

DM

Extração de Dados da Direção do Vento a partir de Radar HF

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Rui Ricardo Almeida Vieira

MESTRADO EM ENGENHARIA ELETROTÉCNICA - TELECOMUNICAÇÕES



UNIVERSIDADE da MADEIRA

A Nossa Universidade

www.uma.pt

setembro | 2019

Extração de Dados da Direção do Vento a partir de Radar HF

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Rui Ricardo Almeida Vieira

MESTRADO EM ENGENHARIA ELETROTÉCNICA - TELECOMUNICAÇÕES

ORIENTAÇÃO

Tiago Hipkin Meireles

Joaquim Amândio Rodrigues Azevedo

RESUMO

O elevado interesse nas condições ambientais e a necessidade de observar o estado do mar e da atmosfera proporciona a utilização de sistemas de radar de alta frequência (HF), capazes de monitorizar grandes áreas costeiras.

Durante uma fase experimental em 2017/18, fizeram-se medições da superfície do oceano por duas estações de radar de alta frequência (13,5 MHz) da CODAR *SeaSonde*, pelo Projeto Observatório Oceânico da Madeira.

O objetivo deste trabalho consiste em utilizar os dados obtidos por este sistema de radar HF para extrair a direção dos ventos de superfície na zona costeira da Madeira.

Descreve-se o funcionamento destes sistemas e como estes respondem às ondas do mar, identificam-se as diferenças entre os vários sistemas operacionais e caracterizam-se mais detalhadamente os sistemas da CODAR.

Efetua-se um estudo sobre como extrair a informação da direção do vento a partir de um radar HF, onde são analisadas diversas abordagens.

Aplicam-se diferentes abordagens para obter a direção do vento, derivada da razão das linhas de *Bragg* do eco do mar, e comparam-se os resultados provenientes desses métodos com os dados de satélite e do modelo numérico *Weather Research and Forecasting* (WRF).

Os algoritmos utilizados que são baseados na relação dos picos de *Bragg* não permitem determinar a velocidade do vento. Para isso, teríamos de ter dados de outros sistemas de radar, como por exemplo, os de multi-frequência (MCR) e recorrer a modelos mais complexos.

Neste trabalho apresentam-se resultados do mapeamento da direção do vento em dois períodos de maior intensidade na costa sul da ilha da Madeira, numa distância até aproximadamente 57 km (35 milhas náuticas) da costa.

É demonstrado que é possível extrair a informação dos ventos de superfície do oceano a partir dos sistemas de radar HF, numa vasta área, com possibilidade de adquirir informação em tempo real com registos horários.

Palavras-chave: radar HF; medições da direção do vento; CODAR *SeaSonde*; deteção remota;

ABSTRACT

The concern about environmental conditions and the need to observe the state of the sea and weather leads to the use of High Frequency (HF) radar system capable of monitoring large coastal areas.

During an experimental phase in 2017/18, ocean surface measurements were taken by two CODAR SeaSonde high frequency (13,5 MHz) radar stations by the Madeira Ocean Observatory Project.

The objective of this work is to extract the direction of sea surface winds with the use of the data obtained by this HF radar system.

This work describes how HF radar systems work, how they respond to sea waves, identifies the differences between operating systems, and analyses the CODAR systems in more detail.

Different approaches are used to obtain the wind direction derived from the Bragg line ratio of the sea echo, and compare the results with satellite data and the Weather Research and Forecasting (WRF) numerical model.

The algorithms used, which are based on the ratio of Bragg peaks, cannot detect wind speed.

This work presents results of the wind direction mapping in two periods of greater intensity on the south coast of Madeira, at a distance of approximately 57 km (35 nautic miles) from the coast.

It is demonstrated that it is possible to extract information from ocean surface winds from HF radar systems over a wide area, with the possibility of acquiring real-time information with hourly records.

Keywords: HF radar; wind direction measurements; CODE SeaSonde; remote sensing;

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Professor Tiago Hipkin Meireles, por ter aceitado este desafio e proporcionado a realização deste projeto com sucesso, com a sua formidável dedicação, empenho, paciência, motivação e conhecimento.

Ao meu co-orientador, Professor Joaquim Amândio Rodrigues Azevedo, pelas suas fantásticas e sempre oportunas intervenções, por todo o apoio, suporte e disponibilidade.

Ao Diretor do Observatório Oceânico da Madeira, Doutor Rui Miguel Andrade Caldeira, por ter promovido a realização deste projeto. Igualmente à participação do Observatório Oceânico da Madeira, a todo o grupo de oceanografia, nomeadamente, ao Dr. Jesus Costa Reis, pela sua disponibilidade e colaboração.

À *Qualitas Instruments*, respetivamente ao Engenheiro Pedro Agostinho, por nos ter possibilitado o acesso aos dados do sistema de radares, assim como pela sua disponibilidade e contribuição.

À minha esposa e filho, pelas horas em que não lhes pude dar a devida atenção, mas também pela compreensão e força que me deram ao longo da realização deste trabalho e vida académica.

Ao meu falecido pai, que sempre teve o sonho de me ver com um curso em engenharia. E à minha mãe, pelo seu ânimo e encorajamento, que fez sempre questão em saber se estava a correr bem cada etapa do trabalho.

Aos meus irmãos e família, amigos e a todos que contribuíram, direta ou indiretamente, nesta caminhada.

ÍNDICE

Resumo	i
Abstract.....	iii
Agradecimentos.....	v
Índice	vii
Índice de figuras.....	xi
Índice de tabelas.....	xvii
Lista de acrónimos.....	xix
1 Introdução	1
1.1 Motivação	1
1.2 Objetivos	2
1.3 Organização do relatório	3
2 Revisão do estado da arte	5
2.1 Visão geral.....	5
2.2 Transmissão de sinais HF	6
2.3 Operações do radar HF	9
2.3.1 Cálculo da distância.....	9
2.3.2 Cálculo da velocidade.....	10
2.3.3 Cálculo da direção	10
2.4 Ondas HF dispersadas pelo mar	12
2.4.1 Espectro do sinal recebido do radar HF.....	16
2.5 Sistemas operacionais	21
2.5.1 CODAR - <i>Coastal Ocean Dynamics Applications Radar</i>	21
2.5.2 OSCAR - <i>Ocean Surface Current Radar</i>	23
2.5.3 WERA - <i>Wellen Radar</i>	24
2.6 Conclusão.....	25
3 Medições dos parâmetros do oceano e ventos de superfície	27
3.1 Determinação das correntes oceânicas	27

3.2	MUSIC- MUltiple Signal Classification.....	30
3.3	Determinação das ondas do mar	31
3.4	Determinação dos ventos de superfície do oceano	32
3.5	Conclusão	44
4	Radar HF na ilha da Madeira, Projeto OOM	45
4.1	Descrição do sistema	45
4.2	Configuração	47
4.3	Calibração.....	49
4.4	Diagrama de funcionamento	50
4.5	Ferramentas de monitorização e visualização.....	52
4.5.1	<i>SeaSonde Radial Site</i>	53
4.5.2	Plataforma <i>PORTUS</i>	54
4.6	Formato dos ficheiros	55
4.7	Dados para validação	56
4.7.1	Modelo numérico: Weather Research and Forecasting	56
4.7.2	Dados de Satélite do vento: <i>Copernicus Marine Environment Monitoring Service</i>	57
4.8	Conclusão	58
5	Implementação do trabalho	59
5.1	Leitura dos dados do espectro.....	59
5.2	Criação da malha.....	61
5.3	Associação dos dados do espectro aos pontos da malha.....	66
5.4	Extração da direção do vento	68
5.4.1	Vento constante ao longo da radial	69
5.4.2	Vento a variar ao longo da radial	70
5.4.3	Vento constante ao longo da radial com resolução de ambiguidade.....	71
5.4.4	Vento a variar ao longo da radial com resolução de ambiguidade.....	73

5.4.5	Método de <i>Paduan et al.</i> (1999)	73
5.5	Conclusão.....	77
6	Resultados	79
6.1	Relação dos picos de <i>Bragg</i> em função da direção do vento	79
6.2	Escolha do período para análise do vento	81
6.3	Mapeamento da direção do vento	83
6.3.1	Vento constante ao longo da radial	84
6.3.2	Vento a variar ao longo da radial	85
6.3.3	Vento constante ao longo da radial com resolução de ambiguidade.....	86
6.3.4	Vento a variar ao longo da radial com resolução de ambiguidade.....	88
6.3.5	Método de <i>Paduan et al.</i> (1999) para ventos a variar ao longo da radial.....	88
6.3.6	Método baseado em <i>Paduan et al.</i> (1999) para ventos constantes ao longo da radial	89
6.4	Direção do vento ao longo dos dois períodos	92
6.5	Análise estatística do erro e correlação	95
6.6	Direção do vento de uma estação	96
6.7	Discussão dos resultados.....	97
6.8	Conclusão.....	98
7	Conclusões	99
	Referências	101
	Anexo A.....	107
A.1	Ficheiro de dados das correntes radiais (.ruv).....	107
A.2	Ficheiro binário do espectro (.cs)	109
A.3	Ficheiro NetCDF das correntes totais (.nc)	110
	Anexo B	111
B.1	Função para ler os ficheiros espectrais.....	111

B.2 Função da criação da malha	113
B.3 Função de associar os pontos do espectro aos pontos da malha	114
B.4 Função de extrair direção do vento constante ao longo do radial	115
B.5 Função de extrair direção do vento a variar ao longo do radial	116
B.6 Função de extrair direção do vento constante ao longo do radial com resolução de ambiguidade	117
B.7 Função de extrair direção do vento a variar ao longo do radial com resolução de ambiguidade	119
B.8 Função de extrair direção do vento pelo método de <i>Paduan et al.</i> (1999)	121
B.9 Função de extrair direção do vento constante ao longo da radial com base no método de <i>Paduan et al.</i> (1999).....	125
B.10 Funções intermédias	129
Anexo C	131
C.1 Cálculo da interseção de dois círculos.....	131
C.2 Cálculo do ângulo radial no mesmo referencial.....	132
C.3 Cálculo dos quatro pares de soluções.....	134
Anexo D	141
D.1 Mapeamento da direção do vento a variar ao longo da radial	141
D.2 Mapeamento da direção do vento a variar ao longo da radial com resolução de ambiguidade	141
D.3 Métricas do erro e correlação.....	143
D.4 Análise dos resultados entre as duas estações.....	143

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Um sistema de observação costeiro. Radares HF à direita [3].....	6
Figura 2: Espectro eletromagnético com a representação da banda HF relativa às outras gamas de onda [1].....	7
Figura 3: Aspeto da forma de onda para um sistema de radar utilizando um código de 11 elementos de <i>Barker</i> [2].....	8
Figura 4: Representação de sinais transmitidos e recebidos de um sistema FMCW [2].....	9
Figura 5: O princípio básico de estimativa da direção de chegada de um eco com referência à linha que une as antenas recetoras [6].....	11
Figura 6: Forma cicloidal das ondas do mar geradas pelo movimento circular da água [7].....	13
Figura 7: Exemplificação do processo de criação de “ <i>swell</i> ” por tempestades distantes [8].....	13
Figura 8: Padrão de interferência mista com a sobreposição de diferentes agrupamentos de onda [8].....	14
Figura 9: Transporte e espiral de <i>Ekman</i> [8].....	15
Figura 10: Ilustração do desvio de <i>Doppler</i> do espectro do eco do mar de um radar HF [6].....	17
Figura 11: Retrodispersão da ondulação do mar quando o comprimento é igual à metade do comprimento de onda [11].....	18
Figura 12: A ressonância de <i>Bragg</i> ocorre quando a diferença de caminho entre o eco de duas cristas é um múltiplo de $\lambda/2$ [7].....	18
Figura 13: Potência típica do espectro de <i>Doppler</i> registado aos 8 MHz [7]..	20
Figura 14: Espectro do sinal recebido, apresentando os picos de <i>Bragg</i> e os retornos de segunda ordem [1].....	20
Figura 15: Representação idealizada de uma antena recetora da SeaSonde [12].....	22
Figura 16: Configuração típica de um sistema OSCAR [6].....	24
Figura 17: Ilustração esquemática do radar indicada pelo círculo e de duas células de alcance de radar [15].....	29
Figura 18: Combinação de vetores de correntes radiais (v_1, v_2) medidos a partir de dois locais de radar A, B no ponto P [16].....	29

Figura 19: Espectro típico da frequência de <i>Doppler</i> . Os dois picos mais fortes <i>B-</i> e <i>B+</i> [21].....	32
Figura 20: Amostra da distribuição da energia da onda de superfície em função do ângulo em relação à direção do vento [26].....	36
Figura 21: Direção do vento relativo ao campo de visão do radar para três modelos diferentes, Georges et al., Long e Trizna, e Stewart e Barnum [27].....	38
Figura 22: Pares de soluções (L e R) num ponto de interseção das estações do radar E1 e E2.....	39
Figura 23: Modelo de direção do vento cosseno [30].	41
Figura 24: Biblioteca Municipal de Câmara de Lobos (panorâmico). Antena recetora à esquerda e antena emissora à direita.....	45
Figura 25: Centro de Maricultura da Calheta. Antena recetora à esquerda e antena emissora à direita.....	46
Figura 26: Antena recetora CODAR na estação da Biblioteca Municipal de Câmara de Lobos no lado esquerdo. Interior do <i>Dome</i> com <i>loops</i> cruzados [39] no lado direito.....	46
Figura 27: Bastidor na estação da Biblioteca Municipal de Câmara de Lobos.	47
Figura 28: Definições da estação da Biblioteca Municipal de Câmara de Lobos.	48
Figura 29: Definições de processamento para o espectro, radiais e ondas. .	48
Figura 30: Definições do controlador da SeaSonde.....	49
Figura 31: Percurso efetuado na medição do diagrama de radiação da antena recetora na estação BMCL.....	49
Figura 32: Diagrama de radiação ideal dos <i>loops</i> 1, 2 (esquerda) e monopolo (direita).....	50
Figura 33: Diagrama de funcionamento do sistema de radar da CODAR.....	51
Figura 34: <i>SeaSonde Radial Site</i> para a estação BMCL.	53
Figura 35: Plataforma <i>PORTUS</i> : correntes de superfície na costa sul da ilha da Madeira pelo sistema de radar HF da CODAR.....	54
Figura 36: Plataforma <i>PORTUS</i> : ondulação na costa sul da ilha da Madeira pelo sistema de radar HF da CODAR.....	55
Figura 37: Plataforma <i>PORTUS</i> : direção e altura significativa da onda para um determinado período temporal.....	55
Figura 38: Fluxograma da função para extrair os dados do espectro.....	60
Figura 39: Dados do espectro para uma estação numa determinada data. .	61

Figura 40: Espectro obtido pelo monopolo da estação BMCL para a <i>range cell</i> 15, numa determinada data.....	61
Figura 41: Pontos radiais georreferenciados de cada estação.....	62
Figura 42: Malha da CODAR para apresentação das correntes totais.....	63
Figura 43: Fluxograma da função para obter as coordenadas dos pontos da malha.....	64
Figura 44: <i>Range cell</i> dos 6 km aos 57 km a partir de cada estação.	65
Figura 45: Pontos da malha de interseção dos <i>range cell</i> de cada estação..	65
Figura 46: Variável com os pontos da malha e <i>range cell</i> de cada estação..	66
Figura 47: Fluxograma para associar o espectro das duas estações a cada ponto da malha.....	67
Figura 48: Variável com os pontos da malha e dados do espectro de cada estação.....	67
Figura 49: Lista correspondente aos pontos da malha com os dados do espectro da estação BMCL.....	68
Figura 50: Consideração ao longo da radial em relação a um referencial comum. a) Vento constante. b) Vento a variar.....	69
Figura 51: Fluxograma para extrair a direção do vento.....	69
Figura 52: Variável com os pontos da malha, direção do vento total e de cada estação.....	70
Figura 53: Fluxograma para extrair a direção do vento com resolução de ambiguidade.....	71
Figura 54: Soluções de esquerda e direita de alguns pontos para o mesmo referencial.....	72
Figura 55: Fluxograma para extrair a direção do vento pelo método de 1999.	74
Figura 56: Variável de agrupamento de células, com os índices da lista de pontos geográficos da malha.....	75
Figura 57: Disposição gráfica do agrupamento de células dentro de um raio de 3 km.....	76
Figura 58: Variável com os pontos da malha, direção do vento, ângulos da direção radial, índice dos agrupamentos de células e soluções de esquerda e direita.	77
Figura 59: Relação dos picos de <i>Bragg</i> de <i>range cells</i> 10, 20 e 40 para três meses da estação BMCL.....	79

Figura 60: Relação dos picos de <i>Bragg</i> em função do ângulo da direção do vento a soprar na direção (a), em ângulo reto (b) e na direção oposta (c) do radar. O vetor a azul refere-se ao modelo de <i>Fernandez et al. (1997)</i> e o vetor a vermelho ao modelo de <i>Paduan et al. (1999)</i>	80
Figura 61: 1º Período – Potência média dos picos de <i>Bragg</i> do radar HF (superior) em relação com a intensidade do vento obtida por satélite e modelo WRF (inferior).....	82
Figura 62: 2º Período – Potência média dos picos de <i>Bragg</i> do radar HF (superior) em relação com a intensidade do vento obtida por satélite e modelo WRF (inferior).....	83
Figura 63: Mapeamento da direção do vento para 2017-11-10_1200. Radar HF (ventos constantes) a azul, satélite a vermelho e modelo WRF a preto.....	84
Figura 64: Mapeamento da direção do vento para 2018-02-28_0600. Radar HF (ventos constantes) a azul, satélite a vermelho e modelo WRF a preto.....	85
Figura 65: Mapeamento da direção do vento para 2017-11-10_1200. Radar HF (ventos a variar) a azul, satélite a vermelho e modelo WRF a preto.....	86
Figura 66: Mapeamento da direção do vento para 2017-11-10_1200. Radar HF (ventos constantes, resolução de ambiguidade) a azul, satélite a vermelho e modelo WRF a preto.....	87
Figura 67: Mapeamento da direção do vento para 2018-02-28_0600. Radar HF (ventos constantes, resolução de ambiguidade) a azul, satélite a vermelho e modelo WRF a preto.....	87
Figura 68: Mapeamento da direção do vento para 2017-11-10_1200. Radar HF (método <i>Paduan et al. (1999)</i>) a azul, satélite a vermelho e modelo WRF a preto.	88
Figura 69: Mapeamento da direção do vento para 2018-02-28_0600. Radar HF (método <i>Paduan et al. (1999)</i>) a azul, satélite a vermelho e modelo WRF a preto.	89
Figura 70: Mapeamento da direção do vento para 2017-11-10_1200. Radar HF (ventos constantes, <i>Paduan et al. (1999)</i>) a azul, satélite a vermelho e modelo WRF a preto.....	90
Figura 71: Mapeamento da direção do vento para 2018-02-28_0600. Radar HF (ventos constantes <i>Paduan et al. (1999)</i>) a azul, satélite a vermelho e modelo WRF a preto.....	91

Figura 72: Mapeamento da direção do vento para 2018-02-28_0600 com retificação de células para 6 km. Radar HF (Ventos constantes, <i>Paduan et al. (1999)</i>) a azul, satélite a vermelho e modelo WRF a preto.....	91
Figura 73: Resultados obtidos da direção do vento para o 1º período do ponto 1.....	93
Figura 74: Resultados obtidos da direção do vento para o 1º período do ponto 2.....	93
Figura 75: Resultados obtidos da direção do vento para o 2º período do ponto 1.....	94
Figura 76: Resultados obtidos da direção do vento para o 2º período do ponto 2.....	94

Índice de figuras Anexo A

Figura A.1: Cabeçalho de um ficheiro de corrente radial pela CODAR.....	107
Figura A.2: Seção de dados de um ficheiro de corrente radial pela CODAR (na horizontal).....	108
Figura A.3: Ficheiro binário da CODAR, resultado da leitura de alguns bytes em <i>python</i>	109
Figura A.4: Ficheiro binário espectral da CODAR convertido.....	109
Figura A.5: NetCDF dataset do ficheiro das correntes totais da CODAR.....	110

Índice de figuras Anexo C

Figura C.1 Interseção de dois círculos.....	131
Figura C.2: Representação vetorial e respetivos cálculos para o referencial comum dos pontos a norte da estação.....	132
Figura C.3: Representação vetorial e respetivos cálculos para o referencial comum dos pontos a sul da estação	133
Figura C.4: Representação vetorial de soluções de um ponto entre as duas estações.....	134
Figura C.5: Representação vetorial de soluções para estação 1.....	135
Figura C.6: Representação vetorial de soluções para a estação 2.....	136
Figura C.7: Representação vetorial de soluções de um ponto ao lado esquerdo das duas estações.....	137

Figura C.8: Representação vetorial de soluções de um ponto ao lado direito das duas estações.....	139
---	-----

Índice de figuras Anexo D

Figura D.1 Mapeamento da direção do vento para 2018-02-28_0600. Radar HF (ventos a variar) a azul, satélite a vermelho e modelo WRF a preto.....	141
--	-----

Figura D.2: Mapeamento da direção do vento para 2017-11-10_1200. Radar HF (ventos variar, resolução de ambiguidade) a azul, satélite a vermelho e modelo WRF a preto.....	142
---	-----

Figura D.3: Mapeamento da direção do vento para 2018-02-28_0600. Radar HF (ventos variar, resolução de ambiguidade) a azul, satélite a vermelho e modelo WRF a preto.....	142
---	-----

Figura D.4: Resultados da direção do vento de cada estação de V1 no ponto 1.....	144
--	-----

Figura D.5: Resultados da direção do vento de cada estação de V1 no ponto 2.....	144
--	-----

Índice de tabelas

Tabela 1: Soluções de esquerda e direita de alguns pontos.....	72
Tabela 2: Valores obtidos entre a relação dos picos de <i>Bragg</i> em função da direção do vento a soprar na direção (a), em ângulo reto (b) e na direção oposta (c) do radar. θ_1 pelo modelo de <i>Fernandez et al.</i> (1997) e θ_2 pelo modelo de <i>Paduan et al.</i> (1999).....	81
Tabela 3: Valores da relação dos picos de <i>Bragg</i> (ζ), sabendo da direção do vento (θ). ζ_1 pelo modelo de <i>Fernandez et al.</i> (1997) e ζ_2 pelo modelo de <i>Paduan et al.</i> (1999).....	81
Tabela 4: Análise estatística da raiz do erro quadrático médio (RMSE), erro absoluto médio (MAE) e coeficiente de correlação de <i>Pearson</i> (R) dos dados de satélite em relação ao WRF, V1, V2 e V3 no ponto 1 e ponto 2.....	95
Tabela 5: Análise estatística da raiz do erro quadrático médio (RMSE), erro absoluto médio (MAE) e coeficiente de correlação de <i>Pearson</i> (R) dos dados de satélite em relação ao WRF, V1 e de cada estação.....	96

LISTA DE ACRÓNIMOS

AFWA – *Air Force Weather Agency*
APM – *Antenna Pattern Measurement*
ASCAT – *Advanced SCATterometer*
BMCL – *Biblioteca Municipal de Câmara de Lobos*
CALH – *Centro de Maricultura da Calheta*
CODAR – *Coastal Ocean Dynamics Applications Radar*
CW – *Continuous Wave*
EOF – *Empirical Orthogonal Function*
FFT – *Fast Fourier Transform*
FMCW – *Frequency Modulated Continuous Wave*
FMICW – *Frequency Modulated Interrupted Continuous Wave*
GPS – *Global Positioning System*
HF – *High Frequency*
LSM – *Least Squares Method*
MAE – *Mean Absolute Error*
MCR – *Multi-frequency Coastal Radar*
MUSIC – *MUltiple Signal Classification*
NCEP – *National Centers for Environmental Prediction*
OOM – *Observatório Oceânico da Madeira*
OSCR – *Ocean Surface Current Radar*
OTH – *Over The Horizon*
PCA – *Principal Component Analysis*
RMSE – *Root Mean Squared Error*
SSMIS – *Special Sensor Microwave Imager Sensor*
UHF – *Ultra High Frequency*
UPS – *Uninterruptible Power Supply*
VHF – *Very High Frequency*
WERA – *Wellen Radar*
WRF – *Weather Research and Forecasting numerical model*

1 INTRODUÇÃO

As informações em tempo real do estado do mar e da atmosfera são importantes para a navegação, planeamento e gestão costeira, assim como para o estudo de fenómenos ambientais. Devido às dificuldades inerentes em obter dados oceanográficos de observações *in-situ*, tem surgido um elevado interesse em sistemas capazes de medir parâmetros físicos com boa resolução, numa vasta área de cobertura.

Nas últimas décadas, os sistemas de radar de alta frequência têm sido utilizados como ferramentas permanentes de monitorização do estado do mar. Estes são usados para medir correntes de superfícies oceânicas e ondas do mar. Estudos revelam a possibilidade destes sistemas determinarem o estado dos ventos de superfície.

Neste capítulo, pretende-se contextualizar a motivação para a realização deste trabalho, bem como os objetivos principais que se ambicionam concretizar e especificar no que toca à organização deste relatório.

1.1 Motivação

A crescente preocupação das alterações climáticas, a ocorrência de eventos oceânicos e atmosféricos extremos e o impacto que estes têm nas atividades socioeconómicas, exprimem a importância e a necessidade de se recorrer a sistemas de monitorização permanente que sustentem tomadas de decisão e estudos de fenómenos meteorológicos e oceanográficos.

Um sistema de observação costeiro agrega várias plataformas para recolha de informação. Estes sistemas são dispendiosos, nomeadamente no que diz respeito à manutenção, à necessidade de recorrer a embarcações e à área de cobertura.

Os sistemas de radar de alta frequência, com os equipamentos em terra, conseguem aplicar permanentemente em tempo real, independentemente das condições climatéricas, a monitorização em grandes áreas costeiras. Estes podem medir as correntes de superfície oceânica e a ondulação marítima. Além disso, têm o potencial para detetar embarcações, alertar em caso de *tsunamis* e extrair informação do vento de superfície. Diversos estudos têm sido feitos, com diferentes abordagens e métodos, para que, com estes sistemas, seja possível determinar a direção do vento.

Os sistemas de radar de alta frequência encontram-se operacionais em diversos países, incluindo Portugal. Na Madeira, no âmbito do Projeto Observatório Oceânico da Madeira, esteve implementado um sistema da CODAR *SeaSonde* (*Coastal Ocean Dynamics Applications Radar*) de duas estações, com frequência de 13.5 MHz, entre julho de 2017 e julho de 2018, para monitorização de correntes de superfície e ondas do oceano.

Considerando a capacidade destes sistemas de radar, é proposta a utilização dos dados recolhidos pela CODAR para a criação e validação de um modelo que permita medir a direção do vento de superfície oceânica.

1.2 Objetivos

Pretendeu-se extrair a direção do vento de superfície do oceano a partir da informação recolhida por um sistema de radar de alta frequência da CODAR *SeaSonde*.

Com este intuito, foi necessário realizar um estudo dos sistemas de radar HF (*High Frequency*), de como são feitas as transmissões de sinais e as operações do radar no que diz respeito ao cálculo da distância, velocidade e direção do alvo. Também foi importante para este estudo perceber como os sinais são dispersos pelo mar e quais os sinais que são recebidos pelo radar, assim como compreender os diferentes sistemas operacionais de radar de alta frequência e distinguir como são determinadas as correntes de superfície e ondas do mar.

Foi fundamental elaborar uma investigação acerca da extração da informação da direção do vento a partir de um radar HF. Para extrair esta informação, foi crucial entender a relação entre os picos das linhas de *Bragg*, os modelos matemáticos propostos, os métodos e os diferentes tipos de radar utilizados.

Em complemento, o sistema da CODAR, que esteve implementado na Madeira, os seus passos de funcionamento, a sua configuração e calibração e as ferramentas de visualização e ficheiros disponibilizados são descritos neste trabalho.

Assim, identificam-se e implementam-se diferentes etapas para a extração da direção do vento. Por último, validam-se os resultados obtidos, fazendo uma comparação dos mesmos com a informação de dados de satélite, juntamente com a do modelo numérico WRF (*Weather Research and Forecasting numerical model*).

1.3 Organização do relatório

Este relatório está dividido em sete capítulos, respetivamente:

- Capítulo 1: apresenta-se a introdução à realização deste estudo, no que diz respeito à motivação e objetivos;
- Capítulo 2: encontra-se uma revisão do estado da arte sobre os sistemas de radar HF. Inicia-se com uma visão geral do seu enquadramento, importância e aplicabilidade. Explica-se em seguida a forma como são efetuadas a transmissão de sinais e operações do radar. Depois mostra-se como ocorrem as respostas dos sinais na superfície do mar. Por último é apresentada uma breve descrição dos sistemas operacionais;
- Capítulo 3: descreve-se como são feitas as medições oceânicas pelos sistemas da CODAR *SeaSonde*, respetivamente para as correntes oceânicas e ondas do mar. Depois, analisa-se como é determinada a direção dos ventos de superfície;
- Capítulo 4: destina-se ao sistema de radar da CODAR que esteve implementado na ilha da Madeira, no qual se detalha a composição do sistema, configuração, calibração, passos de funcionamento e ferramentas de monitorização e visualização. Também são abordados os dados disponibilizados deste sistema, assim como os dados recolhidos para validação;
- Capítulo 5: refere-se à implementação do trabalho propriamente dito, onde são identificadas as fases realizadas para extrair a direção do vento;
- Capítulo 6: traduz-se a apresentação de resultados / validação por intermédio da comparação dos valores obtidos do radar HF com os valores de satélite e modelo numérico WRF;
- Capítulo 7: apresentam-se as conclusões, onde se resumem e salientam os pontos mais relevantes na realização deste relatório, e propõem-se trabalhos futuros.

Também fazem parte da estrutura deste trabalho os seguintes anexos:

- Anexo A: exemplifica-se o formato dos ficheiros disponibilizados pelo sistema de radar da CODAR;
- Anexo B: disponibilizam-se as funções implementadas para a extração da direção do vento;
- Anexo C: demonstram-se os cálculos intermédios efetuados.
- Anexo D: complementam a descrição de alguns resultados.

2 REVISÃO DO ESTADO DA ARTE

De modo a fazer um enquadramento geral sobre os sistemas de radar de alta frequência (HF – *high frequency*), inicialmente faz-se referência à sua importância, vantagens, funcionalidades, gama de frequências e transmissão de sinal. Depois explica-se como são efetuadas as operações do radar HF, respetivamente para o cálculo da distância, velocidade e direção do alvo.

Uma vez que o cálculo da direção depende do tipo de sistema de radar que é aplicado, começa-se por fazer referência aos métodos utilizados, tais como *phased array*, *direction finding* e *synthetic aperture*. Segue-se uma breve noção sobre as ondas do mar e as correntes oceânicas, assim como a interação com o vento de superfície oceânica. Posteriormente, explica-se como é possível obter o espectro dos sinais de radar pelo retroespalhamento (*backscattering*) da superfície do mar. Por último, faz-se referência aos sistemas operacionais mais relevantes, nomeadamente *CODAR SeaSonde*, *OSCR (Ocean Surface Current Radar)* e *WERA (Wellen Radar)*.

2.1 Visão geral

Os sistemas de radar de alta frequência sondam remotamente as superfícies do oceano e são amplamente utilizados em oceanografia costeira [1] [2]. Um sistema de observação costeiro (Figura 1) é uma combinação de muitas plataformas utilizadas para recolher informações e transformá-las em produtos úteis que sustentam tomadas de decisão para a população, economia costeira e para o meio ambiente [3].

Os radares HF são capazes de fornecer, essencialmente, medições de correntes de superfície, de ondas marítimas e de ventos de superfície, assim como, fazer deteção de embarcações e alerta de *tsunamis*, de uma ampla área em tempo real. Isso faz com que os radares HF se tornem numa ferramenta poderosa, sendo difícil conseguir a mesma quantidade de informação por outro meio. Outra vantagem reside no facto dos radares HF poderem operar em diversas condições climáticas. Além disso, as localizações de operação são terrestres e de baixo custo, em relação às operações exaustivas efetuadas em alto mar. Outra consideração resulta no contexto não invasivo do sistema no meio ambiente.

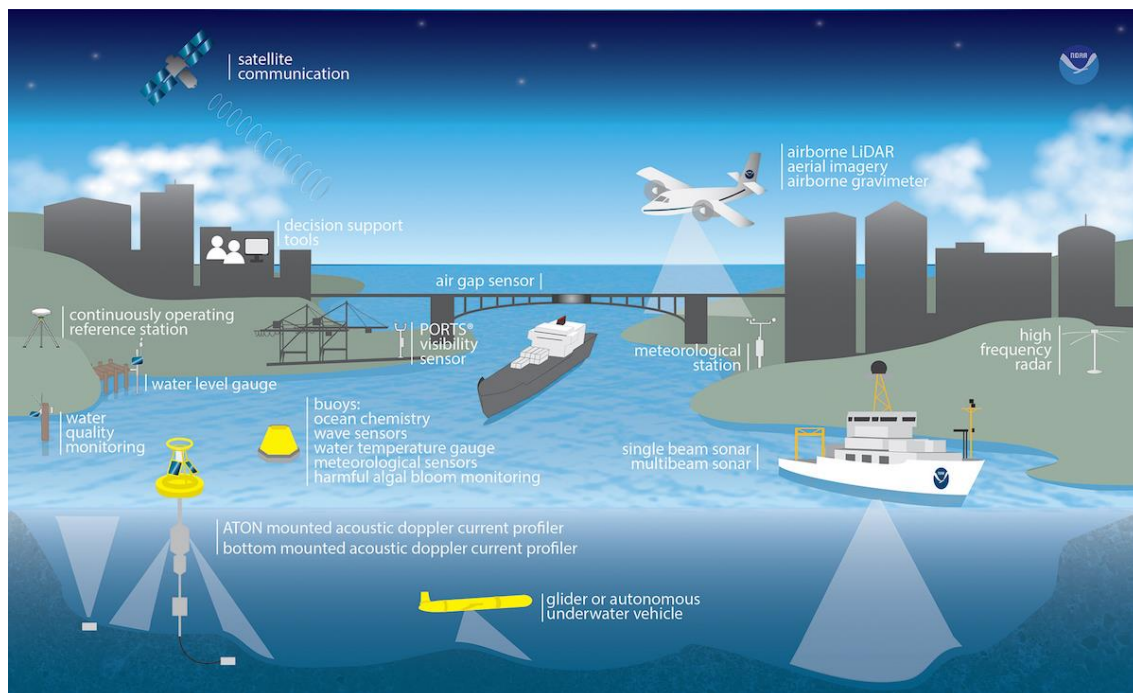


Figura 1: Um sistema de observação costeiro. Radares HF à direita [3].

A recolha de informação pelos radares HF insere-se numa variedade de aplicações que são importantes e de grande utilidade em diferentes vertentes [4], nomeadamente, em oceanografia física e biológica na zona costeira, em operações militares e civis, respetivamente, nas tomadas de decisão das operações de busca e salvamento, no combate a possíveis incidentes de poluição marinha (ex. derramamento de poluentes), no planeamento e navegação de navios, no estudo e impacto ambiental, entre outros.

2.2 Transmissão de sinais HF

Em observação costeira, muitos instrumentos (Figura 1) exploram diferentes gamas de frequências. No espectro eletromagnético a gama de frequências HF encontra-se aproximadamente entre os 3 a 30 MHz e o comprimento de onda entre os 10 a 100 m. A Figura 2 mostra a nomenclatura tipicamente usada para uma ampla gama do espectro eletromagnético [1]. Geralmente, o termo radar é aplicado em instrumentos que operam na gama do espectro das micro-ondas.

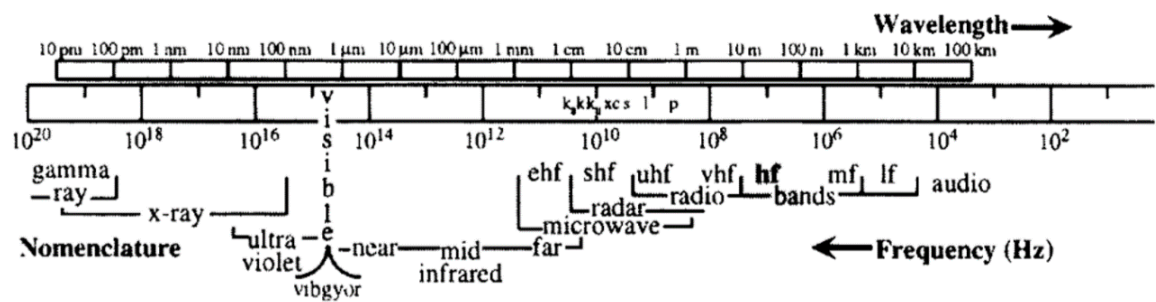


Figura 2: Espectro eletromagnético com a representação da banda HF relativa às outras gamas de onda [1].

O princípio básico de funcionamento de um radar consiste num transmissor que gera um sinal eletromagnético que é difundido para o espaço por uma antena. Uma porção de energia transmitida é interceptada num alvo e retransmitida de volta. Esta é captada pela antena e entregue ao recetor [5].

Os sinais eletromagnéticos podem ser:

- 1) Impulso simples – A maneira mais simples é usar um pequeno impulso de energia de radar. A desvantagem desta técnica é que se o impulso for demasiado curto, a potência transmitida é baixa e conseqüentemente a relação sinal-ruído resultante é muito limitada.
- 2) Forma de onda codificada – O radar transmite uma seqüência de curtos impulsos codificados de modo que a sua função de auto-correlação seja um único pico central com baixos lóbulos secundários. A largura dos impulsos individuais determina o tamanho da resolução, mas quanto maior for o número de impulsos da seqüência, maior terá de ser a potência média. Uma limitação a esta abordagem resulta do facto de que se a seqüência for muito longa, as informações sobre os alvos de curta distância não serão recolhidos porque uma parte do eco chega enquanto a seqüência continua a ser transmitida. Outro problema tem a ver com a resposta duvidosa (lóbulos secundários de alcance) de certos alvos. Estes problemas podem ser atenuados pela utilização de formas de onda mais complicadas, à custa de processamento adicional. A Figura 3 apresenta o código de 11 elementos de *Barker* utilizado para captar dois alvos de diferentes amplitudes, na qual verifica-se a forma de onda transmitida (Tx) no topo, seguido por dois retornos de dois alvos (T1,T2) de diferentes amplitudes, a soma dos retornos (Sum) e a função de correlação (XCor) entre o sinal composto recebido e o transmitido [2].

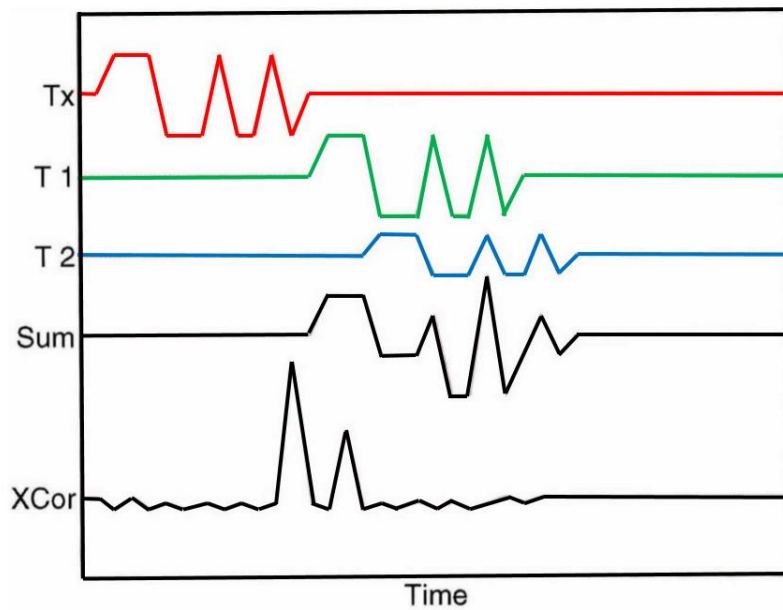


Figura 3: Aspecto da forma de onda para um sistema de radar utilizando um código de 11 elementos de *Barker* [2].

- 3) Onda contínua modulado em frequência – Em vez de o radar transmitir impulsos curtos, a *FMCW (Frequency Modulated Continuous Wave)* transmite um sinal de onda contínua modulado em frequência relativamente longo. O sinal transmitido é linearmente varrido e usado como referência para os sinais recebidos, um alvo numa distância específica produz uma frequência constante diferente cujo valor depende da distância. Alvos mais distantes produzirão frequências mais elevadas. Ao analisar a frequência do sinal recebido, os alvos de diferentes distâncias podem ser identificados. Para a maioria dos radares o varrimento linear é periodicamente interrompido de modo a evitar sobrecarga no recetor durante a receção do eco. Pela Figura 4 pode-se verificar os sinais transmitidos e recebidos por um sistema FMCW, sendo que, a vermelho tem-se o sinal transmitido, a verde e a azul o retorno de dois alvos diferentes [2]. A diferença de frequência entre o sinal transmitido e recebido é constante com o tempo e é de valor maior para alvos mais distantes.

