixa [13].

Esta técnica é utilizada para formar N lóbulos contíguos gerados em um arranjo de N radiadores ou dipolos, onde $N = 2_p$ e p é um número inteiro. A matriz Butler tem 2_p entradas e 2_p saídas. O número de acopladores direcionais ou híbridos necessários para um arranjo de N elementos é $(N/2)\log_2 N$ e o número de comutadores de fase fixa é $(N/2)\log_2 N - 1$. A complexidade da matriz de Butler aumenta com o número de elementos. Uma matriz de 64 elementos, por exemplo, precisa de 192 acopladores direcionais e 160 de comutadores de fase fixa. A construção de uma rede de Butler complexa requer um grande número de conexões de junção nas linhas de transmissão, o que pode apresentar dificuldades práticas na fabricação dos circuitos impressos usados para construir o dispositivo [13].

A matriz de Butler tipicamente usa acopladores direcionais 3 dB com uma diferença de fase de 90° entre as duas saídas. As junções híbridas também podem ser utilizadas para produzirem uma diferença de fase de 180° entre os dois sinais de saída [13].

Para ter uma melhor noção de uma rede de acoplamento, pode-se considerar, por exemplo, um conjunto simples com dois dipolos espaçados de $\lambda/2$ e conectados a duas portas de um acoplador híbrido de 3 dB como mostra a figura 2.6. Para um sinal na entrada da porta “1” surge uma diferença de fase de 90° entre os sinais nas portas “2” e “3”, o que produzirá um lóbulo orientado a 30° para a direita. Um sinal inserido na porta 4 gera uma distribuição de fase que produz um lóbulo orientado 30° para a esquerda [13].

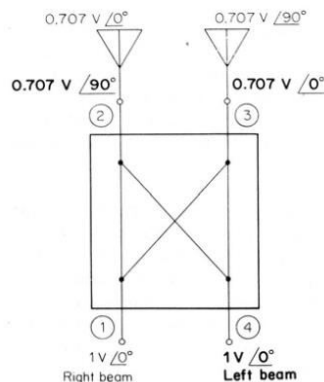


Figura 2.6 Acoplador direcional de 3 dB formando dois lóbulos de um conjunto de dois elementos [13].

Sendo assim, um conjunto simples de dois dipolos e um acoplador 3 dB produz dois lóbulos independentes. O conjunto de dois elementos é um exemplo da formação dos lóbulos de Butler. A figura 2.7 ilustra um circuito básico de um conjunto de oito elementos que produz oito lóbulos independentes através de 12 acopladores direcionais e 8 comutadores de fase fixa, os quais têm valores diferentes [13].

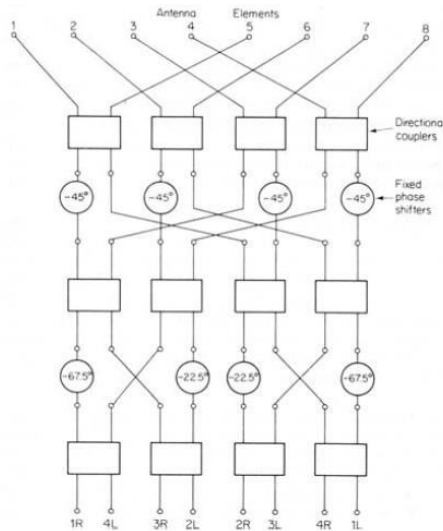


Figura 2.7 Esquema básico de uma Matriz de Butler para 8 lóbulos, utilizando 8 comutadores de fase fixa e 12 acopladores direcionais [13].

A rede formada por lóbulos de Butler é, teoricamente sem perdas, mas sempre existirá uma perda de inserção finita, associada às perdas nos acopladores direcionais, deslocadores de fase e linhas de transmissão que formam a rede. Para uma rede de 16 elementos a 900 MHz, por exemplo, possuem perdas de inserção de 0,74 dB, associadas aos circuitos impressos usadas na construção [14].

2.3 Combinadores/Distribuidores de potência

Os combinadores e distribuidores de potência são dispositivos passivos usados para dividir o sinal de entrada em dois sinais (ou mais) com menor potência [14] [15].

Os combinadores podem utilizar três ou quatro portas, com o sem perdas, como é representado na figura 2.8. Estes distribuidores usualmente são simétricos, mas podem apresentar variações assimétricas [16].

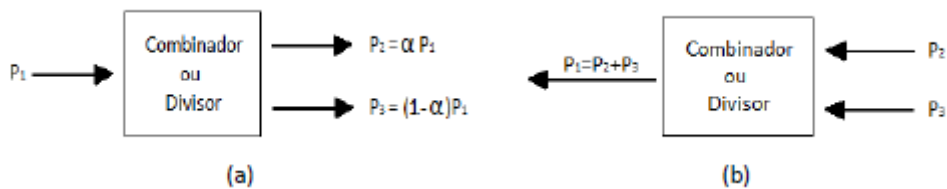


Figura 2.8 (a) Divisor. (b) Combinador de potência [16].

O distribuidor de potência Wilkinson consiste em duas linhas $\lambda/4$ de transmissão paralelas, tendo a vantagem de ter reduzidas perdas, desde que as portas se encontrem adaptadas. A entrada é alimentada por linhas em paralelo e as saídas com duas vezes a impedância do sistema. O divisor de Wilkinson possui alto isolamento entre as portas de entrada e de saída e as impedâncias das portas de entrada e de saída são concebidas para serem

iguais à impedância característica dos sistemas. Na figura 2.9 (a) está representado um combinador de Wilkinson com três portas e na figura 2.9 (b) apresenta-se o circuito equivalente das linhas de transmissão [14] [15].

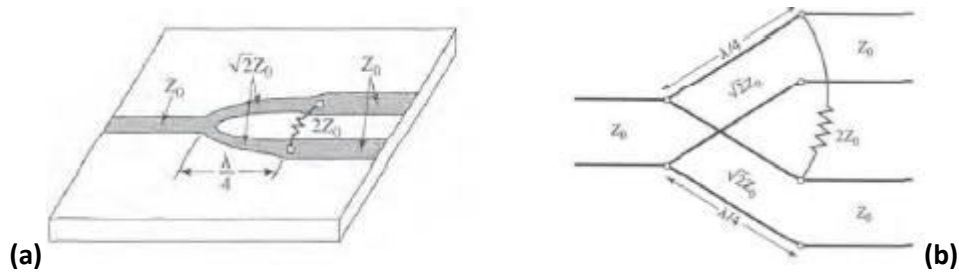


Figura 2.9 Combinador/Divisor de Wilkinson: (a) em circuito impresso; (b) circuito equivalente [15].

2.4 Exemplos de deslocadores de fase

2.4.1 Deslocador de fase de 4 bit

Em [17] foi implementado um deslocador convencional integrado de 4 bit projetado através da topologia linha carregada em cascata de 3 bit ($22,5^\circ$, 45° , 90°) e um deslocador reflexivo de 180° . Na figura 2.10 encontra-se uma representação do tipo de deslocador de fase implementado para N bits.

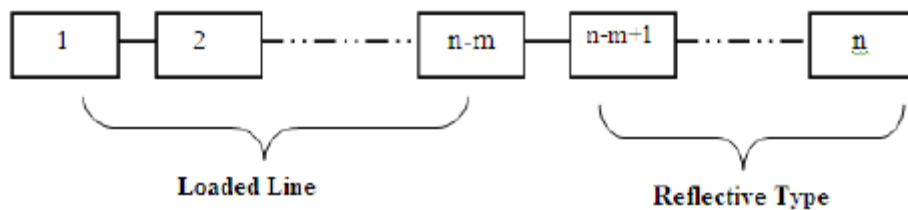


Figura 2.10 Deslocador integrado de para N bit [17].

O deslocador de fase foi produzido em material FR-4 com díodos PIN, condensadores e conectores SMA. Na figura 2.11 é apresentado o protótipo implementado [17].

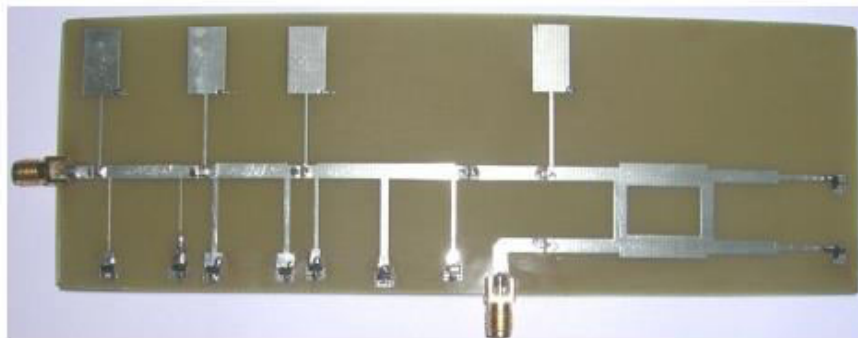


Figura 2.11 Protótipo fabricado para deslocador de fase convencional integrado de 4 bits [17].

Na figura 2.12 mostra o desempenho medido para as perdas de retorno, registrando um valor inferior a -10 dB para 16 estados de fase numa faixa de frequência de 2,4-2,48 GHz.

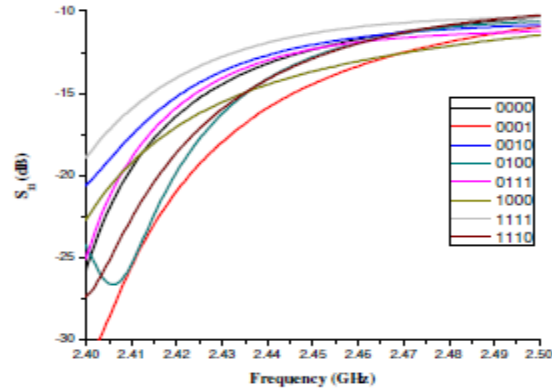


Figura 2.12. Perda de retorno do protótipo implementado para o deslocador de fase convencional integrado de 4 bits [17].

Na figura 2.13 apresenta-se o desempenho de perdas de inserção para a faixa indicada, encontrando-se entre -5 dB (mínimo) e -9 dB (máximo) [17].

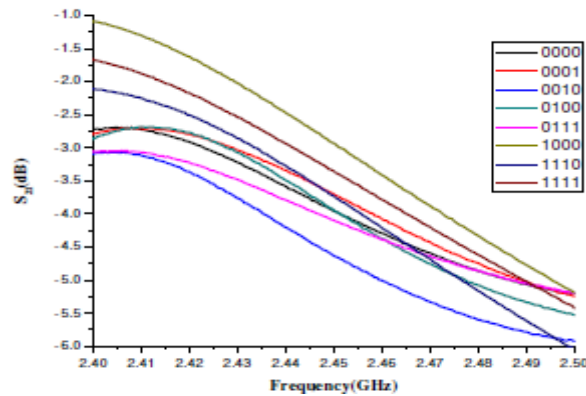


Figura 2.13 Perda de inserção do protótipo implementado para o deslocador de fase convencional integrado de 4 bits [17].

A figura 2.14 mostra o desempenho de deslocador de fase em relação à fase desejada [17].

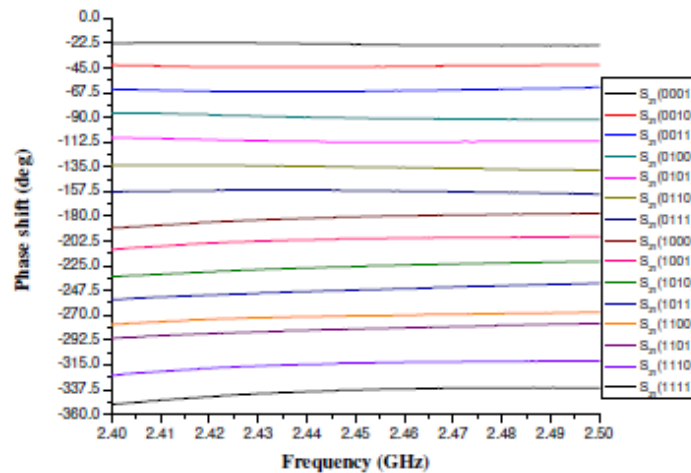
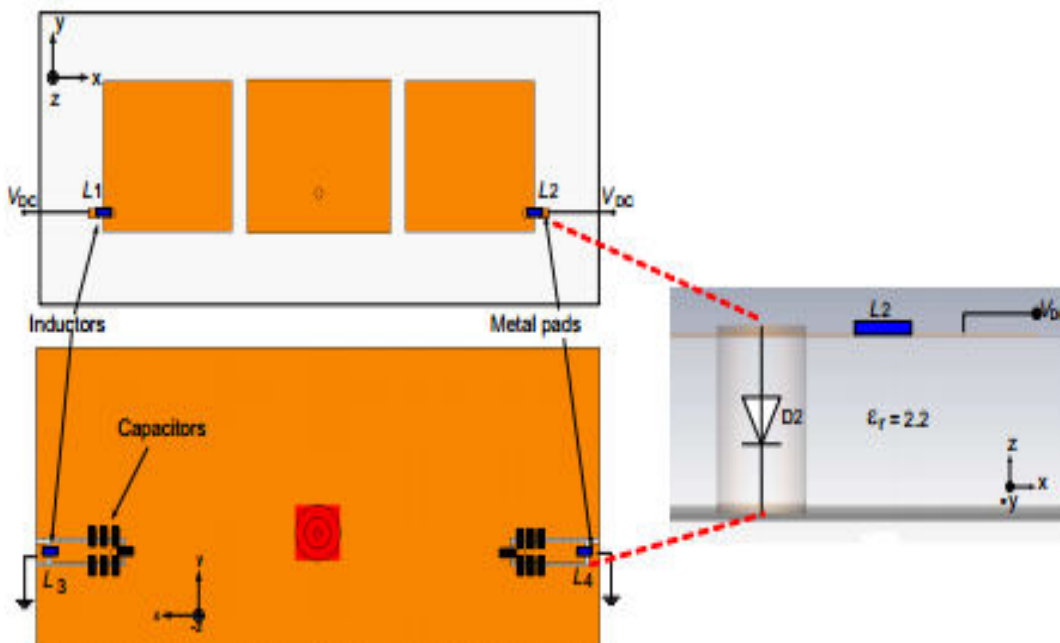


Figura 2.14 Deslocamento de fase do protótipo implementado para o deslocador de fase convencional integrado de 4 bits [17]

2.4.2 Controlo do feixe de um agrupamento de antenas usando díodos PIN

Em [18] encontra-se a implementação de um trabalho cujo objetivo é controlar um feixe eletronicamente utilizando interruptores através de díodos PIN RF, para a comunicação de um sistema sem fios que opera na frequência de 5,8 GHz. O autor pretende que, no agrupamento um único elemento seja acionado, enquanto cada um dos outros elementos encontram-se desligados. Em termos de variação de azimute, pretende-se que o mesmo tenha um varrimento de 30° , 0° e -30° . A figura 2.15 apresenta o esquema do circuito [18].



(a)



Figura 2.15 Esquema utilizado no projeto: (a) Esquemático do projeto, (b) Esquemático implementado visto de frente, (c) Esquemático implementado vista posterior.

Na figura 2.15 observa-se que um só elemento é alimentado por um cabo coaxial, enquanto, os outros elementos parasitas estão integrados com díodos PIN RF que funcionam como interruptores. Estes díodos foram incrustados dentro do substrato. Na tabela 2.2 encontram-se os diferentes estados de operação.

Tabela 2.2 Diferentes estados de comutação para a configuração dos díodos PIN [18].

Operação do interruptor		Modo de operação
SW1	SW2	
ON	OFF	RD
OFF	ON	DR
OFF	OFF	DD

Quando o interruptor está no modo ON este encontra-se ativo, e atua como refletor (R). Porém, se estiver no modo OFF o interruptor está aberto e atua como um diretor (D).

Na figura 2.16 observam-se os resultados obtidos pelo autor tanto na simulação como medidos, para o controlo do azimute em três desvios de fase.

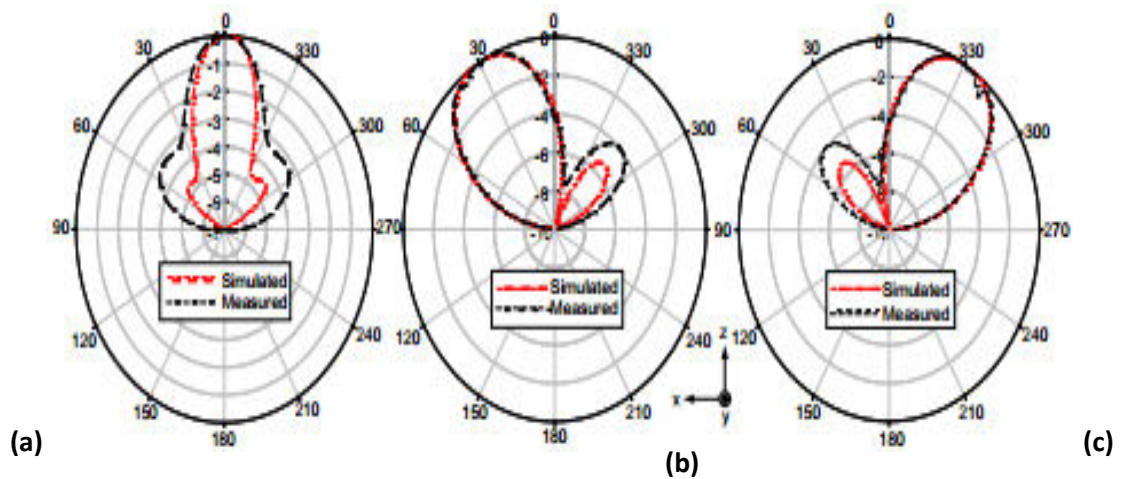


Figura 2.16 Resultados para os três estados de comutação, (a) modo DD, modo RD, (c) modo DR [18].

Na tabela 2.3 encontram-se os valores registados na simulação e na prática, para os diferentes estados de comutação, sendo que, também realizou-se uma comparação das perdas para os diferentes estados de comutação [18].

Tabela 2.3. Valores obtidos na simulação e pratica para os diferentes estados de comutação [18].

Modes	Tilt angle (θ_m)		
	Simulation (Ideal switch)	Simulation (Actual switch)	Measurement
RD	-33°	-30°	-30°
DR	$+33^\circ$	$+30^\circ$	$+30^\circ$
DD	0°	0°	0°
Modes	Maximum Gain (dBi)		
	Simulation (Ideal switch)	Simulation (Actual switch)	Measurement
RD	8.2	7.3	6.5
DR	8.2	7.3	6.5
DD	7.0	5.6	4.9

3 Sistemas de medições

Neste capítulo são apresentados os sistemas desenvolvidos para a medição do diagrama de radiação das antenas e a implementação dos sistemas de controlo dos diagramas de radiação mecânico e eletrónico.

3.1 Sistema de medição do diagrama de radiação

O diagrama de radiação é um parâmetro relevante para avaliar o desempenho das antenas e também para obter a posição onde a antena consegue captar a maior radiação vinda de uma antena emissora. Para isso, desenvolveu-se um sistema que permite medir o diagrama de radiação de forma automática.

3.1.1 Desenvolvimento do sistema

O sistema de medição utilizado para obter os respetivos diagramas de radiação é constituído por um motor que permite rodar a antena para a direção desejada, um controlador que faz a ligação entre o motor e o computador, o computador com um programa de controlo desenvolvido em MatLab e o medidor de sinal que permite obter o nível de potência recebido para cada posição. Para cada ângulo o *Software* MatLab faz a verificação dos componentes e o tratamento dos dados provenientes do medidor de sinal de forma a desenhar os respetivos diagramas de radiação. A arquitetura do sistema implementado encontra-se na figura 3.1.

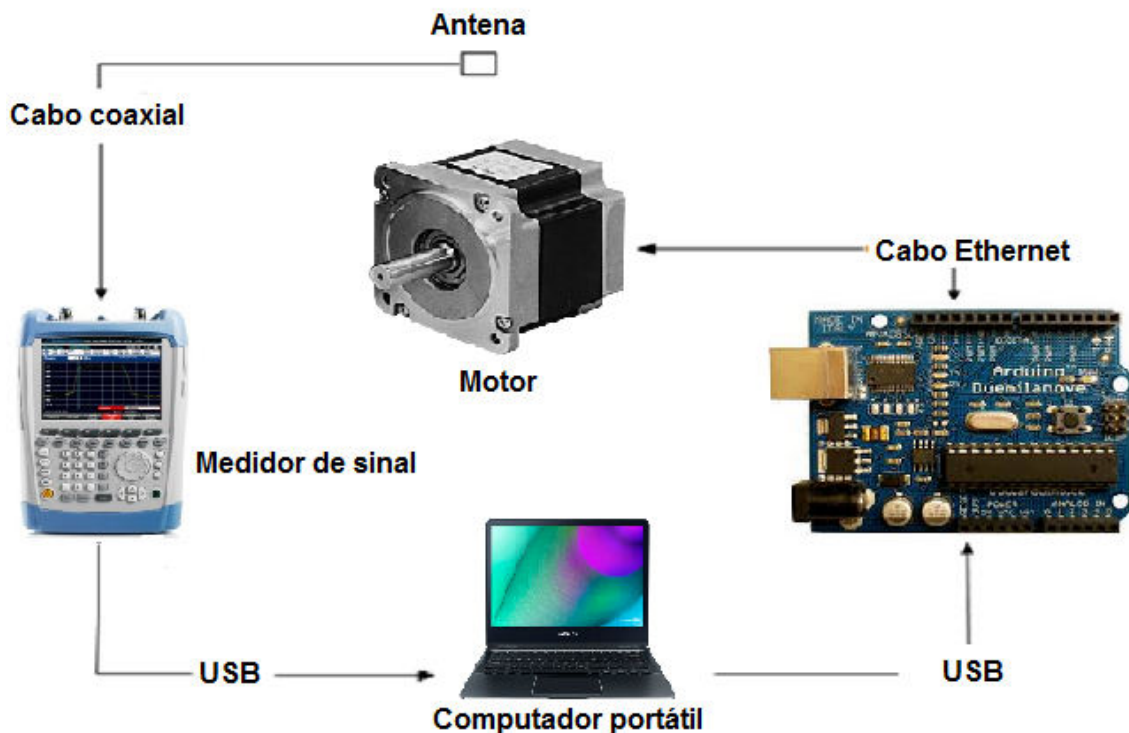


Figura 3.1. Sistema utilizado para a medição do diagrama de radiação.

3.1.2 Motor

Dentro dos motores disponíveis, inicialmente foi adquirido o motor RCA VH126N [19], figura 3.2. Este motor alternado não apresentou as características e o desempenho necessário para registar diagramas de radiação. Apresenta só uma velocidade, e devido à amostragem do analisador de espectro ser de uma amostra por segundo, aproximadamente, não se conseguiu obter a resolução desejada entre 1° a 2° .



Figura 3.2. Motor RCA VH126N.

Após analisar os resultados obtidos, optou-se por utilizar para a realização deste sistema de medição um servo motor disponível no laboratório.

Uma das limitações deste motor deve-se ao facto de ter um veio muito pequeno, o que não permite acoplar qualquer tipo de antena sobre o mesmo. Sendo assim, foi utilizado um sistema desenvolvido com este motor num outro trabalho que já possuía um suporte com um veio de maior dimensão e mais resistente. Este veio encontra-se ligado a duas rodas dentadas, o que permite ter uma maior força de rotação e diminuir o passo mínimo aproximadamente para $0,2^\circ$. O motor é alimentado por 4 baterias AA de 1,2 V. o modelo do sistema implementado está representado na figura 3.3.

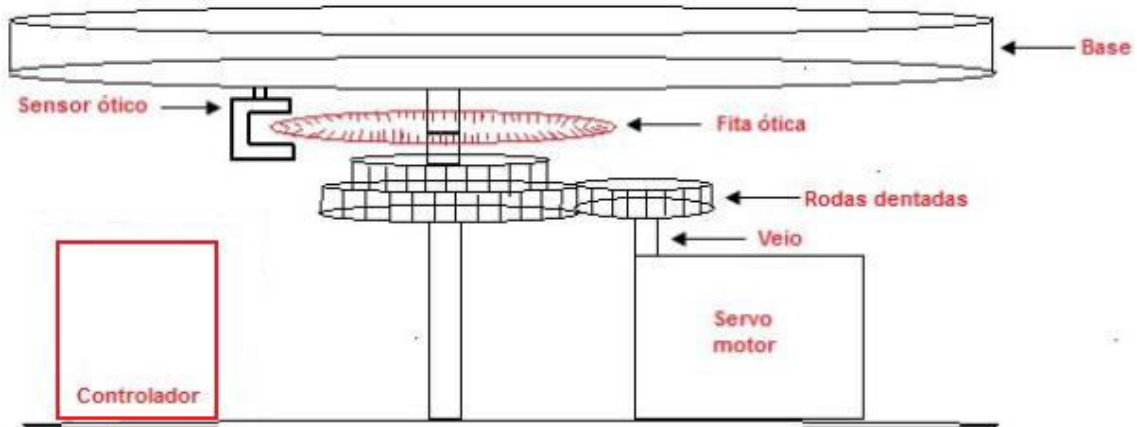


Figura 3.3. Modelo do sistema implementado para obter os diagramas de radiação.

Um das características importantes para obter uma maior precisão nos diagramas de radiação, foi a colocação de um sensor ótico. Este sensor deteta o movimento da fita ótica através de um LED (*Light Emitting Diode*), que permite contar o número de riscas da fita ótica, constituída por 1800 riscas. Além de contar o número de riscas, é enviado o tempo entre riscas e, por sua vez, este valor é enviado pela porta série para o computador via cabo USB. Os valores registados do tempo entre cada risca permitem saber em que instante foi registado cada valor obtido através do analisador de espetro. A figura 3.4 (a) apresenta o circuito do sensor ótico e a figura 3.4 (b) um esquema de montagem do mesmo.

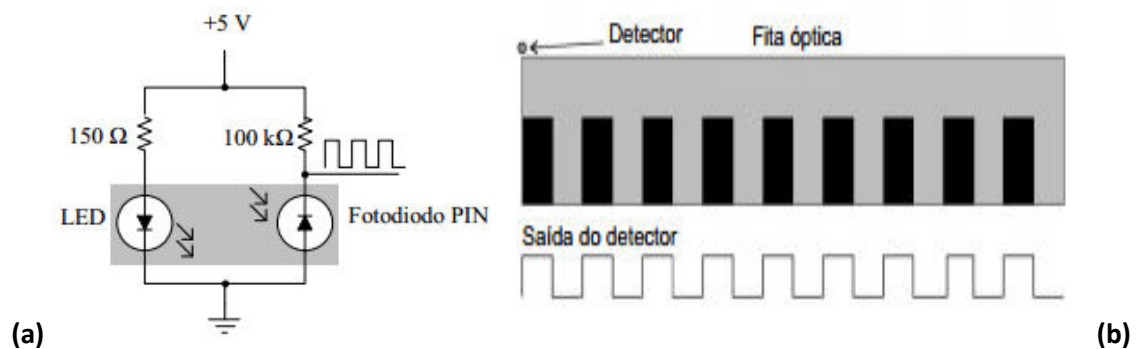


Figura 3.4. (a) Circuito sensor ótico; (b) Esquema de montagem do sensor ótico.

3.1.3 Controlador

O sistema que faz o controlo do servo motor para realizar as medições do diagrama de radiação é constituído por um microcontrolador. O microcontrolador usado foi o ATmega168 (*Duemilanove*). Este foi programado para controlar a velocidade do motor consoante o comando que é enviado, definindo-se seis comandos para velocidade, um comando para parar o motor, e outro para inverter o sentido do motor. O fluxograma da figura 3.5 mostra o funcionamento do código implementado, sendo que este encontra-se no anexo A.

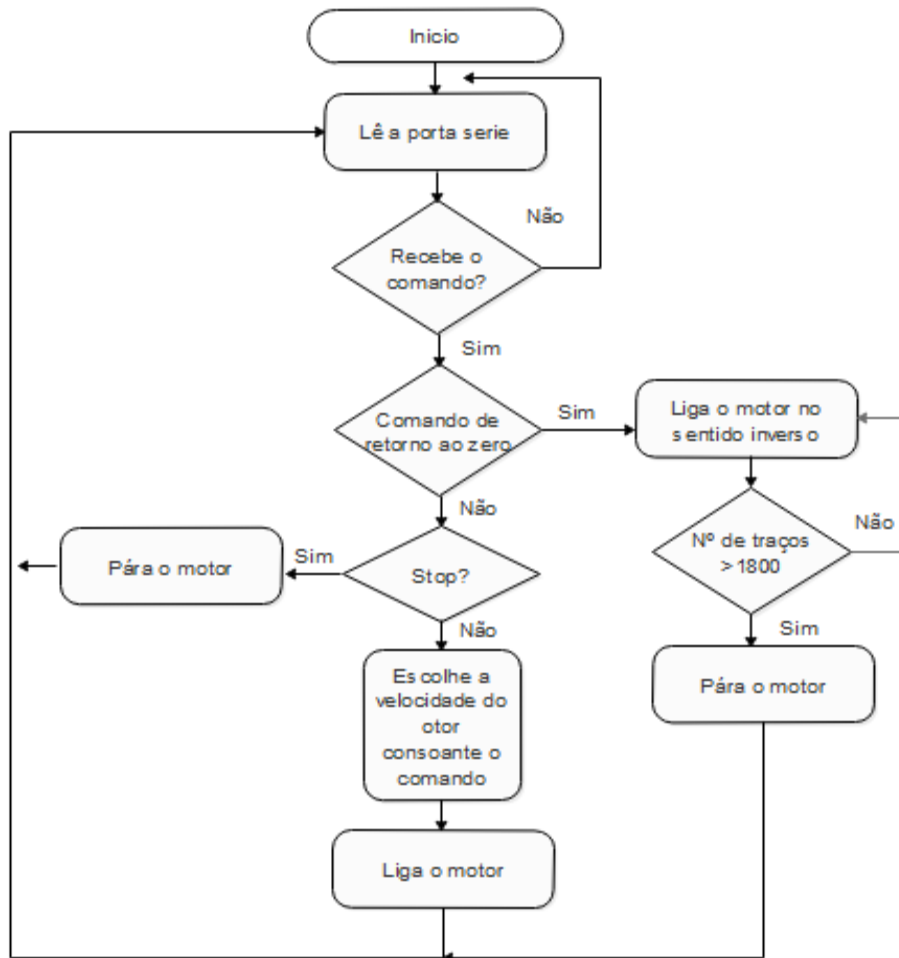


Figura 3.5. Fluxograma do funcionamento do microcontrolador.

3.1.4 Medidor de sinal

O sistema de medição baseia-se na obtenção do nível de sinal recebido pela antena através do analisador de espectro. O analisador de espectro utilizado foi o FSH8- Spectrum Analyzer da marca ROHDE & SCHWARZ [20]. Este dispositivo disponibiliza uma interface para efetuar o controlo do analisador via USB ou LAN (R&SFSH-K40), sendo este utilizado para o registo dos valores visualizados no analisador de espectro.

Esta interface (R&SFSH-K40) permite a interligação com outro software, sendo para tal utilizado o MatLab 2013a. O procedimento para a aplicação dos métodos para integrar os dados do analisador de espectro no computador é o seguinte:

- Após a instalação correta do MatLab 2013a, verifica-se se a biblioteca VISA (*Virtual Instrument Software Architecture*) foi instalada adequadamente. Esta biblioteca pode ser obtida no link ([NI_VISA_Download_link](#)). Para tal, utiliza-se o comando *instrhwinfo*. De seguida, na janela de comando deve aparecer a informação observada na figura 3.6.

```

>> instrhwinfo

ans =

    MATLABVersion: '8.1 (R2013a)'
SupportedInterfaces: {'gpib' 'serial' 'tcpip' 'udp' 'visa' 'Bluetooth' 'i2c'}
SupportedDrivers: {'matlab' 'ivi' 'vxipnp'}
    ToolboxName: 'Instrument Control Toolbox'
    ToolboxVersion: '3.3 (R2013a)'

```

Figura 3.6. Verificação da biblioteca VISA no MatLab 2013a.

- Também pode-se verificar mais informação sobre esta biblioteca utilizando o comando ***instrhwinfo*** (**'visa'**) como se observa na figura 3.7.

```

>> instrhwinfo ('visa')

ans =

    InstalledAdaptors: {'ni'}
    JarFileVersion: 'Version 3.3'

```

Figura 3.7. Verificação da versão da biblioteca VISA.

- Para realizar a conexão ao equipamento de prova utiliza-se o instrumento TMT00L. Este pode ser iniciado através do comando ***tmtool*** ou usando a janela APPS, selecionando depois o ícone ***Instrument Control***, como está representado na figura 3.8.

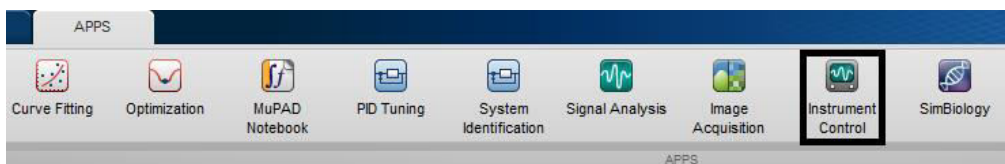


Figura 3.8. Janela APPS, ícone (*Instrument Control*).

- Com a janela ***Instrument Control*** aberta pode-se verificar, através da informação do VXIplug & Play, as diferentes formas para controlar o instrumento. Por exemplo, a função para controlar a frequência está representada na figura 3.9.

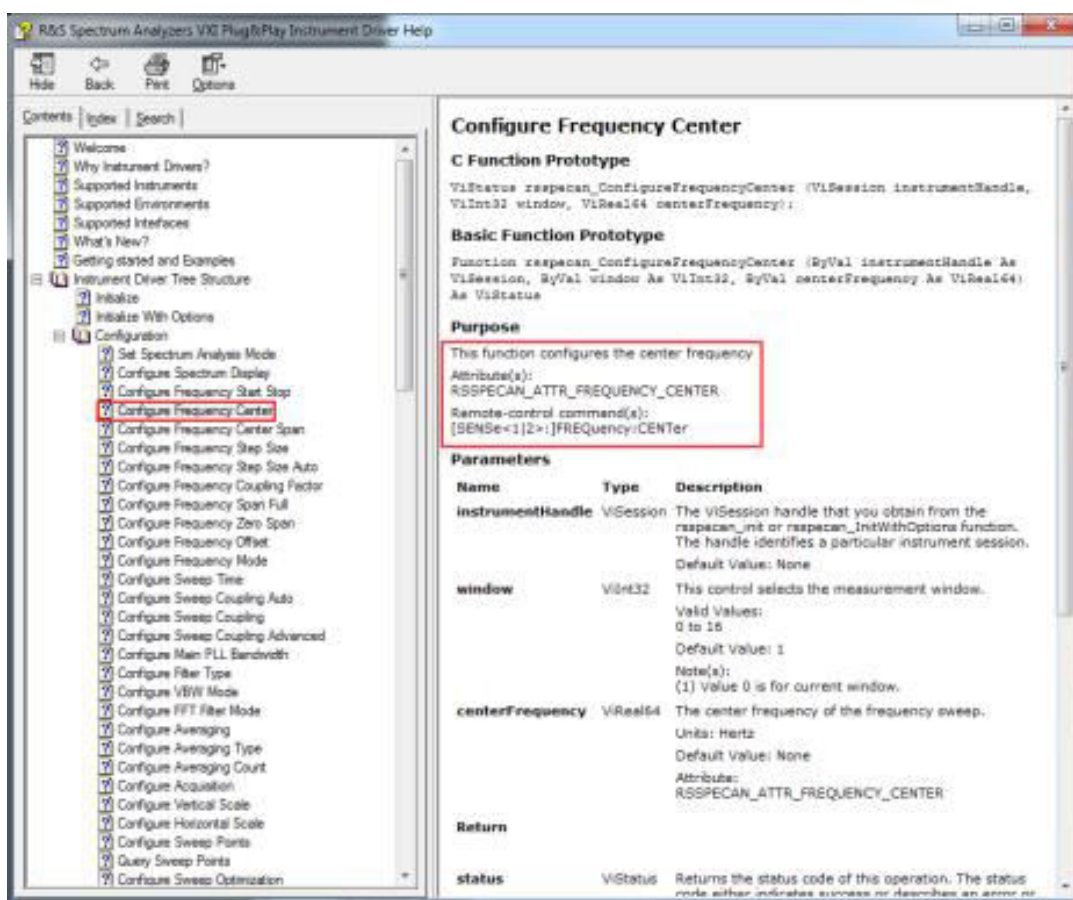


Figura 3.9. Descrição específica da função ConfigureFrequency Center.

- Após ter-se adquirido conhecimentos sobre as funcionalidades e como processar com o driver, liga-se o analisador de espectro com o MatLab, através de um cabo USB. Na janela do TMT00L do lado esquerdo seleciona-se a opção **Instrument Objects**, seguidamente **Interface Objects** e carrega-se no botão **New Objects**, como se observa na figura 3.10.

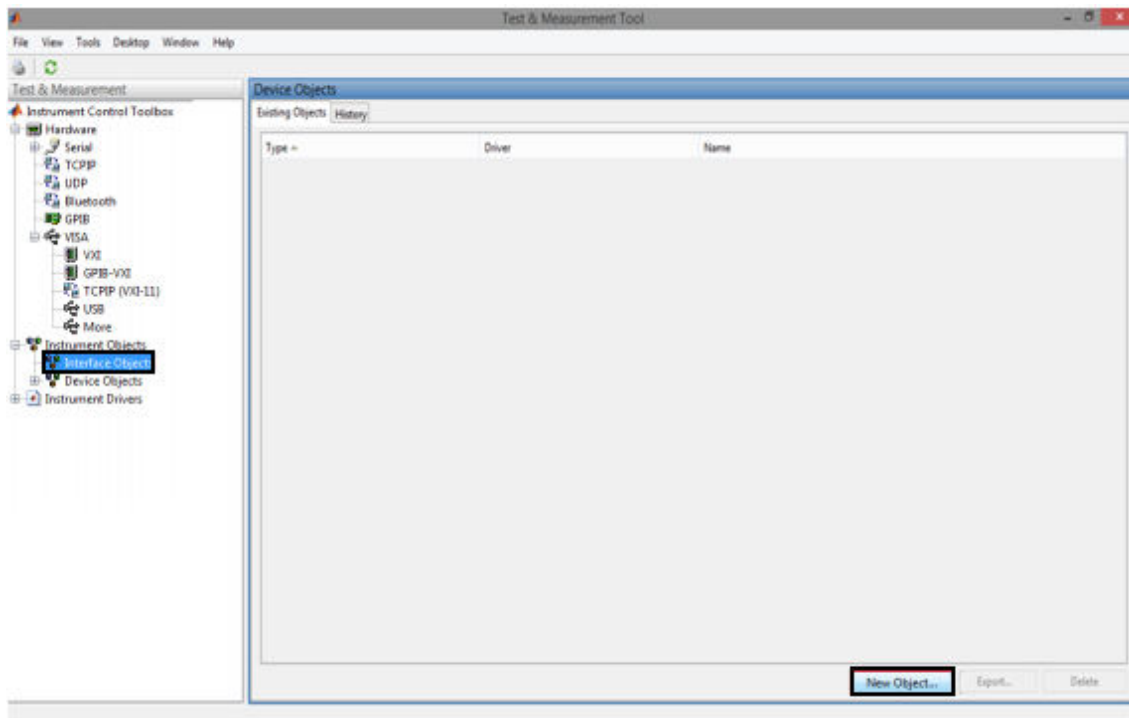


Figura 3.10. Procedimento para a ligação do analisador de espectro com o MatLab.

- Surgirá uma janela denominada de **New Objects Creation**, onde deve ser selecionada na **Interface object type** a opção **VISA**, no **Vendor** deve-se selecionar a opção **ni**, e no **Resource name** coloca-se o IP do analisador de espectro (**TCPIP:172.16.10.10:INSTR**), como mostra a figura 3.11.

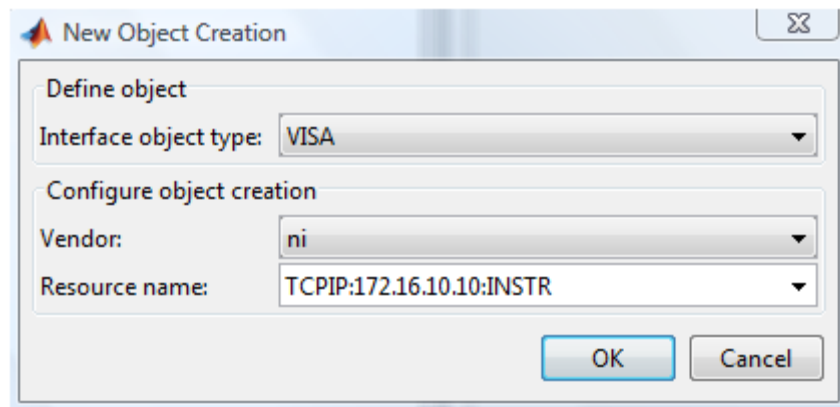


Figura 3.11. Opções escolhidas na janela **New Objects Creation** na ligação entre o MatLab 2013a e o analisador de espectro.

- Depois de selecionar a opção **OK**, surge uma nova janela no item **Instrument Object**, juntamente com o **Interface Objects** com o nome **VISA-TCPIP-0-172.16.10.10-inst0**. Selecionando a opção **Connect** permite realizar a comunicação com o aparelho, obtendo-se a figura 3.12.

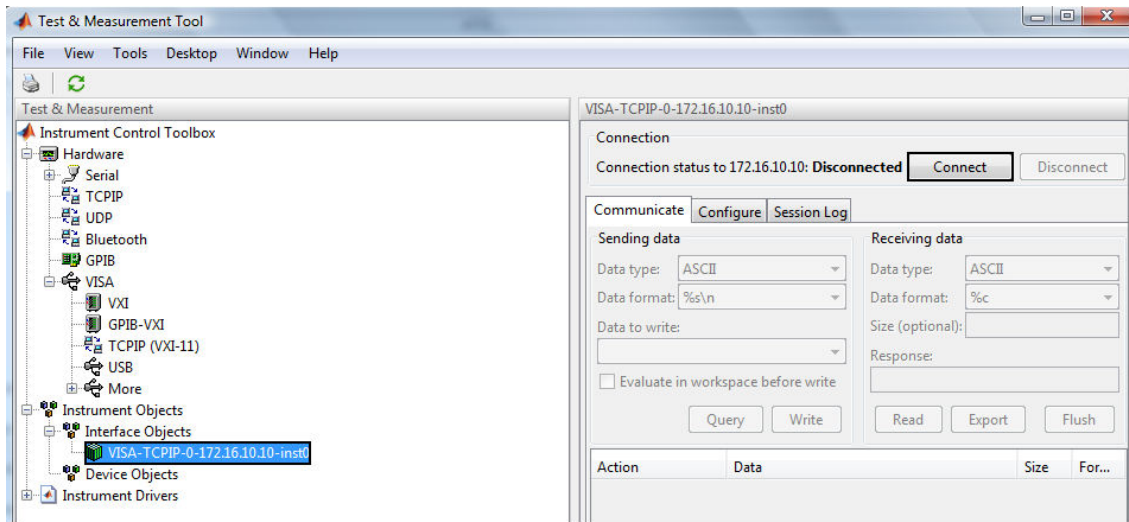


Figura 3.12. Janela com as funções do driver no instrumento MatLab. Uso dos botões de conectar e desligar.

Caso surja a mensagem de erro ***“A ‘Selected’ compiler was not found. You may need to run >> mex -setup”***, é necessário executar a função mex-setup e seguir os passos que são apresentados na figura 3.13.

```

Command Window
New to MATLAB? Watch this Video, see Examples, or read Getting Started.
>> mex -setup

Welcome to mex -setup. This utility will help you set up
a default compiler. For a list of supported compilers, see
http://www.mathworks.com/support/compilers/R2013a/win32.html

Please choose your compiler for building MEX-files:

Would you like mex to locate installed compilers [y]/n? Y

Select a compiler:
[1] Lcc-win32 C 2.4.1 in C:\PROGRA-1\MATLAB\R2013a\sys\lcc
[0] None

Compiler: 1|

```

Figura 3.13. Instrução para executar o comando *mex-setup*.

Após ter-se resolvido o problema é necessário verificar a porta USB. Caso a porta não seja a do código de execução, esta deve ser alterada. Na figura 3.14 pode-se ver onde esta alteração deve ser realizada.

```

% --- Executes on button press in botaostart.
function botaostart_Callback(hObject, eventdata, handles)

    global add;
    global matrix;
    global groupObj;

    %comunica com o ardui no
    %%%%%%%%%%%%%%%

    s = serial('COM7');
    juan=0
    if(s.Status == 'closed')
        fopen(s);
        pause(10);
    end
    fwrite(s,'e');
    pause(1)

```

Figura 3.14. Localização para alteração da porta COM.

- Após ter-se realizado com êxito a conexão com o instrumento como observa-se na figura 3.14, o estado de conexão passa para conectado e todos os comandos podem ser utilizados. No campo **Date to write** pode-se enviar o comando ***IDN?** de forma a consultar o modelo do aparelho, clica-se no botão **Query** e a resposta será mostrada numa tabela de registo. Este comando permite verificar se o envio dos comandos está a ser realizado com sucesso.
- Os códigos dos comandos implementados podem ser verificados na opção **Session Log**, já que permite importar o código real implementado para cada comando interativo. No caso do comando ***IDN?**, por exemplo, o código é representado na figura 3.15.

```

% Find a VISA-TCPIP object.
obj1 = instrfind('Type', 'visa-tcpip', 'RsrcName',
'TCPIP0::10.85.0.68::inst0::INSTR', 'Tag', '');

% Create the VISA-TCPIP object if it does not exist
% otherwise use the object that was found.
if isempty(obj1)
    obj1 = visa('NI', 'TCPIP0::10.85.0.68::inst0::INSTR');
else
    fclose(obj1);
    obj1 = obj1(1)
end

% Connect to instrument object, obj1.
fopen(obj1);

% Communicating with instrument object, obj1.
data1 = query(obj1, '*IDN?');

% Disconnect from instrument object, obj1.
fclose(obj1);

```

Figura 3.15. Código referente ao comando *IDN?.

3.1.5 Software

Desenvolveu-se um programa no MatLab de forma a controlar o motor e para receber os dados do analisador de espectro. Foi criada uma interface gráfica através da ferramenta GUI do MatLab, de forma a proporcionar ao utilizador um programa mais intuitivo e de fácil utilização. Esta interface encontra-se representada na figura 3.16 e o código implementado no anexo B.

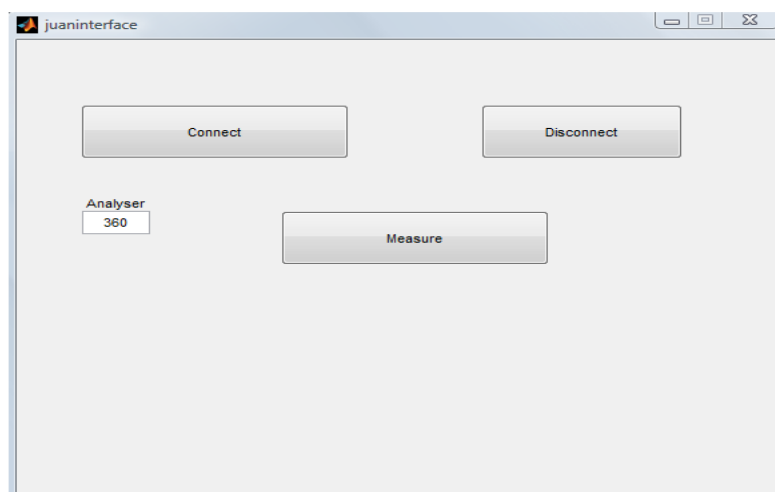


Figura 3.16. Interface gráfica do programa desenvolvido.

Para a utilização deste sistema, o utilizador inicialmente tem de ligar o analisador de espectro na porta COM3 e o microcontrolador na porta COM7 do computador que irá registar os valores obtidos. Após verificar que o sistema está ligado de forma correta, clica-se na interface GUI, figura 3.16, para inicializar o programa. De seguida, deve-se preencher o campo “Analyser” com o número de amostras que se pretende obter através do analisador de espectro. Este número depende da velocidade do motor, devendo-se garantir que o motor realize uma volta de 360°. Após o preenchimento do campo o botão “Connect” fica ativo e ao clicar sobre este o programa começa a correr. Este botão tem a função de ligar o analisador de espectro ao computador já com os parâmetros estipulados para realizar as respetivas medições. Se o utilizador desejar modificar alguns parâmetros, tais como, a frequência, *span* e *marker*, deverá modifica-los diretamente no código.

Depois de clicar no botão “Connect”, o utilizador recebe uma mensagem na janela de comando do MatLab em como a ligação entre o analisador e o computador foi realizada com sucesso. De seguida, o botão “Measure” fica ativo e ao clicar sobre este o programa começa a correr novamente. Este botão tem a função de, comunicar com o microcontrolador e com o analisador de espectro. À medida que as transferências vão sendo recebidas, o programa vai enviando informações para o microcontrolador rodar o motor. Ao mesmo tempo, são registados os valores do nível de sinal recebido na frequência de interesse, guardando-os num vetor. Também são registados em outro ficheiro os valores do tempo entre riscas do sensor ótico, de modo a saber a posição

em que cada ponto do analisador de espectro foi registado. Estes valores são registados em ficheiros .CSV.

Por último, quando o programa tiver guardado os valores em ambos os ficheiros, o utilizador recebe uma mensagem na janela de comando do MatLab em como as medições foram obtidas com sucesso. Após isto, o botão “Disconnet” fica ativo e ao clicar no mesmo finaliza-se o programa. Na figura 3.17 encontra-se apresentado o esquema de funcionamento do programa desenvolvido.

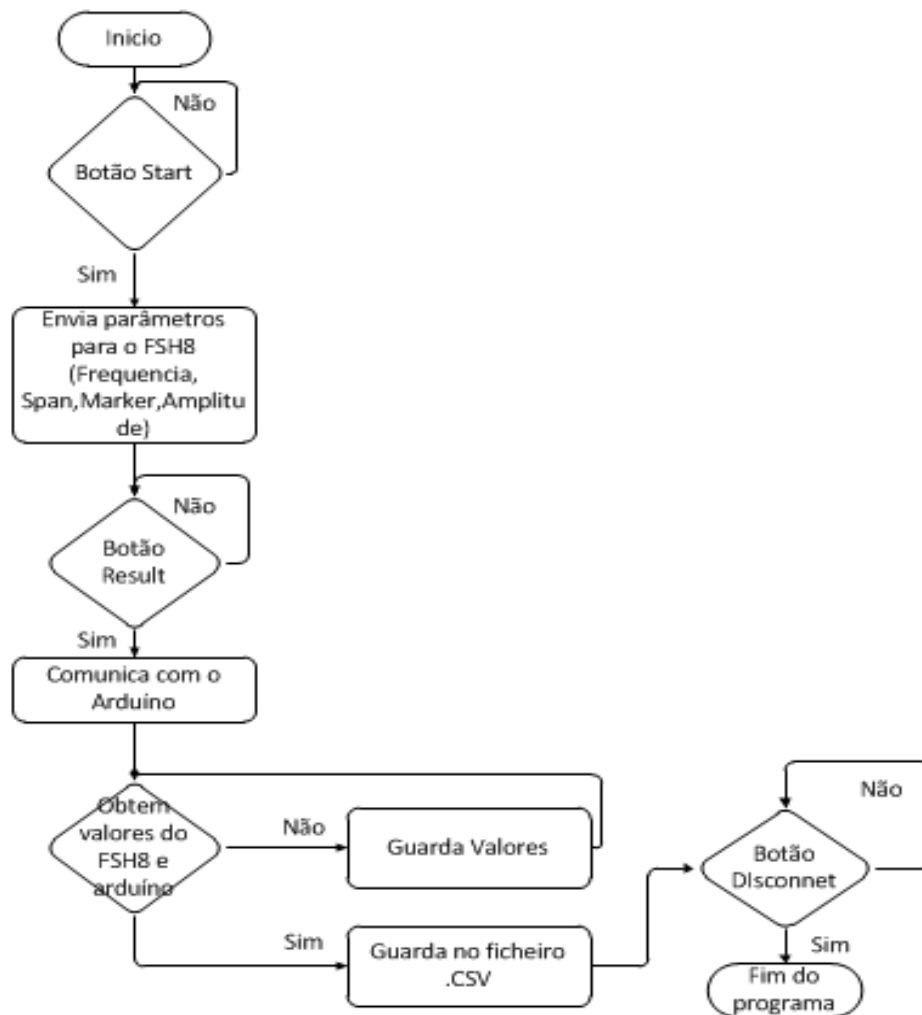


Figura 3.17. Fluxograma do programa desenvolvido para a medição do diagrama de radiação.

Após a conclusão deste processo, os ficheiro .CSV encontram-se gravados na diretoria C:\Documentos\Matlab\"nome do ficheiro". De seguida, utilizam-se os dois ficheiros, para criar um único ficheiro Excel (“nome da antena.xls”) com os dados dos dois, como mostra a figura 3.18, de modo a facilitar a manipulação dos dados para o utilizador na realização dos diagramas de radiação, onde é guardado o nível de sinal recebido e os valores do tempo entre riscas proveniente do microcontrolador.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1	Amostras							Tempo por amostras					
2	-50.131							96					
3	-51.584							230					
4	-52.751							339					
5	-54.047							462					
6	-55.898							519					
7	-57.345							556					
8	-59.297							586					
9	-61.776							668					
10	-63.259							742					
11	-63.361							880					
12	-62.700							934					
13	-64.453							1002					
14	-62.846							1034					
15	-65.595							1106					
16	-65.715							1186					
17	-67.572							1283					
18	-66.045							1371					
19	-66.229							1459					

Figura 3.18. Ficheiro Excel .XLS, com as amostras e tempo entre amostras.

Tendo os valores num só ficheiro Excel .xls, obtêm-se os diagramas de radiação através do código que pode ser visualizado no anexo C. No entanto, têm-se de ter algumas considerações antes de ser aplicado o programa para a realização dos diagramas de radiação. Para tal, tem-se em atenção o número de pontos pedidos no campo “Analyzer” da interface GUI. Os valores pedidos devem garantir que o motor realiza uma volta completa.

Por cada medição efetuada é retirado um número de amostras variável de forma a garantir uma volta completa. Contudo, é necessário realizar um cálculo auxiliar. O primeiro passo consiste em determinar quantas voltas é que o motor deu. Como tal, recorre-se ao ficheiro Excel e observa-se quantos traços foram retirados para X amostras. Como uma volta corresponde a 1800 traços, aplica-se a Regra de Três Simples e obtêm-se o valor de quantas voltas o motor deu. Novamente aplica-se uma Regra de Três Simples de modo a determinar quantas das X amostras é que definem apenas uma volta.

Após ter-se determinado o valor das amostras referente para uma volta, aplicou-se o código do anexo D. A figura 3.19 ilustra parte do código em questão.

```

clear all;
clc;

% tempo de corrido
tempo=[5 102 226 322 451 584 684 816 921 1041 1166 1294 1415 1549 1665 1792 1931 2045 2165 2294 2410 2541 2658 27
amostras=[-34.407 -34.443 -34.485 -34.552 -34.608 -34.69 -34.778 -34.879 -34.98 -35.101 -35.24 -35.353 -35.5 -35.662 -35.82
%Normalização
amostras= amostras -max(amostras);
%Compensação
Graus_para_compensar=0;
graus_por_amostras=360/(length(amostras));
compensacao=round(Graus_para_compensar/graus_por_amostras);
%
amostras = [ amostras((length(amostras)-compensacao):length(amostras)) amostras(1:length(amostras)-(compensacao+1))]

```

Figura 3.19. Excerto do código para o desenho do diagrama de radiação.

Na figura 3.19 visualiza-se no retângulo a vermelho referente ao tempo o sítio onde se deve colocar as amostras que definem apenas uma volta, no retângulo a vermelho referente às amostras tem-se os valores do tempo entre traços e no retângulo vermelho os graus para compensar. O utilizador pode rodar o gráfico, de modo a corrigir o atraso na tiragem das amostras por parte do analisador de espectro. O resultado é apresentado na figura 3.20.

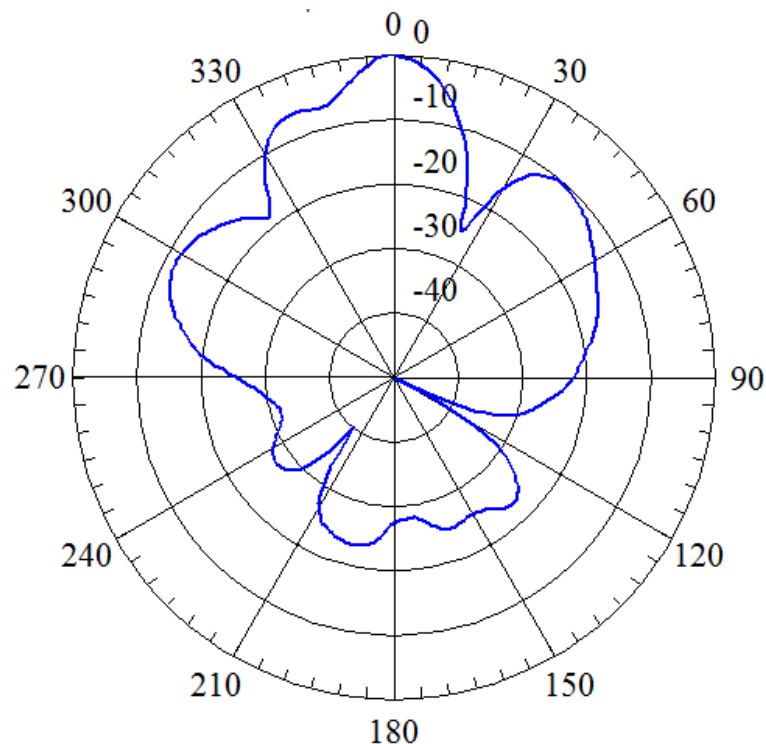


Figura 3.20. Exemplo do diagrama de radiação polar da antena Biquad, obtido com o programa desenvolvido.

3.2 Sistema de comunicação com controlo mecânico

Neste projeto é pretendido o desenvolvimento de um sistema autónomo com a capacidade de controlar o feixe do diagrama de radiação de uma antena

diretiva para o ângulo de máxima radiação. O sistema é constituído por um motor, que faz rodar a antena, e um controlador, que permite determinar o ângulo de máxima radiação. Considerando que o protótipo será instalado no exterior, é relevante considerar algumas características importantes, tais como:

- Ter um baixo consumo energético.
- O sistema deve ser compacto e de fácil manipulação.
- Os componentes do protótipo deverão ser inseridos numa caixa estanque por forma a proteger intempéries.

3.2.1 Motor

O motor escolhido para a implementação deste protótipo foi o motor de passo a passo. Os passos podem variar em 90° ou passos reduzidos de $1,8^\circ$ [21].

Existem dois tipos de motores de passo a passo, os bipolares constituídos por quatro fios (figura 3.21 (a)) e os unipolares que são constituídos por 5 ou 6 fios (figura 3.21 (b)). Estes últimos são mais simples de controlar o seu movimento e caracterizam-se por possuir um *center-tape* entre o enrolamento das bobinas. Normalmente utiliza-se este *center-tape* para alimentar o motor.



Figura 3.21. Tipo de motores de passo: (a) Bipolar, (b) unipolar [20].

O motor utilizado para o controlo mecânico do diagrama de radiação é do tipo unipolar com 6 fios, da marca ASTROSYN modelo Y-129 [22], como está representado na figura 3.22.



Figura 3.22. Motor passo a passo ASTROSYN modelo Y-129.

As suas principais características são:

- Ângulo de passo $1,8^\circ$.
- Corrente por fase 160 mA.
- Tensão de funcionamento 12 V.
- Número de fios 6.

Ao submeter uma das bobinas a uma tensão, o campo magnético induzido no estator (Figura 3.23) provoca um movimento de rotação no rotor do motor até atingir o ponto de equilíbrio. Este movimento é possível porque as bobinas encontram-se isoladas umas das outras. Então, ao aplicar-se uma tensão na bobina 1 e 2, o campo magnético é invertido sem a necessidade de inverter o sentido da corrente para efetuar a rotação no eixo do motor. Esta característica permite que a ativação do circuito seja simples e direta, sendo a diferença em relação aos motores bipolares [23].

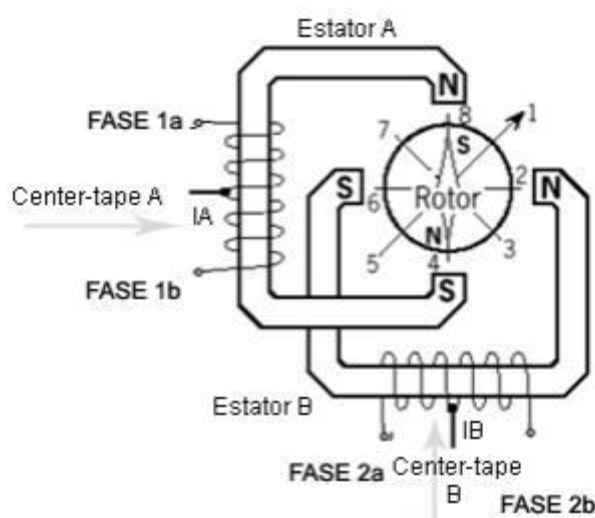


Figura 3.23. Motor unipolar- representação do rotor [22].

Para verificar as ligações do motor recorreu-se à folha característica do motor e, assim, determinar a sequência correta que se deve ligar os terminais para o motor girar continuamente. Sendo assim, o resultado fica em:

- Fase 1A vermelho
- Fase 1B castanho
- Center-tape A preto
- Fase 2A amarelo
- Fase 2D laranja
- Center-tape B branco

3.2.2 Arduíno FIO

Neste protótipo escolheu-se a placa Arduíno FIO devido ao baixo consumo em comparação com as restantes placas. É uma placa eletrónica de desenvolvimento baseada no microcontrolador ATmega328P. A figura 3.24 apresenta a placa utilizada [24].

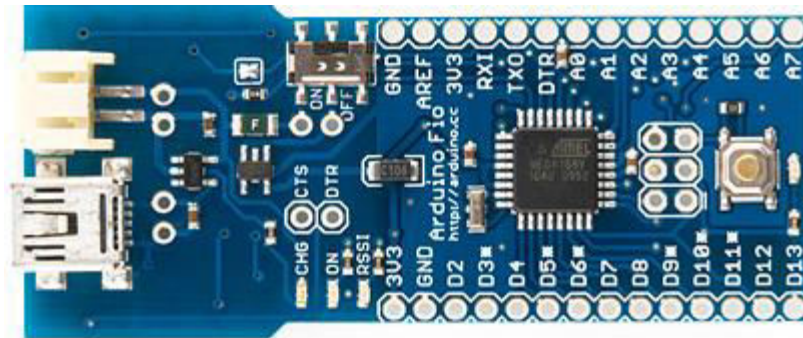


Figura 3.24. Placa Arduíno FIO.

O Arduíno FIO trabalha com uma tensão nominal de 3,3 V. Possui 14 pinos com entrada/saída digitais, dos quais 6 podem ser utilizados como saída PWM (*Pulse Width Modulation*) e 8 pinos como entrada analógica. Cada pino entrada/saída fornece uma corrente de 40 mA.

Para realizar a comunicação entre o computador e Arduíno FIO recorreu-se a um *shield* FTDI (*Future Technology Devices International*), uma vez que a placa não contém entrada direta para a comunicação.

Quanto à alimentação, pode ser efetuada de dois modos, ou através do *shield* FTDI ou recorrendo a uma bateria de lítio, em que a tensão deverá estar entre os 3,3 V e os 12 V.

3.2.3 Driver A4998

O driver utilizado para o controlo do motor foi o A4988 representado na figura 3.25 [25]. Este driver utiliza o chip A4988 da Allegro MicroSystems e foi especialmente desenvolvido para controlo de pequenos passos para motores de passo bipolares e unipolares.

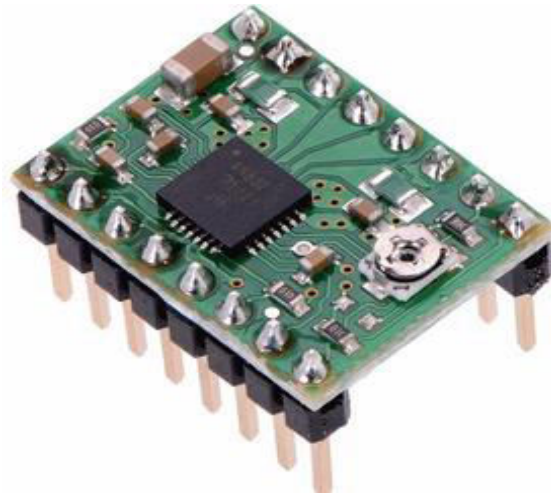


Figura 3.25, Driver A4988 da Allegri MicroSystems.

A tensão de operação lógica do driver é de 3 a 5,5 V a serem conectados nos pinos VDD e GND, sendo que pode controlar motores de 8 a 35 V. Outra característica importante é que possui transístores embutidos, que servem para fornecer corrente elétrica de 2A, muito mais elevadas que as que o Arduino FIO pode fornecer. Além disso, pode-se ajustar a corrente de saída através de um potenciómetro, ou seja, utilizar tensões acima da tensão nominal do motor de passo para alcançar taxas maiores de passo.

O controlo básico de um motor de passo é feito por meio dos pinos do driver STEP e DIR. Na figura 3.26 visualiza-se as respetivas ligações para realizar o controlo de um motor de passo através do driver A4988.

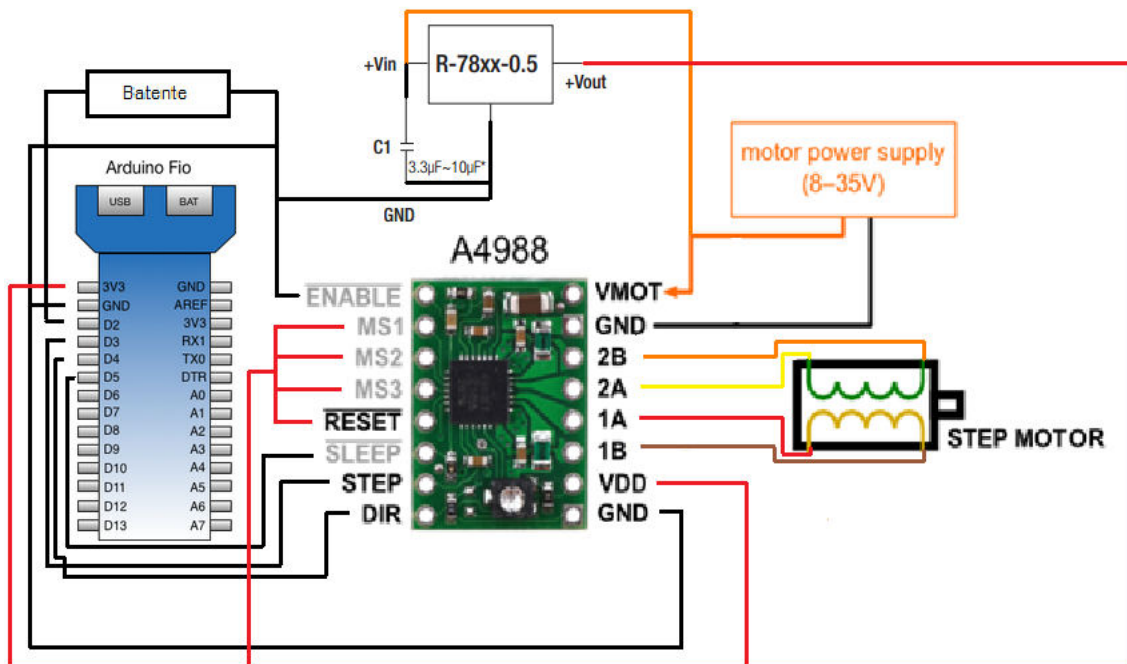


Figura 3.26. Esquema de ligação para o controlo de um motor de passo através do driver A4988 [25].

Uma das grandes vantagens do driver é a possibilidade de utilizar micropassos através dos pinos MS1, MS2 e MS3. Acionando estes pinos pode-se ter as 5 configurações como mostra a tabela 3.1.

Tabela 3.1 Configurações possíveis para o controle de passo do motor.

Pinos			Resolução micropassos
MS1	MS2	MS3	
Low	Low	Low	Full step
High	Low	Low	Half step
Low	High	Low	Quarter step (1/4)
High	High	Low	Eighth step (1/8)
High	High	High	Sixteenth step (1/16)

A utilização dos vários modos de micropassos permite reduzir o torque do motor em 30%, em comparação com o passo completo (*full-step*). Neste projeto optou-se por utilizar a configuração (*Sixteenth-step*), o que permitiu reduzir o passo do motor de $1,8^\circ$ para $0,1125^\circ$.

Além dos pinos STEP e DIR, utilizou-se o pino ENABLE para desligar as saídas do motor quando este estiver desligado. Também verificou-se que com a utilização dos pinos SLEEP e RESET do driver permitem baixar o consumo energético de 2 mA para $10 \mu\text{A}$ [25].

3.2.4 Conversor DC/DC

Neste protótipo a alimentação do motor foi realizada por 8 pilhas de 1,2 V com capacidade de 2300 mAh. Por isso, decidiu-se implementar um Step-Down, que permitia reduzir a tensão utilizada para 3,3 V. A tensão de 3,3 V foi utilizada para alimentação do Arduino FIO e o driver A4988. Para tal, utilizou-se o conversor DC/DC R-783.3-0.5 da RECOM [26], apresentado na figura 3.27.

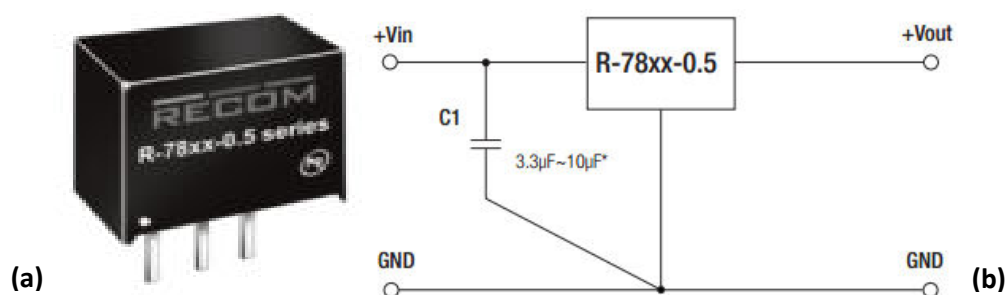


Figura 3.27. Conversor DC/DC: (a) R-783.3-0.5 da RECOM, (b) Circuito implementado.

3.2.5 Circuito e programação

Tendo-se os componentes necessários para controlar o motor e com base no esquema de ligação mostrado na figura 3.26, optou-se por soldar os componentes diretamente numa placa PCI perfurada, não sendo necessário construir uma placa de circuito impresso.

O circuito eletrónico foi colocado dentro de uma caixa estanque (IP65), de forma a estar protegido contra condições climatéricas adversas. A figura 3.28 mostra o circuito eletrónico no interior da caixa estanque.



Figura 3.28. Caixa estanque com circuito elétrico implementado.

Para a utilização deste sistema, programou-se o Arduino. O fluxograma da figura 3.29 ajuda a uma melhor compressão do código desenvolvido para controlar o motor passo a passo, para as necessidades do utilizador. O código implementado pode ser visto no anexo E.