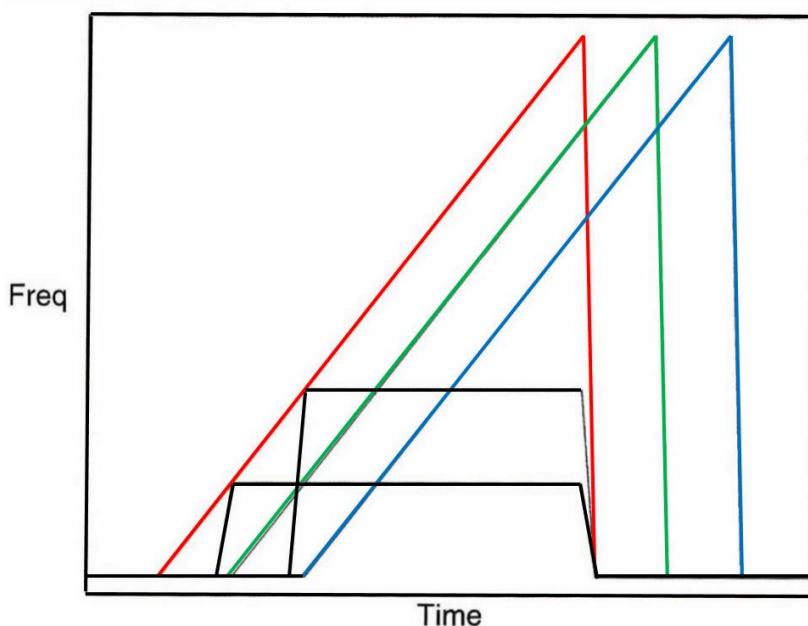


Figura 4: Representação de sinais transmitidos e recebidos de um sistema FMCW [2].

2.3 Operações do radar HF

As principais operações realizadas por um radar HF típico são o alcance ou distância até ao alvo, a direção do alvo em relação ao ângulo azimute de referência do radar, a frequência de *Doppler* do alvo e a potência do sinal recebido pelo alvo.

2.3.1 Cálculo da distância

Conhecendo o sinal transmitido e o tempo em que este leva a propagar-se até ao alvo e a retornar para o recetor, consegue-se calcular a distância do alvo. A energia eletromagnética propaga-se pelo espaço aberto à velocidade da luz, respetivamente $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$. O tempo (T_r) que o sinal leva a percorrer do radar à distância do alvo (R) e retomar ao radar é $2R/c$.

A distância ao alvo é então:

$$R = \frac{cT_r}{2} [m] \quad (1)$$

Habitualmente mede-se a distância em quilómetros e o tempo em microssegundos.

2.3.2 Cálculo da velocidade

O desvio de *Doppler* está diretamente relacionado com a velocidade relativa e inversamente proporcional ao comprimento de onda do radar. A velocidade do alvo é determinada repetindo as medidas de distância a uma taxa regular e realizando uma análise de séries temporais nas amostras obtidas de cada medida de distância individual. Dessa forma, a velocidade do alvo é obtida por:

$$\Delta v = \frac{\lambda \Delta f}{2} [m/s] \quad (2)$$

onde λ é o comprimento de onda do radar em metros e Δf é a resolução da frequência fornecida pela integração coerente do tempo T, $\Delta f = 1/T$ Hz.

2.3.3 Cálculo da direção

Para medir a direção do alvo em relação às antenas, este depende do sistema de antenas que é aplicado. De uma forma geral, são utilizadas diferentes técnicas para medir o ângulo de azimute:

Phased array – Um sistema constituído por um conjunto de elementos de receção idênticos, espaçado não mais do que $\lambda/2$ de distância (para evitar lóbulos laterais severos), com a linha do conjunto perpendicular ao centro das diversas direções dos feixes. O feixe é orientado fazendo o ajuste da amplitude e da fase dos sinais de cada um dos elementos e adicionam-se estes sinais de forma coerente. O ajuste de fase pode ser feito pelos dispositivos físicos (cabo coaxial, redes de deslocamento de fase, etc) ou digitalmente através do processamento de dados com a gravação em separado dos sinais de cada elemento. A resolução angular, ou seja, o ângulo que é produzido entre feixes, pode ser obtida pelo *array* com uma abertura total D, aproximadamente, λ/D radianos. Para obter uma resolução angular de 5 graus (0,1 radianos) é necessária uma abertura de 10λ . Na prática, pode não ser possível obter uma área suficiente para esta resolução, em particular para frequências abaixo de 10MHz.

Synthetic aperture – Para frequências muito baixas, no espectro da gama HF, é impraticável a utilização desta técnica, no entanto, é possível aplicá-la na tecnologia de satélites. Uma antena simples teria de ser transportada ao longo de uma linha reta a uma velocidade constante menor do que a velocidade de fase das ondas do oceano com ressonância de *Bragg* (explicado em 2.4.1). O movimento da antena difunde uma linha de *Bragg* estreita em faixas de frequências dependentes

da direção e com a análise de *Fourier* consegue-se obter a direção dos sinais com a suposição que as correntes são insignificantes em comparação com a velocidade de fase das ondas de *Bragg*.

Direction finding – O sinal de duas ou mais antenas relativamente próximas e de localização referenciada são comparadas quer em fase ou amplitude (Figura 5). Isso é feito em cada feixe de frequência em análise com a largura de banda. Pela Figura 5, a diferença de fase entre os sinais de eco recebidos em quaisquer dois elementos de antena de recepção é utilizada para obter a direção angular de chegada dos ecos com referência à linha que une os elementos de antena de recepção [6].

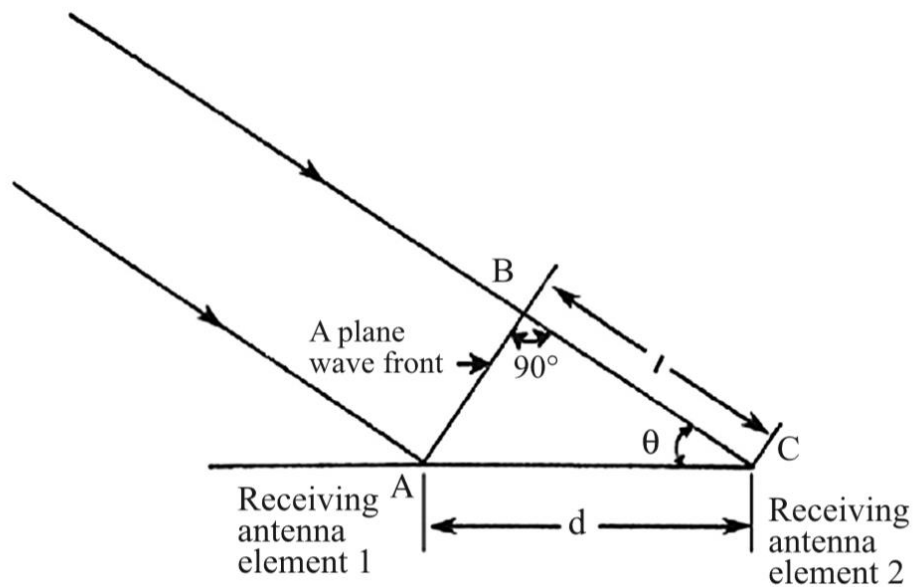


Figura 5: O princípio básico de estimativa da direção de chegada de um eco com referência à linha que une as antenas recetoras [6].

A diferença de fase (\emptyset graus) da frente de onda plana (*plane wave front*) recebida nos dois elementos de antena está relacionada com l , sendo que l é a diferença de trajetória de uma frente de onda plana nos dois elementos de antena de recepção. Como uma diferença de fase de 360 graus corresponde a uma diferença de percurso de λ_r , a diferença de fase medida (\emptyset graus) corresponde a uma diferença do comprimento l , dada pela expressão:

$$l = \frac{\lambda_r \emptyset}{360} \quad (3)$$

em que l é expresso na mesma unidade que λ_r .

Pela Figura 5, d é a separação entre os elementos de antena de recepção, ficando:

$$l = d(\cos \theta) \quad (4)$$

Pelas equações (3) e (4):

$$\theta = \cos^{-1} \left(\frac{\lambda_r \emptyset}{360d} \right) \quad (5)$$

Como λ_r e d são conhecidos por um determinado arranjo dos elementos da antena receptora e \emptyset é medido, a direção da chegada θ do eco com referência aos elementos da antena receptora pode ser estimada. Assim, comparando as fases entre duas antenas que não interagem entre si separadas por uma distância conhecida (geralmente menor que $\lambda_r/2$), é possível determinar univocamente a direção de chegada do sinal sobre um setor de 180 graus ou menos.

Uma vantagem significativa desta técnica é que as antenas são muito menores do que as usadas na técnica de *phased array*.

2.4 Ondas HF dispersadas pelo mar

De forma a perceber o que é que acontece quando o sinal do radar HF incide sobre a superfície do mar, é preciso entender o que é uma onda do mar. Então, entende-se que o movimento da onda é transportado por partículas de água apresentando uma característica circular à medida que a onda passa. Na superfície do mar, esses movimentos circulares podem ter amplitudes bastante amplas, mas rapidamente desaparecem com a profundidade.

A Figura 6 mostra por que a forma de onda em si não é sinusoidal, mas é um tipo de forma designada por "*flat-bottomed/pointed-crest*" conhecida como ciclóide ("*trochoid*") [7]. A altura de uma onda do mar é pequena em comparação com o seu comprimento.

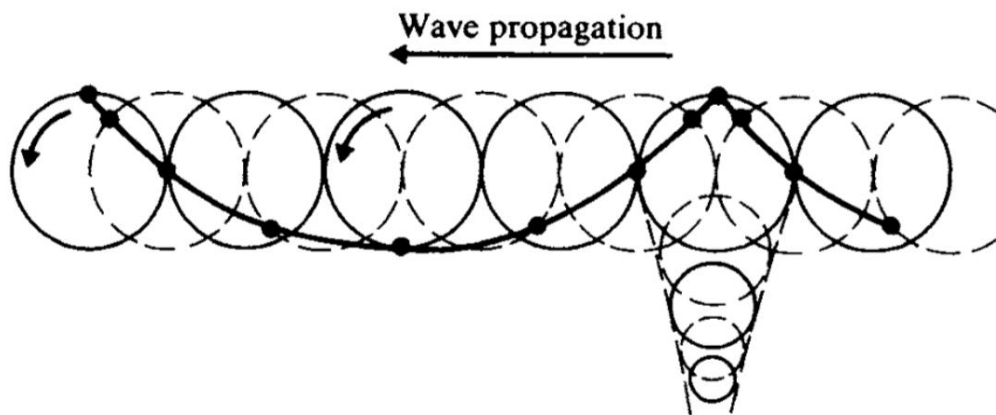


Figura 6: Forma cicloidial das ondas do mar geradas pelo movimento circular da água [7].

As ondas são geradas pelo vento localmente ou por tempestades distantes (Figura 7). Estas últimas ondas são conhecidas como “swell” e possuem longos comprimentos de onda, o que lhes permite viajar grandes distâncias com pouca atenuação [8]. Pela Figura 7, à medida que o vento sopra através do mar (linha tracejada vermelha), o tamanho das ondas aumenta com o aumento da velocidade, duração e alcance do vento. Como as ondas prosseguem além da sua área de origem, elas avançam pela superfície oceânica e se classificam em ondulações uniformes e simétricas (“swell”).

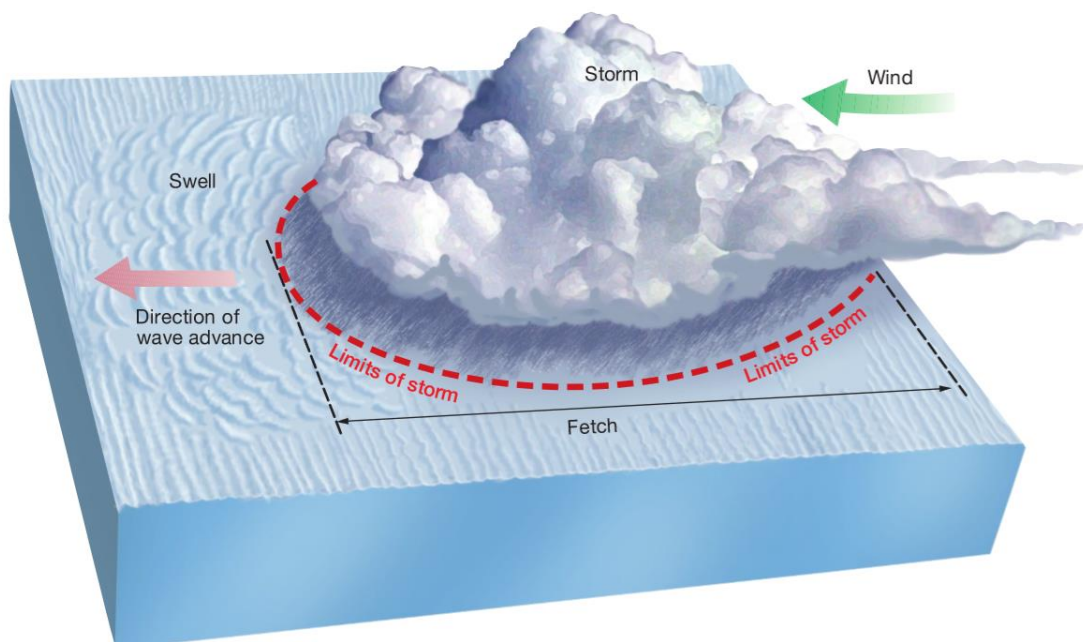


Figura 7: Exemplificação do processo de criação de “swell” por tempestades distantes [8].

Quando as ondas *swell* de diferentes tempestades se encontram, as ondas chocam entre si causando um padrão de interferência. Este padrão é produzido quando dois ou mais sistemas de onda colidem e é a soma da perturbação que cada onda teria produzido individualmente. Dessa forma, se duas ondas com o mesmo comprimento e em fase se juntam, causam interferência construtiva produzindo uma onda de altura maior. A interferência destrutiva ocorre quando a sobreposição das ondas com características iguais, mas com fases opostas gerando um efeito de cancelamento. No oceano, é provável que dois ou mais *swells* com alturas e comprimentos diferentes venham a se encontrar produzindo um padrão complexo de interferência mista (Figura 8).

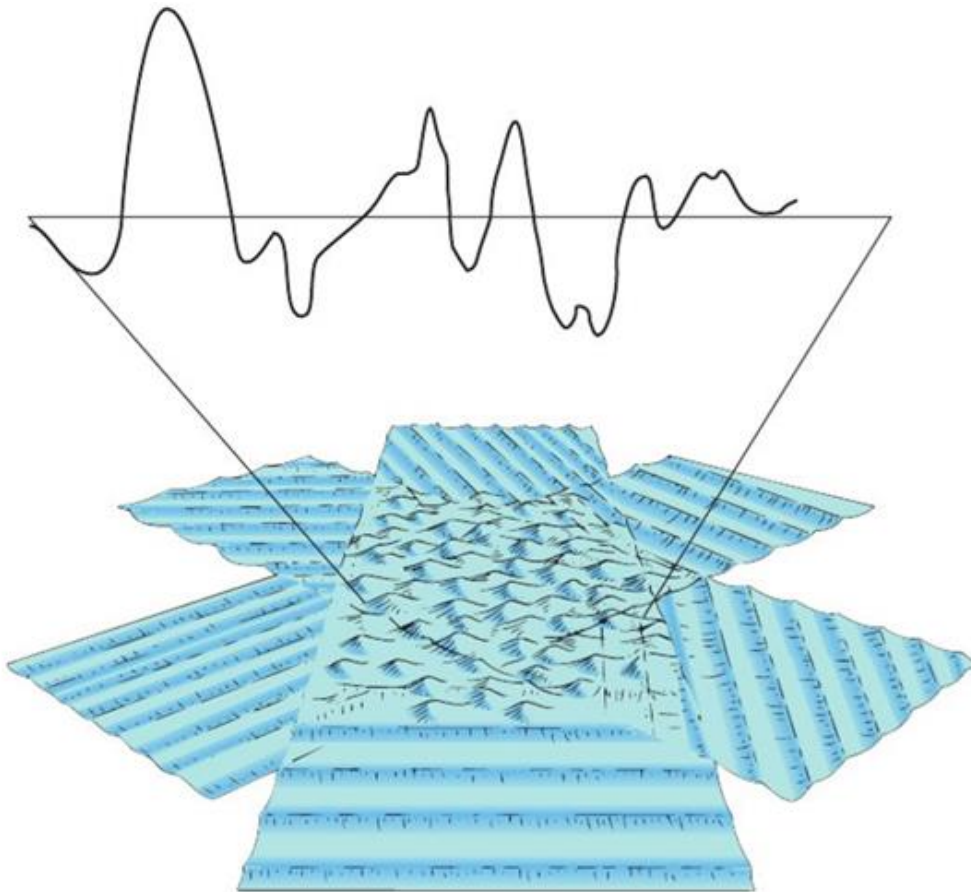


Figura 8: Padrão de interferência mista com a sobreposição de diferentes agrupamentos de onda [8].

As ondas produzidas localmente são mais sofisticadas. O vento sopra sobre a água e começa a formar ondas de curto comprimento de onda (“*short-wavelength waves*”), mas à medida que estas se acumulam, os processos tornam-se não lineares e a energia é transferida para ondas mais longas com amplitudes maiores. Para uma velocidade constante do vento, um equilíbrio é alcançado para as maiores ondas

com uma velocidade próxima do vento. Se o vento for intensificado, serão geradas mais e maiores ondas. As ondas maiores tendem a ser alinhadas com a força do vento, mas as ondas menores são omnidirecionais.

Visualizando as ondas do mar como massas de água oceânica que fluem de um lugar para o outro, estes são designados por correntes oceânicas. A deslocação da quantidade de água pode ser grande ou pequena e podem ser correntes de superfície ou pelo fundo. Estes fenômenos podem ser simples ou bastante complexos. As correntes oceânicas podem ser movidas pelo vento ou pela densidade do oceano. As correntes movidas pelo vento, movem a água horizontalmente, particularmente pelos principais cinturões de vento do mundo, isto é, massas de ar em movimento, e ocorrem principalmente nas águas superficiais do oceano. Entre outros fatores que influenciam os padrões de circulação oceânica, salienta-se o transporte e a espiral de *Ekman* (Figura 9) que descreve a velocidade e a direção do fluxo das águas superficiais em várias profundidades e assume que uma coluna de água uniforme é posta em movimento pelo vento que sopra na superfície. Para o hemisfério norte o vento impulsiona a água da superfície numa direção de 45 graus para a direita do vento e o movimento médio de água para toda a coluna está a 90 graus em relação à direção do vento [8].

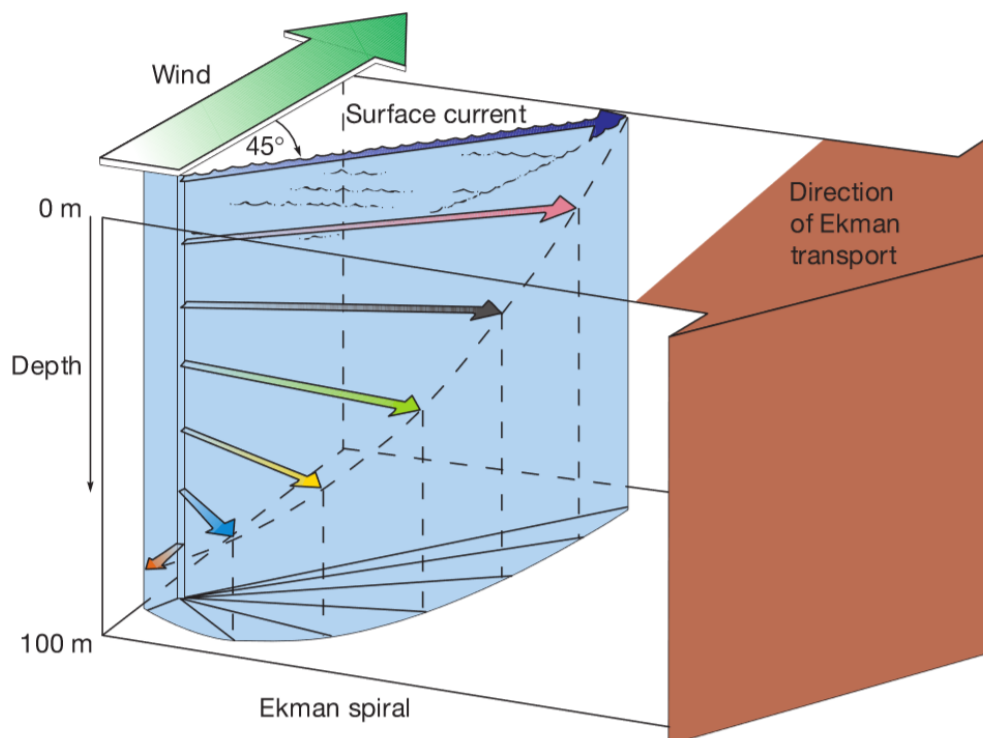


Figura 9: Transporte e espiral de *Ekman* [8].

Para descortinar o transporte e a espiral de *Ekman* e a pertinência dos 45 graus, seria necessário entrar no campo da oceanografia física. Contudo, o transporte e a espiral de *Ekman* é uma teoria que nunca foi diretamente observada, com uma série de limitações, nomeadamente suposições não realistas. Essas suposições dizem respeito à não consideração de condições costeiras e dos limites da profundidade do oceano. Além disso, são considerados ventos estacionários e águas homogêneas [9]. Apesar das limitações, a teoria de *Ekman* é utilizada para validação e no desenvolvimento de modelos. Nos modelos numéricos de circulação oceânica, os dados de radar HF são utilizados para correção e melhoria desses modelos, no entanto, quando uma projeção de *Ekman* é incluída nas correções, é alcançada uma melhoria significativa na correlação entre modelos e as correntes superficiais observadas [10].

2.4.1 Espectro do sinal recebido do radar HF

Quando um sinal eletromagnético transmitido pelo radar HF atinge a superfície irregular do mar, uma certa quantidade de energia incidente é refletida ou espalhada de volta ao radar. Este sinal de retorno contém as informações sobre a superfície do mar. Estes dois mecanismos ou processos básicos responsáveis pelo retroespalhamento da energia eletromagnética a partir da superfície do mar são a reflexão especular e o espalhamento de *Bragg* (*specular reflection and Bragg scattering*) [6]. Se existir algum movimento relativo entre o radar e o alvo, ou seja, associado às correntes de superfície, o sinal de retorno exibe um desvio na frequência. Como já foi explicado anteriormente pela equação (2), o desvio de frequência verifica-se quando a frequência do sinal recebido é diferente da frequência do sinal transmitido e está diretamente relacionada à velocidade relativa e inversamente proporcional ao comprimento de onda do radar.

Pela análise das primeiras observações, o espectro dos sinais de radar de retroespalhamento da superfície do mar revelou as seguintes características:

- Dois picos bem definidos. Estes foram colocados em ambos os lados da frequência de transmissão do radar, representando os picos de *Doppler* positivos e negativos (Figura 10).
- O desvio de *Doppler* desses picos a partir da frequência de transmissão variam em função da raiz quadrada da frequência emitida, e não em proporção direta à frequência de transmissão, como no caso do eco *Doppler* de um alvo discreto.

- A amplitude dos picos *Doppler* positivos e negativos são proporcionais à altura das ondas do mar que estão a avançar em direção ao radar e a afastar da direção do radar.

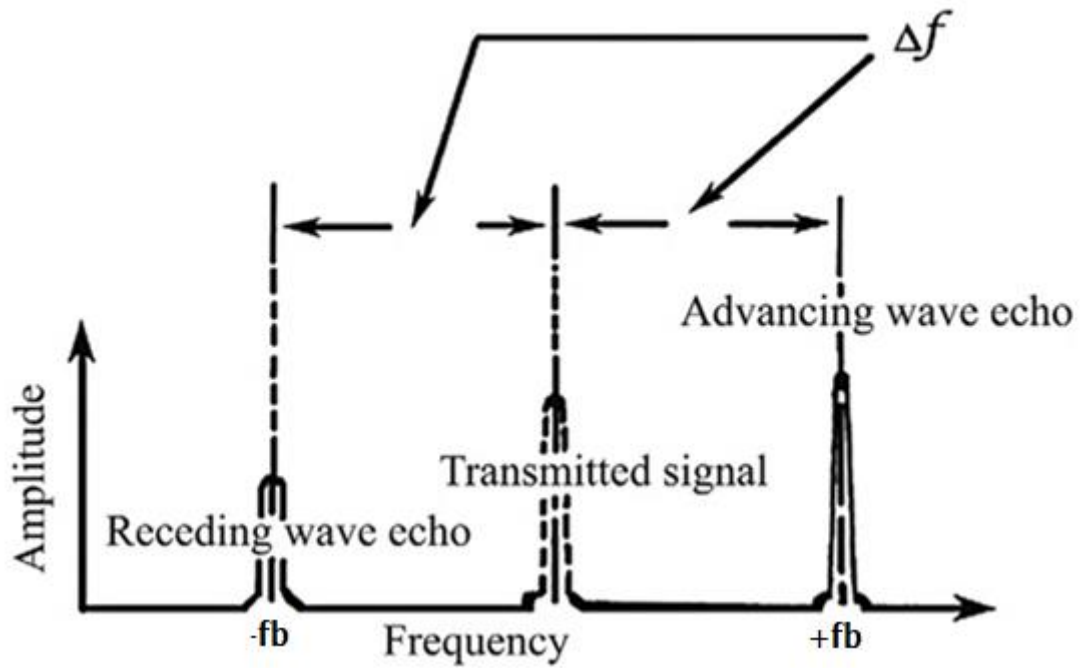


Figura 10: Ilustração do desvio de *Doppler* do espectro do eco do mar de um radar HF [6].

Pela teoria por detrás da aplicação do princípio do radar de *Doppler* para medição remota da superfície do mar [6], deduz-se que a ressonância de *Bragg* ocorre quando o comprimento da onda do mar (L) é igual à metade do comprimento de onda (λ).

$$L = \frac{\lambda}{2} [m] \quad (6)$$

Qualquer uma das ondas do mar que estão viajando diretamente em direção ou para longe do radar dará origem a uma retrodispersão, mas aqueles com um comprimento igual à metade do comprimento de onda ($\lambda / 2$) darão um eco muito mais forte porque as ondas de rádio refletidas se juntam de forma coerente, como ilustrado na Figura 11. Esta seletividade no processo de eco é conhecida como dispersão de ressonância de *Bragg* [7].

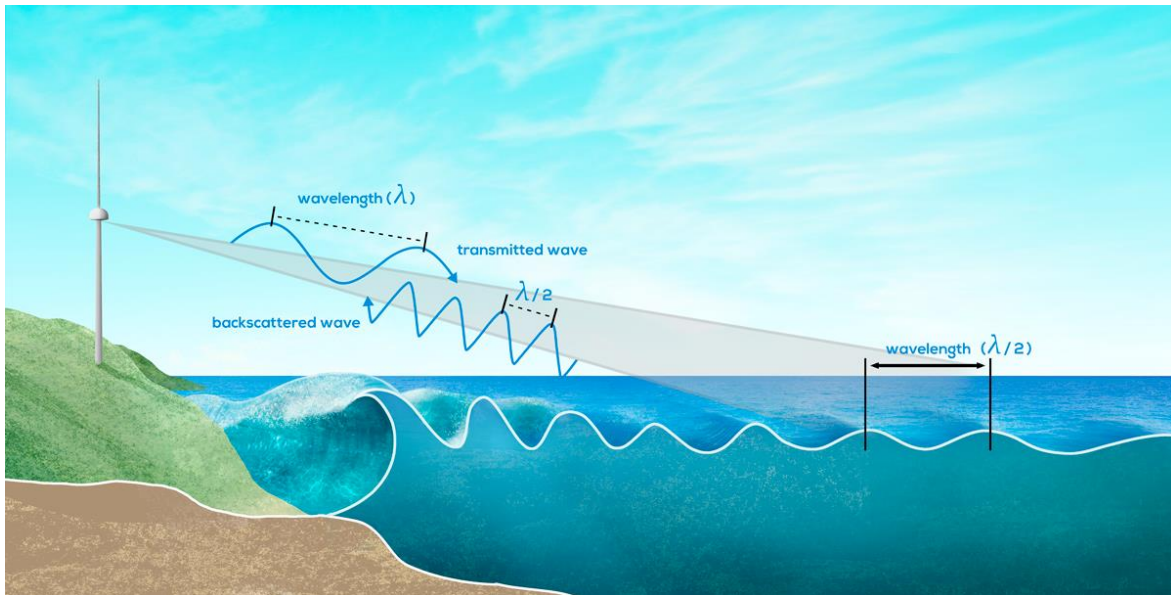


Figura 11: Retrodispersão da ondulação do mar quando o comprimento é igual à metade do comprimento de onda [11].

A dispersão de *Bragg* torna-se um pouco mais complexa do que é mostrada na Figura 11 porque a onda de rádio pode incidir na superfície do mar num ângulo oblíquo, como apresentado pela Figura 12.

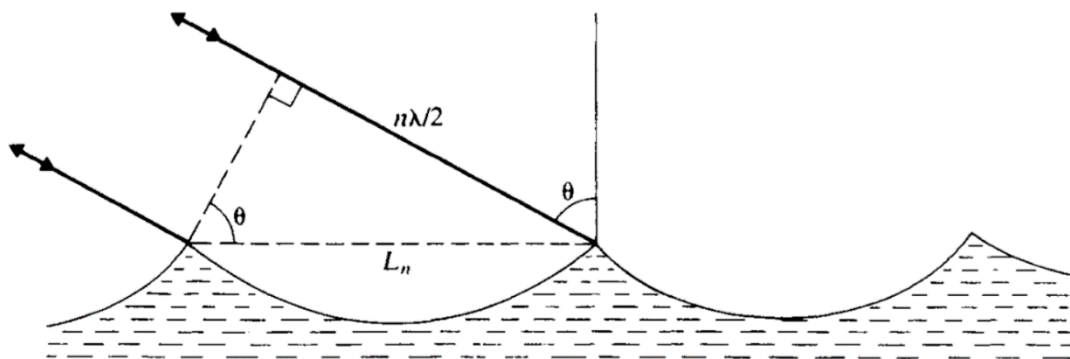


Figura 12: A ressonância de *Bragg* ocorre quando a diferença de caminho entre o eco de duas cristas é um múltiplo de $\lambda/2$ [7].

A fórmula de *Bragg* para o comprimento da onda do mar, apresentado em (6), é generalizada pela equação:

$$L_n = \frac{n\lambda}{2 \sin \theta} \text{ [m]} \quad (7)$$

Para um radar de onda terrestre $\sin \theta = 1$. Nota-se que há possibilidade de que os sinais que são retrodispersos pelas ondas do mar de comprimento de onda $2\lambda/2, 3\lambda/2, \dots, n\lambda/2$, também se juntem de forma coerente no recetor.

Outra informação importante é a relação de dispersão para as ondas do mar, que relaciona a velocidade da fase (V_n) com o comprimento de onda do mar (L_n), dado pela seguinte equação, onde g é a aceleração devido à gravidade:

$$V_n = \sqrt{(gL_n/2\pi)} \text{ [m s}^{-1}\text{]} \quad (8)$$

A fórmula de *Doppler*:

$$f_n = \pm(2V_n \sin \theta)/\lambda \text{ [Hz]} \quad (9)$$

Juntando as equações anteriores:

$$f_n = \pm \sqrt{\left(\frac{ngf_{radar} \sin \theta}{\pi c}\right)} \text{ [Hz]} \quad (10)$$

Por (10) o deslocamento de *Doppler* tem uma dependência da raiz quadrada na frequência do radar, sabendo que $f_{radar} = c/\lambda$ e que f_n está diretamente relacionado com f_{radar} . Por outras palavras, a mudança da frequência do radar faz com que um conjunto diferente de ondas do mar seja selecionado pelo processo de *Bragg* e essas ondas possuem uma velocidade com dependência da raiz quadrada na relação de dispersão. Esta distinção entre ondas e alvos sólidos é uma propriedade útil ao rastrear os navios com radar HF. Se um navio estiver viajando na mesma velocidade que as ondas de *Bragg* dominantes, geralmente não pode ser detetado porque o eco do mar é muito maior que o do navio. No entanto, uma mudança na frequência do radar fará com que os dois ecos sejam separados no espectro de *Doppler*.

Quando $n = 1$ na equação (10), a equação do espectro de *Doppler* designa-se de “primeira ordem” e é o mais perceptível dos sinais no resultado de saída do radar. As características de um espectro de *Doppler* podem ser observadas ao anexar um analisador de espectros a um radar HF e usando um tempo de integração de cerca de 100s para exibir a saída espectral [7]. Um exemplo típico, apresentado na Figura 13, onde o espectro de primeira ordem consiste nas duas “linhas de *Bragg*” proeminentes que representam as velocidades das ondas de ressonância de *Bragg* que estão avançando e recuando em relação ao radar.

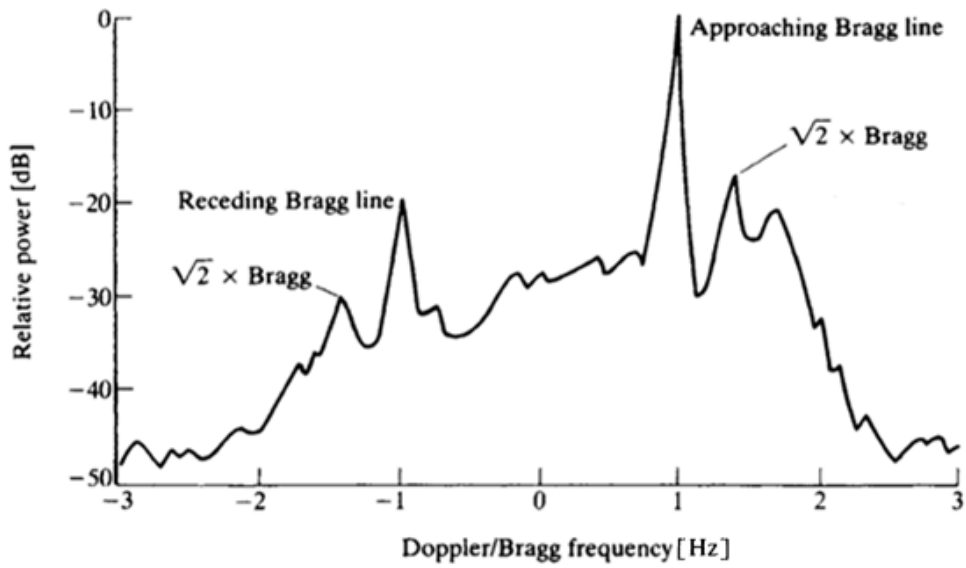


Figura 13: Potência típica do espectro de *Doppler* registado aos 8 MHz [7].

Um espectro real de um sistema de radar de superfície oceânico, como mostra a Figura 14, apresenta os picos de *Bragg*, devido à presença das ondas de *Bragg* aproximando-se e se afastando do recetor, e a informação de segunda ordem [1].

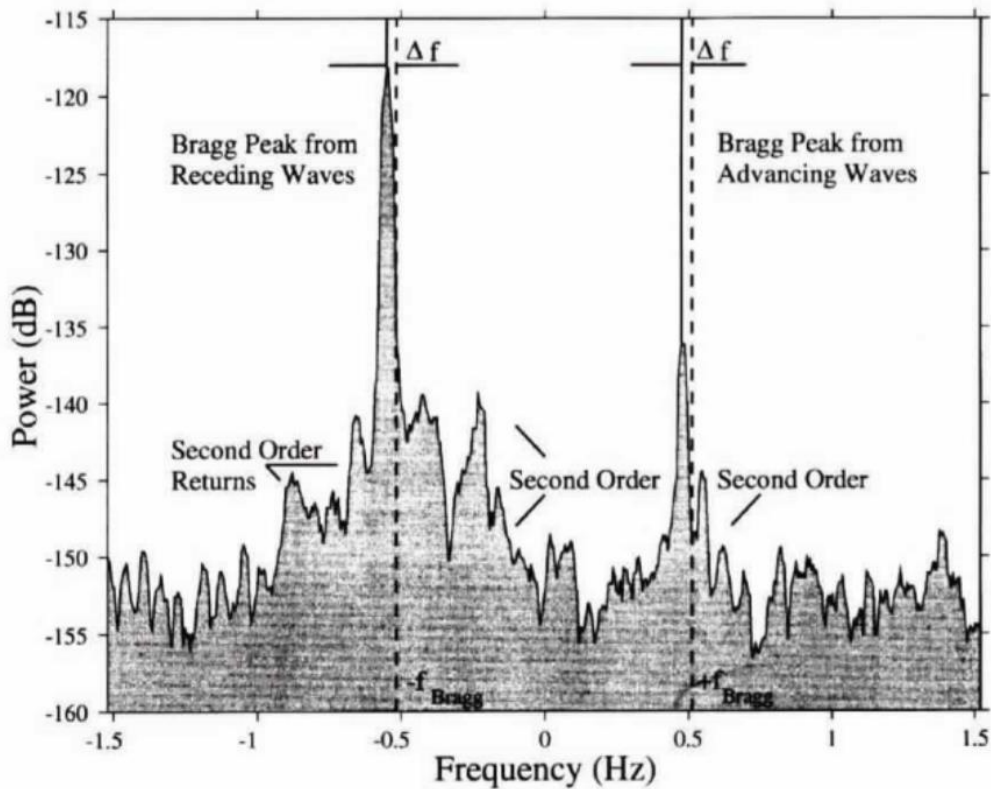


Figura 14: Espectro do sinal recebido, apresentando os picos de *Bragg* e os retornos de segunda ordem [1].

A frequência destes picos tem um desvio em relação à energia transmitida devido a duas razões, respetivamente as ondas de *Bragg* estarem a movimentar-se com as águas profundas em velocidade de fase e por serem movidas pela corrente oceânica subjacente.

A direção das correntes das ondas oceânicas relaciona-se com os picos do espetro, a altura das ondas com os resultados de segunda ordem e a direção do vento com a proporção da amplitude dos picos de *Bragg*.

2.5 Sistemas operacionais

Normalmente quando se fala num sistema operacional de radar HF, associa-se ou diferencia-se pelo método utilizado para a medição do ângulo de azimute. Dessa forma, por um lado, destaca-se a CODAR (*Coastal Ocean Dynamics Applications Radar*) para a *direction finding*, e por outro, a WERA (*Wellen Radar*) e a OSCAR (*Ocean Surface Current Radar*) para a *phased array*.

2.5.1 CODAR - *Coastal Ocean Dynamics Applications Radar*

Inicialmente a CODAR usava uma composição de quatro elementos para uma configuração *direction finding*. Transmítia impulsos curtos de onda contínua (CW – *Continuous Wave*) dentro de um feixe amplo e executava a resolução de alcance por meio do comprimento de impulso (τ). Para não perturbar o sinal de receção, impulsos sucessivos de transmissão são separados por um período da ordem de 100 τ . Devido ao tempo de transmissão curto, era necessária uma potência de pico mais elevada. No recetor utilizavam-se rotinas de FFT (*Fast Fourier Transform*) para resolver os ecos equidistantes dentro do feixe, assim como os sinais das antenas individuais (os quatro elementos de antena de receção) eram comparados para estimar a direção. Posteriormente, estimava-se a velocidade da corrente radial versus o alcance e direção do feixe.

Atualmente, a CODAR foi evoluída para *SeaSonde*. O sistema da CODAR *SeaSonde* utiliza uma antena recetora de três elementos, dois *loops* cruzados e um monopolo vertical, juntamente com uma variante do algoritmo de classificação múltipla de sinais (MUSIC – *MULTiple Signal Classification*) para determinar a direção do feixe. Este sistema com antenas compactas está preparado para áreas costeiras altamente povoadas e rochosas, abrangendo uma área menor em comparação com um sistema de antenas *phased array*. A antena recetora é montada num poste, fora de alcance, ou no telhado de um prédio, em vez de se estender por centenas de

metros numa propriedade à beira-mar. A configuração da antena recetora é mostrada na Figura 15, onde estão representados os dois *loops* cruzados em torno de um monopolo vertical, juntamente com gráficos dos padrões de amplitude angular ideal para cada um dos três elementos (*loops* – a amarelo e rosa, monopolo – a branco) [12]. O monopolo permite obter a intensidade do sinal (distância do eco) e os *loops* cruzados a direção (azimute). Além dos padrões ideais da antena, a precisão dos algoritmos *direction finding* também depende da relação S/N (sinal ruído) do retroespalhamento medido.