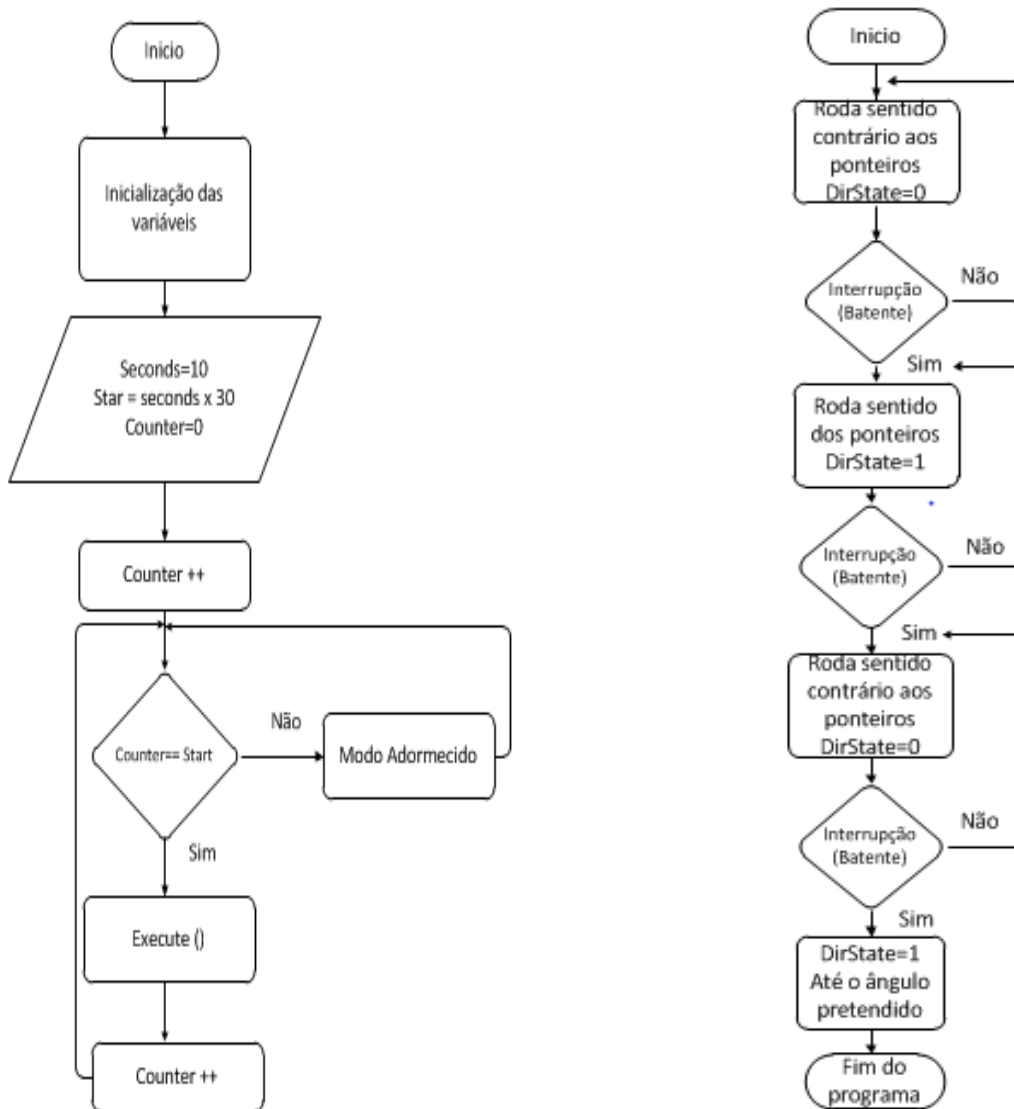


Figura 3.29. Fluxograma para o sistema mecânico: (a) Código principal; (b) Função Execute ().

O motor passo a passo também foi colocado dentro de uma caixa estanque, de modo a proteger contra as condições climáticas adversas. Desta forma, desenhou-se uma caixa na impressora 3D com as dimensões adequadas no programa de desenho 3D *Sketchup*. A figura 3.30 (a) ilustra a caixa vista do topo, a figura 3.30 (b) mostra a caixa de perfil e a figura 3.30 (c) mostra a tampa da caixa.

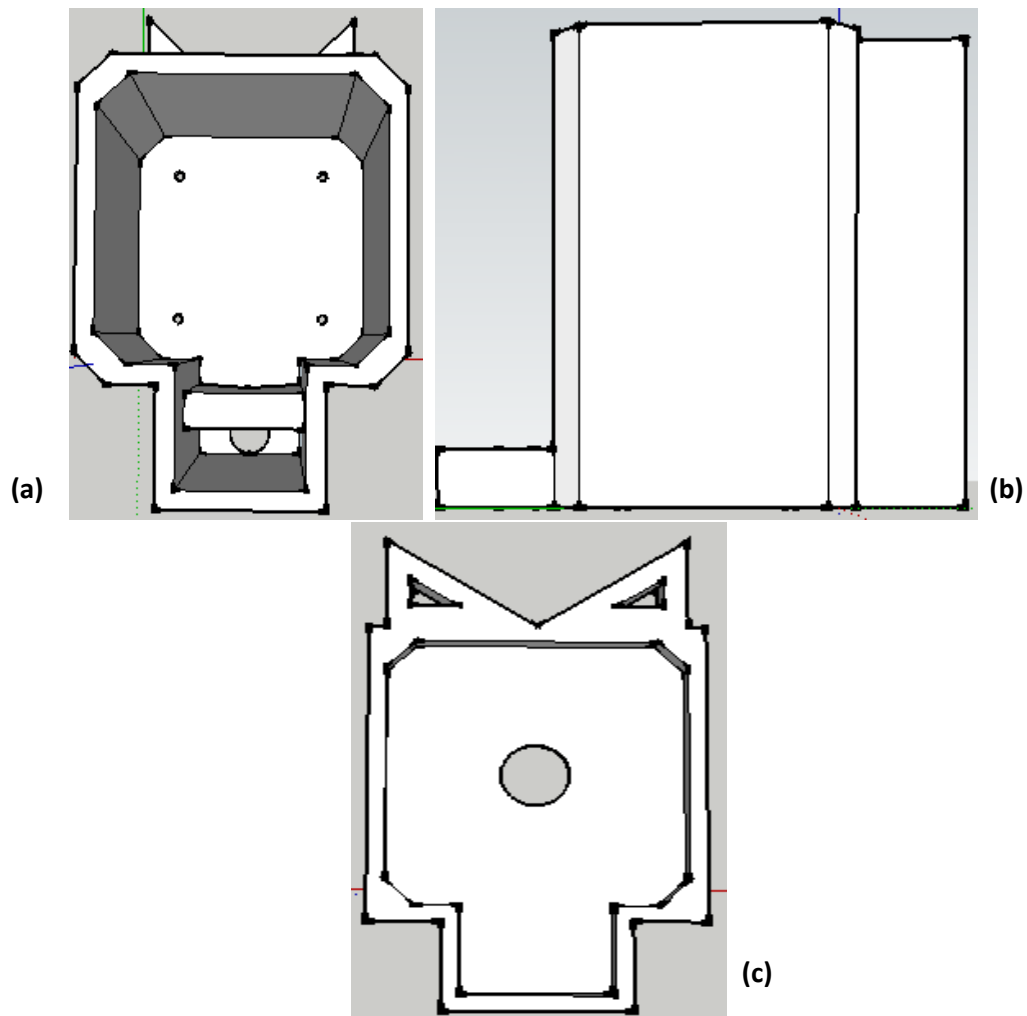


Figura 3.30. Caixa estanque para proteção do motor de passo: (a) visto do topo, (b) vista de perfil, (c) tampa da caixa.

Após ter-se dimensionado e desenhado a respetiva caixa estanque, realizou-se a impressão. Na figura 3.31 apresenta-se a caixa depois de impressa.

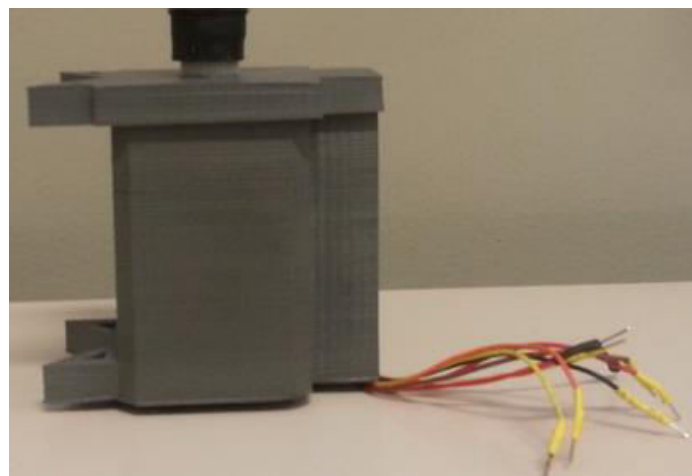


Figura 3.31. Caixa estanque para a proteção do motor passo a passo.

3.2.6 Antena

Na fase de testes do sistema mecânico implementado recorreu-se a uma antena suspensa (*Patch Antenna*) [27]. Esta antena é diretiva e de dimensões reduzidas, apresentando as características ideais para realizar os testes ao sistema. Esta antena opera na frequência de 2,42 GHz. A figura 3.32 ilustra as dimensões para a antena proposta.

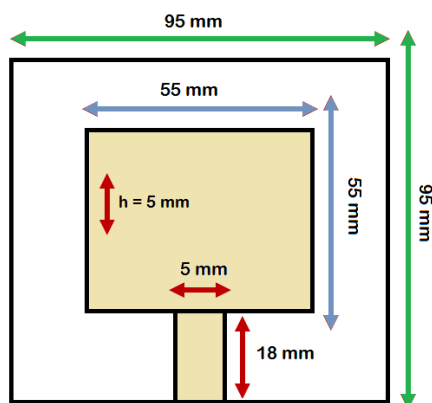


Figura 3.32. Antena suspensa com as medidas pretendidas [27].

Para o plano de massa as dimensões utilizadas foram 95 mm por 95 mm. Para a antena foram de 55 mm por 55 mm enquanto a linha suspensa que liga a antena ao plano de massa foi de 5 mm. Na figura 3.33 é possível visualizar a antena construída.



Figura 3.33. Antena de referência utilizada.

A figura 3.34 (a) mostra os resultados referentes ao valor da impedância da antena e do SWR (*Standing Wave Ratio*). A figura 3.34 (b) apresenta o diagrama de radiação da antena.

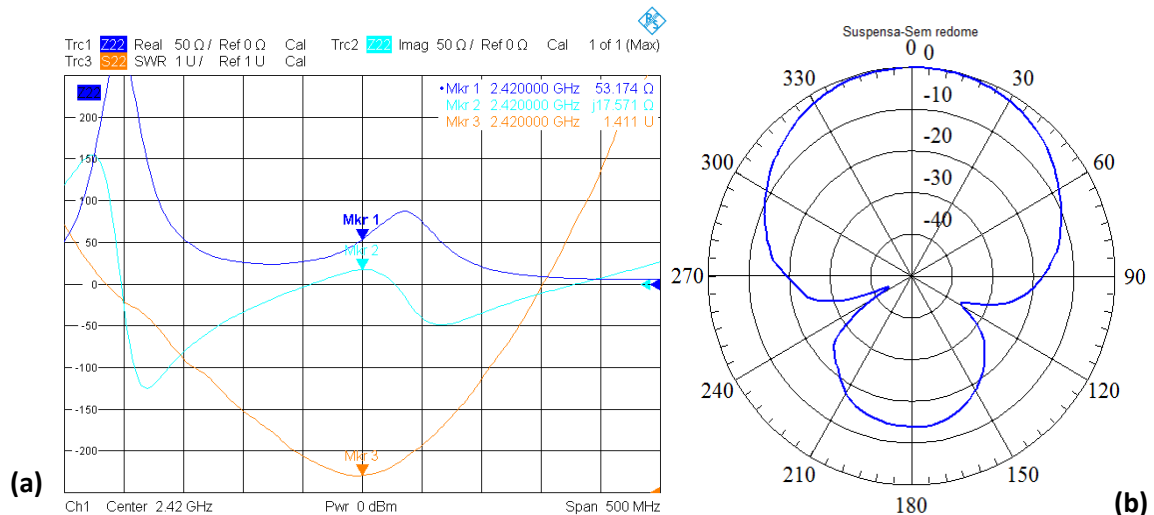


Figura 3.34. Antena suspensa: (a) SWR e impedância da antena, (b) Diagrama de radiação.

Analisando os resultados da figura 3.34 (a) verifica-se que para frequência de 2,42 GHz obteve-se uma impedância de 53,17- j17,57, um SWR de 1,41. No que concerne ao ganho da antena foi de 8,6 dBi.

A antena foi colocada dentro de uma estrutura resistente, tendo-se realizado um pequeno estudo de que material poderia ser o mais indicado, concluindo que tanto o PVC (*Polyvinyl Chloride*) como o acrílico de 3 mm tinham a mesma influência sobre o sinal recebido. Sendo assim, optou-se por uma caixa PVC disponível no laboratório com as dimensões adequadas para incrustar a antena dentro da caixa. Por último, fez-se um teste de forma a verificar a que distância o material em causa tinha mais influência na perda de sinal, optando-se por colocá-la 2 cm. O resultado do estudo encontra-se na tabela 3.2.

Tabela 3.2. Distâncias entre o acrílico e PVC à antena.

Distância do acrílico e PVC à antena (cm)	Perda no ganho (dBi)
0,5	1
1	0,6
1,5	0,4
2	0,2
2,5	0,2
3	0

Após ter-se adquirido as influências do material no sinal, colocou-se a antena dentro da caixa, figura 3.35. A figura 3.36 apresenta os valores do SWR 1,163 e de impedância de 57,01- j4,02, bem como o diagrama de radiação após a colocação da antena dentro da caixa. O valor do ganho passou para os 8,2 dBi, valor aproximado ao valor obtido sem proteção.



Figura 3.35. Redome: (a) Interior; (b) Antena vedada.

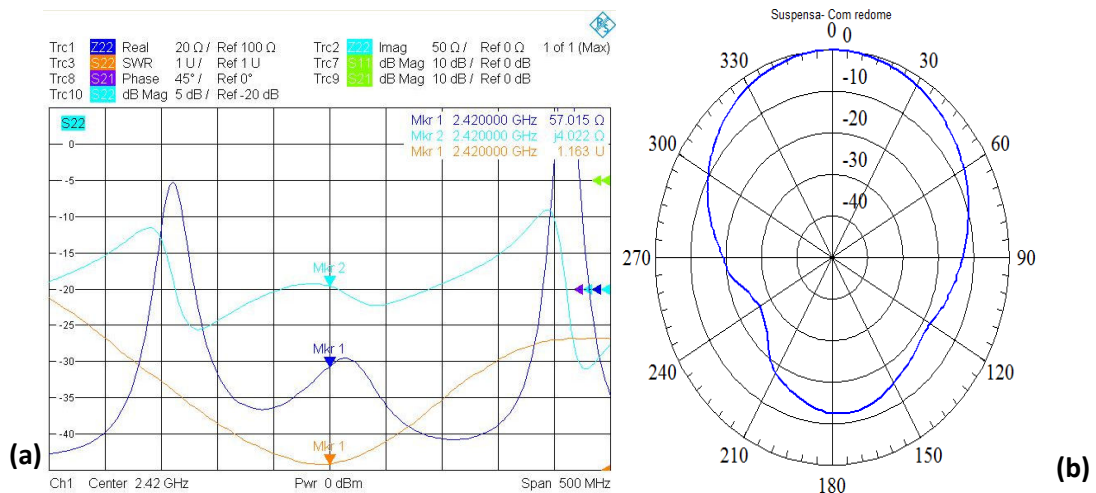


Figura 3.36. (a) SWR e impedância da antena; (b) Diagrama de radiação.

3.2.7 Alimentação e consumo energético

A fonte de energia para este sistema foi constituída por 8 baterias recarregáveis em série do tipo AA, composição NiMH, com uma carga útil de 2500 mAh. Utilizando 8 baterias em série o nível de tensão é de 9,6 V, este valor encontra-se dentro do valor típico de funcionamento de um motor de passo a passo.

Efetou-se um estudo do consumo energético total do protótipo em causa. Para tal, verificaram-se os consumos fornecidos pelos fabricantes de cada componente, caso estes estejam no modo ativo ou adormecido. A tabela 3.3 apresenta os respetivos consumos. Obteve-se na prática 66 mA para o modo ativo e 4 mA no modo adormecido.

Tabela 3.3. Consumo energético dos componentes.

Componente	Estado	
	Ativo	Adormecido
Arduíno FIO	4 mA	180 μ A
Driver A4988	2 mA	10 μ A

Este protótipo opera nos dois estados, ativo e adormecido, de forma a diminuir o consumo da bateria quando o sistema não está em funcionamento. Para tal, criou-se um ciclo em que o sistema permanece ativo o tempo necessário para procurar o melhor sinal e adormece quando o sistema pára no ângulo pretendido. Supondo que o ciclo é de 30 s, em que 10 s é o tempo necessário para o modo ativo e 20 s para o modo adormecido, até realizar novamente o mesmo ciclo, este valor pode ser alterado conforme as necessidades do utilizador. Para esta situação o consumo do nó é,

$$\text{Consumo do protótipo} = \frac{\text{Consumo total}_{\text{modo ativo}} + \text{Consumo total}_{\text{modo adormecido}}}{\text{Duração do ciclo}} \quad (3.1)$$

$$= \frac{66\text{mA} \times 10\text{s} + 4\text{mA} \times 20\text{s}}{30} = 24,67 \text{ mA}$$

Após saber o consumo do protótipo, verificou-se o tempo que as baterias demoram a descarregar, através da seguinte expressão:

$$\text{Duração}_{\text{bateria}}(\text{horas}) = \frac{\text{Carga das baterias}}{\text{Consumo do protótipo}} \quad (3.2)$$

$$\text{Duração}_{\text{bateria}}(\text{horas}) = \frac{2300 \text{ mAh}}{24,666 \text{ mA}} = 93,245 \text{ h} = 3.89 \text{ dias}$$

Concluiu-se que para um ciclo de 30 segundos, o sistema tem uma autonomia de aproximadamente 4 dias.

A figura 3.37 ilustra o protótipo final, onde foi colocado um suporte abaixo da caixa do motor, para facilitar ao utilizador a colocação do sistema num mastro.



Figura 3.37. Protótipo final: (a) vista frontal; (b) vista lateral.

3.3 Sistema de comunicação com controlo eletrónico

Neste projeto foi pretendido o desenvolvimento de um protótipo com a capacidade de controlar o feixe do diagrama de radiação de um agrupamento de antenas. Este protótipo é constituído por 4 antenas suspensas (*patch*) interligadas através de uma malha de alimentação, de modo a garantir um ganho de 8 dBi. Este deslocador de fase utiliza a topologia de linha comutada (*switched-line*). Esta topologia permite que se comute entre dois ou mais percursos (linhas de transmissão) com comprimentos diferentes. Como elemento comutável recorreu-se a os díodos PIN.

3.3.1 Díodos PIN

Os sistemas de agrupamentos de antenas de feixe comutado utilizam circuitos eletronicamente comutados e permitem modificar alguns parâmetros como a amplitude e fase do sinal. Estes dispositivos de silício possuem a vantagem de serem pequenos, rápidos e baratos [28].

O princípio de funcionamento às baixas frequências de um díodo PIN é semelhante a um díodo PN, uma vez que permite fluir a corrente do ânodo para o cátodo quando polarizado diretamente e impede que a corrente flua quando polarizado inversamente. Os díodos PIN são altamente dopados nas extremidades com eletrões, sendo que a região intrínseca entre uma extremidade e outra funciona como um reservatório, isto é, quando a corrente de polarização é direta são acumuladas cargas. Já o díodo PN não possui muitas cargas, sendo armazenadas por um período muito curto. Porém, para as altas frequências e quando é polarizado diretamente o seu comportamento é equiparado ao de um potenciómetro. Para a polarização inversa o díodo PIN apresenta uma impedância elevada à passagem de sinal RF. Na figura 3.38 (a)

e 3.38 (b) estão os circuitos representativos de modo a polarizar o díodo PIN sem que exista fuga de sinal RF quando o díodo é colocado em série com a pista de transmissão e quando é colocado em paralelo com a pista de transmissão [29].

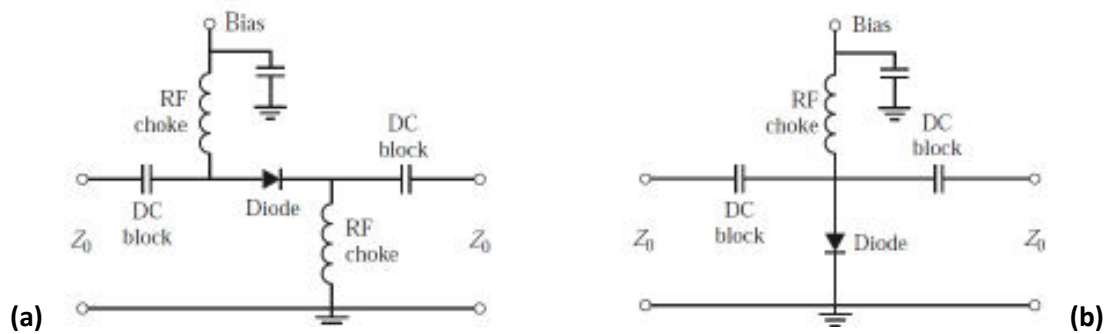


Figura 3.38. Circuito de polarização para díodos PIN: (a) díodo em série com a pista de transmissão; (b) díodo em paralelo com a pista de transmissão [29].

Também, o encapsulamento afeta o desempenho do díodo PIN. As perdas por inserção, devido aos elementos parasitas, podem ser reduzidas fazendo uso do espaçamento entre díodos de $\lambda/4$. Sendo assim, a escolha deste componente decaiu devido a que o díodo PIN é um dispositivo muito adequado para ser utilizado nas frequências RF, visto ter reduzidas dimensões, elevada velocidade comutação e reactância parasitas no encapsulamento reduzidas [30]. Para tal, utilizou-se o díodo BAR64 da Infineon Technologies [31], apresentado na figura 3.39.



Figura 3.39. Díodo BAR64 da Infineon Technologies.

3.3.2 Malha de alimentação

A alimentação dos elementos radiantes de um agrupamento de antenas pode ser efetuada através de malhas de combinação de potência. As malhas de alimentação combinam a potência recebida de modo a obter um diagrama diretivo. Quando a funcionar como emissor, a malha de alimentação é utilizada de modo a distribuir a potência pelos elementos radiantes [32].

A escolha desta topologia de alimentação deve-se a vários fatores, por exemplo, o ganho requerido para o agrupamento de antenas, a largura de

banda, as perdas de inserção, o ângulo do feixe e a capacidade de lidar com a potência. Existem dois tipos de malhas de alimentação, as mesmas dividem-se em malhas em série e malhas em paralelo [33].

As malhas em série dependem da forma como encontram-se dispostos os deslocadores de fase. Na figura 3.40 (a) e 3.40 (b) ilustra as duas formas como podem ser incluídos os deslocadores de fase, em que os elementos radiantes estão em série ao longo do percurso principal de alimentação [33].

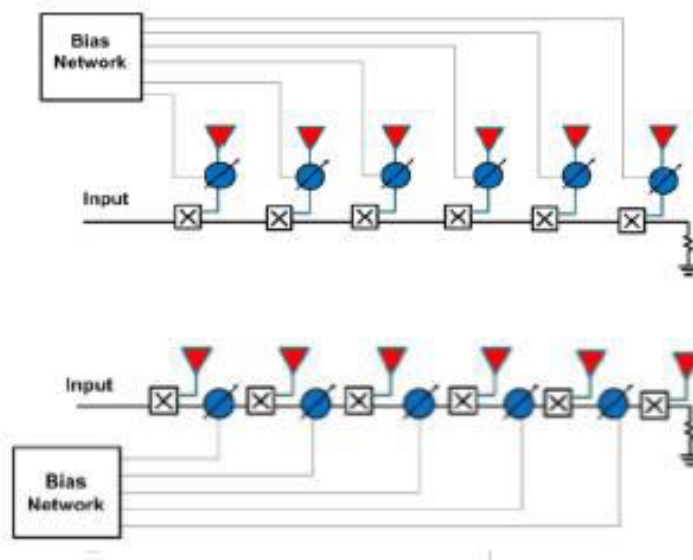


Figura 3.40. Malha de alimentação em série: (a) deslocador de fase percurso principal e os elementos radiantes; (b) deslocador de fase colocado no percurso principal.

Através da figura 3.40 (a) verifica-se que o deslocador de fase está associado a cada um dos percursos que liga o percurso principal aos elementos radiantes, porém para a figura 3.40 (b) os deslocadores de fase estão dispostos ao longo do percurso principal. A alimentação em paralelo faz uso de combinadores de potência para distribuir o sinal a transmitir ou combinar o sinal recebido nos elementos radiantes. A figura 3.41 mostra uma alimentação de uma malha em paralelo [34].

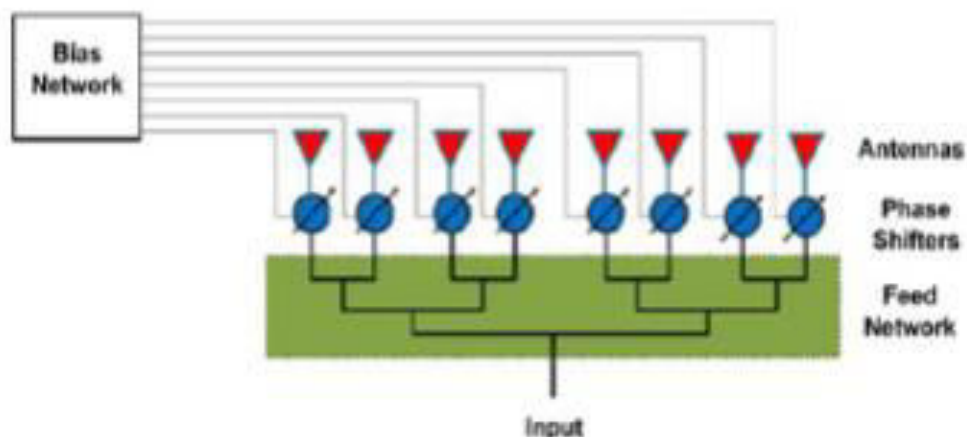


Figura 3.41. Malha de alimentação em paralelo [34].

Para este protótipo escolheu-se a topologia em paralelo pela sua fácil construção e facilidade de adaptação da impedância na linha de transmissão.

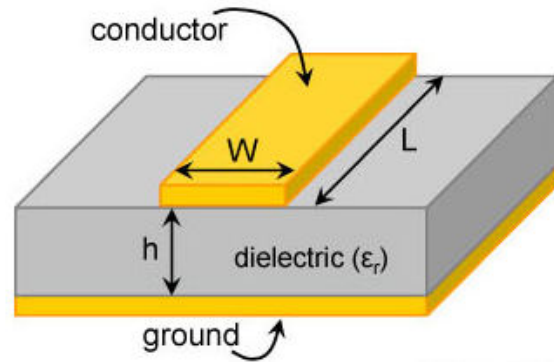
3.3.3 Desenvolvimento do sistema

Com este sistema pretende-se controlar a direção do feixe principal do diagrama de radiação de um agrupamento de antenas. Para tal, construiu-se o circuito da malha de alimentação numa placa com substrato FR4 [35]. A folha característica do material indica que o valor da constante dielétrica para a frequência de operação 1 MHz é de 4,6. Após algumas pesquisas em bibliografia da área verificou-se que o valor mais indicado para frequência de interesse é $\epsilon_r = 4,4$. As características do substrato FR4 são apresentadas na tabela 3.4.

Tabela 3.4. Característica do substrato utilizado FR4.

	Substrato
	FR4
Constante dielétrica (ϵ_r)	4,4
Altura do substrato (h)	1,6 mm
Fator de dissipação ($\tan \theta$)	0,02
Espessura do revestimento	7 μm

A construção da malha de alimentação para as 4 antenas suspensas é feita seguindo as características apresentadas na tabela 3.4, sendo que, a impedância é ajustada para 50 Ω de modo a estar adaptada, evitando assim que a potência seja refletida. Tendo em conta as características do substrato e a frequência de operação pretendida, calcularam-se as dimensões da linha de transmissão de 50 Ω com ajuda da calculadora *Microstrip Line Calculator*. A figura 3.42 apresenta as dimensões da malha de alimentação considerando uma constante dielétrica do substrato de 4,4.



Substrate Parameters

Dielectric Constant (ϵ_r):

Dielectric Height (h): mm

Frequency: GHz

Electrical Parameters

Zo: Ω

Elec. Length: deg

Synthesize

Physical Parameters

Width (W): mm

Length (L): mm

Analyze

Figura 3.42. Dimensão da malha de alimentação para $\epsilon_r = 4,4$.

Da figura 3.42 verifica-se que para uma linha de transmissão de 50Ω o comprimento é de 33,96 mm e a largura é de 3,05 mm. De seguida, desenhou-se a malha de alimentação. Os RF *chokes* foram utilizados para não permitir que o sinal RF se escape pelo circuito de polarização do díodo. Estes são bobinas com elevada impedância à passagem de sinal RF e baixa impedância ao sinal DC [29]. Os RF *chokes* podem ser realizados através de bobinas convencionais, no entanto utilizou-se *stubs* radiais cujo objetivo é criar um curto-circuito para o sinal RF na junção da pista com o díodo PIN, criando um plano de massa virtual. A figura 3.43 apresenta a forma de um *stub* feito em pista impressa [36].

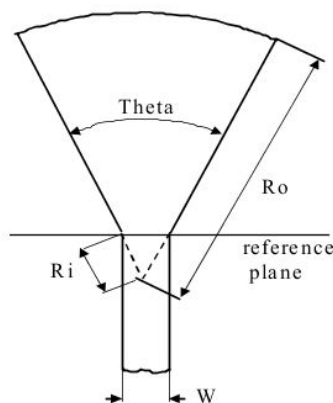


Figura 3.43. Radial *stub* em pista impressa [35].

Após ter realizado o projeto do circuito e os respectivos cálculos para as linhas de transmissão, utilizou-se o programa *software NI Utilboard Circuit Design* da *National Instruments*. A figura 3.44 apresenta o esquema da malha de alimentação desenhada no *software NI Utilboard*

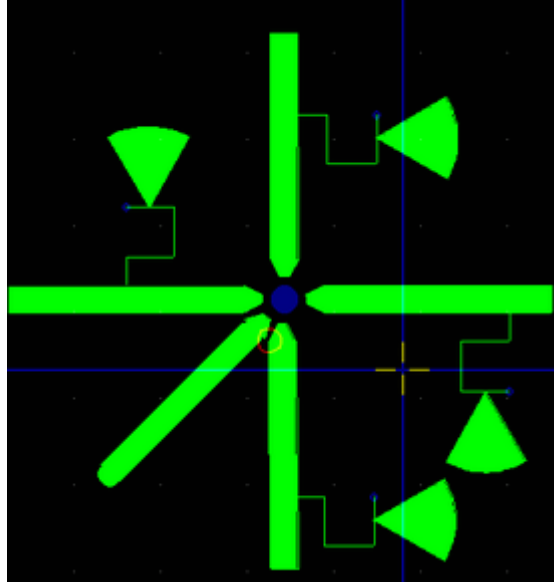


Figura 3.44. Desenho da malha de alimentação no *software NI Utilboard*.

De seguida procedeu-se à impressão do desenho na placa de substrato FR4. A figura 3.45 ilustra a malha de alimentação em FR4.

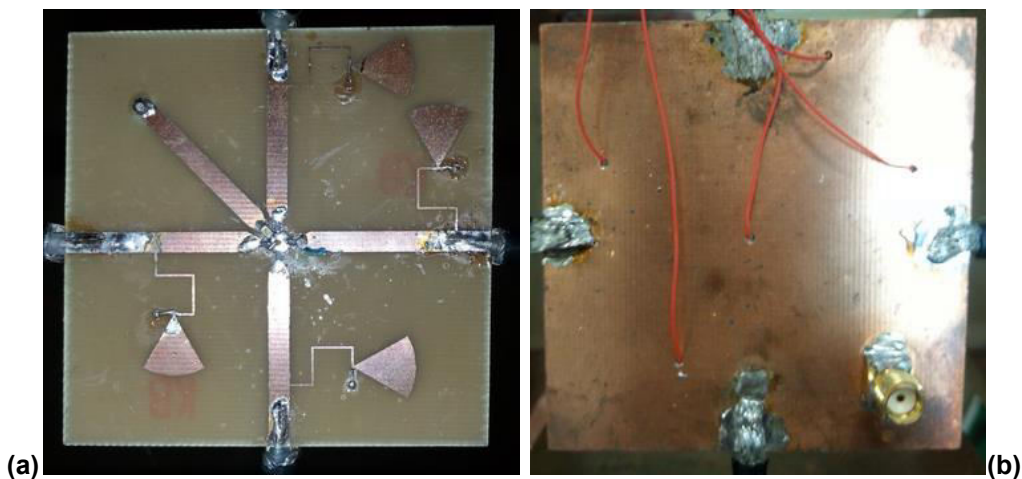


Figura 3.45. Malha de alimentação construída em FR4: (a) vista frontal; (b) vista posterior.

Após a malha de alimentação ter sido construída, soldaram-se os respetivos componentes na mesma. Os díodos PIN foram soldados entre cada uma das 4 linhas de transmissão para o centro de massa, tendo o cuidado de verificar o sentido da polarização do diodo PIN, de modo a não curto-circuitar a linha de transmissão. Também foi soldado um condensador entre o centro de massa e a alimentação, de modo a cortar a componente DC que polariza os

díodos para não afetar o sinal RF. Na figura 3.46 é apresentado um esquemático do circuito com os seus respetivos componentes.

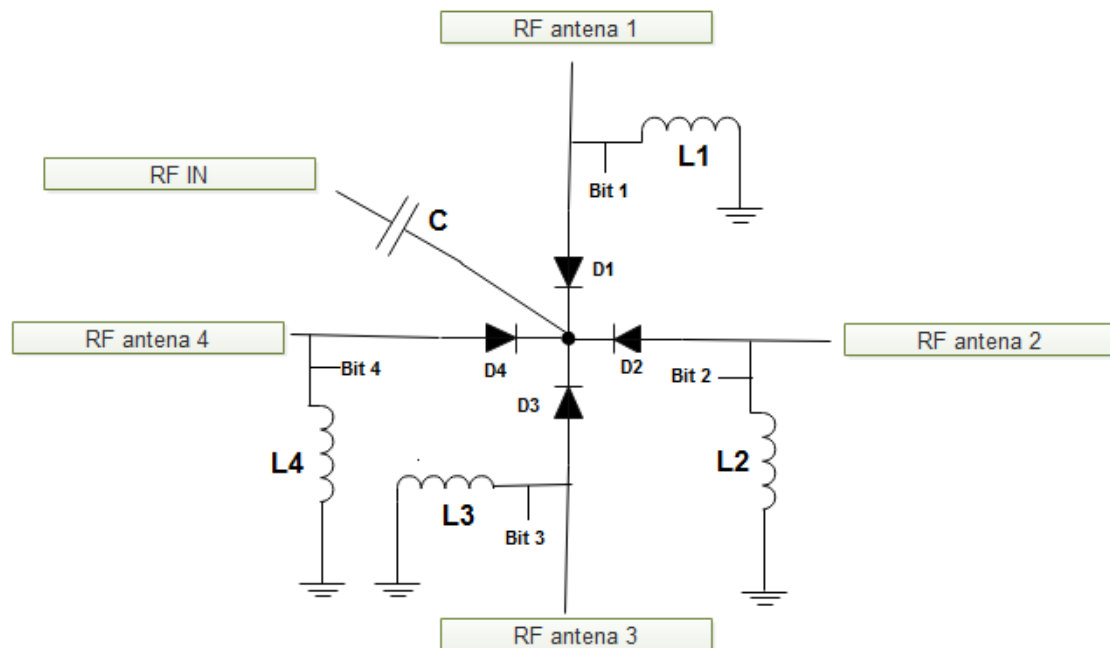


Figura 3.46. Esquemático do circuito implementado na construção da malha de alimentação.

Por último, foi soldado um conector SMA para alimentação da malha de alimentação, como verifica-se na figura 3.45 (b).

Ligou-se uma antena suspensa (*Patch*) diretamente à malha de alimentação, e realizaram-se testes de forma a garantir que estava a funcionar corretamente. Para tal, realizaram-se 4 furos de 1 mm em cada linha transmissão e soldaram-se um fio em cada um deles. Com a ajuda de uma resistência de 47Ω colocada entre a pilha e a malha de alimentação mediu-se o nível de sinal recebido na câmara anecoica, de forma a verificar as perdas introduzidas por esta malha. Visto que a antena suspensa (*patch*) apresenta um ganho de 8,6 dBi, constatou-se que quando a antena está ligada diretamente à malha de alimentação possui um ganho de 8,4 dBi, apresentando uma perda de inserção de 0,2 dB. Porém, devido às dimensões das antenas suspensas utilizadas (figura 3.34), estas não podem ser ligadas diretamente à malha de alimentação. Por isso, a malha de alimentação foi implementada com cabos coaxiais, sendo a forma mais adequada para alimentação de um agrupamento constituído por antenas suspensas.

Assim sendo, as antenas devem de estar ligadas através de cabos coaxiais ao equipamento com um dado comprimento, de modo a que a radiação que existe na parte posterior da antena não influencie nas medições. Para esta malha de alimentação, como a impedância das linhas de transmissão é de 50Ω , o comprimento dos cabos foi escolhido para que sejam o mais curto possível, para que atenuação fosse reduzida e para que o sistema fosse

compacto. Na figura 3.47 encontram-se os cabos coaxiais construídos e soldados diretamente à malha de alimentação e às antenas suspensas.

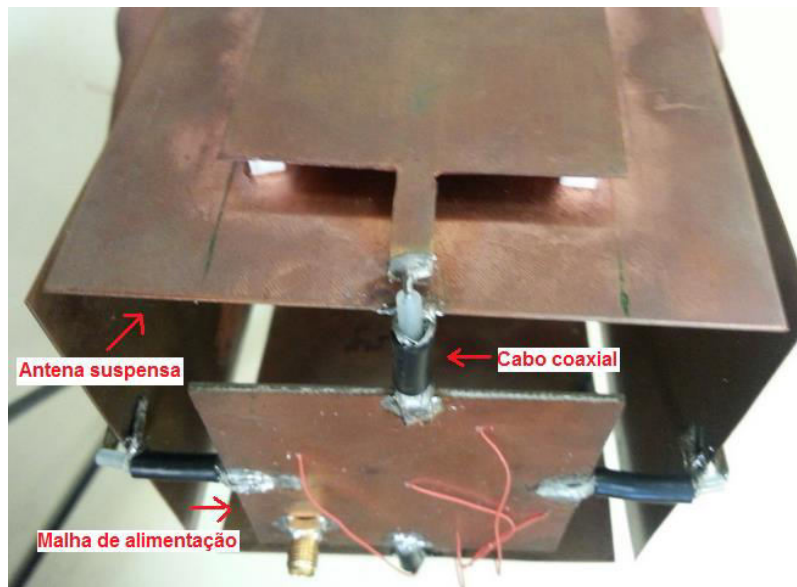
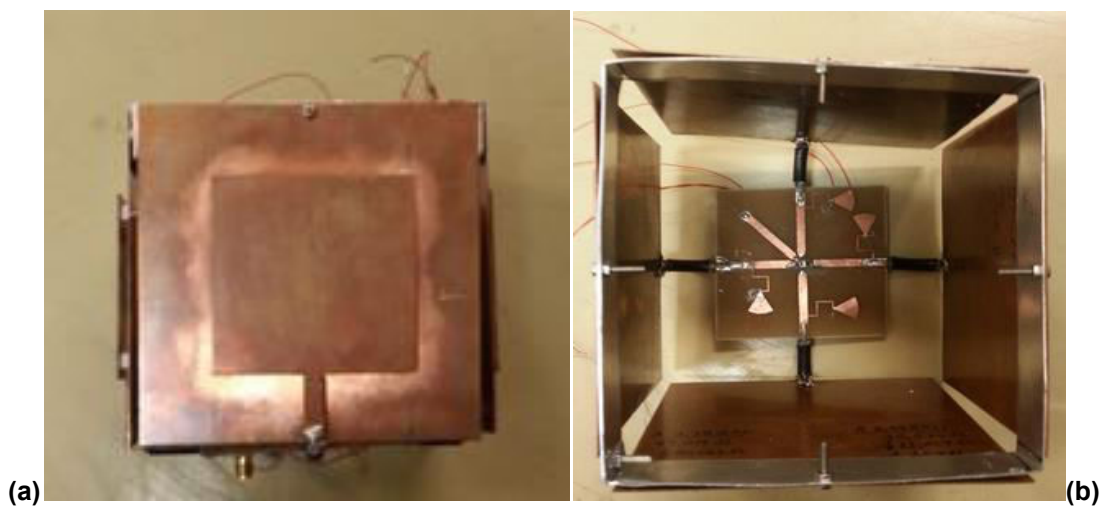


Figura 3.47. Cabos coaxiais construídos e soldados à malha de alimentação e às antenas suspensas.

É de referir que o tipo de cabo coaxial utilizado foi o RG58 de 50Ω , e o comprimento de cada cabo é de 3 cm. Após ter-se soldado cada cabo coaxial a cada antena na sua respetiva linha de alimentação, prenderam-se as quatro antenas suspensas a uma fita metálica, de modo a criar um sistema em forma de cubo. Na figura 3.48 ilustra o sistema de medição com controlo eletrónico, figura 3.48 (a) vista frontal, figura (b) vista superior, figura (c) vista inferior.



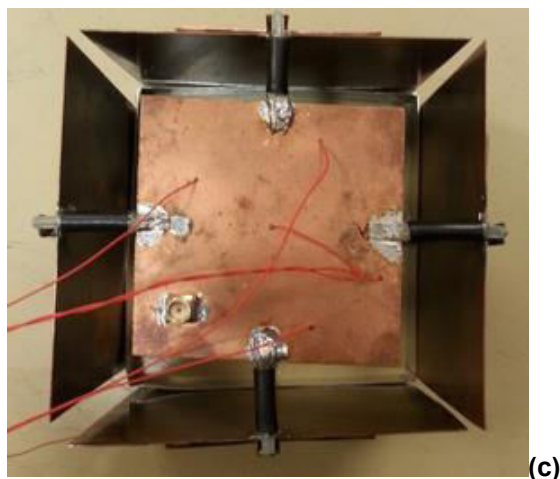


Figura 3.48. Sistema de medição com controlo mecânico: (a) vista frontal, (b) vista superior, (c) vista inferior.

O agrupamento foi colocado dentro de uma estrutura resistente. Para tal, considerou-se o estudo realizado através dos resultados obtidos na tabela 3.2, tendo-se optado por construir uma caixa em acrílico com as dimensões adequadas para incrustar o agrupamento de antenas dentro da caixa. O espaçamento entre o acrílico e as antenas é de 2 cm. De seguida colocou-se o agrupamento dentro da caixa, como mostra a figura 3.49.



Figura 3.49. Redome: (a) Interior; (b) Antena vedada.

3.3.4 Alimentação e programação

Para o controlo e alimentação do sistema foi utilizada a placa Arduino FIO [24], alimentada por uma bateria de lítio, que fornece à saída uma tensão nominal de 3,7 V. O controlo do sistema consiste em colocar em modo ativo uma das antenas e as restantes três antenas no modo desativado. Para tal, é enviado um carácter X (1,2,3,4), de forma a ativar a posição desejada. O fluxograma da figura 3.50 ajuda a ter uma melhor compressão do funcionamento do código em causa. O código implementado encontra-se no anexo F.

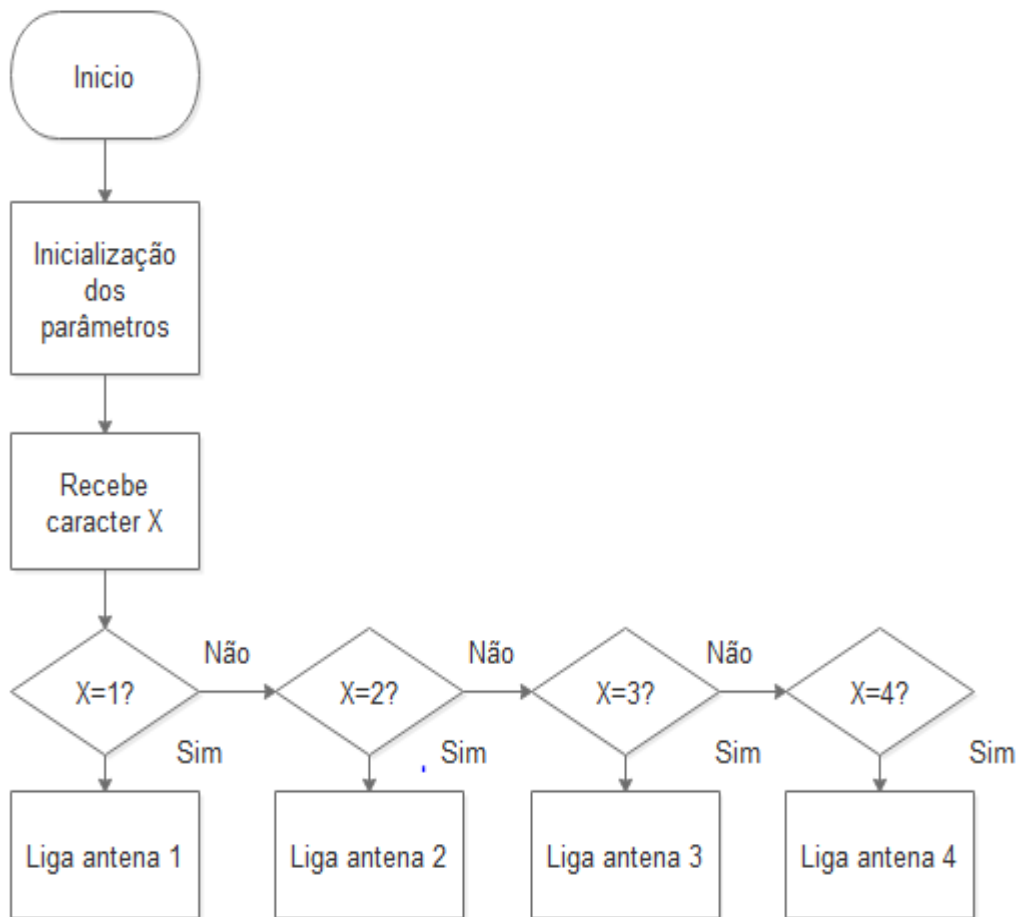


Figura 3.50. Fluxograma do funcionamento do microcontrolador.

A figura 3.51 ilustra o protótipo final, onde foi colocado um suporte abaixo da caixa do motor para facilitar ao utilizador a colocação do sistema num mastro.



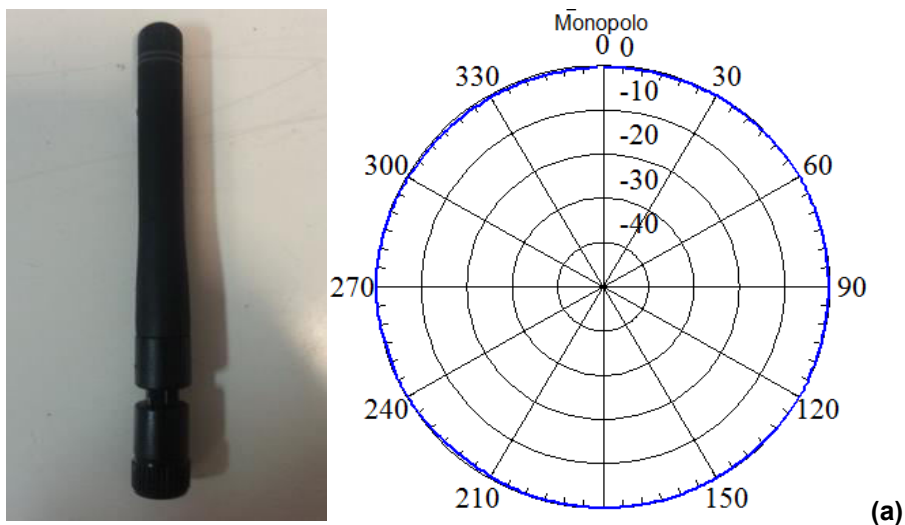
Figura 3.51. Protótipo final: (a) vista frontal; (b) vista lateral.

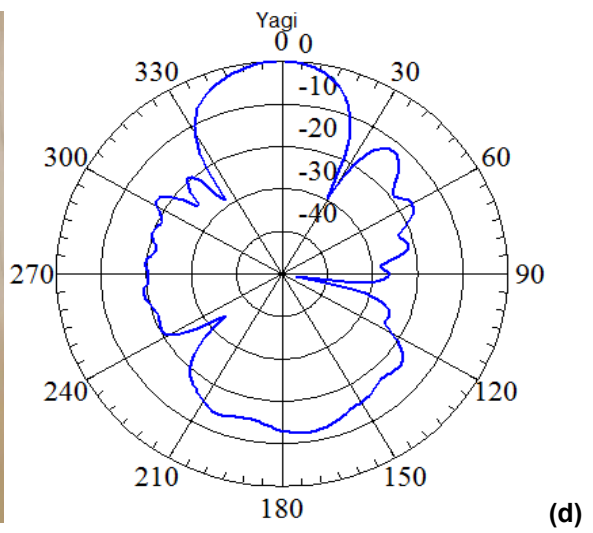
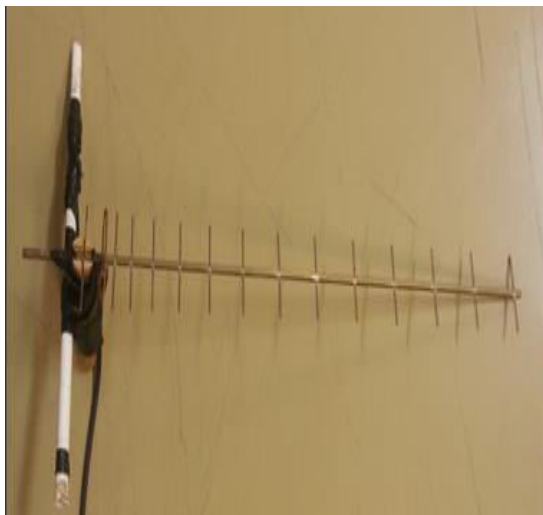
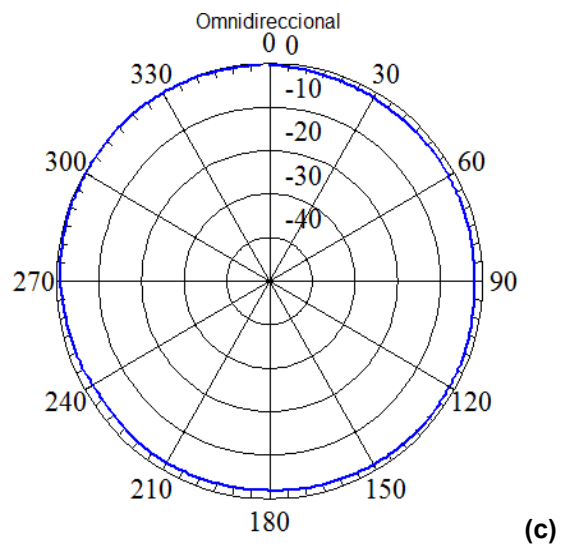
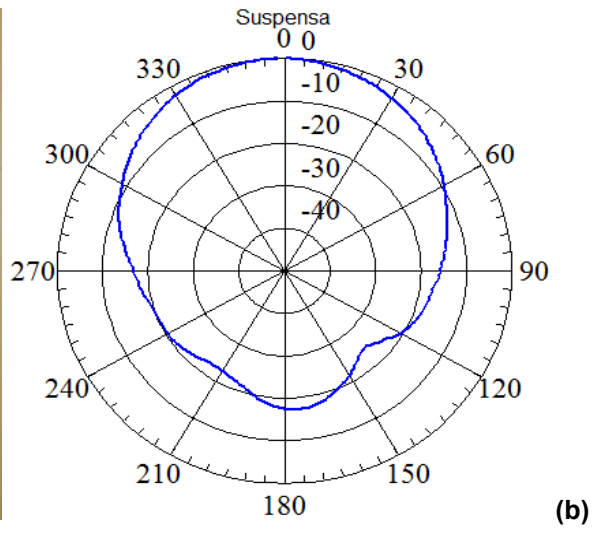
4 Análises de resultados

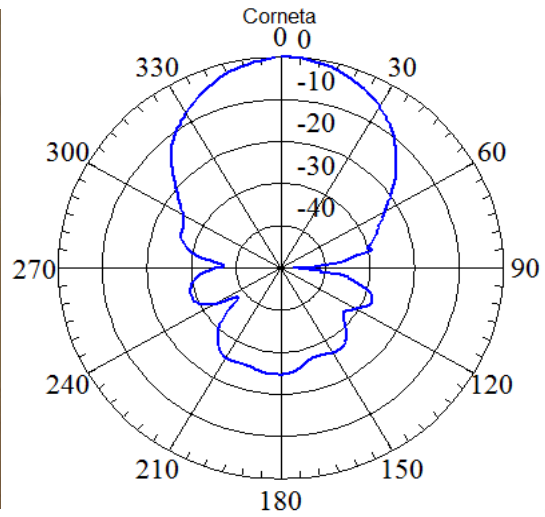
Neste capítulo apresentam-se os resultados das diversas medições obtidas no meio com vegetação. Inicialmente, são apresentadas as características das antenas utilizadas para o estudo da propagação do sinal, nomeadamente o ganho e o diagrama de radiação. De seguida apresentam-se os resultados das medições. Seguidamente mostram-se os resultados obtidos referentes aos sistemas desenvolvidos para o controlo do diagrama de radiação.

4.1 Antenas utilizadas

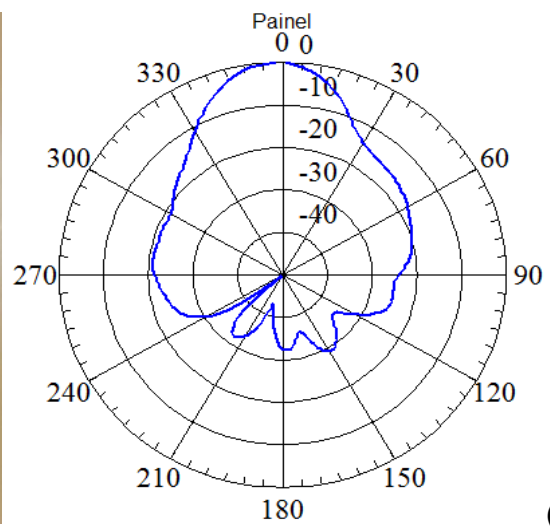
As antenas utilizadas neste trabalho encontravam-se disponibilizadas no laboratório de engenharia da Universidade da Madeira, sendo elas: duas antenas monopolo, uma biquad, uma corneta, uma omnidirecional, uma painel, uma suspensa e uma antena Yagi. Estas antenas foram selecionadas conforme o seu ganho e diagrama de radiação. Na figura 4.1 apresenta-se as antenas utilizadas para a realização deste trabalho com os seus respetivos diagramas de radiação medidos através do sistema desenvolvido no capítulo 3 com uma resolução abaixo de 2° . Os diagramas foram obtidos na câmara anecoica.



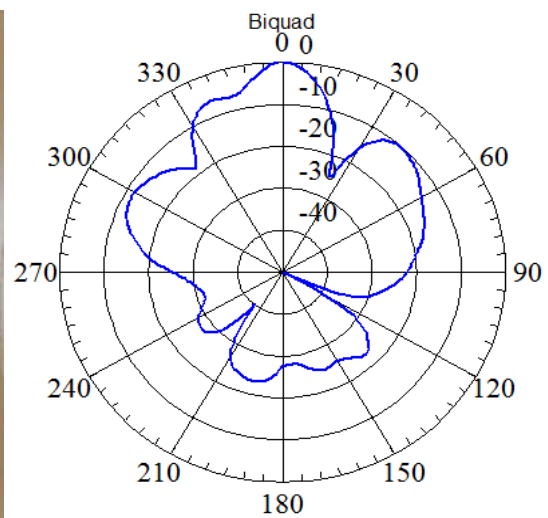
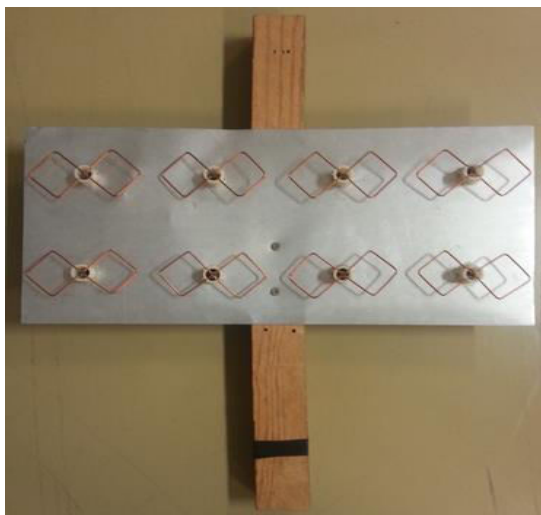




(e)



(f)



(g)

Figura 4.1. Diagrama de radiação das antenas: (a) monopolo; (b) suspensa; (c) omnidireccional; (d) yagi; (e) corneta; (f) painel; (g) biquad.

4.1.1 Ganho das antenas

Após a seleção das antenas procedeu-se à medição do ganho de cada uma delas. As medições do ganho foram efetuadas na câmara anecoica de modo a proporcionar um ambiente protegido e de modo a minorar as interferências eletromagnéticas. A figura 4.2 apresenta uma representação do esquema montado para o cálculo dos ganhos.

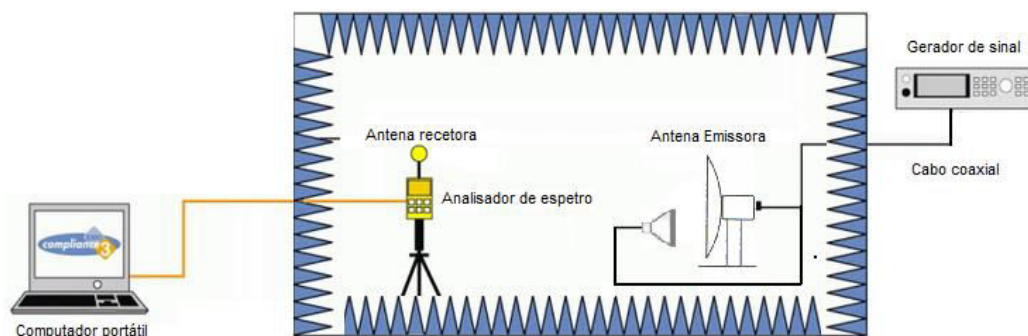


Figura 4.2. Esquema de montagem para medição do ganho das antenas.

Como se pode observar na figura 4.2 para os cálculos dos ganhos na câmara anecoica utilizou-se um sistema compacto constituído por uma antena emissora (antena parabólica com elemento ativo, uma antena corneta). Inicialmente verificou-se a potência recebida de uma antena dipolo, de modo a que esta sirva de referência para o cálculo do ganho das restantes antenas. Para tal, a antena parabólica estava ligada através de um cabo coaxial RG213, com atenuação de 3,4 dB, a um gerador de sinais com uma potência de saída de 10 dBm para uma frequência de 2,42 GHz. As antenas recetoras foram ligadas ao analisador de espectro através de um cabo coaxial RG213, com atenuação de 4,3 dB, e registou-se o nível de sinal recebido para as diferentes antenas. Os resultados obtidos estão registados na tabela 4.1.

Tabela 4.1. Tabela dos ganhos das antenas.

Antena recetora	Ganho (dBi)
Monopolo	2
Dipolo	3
Suspensa	8
Omnidirecional	9
Yagi	9,1
Corneta	11,1
Painel	13,1
Biquad	15,6

4.2 Medições para o estudo da propagação do sinal

Para a medição dos diagramas de radiação no meio florestal, foram utilizadas duas antenas, uma emissora e uma recetora, colocadas em mastros de 3 metros de comprimento, tal como mostra a figura 4.3. A antena emissora é colocada numa posição fixa, enquanto a antena recetora é colocada nas distâncias de 20, 40, 60, 80 e 100 metros.

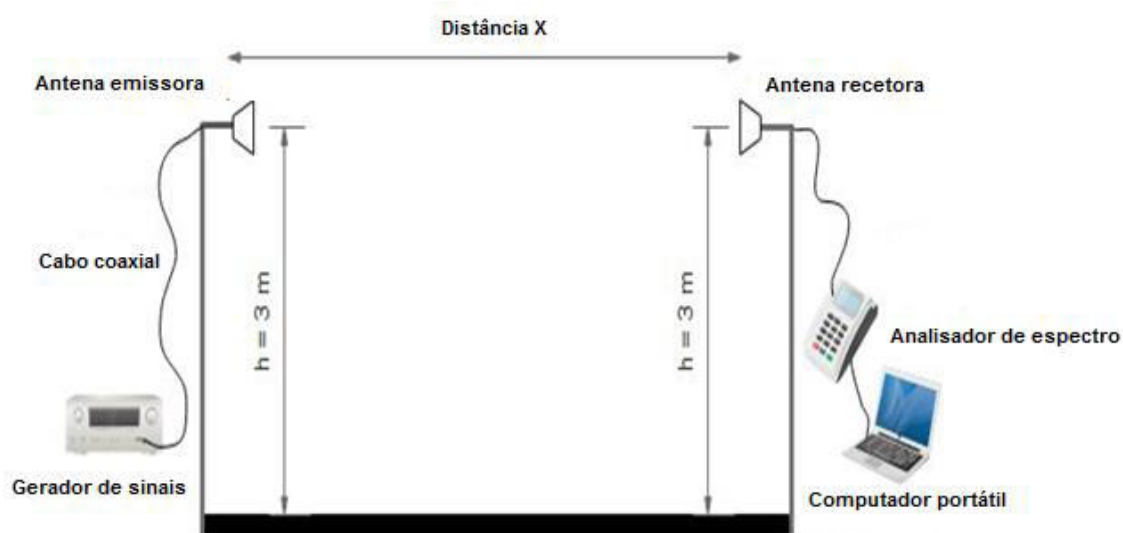


Figura 4.3. Esquema de medição.

Para a realização destas medições, a antena emissora foi ligada através de um cabo coaxial RG58, com 0,6 dB de atenuação, ao gerador de sinais (*Lab Brick*). O nível de sinal emitido para as medições foi de 13 dBm. A antena recetora foi ligada ao analisador de espectro através de um cabo coaxial RG213 com 4,3 dB de atenuação. O analisador de espectro foi ligado ao computador através de um cabo USB (*Universal Serial Bus*) de modo a desenvolver o sistema para a medição dos diagramas de radiação. A frequência de operação dos equipamentos (emissor e recetor) foi de 2,42 GHz.

Relativamente aos diagramas de radiação, estes foram obtidos com o sistema desenvolvido no capítulo 3 para uma resolução angular inferior a 2° . As medições foram realizadas num meio com vegetação ao nível de troncos e com folhagem, de forma a estudar a variação da atenuação do sinal recebido. Na figura 4.4 observa-se uma representação esquemática do local escolhido para a realização das medições correspondentes ao jardim da Universidade da Madeira.



Figura 4.4. Representação do local de medição.

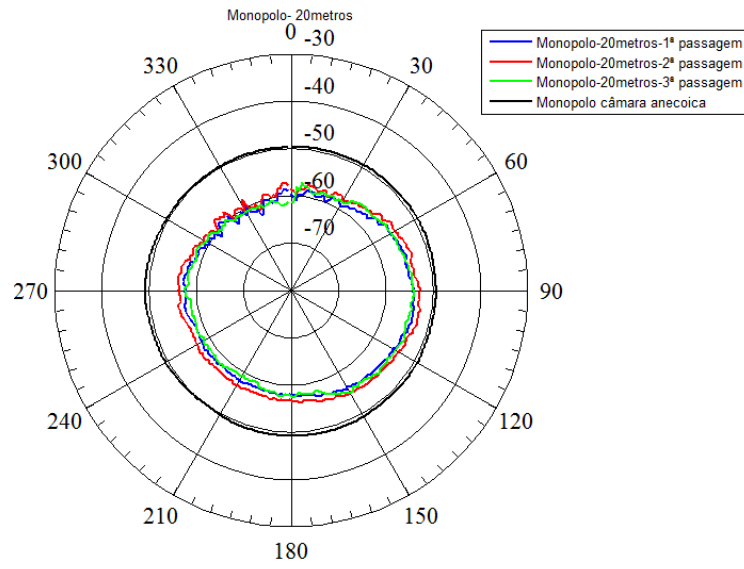
É de referir que para cada antena foram realizadas três passagens de forma a verificar se os resultados obtidos pelo sistema eram replicados. O sentido de rotação da antena no meio é igual ao sentido dos ponteiros do relógio. Aos valores obtidos pelo analisador de espectro foram retiradas as perdas dos cabos coaxiais tanto da emissão como na recepção. Para uma melhor comparação com os valores obtidos na câmara anecoica, foi obtida a potência normalizada, com a potência recebida definida por

$$P_r = P_n + P_t - P_l \quad (4.1)$$

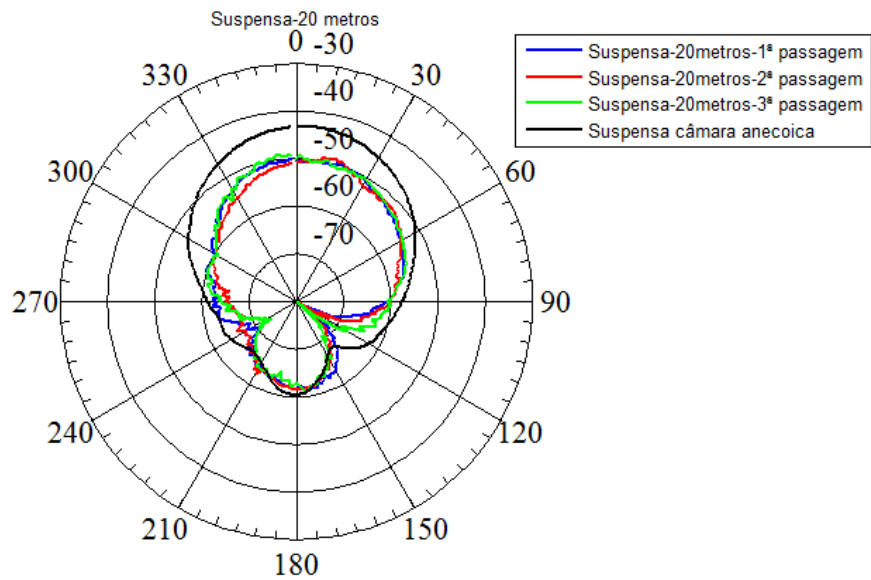
em que P_n é potência recebida normalizada, P_t é a potência de transmissão, e P_l são as perdas nos cabos.

4.2.1 Análise das medições para 20 metros

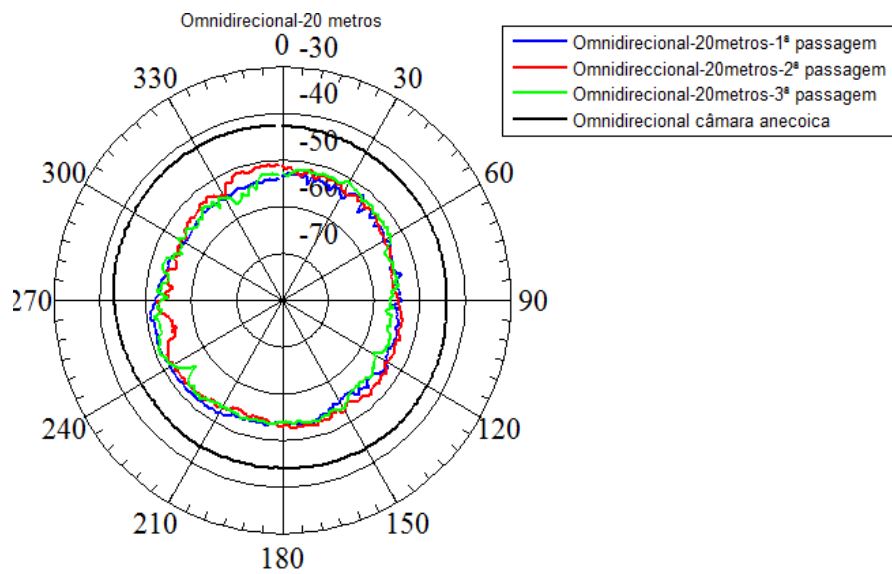
As medições dos diagramas de radiação para os 20 metros foram realizadas num percurso em que a antena emissora e recetora encontravam-se em linha de vista, com uma densidade de vegetação muito baixa. Os diagramas foram obtidos com a antena monopolo como emissora e como recetora as antenas biquad, corneta, monopolo, omnidirecional, painel, suspensa e yagi. Os resultados são apresentados na figura 4.5.



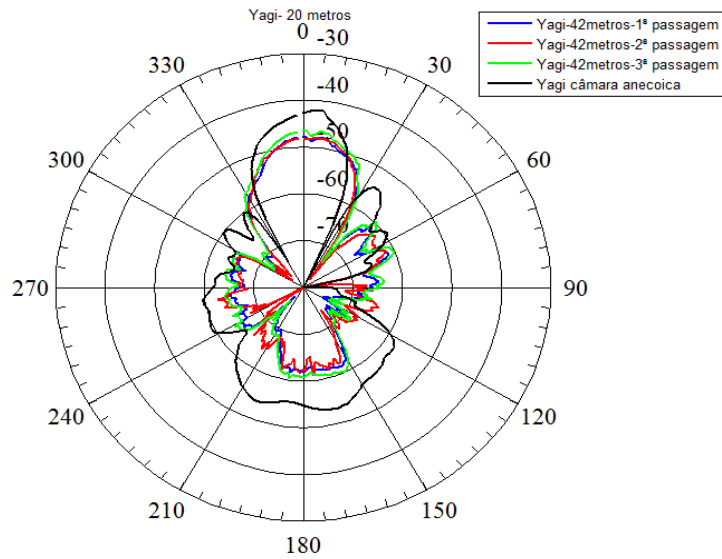
(a)



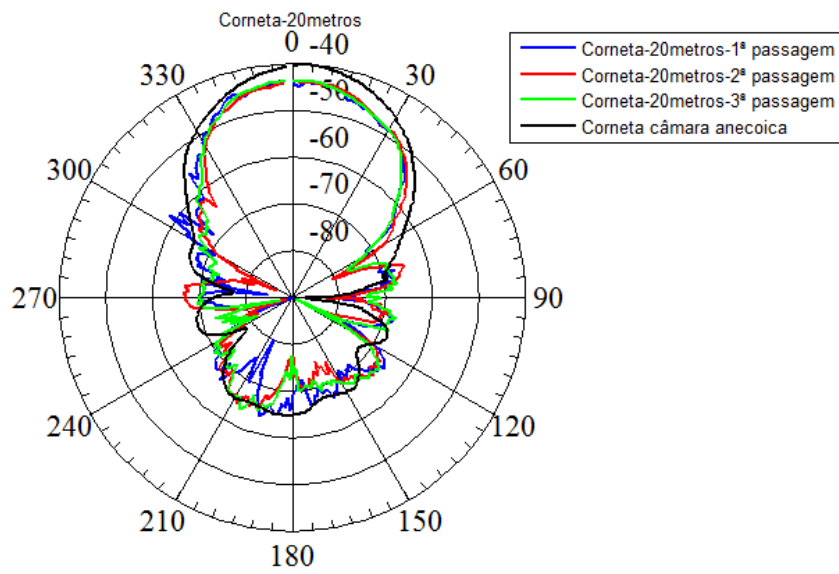
(b)



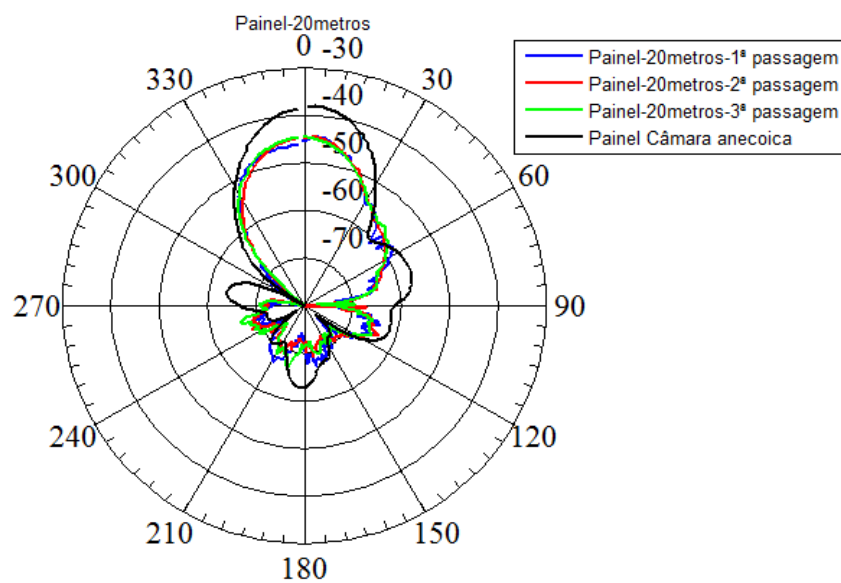
(c)



(d)



(e)



(f)

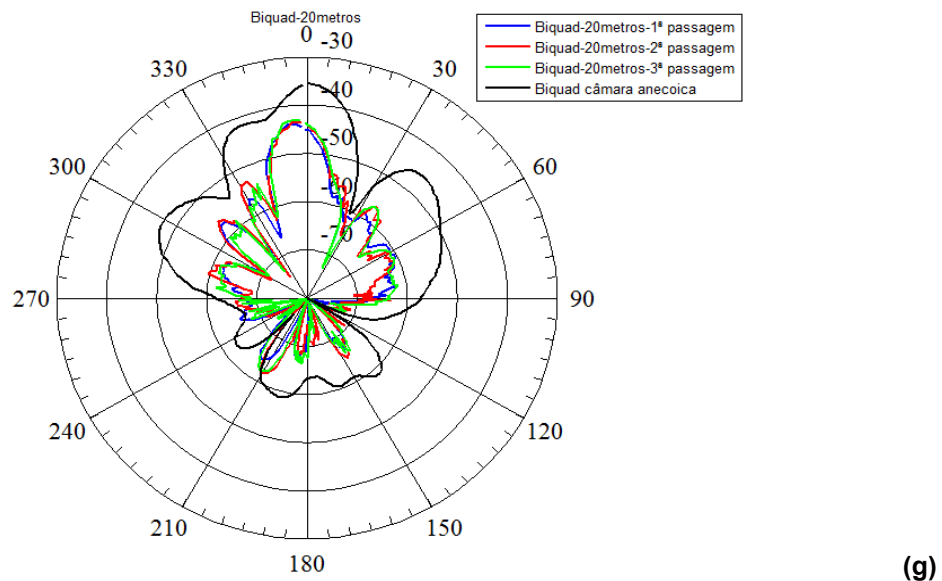


Figura 4.5. Resultados obtidos para os 20 metros de distância no meio florestal: (a) monopolo; (b) suspensa; (c) Omnidireccional; (d) yagi; (e) corneta; (f) painel; (g) biquad.