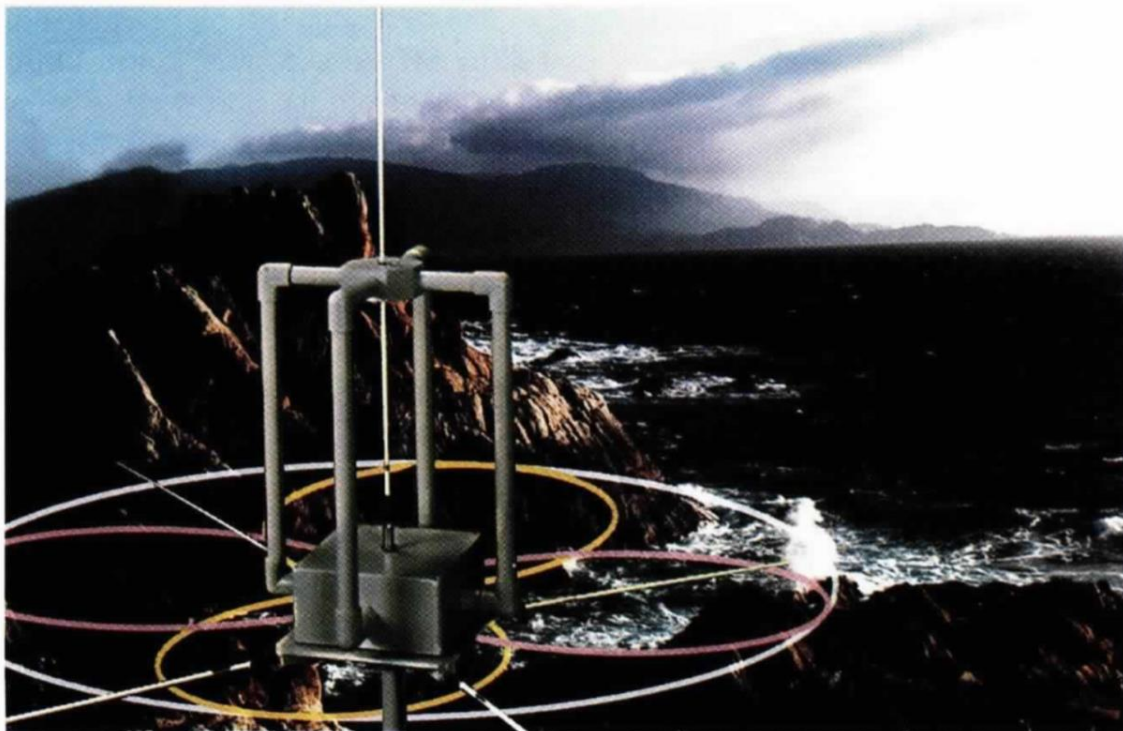


Figura 15: Representação idealizada de uma antena recetora da SeaSonde [12].

O sistema utiliza a técnica de onda contínua interrompida modulada por frequência (FMICW – *Frequency Modulated Interrupted Continuous Wave*) para resolução de alcance. A resolução de azimute é obtida por meio de uma antena de *loop* combinada com um algoritmo especial de deteção de direção. Controlado por computadores remotos, os dados em tempo real são enviados para um servidor central. Lá, estes são combinados com os dados de outras estações de antenas de radar da *SeaSonde*, visualizando a mesma área a dezenas de quilómetros de distância para produzir campos vectoriais totais. Normalmente, eles geram mapas atualizados de hora em hora, e são automaticamente enviados para *websites* para acesso imediato ao público.

A gama de frequências *standard* que os radares da *SeaSonde* operam é entre 12-27 MHz para faixas de 30 a 60 km com resolução típica de 1 a 3 km. Para alta resolução, oferecem alcance de 200 a 500 metros em baías com áreas menores, como 10 a 15 km. Para longo alcance, chegam a valores diurnos médios de 170 a 200 km, possibilitando o mapeamento das correntes ao longo de grandes secções do litoral de um país, continuamente, com baixos custos iniciais e operacionais, em comparação com outros métodos de mapeamento.

Atualmente, estes sistemas de radar estão por todo o mundo, de acordo com a *CODAR Ocean Sensors* [13], mais de 350 estações de radares estão instaladas ou agendadas para instalação em 30 países, incluindo Portugal. Em Portugal, os projetos de instalação, operação e manutenção dos sistemas de radar *CODAR SeaSonde* são realizados pela *Qualitas Instruments* [14], e complementarmente, disponibilizam o sistema *PORTUS web-based* (ver Capítulo 4.5.2) para gestão e visualização dos dados em tempo real.

2.5.2 OSCR - *Ocean Surface Current Radar*

O radar de corrente da superfície do oceano (*OSCR – Ocean Surface Current Radar*), desenvolvido inicialmente pelo *Rutherford Appleton Laboratory* no Reino Unido e posteriormente pela *MAREX Ltd*.

O sistema foi projetado para funcionar com uma de duas frequências: 27 MHz (HF) para um alcance que próximo dos 35 km e 51 MHz (VHF – *Very High Frequency*) para medições de alta resolução e um alcance de aproximadamente 15 km. O OSCR difere da abordagem da CODAR, na qual utiliza 16 elementos (para HF) ou 32 elementos (para VHF) distribuídos ao longo de uma linha costeira para formar uma configuração *phased-array*, de modo a produzir um feixe estreito guiado eletronicamente sobre uma área “iluminada” da superfície do oceano. A resolução angular é controlada pelo comprimento (em comprimento de onda) do arranjo de fases que é usado para receção do sinal. A configuração da antena *phased-array* (Figura 16) e com técnicas digitais de formação de feixe pode “apontar ou direcionar” o radar [6].

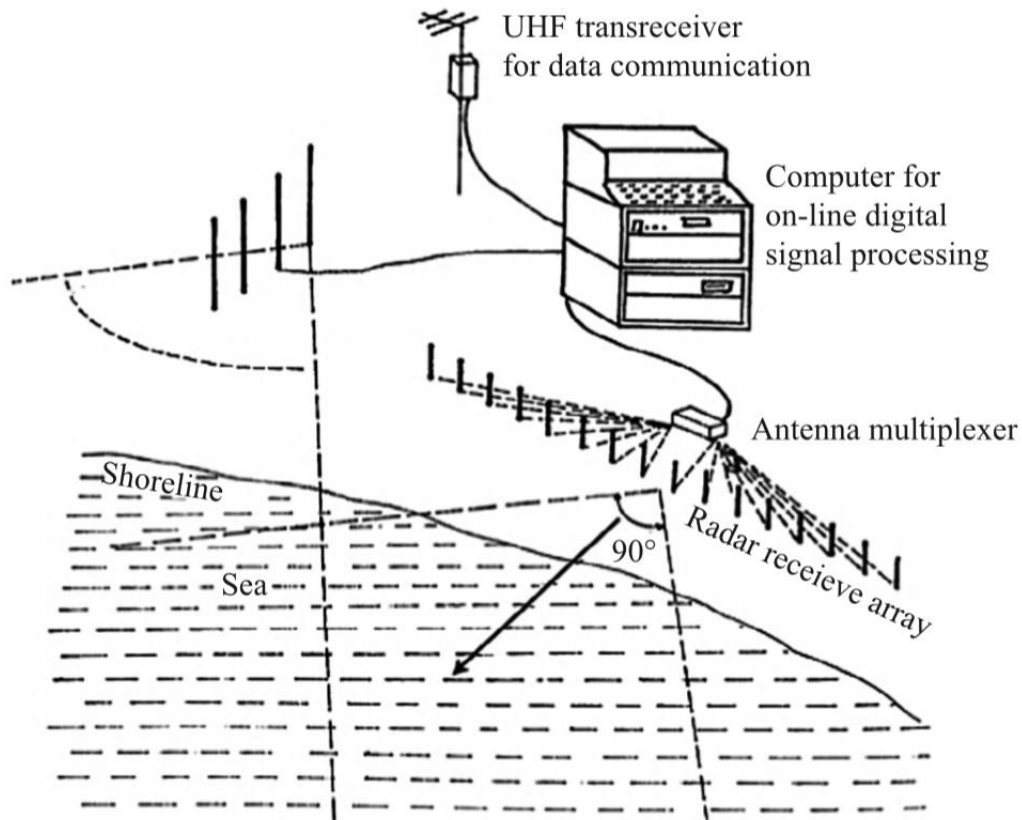


Figura 16: Configuração típica de um sistema OSCAR [6].

Para obter o melhor resultado possível destes sistemas, muitas precauções devem ser tomadas no âmbito da sua instalação. A localização do radar precisa de ser escolhida de modo a que a antena tenha uma visão desobstruída sem ser sombreada por prédios ou colinas. A antena deve estar localizada o mais próximo possível da água, preferencialmente dentro de 50 metros e ao nível do mar, caso contrário, para uma extensão maior do que 100 metros, o sinal é severamente atenuado.

2.5.3 WERA - *Wellen Radar*

A WERA (*Wellen Radar*) é um sistema de radar de alta frequência desenvolvido na Universidade de Hamburgo, na Alemanha. A WERA funciona com um sinal de onda contínua modulada por frequência (FMCW), através de “*chirps*” (técnica para compressão de impulso), com a possibilidade de combinar diferentes configurações da antena recetora. A WERA pode ser operada com até 16 antenas *phased-array*. Quando operado com um arranjo linear, a informação sobre o estado do mar também pode ser obtida através de bandas espectrais de segunda ordem. Uma outra vantagem é a flexibilidade na resolução de alcance entre 0,3 e 1,2 km,

em vez de uma resolução constante de cerca de 2 km para o CODAR. A resolução do alcance por intermédio dos *chirps* FMCW é mais complexa, no entanto é mais vantajoso em vários aspetos. Permite mais flexibilidade na alteração da frequência de transmissão e resolução de alcance. Em particular, a relação S/N pode ser melhorada evitando problemas de *aliasing*.

2.6 Conclusão

Neste capítulo especificou-se que os sistemas de radar de alta frequência são capazes de fazer medições de correntes de superfície oceânica, de ondulação marítima e de ventos de superfície, assim como de detetar embarcações e alertar sobre a ocorrência de *tsunamis*. Para tal, um sinal eletromagnético é transmitido pelo radar e, quando este atinge a superfície irregular do mar, uma parte da energia incidente é refletida ou espalhada de volta ao radar. O sinal de retorno contém a informação sobre a superfície do mar. A distância do alvo está relacionada com o tempo de propagação. A velocidade está diretamente relacionada com o desvio de *Doppler*. A direção do alvo depende do facto de o sistema ser *phased array* ou *direction finding*. O espectro do sinal recebido de primeira ordem relaciona-se com as correntes de superfície, a segunda ordem com a ondulação marítima e a relação entre os picos de *Bragg* com a direção do vento. Identificou-se os sistemas operacionais, respetivamente a CODAR *SeaSonde* para a *direction finding* e a WERA e OSCR para a *phased array*.

No capítulo seguinte descreve-se como são efetuadas as medições das correntes de superfície do oceano e da ondulação marítima para o sistema de radar da CODAR *SeaSonde*. E a seguir, independentemente do sistema, explica-se os diferentes métodos para determinar os ventos de superfície do oceano.

3 MEDIÇÕES DOS PARÂMETROS DO OCEANO E VENTOS DE SUPERFÍCIE

Visto que este trabalho incide sobre os sistemas de radar HF da *CODAR SeaSonde*, apresentam-se, especificamente para este sistema, os passos para determinar os parâmetros do oceano, particularmente para a determinação das correntes oceânicas e para a determinação das ondas do mar. Por último, identificam-se diferentes métodos para a determinação dos ventos de superfície pelos diferentes sistemas de radar.

3.1 Determinação das correntes oceânicas

Como referenciado anteriormente, as velocidades radiais da corrente são obtidas a partir dos espectros do eco do radar de primeira ordem medidos nos locais de radar individuais. O desvio de *Doppler* da frequência de *Bragg* ideal define um valor de velocidade de corrente radial e os valores espectrais nesse valor de deslocamento de *Doppler* são interpretados para fornecer os azimutes nos quais essa velocidade ocorre. Juntamente com o intervalo, definido pelo atraso de tempo, isso fornece as estimativas de velocidade da corrente radial em locais geográficos em intervalos, tipicamente, de 5° em torno de uma célula circular centrada no local do radar. Uma célula de alcance é um anel circular definido pelo alcance do radar e por um incremento fixo que é tipicamente 1,5, 3 e 10 km para frequências de transmissão nas bandas de 24 – 27, 12 – 14, 4 – 6 MHz, respectivamente.

Para tal, o *software* do sistema *SeaSonde* executa oito etapas a partir da série temporal de tensão complexa obtidas pelas três antenas [15]. O resumo dos procedimentos são:

- 1) As tensões do sinal complexas das três antenas *SeaSonde* $V_i, i = 1, 2, 3$ para cada célula de alcance são combinadas para fornecer os espectros de tensão (*voltage cross-spectra*) definidos por $V_i V_j^*$ onde $i, j = 1, 2, 3$. *Lipa* e *Barrick* [16] descrevem como as séries temporais de tensão (*time series*) dos elementos separados da antena *SeaSonde* são transformadas de *Fourier* para gerar espectros complexos de tensão (*self- e cross-spectra*).
- 2) O valor da tensão é calculado ao longo de um intervalo de tempo, que geralmente é ajustado normalmente para 10 min para a gama frequência de transmissão na ordem dos 12 – 14 MHz ou 24 – 27 MHz e 30 min para os

sistemas *SeaSonde* de longo alcance (4 – 6 MHz). Os espectros médios são denotados como $(V_i V_j^*)$.

- 3) É calculada a velocidade da corrente radial correspondente a uma dada frequência de sinal. A velocidade é proporcional à diferença de frequência da frequência ideal de *Bragg*, que é calculada usando a relação de dispersão para ondas do mar com comprimento de onda igual a metade do comprimento de onda do radar.
- 4) São definidos os limites no espectro do radar que delimitam a região de primeira ordem devido à dispersão do mar. São usados métodos empíricos para separar o espectro de primeira ordem em torno das frequências de *Bragg* ideais da vizinhança da menor amplitude, nomeadamente a estrutura de segunda ordem e ruído. Se a região de primeira ordem for muito ampla, a região anómala incluída nos limites externos levará a vetores de velocidade radial grandes e incorretos.
- 5) São usados métodos empíricos para verificar se uma região espectral de primeira ordem está contaminada por interferência de radar, se assim for, é excluída de análises posteriores.
- 6) Os espectros de tensão cruzada (*voltage cross-spectra*) são analisados usando o algoritmo MUSIC (*MUltiple Signal Classification*) para obter a direção de chegada do sinal, usando padrões de antena ideais ou medidos. Se forem usados padrões ideais, eles serão corrigidos pela primeira vez em relação às incompatibilidades de fase e amplitude entre as antenas de loop e o monopolo. Este cálculo resulta nas direções de chegada do sinal para cada valor da velocidade radial e para todas as células da faixa.
- 7) A análise descrita na etapa 6) normalmente produz vários valores de velocidade que são agrupados em função da distância, ou seja, em segmentos de células de alcance (denominados por *range cell*) definidos pelo ângulo de azimute do radar e incremento de azimute, ilustrado esquematicamente na Figura 17, na qual mostram o aumento da incerteza da velocidade radial com o alcance. Estes valores são calculados para dar o valor final de saída para aquele local e o desvio padrão é calculado.

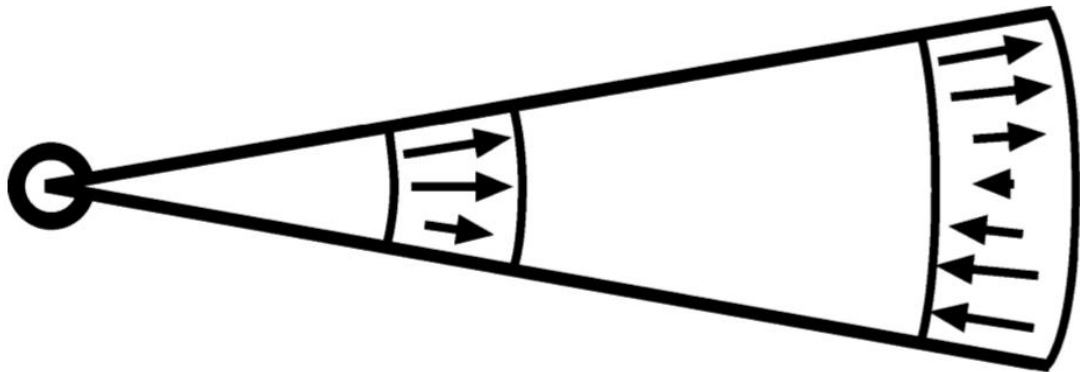


Figura 17: Ilustração esquemática do radar indicada pelo círculo e de duas células de alcance de radar [15].

8) Os resultados são então calculados para a média temporal ao longo de mapas radiais.

As velocidades totais da corrente são obtidas pela combinação das velocidades radiais de dois locais com área sobreposta (Figura 18). Uma grelha de pontos geográficos é formada sobre a área de cobertura do radar. Em cada ponto da grelha são formados círculos de média com um raio de alguns quilómetros ao redor do ponto. As componentes do vetor de velocidade total são calculadas ajustando-se às velocidades radiais dos dois locais que se enquadram no círculo de média.

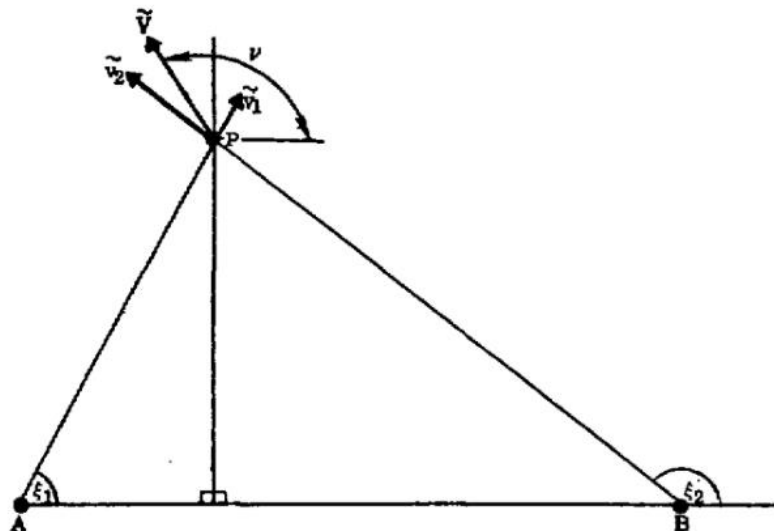


Figura 18: Combinação de vetores de correntes radiais (v_1, v_2) medidos a partir de dois locais de radar A, B no ponto P [16].

3.2 MUSIC- Multiple Signal Classification

O MUSIC (*MUltiple S_Ignal C_Lassification*) é um algoritmo de localização da direção de chegada (*direction-finding*) utilizado em radares com antenas compactas para “visualização” (detecção de alvos) numa área ampla [17]. O algoritmo permite determinar ângulos com espaçamento pequeno de múltiplos alvos com uma resolução numericamente eficiente e robusta. A utilização de *direction-finding* elimina a necessidade de sistemas fisicamente grandes para a formação de feixes direcionais, como no caso das antenas *phased array*. Este, quando utilizado para monitorização da superfície oceânica em HF, onde o alvo são as ondas do mar, permite extrair padrões complexos de corrente de superfície do oceano. Para isso, é explorado um elevado grau de singularidade da matriz de covariância do sinal da antena, na qual é utilizado como base para a extração de ângulos com média mínima.

O algoritmo implementado pelo *software* da *SeaSonde* [15], resumidamente, toma os seguintes passos:

- 1) As tensões das antenas são modeladas como um produto complexo do padrão da antena e das amplitudes dos sinais de eco de duas direções.
- 2) Na respetiva frequência de *Doppler* é formada uma matriz de covariância das tensões de sinal complexas das três antenas (dois *loops* cruzados e o monopolo), que representa as tensões de *cross spectra*.
- 3) É realizada uma análise de funções próprias na matriz de covariância. Os maiores valores próprios e respetivos vetores representam o eco do mar, enquanto que os menores representam o ruído.
- 4) A direção de chegada do sinal é determinada pelo princípio fundamental do MUSIC, em que os vetores próprios do feixe correto são ortogonais a todos os vetores próprios de ruído. O algoritmo encontra os ângulos em que isso ocorre.
- 5) As soluções são testadas com base em critérios de observação da potência de sinal, através da análise dos valores próprios e valores de ruído e pela relação de parâmetros do MUSIC.

O diagrama de radiação da antena é medido ou idealizado. Para medir o diagrama de radiação é necessário fazer um arco para um alcance constante com um *transponder*. Este transmite um sinal que é captado pela antena recetora da estação. Depois é analisado e gerado o mapa diagrama de radiação para ser utilizado pelo *software*.

3.3 Determinação das ondas do mar

O *SeaSonde* fornece medições robustas das correntes da superfície do oceano, obtidas a partir dos picos dominantes de primeira ordem no espectro de eco do radar. A derivação de informações de ondas do espectro de radar de segunda ordem é mais frágil, em parte porque o espectro de segunda ordem de menor energia está mais próximo do nível de ruído e tem maior probabilidade de ser contaminado [18]. Além disso, para as condições extremas das ondas do mar, de ondulação elevada, o espectro do radar satura quando a altura da onda excede um limite definido pela frequência de transmissão do radar. Este efeito de saturação é comum a todos os sistemas de radar HF. Quando o espectro do radar satura, o eco de primeira ordem funde-se com os ecos de segunda e de terceira ordem, e sua interpretação não é possível usando os métodos existentes. O limite de saturação na altura de onda significativa é definido aproximadamente por:

$$h_{sat} = \frac{2}{k_0} [m] \quad (11)$$

onde k_0 é o número de onda do radar. Para um sistema radar a transmitir a uma frequência de 13 MHz, o valor de h_{sat} é de 7.4 m.

Existem três etapas na interpretação do espectro do radar para fornecer informações sobre ondas do mar, respetivamente, a altura significativa, o período e a direção. Para começar, é efetuada a separação das regiões de primeira e segunda ordem. O *software SeaSonde* procura automaticamente os nulos entre os espectros de primeira e segunda ordem e determina as frequências de *Doppler* e os dados espectrais de radar correspondentes às duas regiões. Depois, a região de primeira ordem é analisada para fornecer o espectro de ondas oceânicas no número de onda de *Bragg*. Por fim, o espectro de radar de segunda ordem é analisado para fornecer parâmetros do espectro total de ondas oceânicas. Neste último, o espectro de segunda ordem é efetivamente normalizado pela primeira ordem, eliminando fatores multiplicativos desconhecidos produzidos por ganhos de antena, perdas de percurso, etc. Para a interpretação do espectro de segunda ordem, são utilizados dois modelos espectrais de ondas oceânicas. O primeiro considera a série geral de *Fourier*, na qual neste modelo se define o espectro do oceano como a soma dos cinco primeiros termos de uma série de *Fourier* sobre a direção. O segundo é o modelo de *Pierson-Moskowitz* com a distribuição direcional cardióide definida como o produto de fatores direcionais e não direcionais. A altura, o período e a direção

das ondas do oceano são definidos em termos dos parâmetros do modelo e são obtidas estimativas ajustando-se aos espectros de radar.

3.4 Determinação dos ventos de superfície do oceano

A extração da informação da direção do vento a partir de um radar HF não é recente. No entanto, no que diz respeito à validação, os resultados não têm sido satisfatórios. Dessa forma, ao longo dos anos têm existido diversas tentativas de melhoramento dos resultados, muitas delas através de fórmulas empíricas e com a atribuição de certas condições. A extração da informação da velocidade do vento, também tem sido alvo de discussão e depende da técnica dos radares que se utiliza e mais recentemente de novos métodos de cálculo.

Na teoria da propagação HF pelo mar, por *Barrick* em 1971 [19], são apresentados modelos matemáticos do espectro de ondas de vento para o oceano. E na análise e teoria do espectro HF de primeira ordem, em 1972 [20], *Barrick* escreve que existe uma relação entre os picos do sinal e a direção do vento.

Em 1973, *Long e Trizna* [21] apresentam o mapeamento da direção do vento, para um período de tempestade, através de um radar HF, a partir da relação da primeira ordem das linhas de *Bragg* (Figura 19).

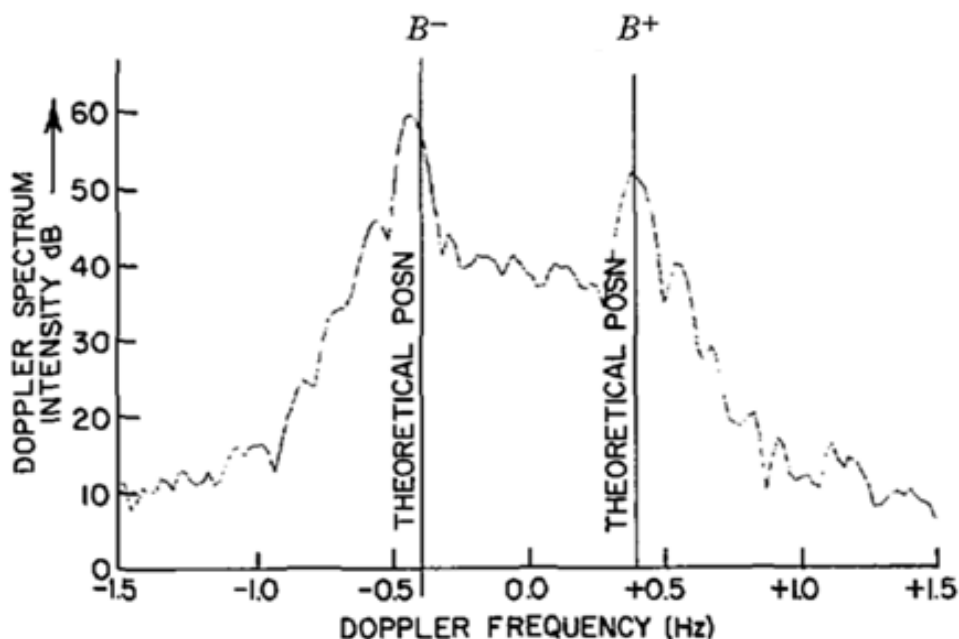


Figura 19: Espectro típico da frequência de *Doppler*. Os dois picos mais fortes B^- e B^+ [21].

Neste surge a expressão empírica da relação de *Bragg* (em dB), da seguinte forma:

$$\zeta = 10\log(B^+/B^-) \quad (12)$$

onde B^+ e B^- são o nível dos picos de *Bragg* positivo e negativo. Os picos de *Bragg* positivos no espectro estão associados às ondas que se aproximam do posto do radar, enquanto que os picos de *Bragg* negativos estão associados às ondas que se afastam da posição do radar. A amplitude destes picos está diretamente relacionada com a energia dentro dos componentes das ondas que se aproximam ou se afastam. É a relação entre as amplitudes dos dois picos de *Bragg* que contém a informação sobre a direção do vento, tal como definida em (12). Para o cálculo da direção, incluem o parâmetro direcional do vento (θ) no espectro modificado por *Pierson et al.*, com $\theta \leq \pi/2$, em que:

$$\zeta = \begin{cases} 24.6 \text{ dB}, & \theta = 0 \\ 0 \text{ dB}, & \theta = \frac{\pi}{2} \end{cases} \quad (13)$$

ficando (em dB):

$$\zeta = 20\log\left[\frac{(0.56 + 0.50 \cos 2\theta)}{\pi}\right] + 34.02 \text{ dB} \quad (14)$$

Resolvendo (14) em função de θ , obtém-se:

$$\theta = \frac{1}{2} \cos^{-1}\left(\frac{\pi 10^{\frac{\zeta - 34.02}{20}} - 0.56}{0.5}\right) \quad (15)$$

A equação resultante para θ é medida a partir do radial, com uma ambiguidade no seu sinal. Para resolver a ambiguidade, assumiram uma circulação no sentido anti-horário sobre o centro de baixa pressão e recorreram a uma tabela construída pela inversão da equação direcional e por valores da relação das linhas de *Bragg*.

Com um radar HF *skywave*, também denominado *over-the-horizon*, para alcances na ordem dos 3000 km, em 1975, *Stewart e Barnum* [22] fizeram a extração da direção e da velocidade do vento assumindo que as ondas oceânicas estão em equilíbrio com o vento local e que a sua distribuição direcional é simétrica em relação ao vento.

Obtêm a razão, r , na qual:

$$\zeta = 10\log(r) \text{ (dB)} \Leftrightarrow r = 10^{\frac{\zeta}{10}} \quad (16)$$

Se r for grande, o vento está na direção do radar. Se r for próximo de 0, o vento encontra-se em oposição ao radar. Se $r = 1$, está-se perante ventos cruzados com ambiguidade da direção. Esta ambiguidade é removida, conhecendo-se a circulação geral do vento, ou o vento em alguns pontos, e assumindo-se a continuidade no campo de vento. Para relacionar a relação r das linhas de *Bragg* com a direção do vento, assumem que a distribuição direcional da onda do oceano é:

$$g(\theta) = \cos^s(\theta/2) \quad (17)$$

onde θ é o ângulo entre a direção de propagação do radar e a direção média do vento, em que:

$$\theta = 2\arctan(r^{1/s}) \quad (18)$$

Resolvendo em dB, obtém-se:

$$\theta = 2\arctan(10^{\zeta/10s}) \quad (19)$$

Na qual s é calculado como função da velocidade do vento U , onde:

$$\begin{aligned} s &= 0.4 (\mu - 0.1)^{-1}, \quad \mu > 0.1 \\ s &= 4, \quad \mu < 0.1 \end{aligned} \quad (20)$$

O parâmetro μ caracteriza a transferência de momento do vento para as ondas. Este parâmetro está relacionado com a velocidade do vento em relação à velocidade da onda. Foram utilizados os valores medidos de U para calcular μ e s . Para medir a velocidade do vento, este é calculada a partir de termos de dispersão de ordem superior. Estes produzem bandas laterais que aumentam e ampliam as linhas de *Bragg* e utilizam a seguinte relação:

$$U = 39.4(B - 0.1) \quad (21)$$

B é a largura espectral em torno da linha de *Bragg* mais forte num ponto a 10 dB abaixo do pico.

Heron e Rose, em 1986 [23], verificam que o modelo $\cos^s(\theta/2)$ não se aplica a certos casos específicos, onde as ondas se comportam de maneira não linear e consideram:

$$G(\theta) = A\cos^s(\theta/2) \quad (22)$$

θ é o ângulo medido a partir da direção da energia máxima das ondas, s é o parâmetro de dispersão dependente da velocidade do vento e A é o fator de normalização. Além disso, apontam que a principal limitação em (22) é que é unimodal e encontra dificuldades com ondas longas e mudanças nas direções do vento. Para a direção do vento, calculam da seguinte forma:

$$\theta_w = \theta_0 \pm 2\arctan(r^{1/s}) \quad (23)$$

em que θ_0 é o azimute do feixe de radar, θ_w é o azimute do vetor de vento e r é a relação das densidades de energia espectral. O sinal \pm diz respeito à ambiguidade que não pode ser resolvida usando um azimute de feixe único. Para isso recorreram a uma amostragem do feixe em três diferentes ângulos simultaneamente.

No rastreamento de um furacão, com um radar “*over the horizon*” (OTH), por Georges *et al.*, em 1993 [24], dizem que para estimar a direção das ondas de superfície ressonantes e inferir a direção dos ventos de superfície, depende das medições de ζ de dois radares apropriados (separados a 180°) para um modelo assumido de $G(\theta)$. Além disso, referem que todas as suposições são questionáveis e há a necessidade de melhores modelos da relação entre vento e onda. E assumem que θ está linearmente relacionado com $\text{Log } \zeta$, se se medir θ pelo campo de visão do radar e derivam que:

$$\theta = \begin{cases} 0^\circ, & \zeta = -24 \text{ dB} \\ 90^\circ, & \zeta = 0 \text{ dB} \\ 180^\circ, & \zeta = 24 \text{ dB} \end{cases} \quad (24)$$

Ao determinar θ , o resultado do ângulo do vento é em função do campo de visão da direção do radar, mas não dá o resultado da sua componente transversal, na qual denominam de “ambiguidade entre esquerda-direita”. Isso significa que pela relação das linhas de Bragg não é possível distinguir se o vento está a soprar a 47 graus para a direita do campo de visão do radar ou se a 47 graus para a esquerda. No caso do furacão, resolveram através da continuidade e das propriedades globais do campo de dados. Para casos mais complicados sugerem a utilização de medições independentes da meteorologia ou oceanografia perto do local do radar.

Em continuidade do trabalho com o radar OTH, *Georges e Harlan*, em 1994 [25] apresentam uma relação empírica entre a direção do vento de superfície do oceano e as linhas de *Bragg* do espectro do radar HF, da seguinte forma:

$$|\theta| = 3.75 \zeta \text{ (dB)} + 90^0 \quad (25)$$

A primeira tentativa de mapear a direção do vento de um sistema da *SeaSonde* (CODAR) surge em 1997 por *Fernandez et al.* [26]. Atendendo que se o vento estiver a soprar por um tempo suficientemente longo e sobre uma área suficientemente ampla, a distribuição bidimensional da energia da onda de superfície em equilíbrio com o vento pode ser modelada como uma distribuição cardioide em função do ângulo que diz respeito à direção do vento. A formulação desta distribuição toma a mesma forma que (22). Os gráficos desta função cardioide são mostrados na Figura 20, juntamente com o espectro correspondente relativo à direção do vento com o radar. Pela Figura 20 verifica-se os casos com o vento soprando em direção (à esquerda), em ângulo reto (no meio) e em oposição (à direita) em relação à posição do radar. Os espectros abaixo mostram a altura relativa aos picos de *Bragg* para cada caso.

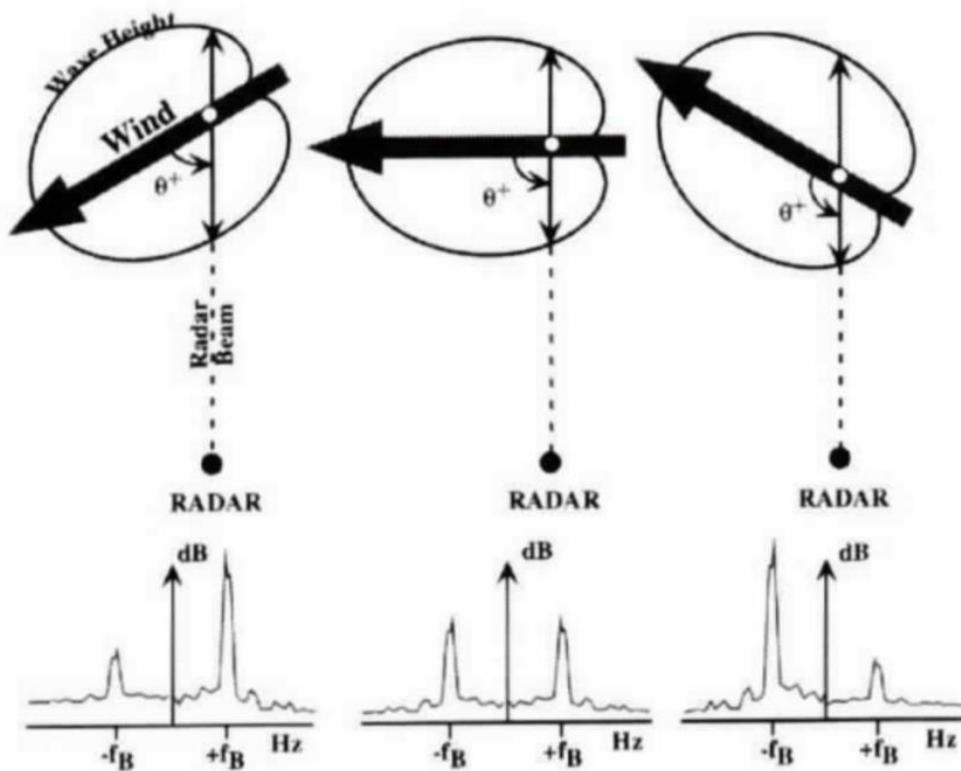


Figura 20: Amostra da distribuição da energia da onda de superfície em função do ângulo em relação à direção do vento [26].

Tal como vimos anteriormente, os picos de *Bragg* positivos no espectro estão associados às ondas que se aproximam do posto do radar e os picos de *Bragg* negativos estão associados às ondas que se afastam da posição do radar. A informação sobre a direção do vento obtém-se da relação entre as amplitudes dos dois picos de *Bragg*, tal como definida em (12). Se as ondas que se propagam em direção ao radar são muito mais fortes do que as ondas que se propagam em oposição ao radar, então a relação de *Bragg* é maior e positiva e o vento é assumido que está em direção com o radar (lado esquerdo da Figura 20). A condição contrária ocorre quando o vento está se afastando do radar. Se a direção do vento estiver perpendicular ao radar, então B^+ é aproximadamente B^- e a relação de *Bragg* próximo de zero (no centro da Figura 20). Considerando as equações (12) e (22), a relação de *Bragg* fica relacionada com a direção do vento, da seguinte forma:

$$\zeta = 10\log\left[\frac{\cos^s\left(\frac{\theta^- - 180^\circ}{2}\right)}{\cos^s\left(\frac{\theta^-}{2}\right)}\right] = 10\log\left[\tan^s\left(\frac{\theta^-}{2}\right)\right] \quad (26)$$

em que o θ^- é o ângulo entre a direção do vento e as ondas de *Bragg* que se afastam. A equação pode ser escrita para o ângulo θ^+ com a respetiva direção do vento. O parâmetro s é assumido (neste caso é utilizado $s = 4$). No entanto, existe uma certa ambiguidade nas soluções com o direito e o esquerdo ($\pm\theta$), a qual deve ser resolvida, usando observações independentes, pressuposto sobre a continuidade do tempo ou, preferencialmente, com um segundo radar a partir de um ângulo diferente. Resolvendo (26) em função de θ obtém-se a equação (19). Para o caso da velocidade do vento concluem que não é possível para estes sistemas.

Com um radar de multi-frequência (*MCR – Multi-frequency Coastal Radar*), *Paduan et al.*, em 1999 [27], descrevem o mapeamento de ventos costeiros e referem que a direção do vento baseado nos algoritmos da razão de *Bragg* não consegue detetar a velocidade do vento. No entanto, para um MCR já é possível realizar essa deteção. Qualquer algoritmo que relaciona retroespalhamento HF com a direção do vento deve assumir uma relação entre o vento e as ondas de vento que são geradas localmente. O modelo assumido é o mesmo que o anterior pela equação (22). Embora o princípio que relaciona as razões de *Bragg* de radar HF com a direção do vento seja simples, na prática há vários fatores a serem considerados, incluindo algoritmos usados para resolver θ e a sua ambiguidade, limitações de busca e duração do vento e calibração do vento para uma dada configuração de radar. A Figura 21 mostra como o resultado do vento é sensível ao modelo escolhido.

Para chegar aos valores da Figura 21, na relação de *Bragg*, ζ toma valores de 0 a 30 dB e calcula-se θ pelas fórmulas (15) de *Long* e *Trizna*, (19) de *Stewart* e *Barnum* e (25) de *Georges et al.*, em que nestes dois últimos faz-se com $-\zeta$.

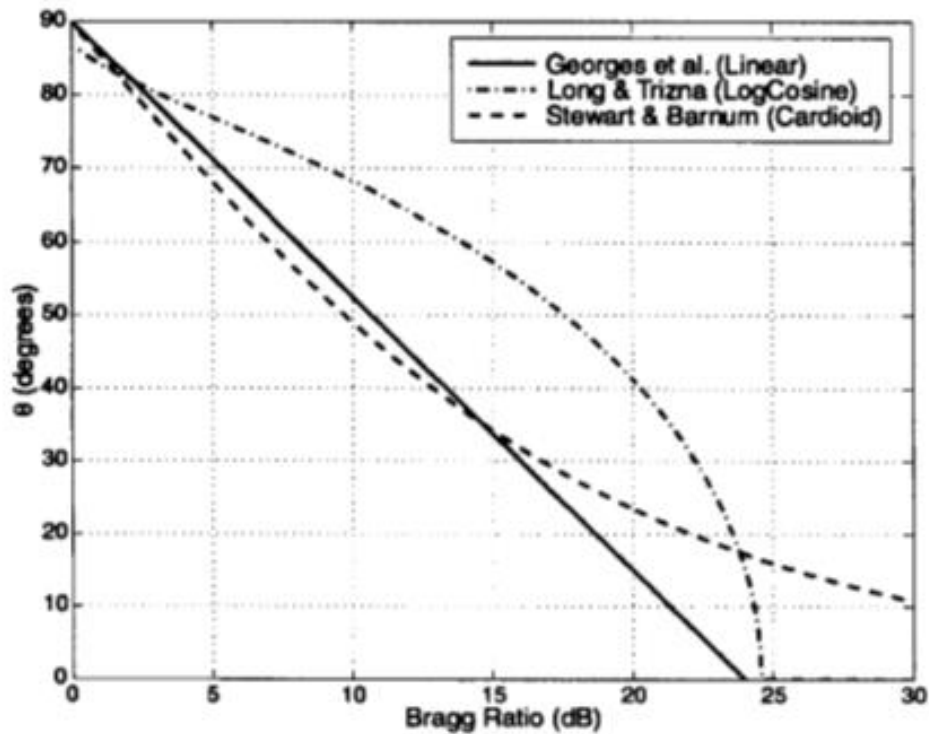


Figura 21: Direção do vento relativo ao campo de visão do radar para três modelos diferentes, Georges et al., Long e Trizna, e Stewart e Barnum [27].