Analisando os diagramas da figura 4.5 verifica-se que para as antenas omnidirecionais (monopolo e omnidireccional) o nível de sinal recebido é semelhante em todas as direções. Para as antenas diretivas nota-se uma maior flutuação do nível de sinal recebido. Na tabela 4.2 encontra-se uma comparação detalhada sobre as atenuações para os ângulos mais significativos.

Tabela 4.2. Valor para os 20 metros em relação a potência em espaço livre.

Antenas recetoras	Potência recebida na situação de espaço livre (dBm)	Atenuação em relação ao espaço livre (dB)	Ângulo de maior captação de sinal	Atenuação no ângulo de maior captação de sinal (dB)
Monopolo	-49,14	-11,50	0°	-11,50
Suspensa	-43,14	-6,88	0°	-6,88
Omnidireccional	-42,14	-10,35	0°	-10,35
Yagi	-42,04	-6,03	0°	-6,03
Corneta	-40,04	-4,08	0°	-4,08
Painel	-38,04	-6,80	0°	-6,80
Biquad	-35,54	-7,79	0°	-7,79

É de referir que os valores apresentados na tabela 4.2 são obtidos em relação ao espaço livre. Ao analisar os dados observa-se que o sinal para as diferentes antenas é atenuado entre 6 e 11,5 dB em comparação com a potência recebida na situação de espaço livre. Para a posição dos 20 metros as antenas encontram-se em linha de vista, seguindo a mesma tendência dos diagramas obtidos na situação de espaço livre.

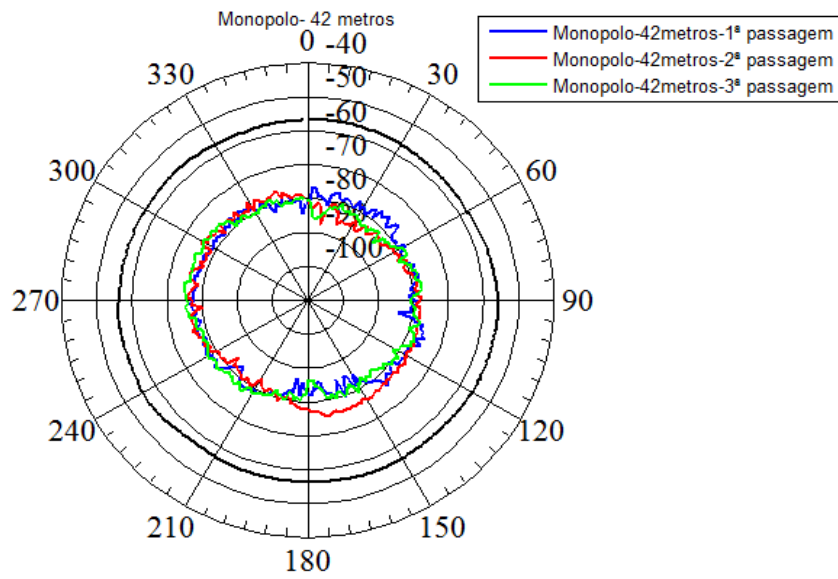
4.2.2 Análise das medições no meio florestal para 40 metros de distância

As medições dos diagramas de radiação para os 40 metros foram realizadas num percurso em que a antena emissora e a recetora encontravam-se sem linha de vista, com uma densidade de vegetação muito alta, principalmente à volta da antena recetora. Devido à quantidade de árvores situadas nos 40 metros foi necessário deslocar a antena emissora para os 42 metros para que o sistema conseguisse funcionar eficazmente. A figura 4.6 mostra o local de medição da antena recetora para os 42 metros.

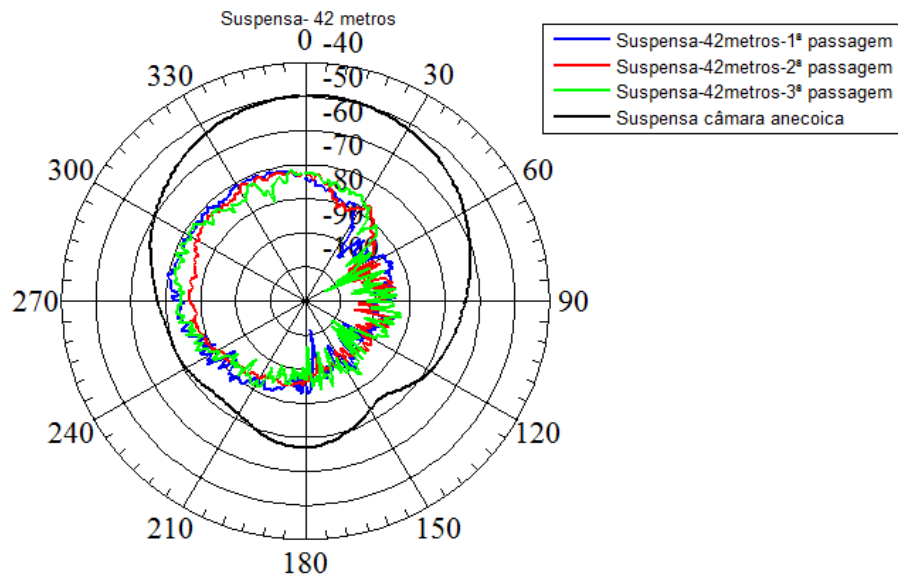


Figura 4.6. Local de medição para à antena recetora aos 42 metros de distância.

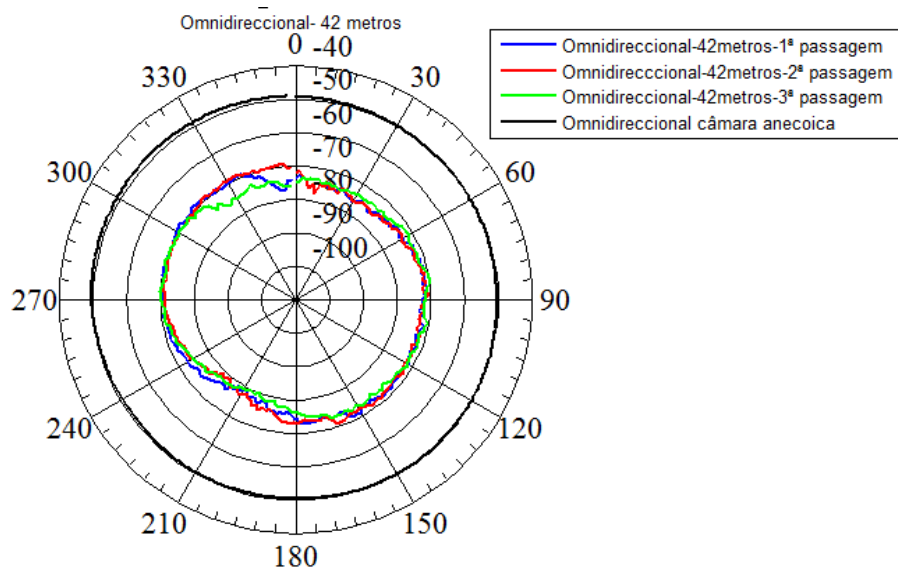
Os resultados para os diagramas de radiação para a distância de 42 metros são apresentados na figura 4.7.



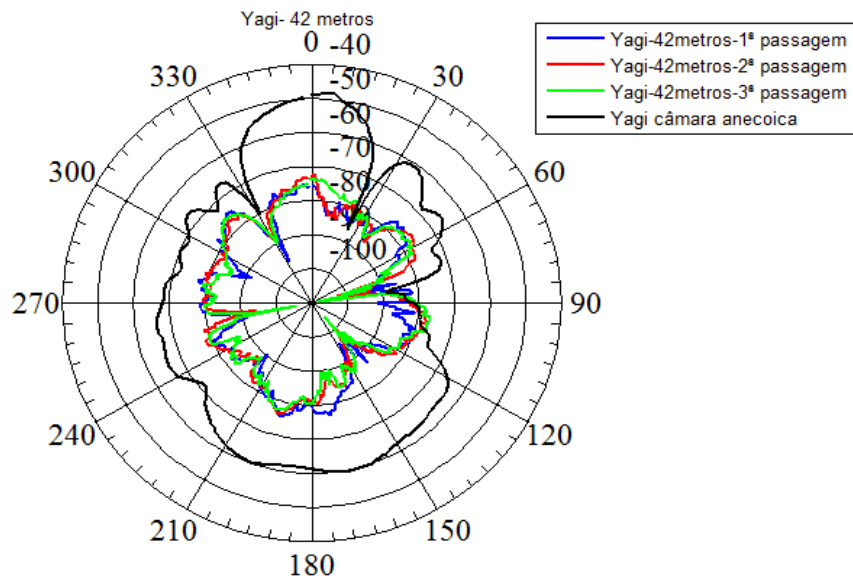
(a)



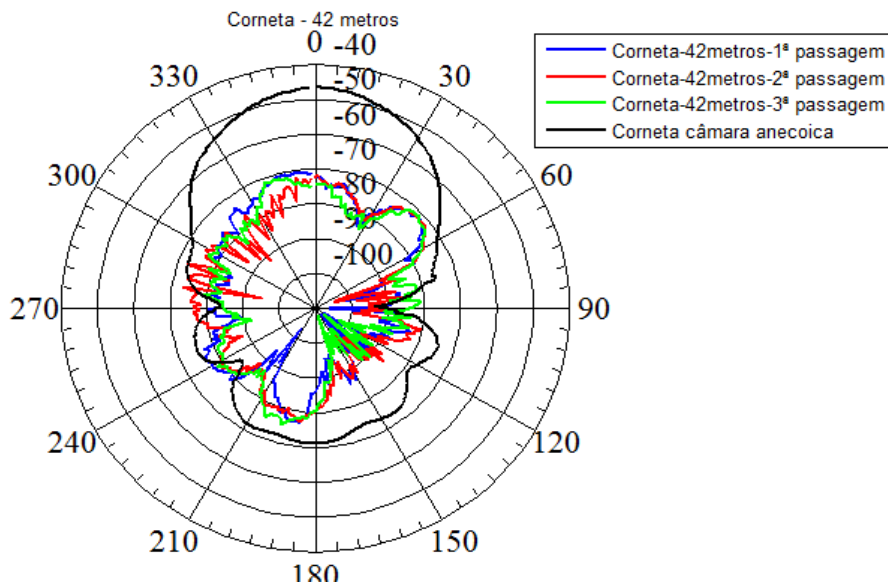
(b)



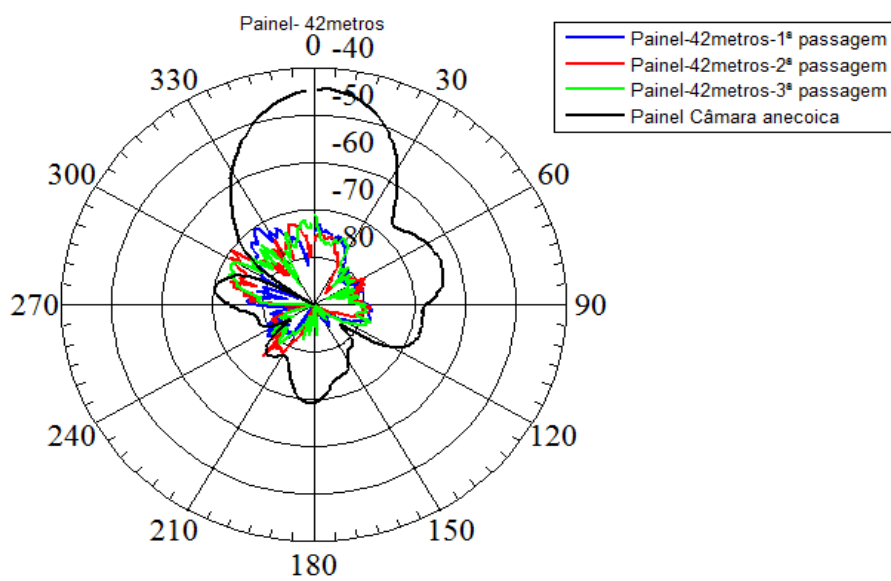
(c)



(d)



(e)



(f)

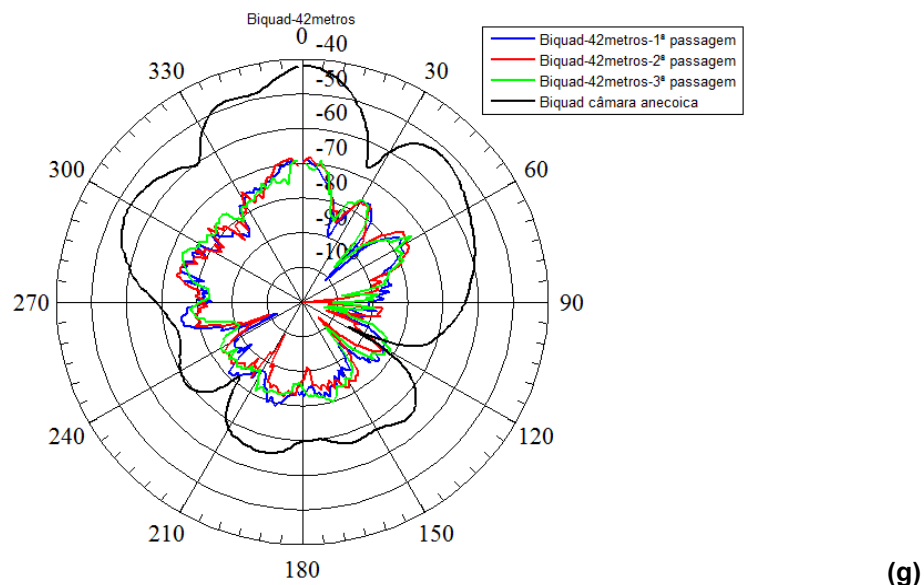


Figura 4.7. Resultados obtidos para os 42 metros de distância no meio florestal: (a) monopolo; (b) suspensa; (c) omnidireccional; (d) yagi; (e) corneta; (f) painel; (g) biquad.

Relativamente aos diagramas da figura 4.7 verifica-se que nas antenas omnidireccionais (monopolo e omnidireccional) apresentam grandes variações, o mesmo acontece para as antenas diretivas, existindo uma diferença do sinal recebido em relação ao espaço livre. Isto deve-se à maior densidade de vegetação (figura 4.7), provocando muitas reflexões devido à folhagem. Os nulos não são muitos acentuados para os 42 metros. Na tabela 4.3 encontra-se uma comparação detalhada sobre as atenuações para os ângulos mais significativos.

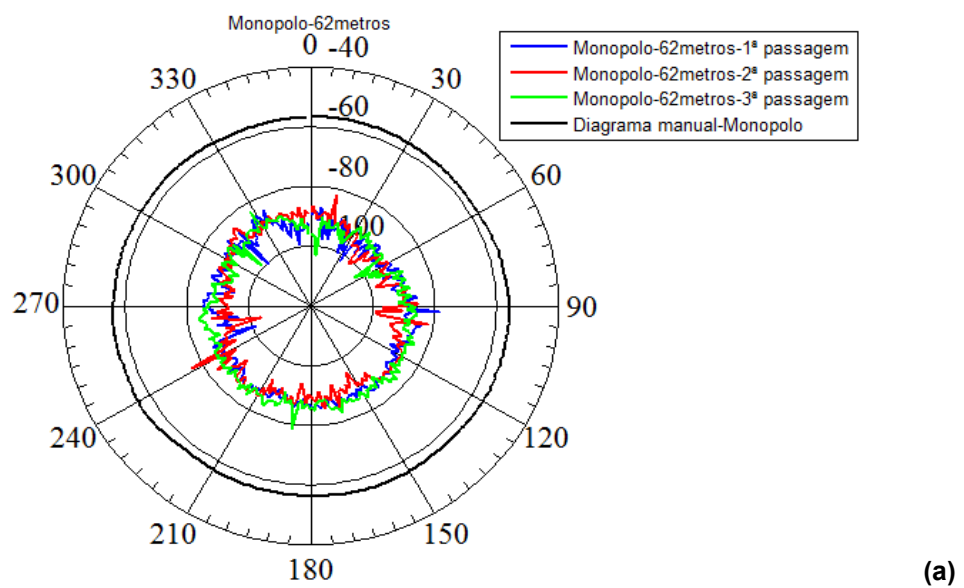
Tabela 4.3. Valor para os 42 metros em relação a potência em espaço livre.

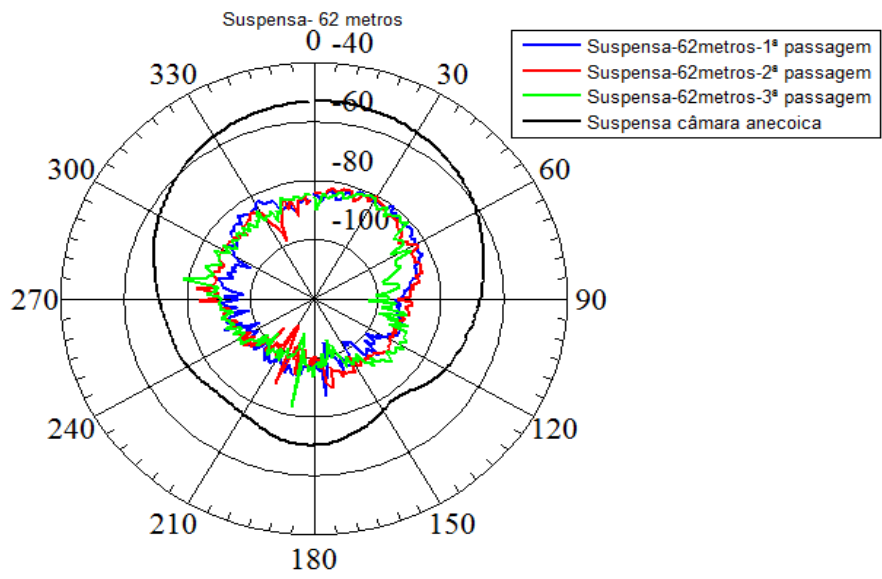
Antenas recetoras	Potência recebida na situação de espaço livre (dBm)	Atenuação em relação ao espaço livre (dB)	Ângulo de maior captação de sinal	Atenuação no ângulo de maior captação de sinal (dB)
Monopolo	-55,5	-25,4	0°	-25,4
Suspensa	-49,5	-23,6	285°	-21,0
Omnidireccional	-48,5	-24,2	0°	-24,2
Yagi	-48,4	-25,4	0°	-25,4
Corneta	-46,4	-26,3	48°	-25,2
Painel	-44,4	-29,4	0°	-29,4
Biquad	-41,9	-27,8	0°	-27,8

Ao analisar os resultados da tabela 4.3 afere-se um aumento da atenuação em relação à potência recebida na situação de espaço livre em comparação com a distância de 20 metros. Também se observa que para algumas antenas diretivas existem outros ângulos de maior captação, como por exemplo a corneta e a suspensa. A atenuação oscila em torno dos 23,6 a 29,4 dBi.

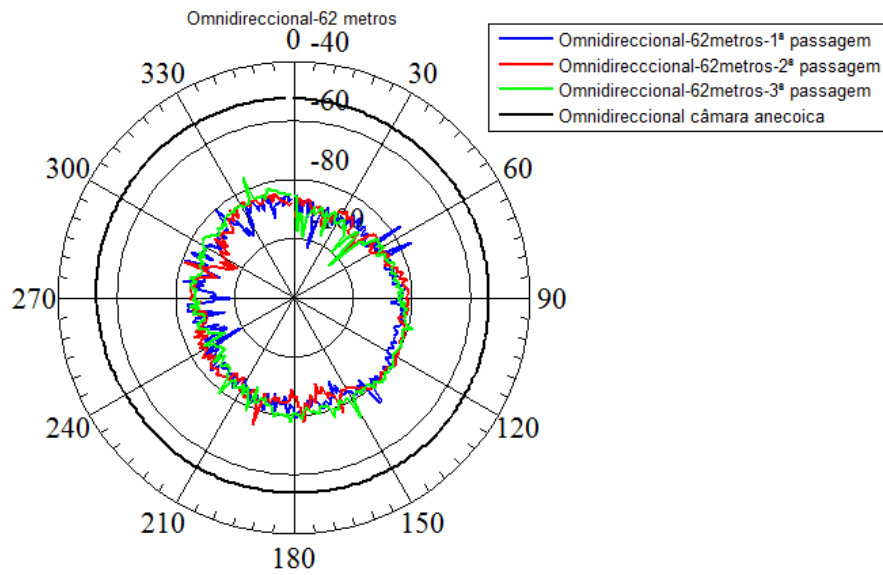
4.2.3 Análise das medições no meio florestal para 60 metros de distância

As medições dos diagramas de radiação para os 60 metros foram realizadas num percurso em que a antena emissora e recetora encontravam-se sem linha de vista. A diferença em relação aos 40 metros é a existência de maior concentração de árvores à frente da antena recetora e para o lado direito da mesma, sendo que para as restantes direções a densidade de vegetação é muito baixa. Devido à quantidade de árvores situadas nos 60 metros foi necessário deslocar a antena emissora para os 62 metros para que o sistema conseguisse funcionar eficazmente. Os resultados registados para esta distância são apresentados na figura 4.8.

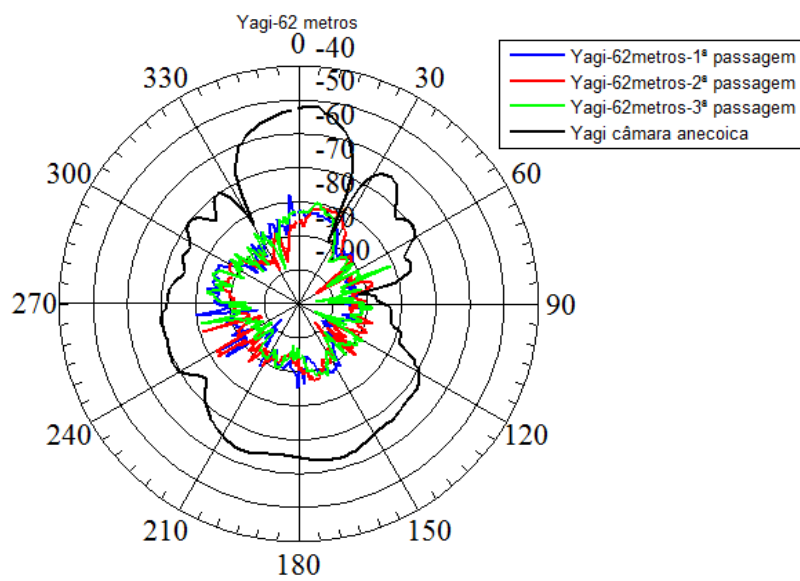




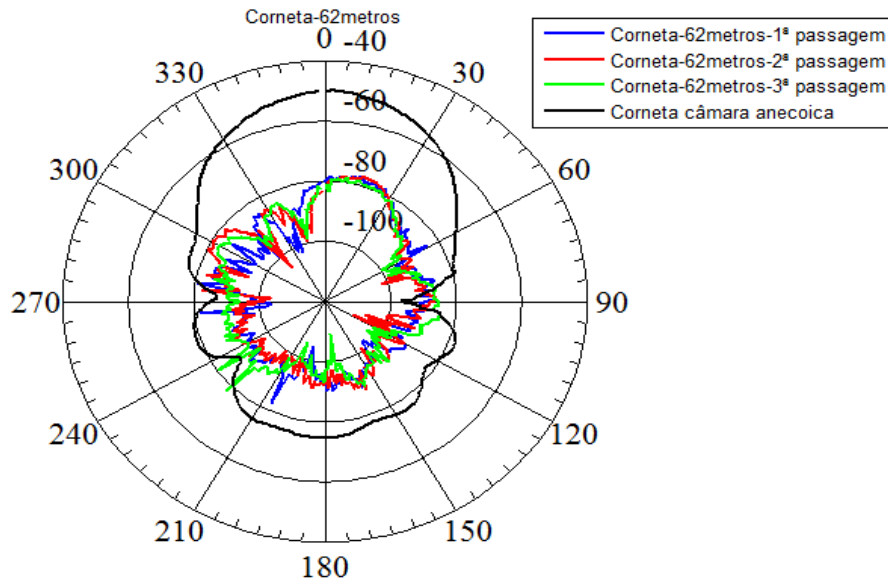
(b)



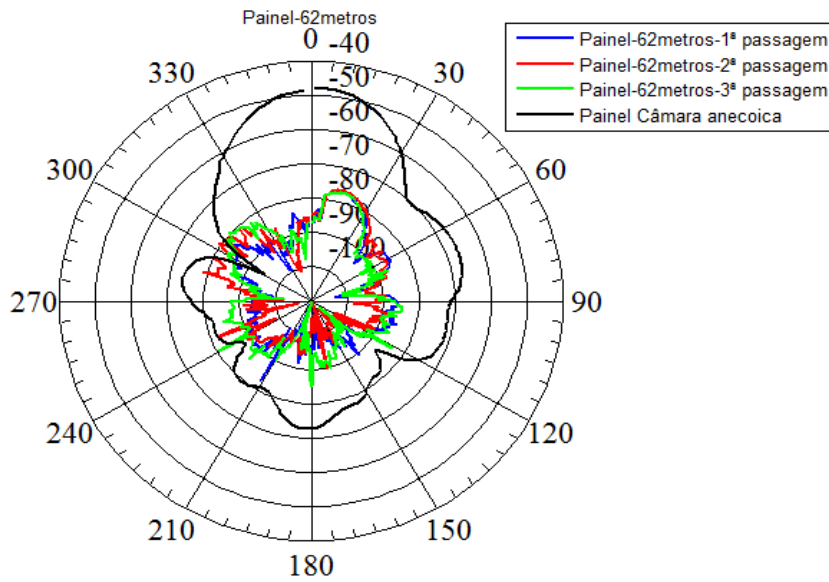
(c)



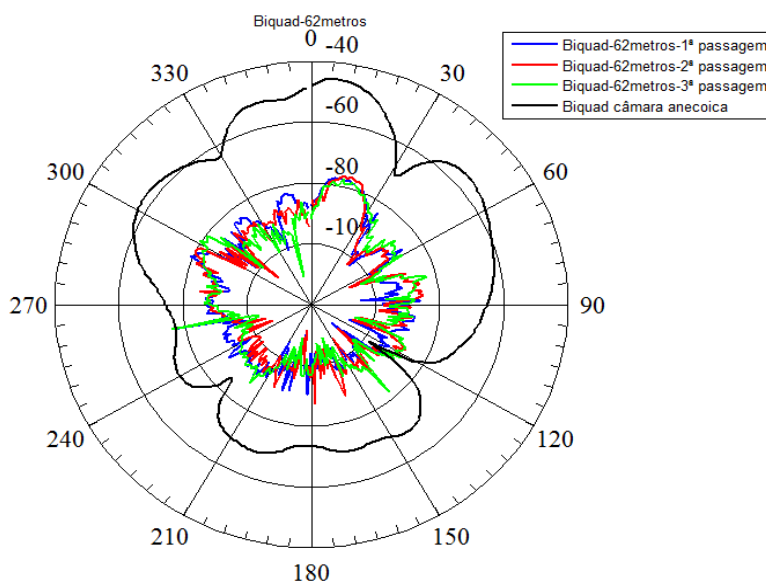
(d)



(e)



(f)



(g)

Figura 4.8. Resultados obtidos para os 62 metros de distância no meio florestal: (a) monopolo; (b) suspensa; (c) omnidireccional; (d) yagi; (e) corneta; (f) painei; (g) biquad.

Para a distância dos 62 metros as antenas diretivas apresentam um comportamento semelhante, uma vez que o lóbulo principal das antenas encontra-se deslocado entre os 15° e 30°. Para esta posição os nulos não são tão acentuados como para as posições anteriores. Na tabela 4.4 mostram-se as atenuações para os ângulos mais significativos.

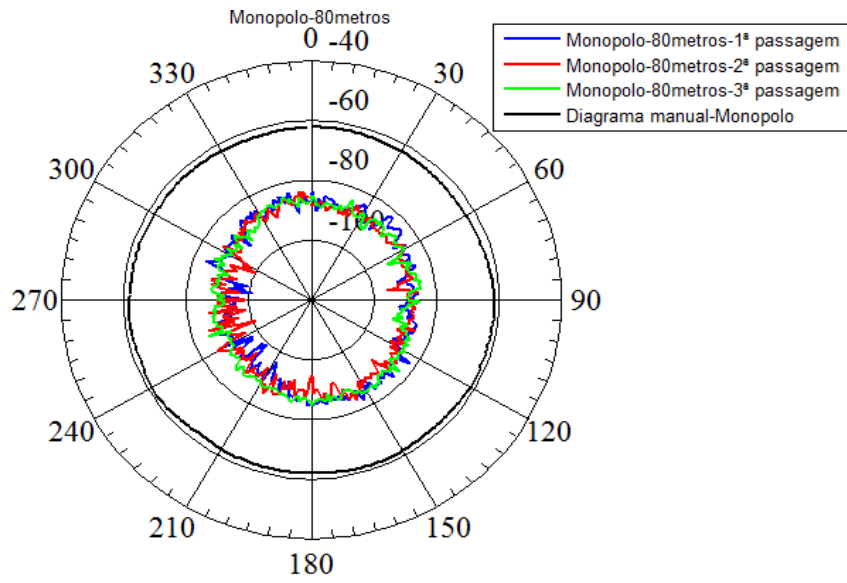
Tabela 4.4. Valor para os 62 metros em relação a potência em espaço livre.

Antenas recetoras	Potência recebida na situação de espaço livre (dBm)	Atenuação em relação ao espaço livre (dB)	Ângulo de maior captação de sinal	Atenuação no ângulo de maior captação de sinal (dB)
Monopolo	-58,9	-32,4	0°	-32,4
Suspensa	-52,9	-33,0	30°	-28,8
Omnidirecional	-51,9	-35,3	0°	-35,3
Yagi	-51,8	-31,7	15°	-31,5
Corneta	-49,8	-30,8	15°	-27,0
Painel	-47,8	-38,1	15°	-29,0
Biquad	-45,3	-42,8	15°	-32,0

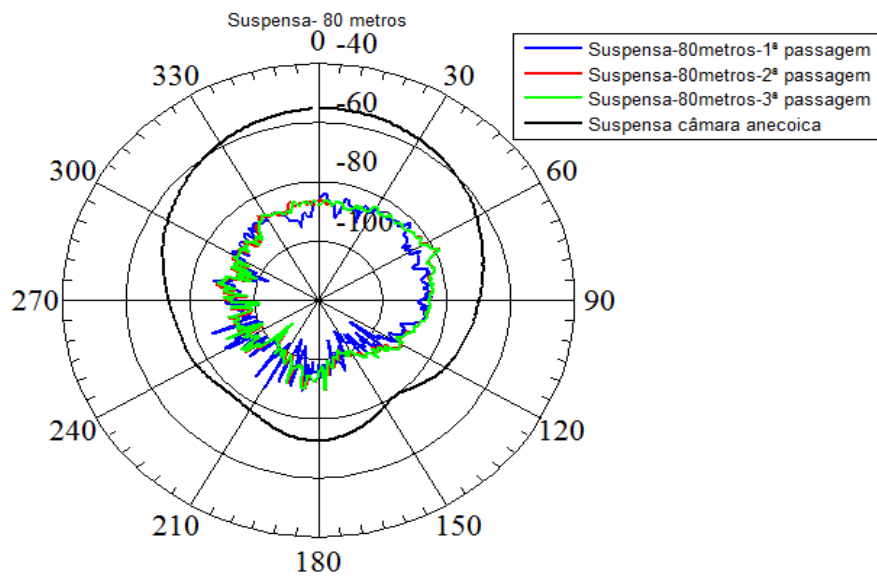
Ao analisar os resultados da tabela 4.4, verifica-se um novo aumento da atenuação em relação à potência recebida na situação de espaço livre em comparação com a distância de 40 metros. Também observa-se que para as antenas diretivas o ângulo de maior radiação passa a ser entre os 15°-30°, existindo uma diminuição da atenuação em relação ao espaço livre. A atenuação para as antenas diretivas encontra-se em torno dos 30,8 a 42,8 dBi.

4.2.4 Análise das medições no meio florestal para 80 metros de distância

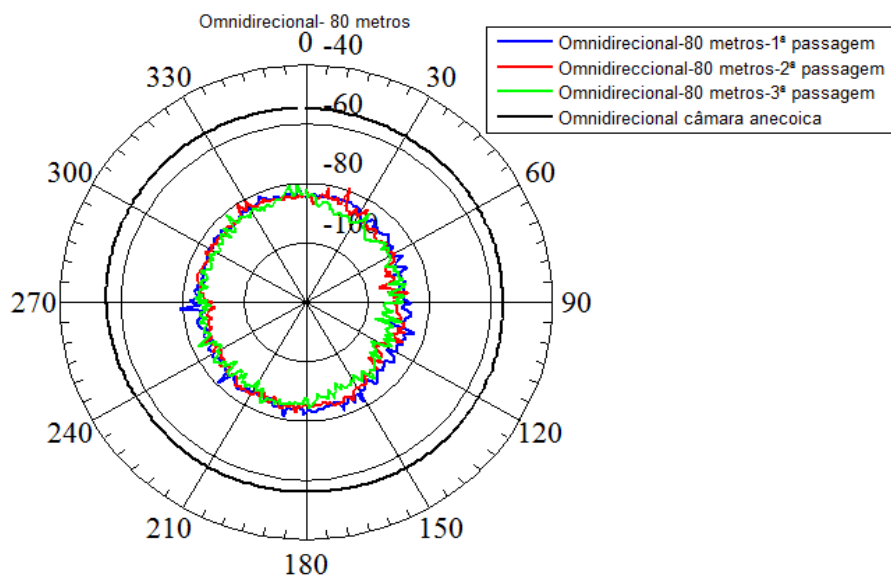
As medições dos diagramas de radiação para os 80 metros foram realizadas num percurso em que a antena emissora e a recetora encontravam-se sem linha de vista. Para os 80 metros o número de árvores à volta da antena recetora é pequeno, tendo uma densidade de árvores mais baixa em comparação com os 40 e 60 metros. Os resultados obtidos são apresentados na figura 4.9.



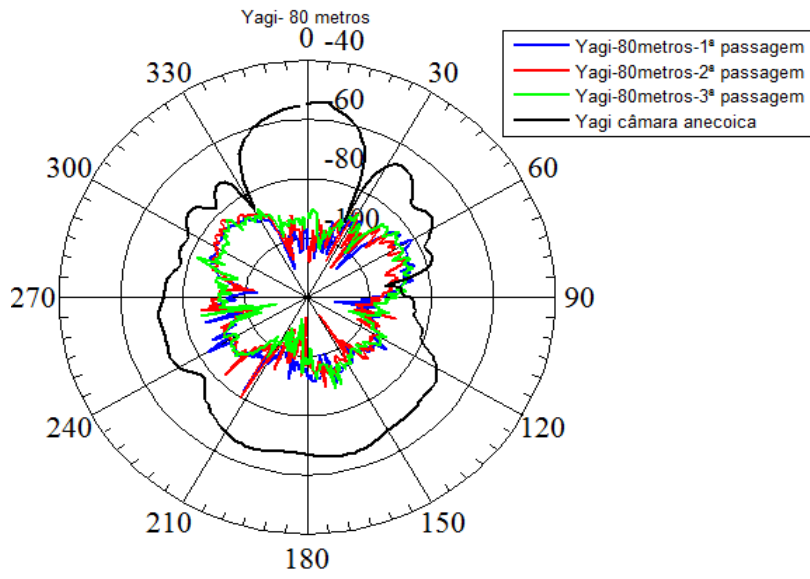
(a)



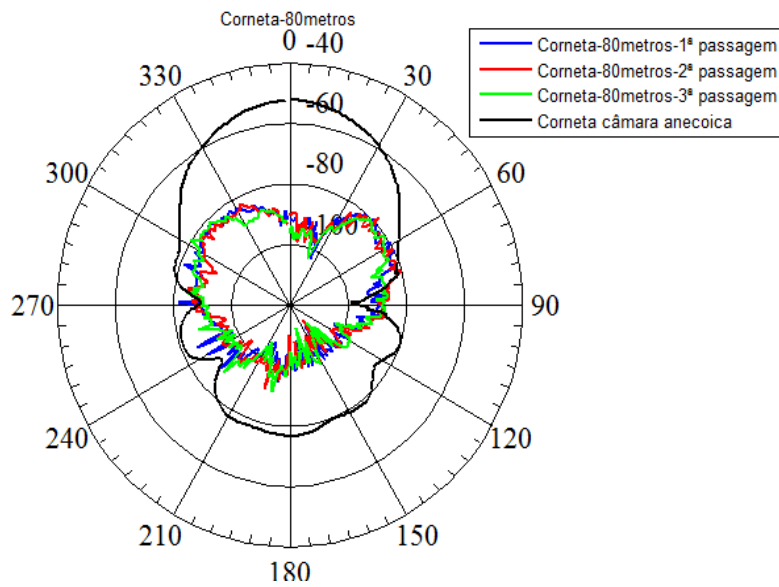
(b)



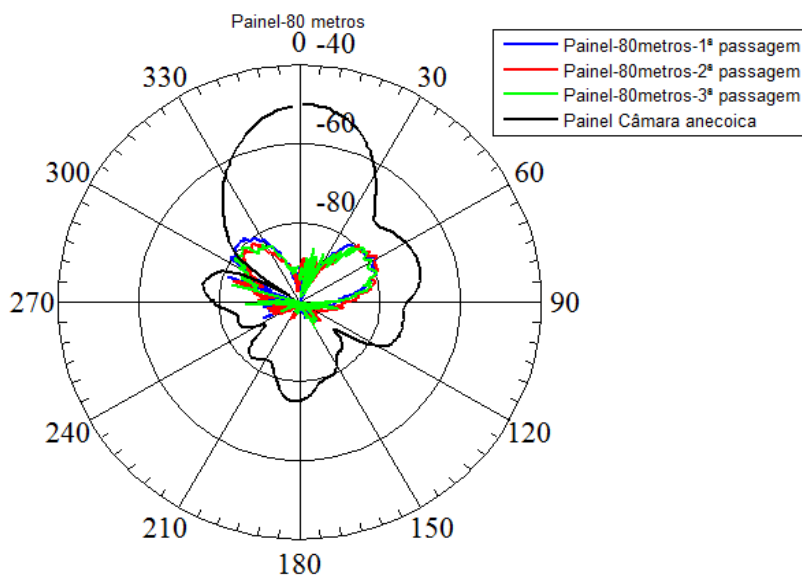
(c)



(d)



(e)



(f)

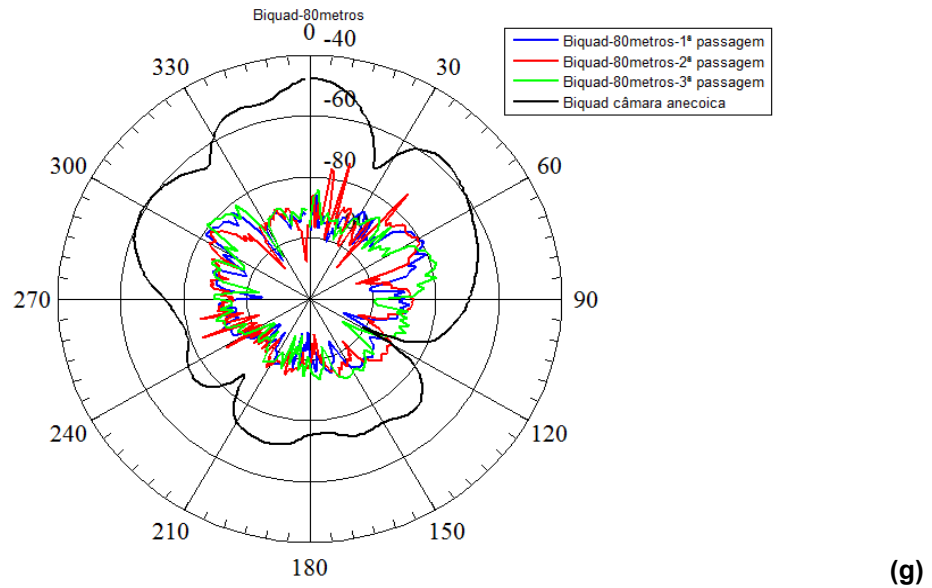


Figura 4.9. Resultados obtidos para os 80 metros de distância no meio florestal: (a) monopolo; (b) suspensa; (c) omnidireccional; (d) yagi; (e) corneta; (f) painel; (g) biquad.

Da figura 4.9 afere-se que para a distância dos 80 metros as antenas diretivas apresentam um comportamento semelhante, considerando que o lóbulo principal das antenas encontra-se deslocado para 60° e 300° com uma diferença de nível de sinal recebido em torno dos 30 dB em relação ao diagrama ideal. É de referir que, para esta distância, as antenas de menor ganho recebem a mesma quantidade de sinal que as de maior ganho. Desta forma, é necessário mais potência para aumentar o nível do sinal recebido, ao contrário de aumentar o ganho das antenas. O comportamento das antenas omnidirecionais é similar aos casos anteriores. Na tabela 4.5 encontra-se uma análise da atenuação para os diferentes ângulos.

Tabela 4.5. Valor para os 80 metros em relação a potência em espaço livre.

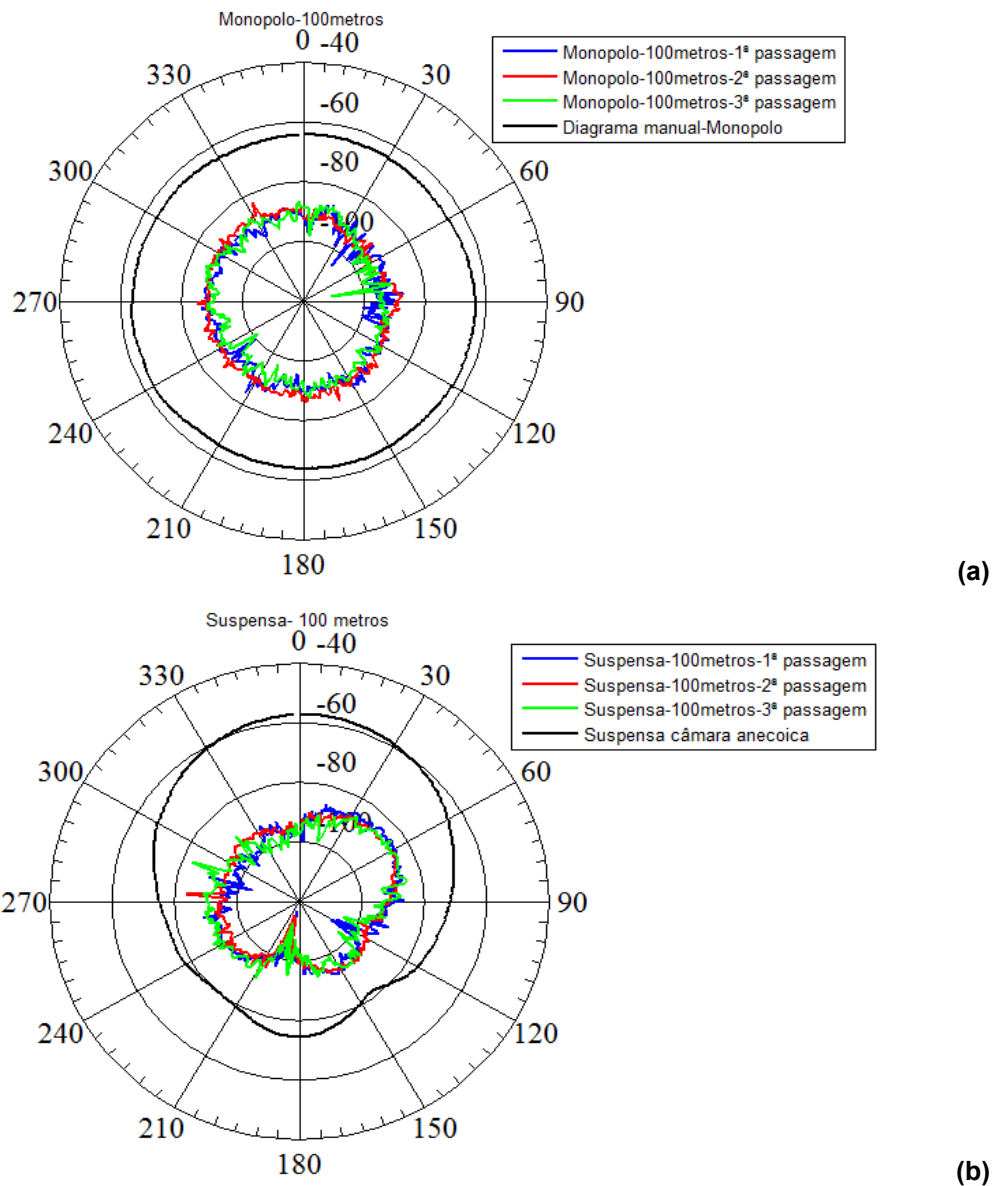
Antenas recetoras	Potência recebida na situação de espaço livre (dBm)	Atenuação em relação ao espaço livre (dB)	Ângulo de maior captação de sinal	Atenuação no ângulo de maior captação de sinal (dB)
Monopolo	-61,1	-25,6	0°	-25,6
Suspensa	-55,1	-31,7	60°	-28,6
Omnidireccional	-54,1	-30,1	0°	-30,1
Yagi	-54,0	-49,6	60°	-27,0
			310°	-30,8
Corneta	-52,0	-40,0	60°	-27,2
			315°	-29,2
Painel	-50,0	-44,0	60°	-28,1
			315°	-28,7
Biquad	-47,5	-49,8	70°	-32,9
			310°	-33,1

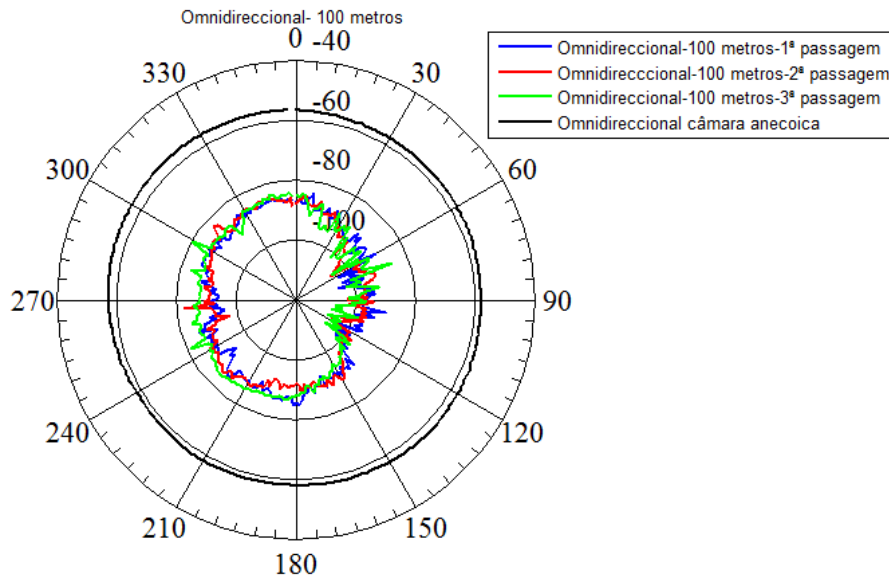
Ao analisar os resultados da tabela 4.5, verifica-se que a atenuação mantém-se em relação à potência recebida na situação de espaço livre em

comparação com a distância de 60 metros. Também observa-se que para as antenas diretivas o ângulo de maior radiação passa a ser nos 60° e 300° - 330° , com uma diminuição da atenuação em relação ao espaço livre.

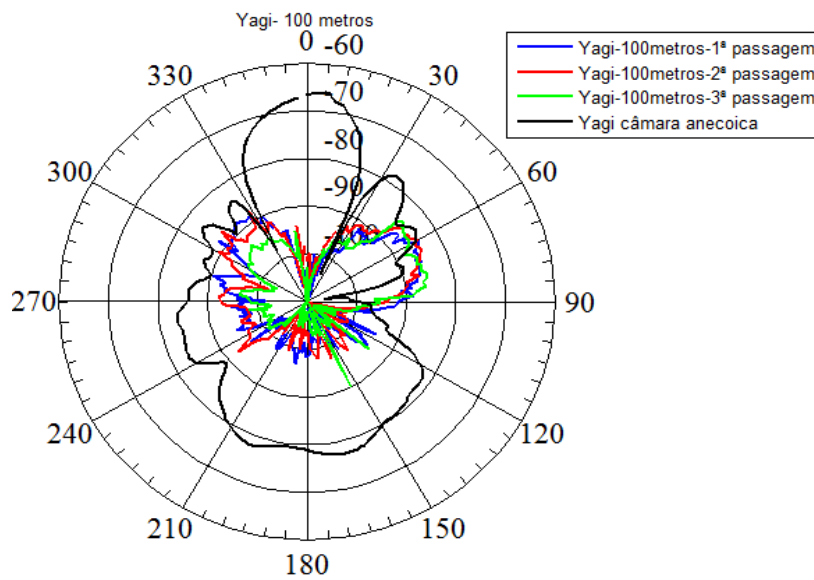
4.2.5 Análise das medições no meio florestal para 100 metros de distância

As medições dos diagramas de radiação para os 100 metros também foram realizadas num percurso em que a antena emissora e a recetora encontravam-se sem linha de vista. Para os 100 metros as árvores à volta da antena emissora. A figura 4.10 apresenta os resultados obtidos para esta distância.

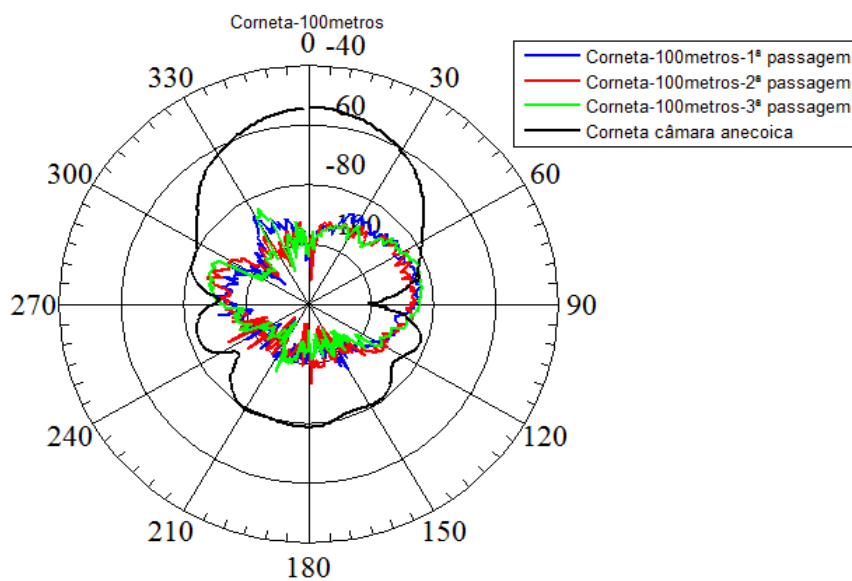




(c)



(d)



(e)

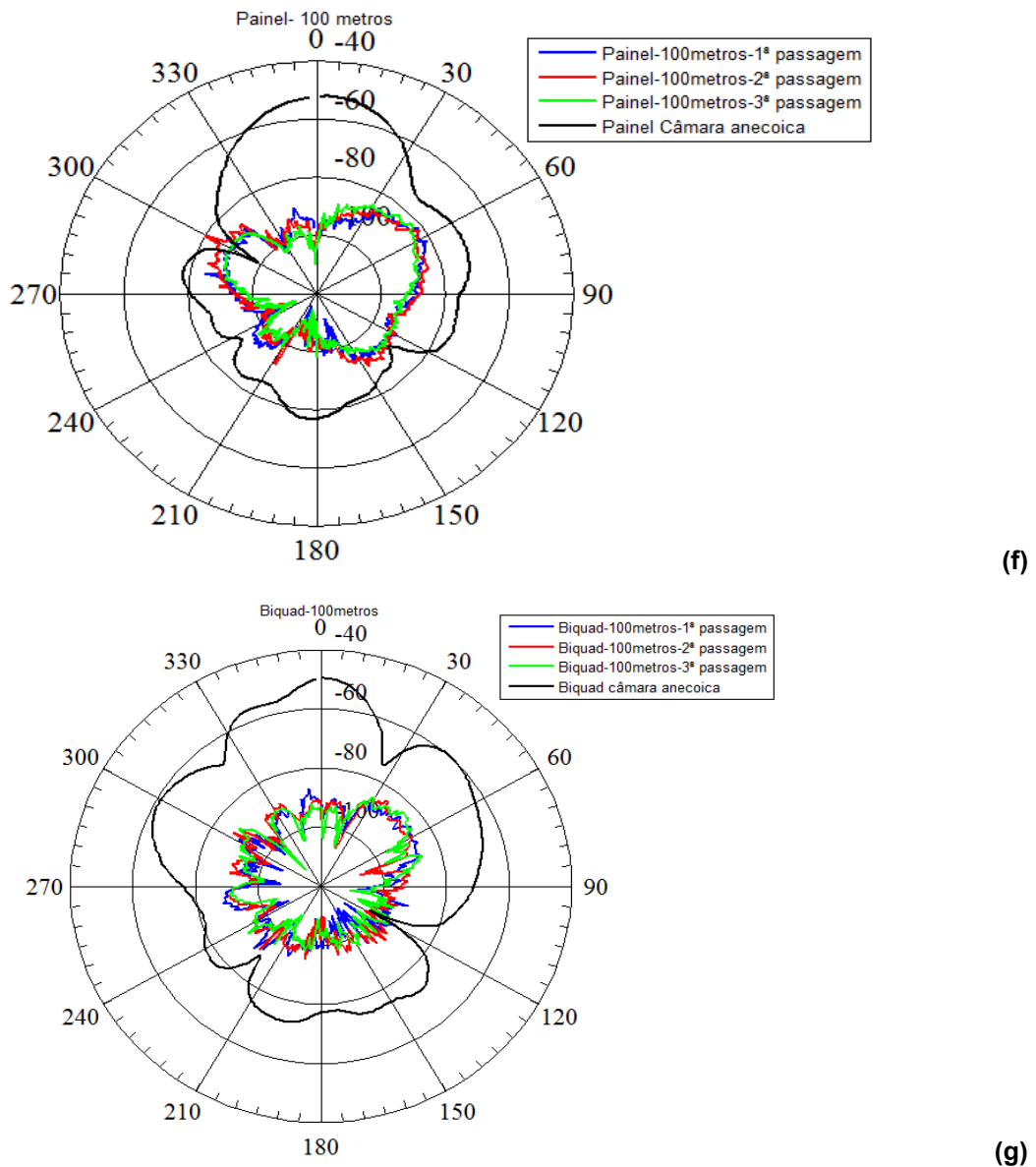


Figura 4.10. Resultados obtidos para os 100 metros de distância no meio florestal: (a) monopolo; (b) suspensa; (c) omnidireccional; (d) yagi; (e) corneta; (f) painel; (g) biquad.

Da figura 4.10 verifica-se que para a distância dos 100 metros as antenas diretivas apresentam um comportamento semelhante ao das distâncias anteriores. A tabela 4.6 mostra os resultados obtidos para esta distância.

Tabela 4.6. Valor para os 100 metros em relação a potência em espaço livre.

Antenas recetoras	Potência recebida na situação de espaço livre (dBm)	Atenuação em relação ao espaço livre (dB)	Ângulo de maior captação de sinal	Atenuação no ângulo de maior captação de sinal (dB)
Monopolo	-63,1	-28,3	0°	-28,3
Suspensa	-57,1	-38,8	60°	-31,8
Omnidirecional	-56,1	-29,4	0°	-29,4
Yagi	-56,0	-45,6	60°	-28,0
			315°	-33,0
Corneta	-54,0	-48,9	65°	-30,2
			330°	31,6
Painel	-52,0	-46,9	60°	-29,2
			300°	-37,4
Biquad	-49,5	-42,1	60°	-35,1

Ao analisar os resultados da tabela 4.6 verifica-se que a atenuação é semelhante à obtida para a distância de 80 metros. Também se observa que para as antenas diretivas o ângulo de maior captação passa a ser de 60° e 300°-330°.

4.3 Estudo da variação do sinal ao longo do tempo

Após a análise realizada para as diferentes distâncias verificou-se que para as posições de 60, 80 e 100 metros existem ângulos com maior captação de sinal que o de máxima radiação no espaço livre. Sendo assim, escolheram-se algumas das antenas diretivas para realizar novas medições nos ângulos de 15°, 60° e 300° de modo a verificar a variação do nível de sinal recebido para essas posições e, assim, avaliar se os valores obtidos encontram-se dentro de uma média adequada.

Para a distância de 60 metros escolheram-se as antenas diretivas painel e biquad. Após verificar a tabela 4.4, as antenas foram colocadas no ângulo de 15°. Para uma posição fixa foram obtidas 100 amostras para cada antena. A figura 4.11 apresenta os resultados obtidos.

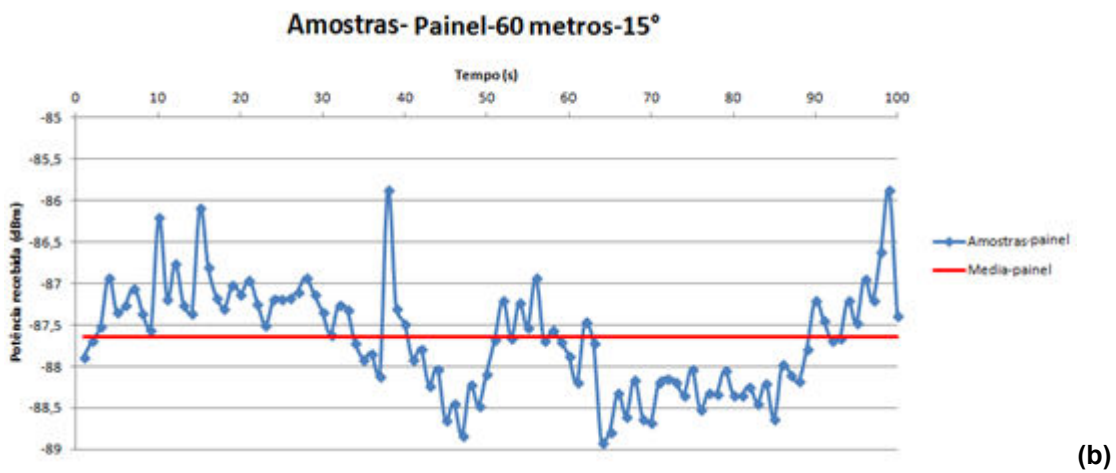
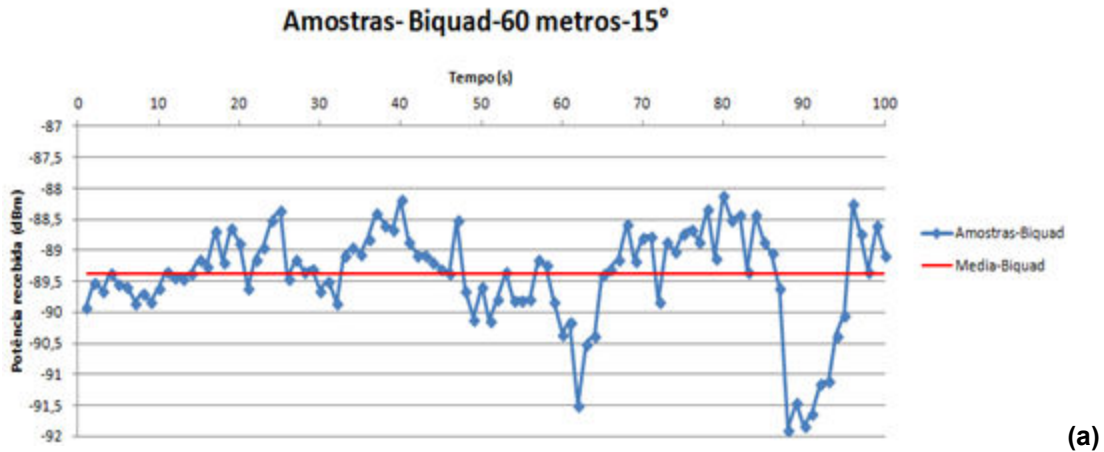
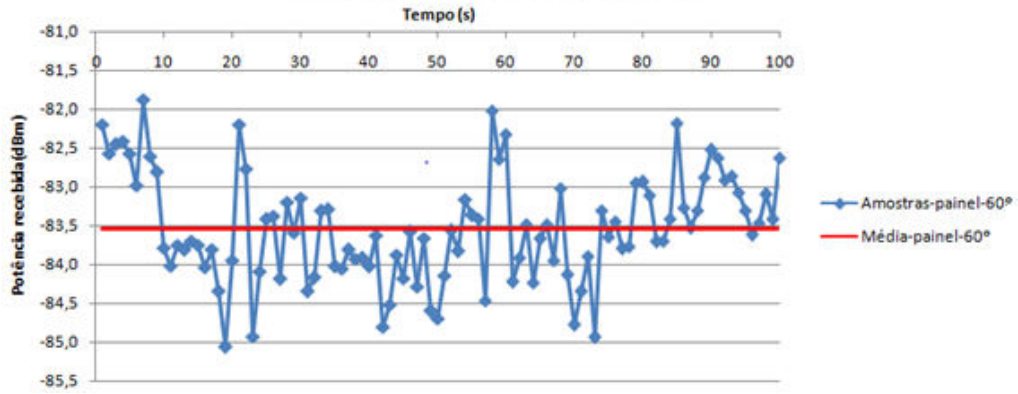


Figura 4.11. Variação do nível de sinal nos 60 metros para o ângulo de 15°: (a) painel; (b) biquad.

Da figura 4.11 afere-se que para cada uma das antenas existe alguma variação, sendo que a média para a antena painel foi de 87,5 dBm aproximadamente e para a antena biquad foi de 89,5 dBm. O desvio padrão é, de 0,6 para antena painel e de 0,7 para antena biquad.

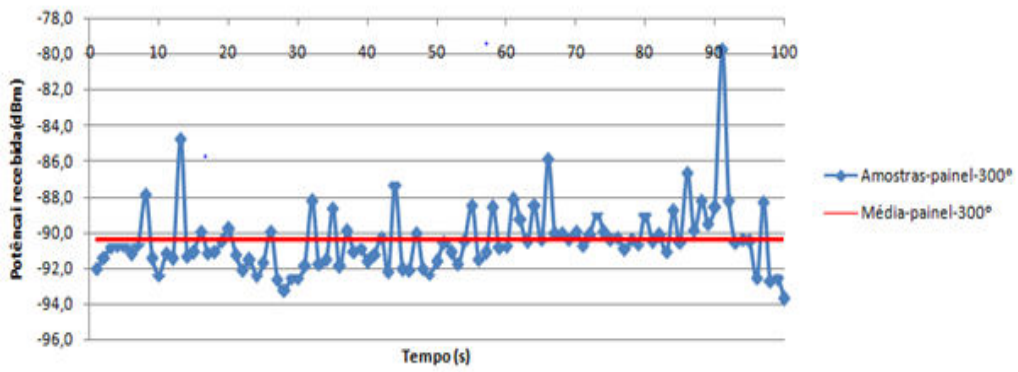
Para a distância de 80 metros foram utilizadas a antena painel e a antena corneta. Sendo assim, verificou-se a tabela 4.5 de modo a colocar as antenas na posição de máxima captação para esta distância. Os valores registados na figura 4.12 correspondem aos ângulos de 60° e 300°.

Amostras-Painel-80 metros-60°



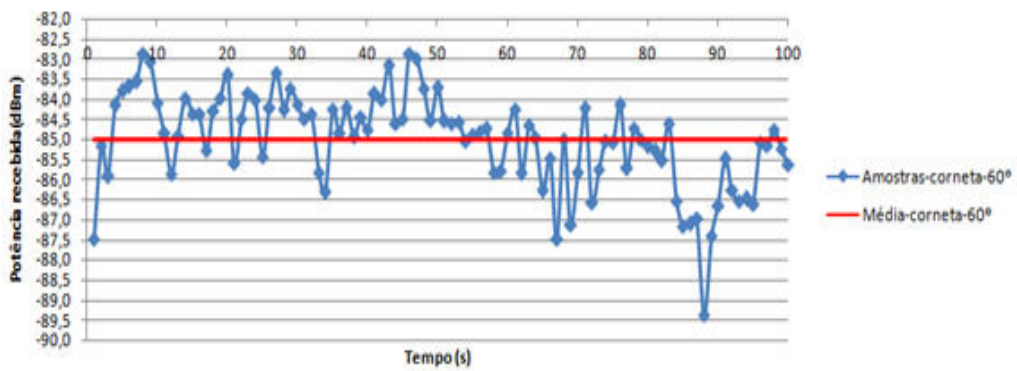
(a)

Amostras-painel-80 metros-300°



(b)

Amostras-corneta-80 metros-60°



(c)

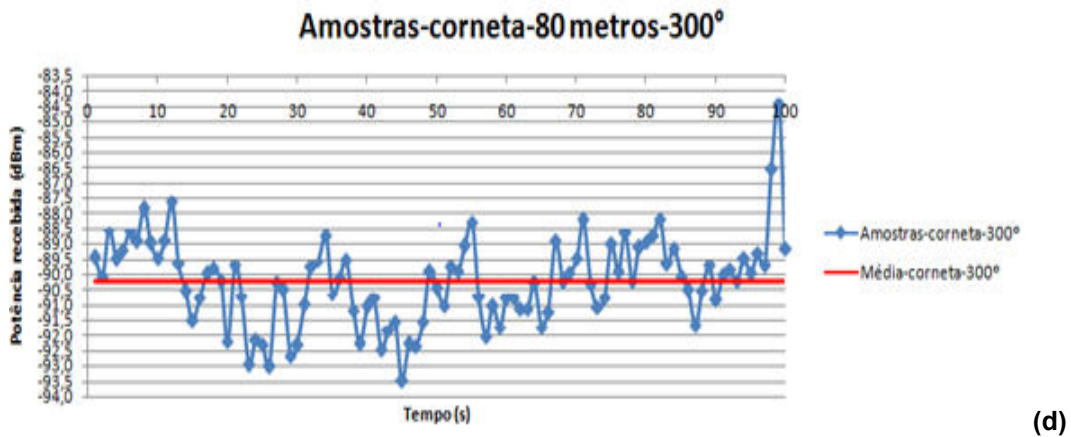


Figura 4.12. Variação das amostras nos 80 metros: (a) painel 60°; (b) painel 300°; (c) corneta 60°; (d) corneta 300°.

Da figura 4.12 confere-se que existe alguma variação em cada situação, sendo que a média para antena painel no ângulo 60° foi de 84 dBm e para 300° foi de aproximadamente 90 dBm. O desvio padrão para os 60° é de 0,7 e para os 300° é de 1,9. Para a antena corneta os valores foram semelhantes aos valores da antena painel. Para o ângulo de 60° a média foi de 85 dBm e para 300° foi de 90 dBm. Sendo que o desvio padrão para os 60° é de 1,2 e para os 300° é de 1,4. Realizou-se o mesmo procedimento para a posição de 100 metros com a antena corneta. A figura 4.13 apresenta os resultados obtidos.

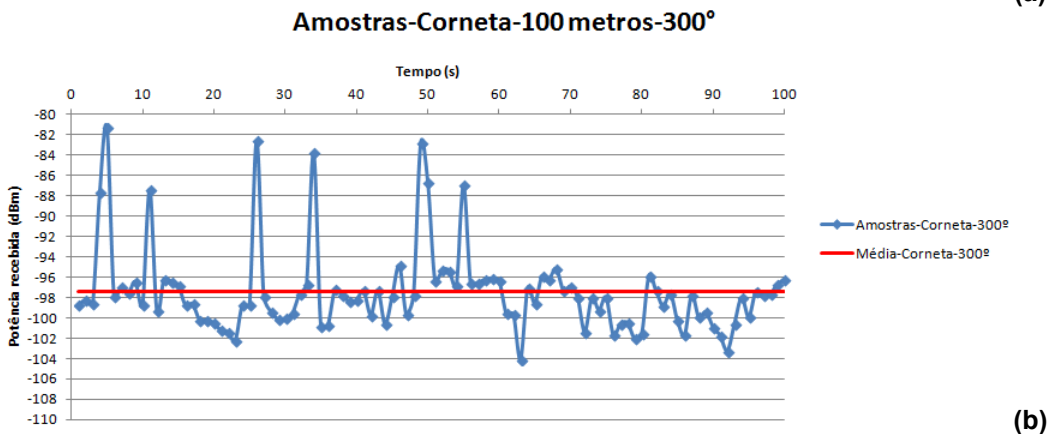
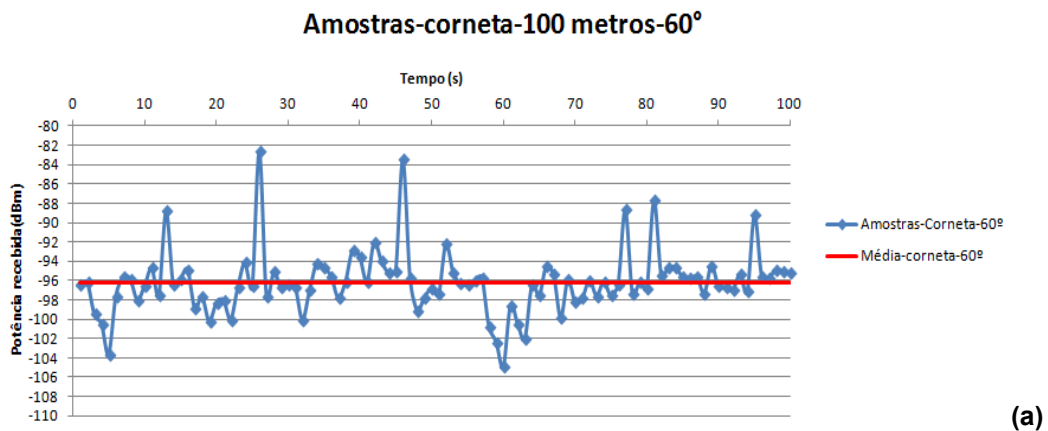


Figura 4.13. Variação das amostras nos 100 metros: (a) corneta 60°; (b) corneta 300°.

Analisando os gráficos da figura 4.13 verifica-se que a média obtida é semelhante à dos gráficos da figura 4.11 (c) e 4.11 (d). Para o ângulo 60° registou-se uma média de aproximadamente 96 dBm e para o ângulo 300° apresenta uma média de 97 dBm. O desvio padrão para os 60° é de 3,3 e para 300° é de 4,2. A variação em torno da média pode ser provocada por diversos fatores, como o vento, folhagem existente no local, entre outros.

4.4 Comparação entre antenas

Nesta secção realiza-se uma comparação entre as diferentes antenas para os ângulos mais significativos de acordo com a potência recebida. É de referir que os resultados foram obtidos através das tabelas 4.2 a 4.6.

Os resultados da figura 4.14 permitem fazer uma comparação entre antenas para as diferentes distâncias na posição de máxima de radiação (0°).