Outra dedução obtida pelo MCR foi que o espectro obtido pelas frequências mais baixas são provavelmente das ondas de *swell* e não de ondas do mar geradas pelo vento. Para obter a direção do vento, em vez de combinar células radiais isoladas de um local de radar com uma célula do outro local, optam por incluir todas as estimativas de direção dentro de um raio de uma posição oceânica. Para tal, é feito o procedimento da seguinte forma:

- 1) Selecionam-se as linhas de *Bragg* úteis apenas para os casos em que ambos os picos de *Bragg* excedam o nível de ruído em pelo menos 3 dB.
- 2) Calculam-se as soluções de direção esquerda e direita (em relação à direção de visão específica do radar) de acordo com a seguinte fórmula:

$$\theta = 90((\zeta - 24)/24) \quad (27)$$

e expressa-se cada solução com um vetor unitário num sistema de coordenadas cartesianas leste e norte. A equação (27) é de *Georges et al.*

apresentada de forma diferente da (25), em que para se poder verificar a sua igualdade, resolve-se:

$$3.75(-\zeta) + 90 = -90((\zeta - 24)/24) \quad (28)$$

- 3) Identificam-se todas as soluções de direção dentro de 3 km de um local específico na grelha de mapeamento.
- 4) Faz-se a média, separadamente, de todas as soluções da esquerda e de todas as soluções de direita, componente por componente, para cada estação do radar. Para duas estações, gera quatro possíveis pares de soluções L_1L_2 , R_1R_2 , L_1R_2 , e R_1L_2 , em que L diz respeito à solução da esquerda, R à solução da direita, e 1 e 2 referem-se à localização do radar, como mostra a Figura 22.

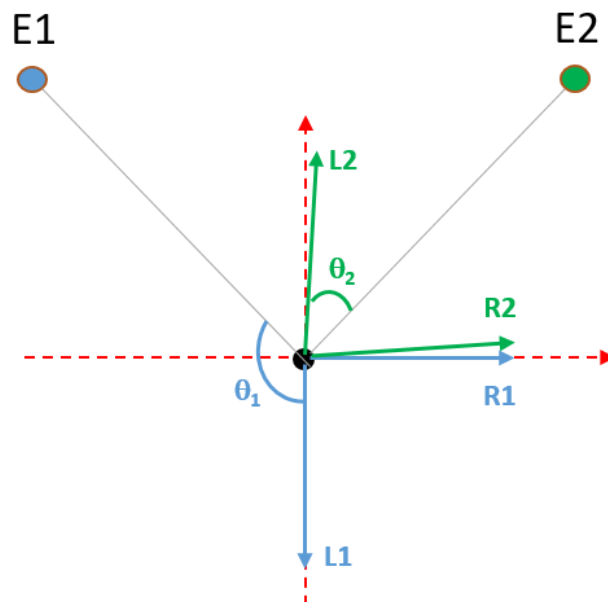


Figura 22: Pares de soluções (L e R) num ponto de interseção das estações do radar E1 e E2.

- 5) Determina-se a menor diferença angular entre os quatro pares de soluções. Pela Figura 22, verifica-se que a menor diferença angular é entre R1 e R2.
- 6) Escolhe-se a solução do ângulo esquerdo ou direito para a estação com a maior média de sinal-ruído como estimativa final para a direção do vento.

Este último passo, segundo o autor, é usado como reconhecimento que os resultados da estação parecem melhores do que as soluções em que são calculadas as médias.

Num exame detalhado da prática de usar o espectro de frequências para caracterizar o vento a partir das ondas do mar, Liu, em 2000 [28], levanta dúvidas

sobre os métodos utilizados, salientando que enfrentam margens de erro insatisfatórias e que na sua opinião os atuais modelos do espectro de frequência de ondas de vento está desatualizado.

Novamente com um radar MCR, *Drake et al.*, em 2003 [29], apresentam as fórmulas (24) e (25) da seguinte maneira:

$$\begin{cases} |\theta| = 3.75 \zeta + 90^\circ, & |\zeta| \leq 24 \\ \theta = 0^\circ, & \zeta > 24 \\ \theta = 180^\circ, & \zeta < -24 \end{cases} \quad (29)$$

A primeira equação representa o vento a soprar através do ângulo de visão do radar e as outras, teoricamente, ocorrem quando o vento está a soprar em direção ou em oposição ao radar. Além disso, este recorre à teoria da espiral de *Ekman*, em que é esperada uma rotação das correntes no sentido horário em relação ao vento, na qual utiliza uma tabela denominada por “*predictor matrix*” com os valores das correntes radiais e totais das diferentes gamas de frequência do MCR (neste caso, quatro frequências). Depois, este explora a relação entre a corrente e o vento, por intermédio de uma ferramenta de processamento *Partial Least Squares* (PLS), uma vez que a relação não é completamente compreendida, nem o vento é o único fator que afeta as correntes.

Na manifestação da direção do vento nos ecos de um radar HF do oceano, *Heron e Marrone* em 2010 [30], utilizam a relação de *Bragg* (12) para cada ponto da malha e assumem que o modelo direcional da onda, dado por (22), passa a ser:

$$G(k, \theta) = A(k) \cos^{2s}(0.5(\theta - \theta_0)) \quad (30)$$

onde $A(k)$ é escolhido de modo a que:

$$\int_0^{2\pi} G(k, \pi) d\theta = 1 \quad (31)$$

e demonstram que a ambiguidade é sujeita apenas às limitações do modelo de direção do vento cosseno, como mostra a Figura 23.

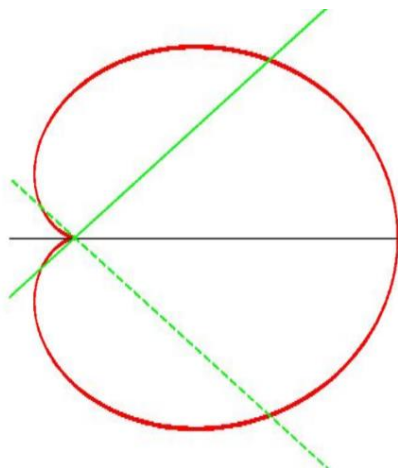


Figura 23: Modelo de direção do vento cosseno [30].

A relação de *Bragg* para os 45° (a verde sólido) numa direção de visão do radar é a mesma para a direção de visão do radar a -45° e isso cria a ambiguidade. Se duas estações de radar HF estão a operar sobre a mesma área do mar, então a ambiguidade (pela Figura 23) pode ser resolvida e uma direção do vento pode ser determinada para aquela hora e local.

Em 2012 [31], Shen com radares OTH pela *WERA* assume que a direção do vento é idêntica à direção média das ondas curtas (*short waves*) do mar, que são sensíveis às mudanças do vento local e propõe um novo modelo para o espectro direcional de ondas geradas pelo vento em águas profundas:

$$G(f, \theta) = 0.5\beta \operatorname{sech}^2(\beta\theta) \quad (32)$$

β é o parâmetro de espalhamento direcional que depende fortemente da velocidade do vento local, da frequência de pico da onda e de parâmetros cujos valores são desconhecidos, o que causa dificuldades para o cálculo do vento. A direção do vento toma a forma:

$$\theta_i = \phi_i \pm \frac{1}{2\beta} \ln \left| \frac{1 - R_i^{\frac{1}{2}} e^{(-\beta\pi)}}{R_i^{\frac{1}{2}} e^{(\beta\pi)} - 1} \right| \quad (i = 1,2) \quad (33)$$

em que a direção do vento toma valores de $[-\pi, \pi]$, i representa a interseção num ponto da malha de dois feixes de duas estações de radar, ϕ_i é o azimute do feixe de radar e a relação:

$$R = \frac{\sigma_1(f_B)}{\sigma_1(-f_B)} \quad (34)$$

onde $\sigma_1(f_B)$ é a potência do pico de primeira ordem.

A segunda tentativa registrada para obter a direção do vento por sistemas da *SeaSonde* (CODAR) surge por *Lipa et al.* em 2014 [32], na qual escrevem que o método baseado na análise da razão de amplitudes de *Doppler* positivas para negativas num dado valor de frequência de *Doppler* é instável quando o denominador é pequeno, sendo substituído pela abordagem seguinte. Para estimar a direção da onda do mar a partir das amplitudes do eco do radar, elas são ajustadas a um padrão cardioide para a distribuição direcional da onda de *Bragg*. Supõe-se que as direções das ondas curtas de *Bragg* se aproximem da direção do vento. Para ondas de avanço/recuo, ou seja, *Doppler* positivo/negativo, a dependência direcional f^+ , f^- das amplitudes de sinal são modeladas como:

$$\begin{aligned} f^+ &= \cos^4\left(\frac{\phi - \phi^*}{2}\right) \\ f^- &= \cos^4\left(\frac{\phi + \pi - \phi^*}{2}\right) \end{aligned} \quad (35)$$

e as amplitudes do sinal a^+ , a^- como:

$$\begin{aligned} a^+ &= Af^+ \\ a^- &= Af^- \end{aligned} \quad (36)$$

ϕ^* é a direção do vento e A é uma constante multiplicativa desconhecida que é a mesma para o *Doppler* positivo/negativo, mas diferente para cada local do radar.

As amplitudes são obtidas para todos os pontos *Doppler* na região de primeira ordem positiva/negativa para dois locais de radar (designados Site 1, 2). Para tal, gera-se uma grelha sobre a área de cobertura do radar. Em cada ponto da grelha, formam-se círculos de média com 15 km de raio em torno de cada ponto da grelha. Dentro do círculo de média ao redor do i^{th} ponto da grelha representam-se as n amplitudes a_i^+ , a_i^- como segue:

$$\begin{aligned} a_{i1}^+, i = 1, 2, \dots, n_1^+ \text{ Site 1, Doppler positivo} \\ a_{i1}^-, i = 1, 2, \dots, n_1^- \text{ Site 1, Doppler negativo} \\ a_{i2}^+, i = 1, 2, \dots, n_2^+ \text{ Site 2, Doppler positivo} \\ a_{i2}^-, i = 1, 2, \dots, n_2^- \text{ Site 2, Doppler negativo} \end{aligned} \quad (37)$$

Para um determinado local do radar e sinal *Doppler*, a soma dos desvios quadrados entre as amplitudes medidas e o modelo é formada. Para os dois sítios e *Doppler* positivo/negativo, a soma dos quadrados mínimos (*least-squares sum*) é dada por:

$$SUM = \sum_{i=1}^{n_1^+} (a_{i1}^+ - A_1 f_{i1}^+)^2 + \sum_{i=1}^{n_1^-} (a_{i1}^- - A_1 f_{i1}^-)^2 + \sum_{i=1}^{n_2^+} (a_{i2}^+ - A_2 f_{i2}^+)^2 + \sum_{i=1}^{n_2^-} (a_{i2}^- - A_2 f_{i2}^-)^2 \quad (38)$$

Isso é minimizado, ou seja, procura determinar o melhor ajuste, para fornecer estimativas das amplitudes A_1 , A_2 e direção do vento ϕ^* . Esta análise é realizada em cada ponto da grelha para produzir um mapa de direção do vento. O mapeamento da direção do vento requer uma estimativa do feixe em um dado valor de desvio *Doppler* de ambos os picos de *Bragg* positivos e negativos. A área coberta pelas direções do vento é, portanto, menor do que a coberta pelos vetores de velocidade de corrente, o que requer uma estimativa de carga a partir de apenas um pico de *Bragg*. Além disso salientam que a direção do vento para os sistemas da *SeaSonde* está numa fase preliminar e que são necessários mais estudos.

Outra abordagem para sistemas da *SeaSonde* (*CODAR*), por *Zhang* em 2016 [33], utiliza dois métodos independentes para estimar a direção do vento a partir das correntes de superfície e da espiral de *Ekman*. O primeiro método é um método complexo de análise de componentes principais e de funções ortogonais empíricas (*PCA – principal component analysis; EOF – empirical orthogonal function*) utilizado para estimar a espiral de *Ekman* e é aplicado a vetores de corrente relativa de vento e de superfície de modo a estimar os parâmetros de desvio de vento. No segundo método, os parâmetros do vento são estimados pelo método dos mínimos quadrados (*LSM – Least Squares Method*).

Também em 2016 [34], *Kirincich* com dados da *SeaSonde*, faz uma comparação da relação de *Bragg* com os modelos existentes e considera que a função secante hiperbólica é de um modo geral a mais representativa e, dessa forma, o modelo mais adequado apresentado em (32). Depois verifica uma relação empírica entre a potência do sinal com a velocidade do vento e calcula o modelo combinado para representar a potência total, da seguinte forma:

$$P(\pm f) = \kappa + (E_w + E_a) \operatorname{sech}^2(\beta\theta) \quad (39)$$

onde P é a potência para as frequências de *Bragg* f , κ é a potência de referência dependente da localização, E_w representa a forma de uma equação típica de

crescimento de energia das ondas e E_a caracteriza a diminuição da potência com o aumento da distância. Sendo que:

$$\begin{aligned} E_w &= W_{fact}(U_{10}/c)^2 \\ E_a &= -(r/r_{max})(U_{10}/R_{fact})^3 \end{aligned} \tag{40}$$

na qual U_{10} é a velocidade do vento, c é a velocidade de fase da onda de *Bragg*, W_{fact} é uma constante que representa a potência obtida por unidade de vento em cada local, R_{fact} é uma constante que determina a importância do termo de perda de potência e (r/r_{max}) é o fator de alcance. Por último, *Kirincich* conclui que o modelo desenvolvido permanece excessivamente simplista para alguns pontos chave e que existem otimizações mais complexas para os conjuntos lineares de equações e considera que devem ser feitos esforços adicionais na formulação do modelo por forma a fornecer reduções mais substanciais de erro.

Mais estudos têm vindo a ser realizados em 2017 [35] e 2018 [36] para o mapeamento da direção do vento com radar HF, com matemáticas e modelos cada vez mais complexos, não sendo abordados no âmbito deste trabalho, mas relevantes como referências para possíveis trabalhos futuros.

3.5 Conclusão

Neste capítulo verificou-se como se determina as correntes de superfície e as ondas do mar particularmente para o sistema de radar HF da CODAR *SeaSonde*. Para determinar as correntes de superfície, o *software* aplica oito etapas, entre as quais: converte as séries temporais de tensão, por intermédio da transformada de *Fourier*, para gerar os dados do espectro; emprega o algoritmo MUSIC para criar as componentes radiais e, com a combinação de duas estações, obtém as velocidades totais. No caso da ondulação marítima, o *software* separa as componentes de primeira e segunda ordem do espectro e por intermédio de dois modelos espectrais define os parâmetros de altura, período e direção da onda. Para extrair a informação dos ventos de superfície do oceano, determina-se a relação dos picos de *Bragg* e calcula-se a direção do vento a partir de um modelo de distribuição direcional da onda do oceano. Os resultados da direção do vento são obtidos com ambiguidade de sinal onde são aplicados métodos para determinar a solução.

No capítulo seguinte descreve-se o sistema da CODAR *SeaSonde*, aquando instalado na Madeira, no que diz respeito ao equipamento, configuração e funcionamento, assim como dos dados utilizados para a realização deste trabalho.

4 RADAR HF NA ILHA DA MADEIRA, PROJETO OOM

No âmbito do Projeto OOM (Observatório Oceânico da Madeira), foi instalado na ilha da madeira, pela *Qualitas Instruments (QUALITAS)*, um sistema de radar de alta frequência de 13,5 MHz, para obtenção de mapas de correntes e de ondas, entre julho de 2017 e julho de 2018. Faz-se uma descrição do sistema, no que diz respeito à sua localização e composição do equipamento. Seguidamente, apresentam-se a configuração e a calibração do sistema. Depois, por intermédio do diagrama de funcionamento, faz-se um enquadramento geral do sistema. Posteriormente, mostram-se as ferramentas de monitorização e visualização, assim como o formato dos ficheiros disponibilizados no âmbito deste estudo. Por último, faz-se referência aos dados utilizados provenientes de satélite e modelo numérico WRF, onde é salientada a relevância para validação dos resultados deste trabalho.

4.1 Descrição do sistema

O sistema era composto por duas estações da *CODAR SeaSonde*, uma localizada na Biblioteca Municipal de Câmara de Lobos (Figura 24) e a outra no Centro de Maricultura da Calheta (Figura 25). Ambas as estações enviavam os dados para uma estação central localizada nas instalações da *QUALITAS*. Este servidor central, por sua vez, era responsável por processar os dados radiais das estações remotas de modo a gerar os mapas totais de correntes de superfície.



Figura 24: Biblioteca Municipal de Câmara de Lobos (panorâmico). Antena recetora à esquerda e antena emissora à direita.



Figura 25: Centro de Maricultura da Calheta. Antena recetora à esquerda e antena emissora à direita.

Cada estação era composta por uma antena de transmissão, uma antena de receção, um bastidor de controlo, cabos entre o bastidor e as antenas e uma antena GPS (*Global Positioning System*) [37] [38]. A antena de transmissão é composta por um único elemento ativo, com uma altura a rondar os 8 m (mastro de 5,4 m e chicote de 2,4 m), agregado a uma base sólida. A antena recetora (Figura 26) é constituída por um mastro vertical de 3,8 m, um *Dome* onde se encontram os *Loops* internos e um dipolo de 2,4m.

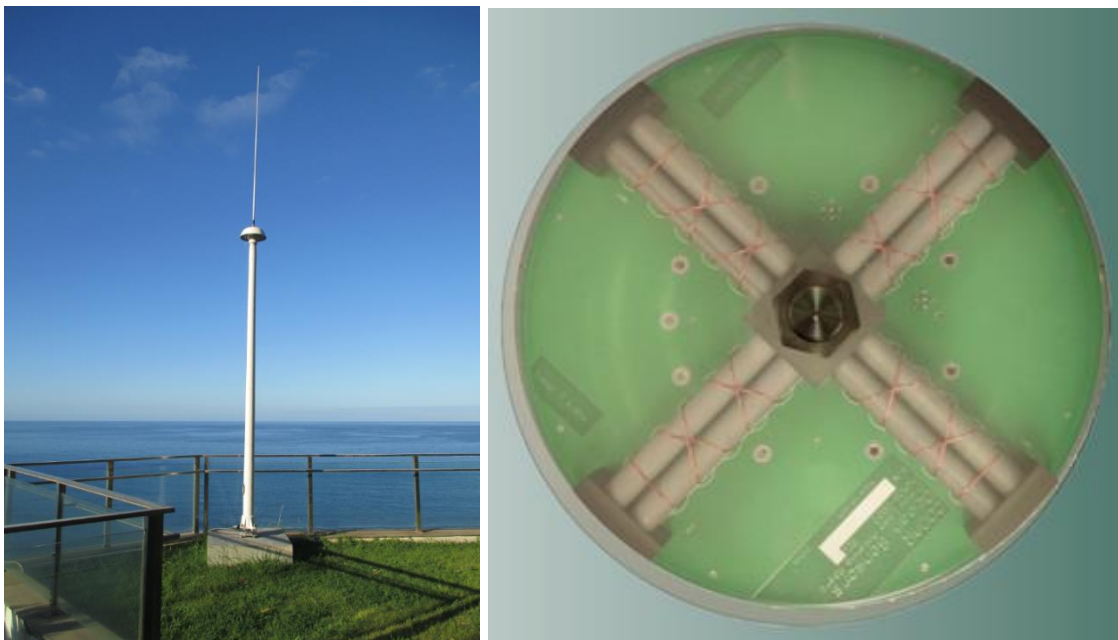


Figura 26: Antena recetora CODAR na estação da Biblioteca Municipal de Câmara de Lobos no lado esquerdo. Interior do *Dome* com *loops* cruzados [39] no lado direito.

O bastidor (Figura 27) integra o módulo de receção e o de transmissão de sinal, um computador Mac Mini com o *software* da *CODAR SeaSonde*, um *modem*

de comunicação, um sistema UPS (*Uninterruptible Power Supply*), disjuntores de proteção do equipamento e um módulo de proteção contra sobretensões.



Figura 27: Bastidor na estação da Biblioteca Municipal de Câmara de Lobos.

Em relação aos cabos, são necessários cinco cabos para ligar o bastidor às diferentes antenas, respetivamente, três cabos RG58 para os três canais da antena recetora (canal 1 e 2 são os *loops* direcionais e o canal 3 o dipolo omnidirecional), um cabo para a antena GPS e um cabo RG8 para a antena transmissora.

4.2 Configuração

A configuração é feita no âmbito da instalação de cada estação por intermédio das aplicações e dos controladores provenientes do *software* da *CODAR SeaSonde*. A cada estação foi atribuído um código: BMCL para a Biblioteca Municipal de Câmara de Lobos e CALH para o Centro de Maricultura da Calheta. Foi guardada para cada estação a respetiva posição geográfica, sendo a frequência central de transmissão de 13,5 MHz para uma resolução com um alcance de 1,5 km, como mostra a Figura 28.

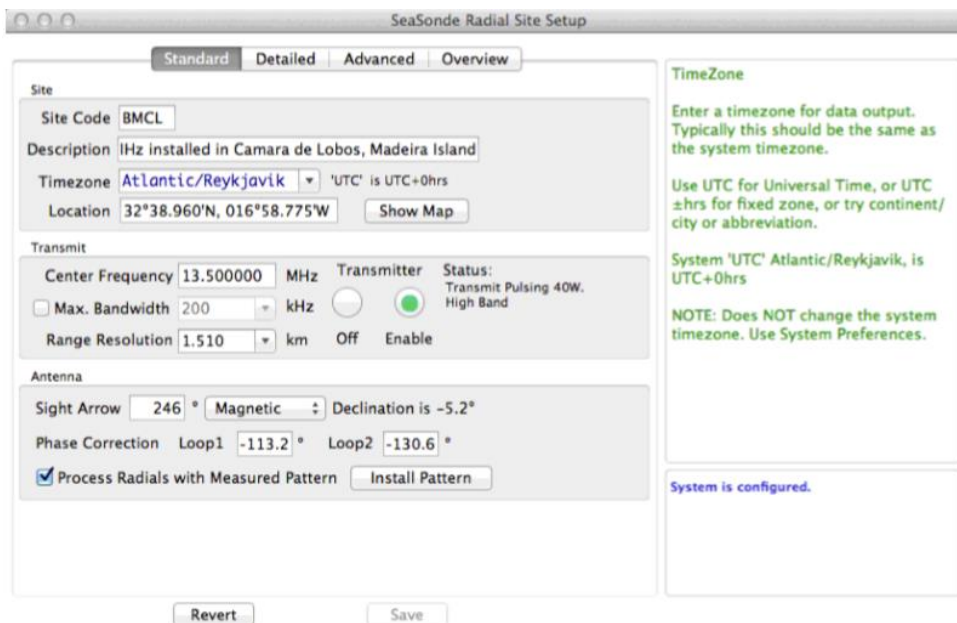


Figura 28: Definições da estação da Biblioteca Municipal de Câmara de Lobos.

Foram configurados os parâmetros de processamento do espectro, radiais e ondas (Figura 29), com 512 amostras de *Doppler*, 2 Hz de *Sweep Rate*, 96 *range cells* e uma resolução angular de 5 graus.

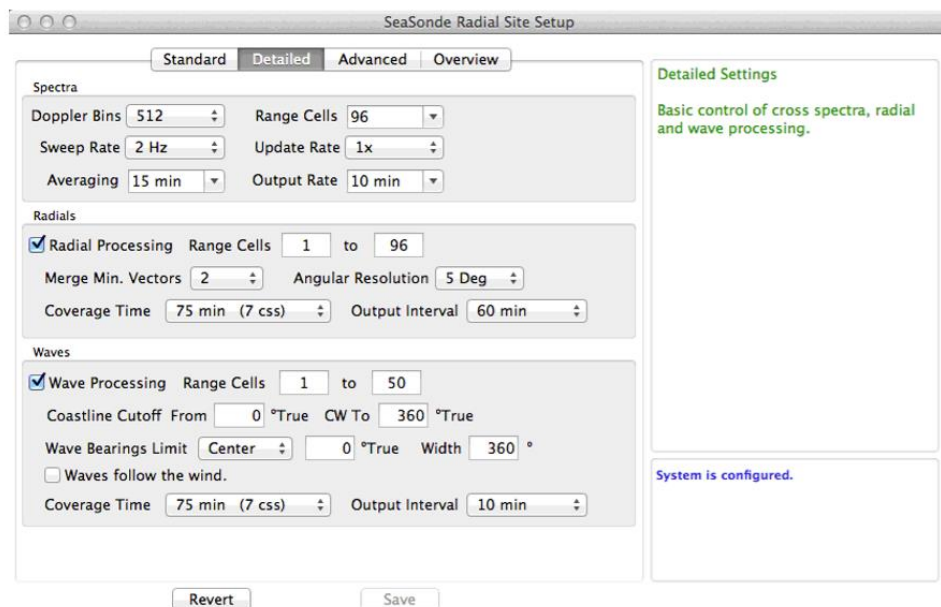


Figura 29: Definições de processamento para o espectro, radiais e ondas.

As antenas recetoras foram configuradas pelo controlador da *SeaSonde*, como mostra a Figura 30, com uma frequência central de 13,5 MHz e uma largura de banda de 99 kHz.

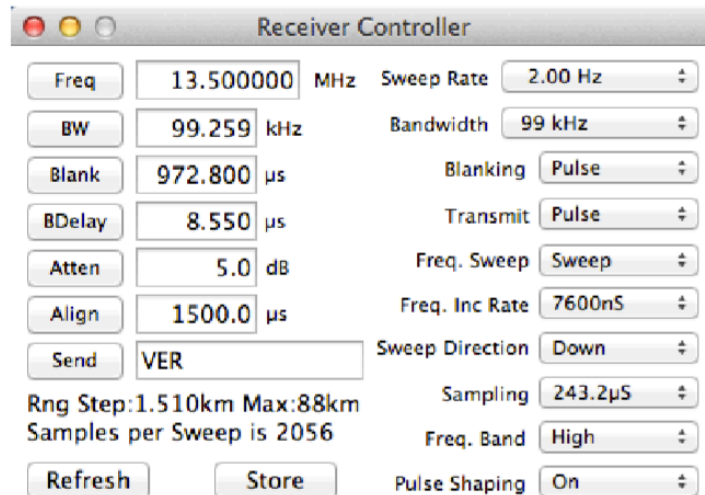


Figura 30: Definições do controlador da SeaSonde.

4.3 Calibração

A calibração faz parte do processo de instalação de cada estação. Consiste em medir o diagrama de radiação da antena recetora fazendo um arco a uma determinada distância constante (Figura 31).



Figura 31: Percurso efetuado na medição do diagrama de radiação da antena recetora na estação BMCL.

A medição foi feita por intermédio de um *transponder* que emite um sinal numa embarcação em redor do radar. O *software* regista o diagrama de receção dos *loops* e do monopolo, na qual pretende-se que fique próximo do diagrama ideal (Figura 32).

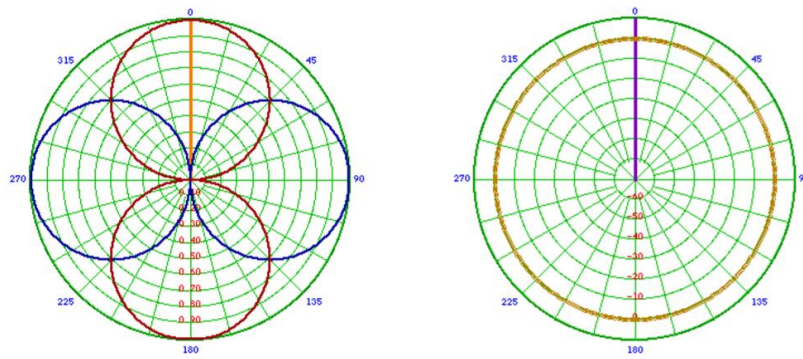


Figura 32: Diagrama de radiação ideal dos *loops* 1, 2 (esquerda) e monopolo (direita).

Apesar de as antenas estarem fabricadas para um diagrama de radiação ideal, estas terão uma interação com o ambiente onde se encontram, alterando o seu padrão. A medição do diagrama da antena (APM - *antenna pattern measurement*), pela CODAR, é facilitada pela execução da medição e pela implementação dos dados processados em tempo real, como parte do processo de calibração [40].

4.4 Diagrama de funcionamento

O sistema de radar pode ser dividido em três partes de funcionamento: a emissão e recepção do sinal; o processamento comum à obtenção dos parâmetros do oceano; e o processamento individual de cada parâmetro. O diagrama de funcionamento está representado pela Figura 33.

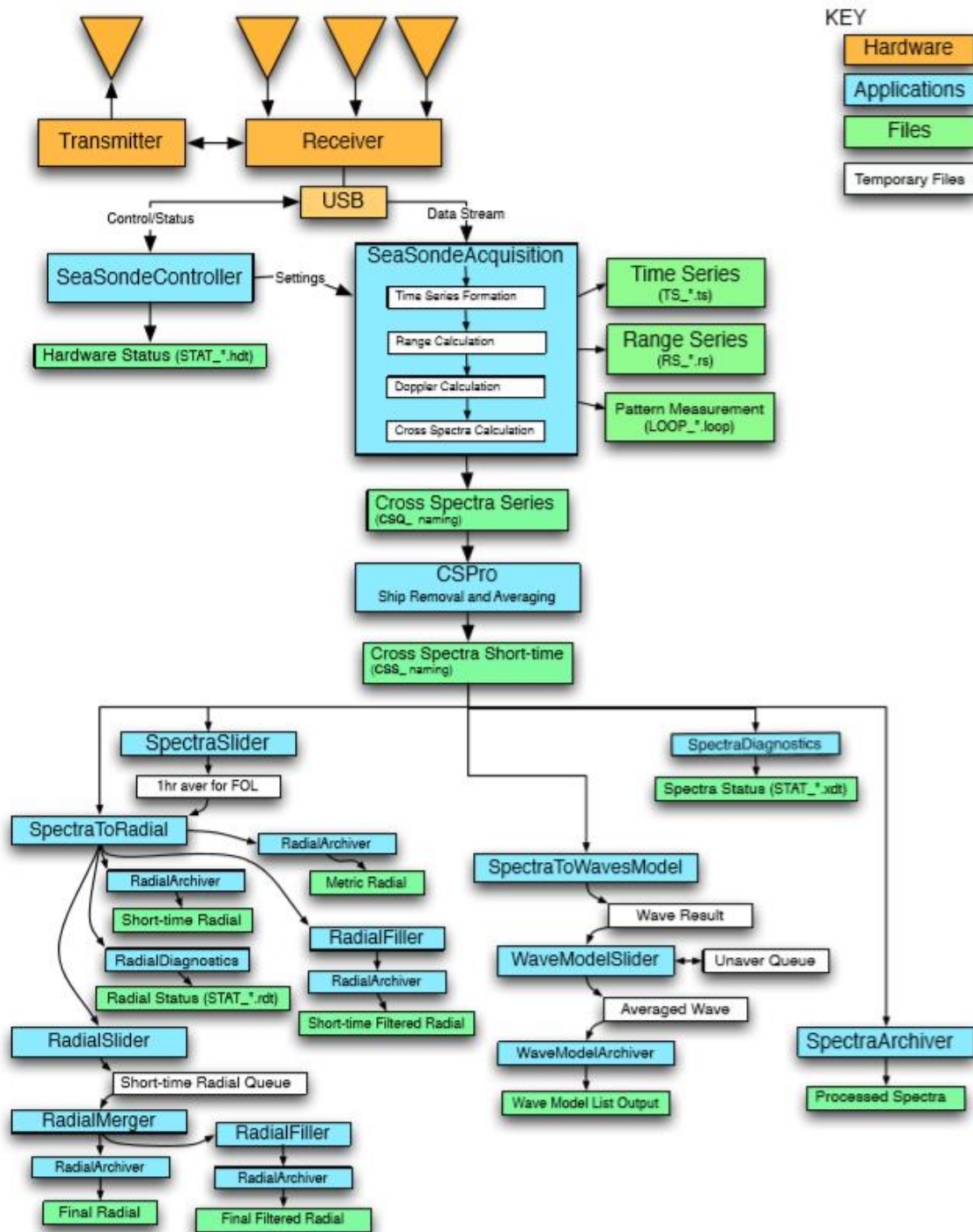


Figura 33: Diagrama de funcionamento do sistema de radar da CODAR.

A parte do *hardware* está representada a laranja, sendo composta pela antena emissora, a antena recetora (2 *loops* e um monopolo), o transmissor, o recetor e o USB. O USB é uma chave de *hardware* com uma licença válida. A informação do eco do sinal é enviada para um computador e por intermédio do *software* da *SeaSonde* é processado pelas aplicações (a azul na Figura 33).

O *seasonde controller* é a aplicação destinada a controlar o recetor. Este comunica com o recetor de modo a que seja possível fazer as configurações pretendidas, monitorizar o estado de *hardware*, gerar registos/alertas e tomar medidas preventivas em situações de falhas [41].

O *SeaSonde acquisition* permite a aquisição da informação recolhida pela antena recetora e faz o tratamento dos dados. Para tal, guarda as séries temporais (*Time Series*) e os cálculos, nomeadamente para obtenção da distância (*Range Series*), *Doppler* e *cross spectra*.

O CSPro remove os sinais de navios e de corrente contínua e faz o cálculo das médias do espectro de *Doppler* por intermédio de um exponencial suavizador [42].

Segue-se a ramificação para as aplicações (do diagrama Figura 33) destinadas à obtenção dos parâmetros radiais e das ondas, assim como aplicações de diagnósticos e de arquivo.

Os ficheiros resultantes das aplicações (a verde na Figura 33) são temporários ou de arquivo (*output*). Os ficheiros temporários são eliminados de acordo com um prazo de manutenção, devido ao seu enorme volume de dados, que, em pouco tempo, esgota a capacidade do disco. Os ficheiros de *output* são depois copiados para a estação central para disponibilização de resultados e para o cálculo das radiais totais.

No âmbito deste trabalho de projeto, o prazo de manutenção dos dados temporários foi alargado, para que fosse possível recolher os dados espectrais. Este procedimento foi efetuado mensalmente em cada estação por intermédio de um disco externo. Geralmente, ficava de um dia para o outro a copiar. Devido ao elevado número de ficheiros, a cópia por rede seria problemática, pois podia comprometer o fluxo normal de informação entre a estação e o servidor central e exceder o valor da cota de transferência de dados paga à operadora de rede.

4.5 Ferramentas de monitorização e visualização

Essencialmente, eram disponibilizadas duas ferramentas de monitorização e visualização em tempo real, nomeadamente o *Radial Site* de cada estação e a plataforma *PORTUS*.

4.5.1 SeaSonde Radial Site

Cada estação continha um servidor *web* do *SeaSonde Radial Site*, na qual era possível, num *browser* fazendo um *login*, monitorizar remotamente o estado, as configurações, os diagnósticos, os dados do espectro, os radiais e as ondas [43].

Pela Figura 34, à esquerda, verifica-se a lista de navegação. O *Status* é destinado a uma visualização rápida do funcionamento da estação por intermédio de quatro secções, respetivamente, lista de problemas a alertar (caso existam), informações sobre a configuração, apresentação gráfica dos últimos vetores radiais e dos últimos dados espectrais obtidos. Em *Details* seria possível verificar, com maior detalhe, a informação sobre os recetores, os transmissores, os ficheiros de dados, o processador e as aplicações em execução. Alguma dessa informação útil é a temperatura do *hardware*, a potência de transmissão e o espaço de disco. Em *Radials*, *Waves* e *Spectras* conseguia-se visualizar graficamente os dados anteriores disponíveis por intermédio de um menu de calendário de datas. Em *Diags* e *Logs* permitia aceder ao historial de registo de diagnósticos e de sistema. Por último, *Settings* era destinado aos administradores para controlo do servidor.

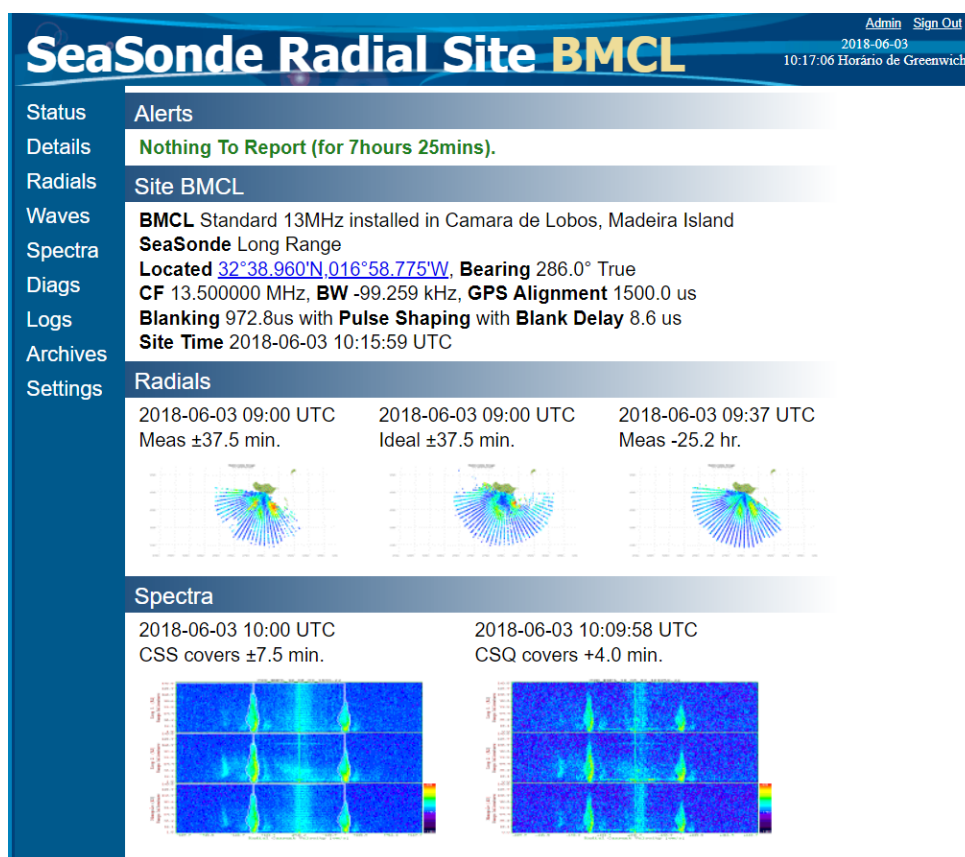


Figura 34: *SeaSonde Radial Site* para a estação BMCL.

4.5.2 Plataforma *PORTUS*

PORTUS é uma plataforma *web-based* que permite que diferentes utilizadores visualizem os seus produtos de dados da *SeaSonde* com outros dados de sensores ou com resultados de modelos numéricos num único ambiente simples e intuitivo [44]. Um dos objetivos desta plataforma é agregar todos os produtos dos radares HF da *SeaSonde* para combater a dispersão da informação e explorar o potencial das capacidades de informação. Outra finalidade é elevar o valor dos dados HF num nível cada vez maior de utilização operacional [45].

Na Figura 35 visualizam-se pela plataforma *PORTUS* as correntes de superfície medidas pelo sistema de radar HF na Madeira para uma determinada data. Pelo menu no lado direito é possível ativar ou desativar o tipo de informação que se pretende analisar.

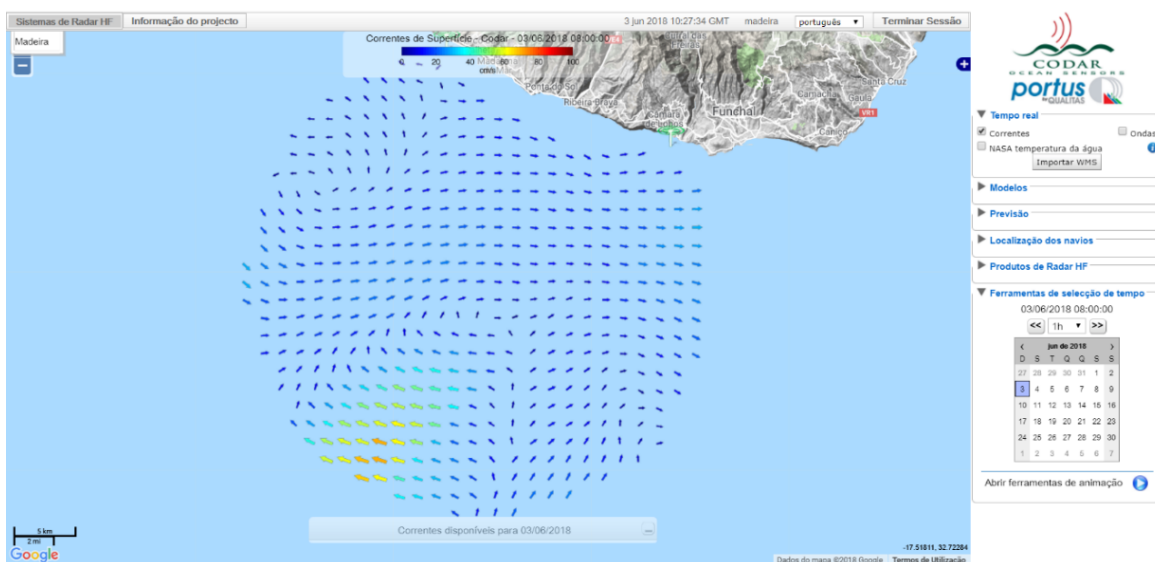


Figura 35: Plataforma *PORTUS*: correntes de superfície na costa sul da ilha da Madeira pelo sistema de radar HF da CODAR.

Ao ativar no menu a informação das ondas obtém-se a Figura 36. No caso da ondulação é possível fazer uma apresentação gráfica temporal da direção e altura significativa (Figura 37).

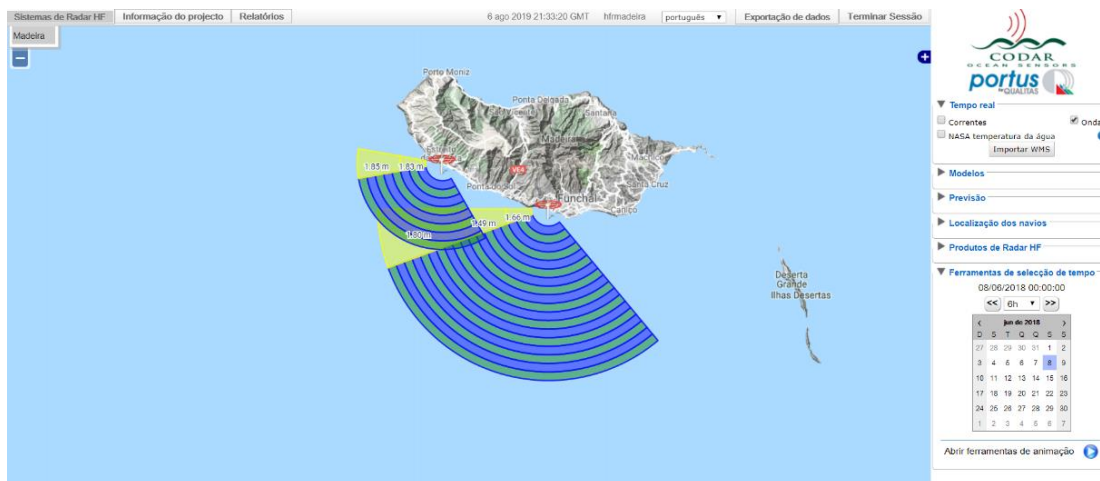


Figura 36: Plataforma *PORTUS*: ondulação na costa sul da ilha da Madeira pelo sistema de radar HF da CODAR.

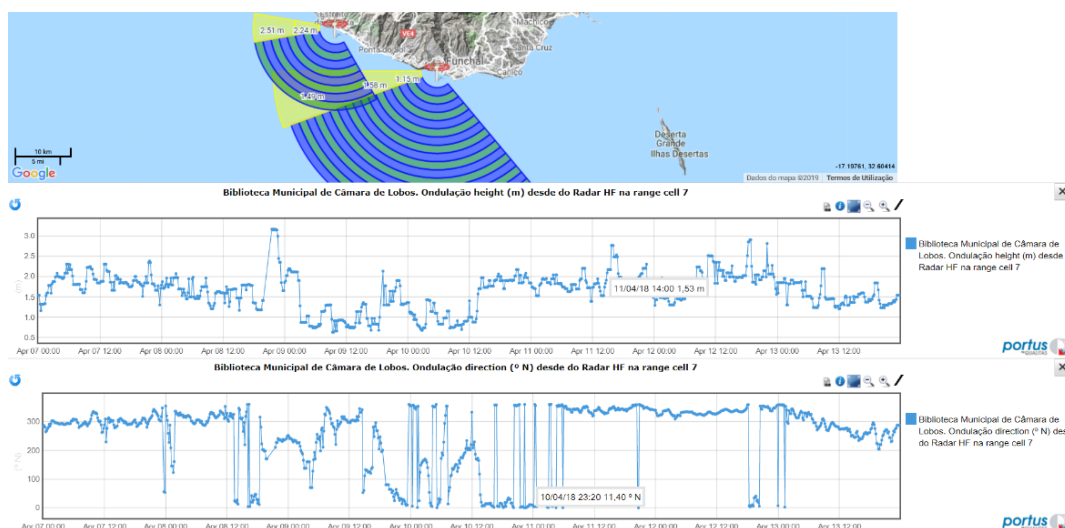


Figura 37: Plataforma *PORTUS*: direção e altura significativa da onda para um determinado período temporal.

4.6 Formato dos ficheiros

Os ficheiros disponibilizados pelo sistema de radar HF, no âmbito do trabalho, foram:

- ruv – Dados das correntes radiais,
- wls – Dados das ondas,
- cs – Dados binários do espectro,
- nc – Dados NetCDF das correntes totais.

Os ficheiros .ruv e .wls (exemplo no anexo A.1) são compostos por um cabeçalho (*header*), com informação sobre a estação, a versão, o alcance e por outros parâmetros técnicos, seguido por uma tabela separada por espaços com

valores das variáveis, tais como: longitude, latitude, *range cell*, componente U e V (no caso das correntes radiais) e altura significativa (no caso da ondas).

Os ficheiros .cs (exemplo no anexo A.2) são ficheiros binários com um formato específico da *SeaSonde* [46]. São compostos por um *header* e uma secção dos dados. Estes utilizam uma ordenação de *bytes Big-Endian* (*byte* mais significativo primeiro), valores de ponto flutuante IEEE simples (4 bytes) e duplo (8 bytes), complemento de dois e valores inteiros.

Os ficheiros NetCDF (*Network Common Data Form*) (exemplo no anexo A.3) é uma abstração de dados para armazenar e recuperar dados multidimensionais [47]. Este é distribuído como uma biblioteca de *software* que fornece uma implementação concreta dessa abstração. A implementação fornece um formato independente da máquina para representar dados científicos. Estes três, abstração, biblioteca e formato de dados, suportam a criação, o acesso e a disponibilização de informações científicas. A abstração é o tipo de dados que pode conter um ficheiro NetCDF, dividido em três componentes, dimensão, variável e atributo. A dimensão especifica a forma (ou matriz) da variável e pode representar uma dimensão física (ex. tempo, latitude, longitude) assim como relacionar variáveis a uma malha (*grid*) comum. A variável é um *array* de valores do mesmo tipo. O atributo pode ser um valor único ou um vetor de valores. Os NetCDF fornecem uma maneira estruturada de armazenar dados científicos para o uso entre vários programas e aplicativos, suportando o acesso e programação de alto nível [48].

4.7 Dados para validação

Para validação do trabalho foram utilizados dados de satélite (*Global Ocean Wind L4 Near Real Time 6 Hourly Observations*) e resultados obtidos pelo modelo de previsão numérica WRF. Os resultados provenientes do WRF foram facultados pelo OOM no âmbito deste trabalho, com uma resolução espacial de 1 km e temporal de 1 h. Os dados de satélite foram extraídos do *Copernicus Marine Environment Monitoring Service*, com uma resolução espacial de 1/4º (aproximadamente 27 km) e temporal de 6 h.

4.7.1 Modelo numérico: Weather Research and Forecasting

O *Weather Research and Forecasting numerical model* (WRF) é um sistema numérico de previsão meteorológica de mesoescala destinado para a realização de estudos científicos da atmosfera e previsão operacional [49]. Este assenta em dois

núcleos dinâmicos, nomeadamente um sistema de assimilação de dados e uma arquitetura de *software* capaz de suportar computação paralela e extensibilidade do sistema. Dependendo da necessidade do estudo atmosférico, o modelo adequa-se a uma ampla gama de aplicações meteorológicas em escalas de dezenas de metros a milhares de quilómetros. O WRF atualmente está a ser utilizado como sistema de previsão operacional no NCEP (*National Centers for Environmental Prediction*), AFWA (*Air Force Weather Agency*) e outros centros dos Estados Unidos. Do mesmo modo está a ser usado em laboratórios, universidades e empresas. Analogamente, está a ser utilizado em muitos países, uma vez que conta com uma grande comunidade mundial (em mais de 160 países).

No arquipélago da Madeira, o WRF tem sido utilizado para diversos casos de estudo. Como exemplo, a utilização do WRF para simular a dinâmica de um episódio que ocorreu a nordeste da Madeira [50]. Além dos casos de estudo documentados na literatura científica, o WRF é utilizado para a disponibilização diária de previsões para o arquipélago da Madeira [51]. Uma outra utilização foi a produção de resultados para 10 anos típicos representativos de ventos para a Madeira e Porto Santo, com o intuito de realizar estudos energéticos [52].

No entanto, a validação de modelos de previsão para pequenas regiões oceânicas é dificultada pela falta de dados de observações *in-situ*. Apesar deste impedimento, estes sistemas de previsão de alta resolução são extremamente importantes, visto que permitem obter melhores resultados que os modelos globais [53].

No que diz respeito ao vento, destaca-se um estudo sobre a geração de vórtices e a interação atmosfera-oceano induzida pelos ventos de superfície, sobre a qual foi feita uma comparação dos resultados de vento do modelo WRF com resultados de satélite (QuikSCAT e ENVISAT). Uma das conclusões deste estudo foi a capacidade do WRF ser capaz de reproduzir realisticamente os fenómenos de vento induzidos pela ilha da Madeira [54].

4.7.2 Dados de Satélite do vento: *Copernicus Marine Environment Monitoring Service*

Os dados de satélite de vento foram escolhidos com base na melhor resolução espacial e temporal possíveis de adquirir. A *Copernicus Marine Environment Monitoring Service* fornece produtos e serviços para vários tipos de aplicações marinhas. Na sua plataforma, em *Ocean Products*, é possível obter os

dados de vento do produto *Global Ocean Wind L4 Near Real Time 6 Hourly Observations* [55].

Este produto é resultante da combinação de dados de diversos satélites. A detecção remota dos ventos é proveniente de dados derivados de ASCAT (*Advanced SCATterometer*) disponíveis a bordo dos satélites *Metop-A* e *Metop-B*, do radiómetro SSMIS (*Special Sensor Microwave Imager Sensor*) a bordo dos satélites F16, F17, F18 e F19 e do radiómetro da *WindSat* a bordo do satélite *Coriolis*.

Os dados fornecidos pela *Copernicus* têm uma atividade contínua de validação de forma a manter a qualidade e precisão dos seus produtos. Os dados de ventos de satélite são comparados com uma rede de bóias [56].

4.8 Conclusão

Neste capítulo apresentou-se as duas estações da CODAR *SeaSonde* instaladas na ilha da Madeira. Cada estação é constituída por uma antena emissora e uma antena recetora composta por um dipolo e dois *loops* cruzados. Após a receção do sinal, o *software* faz o tratamento dos dados e o processamento para a obtenção dos parâmetros do oceano. Os dados do espectro do sinal recebido foram guardados no âmbito deste trabalho. Especificou-se os dados utilizados para validação, respetivamente os dados de satélite pelo produto da *Copernicus* e do modelo numérico WRF.

No capítulo seguinte descreve-se, a partir dos dados do espectro, os passos efetuados para extrair a direção do vento.

5 IMPLEMENTAÇÃO DO TRABALHO

Para implementação do trabalho utilizou-se a linguagem de programação em *python 2.7* [57], juntamente com o ambiente gráfico *Spyder* [58]. Neste usufruiu-se das bibliotecas *numpy*, *matplotlib*, *basemap* e *netCDF4*. A partir deste realizaram-se diversas funções relativas a cada etapa do trabalho. Inicialmente, procedeu-se à leitura dos dados do espectro, seguindo-se da criação da malha e da respetiva atribuição das amostragens de *Doppler*. Depois, a partir da extração da direção do vento introduzidos no capítulo 3, nomeadamente por *Fernandez et al.* em 1997 e *Paduan et al.* em 1999, implementou-se as funções de duas formas, a primeira, assumindo que a direção do vento é constante ao longo da radial e na segunda, converteu-se a direção do vento para o mesmo referencial, variando ao longo da radial. A seguir procedeu-se às funções para resolver a ambiguidade e por último, implementou-se de acordo com todos os passos descritos por *Paduan et al.* (1999).

5.1 Leitura dos dados do espectro

Para extrair os dados do espectro do ficheiro binário, criou-se uma função (em anexo B.1) de acordo com o fluxograma da Figura 38, onde foi necessário fazer a conversão dos dados binários para um *array*, de acordo com a estrutura da *SeaSonde* explicada anteriormente.

Cada *array* corresponde a um ficheiro binário que, por sua vez, diz respeito a uma medição do radar num determinado momento temporal. Este *array* contém diversas informações tais como o número das células de *Doppler*, à *range cell* e os valores dos três canais da antena recetora em *volts* ao quadrado.

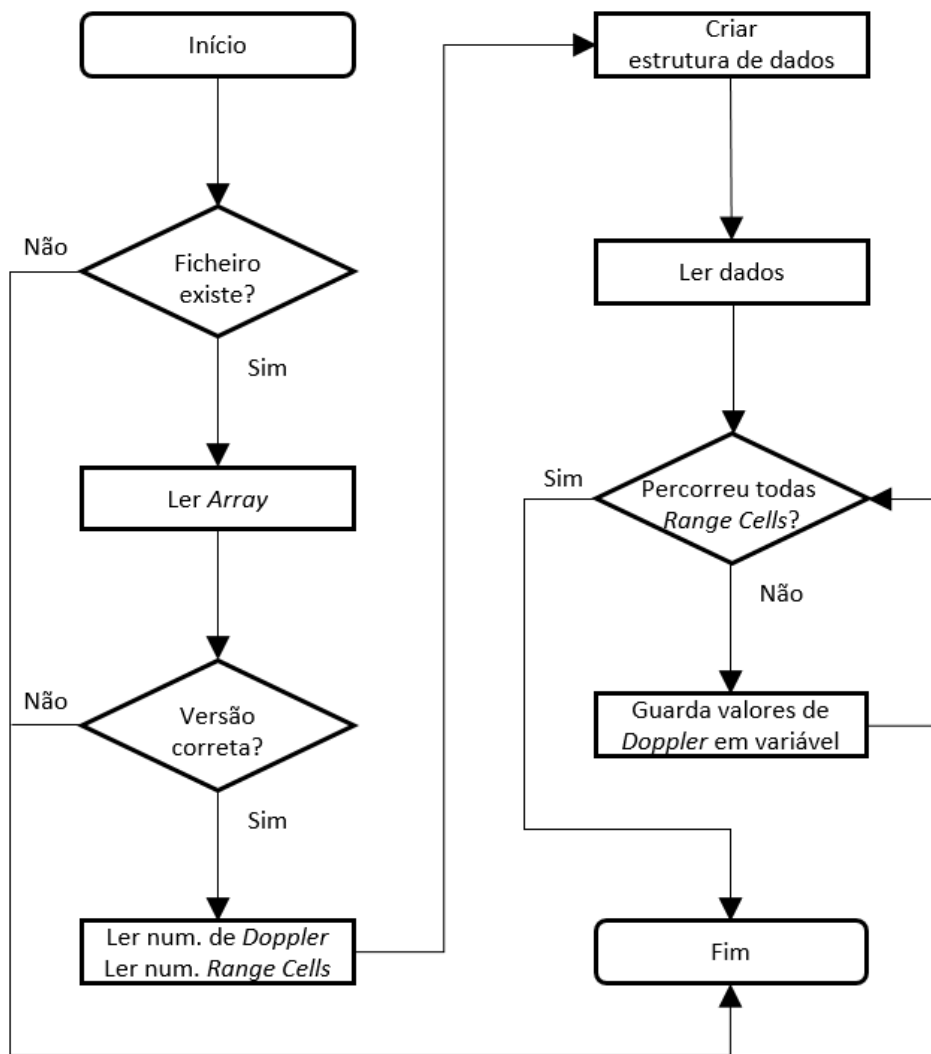


Figura 38: Fluxograma da função para extrair os dados do espectro.

Depois fez-se a atribuição para uma variável do tipo lista, em que cada elemento da lista corresponde a uma *range cell* (96 no total) com as 512 amostragens de *Doppler*, de acordo com a Figura 39.

Est1DadosEspect - List (95 elements)

Index	Type	Size	Value
0	tuple	511	(4.904148961926147e-11, 4.353037028059781e-11, 4.35580...
1	tuple	511	(5.296810906552096e-11, 4.8133441676867506e-11, 3.7809...
2	tuple	511	(8.273336876696291e-11, 4.131382388972149e-11, 6.02354...
3	tuple	511	(5.189546709027937e-11, 3.1215075663171277e-11, 4.3427...
4	tuple	511	(5.668719660345545e-11, 1.2767267798530213e-10, 1.1546...
5	tuple	511	(1.220353540443142e-10, 1.9515275506698515e-10, 1.4711...
6	tuple	511	(9.909593284840312e-11, 1.0058671950918807e-10, 1.3673...
7	tuple	511	(8.084622554749288e-11, 1.1118852366598375e-10, 2.1294...
8	tuple	511	(7.992347755836349e-11, 8.416954633272411e-11, 1.25558...
9	tuple	511	(5.7628814914556514e-11, 7.626526493664798e-11, 5.9453...
10	tuple	511	(1.0535567557257153e-10, 3.1640436798374694e-11, 6.400...

Save and Close Close

Figura 39: Dados do espectro para uma estação numa determinada data.

A Figura 40 apresenta o espectro em dB para uma *range cell*.

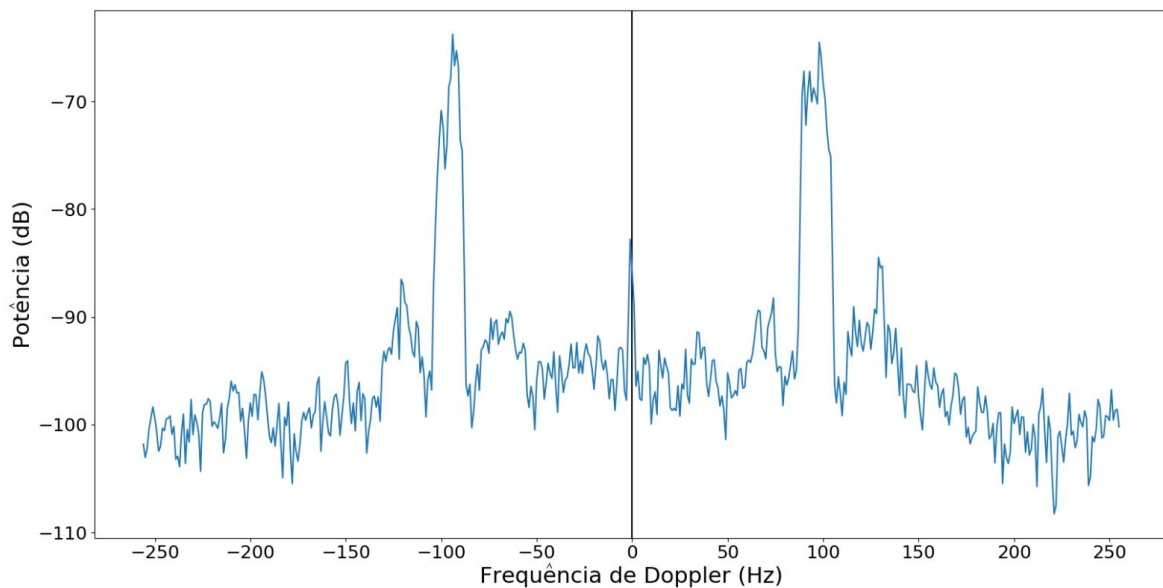


Figura 40: Espectro obtido pelo monopolo da estação BMCL para a *range cell* 15, numa determinada data.

5.2 Criação da malha

Para fazer o mapeamento da direção dos ventos foi necessário criar uma malha (ou denominada *grid*). Para isso analisaram-se os pontos geográficos disponíveis e depois procedeu-se à criação da malha.

Fez-se o mapeamento dos dados dos radiais de cada estação e verificou-se que estes, como o próprio nome indica, estão dispostos em raios e que os pontos das duas estações, em geral, não se sobrepõem, como mostra a Figura 41.

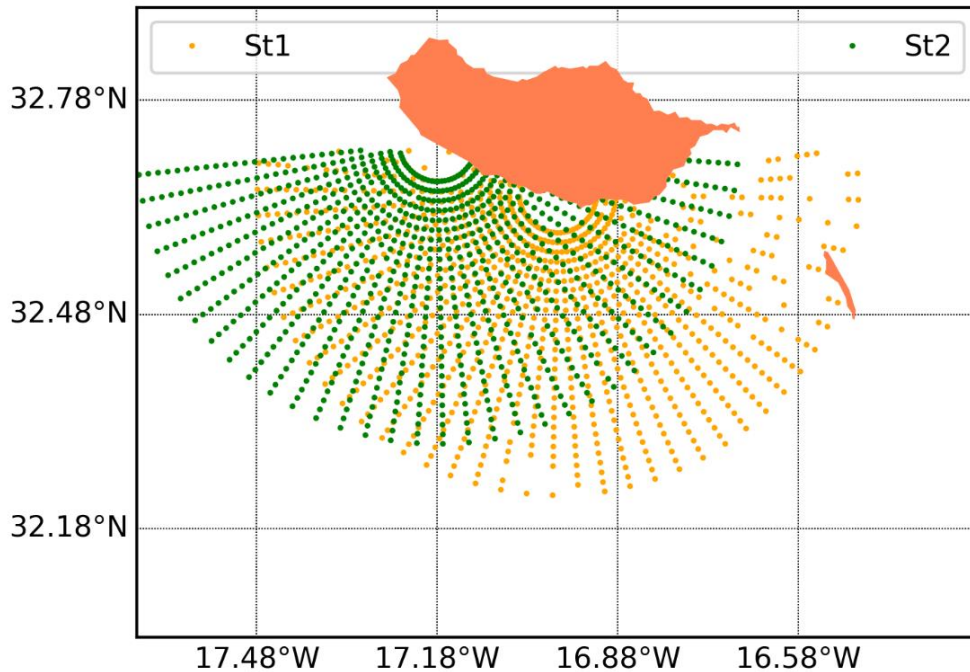


Figura 41: Pontos radiais georreferenciados de cada estação.

Para os dados das correntes totais, pela Figura 42, verificou-se a posição escolhida pela CODAR para a interseção das componentes radiais das duas estações. A malha apresenta espaçamentos bem definidos com uma resolução de 1,5 km. No entanto, para fazer coincidir com os dados do espectro seria preciso recorrer a métodos de interpolação.

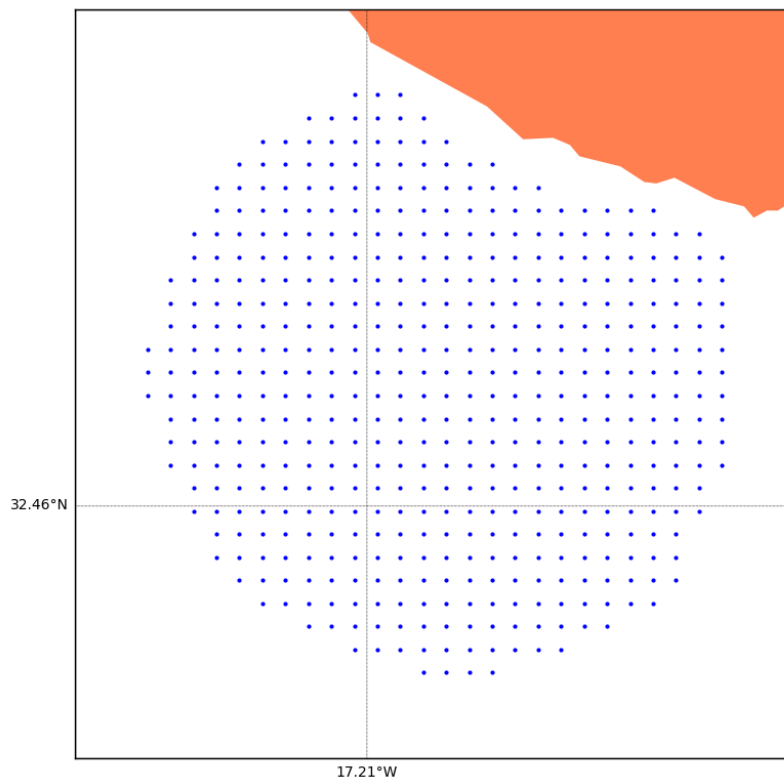


Figura 42: Malha da CODAR para apresentação das correntes totais.

Outra alternativa seria criar uma malha equidistante, com raio a uma distância suficiente entre pontos, onde fosse possível agrupar o maior número de informação do espectro das duas estações. Esta abordagem, de uma certa forma, gerava um método de interpolação.

Decidiu-se criar uma malha em que os pontos são a interseção pelas *range cell* do espectro (função em anexo B.2), conforme o fluxograma na Figura 43.

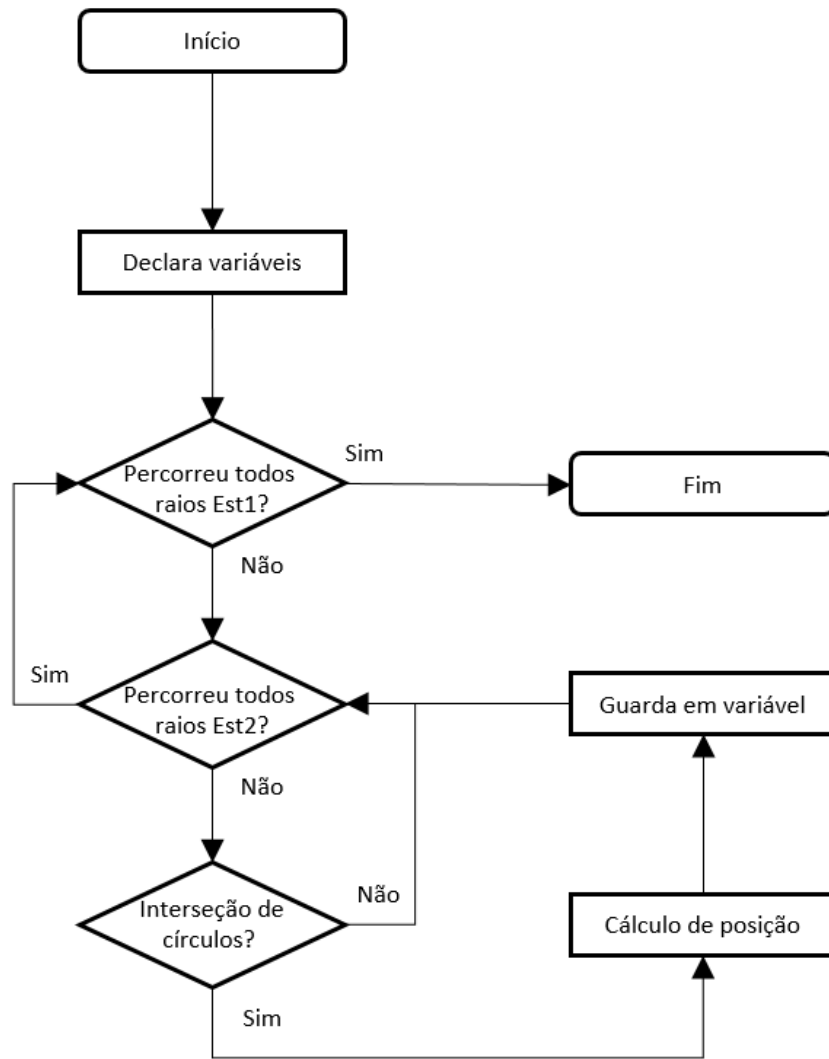


Figura 43: Fluxograma da função para obter as coordenadas dos pontos da malha.

Como cada *range cell* está separada de 1,5 km, representaram-se circunferências espaçadas em torno da posição de cada estação, como mostra a Figura 44.

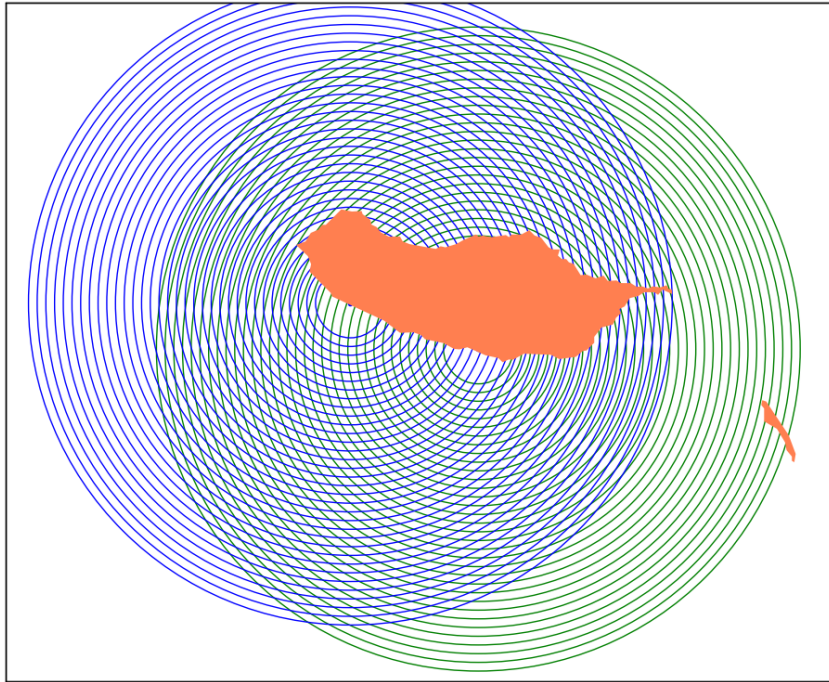


Figura 44: *Range cell* dos 6 km aos 57 km a partir de cada estação.

Fez-se um algoritmo para o cálculo de posição (coordenadas) dos pontos da malha com base no cálculo matemático da interseção entre circunferências (em anexo C.1) e eliminou-se a interseção a norte da ilha, ficando com os pontos de interesse a sul, como representado na Figura 45.

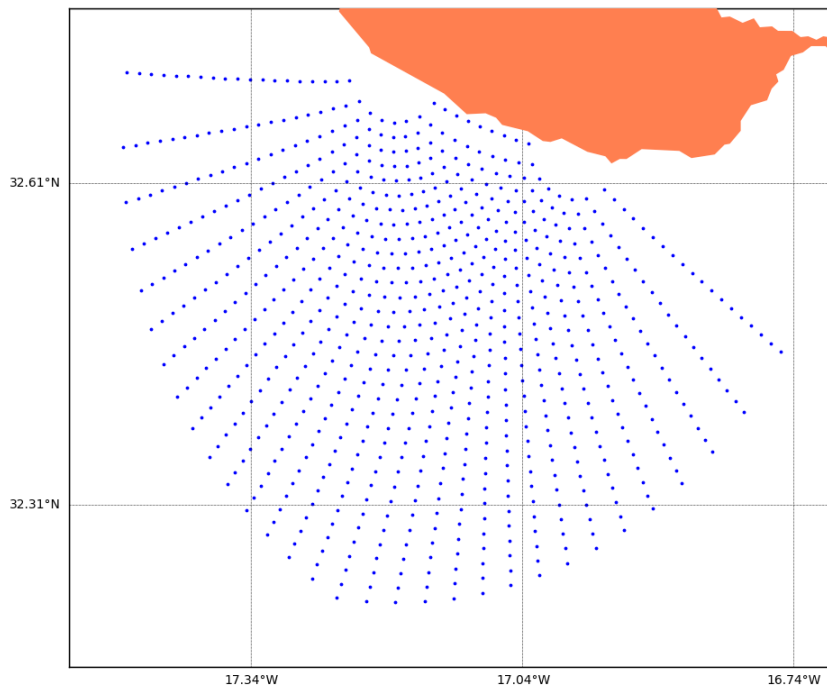


Figura 45: Pontos da malha de interseção dos *range cell* de cada estação.

Guardaram-se os valores numa variável do tipo lista, conforme a Figura 46, com 5 elementos, da seguinte forma:

- Índice 0 – Descrição dos índices seguintes;
- Índice 1 – Latitude para cada ponto;
- Índice 2 – Longitude para cada ponto;
- Índice 3 – Número da range cell da estação BMCL;
- Índice 4 – Número da range cell da estação CALH.

Index	Type	Size	Value
0	str	1	Lat_Lon_rngBMCL_rngCALH
1	list	778	[32.64766544278291, 32.627851424926924, 32.61497727341876, ...]
2	list	778	[-17.03383669575398, -17.029430467694826, -17.021605593386...]
3	list	778	[3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 4, 4, ...]
4	list	778	[11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 10, 11, ...]

Figura 46: Variável com os pontos da malha e *range cell* de cada estação.

Os índices de 1 a 4 são do tipo lista com uma dimensão de 778 elementos (pontos da malha). Para extrair uma coordenada, obtém-se a posição (índice) da lista de longitudes que corresponde à mesma posição na lista de latitudes. Essa mesma posição (índice) serve para obter os valores dos *range cell*.

5.3 Associação dos dados do espectro aos pontos da malha

Como verificado anteriormente, cada ponto da malha está anexado com uma *range cell* de cada estação. Do mesmo modo, cada espectro está relacionado com uma *range cell*. Criou-se uma função (em anexo B.3) para associar os dados do espectro aos pontos da malha pelo número da *range cell* de acordo com o fluxograma da Figura 47.

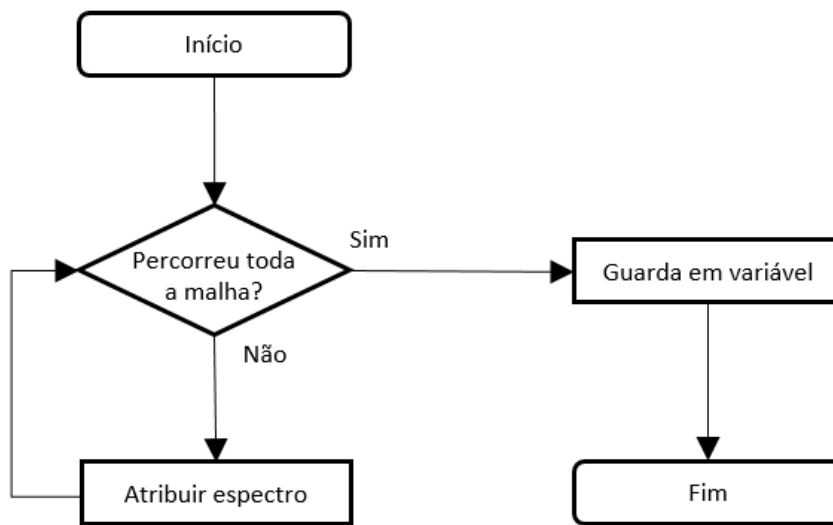


Figura 47: Fluxograma para associar o espectro das duas estações a cada ponto da malha.

Guardou-se o resultado numa variável conforme a Figura 48. Essa variável é do tipo lista com 5 elementos, com a seguinte estrutura:

- Índice 0 – Descrição dos índices seguintes;
- Índice 1 – Latitudes para cada ponto;
- Índice 2 – Longitudes para cada ponto;
- Índice 3 – Espectro da estação BMCL;
- Índice 4 – Espectro da estação CALH.

Index	Type	Size	Value
0	list	1	['Lat_Lon_EspectBMCL_EspectCALH']
1	list	778	[32.64766544278291, 32.627851424926924, 32.61497727341876, ...]
2	list	778	[-17.03383669575398, -17.029430467694826, -17.021605593386, ...]
3	list	778	[(5.796099017407741e-11, 1.0471623568264476e-10, 8.4188440, ...]
4	list	778	[(2.565327950065921e-10, 4.889187388279481e-10, 5.31544530, ...]

Figura 48: Variável com os pontos da malha e dados do espectro de cada estação.

Os índices 3 e 4 são listas com 778 elementos cada (correspondente a cada ponto da malha) em que cada elemento contém as 512 amostras de *Doppler*, como exemplifica a Figura 49, com os 11 primeiros elementos do conteúdo do índice 3 (Espectro da estação BMCL).

Index	Type	Size	Value
0	tuple	511	(5.796099017407741e-11, 1.0471623568264476e-10, 8.4188...
1	tuple	511	(5.796099017407741e-11, 1.0471623568264476e-10, 8.4188...
2	tuple	511	(5.796099017407741e-11, 1.0471623568264476e-10, 8.4188...
3	tuple	511	(5.796099017407741e-11, 1.0471623568264476e-10, 8.4188...
4	tuple	511	(5.796099017407741e-11, 1.0471623568264476e-10, 8.4188...
5	tuple	511	(5.796099017407741e-11, 1.0471623568264476e-10, 8.4188...
6	tuple	511	(5.796099017407741e-11, 1.0471623568264476e-10, 8.4188...
7	tuple	511	(5.796099017407741e-11, 1.0471623568264476e-10, 8.4188...
8	tuple	511	(6.945997943486049e-11, 1.1798682864050392e-10, 7.6515...
9	tuple	511	(6.945997943486049e-11, 1.1798682864050392e-10, 7.6515...
10	tuple	511	(6.945997943486049e-11, 1.1798682864050392e-10, 7.6515...

Figura 49: Lista correspondente aos pontos da malha com os dados do espectro da estação BMCL.

5.4 Extração da direção do vento

No capítulo 3.4 foram abordados diversos métodos utilizados ao longo do tempo para obter a direção do vento pelo radar HF. Recorreu-se aos métodos utilizados por *Fernandez et al.* em 1997 e *Paduan et al.* em 1999 para extrair a direção do vento. A escolha destes métodos traduz-se na viabilidade de implementação e porque o método de 1997 foi o primeiro a ser registado para sistemas da CODAR enquanto o de 1999 toma em consideração as componentes radiais e a ambiguidade de esquerda e direita.

Realizou-se a extração da direção do vento por etapas. Como só se tem dados espectrais por cada radial (*range cell*), ou seja, tem-se o mesmo diagrama de *Bragg* para todos os pontos que compõem a mesma radial, decidiu-se resolver de duas formas: considerar o vento constante ao longo da radial ou o vento a variar ao longo da radial (Figura 50). Pela Figura 50 a), assume-se que o ângulo da direção do vento obtido é constante para cada radial e em b) assume-se que o ângulo da direção do vento é diferente ao longo de cada radial em relação ao referencial comum. Além disso, é necessário ter em consideração que o cálculo do vento a partir da razão dos picos de *Bragg* pode ser conseguido por duas fórmulas, uma por *Fernandez et al.* (1997) ou por *Paduan et al.* (1999). A seguir, para determinar a ambiguidade, utilizou-se a metodologia descrita em *Paduan et al.* (1999). Por último, implementou-se o método detalhado por *Paduan et al.* (1999), limitadas pelo sinal-ruído de 3 dB e por células com um raio de 3 km.

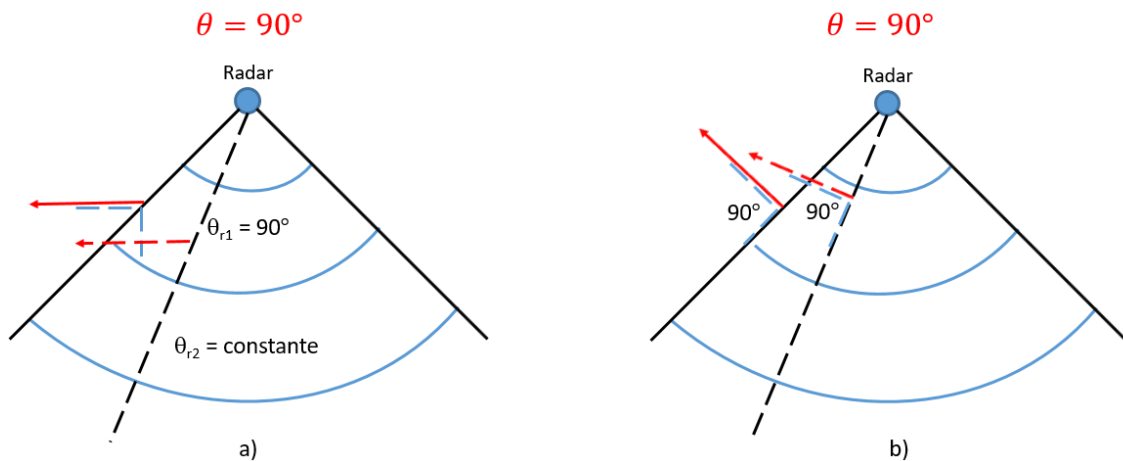


Figura 50: Consideração ao longo da radial em relação a um referencial comum. a) Vento constante. b) Vento a variar.

5.4.1 Vento constante ao longo da radial

Fez-se uma função (em anexo B.4) pelo fluxograma da Figura 51.

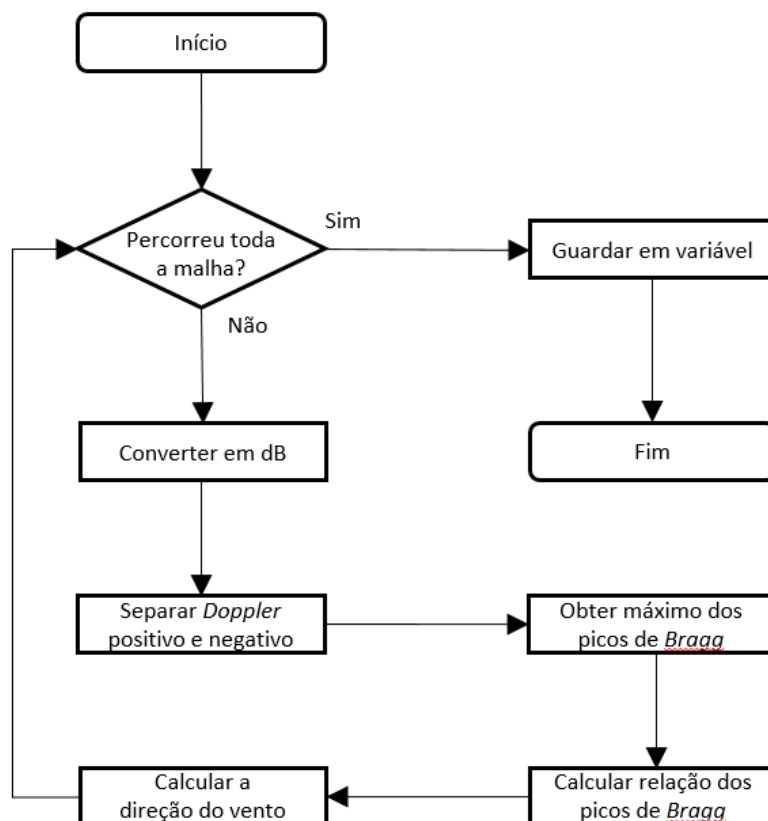


Figura 51: Fluxograma para extrair a direção do vento.