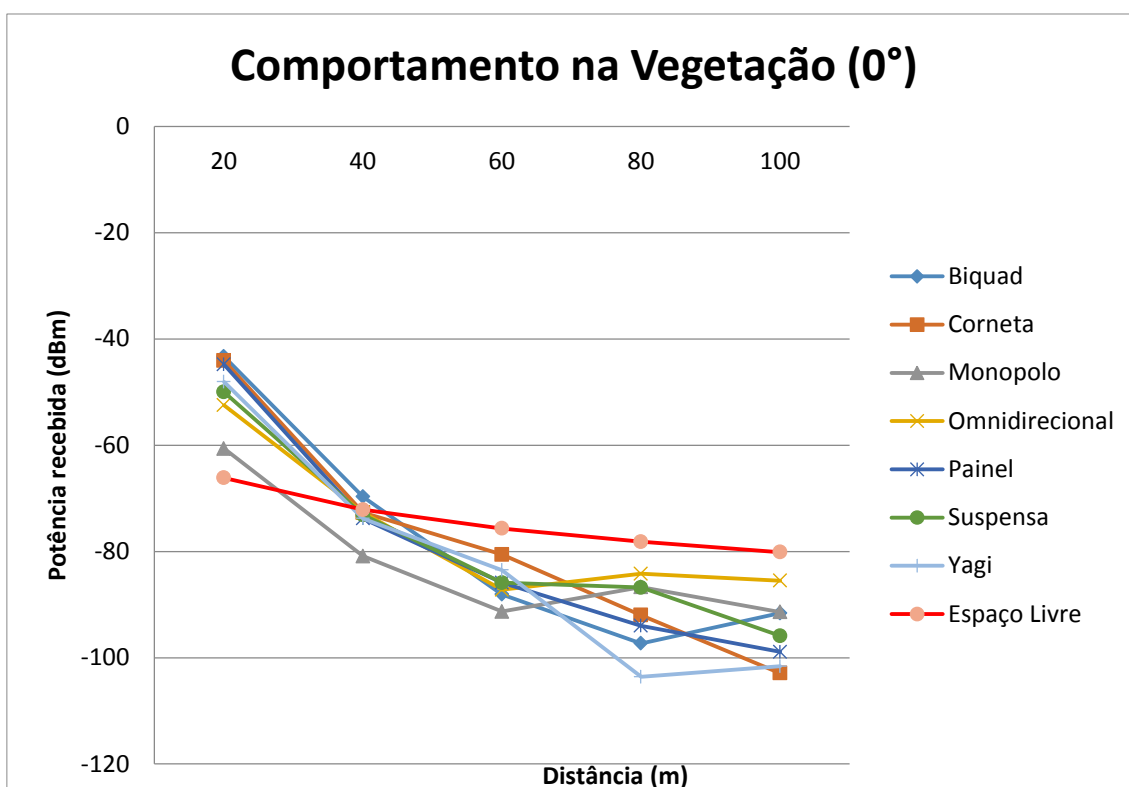


Figura 4.14. Comportamento das antenas no meio florestal para 0°.

Verifica-se que até à distância de 60 metros as antenas diretivas conseguem receber mais sinal que as omnidirecionais. Para as distâncias de 80 e 100 metros as antenas omnidirecionais conseguem receber mais potência que as diretivas. Desta forma, para estas distâncias não interessa ter antenas com grande ganho mas sim maior potência para obter um maior alcance.

A figura 4.15 apresenta uma comparação entre antenas para o ângulo de 60°.

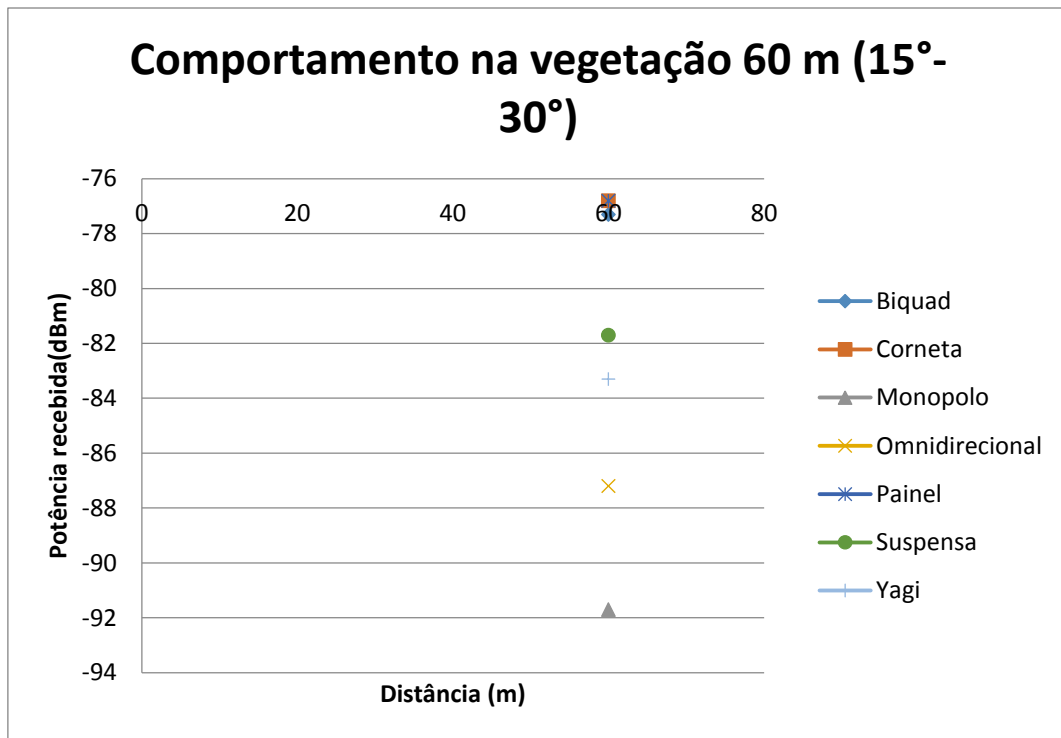


Figura 4.15. Comportamento das antenas para a distância de 60 metros no ângulo de 15°.

Como foi verificado anteriormente na tabela 4.4 para a distância de 60 m, o ângulo de maior captação nas antenas diretivas passou a estar entre os 15°-30°. Na figura 4.14 observa-se que as antenas diretivas para este ângulo conseguem obter mais sinal do que as antenas omnidirecionais devido às reflexões provenientes desta direção. A figura 4.16 mostra o posicionamento da antena recetora juntamente com a direção que provoca as reflexões.



Figura 4.16. Posicionamento da antena recetora para os 62 metros juntamente e visualização da árvore provocadora das reflexões.

A figura 4.17 mostra uma comparação entre diferentes antenas para um ângulo de captação de 60°.

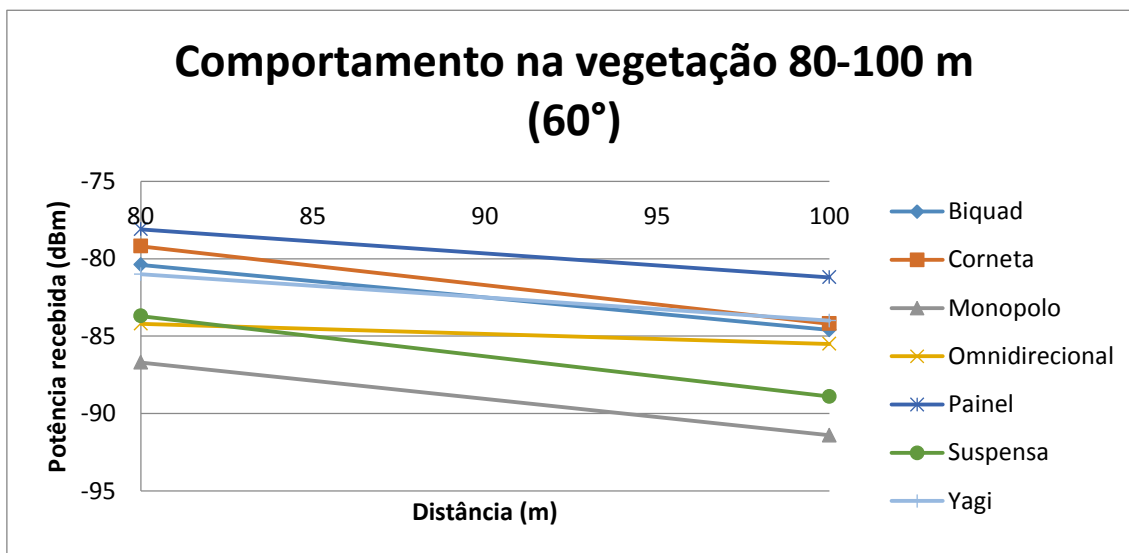


Figura 4.17. Comportamento das antenas na vegetação para a distância 80-100 m para os ângulos 60°.

Como foi verificado anteriormente nas tabelas 4.5 e 4.6, para as distâncias de 80 e 100 metros o ângulo de maior captação nas antenas diretivas passou para os 60°. Na figura 4.17 observa-se que estas antenas para este ângulo conseguem obter mais sinal que as antenas omnidirecionais, sendo que a antena suspensa apresenta um pior nível de sinal recebido que a antena omnidirecional de ganho 9 dBi. Este deslocamento do ângulo de

máxima captação deve-se a uma encosta localizada no lado direito da antena recetora, representada na figura 4.18.



Figura 4.18. Encosta causadora de reflexões para o ângulo de 60°.

Na figura 4.19 está representada uma comparação entre diferentes antenas para um ângulo de captação de entre 300° e 330°.

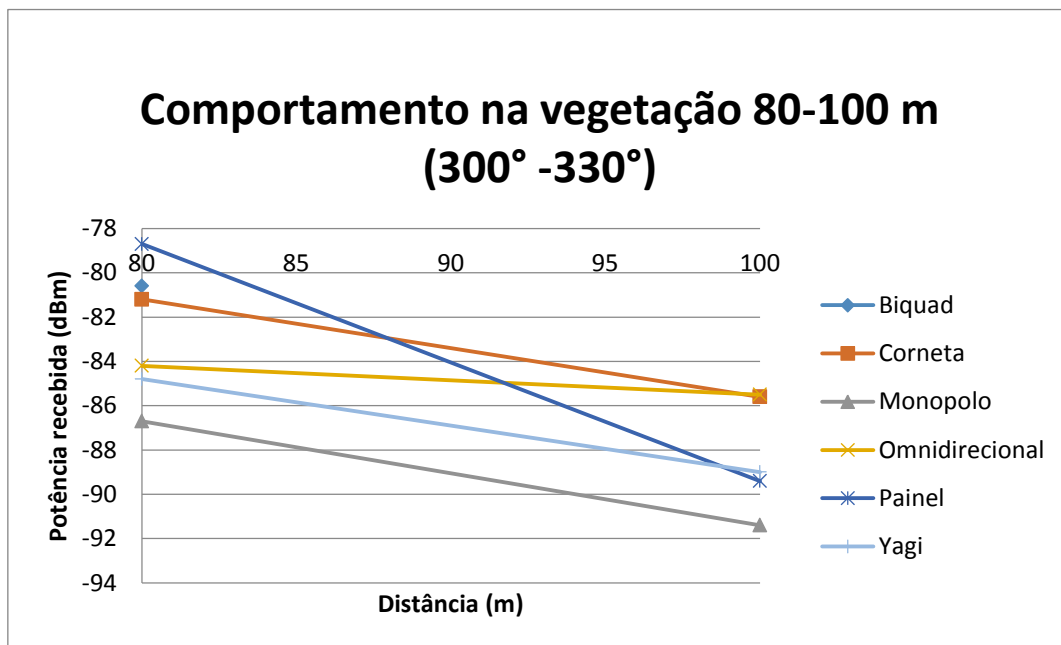


Figura 4.19. Comportamento das antenas na vegetação para a distância 80-100 m para os ângulos 300°-330°.

Na figura 4.19 observa-se que para esta distância também existe um novo ângulo de máxima captação entre os 300° e 330° devido às reflexões causadas pelo edifício da Universidade da Madeira, (figura 4.20). Contudo, só

se verifica para algumas das antenas diretivas e também se regista que para esta posição a antena omnidirecional de ganho 9 dBi consegue resultados melhores que as antenas diretivas yagi e painel.



Figura 4.20. Edifício da Universidade da Madeira visto do meio florestal na posição de 100 metros causando reflexões nos ângulos 300° e 330°.

4.5 Sistema de comunicação mecânico

Nesta secção apresentam-se os resultados obtidos pelo sistema de medição mecânico, para a distância de 80 metros. A figura 4.21 ilustra o sistema de comunicação mecânico no local de mediação escolhido para testes.



Figura 4.21. Sistema de comunicação mecânico nos 80 metros.

Na figura 4.22 apresenta os resultados obtidos por este sistema. Foram medidas 100 amostras para a posição de máxima radiação (0°) e, para os ângulos de maior captação de potência (60° e 300°).

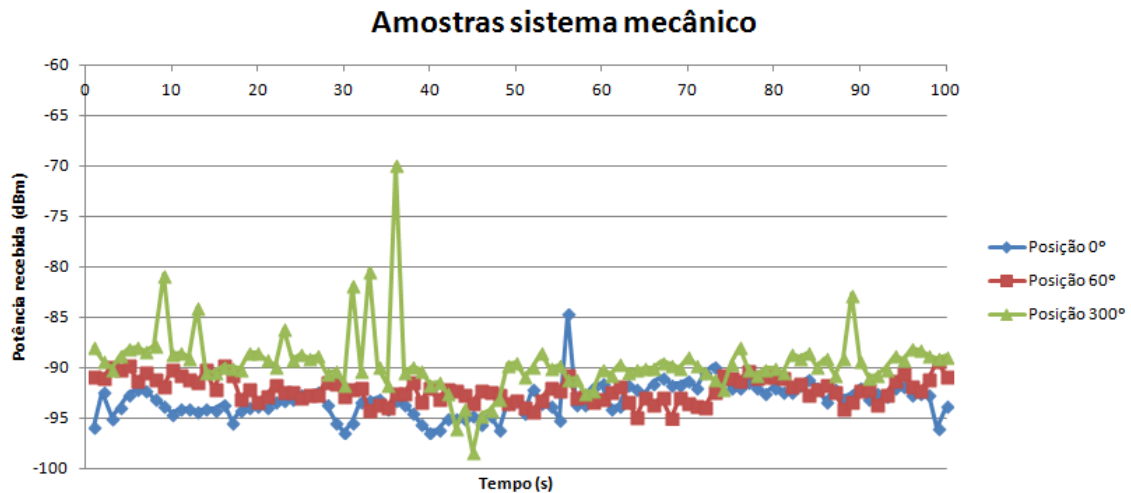
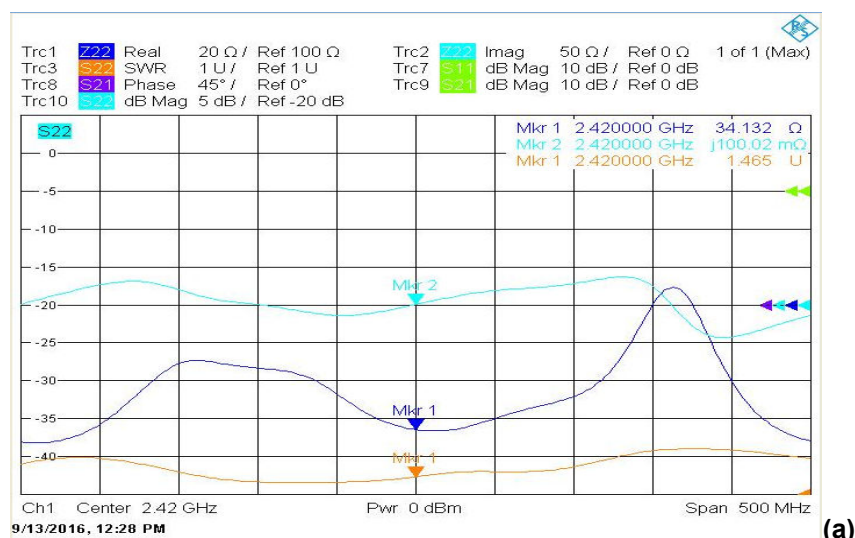


Figura 4.22. Resultados do sistema de comunicação mecânico.

Analisando os dados obtidos da figura 4.22 verifica-se que existe uma maior atenuação para a posição de 0° , sendo que os ângulos de maior captação de potência apresentam menor atenuação, com uma variação em relação à posição de 0° em torno de 1 dB para o ângulo de 60° e de 4 dB para o ângulo de 300° .

4.6 Sistema de comunicação eletrônico

Nesta secção apresentam-se os resultados do sistema de medição eletrônico. A figura 4.23 (a) ilustra os resultados obtidos relativamente ao valor do SWR e da impedância da antena. A figura 4.23 (b) apresenta os diagramas de radiação das respetivas antenas.



(a)

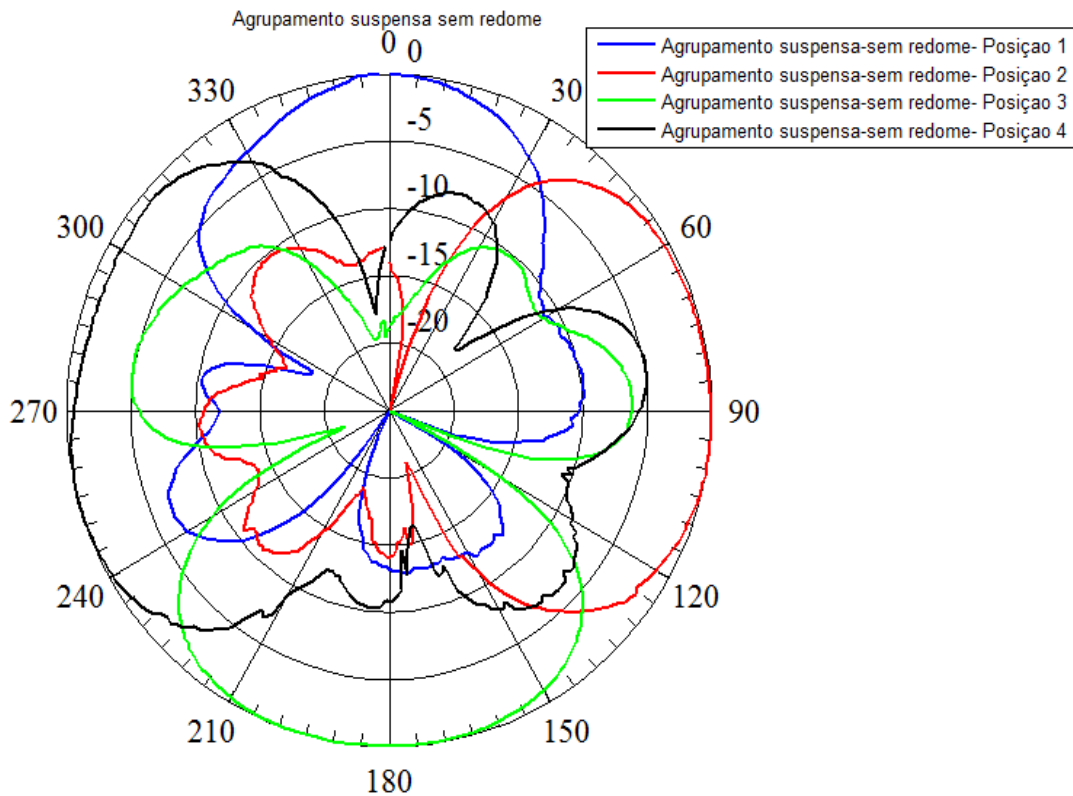


Figura 4.23. (a) SWR e impedância do Agrupamento de antena; (b) Diagrama de radiação.

Analisando os resultados da figura 4.23 (a), verifica-se que existe o mesmo comportamento para a posição 1, 2, 3 e 4, as quais correspondem aos ângulos de 0° , 90° , 180° e 270° . Para a frequência de 2,42 GHz obteve-se uma impedância de $34,13 - j0,10$ e, um SWR de 1,47. No que concerne ao ganho do agrupamento é de aproximadamente 7 dBi. Para este sistema foi realizada uma nova medição após se ter colocado o agrupamento dentro da caixa de proteção. A figura 4.24 apresenta os valores do SWR, 1,42 para 2,42 GHz e de impedância de $39,03 - j10,83$ para 2,42 GHz. O valor do ganho manteve-se nos 7 dBi.

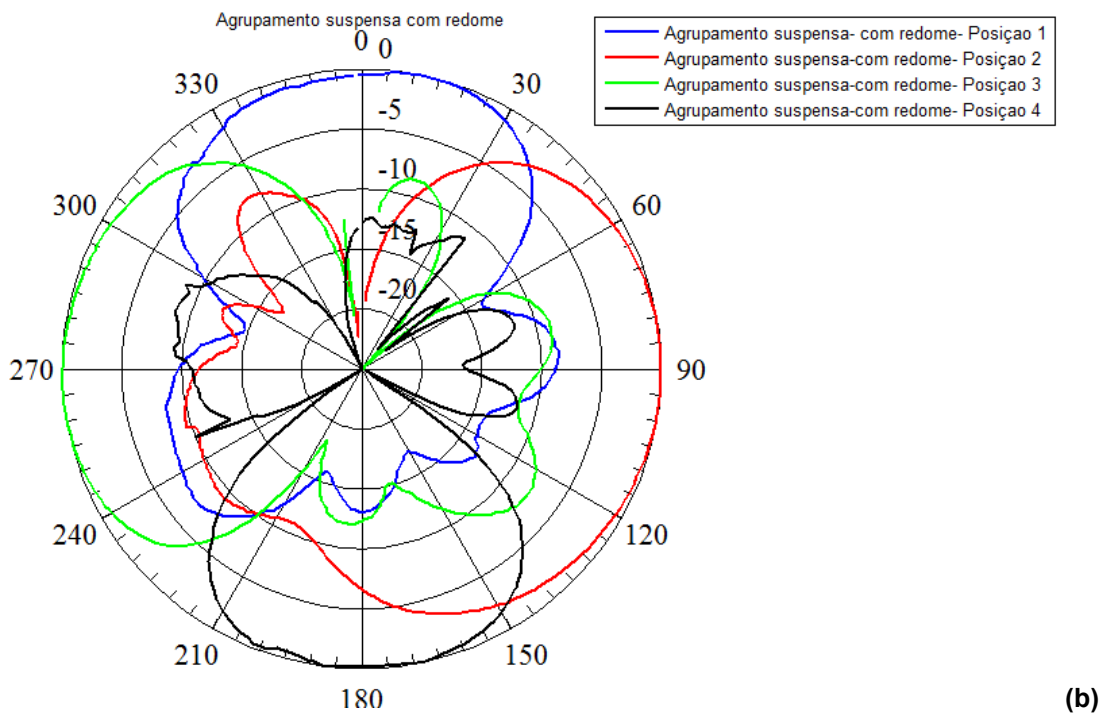
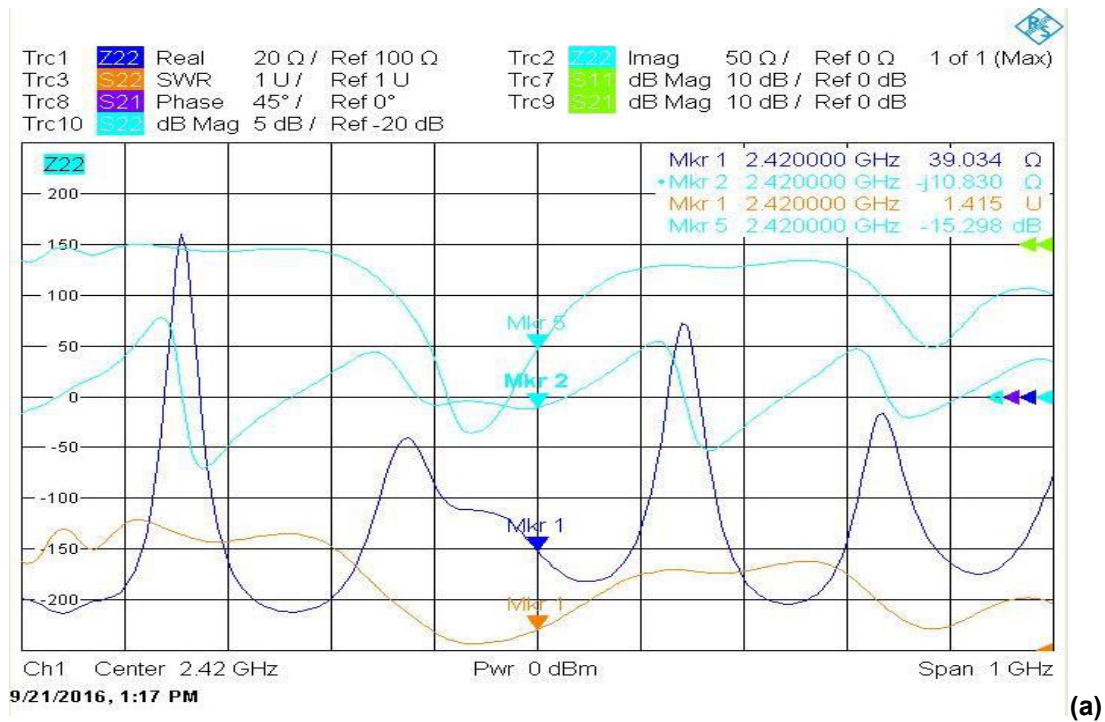


Figura 4.24. (a) SWR e impedância da antena; (b) Diagrama de radiação.

Analisando as figuras 4.23 e 4.24 verifica-se que tanto os valores de impedância e SWR estão dentro do esperado, enquanto os diagramas de radiação com caixa e sem caixa são muito semelhantes. Afere-se que, quando se ativa a posição 1 obtém-se o diagrama com máxima radiação para o ângulo de 0°, para a posição 2 o feixe é deslocado para os 90°, para a posição 3 o feixe é deslocado para os 180° e para a posição 4 o feixe desloca-se para os 270° como era de esperar.

Foram realizados testes na vegetação nas mesmas condições que o sistema de comunicação mecânico. A figura 4.25 ilustra o sistema de comunicação eletrônico no local de medição escolhido para testes.



Figura 4.25. Sistema de comunicação eletrônico nos 80 metros.

Na figura 4.26 apresenta os resultados obtidos para o sistema de comunicação eletrônico. Foram retiradas 100 amostras para as posições de 0°, 90°, 180° e 270°.

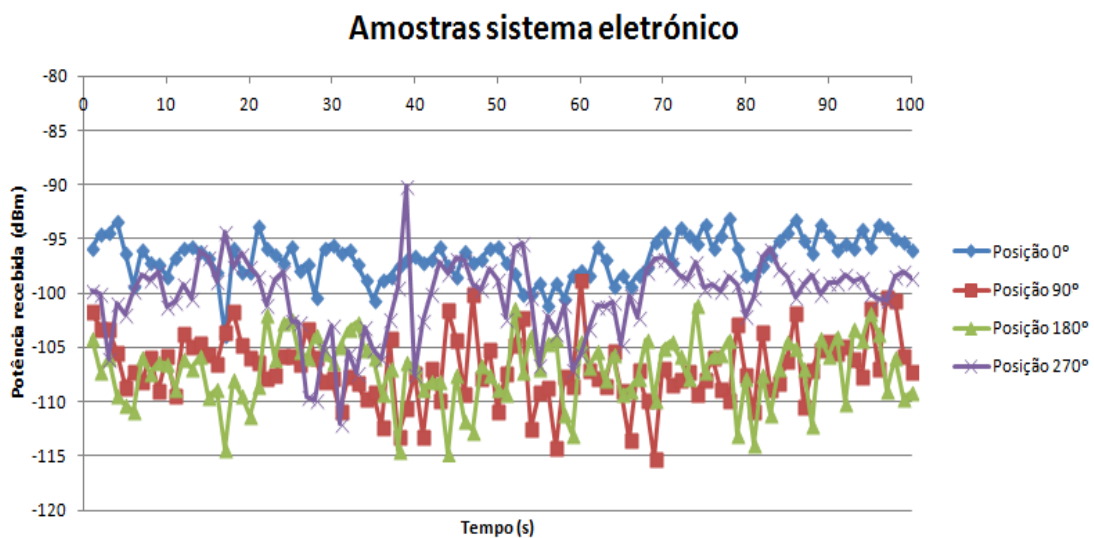


Figura 4.26. Resultados do sistema de comunicação mecânico.

Analisando os dados obtidos da figura 4.26 verifica-se que o ângulo de maior radiação apresenta uma menor atenuação, sendo que o ângulo de 270°

tem uma atenuação mais baixa em relação aos ângulos de 90° e 180°. Isto deve-se às reflexões provocadas pelo edifício da Universidade da Madeira. As atenuações em relação ao ângulo de maior radiação variam em torno dos 10 dB para os 90°, 11 dB para os 180° e de 3 dB para os 270°.

5 Conclusão e trabalhos futuros

Com este capítulo pretende-se apresentar as conclusões referentes ao desenvolvimento e implementação de sistemas que permitam o controlo do diagrama de radiação para agrupamentos de antenas. Também são indicados alguns trabalhos futuros que podem ser desenvolvidos para contribuir na continuação deste.

5.1 Conclusões

Este trabalho teve como principal objetivo o estudo da propagação do sinal em meios com desvanecimento e o controlo dos diagramas de radiação através de sistemas de comunicação que permitissem o controlo de um agrupamento de antenas.

Para a realização deste trabalho foi importante a implementação de um sistema automático para a medição dos diagramas de radiação, de modo a obter as características de radiação com uma boa precisão. Também foi relevante a implementação de um sistema capaz de interligar o computador ao analisador de espectro para captura dos dados em tempo real e uma fácil manipulação por parte do utilizador do sistema.

Relativamente ao estudo da propagação do sinal, este foi realizado no meio com vegetação, precisamente no jardim da Universidade da Madeira, caracterizando-se por ser um meio com troncos e folhagem, tendo-se verificado um aumento da atenuação do sinal com a distância.

Ao nível da folhagem, afere-se um grande aumento da atenuação à medida que o ganho da antena recetora aumentava. Desta forma, o melhor tipo de antena para ser utilizada a partir da distância dos 60 metros, neste meio foram as antenas omnidirecionais uma vez que conseguem receber maior potência em relação as antenas diretivas. Por isso, para estas distâncias não interessa ter antenas com grande ganho mas sim maior potência para obter um maior alcance.

As antenas diretivas, a partir da distância de 60 metros, apresentam maior nível de sinal para determinados ângulos. Após realizar-se um estudo do meio verificou-se que esta deslocação do feixe para esses ângulos deve-se a determinados obstáculos que introduzem reflexões com maior intensidade.

Analisaram-se diferentes sistemas para controlo do diagrama de radiação e implementou-se um sistema de comunicação mecânico e um sistema de comunicação eletrónico. O sistema autónomo de comunicação eletrónico constituído por um motor de passo apresentou valores de perdas de inserção muito baixos, sendo que inicialmente o ganho da antena suspensa era de 8,6 dBi e após ter sido colocada dentro de uma caixa de proteção em PVC o seu ganho passou a ser de 8,2 dBi, verificando-se uma perda de 0,4 dB.

Para o sistema de comunicação eletrónico foi escolhida uma malha de alimentação paralela, uma vez que permite uma distribuição uniforme da potência por todas as linhas de transmissão. Utilizou-se esta opção essencialmente não só pelo facto de ser simples de implementar, mas principalmente porque a degradação das perdas de inserção são mais baixas que as introduzidas por deslocadores de fase. Sendo assim, as antenas apresentaram um ganho de 7 dBi, correspondendo a uma perda de inserção de aproximadamente 1 dB. Após a colocação do agrupamento dentro da caixa de acrílico o valor manteve-se. O sistema de comunicação mecânico para controlo do diagrama de radiação apresenta valores de perdas de inserção menores que o sistema de comunicação eletrónico, mas é um sistema mais complexo de implementar. O sistema eletrónico utilizou várias antenas, mas não necessita de um sistema rotativo.

5.2 Trabalhos futuros

Ao longo deste trabalho verificou-se que existem alguns pontos que podem ser melhorados para cada sistema de comunicação de controlo do diagrama de radiação, assim como diversas medições que podem ser realizadas para verificar o funcionamento dos sistemas em outros ambientes. Dentro destes pode-se referir:

- Implementar os sistemas de controlo mecânico e eletrónico com o Xbee para implementação das redes sensores sem fios com controlo do diagrama de radiação.
- Realizar medições em outros locais como, por exemplo, no meio urbano e meios interiores.
- Realizar medições com o sistema de comunicação mecânico de modo a colocar em funcionamento duas antenas ligadas ao mesmo tempo.

6 Bibliografia

- [1] Sizum, H., *Radio Wave Propagation for Telecommunication Applications*. 1ª ed., Paris: Springer, ISBN 3-540-40758-8, 2016.
- [2] Seybold, J. S., *Introduction to RF propagation*. 1ª ed., New Jersey: Wiley-Interscience, 2005.
- [3] http://www.antd.nist.gov/wctg/manet/calcmmodels_dstlr.pdf, [Online], consultado Setembro 2015.
- [4] <http://coral.ufsm.br/gpscom/professores/Renato%20Machado/Telefonia/Telcelular06Renato.pdf> [Online], consultado Agosto de 2016.
- [5] Nascimento, A., *Noções Básicas da Propagação*. Apontamentos da cadeira: Comunicações Moveis e Sem Fios, CCCEE, Univ. da Madeira, Funchal, 2014.
- [6] De Sousa, T. A. P., *Efeito do Ganho da Antena nas Perdas de Percurso de uma ligação*, Dissertação de Mestrado Universidade da Madeira, 2011.
- [7] Seville, A. e Craig, K. H., "Semi-empirical model for millimeter-wave vegetation. attenuation rates", *Elect Let.*, Vol. 31 (17), pag 1507-1508, 1995.
- [8] Azevedo, J. A. R. and Santos, F. E. S., "Propagação em ambientes florestais", Universidade da Madeira, Portugal, 2008.
- [9] Lee, Y. S. e Meng, Y.H., "Investigations of Foliage Effect on Modern Wireless Communication Systems: A Review", *Progress In Electromagnetism Research*, Vol. 105, Singapore, 2010.
- [10] http://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/5069/5069_4.PDF, [Online], consultado Setembro 2015.
- [11] <http://www.microwaves101.com/encyclopedias/high-pass-low-pass-phase-shifters>, [Online], consultado Setembro 2015.
- [12] Skolnik, M. I., *Introduction to Radar Systems*. 2ª ed, International Edition, 2008.
- [13] Vargas, A. C., "Matriz de Butler com 16 puertos" [Online], consultado Setembro 2015.
- [14] https://en.wikipedia.org/wiki/Power_dividers_and_directional_couplers, [Online], consultado Setembro 2015.
- [15] Agrela, J. M. G., *Circuitos de Alimentação para Agrupamentos de Antenas*, Dissertação de Mestrado Universidade da Madeira, 2011.

[16] Pozar, D. M., *Microwave Engineerin*, 2^a ed., Nova Iorque: John Wiley & Sons, 1998.

[17]http://shodhganga.inflibnet.ac.in/bitstream/10603/13422/9/09_chapter%204.pdf, [Online], consultado Setembro 2015.

[18] <http://www.jpier.org/PIER/pier140/14.13042906.pdf>, [Online], consultado em Agosto de 2016.

[19] http://www.compsource.com/pdfs/pdf_new/34626_new.pdf, [Online], consultado em Agosto de 2016.

[20]https://cdn.rohdeschwarz.com/pws/dl_downloads/dl_application/application_notes/1ma171/1MA171_10e_Instruments_in_MATLAB.pdf, consultado em Setembro de 2015.

[21] Todo Robot, "Tutorial sobre Motores Passo a Passo." *www.todorobot.com.ar*. [Online], <http://www.todorobot.com.ar/informacion/tutorial%20stepper/steppertutorial.htm>, consultado em Agosto de 2016.

[22] <http://www.farnell.com/datasheets/95973.pdf>, [Online], consultado em Agosto de 2016.

[23]<http://www.ppgel.ufsj.edu.br/uaisoccer/downloads/1272062510.pdf>, [Online], consultado em Agosto de 2016.

[24] <https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardFio>, [Online], consultado em Agosto de 2016.

[25][file:///C:/Users/Vanessa%20Nascimento/Downloads/A4988Datasheet%20\(\).pdf](file:///C:/Users/Vanessa%20Nascimento/Downloads/A4988Datasheet%20().pdf), [Online], consultado em Agosto de 2016.

[26] <http://www.recom-power.com/pdf/Innoline/R-78xx-0.5.pdf>, consultado em Agosto de 2016.

[27] Ascensão, B e Azevedo, J., 4 Antenas suspensas com pista suspensa de 50 Ohm a 5mm, Relatório da unidade curricular Comunicações de Via Rádio, 2015.