Para cada ponto da malha converteu-se para dB um determinado espectro, separaram-se os valores de *Doppler* positivos e negativos, extraíram-se os valores

máximos de cada parte (*Doppler* positivos e negativos) dentro de uma zona da amostragem para incluir as potências de primeira e segunda ordem, determinou-se a relação dos picos de *Bragg* e a seguir calculou-se o valor da direção do vento. O cálculo da direção do vento pode ser efetuado pela equação (26) proveniente de *Fernandez et al.* (1997) ou pela equação (27) de *Paduan et al.* (1999) e depois aplicou-se a soma vetorial do resultado das duas estações. Após percorrer todos os pontos da malha, guardam-se os resultados numa variável do tipo lista de listas, como apresenta a Figura 52, da seguinte forma:

- Índice 0 – Descrição dos índices seguintes;
- Índice 1 – Latitudes para cada ponto;
- Índice 2 – Longitudes para cada ponto;
- Índice 3 – Soma vetorial da direção do vento das estações;
- Índice 4 – Ângulo de direção da estação CALH,
- Índice 5 – Ângulo de direção da estação BMCL,
- Índice 6 – Data da medição do radar HF.

Index	Type	Size	Value
0	list	1	['Lat_Lon_thetaTOTL_theta1CALH_theta2BMCL_data']
1	list	778	[32.64766544278291, 32.627851424926924, 32.61497727341876, ...
2	list	778	[-17.03383669575398, -17.029430467694826, -17.021605593386...
3	list	778	[60.48668305376386, 49.14515034680663, 50.61728953127708, ...
4	list	778	[64.4301138770769, 41.74704846316245, 44.691326832103336, ...
5	list	778	[56.54325223045082, 56.54325223045082, 56.54325223045082, ...
6	str	1	18_02_26_1800

Figura 52: Variável com os pontos da malha, direção do vento total e de cada estação.

5.4.2 Vento a variar ao longo da radial

Criou-se uma função igual à anterior (em anexo B.5), exceto que, após se obter a direção do vento radial, esta é convertida para o referencial meteorológico em relação à sua respetiva estação. Para isso, considerou-se a posição de cada ponto, caso fique a oeste ou a este da estação, assim como, se está a norte ou a sul da estação, de acordo com os cálculos descritos no anexo C.2. A seguir aplica-se a soma vetorial das duas estações e guardam-se os resultados da mesma forma, como explicado anteriormente.

5.4.3 Vento constante ao longo da radial com resolução de ambiguidade

Para a resolução da ambiguidade implementou-se uma função (em anexo B.6) pelo fluxograma Figura 53, de acordo com o explicado no capítulo 3.4 pela Figura 22, em que se obtém a direção do vento pelo par de soluções ao longo da radial e pela menor diferença entre os quatro pares de soluções compostas das duas estações.

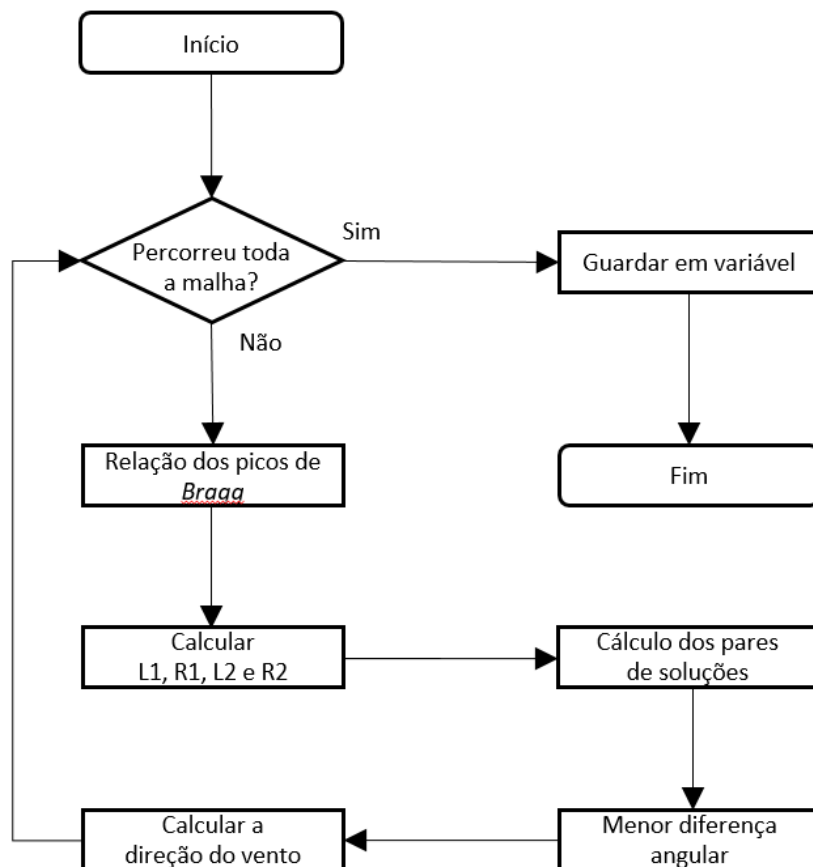


Figura 53: Fluxograma para extrair a direção do vento com resolução de ambiguidade.

Calculou-se a diferença da relação dos picos de *Bragg* e a direção do vento radial para ambas as estações e para cada ponto da malha. Depois, converteram-se os ângulos radiais para o referencial meteorológico, considerando se o ponto ficava à direita de ambas as estações, à esquerda das estações ou entre as estações (à esquerda de uma estação e à direita de outra, de forma a obter as quatro soluções possíveis L_1, L_2, R_1 e R_2 em que L é a solução da esquerda (*Left*), R da direita (*Right*) e 1 ou 2 referente à localização das estações. A Figura 54 apresenta, para alguns pontos da malha, as quatro soluções possíveis para o mesmo referencial (cálculos descritos em anexo C.3 para os pontos P4, P6 e P9).

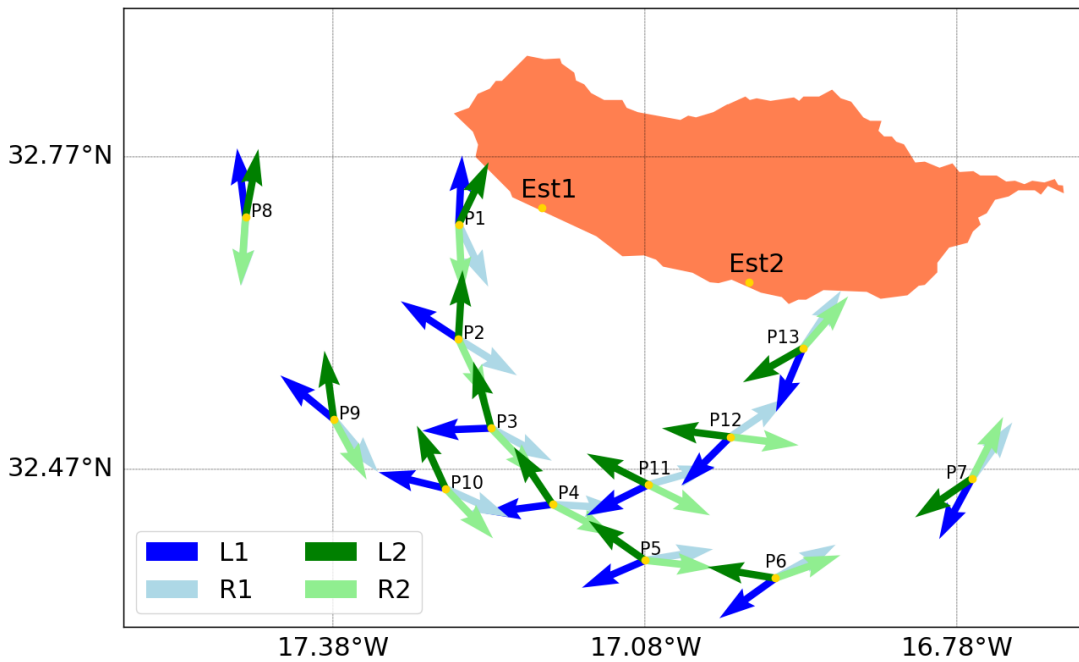


Figura 54: Soluções de esquerda e direita de alguns pontos para o mesmo referencial.

Os valores das soluções de esquerda e de direita dos pontos da Figura 54 são apresentados pela Tabela 1 (no referencial meteorológico o zero está apontado para norte).

Tabela 1: Soluções de esquerda e direita de alguns pontos.

Ponto	L1 (graus)	R1 (graus)	L2 (graus)	R2 (graus)
P1	2,7	154,6	25,6	176,9
P2	303,1	121,8	3,4	154,6
P3	267,7	118,1	345,0	136,2
P4	262,5	93,2	326,0	117,2
P5	246,6	80,6	304,9	96,2
P6	234,4	60,9	279,3	70,5
P7	208,4	35,8	235,6	26,9
P8	352,9	183,5	10,6	184,1
P9	309,2	139,9	352,2	151,4
P10	283,6	114,3	335,5	136,3
P11	243,6	74,2	296,8	116,3
P12	225,1	55,8	277,1	96,9
P13	202,9	33,5	33,5	41,2

De seguida, geram-se os quatro possíveis pares de soluções L_1L_2 , R_1R_2 , L_1R_2 , e R_1L_2 e verifica-se qual é a menor diferença angular. Depois, sabendo qual o par de menor diferença angular é feita a média dos valores deste par e o valor resultante corresponde ao lado da direção do vento, ou seja, este tornou-se no indicador da solução de ambiguidade. Assim, verifica-se se este indicador está compreendido entre 0 a 180° ou entre 180 a 360°. Com base neste indicador de esquerda ou direita, calcula-se a média da direção do vento constante obtida ao longo da radial das duas estações como solução da direção do vento. Por último, guardam-se os resultados da mesma forma, como explicado anteriormente.

5.4.4 Vento a variar ao longo da radial com resolução de ambiguidade

Criou-se uma função igual à anterior (em anexo B.7), exceto que após se obter a média dos valores do par da menor diferença angular já se está perante a direção do mesmo referencial comum, não se aplicando os passos da direção do vento constante ao longo da radial. De igual modo, guardam-se os resultados.

5.4.5 Método de *Paduan et al.* (1999)

Fez-se uma função (em anexo B.8) pelo Fluxograma da Figura 55, de acordo com os passos teóricos do método de *Paduan et al.* (1999) em que se verificaram os níveis de ruído, calcularam-se as soluções de esquerda e direita, identificaram-se os pontos dentro de um raio de 3 km, geraram-se os quatro pares de soluções, determinou-se a menor diferença angular entre estes pares e extraiu-se a solução da direção do vento com a melhor relação sinal-ruído.

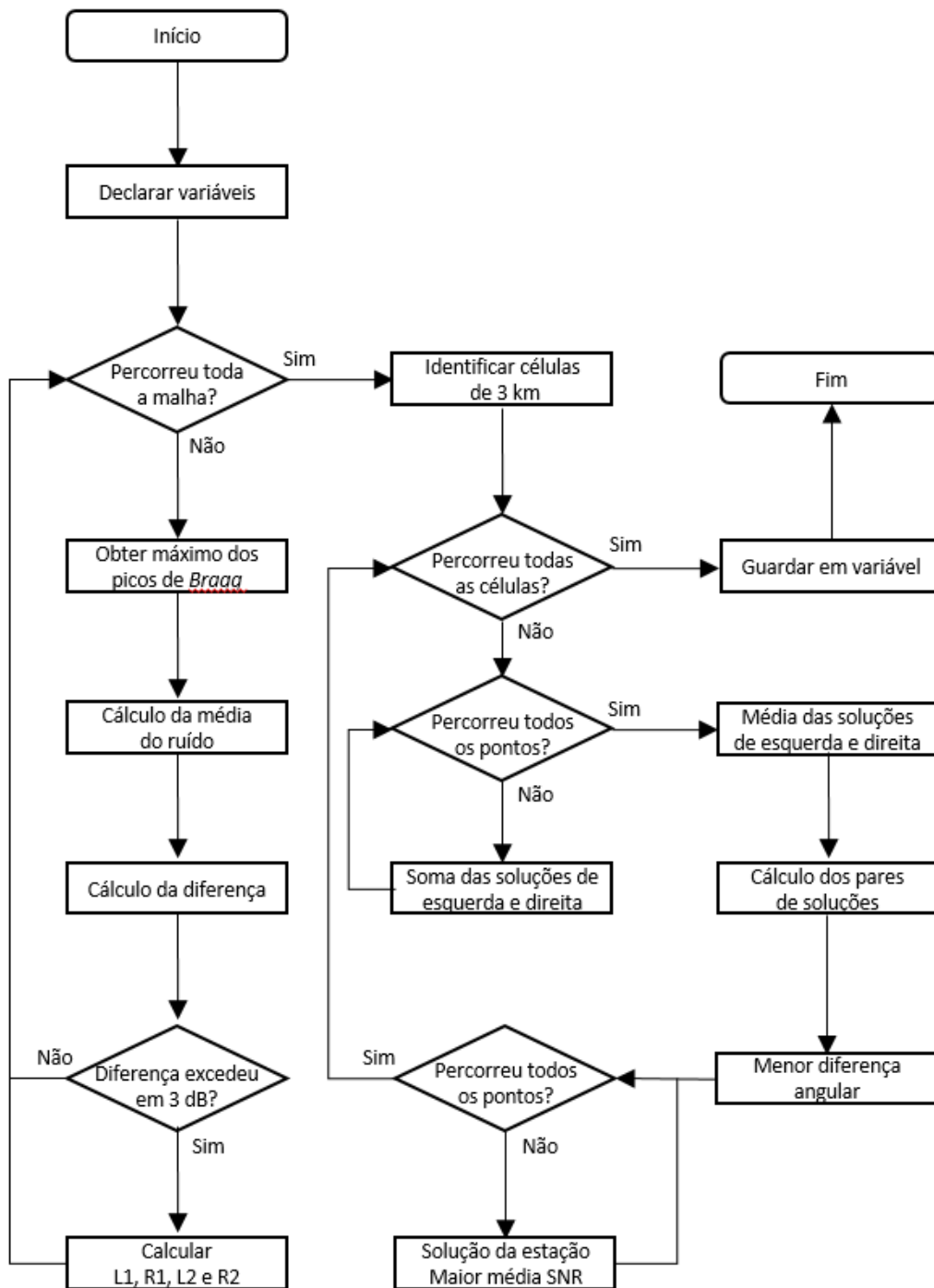
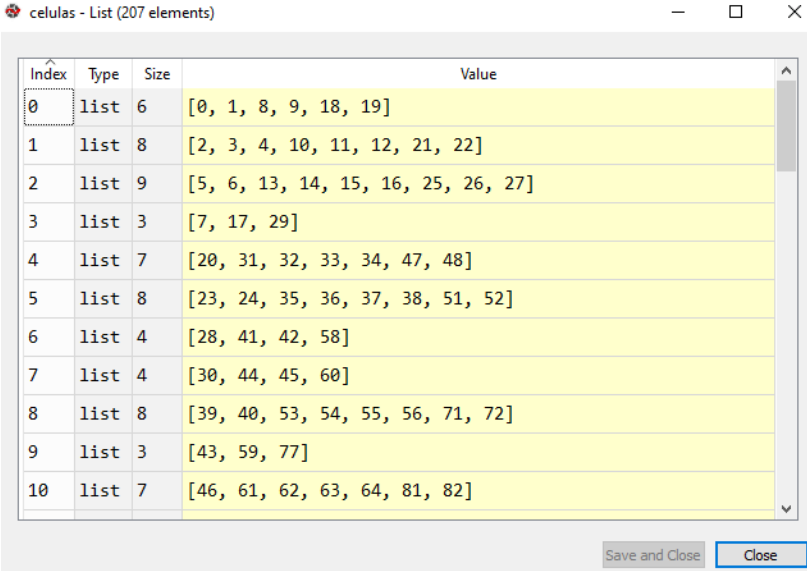


Figura 55: Fluxograma para extrair a direção do vento pelo método de 1999.

Para verificar que ambos os picos de *Bragg* excedem o nível de ruído em 3 dB, retiraram-se os valores máximos de *Doppler* positivos e negativos em dB, como anteriormente. Com os valores de tensão calculou-se a média de todas as amostras de *Doppler*. Depois fez-se a diferença em dB para o pico de *Doppler* positivo e negativo de ambas as estações para cada ponto da malha. Se alguma dessas diferenças fosse inferior a 3 dB o ponto deixa de fazer parte para extração da direção

do vento. Depois, efetuaram-se as soluções de esquerda e direita, como explicado anteriormente.

Para identificar os pontos num raio de 3 km, uma vez que os pontos da malha não estão todos à mesma distância entre si e não estão ordenados em coordenadas geográficas sequencialmente, procedeu-se à seleção de um ponto da malha de cada vez da lista de coordenadas geográficas e percorreram-se todos os outros pontos da malha, verificando se estão dentro da distância do raio pretendido. Caso estes estejam dentro da distância, são guardados os valores numa variável. Esta variável, como se verifica pela Figura 56, representa agrupamentos de células de pontos, neste caso são 207 células de pontos sem repetição.



Index	Type	Size	Value
0	list	6	[0, 1, 8, 9, 18, 19]
1	list	8	[2, 3, 4, 10, 11, 12, 21, 22]
2	list	9	[5, 6, 13, 14, 15, 16, 25, 26, 27]
3	list	3	[7, 17, 29]
4	list	7	[20, 31, 32, 33, 34, 47, 48]
5	list	8	[23, 24, 35, 36, 37, 38, 51, 52]
6	list	4	[28, 41, 42, 58]
7	list	4	[30, 44, 45, 60]
8	list	8	[39, 40, 53, 54, 55, 56, 71, 72]
9	list	3	[43, 59, 77]
10	list	7	[46, 61, 62, 63, 64, 81, 82]

Figura 56: Variável de agrupamento de células, com os índices da lista de pontos geográficos da malha.

De forma a verificar a distribuição gráfica dos pontos, fez-se a Figura 57, em que a numeração e os pontos de cor identificam o agrupamento. Como a malha é não equidistante, cada célula tem quantidades diferentes de pontos.

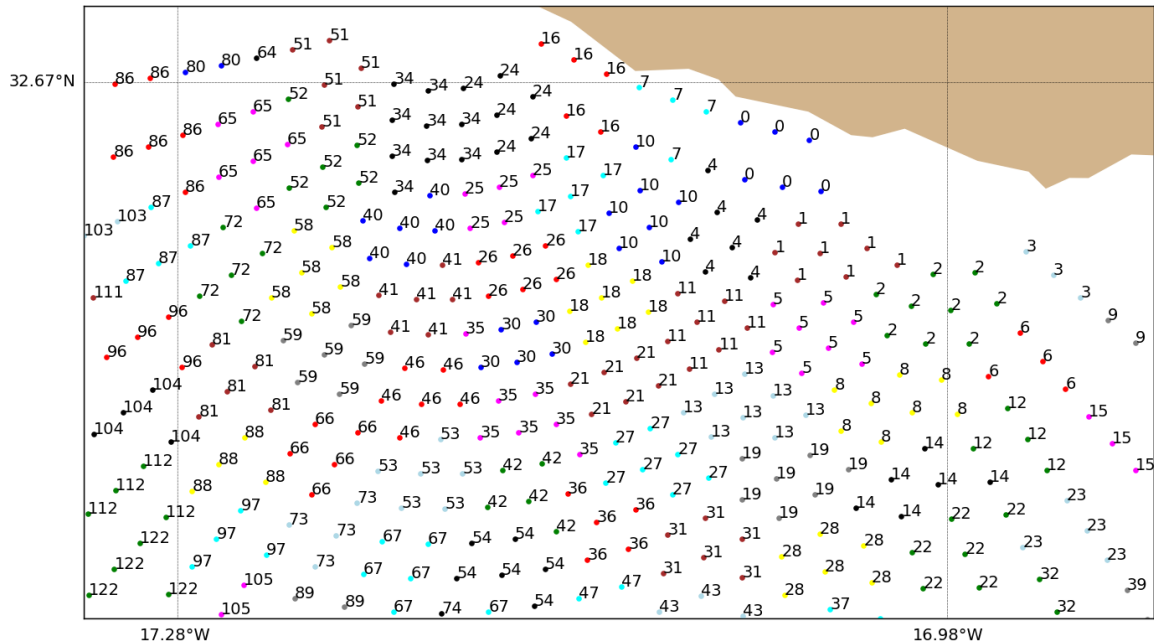


Figura 57: Disposição gráfica do agrupamento de células dentro de um raio de 3 km.

Efetuuou-se a média de todas as soluções da esquerda e de todas as soluções da direita de cada estação (L_1, L_2, R_1 e R_2) em cada agrupamento de células de 3 km e realizou-se o cálculo dos pares de soluções de L_1L_2, R_1R_2, L_1R_2 , e R_1L_2 .

Retirou-se o menor valor de entre os pares de soluções. Neste resulta um par com dois ângulos, um de cada estação.

De modo a escolher uma solução particular de esquerda ou de direita para a estação com maior média de sinal-ruído, verificou-se qual das estações tem maior média de sinal-ruído e, a partir do par de soluções resultante, extraiu-se o ângulo relativo a L ou R referente esta estação. Guardaram-se os resultados numa variável do tipo lista de listas, como apresentado na Figura 58, da seguinte forma:

- Índice 0 – Descrição dos índices seguintes;
- Índice 1 – Latitudes para cada ponto;
- Índice 2 – Longitudes para cada ponto;
- Índice 3 – Direção do vento resultante;
- Índice 4 – Ângulo de direção radial da estação CALH,
- Índice 5 – Ângulo de direção radial da estação BMCL,
- Índice 6 – Agrupamento de células, índice de coordenadas,
- Índices 7 a 10 – Soluções de esquerda e de direita de cada estação,
- Índice 11 – Menor diferença angular dos quatro pares de soluções,
- Índice 12 – Data da medição do radar HF.

Index	Type	Size	Value
0	list	1	['Lat_Lon_Beta_theta1CALH_theta2BMCL_Celulas_L1_R1_L2_R2_Par_data']
1	list	778	[32.64766544278291, 32.627851424926924, 32.61497727341876, 32.6055...
2	list	778	[-17.03383669575398, -17.029430467694826, -17.021605593386553, -17...
3	list	778	[508.38674135612257, 379.5610107153501, 470.87927142526314, 456.33...
4	list	778	[-77.72801577222707, -77.64373103076686, -74.77029389882324, -77.3...
5	list	778	[-60.14760918421889, -60.14760918421889, -60.14760918421889, -60.1...
6	list	207	[[0, 1, 8, 9, 18, ...], [2, 3, 4, 10, 11, ...], [5, 6, 13, 14, 15,...
7	list	778	[374.5405071146401, 379.5610107153501, 378.73606625398577, 381.940...
8	list	778	[-140.915524429814, -135.7264513461836, -130.8045215436607, -132.7...
9	list	778	[508.38674135612257, 486.83370590931906, 470.87927142526314, 456.3...
10	list	778	[28.09152298768482, 6.538487540881285, -9.415946943174603, -23.964...
11	list	778	['par1', 'par1', 'par1', 'par1', 'par1', 'par1', 'par1', 'par1', '...
12	str	1	18_02_24_0600

Figura 58: Variável com os pontos da malha, direção do vento, ângulos da direção radial, índice dos agrupamentos de células e soluções de esquerda e direita.

Com base neste método, adaptou-se para uma função (em anexo B.9) o cálculo dos ventos constantes ao longo da radial, realizado da mesma forma que explicado anteriormente, em que a resultante da média do par de soluções torna-se no indicador de ambiguidade.

5.5 Conclusão

Neste capítulo, explicou-se como foram implementadas as diversas funções relativas a cada etapa do trabalho. Organizou-se os dados do espectro para cada ponto georreferenciado de uma malha. Determinou-se a razão dos picos de *Bragg* e calculou-se a direção do vento por duas opções, respetivamente pela fórmula de *Fernandez et al. (1997)* ou por *Paduan et al. (1999)*. Tendo em conta que os dados do espectro são relativos a cada radial, não são georreferenciados, considerou-se duas formas para os valores do cálculo da direção, nomeadamente assume-se que o ângulo resultante da direção é constante por radial em relação ao referencial comum (denomina-se ventos constantes) ou assume-se que ângulo resultante da direção é diferente ao longo de cada radial em relação ao referencial comum (denomina-se ventos a variar). Por último, implementou-se três metodologias, relativamente, sem resolução de ambiguidade, com aplicação do método para resolução de ambiguidade e de acordo com os passos por *Paduan et al. (1999)*.

No capítulo seguinte compara-se o modelo de *Fernandez et al.* (1997) em relação ao de *Paduan et al.* (1999). Escolhe-se dois períodos para amostragem dos resultados. Apresenta-se os resultados e comparam-se com dados de satélite e do modelo numérico WRF.

6 RESULTADOS

Neste capítulo começa-se por mostrar a relação dos picos de *Bragg* em função da direção do vento, onde se compara o modelo de *Fernandez et al. (1997)* em relação ao de *Paduan et al. (1999)*. Depois apresenta-se uma análise da intensidade do vento em relação à média da potência dos picos de *Bragg*, na qual identificam-se dois períodos relativos de estudo. Segue-se o mapeamento da direção do vento obtido pelo radar HF, para um instante de tempo em cada período, juntamente com a direção do vento referente aos dados de satélite e do modelo numérico WRF. Posteriormente, comparam-se os resultados obtidos do radar HF com os dados de satélite e do WRF ao longo de cada período (15 dias de 6 em 6 horas) para dois pontos geográficos. Prossegue-se com a análise estatística do erro e da correlação da direção do vento do radar HF em relação aos dados de satélite. Por último, discutem-se os resultados.

6.1 Relação dos picos de *Bragg* em função da direção do vento

Fez-se uma análise à diferença dos picos de *Bragg* para três meses de três *range cell*, como apresentado pela Figura 59. Neste verifica-se que a diferença dos picos de *Bragg* estão entre -20 a 20 dB aproximadamente.

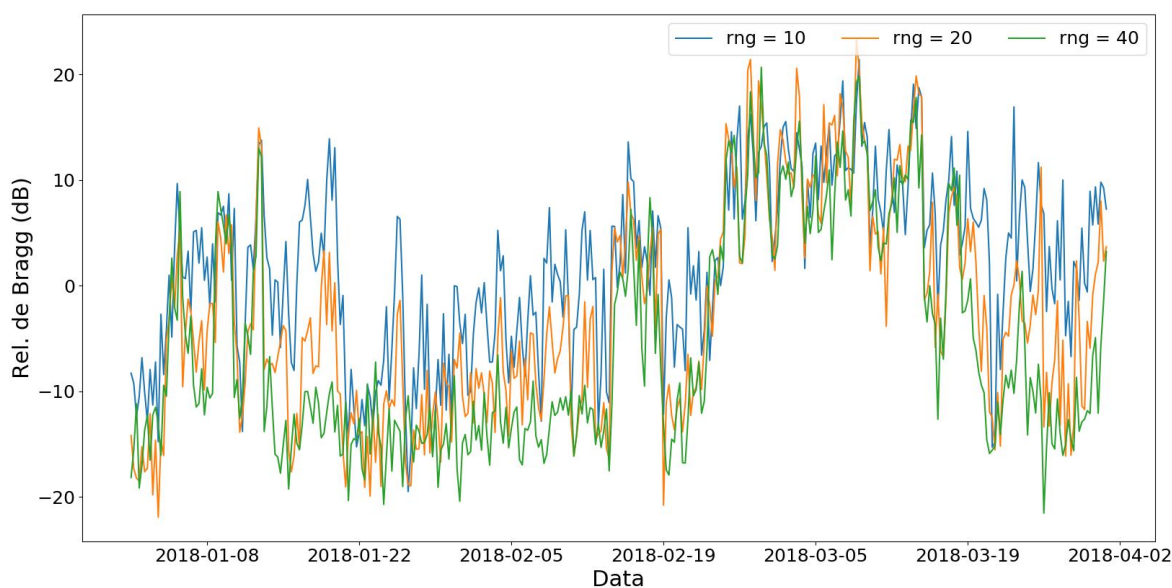


Figura 59: Relação dos picos de *Bragg* de *range cells* 10, 20 e 40 para três meses da estação BMCL.

Tabela 2: Valores obtidos entre a relação dos picos de *Bragg* em função da direção do vento a soprar na direção (a), em ângulo reto (b) e na direção oposta (c) do radar. θ_1 pelo modelo de *Fernandez et al.* (1997) e θ_2 pelo modelo de *Paduan et al.* (1999).

	(a)	(b)	(c)
Direção do vento (θ_1) em graus	29,08	90,02	148,37
Direção do vento (θ_2) em graus	2,10	90,02	172,18
Relação dos picos de <i>Bragg</i> (ζ) em dB	-23,44	0,01	21,91

Nota-se que os valores de direção do vento estão compreendidos entre 0 a 180°, faltando fazer a correspondência com os valores de 180 a 360°. Também é possível perceber que uma diferença entre os dois modelos encontra-se no valor máximo em módulo da relação dos picos de *Bragg*.

De modo a verificar a relação dos picos de *Bragg* para todos os ângulos, fez-se o cálculo para ζ com valores de θ , como mostra a seguinte Tabela 3.

Tabela 3: Valores da relação dos picos de *Bragg* (ζ), sabendo da direção do vento (θ). ζ_1 pelo modelo de *Fernandez et al.* (1997) e ζ_2 pelo modelo de *Paduan et al.* (1999).

θ (graus)	10	40	80	120	160	200	240	280	320	350
ζ_1 (dB)	-42,3	-17,6	-3,0	9,5	30,1	30,1	9,5	-3,0	-17,6	-42,3
ζ_2 (dB)	-21,3	-13,3	-2,7	8,0	18,7	18,7	8,0	-2,7	-13,3	-21,3

Pela Tabela 3 observa-se a ambiguidade do sinal, em que se obtém o mesmo valor da relação dos picos de *Bragg* para dois ângulos opostos, denominados pela literatura de soluções à esquerda e soluções à direita da localização do radar. Verifica-se, também, que os valores de ζ_1 próximos de 0 e 180° (em módulo) são muito elevados em relação a ζ_2 e em relação aos valores obtidos pela Figura 59.

6.2 Escolha do período para análise do vento

Analizou-se a intensidade do vento em relação à média da potência dos picos de *Bragg*, com o intuito de descobrir se existe alguma relação entre estes e encontrar períodos de vento de maior intensidade para comparar com os resultados obtidos da direção do vento do radar HF. Os períodos de maior intensidade de vento são relevantes na medida em que se está perante uma maior concentração de ventos locais e, conseqüentemente, uma maior interação entre o vento e a

ondulação do mar (informação medida pelo radar HF). Também permite, de uma certa forma, evitar as medições do radar HF das ondas de *swell*, provenientes de tempestades distantes.

De modo a encontrar o período de maior intensidade de vento, analisaram-se os dados de satélite e os dados do modelo numérico WRF para os meses de funcionamento do radar HF. Identificaram-se dois períodos de maior intensidade de vento, um ocorrido em novembro de 2017 e o outro em fevereiro / março de 2018. Para cada período escolheram-se 15 dias de 6 em 6 horas. O espaçamento de 6 h diz respeito aos dados de satélite disponíveis. Para cada período comparou-se com a média da potência dos picos de *Bragg* da estação BMCL para a *range cell* próxima do ponto geográfico de satélite e WRF.

Para o primeiro período de 2 de novembro de 2017 até ao dia 17 do mesmo mês, como mostra a Figura 61, encontraram-se ventos com valores superiores a 10 m/s. Neste nota-se que a média da potência dos picos tem uma resposta semelhante à intensidade do vento. Os picos inferiores do modelo numérico dizem respeito a falhas de dados do modelo.

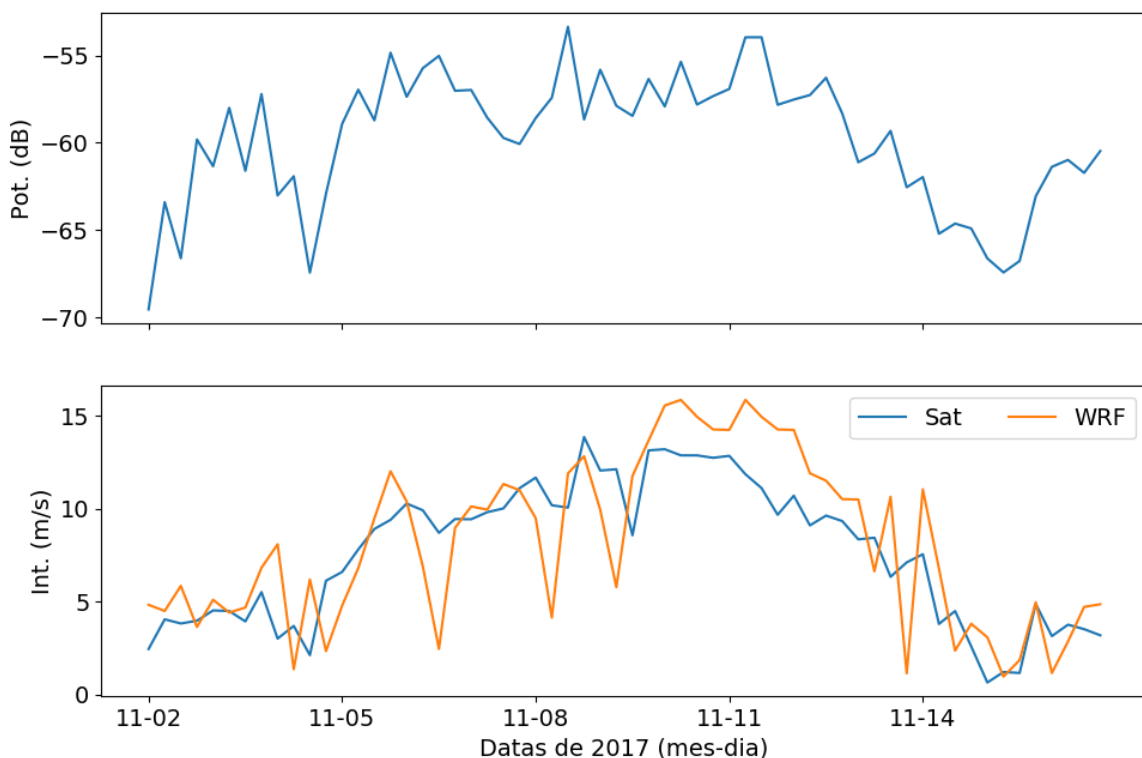


Figura 61: 1º Período – Potência média dos picos de *Bragg* do radar HF (superior) em relação com a intensidade do vento obtida por satélite e modelo WRF (inferior).

No segundo período de 22 de fevereiro de 2018 a 9 de março, como mostra a Figura 62, os ventos estão por volta de valores dos 10 m/s e chegam a atingir

velocidades acima dos 15 m/s. A média da potência dos picos de *Bragg* tem uma resposta semelhante à intensidade do vento, mas verifica-se uma resposta contrária para intensidades muito altas (dia 28) e para intensidades muito baixas (dia 23 / 24).

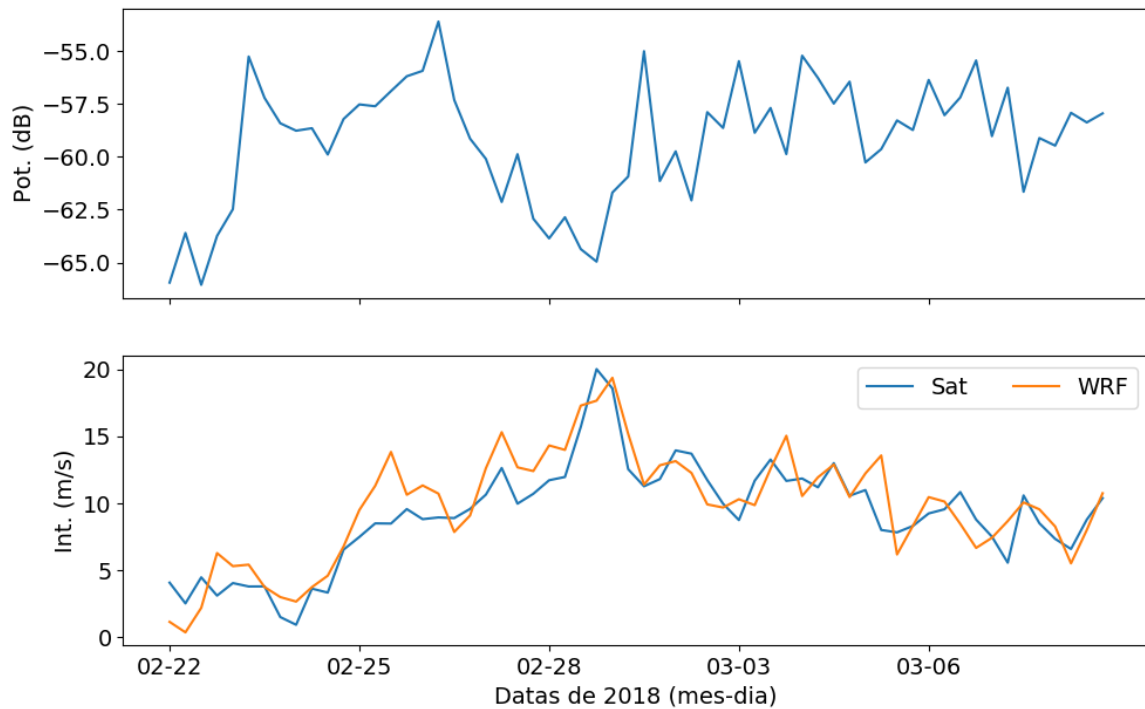


Figura 62: 2º Período – Potência média dos picos de *Bragg* do radar HF (superior) em relação com a intensidade do vento obtida por satélite e modelo WRF (inferior).

6.3 Mapeamento da direção do vento

Efetou-se o mapeamento da direção do vento para cada período. Para o primeiro período escolheu-se para apresentação do mapeamento o dia 10 às 12 h, de modo a ficar mais ou menos a meio do período com maior intensidade de vento. Para o segundo período, com a mesma abordagem anterior, escolheu-se o dia 28 às 6 h.

Para representação gráfica, converteram-se os resultados da direção do vento para as componentes U e V de acordo com o referencial meteorológico, em que:

$$\begin{aligned} U &= \text{sen}\left(\frac{\pi}{180}\theta\right) \\ V &= \text{cos}\left(\frac{\pi}{180}\theta\right) \end{aligned} \quad (41)$$

Como verificado anteriormente, no capítulo 6.1 e no capítulo 3.4 pela Figura 21, o resultado da direção do vento é muito semelhante para o modelo de

Fernandez et al. (1997) em relação ao modelo de *Paduan et al. (1999)* exceto para ângulos próximos de 0 ou de 180 graus. Dessa forma, apresenta-se o mapeamento para o modelo de *Paduan et al. (1999)* e compararam-se os resultados com os valores da direção do vento dos dados de satélite (Sat) e do modelo numérico (WRF).

6.3.1 Vento constante ao longo da radial

Para o vento constante ao longo da radial, relativo ao primeiro período, pela Figura 63, a direção do vento extraída pelo radar HF está a apontar para o lado contrário aos valores obtidos pelo satélite e pelo modelo WRF. Neste é notório que a direção do vento está no lado da ambiguidade do sistema de radar.

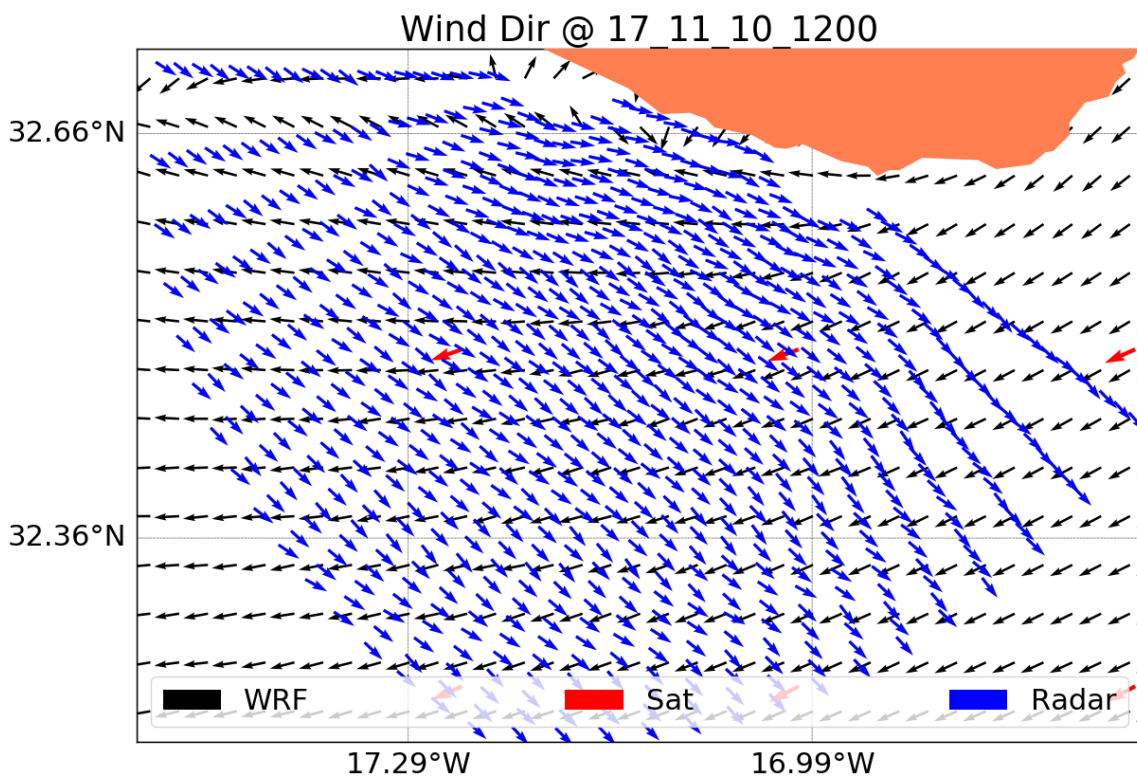


Figura 63: Mapeamento da direção do vento para 2017-11-10_1200. Radar HF (ventos constantes) a azul, satélite a vermelho e modelo WRF a preto.

Em relação ao segundo período, pela Figura 64, os valores são muito semelhantes, na medida em que a direção extraída pelo radar em comparação com os valores de satélite e do modelo, estão todos a apontar para o mesmo sentido.

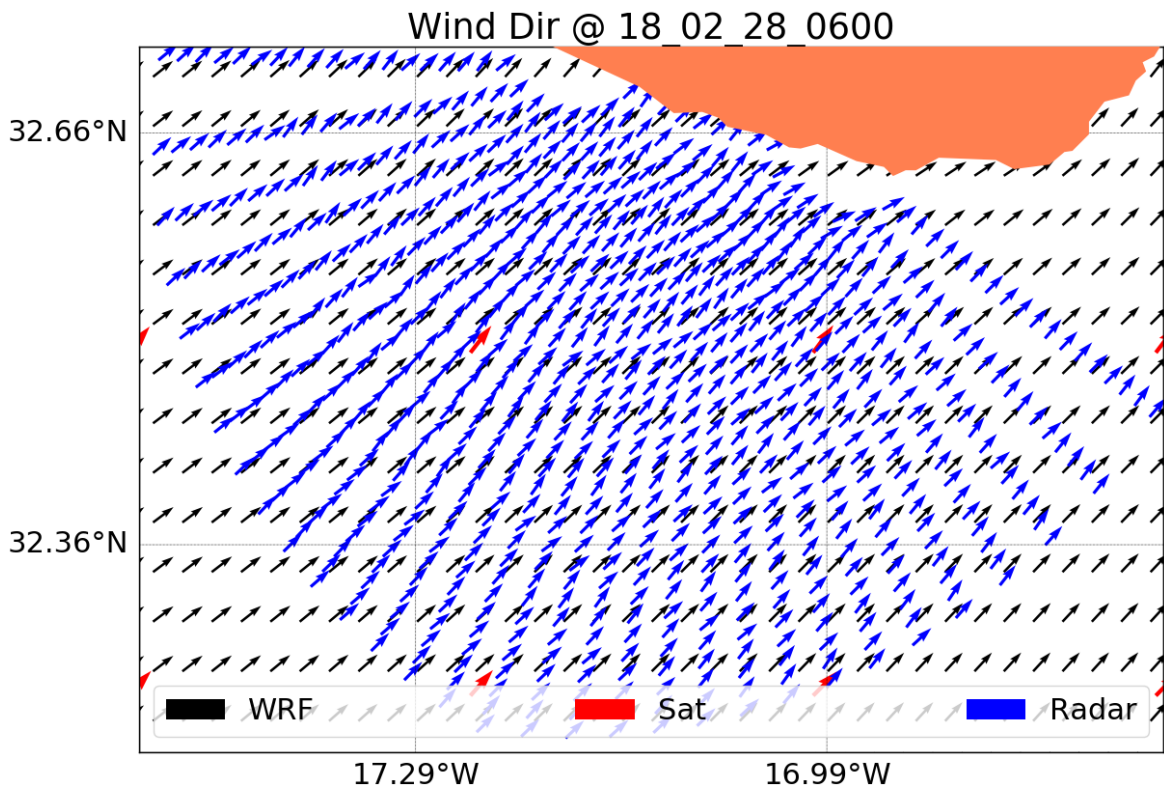


Figura 64: Mapeamento da direção do vento para 2018-02-28_0600. Radar HF (ventos constantes) a azul, satélite a vermelho e modelo WRF a preto.

6.3.2 Vento a variar ao longo da radial

No caso do vento a variar ao longo da radial, para o primeiro período, pela Figura 65, a direção do vento obtida por esta abordagem não corresponde aos valores obtidos pelo satélite e modelo WRF. Verifica-se que o sentido dos vetores estão dos 0 a 180 graus relativo ao lado da ambiguidade. Outra observação é a tendência dos vetores apontarem de forma tangencial em torno das *range cell*.

Para o segundo período, figura em anexo D.1 análoga à Figura 65, os valores resultantes do radar HF estão muito diferentes dos valores pretendidos em relação ao satélite e WRF. Neste verifica-se que os valores resultantes pelo radar HF estão a apontar para o lado certo da ambiguidade, mas a direção não se aproxima dos valores dos dados de satélite e de WRF. De igual modo, é notória a tendência dos vetores em relação às *range cells*, como no primeiro período.

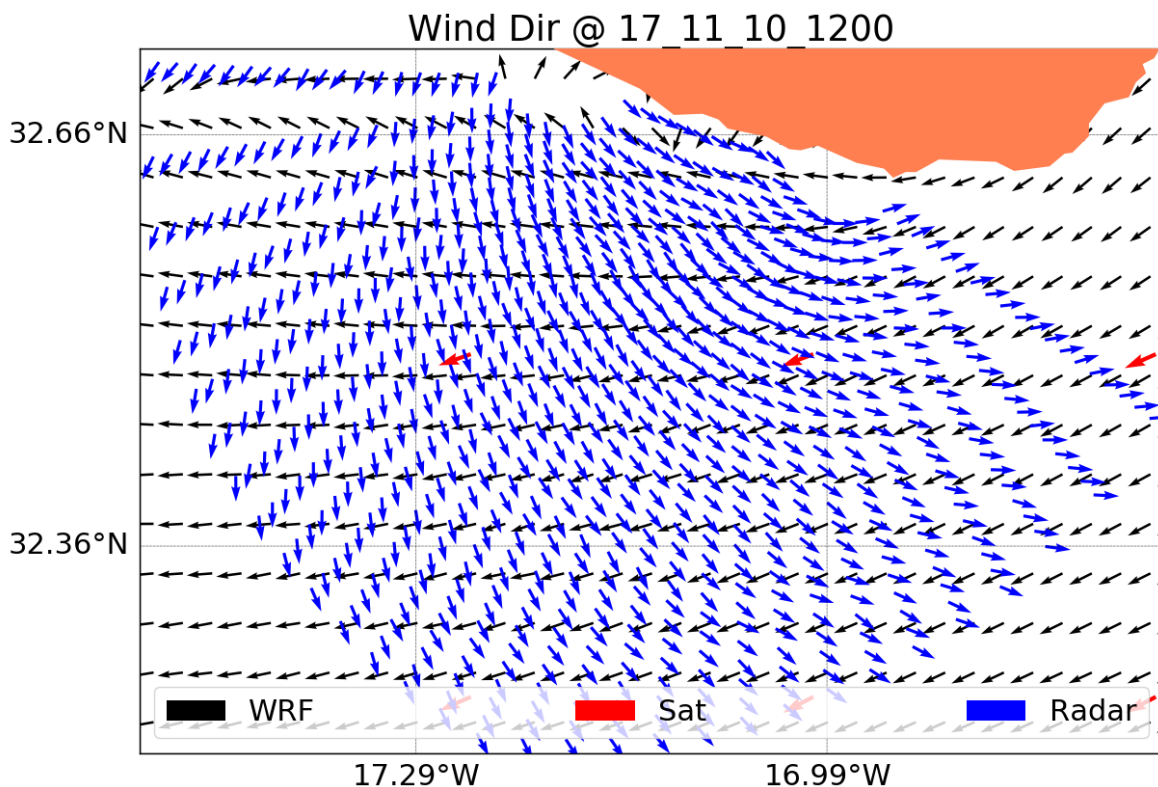


Figura 65: Mapeamento da direção do vento para 2017-11-10_1200. Radar HF (ventos a variar) a azul, satélite a vermelho e modelo WRF a preto.

6.3.3 Vento constante ao longo da radial com resolução de ambiguidade

Para o vento constante ao longo da radial com resolução de ambiguidade, para o primeiro período pela Figura 66, este consegue resolver o sentido da direção dos ventos no que diz respeito à ambiguidade de esquerda ou de direita. No entanto, verifica-se que a metodologia utilizada não consegue reproduzir corretamente o lado da ambiguidade em diversos pontos.

De igual modo, para o segundo período, pela Figura 67, o sentido da ambiguidade da direção dos ventos é resolvido na maior parte dos pontos.

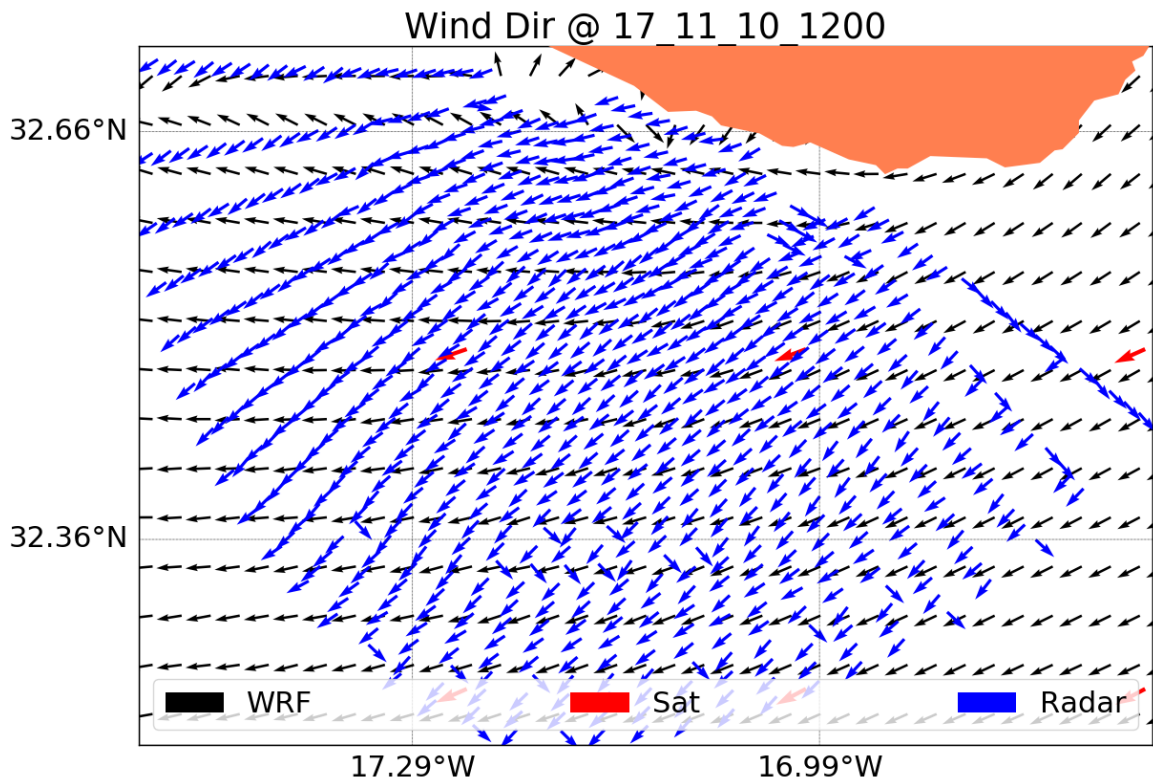


Figura 66: Mapeamento da direção do vento para 2017-11-10_1200. Radar HF (ventos constantes, resolução de ambiguidade) a azul, satélite a vermelho e modelo WRF a preto.

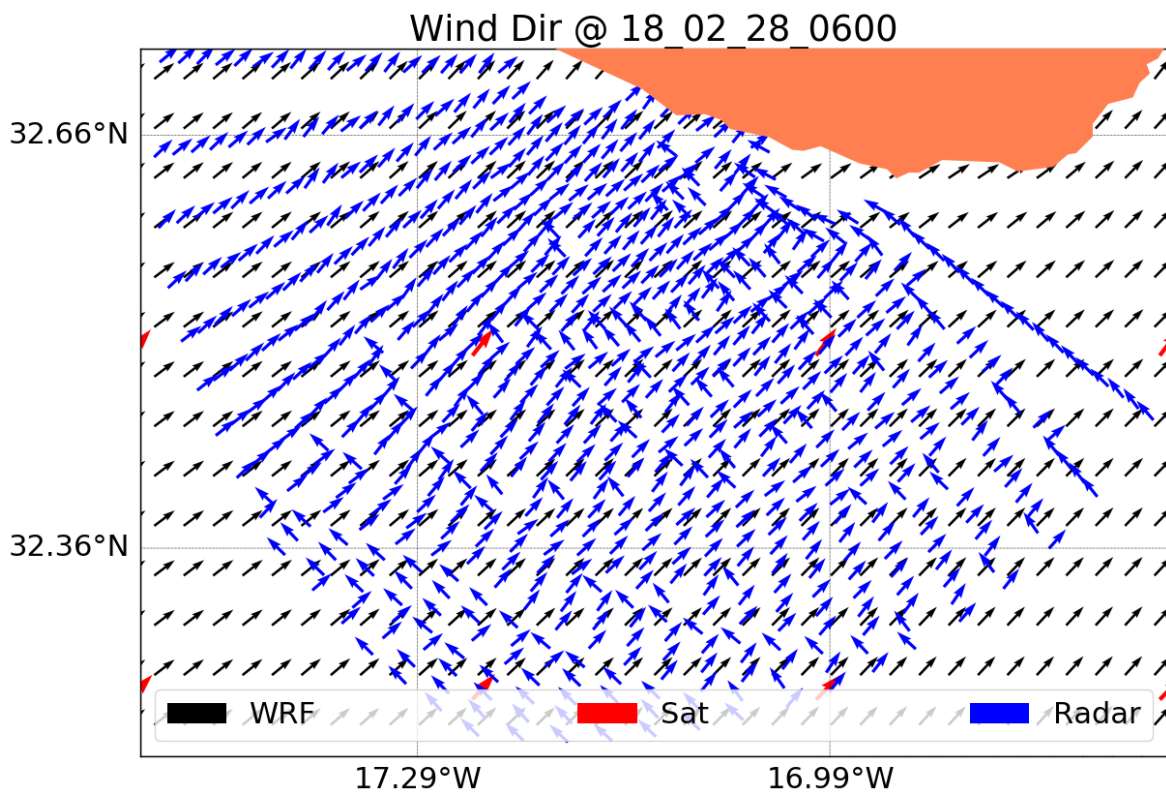


Figura 67: Mapeamento da direção do vento para 2018-02-28_0600. Radar HF (ventos constantes, resolução de ambiguidade) a azul, satélite a vermelho e modelo WRF a preto.

6.3.4 Vento a variar ao longo da radial com resolução de ambiguidade

Em relação ao vento a variar ao longo da radial com resolução de ambiguidade, verifica-se a mesma situação que no ponto 6.3.2, apesar deste em alguns pontos consegue reproduzir o lado da ambiguidade de esquerda ou de direita, mas com valores da direção do vento muito diferentes do esperado em relação aos dados de satélite e de WRF. As figuras estão em anexo D.2.

6.3.5 Método de *Paduan et al.* (1999) para ventos a variar ao longo da radial

No caso do método de *Paduan et al.* (1999) para ambos os períodos, pela Figura 68 e Figura 69, não se verificam melhorias em relação às figuras anteriores para ventos a variar ao longo da radial. Os espaçamentos em falta, na representação dos vetores do radar HF, são referentes à condição do algoritmo em omitir as linhas de Bragg em que ambos os picos não excedam o nível de ruído em 3 dB.

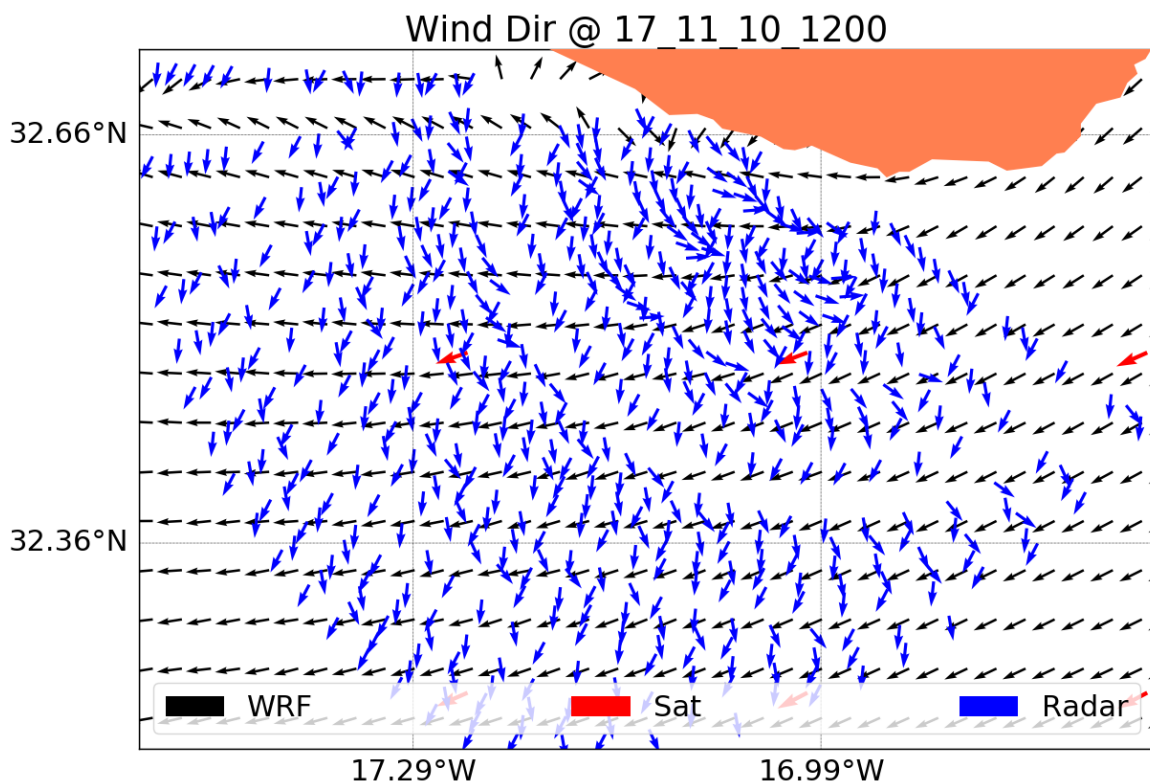


Figura 68: Mapeamento da direção do vento para 2017-11-10_1200. Radar HF (método *Paduan et al.* (1999)) a azul, satélite a vermelho e modelo WRF a preto.

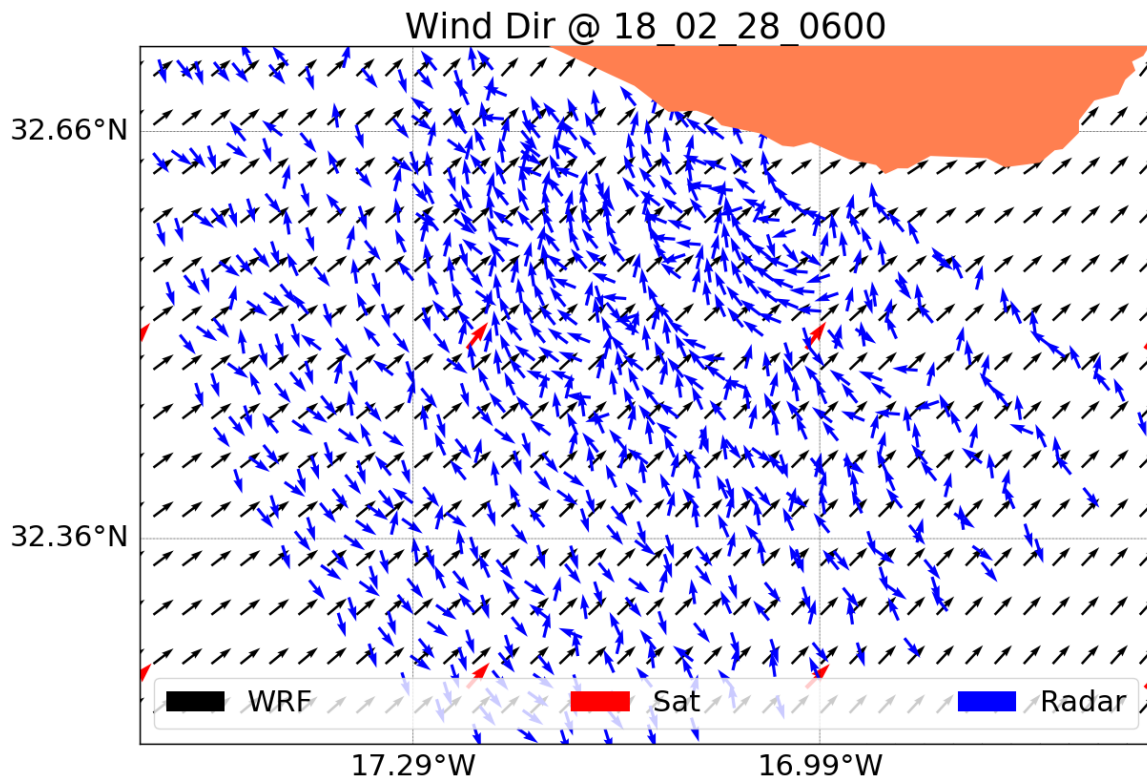


Figura 69: Mapeamento da direção do vento para 2018-02-28_0600. Radar HF (método *Paduan et al.* (1999)) a azul, satélite a vermelho e modelo WRF a preto.

6.3.6 Método baseado em *Paduan et al.* (1999) para ventos constantes ao longo da radial

Considerando o método de *Paduan et al.* (1999) para ventos constantes ao longo da radial, para o primeiro período pela Figura 70 (página seguinte), os resultados aparentemente são melhores, em que foi possível corrigir o sentido do lado ambiguidade de esquerda e de direita, assim como, na maior parte, se aproximar dos valores dos dados de satélite e de WRF. Analogamente, o espaçamento em falta de representação dos vetores do radar, diz respeito às radiais (*range cell*) em que a relação sinal-ruído não excede os 3dB.

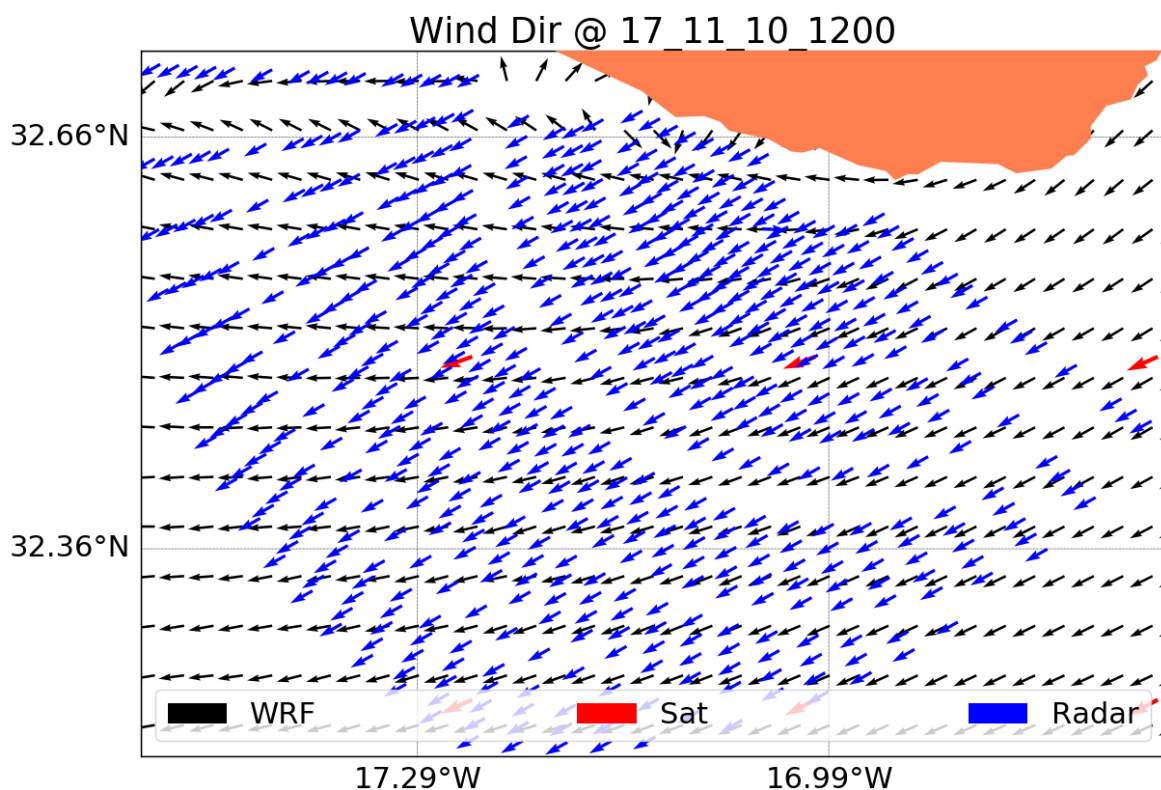


Figura 70: Mapeamento da direção do vento para 2017-11-10_1200. Radar HF (ventos constantes, *Paduan et al. (1999)*) a azul, satélite a vermelho e modelo WRF a preto.

Para o segundo período, pela Figura 71, o sentido dos vetores resultantes do radar HF estão muito diferentes dos valores pretendidos quer em relação aos dados de satélite e de WRF, assim como em comparação dos resultados obtidos anteriormente para ventos constantes. Retificou-se a distância das células de 3 km para 6 km e obteve-se a Figura 72. Neste melhorou-se significativamente o sentido da ambiguidade em relação aos resultados anteriores sem ou com células de 3 km, aproximando-se dos valores de direção do vento dos dados de satélite e de WRF.

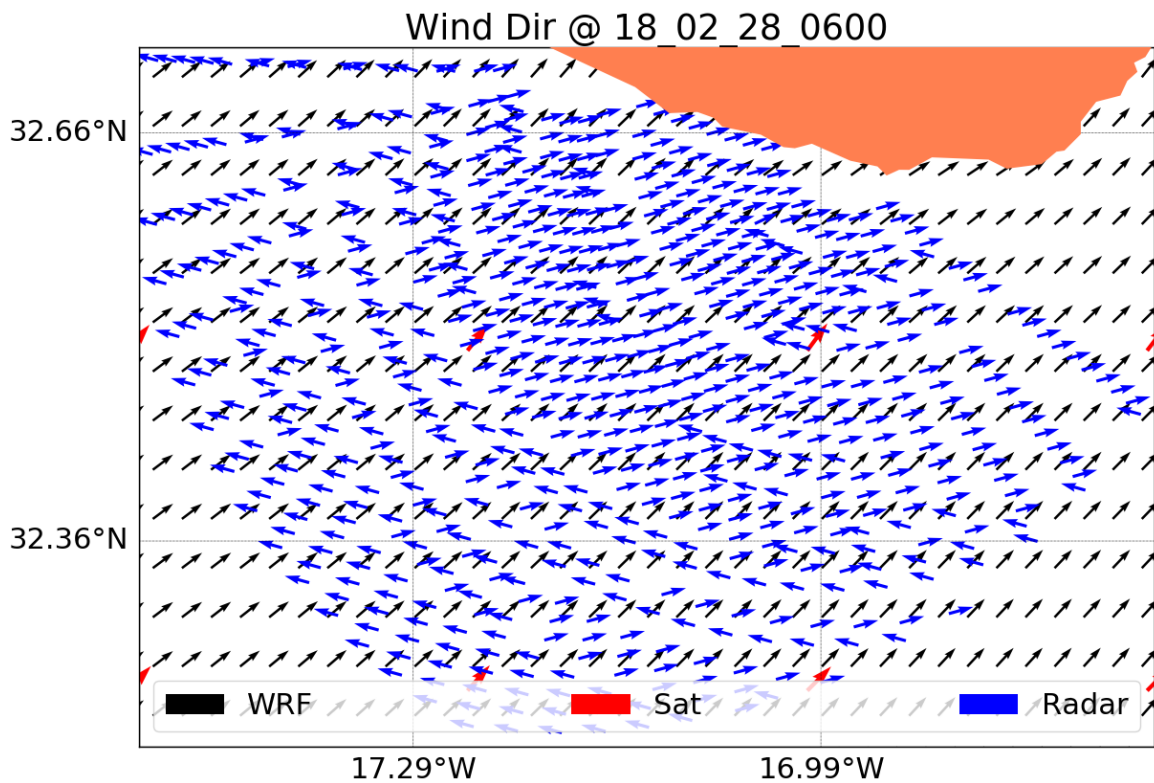


Figura 71: Mapeamento da direção do vento para 2018-02-28_0600. Radar HF (ventos constantes *Paduan et al. (1999)*) a azul, satélite a vermelho e modelo WRF a preto.

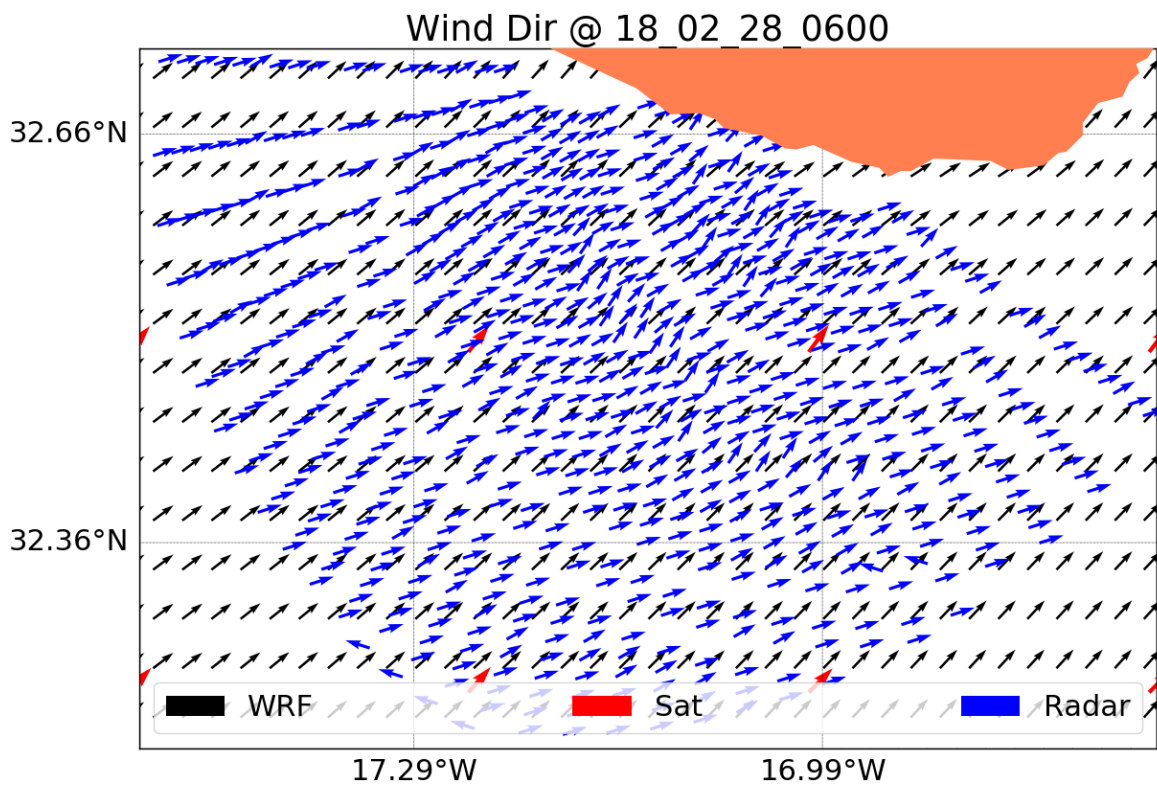


Figura 72: Mapeamento da direção do vento para 2018-02-28_0600 com retificação de células para 6 km. Radar HF (Ventos constantes, *Paduan et al. (1999)*) a azul, satélite a vermelho e modelo WRF a preto.

6.4 Direção do vento ao longo dos dois períodos

Para apresentar os resultados da direção do vento ao longo dos dois períodos, escolheram-se os dois pontos geográficos dos dados de satélite, respetivamente, o ponto 1 (-17.25, 32.5) e o ponto 2 (-17.0, 32.5).

Como verificado anteriormente, os resultados do vento a variar ao longo da radial não reproduz corretamente a direção do vento e constata-se que este não é adequado aos dados espectrais por *range cell* disponibilizados pelo sistema de radar HF de *direction finding*. Assim, comparam-se os resultados com os valores dos dados de satélite (Sat) e do modelo numérico (WRF) da seguinte forma:

V1 – Vento constante ao longo da radial pelo modelo de *Paduan et al. (1999)*, conforme apresentado em 6.3.1;

V2 – Vento constante ao longo da radial pelo modelo de *Paduan et al. (1999)* com resolução de ambiguidade, tal como descrito em 6.3.3;

V3 – Vento constante com base no método em *Paduan et al. (1999)*, de acordo com 6.3.6, com células de 3 km.

Para o primeiro período, no ponto 1 pela Figura 73 e no ponto 2 pela Figura 74, observam-se que do dia 2 até ao dia 5 os resultados do radar HF divergem muito da direção do vento dos dados de satélite e do WRF. Se compararmos, para estes dias, com a intensidade do vento pela Figura 61, pode-se constatar que a intensidade do vento é baixa e pode-se estar perante ondas de *swell*. A partir do dia 6 verificam-se resultados coerentes em que: V1 consegue acompanhar a tendência da direção do vento dos dados de Sat e WRF, mas com valores referentes à ambiguidade; V2 demonstra inconsistência para resolver a ambiguidade no ponto 1 e V3 aparenta não melhorar a inconsistência relativamente a V2, em que pode estar relacionado com a dimensão dos 3 km por cada célula. Considerando à parte a resolução da ambiguidade, os valores entre V1 e V2 são idênticos mas diferem de V3 porque para V1 e V2 são feitas as médias das duas estações, no entanto para V3 (por *Paduan et al. (1999)*) a solução da direção do vento é da estação com a maior média de sinal-ruído, como explicado anteriormente.

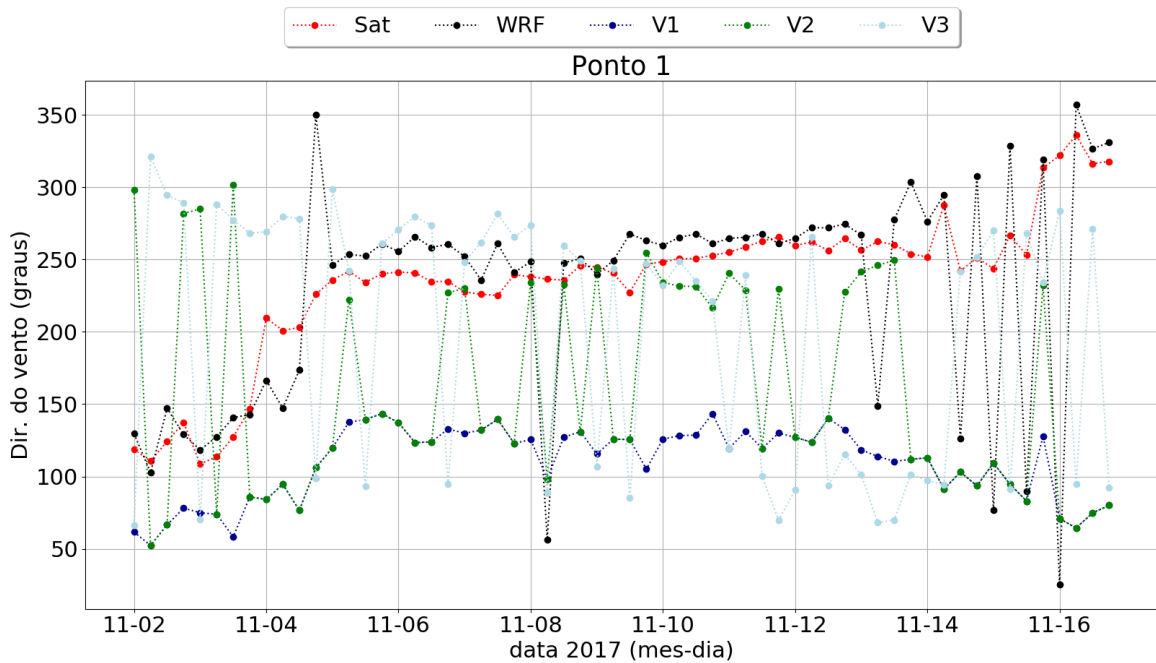


Figura 73: Resultados obtidos da direção do vento para o 1º período do ponto 1.

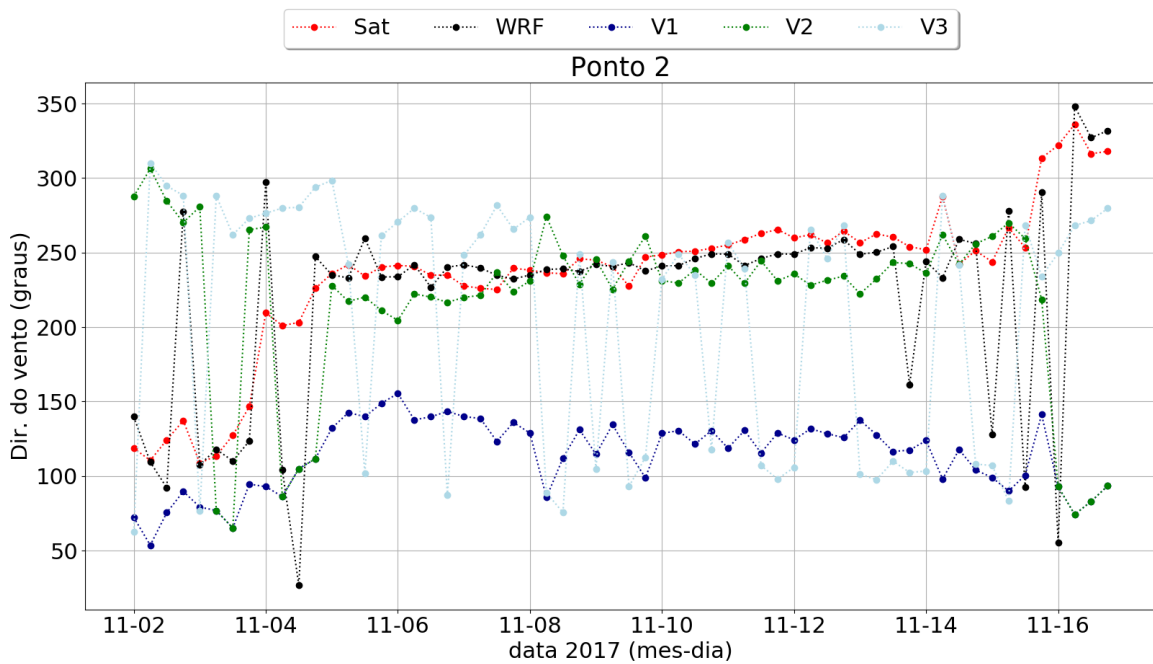


Figura 74: Resultados obtidos da direção do vento para o 1º período do ponto 2.

No segundo período verificam-se no ponto 1 pela Figura 75 e no ponto 2 pela Figura 76 que se está perante a mesma situação discutida para o primeiro período. Comparando com a intensidade do vento pela Figura 62, observam-se que para intensidades abaixo do 5 m/s os resultados da direção do vento do radar não estão

de acordo com os valores dos dados de satélite e do WRF. Para V1 a partir do dia 26 os resultados do radar HF são muito próximos da direção do vento. V2 e V3 apresenta alturas em que não consegue reproduzir o lado da ambiguidade.