[28] Chang, K., *RF and Microwave Wireless Systems*, Norwood, Nova Iorque, John Wiley & Sons Inc, 2000.

[29] Pozar, D., *Microwave Engineering*, 4^a edição, John Wiley & Sons Inc, 2011.

[30] Vendelin, G., Pavio, A., Rohde, U., *Microwave circuit design using linear and nonlinear techniques*, 2^a edição, Nova Jersey, John Wiley & Sons Inc, 2005.

[31][http://docs.google.com/viewer?url=http%3A%2F%2Fdatasheet.iic.cc%2F Infineon technologies%2FBAT64-02W_H6327.pdf](http://docs.google.com/viewer?url=http%3A%2F%2Fdatasheet.iic.cc%2F Infineon%2FBAT64-02W_H6327.pdf), consultado em Agosto de 2016.

[32]Mailloux, R., *Phased Array Antenna Handbook*, 2ª edição, Norwood, Artech House Inc, 2005.

[33] V. Kaper, R. Thompson, T. Prunty, and J.R. Shealy, “Monolithic AlGaIn/GaN HEMT SPDT switch”, Symp. A Q. J. Mod Foreign Lit., no. 2, pp 83-86, 2004.

[34] Ehyaie, D., *Novel Approaches to the Design of Phased Array Antennas*, Dissertação de Doutorado, Universidade do Michigan, Michigan – Estados Unidos da América, 2011.

[35]http://www.farnell.com/datasheets/1483549.pdf?_ga=1.210082325.1876861712.1472036539, consultado em Agosto de 2016.

[36] Backstrom, A. e Agesjo, M., Design and implementation of a 5 GHz radio front-end module, Department of Science and Technology – Linkopings university, Suécia.

7 Anexos

Anexo A Código implementado no microcontrolador para controlar a velocidade do servo motor

```
// Sweep
// by BARRAGAN <http://barraganstudio.com>
// This example code is in the public domain.

#include <Servo.h>

Servo myservo; // create servo object to control a servo
               // a maximum of eight servo objects can be created
volatile char inCmd = 'p';
volatile char inSpd = '1';
volatile char inCmdAnt = 'p';
volatile int passo = 98;
volatile int pulseCount = 0;
volatile int pulseState = 0;
volatile int oldPulseState = 0;
unsigned long timet;
unsigned long timetold;
int period = 0;
int cicles = 0;
unsigned long periodtotal=0;

int pos = 0; // variable to store the servo position
int contact = 0;
void setup()
{
  myservo.attach(9); // attaches the servo on pin 9 to the servo
  object
  myservo.detach();
  // initialize serial:
  Serial.begin(9600);

  myservo.write(100);

  pinMode(4, INPUT); // set pin to input
  digitalWrite(4, HIGH); // turn on pullup resistors
  //attachInterrupt(0, changerot, FALLING);
  //attachInterrupt(1, countTicks, FALLING);
  interrupts();
  pulseCount=0;
}
void countTicks ()
{
  //noInterrupts();
  if(pulseState == 0){
    delay(10);
    pulseState = 1;
  }else{
    pulseState = 0;
    delay(10);
  }//pulseCounter
  pulseCount++;
}
```

```

}
void changerot ()
{
    delay(50);
    //noInterrupts();
    if(inCmd == 'i'){
        inCmd = inCmdAnt;
    }else {
        inCmdAnt =inCmd;
        inCmd='i';
    }
}
void loop()
{
    if(passo > 110){
        contact=digitalRead(4);
        if (contact == HIGH) {
            if(pulseState == 0){
                delay(5);
                pulseState = 1;

                pulseCount++;
                timet = millis();
                period = timet-timetold;
                timetold = timet;
                // Serial.print(pulseCount);
                //Serial.print(" ");
                Serial.println(timet);

                periodtotal = period+periodtotal;
                cicles = cicles+1;
                if(cicles == 20){
                    if(periodtotal < 1972){ // 1000 ms = 100ms*10 tracos
                        // passo = passo+1;
                        digitalWrite(13,HIGH);
                    }else{
                        // passo = passo-1;
                        digitalWrite(13,LOW);
                    }
                }
                cicles = 0;
                periodtotal=0;
            }
        }
    }
    if (contact == LOW) {
        delay(5);
        pulseState = 0;
    }
    if(passo < 1450){
        passo = 1450;
    }
    if(passo > 1650){
        passo = 1650;
    }
    }
myservo.write(passo);

    //delay(200);
    //Serial.println(periodtotal);
}
void serialEvent () {

```

```

inCmdAnt = inCmd;
if (Serial.available()) {
  // get the new byte:
  inCmd = (char)Serial.read();
}
if(inCmd == 'p') // goes from 0 degrees to 180 degrees
{
  // in steps of 1 degree
  myservo.detach();
  passo = 99; // tell servo to go to position in
variable 'pos'
}
if(inCmd == '1'){
  myservo.attach(9);
  passo = 98;
}
if(inCmd == '2'){
  myservo.attach(9);
  passo = 97;
}
if(inCmd == '3'){
  myservo.attach(9);
  passo = 96;
}
if(inCmd == '4'){
  myservo.attach(9);
  passo = 95;
}
if(inCmd == '5'){
  myservo.attach(9);
  passo = 94;
}
if(inCmd == '6'){
  myservo.attach(9);
  passo = 92;
}
if(inCmd == '7'){
  myservo.attach(9);
  passo = 83;
}
if(inCmd == '8'){
  myservo.attach(9);
  passo = 76;
}
if(inCmd == 'e'){
  stage_reset_millis(0);
  pulseCount=0;
  myservo.attach(9);
  passo = 1575;
}
if(inCmd == 'd'){
  myservo.attach(9);
  passo = 110;
}
}
void stage_reset_millis(unsigned long offset)
{
  extern volatile unsigned long timer0_millis, timer0_overflow_count;
  noInterrupts();
  timer0_millis = timer0_overflow_count = -offset;
  interrupts();
}

```

Anexo B Código implementado em ambiente MatLab para a medição do diagrama de radiação

```
function varargout = Programainterface(varargin)

gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',       mfilename, ...
                  'gui_Singleton',   gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn',  @Programainterface_OpeningFcn,
                  ...
                  'gui_OutputFcn',   @Programainterface_OutputFcn, ...
                  'gui_LayoutFcn',   [] , ...
                  'gui_Callback',    []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargin
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
% End initialization code - DO NOT EDIT
% --- Executes just before Programainterface is made visible.
function Programainterface_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles,
varargin)
global add;
% This function has no output args, see OutputFcn.
% hObject    handle to figure
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
% varargin   command line arguments to Programainterface (see
VARARGIN)

% Choose default command line output for Programainterface
handles.output = hObject;

% Update handles structure
guidata(hObject, handles);

% UIWAIT makes Programainterface wait for user response (see UIRESUME)
% uiwait(handles.figure1);

% --- Outputs from this function are returned to the command line.
function varargout = Programainterface_OutputFcn(hObject, eventdata,
handles)
% varargout  cell array for returning output args (see VARARGOUT);
% hObject    handle to figure
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Get default command line output from handles structure
varargout{1} = handles.output;

% --- Executes on button press in botaostart.
function botaostart_Callback(hObject, eventdata, handles)

global add;
global matriz;
```

```

global groupObj;

%comunica com o ardui no
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

s = serial('COM7');
juan=0
if(s.Status == 'closed')
    fopen(s);
    pause(10);
end
fwrite(s,'e');
pause(1)

pontos = 350;
%for a=1:angulo;
soma=0;
media=0;
ij = 0;

    for b=1:pontos;
        % if (b == 1)
            %matriz (b,1) = 1;
            % msgbox('clickme')
        % else
            %matriz (add,b) = b;
            [A,B] = invoke(groupObj, 'querymarker', 1,1);
            matriz (b,1) = B;

while s.BytesAvailable
    ij=ij+1;
    posicao{ij} = fgets(s);
    %posicaoon{ij} =str2num(posicao{ij});
end

        % soma=soma+B;
        %end
    end

        %add=add+1;
%media=soma/20;
assignin('base','Matriz',matriz)
%assignin('base','media',media)

%alterar nome a cada medição
csvwrite('matriz.csv',matriz);
%dlmwrite('medicoesdistancia2.csv',media,'delimiter',' ','-append');

fwrite(s,'p');

while s.BytesAvailable
    ij=ij+1;
    posicao{ij} = fgets(s);
    %posicaoon{ij} =str2num(posicao{ij});
end
fclose(s);
assignin('base','posicaoon',posicao)

juan=1

%dlmwrite('matiz.csv',matriz,'delimiter',' ','-append');

```

```

% hObject    handle to botaostart (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% --- Executes on button press in botaoadiciona.
function botaoadiciona_Callback(hObject, eventdata, handles)
juan=0
global add;
global matriz;
global deviceObj;

global groupObj;

deviceObj = icdevice('matlab_rsspecan_driver.mdd',
'TCPIP::172.16.10.10::INSTR');

% Connect device object to hardware.
connect(deviceObj);

% Execute device object function(s).
%devicereset(deviceObj);
groupObj = get(deviceObj,
'Configurationcommonmeasurementsettingsfrequencyandspan');
groupObj = groupObj(1);
invoke(groupObj, 'configurefrequencycenterspan',
1,2420000000,1000000);

groupObj = get(deviceObj,
'Configurationcommonanalysisanddisplaymarker');
groupObj = groupObj(1);
invoke(groupObj, 'movemarker', 1,1,2420000000);
juan=1
%Disp('your message');
% hObject    handle to botaoadiciona (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% --- Executes on button press in pushbutton3.
function pushbutton3_Callback(hObject, eventdata, handles)
global deviceObj;
juan=0
% hObject    handle to pushbutton3 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
% Disconnect device object from hardware.

disconnect(deviceObj);

% Delete object
delete(deviceObj);
juan=1

```

Anexo C Código implementado em ambiente MatLab para definir às escalas dos diagramas de radiação

```

%*****
***
%       polar_dB(theta,rho,rmin,rmax,rticks,line_style)
%*****
***
%   POLAR_DB is a MATLAB function that plots 2-D patterns in
%   polar coordinates where:
%       0      <= THETA (in degrees) <= 360
%       -infinity <  RHO  (in dB)      < +infinity
%
%   Input Parameters Description
%   -----
%   - theta (in degrees) must be a row vector from 0 to 360 degrees
%   - rho (in dB) must be a row vector
%   - rmin (in dB) sets the minimum limit of the plot (e.g., -60 dB)
%   - rmax (in dB) sets the maximum limit of the plot (e.g., 0 dB)
%   - rticks is the # of radial ticks (or circles) desired. (e.g., 4)
%   - linestyle is solid (e.g., '-') or dashed (e.g., '--')
%*****
****
%   Credits:
%       S. Bellofiore
%       S. Georgakopoulos
%       A. C. Polycarpou
%       C. Wangsvick
%       C. Bishop
%
%   Tabulate your data accordingly, and call polar_dB to provide the
%   2-D polar plot
%
%   Note: This function is different from the polar.m (provided by
%         MATLAB) because RHO is given in dB, and it can be negative
%-----
-----

function hpol = polar_dB(theta,rho,rmin,rmax,rticks,line_style)

% Convert degrees into radians
theta = theta * pi/180;

% Font size, font style and line width parameters
font_size = 16;
font_name = 'Times';
line_width = 1.5;

if nargin < 5
    error('Requires 5 or 6 input arguments.')
elseif nargin == 5
    if isstr(rho)
        line_style = rho;
        rho = theta;
        [mr,nr] = size(rho);
        if mr == 1
            theta = 1:nr;
        else
            th = (1:mr)';

```



```

        end
    end

% define a circle
    th = 0:pi/50:2*pi;
    xunit = cos(th);
    yunit = sin(th);
% now really force points on x/y axes to lie on them exactly
    inds = [1:(length(th)-1)/4:length(th)];
    xunits(inds(2:2:4)) = zeros(2,1);
    yunits(inds(1:2:5)) = zeros(3,1);

    rinc = (rmax-rmin)/rticks;

% label r
% change the following line so that the unit circle is not
multiplied
% by a negative number. Ditto for the text locations.
    for i=(rmin+rinc):rinc:rmax
        is = i - rmin;
        plot(xunit*is,yunit*is,'-','color',tc,'linewidth',0.5);
        text(0,is+rinc/20,[' '
num2str(i)],'verticalalignment','bottom' );
    end
% plot spokes
    th = (1:6)*2*pi/12;
    cst = cos(th); snt = sin(th);
    cs = [-cst; cst];
    sn = [-snt; snt];
    plot((rmax-rmin)*cs,(rmax-rmin)*sn,'-
','color',tc,'linewidth',0.5);

% plot the ticks
    george=(rmax-rmin)/30; % Length of the ticks
    th2 = (0:36)*2*pi/72;
    cst2 = cos(th2); snt2 = sin(th2);
    cs2 = [(rmax-rmin-george)*cst2; (rmax-rmin)*cst2];
    sn2 = [(rmax-rmin-george)*snt2; (rmax-rmin)*snt2];
    plot(cs2,sn2,'-','color',tc,'linewidth',0.15); % 0.5
    plot(-cs2,-sn2,'-','color',tc,'linewidth',0.15); % 0.5

% annotate spokes in degrees
% Changed the next line to make the spokes long enough
    rt = 1.1*(rmax-rmin);
    for i = 1:max(size(th))
        text(rt*cst(i),rt*snt(i),int2str(abs(i*30-
90)), 'horizontalalignment','center' );
        if i == max(size(th))
            loc = int2str(90);
        elseif i*30+90<=0
            loc = int2str(270-(i*30+90));
        else
            loc = int2str(180-(i*30+90-180));
        end
        text(-rt*cst(i),-rt*snt(i),loc,'horizontalalignment','center'
);
    end
% set view to 2-D
    view(0,90);

```

```

% set axis limits
% Changed the next line to scale things properly
axis((rmax-rmin)*[-1 1 -1.1 1.1]);
end

% Reset defaults.
set(cax, 'DefaultTextFontAngle', fAngle , ...
'DefaultTextFontName', font_name, ...
'DefaultTextFontSize', fSize, ...
'DefaultTextFontWeight', fWeight );

% transform data to Cartesian coordinates.
% changed the next line so negative rho are not plotted on the other
side

for i = 1:length(rho)
    if (rho(i) > rmin)
        if theta(i)*180/pi >=0 & theta(i)*180/pi <=90
            xx(i) = (rho(i)-rmin)*cos(pi/2-theta(i));
            yy(i) = (rho(i)-rmin)*sin(pi/2-theta(i));
        elseif theta(i)*180/pi >=90
            xx(i) = (rho(i)-rmin)*cos(-theta(i)+pi/2);
            yy(i) = (rho(i)-rmin)*sin(-theta(i)+pi/2);
        elseif theta(i)*180/pi < 0
            xx(i) = (rho(i)-rmin)*cos(abs(theta(i))+pi/2);
            yy(i) = (rho(i)-rmin)*sin(abs(theta(i))+pi/2);
        end
    else
        xx(i) = 0;
        yy(i) = 0;
    end
end

% plot data on top of grid
if strcmp(line_style,'auto')
    q = plot(xx,yy);
else
    q = plot(xx,yy,line_style);
end
if nargin > 0
    hpol = q;
end
if ~hold_state
    axis('equal');axis('off');
end

set(q,'linewidth',2);

% reset hold state
if ~hold_state, set(cax,'NextPlot',next); end

```

Anexo D Código implementado em ambiente MatLab para desenhar os diagramas de radiação normalizados

```
clear all;
clc;

% tempo de corrido
tempo=[];
amostras=[];
%Normalização
amostras = (amostras+4.9);
%Compensação
Graus_para_compensar=6;
graus_por_amostras=360/(length(amostras));
compensacao=round(Graus_para_compensar/graus_por_amostras);
%
amostras = [ amostras ((length(amostras)-compensacao):length(amostras))
amostras (1:length(amostras)-(compensacao+1))]
% Dados
% 163407 ms de tempo de volta
camostras = length(amostras);
graus_simples = [0: 360/camostras:360-360/camostras];
tempo_por_amostra =[0:
tempo(length(tempo))/camostras:tempo(length(tempo))-
tempo(length(tempo))/camostras];

% Graus
graus=[0:360/1800:360-360/1800];

p = polyfit(tempo,graus,5);
grauseq =
p(6)+p(5)*tempo+p(4)*tempo.^2+p(3)*tempo.^3+p(2)*tempo.^4+p(1)*tempo.^
5;

%plot(tempo,graus)
%hold on
%plot(tempo,grauseq,'r')

%hold off
%pause
erro=max(abs(graus-grauseq))

graus_complexos =
p(6)+p(5)*tempo_por_amostra+p(4)*tempo_por_amostra.^2+p(3)*tempo_por_a
mostra.^3+p(2)*tempo_por_amostra.^4+p(1)*tempo_por_amostra.^5;

%
graus_simplesrad=degtorad(graus_simples);
graus_complexosrad=degtorad(graus_complexos);
%ymax=max(abs(amostras));
%ymax=100;
%amostras=ymax+amostras;
figure;
%polar(pi, 50);
%hold on;
linha1 =polardB(graus_complexos,amostras,-80,-30,5,'-')
% legend('Biquad')
title('Biquad-20metros-Vegetação2')
hold off;
```

Anexo E Código implementado no microcontrolador para o sistema de comunicação mecânico

```
#include <avr/sleep.h>

// defines pins numbers
const int stepPin = 3;
const int dirPin = 4;
const int buttonPin = 2; // tpino digital do batente

// variables will change:
volatile int dirState = 0; // variable for reading the
pushbutton status
volatile int pinState = 0;
volatile int motorStatus = 1; // 1 rotating 0 Stop

/* Timer2 reload value, globally available */
unsigned int tcnt2;
/* Toggle HIGH or LOW digital write */
int seconds = 10; // Período em segundos
int start = seconds*60;
int counter = 0;
int Sleep= 5;

void setup() {
  // Sets the two pins as Outputs
  pinMode(stepPin,OUTPUT);
  pinMode(dirPin,OUTPUT);

  digitalWrite(dirPin,dirState); // Enables the motor to move in a
  particular direction

  // initialize the pushbutton pin as an input:
  pinMode(buttonPin, INPUT);
  digitalWrite(buttonPin, HIGH);

  // Attach an interrupt to the ISR vector
  attachInterrupt(0, pin_ISR, FALLING);

  pinMode(Sleep, OUTPUT);
  digitalWrite(Sleep, HIGH);

  /* First disable the timer overflow interrupt while we're
  configuring */
  TIMSK2 &= ~(1<<TOIE2);

  /* Configure timer2 in normal mode (pure counting, no PWM etc.) */
  TCCR2A &= ~((1<<WGM21) | (1<<WGM20));
  TCCR2B &= ~(1<<WGM22);

  /* Select clock source: internal I/O clock */
  ASSR &= ~(1<<AS2);

  /* Disable Compare Match A interrupt enable (only want overflow) */
  TIMSK2 &= ~(1<<OCIE2A);
```

```

/* Now configure the prescaler to CPU clock divided by 1024 */
TCCR2B |= (1<<CS22) | (1<<CS21) | (1<<CS20); // Set bits
//TCCR2B &= ~(1<<CS21); // Clear bit

/* We need to calculate a proper value to load the timer counter.
 * The following loads the value 131 into the Timer 2 counter
register
 * The math behind this is:      * (CPU frequency) / (prescaler value)
= 125000 Hz = 8us.
 * (desired period) / 8us = 125.      * MAX(uint8) + 1 - 125 = 131;
 */
/* Save value globally for later reload in ISR */
tcnt2 = 0;

/* Finally load and enable the timer */
TCNT2 = tcnt2;
TIMSK2 |= (1<<TOIE2);

set_sleep_mode(SLEEP_MODE_PWR_SAVE);
sleep_enable();
}

/* * Install the Interrupt Service Routine (ISR) for Timer2
overflow.
 * This is normally done by writing the address of the ISR in the
 * interrupt vector table but conveniently done by using ISR() */
ISR(TIMER2_OVF_vect) {
    /* Reload the timer */
    TCNT2 = tcnt2;
    /* Write to a digital pin so that we can confirm our timer */
    //digitalWrite(2, toggle == 0 ? HIGH : LOW);
    //toggle = ~toggle;
    counter++;
}

void loop() {

if(counter == start){
    TIMSK2 &= ~(1<<TOIE2);
    delay (100);

    digitalWrite(Sleep, HIGH); // Liga driver
    delay(200); // Espera que acorde

    if(motorStatus){

dirState = 0; //Roda no sentido contrario aos ponteiros
digitalWrite(dirPin, dirState);

for(int x = 0; x < 3200; x++) { //retorna ao zero
    digitalWrite(stepPin,HIGH);
    delayMicroseconds(800);
    digitalWrite(stepPin,LOW);
    delayMicroseconds(800);
    if(!motorStatus) break;
}
}
}
}

```

```

}

dirState = 1; //Roda no sentido dos ponteiros
digitalWrite(dirPin, dirState);
delay (100);
motorStatus = 1;

for(int x = 0; x < 3200; x++) { //3200 uma volta completa
    digitalWrite(stepPin,HIGH);
    delayMicroseconds(800);
    digitalWrite(stepPin,LOW);
    delayMicroseconds(800);
    if(!motorStatus) break;
}

for(int x = 0; x < 140; x++) { //anda mais um pouco de modo a
compensar, para fazer os 360°
    digitalWrite(stepPin,HIGH);
    delayMicroseconds(800);
    digitalWrite(stepPin,LOW);
    delayMicroseconds(800);
}
motorStatus = 1;

dirState = 0; //Roda no sentido contrario aos ponteiros
digitalWrite(dirPin, dirState);

for(int x = 0; x < 3200; x++) { //3200 uma volta completa
    digitalWrite(stepPin,HIGH);
    delayMicroseconds(800);
    digitalWrite(stepPin,LOW);
    delayMicroseconds(800);
    if(!motorStatus) break;
}

dirState = 1; //Roda no sentido dos ponteiros
digitalWrite(dirPin, dirState);
delay (100);
motorStatus = 1;
for(int x = 0; x < 500; x++) { //vai para o angulo pretendido
    digitalWrite(stepPin,HIGH);
    delayMicroseconds(800);
    digitalWrite(stepPin,LOW);
    delayMicroseconds(800);
    if(!motorStatus) break;
}
motorStatus = 1;

delay(2000);
delay(2000);
}

digitalWrite(Sleep, LOW);

counter = 0;
TCNT2 = tcnt2;
TIMSK2 |= (1<<TOIE2);

```

```
    }  
  
    // Sleep  
    sleep_enable();  
    sleep_mode();  
    sleep_disable();  
}  
  
void pin_ISR() {  
    cli();  
    delay(100);  
    pinState = digitalRead(buttonPin);  
    if(!pinState){  
        motorStatus = 0;  
    }  
}
```

Anexo F Código implementado no microcontrolador para o sistema de comunicação mecânico

```
#define pin1 2
#define pin2 3
#define pin3 4
#define pin4 5
volatile char inCmd = '1';

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  pinMode(pin1, OUTPUT);
  pinMode(pin2, OUTPUT);
  pinMode(pin3, OUTPUT);
  pinMode(pin4, OUTPUT);
}

void loop() {

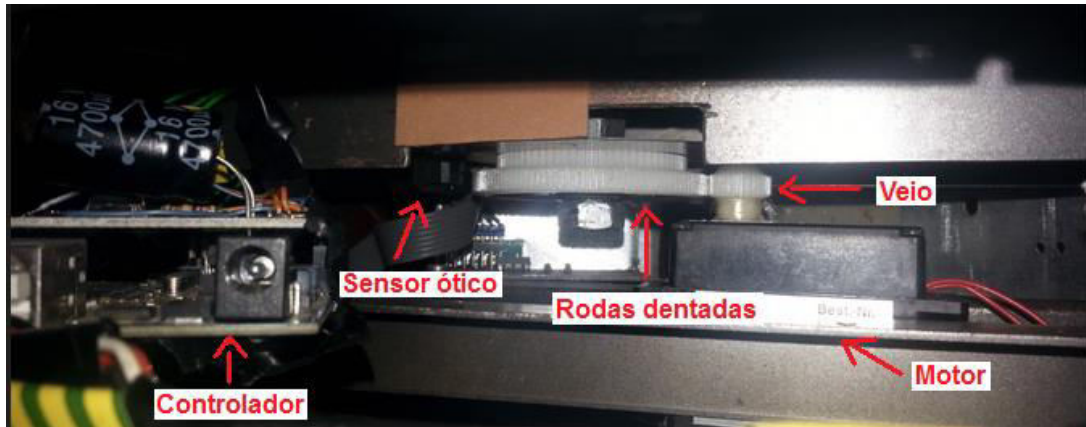
  if (Serial.available()) {
    // get the new byte:
    inCmd = (char)Serial.read();
  }
  if (inCmd == '1'){
    digitalWrite(pin1, HIGH);
    digitalWrite(pin2, LOW);
    digitalWrite(pin3, LOW);
    digitalWrite(pin4, LOW);
  }
  //delay(10000);
  if (inCmd == '2'){
    digitalWrite(pin1, LOW);
    digitalWrite(pin2, HIGH);
    digitalWrite(pin3, LOW);
    digitalWrite(pin4, LOW);
  }
  //delay(10000);

  if (inCmd == '3'){
    digitalWrite(pin1, LOW);
    digitalWrite(pin2, LOW);
    digitalWrite(pin3, HIGH);
    digitalWrite(pin4, LOW);
  }
  //delay(10000);

  if (inCmd == '4'){
    digitalWrite(pin1, LOW);
    digitalWrite(pin2, LOW);
    digitalWrite(pin3, LOW);
    digitalWrite(pin4, HIGH);
  }
  //delay(10000);
}
```

Anexo G Sistema de medição implementado para obtenção dos diagramas de radiação

Constituição interna do sistema de medição dos diagramas de radiação



Sistema de medição dos diagramas de radiação.



Anexo H Diagramas de radiação obtidos manualmente na câmara anecoica.

Diagrama manual Monopolo

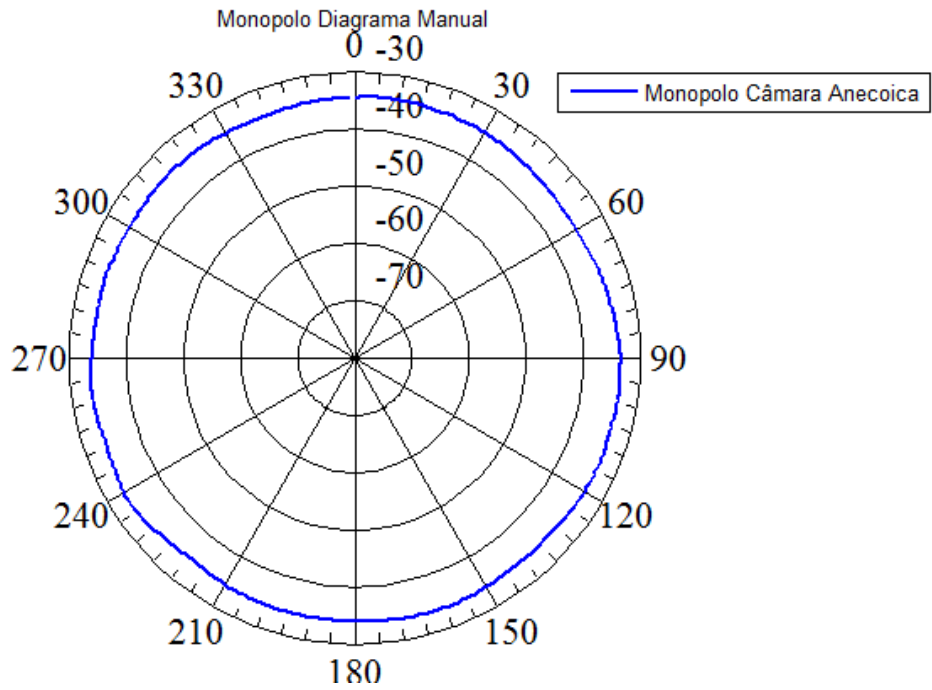


Diagrama manual Painel

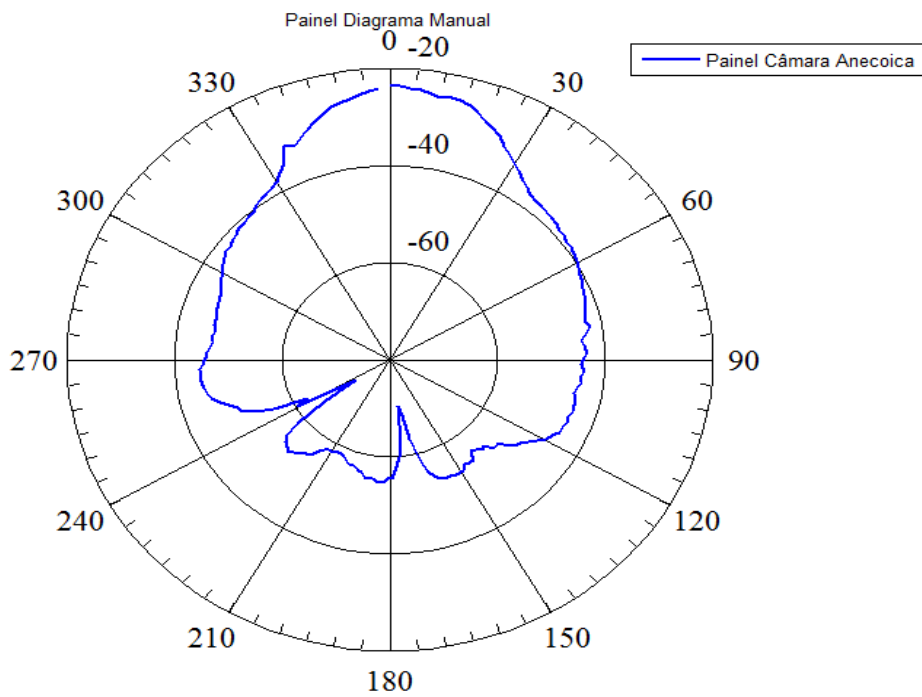


Diagrama manual Suspensa

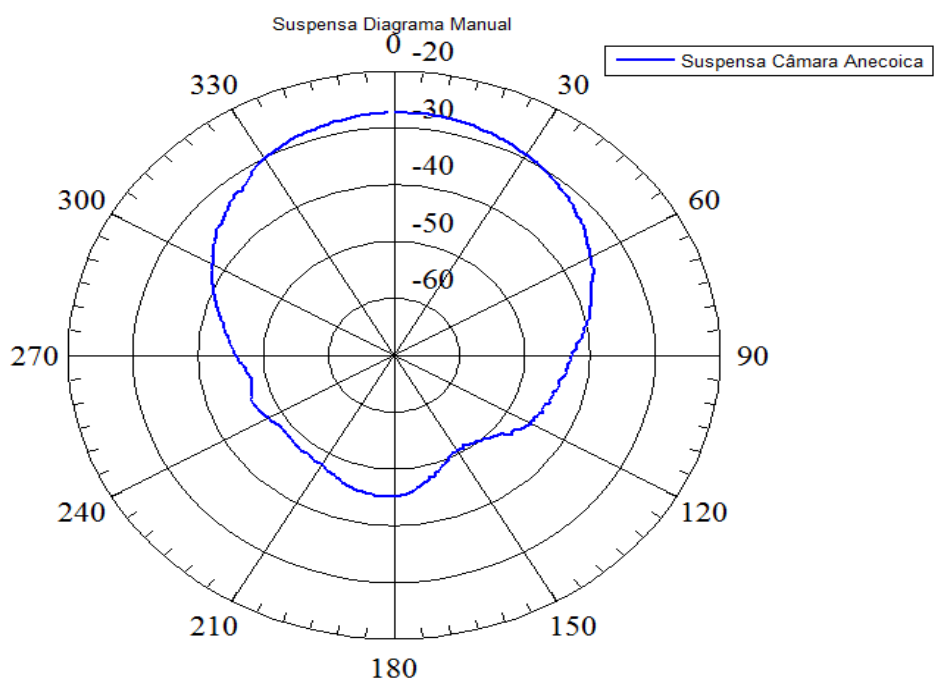
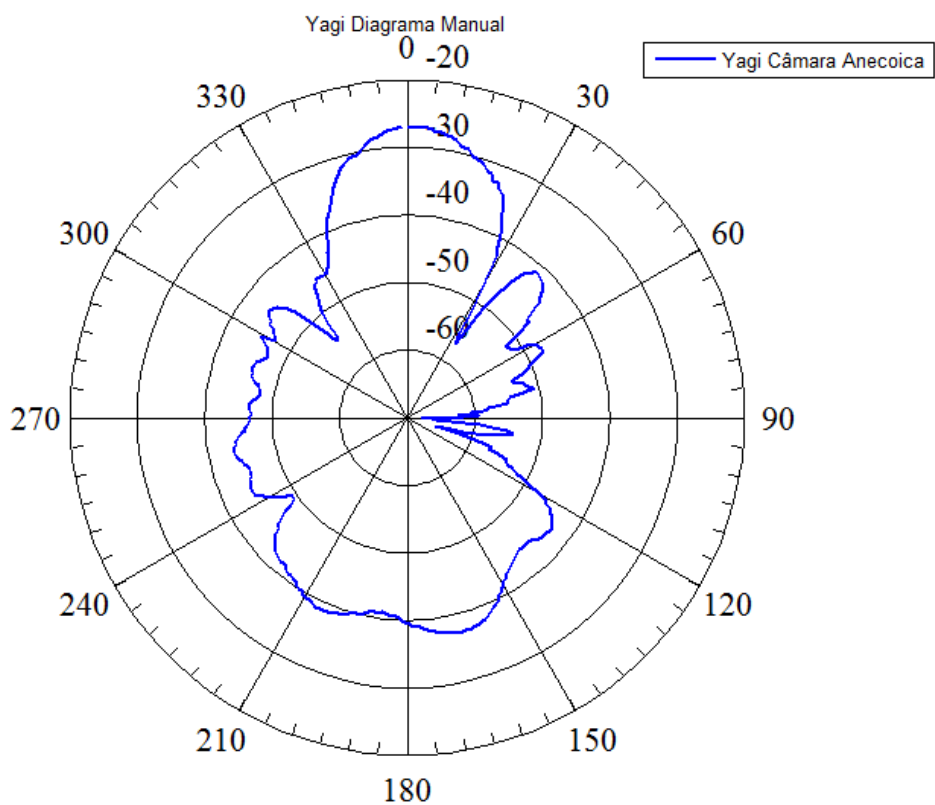


Diagrama manual Yagi



Anexo I Diagramas de radiação obtidos no interior da Universidade da madeira entre o corredor e o laboratório.

Esquemático da localização das antenas no corredor e dentro do laboratório.

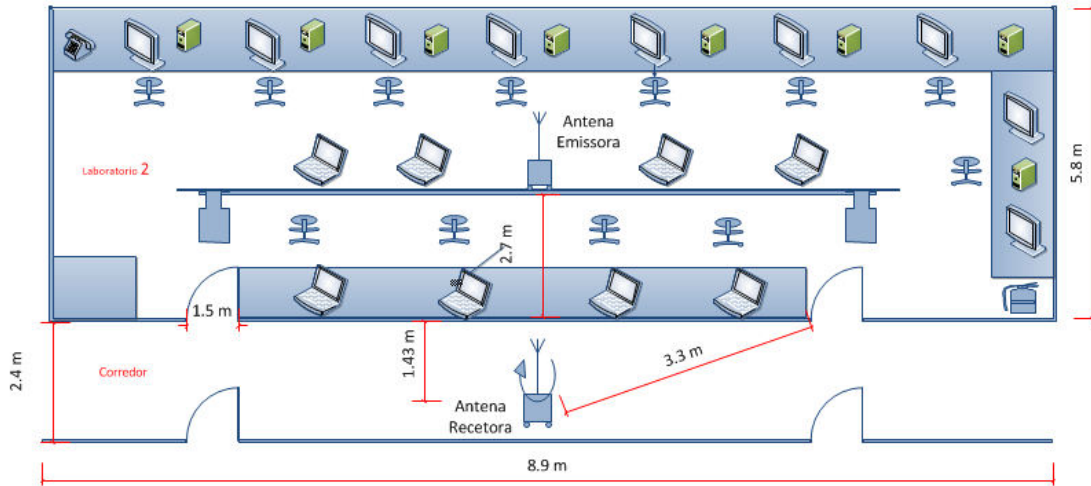


Diagrama da antena Biquad no interior utilizando à antena monopolo como antena emissora.