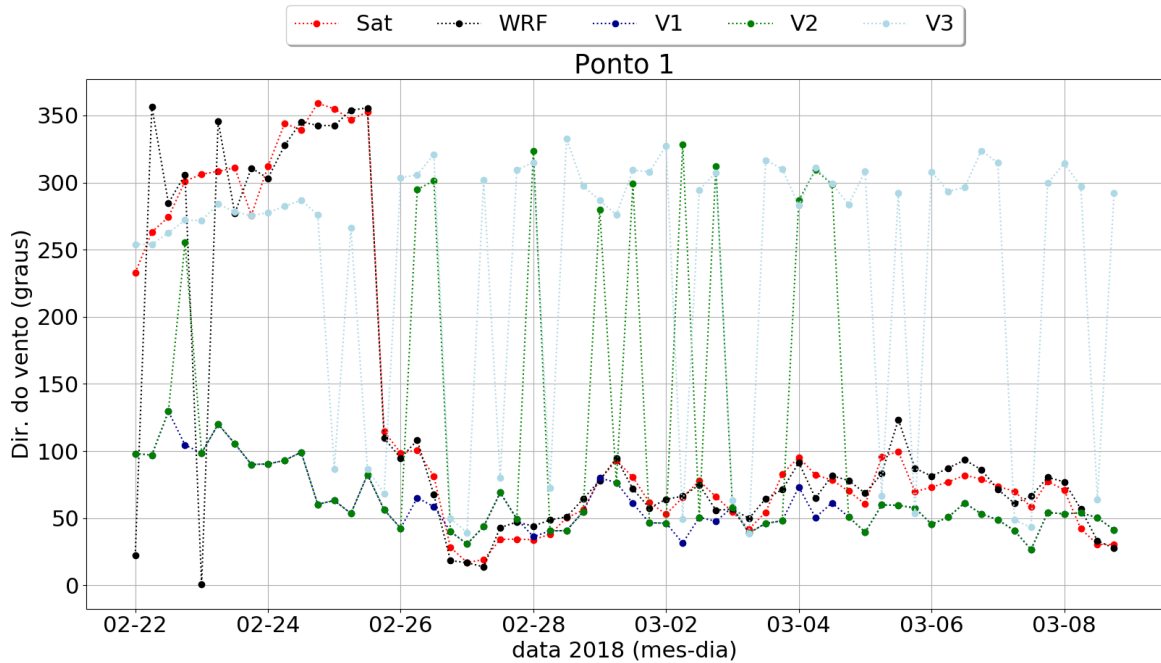


Figura 75: Resultados obtidos da direção do vento para o 2º período do ponto 1.

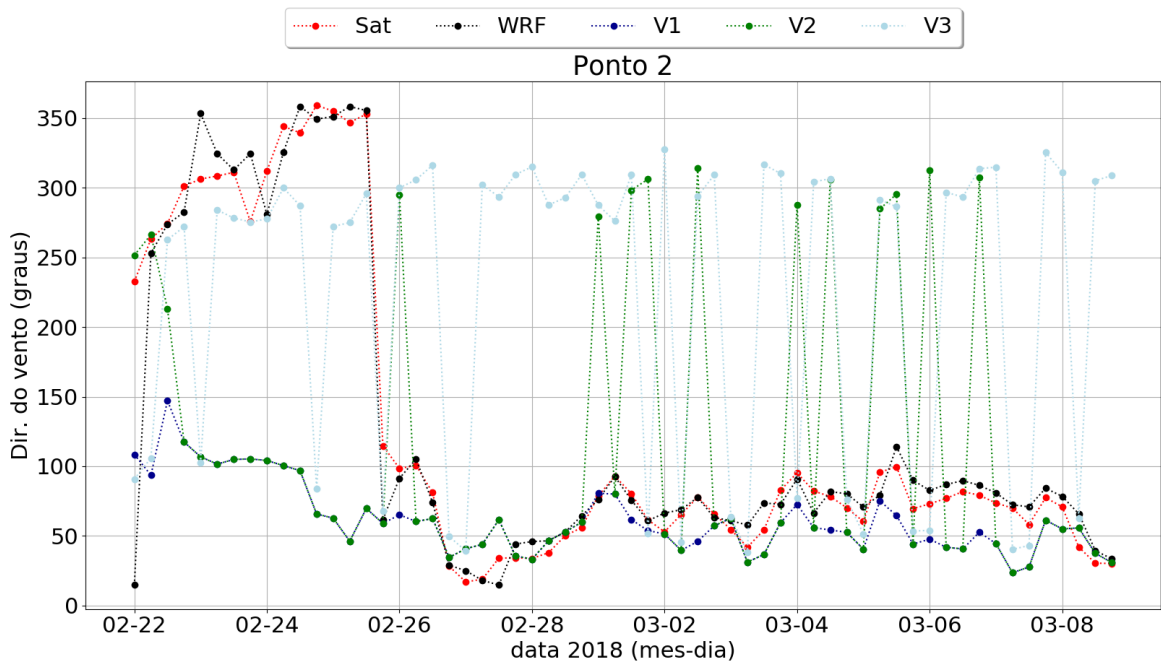


Figura 76: Resultados obtidos da direção do vento para o 2º período do ponto 2.

6.5 Análise estatística do erro e correlação

Para a análise estatística, juntaram-se os dois períodos referidos no capítulo 6.2, representados pela Figura 61 e Figura 62, removendo aqueles cuja intensidade está abaixo dos 5 metros por segundo, perfazendo um total de 72 medições (2017-11-05 a 2017-11-14 e 2018-02-25 a 2018-03-06, de 6 em 6 horas).

Realizou-se a análise estatística do erro e correlação dos resultados dos dados de satélite em relação ao WRF, V1, V2 e V3, com base nas seguintes métricas mais utilizadas para validação de modelos numéricos [59] [60]: o erro absoluto médio (MAE – *Mean Absolute Error*); a raiz do erro quadrático médio (RMSE – *Root Mean Squared Error*); e o coeficiente de correlação de *Pearson* (descrição no anexo D.3). Os resultados dessa análise encontram-se na Tabela 4.

Tabela 4: Análise estatística da raiz do erro quadrático médio (RMSE), erro absoluto médio (MAE) e coeficiente de correlação de *Pearson* (R) dos dados de satélite em relação ao WRF, V1, V2 e V3 no ponto 1 e ponto 2.

		RMSE	MAE	R
Ponto 1	WRF	28,89	15,29	0,10
	V1	87,30	69,96	-0,28
	V2	79,24	58,50	-0,28
	V3	107,44	88,81	0,41
Ponto 2	WRF	14,73	9,47	-0,10
	V1	85,91	68,41	-0,30
	V2	60,42	37,86	0,29
	V3	103,76	83,35	0,25

Pela Tabela 4 o modelo numérico WRF tem o menor erro e o pior coeficiente de correlação em comparação com os resultados de radar HF. O pior coeficiente de correlação para o WRF pode ser explicado pelas falhas do modelo numérico para o período de novembro 2017, que são visíveis nos picos inferiores apresentados na Figura 61 e também visíveis nas Figura 73 e Figura 74 os pontos que se sobressaem com valores errados da direção do vento. O V2 apresenta o menor erro relativamente a V1 e V3. Em ambos os pontos o pior erro encontra-se em V3, mas este apresenta o melhor coeficiente de correlação no ponto 1. Para V2 no ponto 1 a correlação é negativa e no ponto 1 é positiva.

6.6 Direção do vento de uma estação

Como explicado no capítulo 5.4.1, 5.4.3 e 5.4.5, são feitas as médias dos resultados das duas estações para V1 e V2, mas para V3 escolhe-se o resultado da estação com maior média de sinal-ruído. Por conseguinte, levanta-se a questão se uma estação é suficiente para obter o resultado do vento, à parte da resolução da ambiguidade em que se necessita das duas estações.

Fez-se a mesma análise estatística do erro e da correlação, mas para os resultados da direção do vento de cada estação de V1, para o período em que os valores estão com o sentido da ambiguidade (2018-02-26 a 2018-03-07) e obteve-se os resultados de acordo com a Tabela 5. Pela tabela, verifica-se que os erros obtidos para V1, média da direção do vento das duas estações, não são muito diferentes dos erros obtidos da direção do vento de cada estação individual. Para o coeficiente de correlação, nota-se também valores muito próximos, no entanto, observa-se um pior coeficiente de correlação para as estações em relação aos pontos mais distantes (Ponto 1 Estação 2 e Ponto 2 Estação 1). Em relação ao modelo WRF, este tem o menor erro e o melhor coeficiente de correlação, para o período em questão, nos dois pontos.

Tabela 5: Análise estatística da raiz do erro quadrático médio (RMSE), erro absoluto médio (MAE) e coeficiente de correlação de *Pearson* (R) dos dados de satélite em relação ao WRF, V1 e de cada estação.

		RMSE	MAE	R
Ponto 1	WRF	9,68	8,18	0,92
	V1	23,58	19,92	0,56
	Estação 1	21,58	18,22	0,55
	Estação 2	27,48	22,95	0,45
Ponto 2	WRF	10,03	8,29	0,91
	V1	22,09	18,88	0,63
	Estação 1	24,05	20,46	0,37
	Estação 2	23,16	19,73	0,68

No anexo D.4 comparou-se os resultados de V1 com a direção do vento de cada estação, juntamente com os dados de satélite e WRF, para o mesmo período. Observa-se que os valores da direção do vento obtida por cada estação, em certos

instantes de tempo, estão sobrepostos entre si e, noutros instantes, os resultados de uma estação aparentam ser melhores quando comparados com a sua média.

6.7 Discussão dos resultados

Pela primeira vez aplicou-se o método *Paduan et al. (1999)* para dados da *CODAR SeaSonde* para o mapeamento da direção do vento, que à partida seria o mais adequado para a resolução da ambiguidade das soluções de esquerda ou de direita. Todavia, este método não consegue determinar corretamente a direção do vento porque a *CODAR SeaSonde* não tem dados espectrais direcionais, uma vez que são dados espectrais por cada *range cell*. Consequentemente, o ângulo θ é constante ao longo da cada *range cell*. Dessa forma, os resultados com base neste método de *Paduan et al. (1999)* para ventos constantes ao longo da radial foram mais coerentes quando comparados com os dados de satélite e do WRF. Todavia há que ter em consideração que por *Paduan et al. (1999)* selecionam-se as linhas de Bragg úteis, por intermédio do nível do sinal-ruído (excedem em pelo menos 3 dB), para eliminar os pontos com sinal ruidoso. No entanto, para os dados da *CODAR SeaSonde* não é eliminado apenas um ponto, mas todos os pontos que estão na mesma *range cell*. Também há que ponderar a escolha da dimensão das células em que um raio muito pequeno ou muito grande pode não ser suficiente para melhorar a representação da direção do vento. Outra apreciação tem a ver com a escolha do resultado da direção do vento de uma estação pela média do sinal ruído, em que se deve ponderar a hipótese de não ser o mais adequado, visto que, quando comparados os resultados das duas estações (Tabela 5), verifica-se pelo coeficiente de correlação que a tendência é melhor para as estações que estão mais próximas do ponto, notando-se, para estes pontos, um decréscimo do valor dos erros. Estas considerações, de uma certa forma, permitem justificar o maior erro nos resultados para V3 em relação a V2 e V1 na análise estatística para os dois períodos de maior intensidade do vento (Tabela 4).

Comparando os dois modelos, pela equação (26) por *Fernandez et al. (1997)* e pela equação (27) por *Paduan et al. (1999)*, nota-se que os resultados são próximos para valores da direção do vento entre 20 a 160 graus. Para os outros valores (0 a 20 e 160 a 180 graus), para a equação de *Fernandez et al. (1997)* a relação dos picos de *Bragg* tomam valores muito elevados (muito acima de 24 dB) e para *Paduan et al. (1999)* encontra-se limitado aos 24 dB. No entanto, este limite pode ser questionável, na medida em que a relação máxima verificada no presente

estudo toma valores a rondar os 20 a -20 dB (Figura 59). Uma outra condicionante constatada no modelo de *Fernandez et al.* (1997) diz respeito ao valor constante para o parâmetro s ($s=4$), visto que outros autores utilizam outros valores para o parâmetro s , como por exemplo o apresentado na Figura 21, com $s=3$.

Em relação aos dois períodos, nota-se que os resultados da direção do vento do radar HF são piores quando confrontados com intensidades de vento abaixo dos 5 metros por segundo (Figura 61 e Figura 62). Isto poderá estar associado as ondas *swell*, ou seja, medições efetuadas com o radar de ondulação proveniente de tempestades distantes.

Ignorando a ambiguidade de esquerda ou de direita, os valores obtidos de direção do vento constante ao longo da radial são aproximados dos dados de satélite e do modelo WRF. Contudo, não foi tido em conta, por um lado, os limites de deteção do radar (ou seja, o ponto máximo e mínimo em se consegue detetar a ondulação para frequência de 13,5 MHz) e, por outro, a influência das ondas *swell* em relação às ondas geradas localmente pelo vento.

6.8 Conclusão

Neste capítulo compararam-se os resultados do ângulo da direção do vento obtidas pela equação de *Fernandez et al.* (1997) em relação à de *Paduan et al.* (1999). Verificou-se a potência do sinal do radar HF relativamente à intensidade do vento dos dois períodos para amostragem dos resultados. Analisaram-se os resultados das diferentes metodologias em relação aos dados de satélite e do modelo numérico WRF e discutiram-se os resultados.

No capítulo seguinte expõem-se as conclusões e trabalhos futuros.

7 CONCLUSÕES

Conseguiu-se apresentar o mapeamento da direção do vento, a partir de dados recolhidos de duas estações da CODAR *SeaSonde*. Isto foi possível por intermédio de dois modelos diferentes, onde se verificaram resultados interessantes, que tiveram bom termo de comparação, assim como resultados com muita variabilidade, não correspondendo às expectativas pretendidas.

As análises da direção do vento extraídas pelo radar HF foram focadas em dois períodos de maior intensidade de vento, de acordo com os valores de satélite e do modelo numérico WRF, com o intuito de retirar algumas variáveis, tais como as ondas geradas por ventos distantes (*swell*). Através desta análise, observou-se a existência de uma tendência entre a potência dos picos de *Bragg* com a intensidade do vento.

Analisaram-se vários artigos de extração de direção e intensidade do vento para sistemas de radar HF, em que nenhum se destaca como solução reverente. Além da relação da diferença dos picos de *Bragg*, são exploradas soluções por intermédio dos modelos oceanográficos de onda-vento e corrente-vento, assim como de modelos e métodos matemáticos complexos (Ex. *least squares method*), que estão muito além do âmbito deste trabalho.

Verificou-se que por *Fernandez et al.* (1997) nalguns casos tem uma boa resposta, no entanto, notaram-se duas principais falhas. A primeira diz respeito a este não se encontrar preparado para resolver a ambiguidade da direção do vento. A outra está relacionada com a limitação do modelo, que propõe extrair direções de vento com uma diferença de entre os picos de *Bragg* para valores maiores que 20 dB.

Com a utilização do método de *Paduan et al.* (1999) melhorou-se significativamente os resultados da direção do vento comparativamente ao método anterior quando aplicado a ventos constantes ao longo da radial. Constatou-se que o modelo responde melhor à direção do vento em relação à diferença entre os picos de *Bragg*, compreendidos entre os 24 dB. No entanto, observou-se que existem pontos esporádicos que falham na resolução da ambiguidade, relacionando-se com o facto de que os dados espectrais disponibilizados são constituídos por *range cell*. Também devido a estes dados espectrais, a seleção das linhas de *Bragg* úteis podem excluir todos os pontos coincidentes com a mesma radial. Além disso, verificou-se que a escolha da dimensão das células influencia a representação da direção do

vento. E mostrou-se que os resultados provenientes de uma estação conseguem ter uma boa resposta, exceto na resolução da ambiguidade que precisa de duas estações.

Demonstrou-se outra capacidade única dos sistemas de radar HF em permitir fornecer medições da direção do vento costeiro com uma resolução de poucos quilómetros.

Apesar da dificuldade de estimar a velocidade do vento, os sistemas de radar HF evidenciam a habilidade de mapear um parâmetro importante como a direção do vento, de registá-lo de hora em hora e visualizá-lo em tempo real numa ampla área.

Os resultados podem ser combinados com outras medições de ventos, como por exemplo, com os dados de satélite com menor resolução, assim como com os valores calculados em modelos numéricos. Estes podem permitir, entre outros, o estudo da interação da atmosfera costeira com o oceano com uma melhor resolução espacial e temporal.

Para trabalhos futuros propõe-se evidenciar um método capaz de resolver a ambiguidade de esquerda e direita para os sistemas de *direction finding*, de explorar a possibilidade de distinguir as ondas de *swell* das ondas geradas pelo vento local e otimizar os resultados da direção, assim como implementar a extração da velocidade do vento para os sistemas de radar HF.

REFERÊNCIAS

- [1] J. D. Paduan e H. C. Graber, "Introduction to high-frequency radar: reality and myth", *Oceanography*, vol. 10, pp. 36-39, 1997.
- [2] C. C. Teague, J. F. Vesecky e D. M. Fernandez, "HF radar instruments, past to present", *Oceanography*, vol. 10, pp. 40-44, 1997.
- [3] Integrated Ocean Observing System (IOOS), "Coastal Observing", [Online]. Available: <http://www.ioosassociation.org/coastalobserving>. [Acedido em 05 10 2018].
- [4] J. Harlan, E. Terrill, L. Hazard, C. Keen, D. Barrick, C. Whelan, S. Howden e J. Kobut, "The Integrated Ocean Observing System High-Frequency Radar Network: Status and Local, Regional, and National Applications.", *Marine Technology Society Journal*, vol. 44, pp. 122-132, 2010.
- [5] M. L. Skolnik, *Introduction to Radar Systems*, McGraw-Hill, 2001.
- [6] A. Joseph, *Measuring Ocean Currents. Tools, Technologies, and Data*, Elsevier, 2014.
- [7] S. Kingsley e S. Quegan, *Understanding Radar Systems*, Raleigh, NC: SciTech Publishing, Inc, 1999.
- [8] A. P. Trujillo e H. V. Thurman, *Essentials of Oceanography*, Prentice Hall, 2011.
- [9] P. Relvas, "Circulação induzida pelo vento. Apontamentos complementares de oceanografia física", Universidade do Algarve, [Online]. Available: http://w3.ualg.pt/~prelvas/Circulacao_Oceanica/Circulacao_Vento_notas_adicionais.pdf. [Acedido em 18 11 2018].
- [10] J. D. Paduan, "HF radar data assimilation in the Monterey Bay area", *Journal of Geophysical Research*, vol. 109, pp. 1-17, 2004.
- [11] Medcliv, "How the HF radar works", [Online]. Available: <http://medcliv.es/en/instrumentos/radar-costero-hf/>. [Acedido em 07 06 2018].
- [12] D. E. Barrick e B. J. Lipa, "Evolution of Bearing Determination in HF Current Mapping Radars", *Oceanography*, vol. 10, pp. 72-75, 1997.

- [13] CODAR Ocean Sensors, "CODAR Ocean Sensors", [Online]. Available: <http://www.codar.com>. [Acedido em 13 10 2018].
- [14] Qualitas instruments, "Qualitas instruments", [Online]. Available: <http://www.qualitasinstruments.com>. [Acedido em 13 10 2018].
- [15] B. Lipa, B. Nyden, D. S. Ullman e E. Terrill, "SeaSonde Radial Velocities: Derivation and Internal Consistency", *Journal of oceanic Engineering*, vol. 31, pp. 850-861, 2006.
- [16] B. J. Lipa e D. E. Barrick, "Least-Squares Methods for the Extraction of Surface Currents from CODAR Crossed-Loop Data: Application at ARSLOE", *Journal of Oceanic Engineering*, Vols. %1 de %2OE-8, NO. 4, pp. 226-253, 1983.
- [17] D. E. Barrick e B. J. Lipa, "Radar Angle Determination With MUSIC Direction Finding". United States Patente 5,990,834 , 23 Nov 1999.
- [18] B. Lipa e B. Nyden, "Directional Wave Information From the SeaSonde", *Journal of Oceanic Engineering*, vol. 30, pp. 221 - 231, 2005.
- [19] D. E. Barrick, "Theory of HF and VHF propagation across the rough sea, 2, Application to HF and VHF propagation above the sea", *Radio Science*, vol. 6.5, pp. 527-533, 1971.
- [20] D. E. Barrick, "First-order theory and analysis of MF/HF/VHF scatter from the sea", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 20.1, pp. 2-10, 1972.
- [21] A. E. Long e D. B. Trizna, "Mapping of North Atlantic winds by HF radar sea backscatter interpretation", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 21.5, pp. 680-685, 1973.
- [22] R. H. Stewart e J. R. Barnum, "Radio measurements of oceanic winds at long ranges: An evaluation", *Radio Science*, vol. 10.10, pp. 853-857, 1975.
- [23] M. L. Heron e R. J. Rose, "On the application of HF ocean radar to the observation of temporal and spatial changes in wind direction", *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 11.2, pp. 210-218, 1986.
- [24] T. M. Georges, . J. A. Harlan, . L. R. Meyer e R. G. Peer, "Tracking Hurricane Claudette with the US Air Force over-the-horizon radar", *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, vol. 10.4, pp. 441-451, 1993.

- [25] J. A. Harlan e T. M. Georges, "An empirical relation between ocean-surface wind direction and the Bragg line ratio of HF radar sea echo spectra", *Journal of Geophysical Research: Oceans*, vol. 99.C4, pp. 7971-7978, 1994.
- [26] D. M. Fernandez, H. C. Graber, J. D. Paduan e D. E. Barrick, "Mapping wind direction with HF radar", *Oceanography*, vol. 10, pp. 93-95, 1997.
- [27] J. D. Paduan, R. Delgado, J. F. Vesecky, Y. Fernandez, J. Daida e C. Teague, "Mapping coastal winds with HF radar", *Proceedings of the IEEE Sixth Working Conference on Current Measurement*, vol. 99CH36331, pp. 28-32, 1999.
- [28] P. C. Liu, "Is the wind wave frequency spectrum outdated", *Ocean Engineering*, vol. 27.5, pp. 577-588, 2000.
- [29] J. Drake, J. Vesecky, K. Laws, C. Teague, F. Ludwig e J. Paduan, "Vector wind field measurements using multifrequency HF radar", *Proceedings of the IEEE/OES Seventh Working Conference on Current Measurement Technology*, pp. 88-91, 2003.
- [30] M. L. Heron e P. Marrone, "Wind direction manifestation on HF ocean radar echoes", *OCEANS'10 IEEE SYDNEY*, pp. 1-6, 2010.
- [31] W. Shen, K.-W. Gurgel, G. Voulgaris, T. Schlick e D. Stammer, "Wind-speed inversion from HF radar first-order backscatter signal", *Ocean Dynamics*, vol. 62.1, pp. 105-121, 2012.
- [32] B. Lipa, D. Barrick, A. Alonso-Martirena, M. Fernandes, M. I. Ferrer e B. Nyden, "Braham Project High Frequency Radar Ocean Measurements: Currents, Winds, Waves and Their Interactions", *Remote Sensing*, vol. 6, pp. 12094-12117, 2014.
- [33] W. Zhang, N. Ebuchi, Y. Fukamachi e Y. Yoshikawa, "Estimation of wind drift current in the Soya Strait", *Journal of oceanography*, vol. 72.2, pp. 299-311, 2016.
- [34] A. Kirincich, "Remote sensing of the surface wind field over the coastal ocean via direct calibration of HF radar backscatter power", *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, vol. 33.7, pp. 1377-1392, 2016.
- [35] Y. Hisaki, "Sea Surface Wind Correction Using HF Ocean Radar and Its Impact on Coastal Wave Prediction", *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, vol. 34.9, pp. 2001-2020, 2017.

- [36] W. Shen e K.-W. Gurgel, “Wind direction inversion from narrow-beam HF radar backscatter signals in low and high wind conditions at different radar frequencies”, *Remote Sensing*, vol. 10, pp. 1480 (1-16), 2018.
- [37] C. O. Sensors, “SeaSonde Site Installation Schematic”, [Online]. Available: http://www.codar.com/images/products/SeaSonde/SeaSonde_RadarSite_install.pdf. [Acedido em 15 07 2019].
- [38] C. O. Sensors, “CODAR OCEAN SENSORS SeaSonde Remote Unit System Specifications, Product Code: SSRS-100”, [Online]. Available: http://www.codar.com/images/products/SeaSonde/SeaSonde_Product_Specs_012017/CODARspec_SSRS-100_v5-rev20161214-draftv2.pdf. [Acedido em 15 07 2019].
- [39] CODAR Ocean Sensors, *Using Vessel Echoes to Calibrate HF Radar Antenna Patterns*, Kaohsiung, Taiwan: The 2th Ocean Radar Conference for Asia-Pacific (ORCA II), 2014.
- [40] C. O. Sensors, “Antenna Patterns Made Even Easier”, *CODAR Currents Newsletter*, vol. Sping / Summer, 2011.
- [41] C. O. Sensors, “SeaSondeController Application Guide”, CODAR Ocean Sensors, 2009.
- [42] D. Barrick, J. Isaacson e P. Kung, “SeaSonde Averaging and Ship Removal in CPro”, CODAR SeaSonde, 2006.
- [43] C. O. Sensors, “SeaSonde Radial Site Release 6 - RadialWebServer Users Guide”, 2009.
- [44] C. O. Sensors, “PORTUS by Qualitas® Marine Information System”, *CODAR Currents*, vol. Fall, 2017.
- [45] Qualitas, “Why PORTUS Marine Information System?”, 03 2012. [Online]. Available: http://www.qualitasremos.com/wp-content/uploads/2012/03/2012_CATALOGO_QR_IS-PORTUS_AF.pdf. [Acedido em 06 08 2019].
- [46] CODAR Ocean Sensors, “CrossSpectra File Format V5,” *SeaSonde Radial Site*, vol. Release 6 , 2009.
- [47] UNIDATA, “Network Common Data Form (NetCDF),” UCAR, [Online]. Available: <https://www.unidata.ucar.edu/software/netcdf/>. [Acedido em 07 08 2019].

- [48] R. Rew e G. Davis, “NetCDF: an interface for scientific data access”, *IEEE computer graphics and applications*, vol. 10 (4), pp. 76-82, 1990.
- [49] N. C. f. A. R. (NCAR), “WRF - Weather Research & Forecasting Mode”, University Corporation for Atmospheric Research (UCAR), [Online]. Available: <https://www.mmm.ucar.edu/weather-research-and-forecasting-model>. [Acedido em 06 08 2019].
- [50] R. M. Caldeira e R. Tomé, “Wake response to an ocean-feedback mechanism: Madeira Island case study”, *Boundary-layer meteorology*, vol. 148 (2), pp. 419-436, 2013.
- [51] Observatório Oceânico da Madeira (OOM), “Protudos- Data Center”, [Online]. Available: <https://oom.arditi.pt/index.php?page=produtos>. [Acedido em 06 08 2019].
- [52] R. Faria, R. R. Vieira e R. Caldeira, “COAWST model output for 10 typical, maximum and minimum representative years for Madeira and Porto Santo Islands wind studies”, 2019.
- [53] R. M. Caldeira, X. Couvelard, R. Vieira, C. Lucas, I. Sala e I. Casanova, “Challenges of building an operational ocean forecasting system for small island regions: regional to local”, *Journal of Operational Oceanography*, vol. 9 (1), pp. 1-12, 2016.
- [54] X. Couvelard, R. M. Caldeira, A. Araújo e R. Tomé, “Wind mediated vorticity-generation and eddy-confinement, leeward of the Madeira Island: 2008 numerical case study”, *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, vol. 58, pp. 128-149, 2012.
- [55] C. -. M. E. M. Service, “Global Ocean Wind L4 Near Real Time 6 Hourly Observations”, E.U. Copernicus Marine Service Information, [Online]. Available: http://marine.copernicus.eu/services-portfolio/access-to-products/?option=com_csw&view=details&product_id=WIND_GLO_WIND_L4_NRT_OBSERVATIONS_012_004. [Acedido em 06 08 2019].
- [56] C. -. M. E. M. Service, “Quality Information Document For the Global Ocean Wind Products”, 2019.
- [57] Python, “Python”, [Online]. Available: <https://www.python.org/>. [Acedido em 14 08 2019].
- [58] Spyder, “Spyder - The Scientific Python Development Environment”, [Online]. Available: <https://www.spyder-ide.org/>. [Acedido em 17 08 2019].

- [59] C. Draxl e et al., "Overview and meteorological validation of the wind integration national dataset toolkit", *National Renewable Energy Lab*, nº Chapter 3.4 Error Metrics, p. 28, 2015.
- [60] M. Mughal e et al., "Wind modelling, validation and sensitivity study using Weather Research and Forecasting model in complex terrain", *Environmental modelling and software*, nº Chapter 3.8 Model validation, pp. 107-125, 2017.

ANEXO A

Em anexo A apresentam-se os formatos dos ficheiros disponibilizados do sistema de radar HF da CODAR.

A.1 Ficheiro de dados das correntes radiais (.ruv)

Pela Figura A.1, verifica-se a composição do cabeçalho (*header*) para um ficheiro de corrente radial (.ruv) num determinado dia da estação BMCL.

```
%CTF: 1.00
%FileType: LLUV rdls "RadialMap"
%LLUVSpec: 1.18 2012 05 07
%UUID: C6F1C8CA-AC22-4AB7-A766-4AB574D3CBB6
%Manufacturer: CODAR Ocean Sensors. SeaSonde
%Site: BMCL ""
%TimeStamp: 2018 02 01 00 00 00
%TimeZone: "UTC" +0.000 0 "Atlantic/Reykjavik"
%TimeCoverage: 75.000 Minutes
%Origin: 32.6493333 -16.9795833
%GreatCircle: "WGS84" 6378137.000 298.257223562997
%GeodVersion: "CGEO" 1.57 2009 03 10
%LLUVTrustData: all %% all lluv xyuv rbvd
%RangeStart: 1
%RangeEnd: 68
%RangeResolutionKMeters: 1.510100
%AntennaBearing: 286.0 True
%ReferenceBearing: 0 True
%AngularResolution: 5 Deg
%SpatialResolution: 5 Deg
%PatternType: Ideal
%PatternDate: 2014 01 22 11 05 06
%PatternResolution: 1.0 deg
%TransmitCenterFreqMHz: 13.500000
%DopplerResolutionHzPerBin: 0.001953125
%FirstOrderMethod: 0
%BraggSmoothingPoints: 3
%CurrentVelocityLimit: 105.0
%BraggHasSecondOrder: 1
%RadialBraggPeakDropOff: 630.960
%RadialBraggPeakNull: 100.000
%RadialBraggNoiseThreshold: 8.000
%PatternAmplitudeCorrections: 1.0000 1.0000
%PatternPhaseCorrections: -113.20 -130.60
%PatternAmplitudeCalculations: 0.2920 0.2658
%PatternPhaseCalculations: -117.00 -140.10
%RadialMusicParameters: 40.000 20.000 2.000
%MergedCount: 6
%RadialMinimumMergePoints: 2
%FirstOrderCalc: 1
%MergeMethod: 1 MedianVectors
%PatternMethod: 1 PatternVectors
%TransmitSweepRateHz: 2.000000
%TransmitBandwidthKHz: -99.259377
%SpectraRangeCells: 95
%SpectraDopplerCells: 1024
%TableType: LLUV RDL9
%TableColumns: 18
%TableColumnTypes: LOND LATD VELU VELV VFLG ESPC ETMP MAXV MINV ERSC ERTC XDST YDST RNGE BEAR VELO HEAD SPRC
%TableRows: 2155
%TableStart:
```

Figura A.1: Cabeçalho de um ficheiro de corrente radial pela CODAR.

Para o mesmo ficheiro, na linha abaixo ao *header*, verifica-se a secção dos dados pela Figura A.2,

%	Longitude	Latitude	U comp	V comp	VectorFlag	Spatial	Temporal	Velocity	Velocity	Spatial	Temporal	Y Distance	Y Distance	Range	Bearing	Velocity	Direction	Spectra
%	(deg)	(deg)	(cm/s)	(cm/s)	(GridCode)	Quality	Quality	Maximum	Minimum	Count	Count	(km)	(km)	(km)	(True)	(cm/s)	(True)	FlagCell
-16.9735144	32.6828457	-1.613	-4.280	2.293	128	999.000	2.170	4.499	-4.959	1	2	0.5412	1.4098	1.5101	21.0	4.469	201.0	1
-16.9657879	32.6423193	6.374	-3.851	0.110	0	999.000	9.766	-7.437	-7.437	1	2	0.1944	-0.7778	1.5101	121.0	-7.437	306.0	1
-16.9705840	32.6380440	-1.125	1.668	0.110	0	999.000	8.681	2.012	2.011	1	2	0.8444	-1.2519	1.5101	146.0	2.012	326.0	1
-16.9717811	32.6374234	-5.183	9.352	0.000	0	6.352	8.815	10.692	4.340	2	4	0.7321	-1.3208	1.5101	151.0	10.692	331.0	1
-16.9730376	32.6368934	-2.206	4.956	0.000	0	6.352	10.228	12.862	-2.012	2	5	0.6142	-1.3795	1.5101	156.0	-2.329	336.0	1
-16.9784607	32.6357495	0.162	-2.323	0.000	0	6.681	5.663	8.522	-8.839	2	4	0.1053	-1.5064	1.5101	176.0	-2.329	356.0	1
-16.9826540	32.6359665	0.533	2.741	0.000	0	6.111	5.687	13.021	-5.426	2	4	-0.2881	-1.4824	1.5101	191.0	2.792	11.0	1
-16.9840192	32.6362438	-1.003	3.499	0.000	0	1.085	10.281	4.182	0.926	2	6	-0.4162	-1.4516	1.5101	196.0	3.640	16.0	1
-16.9853506	32.6366206	-1.000	-2.607	0.000	0	6.431	5.370	-7.596	-7.596	2	6	-0.5412	-1.4098	1.5101	201.0	-2.792	21.0	1
-16.9866382	32.6370943	-0.284	-0.582	0.000	0	5.618	4.743	5.426	-8.839	3	6	-0.6620	-1.3573	1.5101	206.0	-0.648	26.0	1
-16.9878721	32.6376100	0.818	1.361	0.000	0	6.128	7.398	8.522	-8.522	3	5	-0.7778	-1.2944	1.5101	211.0	1.588	31.0	1
-16.9890429	32.6383166	1.830	2.506	0.000	0	1.085	4.306	11.009	2.012	2	5	-0.8876	-1.2217	1.5101	216.0	3.097	36.0	1
-16.9901417	32.6390580	0.114	0.110	0.000	0	4.642	3.718	9.766	-2.012	4	6	-0.9067	-1.1397	1.5101	221.0	3.038	41.0	1
-16.9911603	32.6398736	-2.951	-2.391	0.000	0	4.669	6.226	-2.329	-4.182	4	4	-1.0863	-1.0490	1.5101	226.0	0.159	46.0	1
-16.9920967	32.6407633	2.183	1.473	0.000	0	1.644	6.268	3.255	2.011	3	5	-1.1736	-0.9503	1.5101	231.0	-3.798	51.0	1
-16.9929280	32.6417181	-7.453	-4.133	0.000	0	999.000	8.059	-8.522	0.111	2	2	-0.8444	-0.8444	1.5101	236.0	2.633	56.0	1
-16.9936598	32.6427209	-1.838	-0.819	0.000	0	8.522	10.156	-2.011	-3.097	2	3	-0.7321	-0.6142	1.5101	241.0	-8.522	61.0	1
-16.9942864	32.6437939	-10.682	-3.129	0.000	0	1.085	10.513	-6.352	-10.692	2	4	-0.6142	-0.6142	1.5101	246.0	-2.012	66.0	1
-16.9948012	32.6448892	-9.083	-2.665	0.000	0	1.085	7.888	-11.009	-11.009	2	3	-1.4278	-0.4916	1.5101	251.0	-9.607	71.0	1
-16.9952002	32.6460381	-2.300	0.365	0.000	0	999.000	6.465	11.876	2.329	3	5	-1.4652	-0.3653	1.5101	256.0	-11.009	81.0	1
-16.9954883	32.6472022	12.831	0.899	0.000	0	999.000	8.741	12.862	2.329	1	3	-1.5964	-0.1053	1.5101	261.0	2.329	86.0	1
-16.9956395	32.6483824	-0.159	0.003	0.000	0	999.000	7.724	-0.159	-0.159	1	3	-1.5018	0.0264	1.5101	271.0	-0.159	91.0	1
-16.995764	32.6495700	-6.475	0.680	0.000	0	6.352	7.032	-12.862	-12.862	2	5	-1.5018	0.1578	1.5101	276.0	-6.511	96.0	1
-16.9959899	32.6507557	-12.626	2.452	0.000	128	999.000	4.340	-12.862	-12.862	1	2	-1.4824	0.2881	1.5101	281.0	-12.862	101.0	1
-16.9959836	32.6519386	-10.800	3.095	0.000	128	3.255	3.961	-15.932	-15.932	1	3	-1.4516	0.4162	1.5101	286.0	-11.235	106.0	1
-16.9959560	32.6530857	-3.904	1.498	0.000	128	999.000	6.959	-4.182	-4.182	2	3	-1.4098	0.5412	1.5101	291.0	-4.182	111.0	1
-16.9946106	32.6542123	3.759	-1.833	0.000	128	3.689	3.689	2.012	2.012	1	3	-1.3573	0.6620	1.5101	296.0	4.182	116.0	1
-16.9940509	32.6553018	-0.136	0.082	0.000	128	1.085	3.689	-0.159	-0.159	2	3	-1.2944	0.7778	1.5101	301.0	-0.159	121.0	1
-16.9933810	32.6563458	4.523	-4.682	0.000	128	999.000	2.328	6.511	6.510	1	2	-1.0490	1.0863	1.5101	306.0	6.510	126.0	1
-16.9907654	32.6591281	3.079	-4.564	0.000	128	2.329	1.164	6.669	4.340	2	2	-0.8444	1.2519	1.5101	311.0	5.505	146.0	1
-16.9885850	32.6606220	0.849	-5.358	0.000	128	999.000	0.927	5.426	5.426	1	2	-0.2362	1.4915	1.5101	316.0	-0.2362	151.0	1
-16.9821016	32.6627826	5.977	-8.865	0.000	0	999.000	12.018	-10.692	-10.692	1	2	-1.6889	-2.5039	1.5101	321.0	-10.692	156.0	1
-16.9615869	32.6267540	4.284	-7.731	0.000	0	8.889	5.864	-8.839	-8.839	2	4	1.4642	-2.6415	1.5101	151.0	-8.839	331.0	2
-16.9630889	32.6255129	-6.093	0.000	0.000	0	1.085	6.357	-6.660	-6.660	2	5	-1.2884	-2.7591	1.5101	156.0	-6.660	336.0	2
-16.9691060	32.6235826	4.186	-12.162	0.000	0	2.170	5.009	-8.522	-12.862	2	5	0.9833	-2.8857	1.5101	161.0	-12.862	341.0	2
-16.9711979	32.6229800	1.613	-6.471	0.000	0	999.000	3.769	-6.669	-6.669	1	5	0.7307	-2.9505	1.5101	166.0	-6.669	346.0	2
-16.9745491	32.624545	-12.019	0.000	0.000	0	1.758	5.387	-13.179	-13.179	2	6	0.4725	-2.9530	1.5101	171.0	-12.169	351.0	2
-16.9773385	32.6221656	0.616	-8.817	0.000	0	1.778	4.513	-8.839	-8.839	3	5	-2.107	-3.0128	1.5101	176.0	-8.839	356.0	2
-16.9801450	32.6221034	-0.078	-4.498	0.000	0	4.922	5.514	-4.499	-15.032	3	3	-0.0527	-3.0197	1.5101	181.0	-4.499	361.0	2
-16.9823472	32.6222484	-7.553	-7.553	0.000	0	999.000	5.267	-7.595	-7.595	2	2	-0.3157	-3.0637	1.5101	186.0	-7.595	366.0	2
-16.9857238	32.6222995	-0.518	-2.663	0.000	0	1.105	2.080	-2.012	-13.179	3	3	-0.5763	-3.0637	1.5101	191.0	-2.713	371.0	2
-16.9884538	32.6231540	-1.281	-4.469	0.000	0	1.105	2.004	-4.182	-4.182	2	4	-0.8325	-2.9032	1.5101	196.0	-4.469	376.0	2
-16.9911163	32.6239076	-1.555	-4.053	0.000	0	999.000	4.181	-4.340	-4.341	1	2	-1.0823	-2.8196	1.5101	201.0	-4.341	381.0	2

Figura A.2: Seção de dados de um ficheiro de corrente radial pela CODAR (na horizontal).

A.2 Ficheiro binário do espectro (.cs)

Pela Figura A.3, verifica-se como é lido o ficheiro binário em *python* sem fazer a conversão da estrutura binária.

```
"\x00\x04\xd6\xb6\xaf\xe0\x00\x00>\x00\x02\x00\x00\x008BMCL
\x00\x00\x000\x00\x00\x0f\x00\x00\x00\x00\x00\x00\x00AX\xcbH@\x00\x00\x00B
\xc6\x84\xcd\x00\x00\x00\x00\x02\x00\x00\x00_\x00\x00\x00\x01?\xc1L}
\x00\x00\x00\x00.\xa8\xb\xaa/\x04\x0e/\x15\xf2\xbb.\x9e\xfd\xf3.\xb5\xb4\xc3.
\x9f\x0c\xfc.\x9e\xdbE-\xc7T\xf1.\x1c\xe2\x18/F\x08\x8d/5U\|.c5.\x99D\x13/\x0c}||
h\x00\x91/\xb3Hx/\xb1\x8c\x9d/?\xf4\xef.VIQ.\x7f\x8c\x99.\xc6\x95T.\xe1~H/.GP/
\x14q\x9f/\x97,9/Y\x87a.\xe2\x15E/\x0eK?/\x0e \x17.\x9dy\x17.\xdf\xb4}.\xdao
\xde.be\x92.k|x11\xc2.\xebZc.\x13\x1dH.\xec\x08\x9e.U\x98\xc5.\xc1\x02..
\xf1\x16\x0f.\xb8i\x8f/a\x91\x94.\xad7n.\xba\xef7i-\xfaP\x02.\x95R\x08.w\xaea.
\x04\xa5\x17.r3C/\x06\x16%.\x8f\xd0\xda.\xddU\x1f.\xb1V\xc9.<\xa1..0\x84\x1e.o|x1f
%.\x8d\xa9\x0f.\xe2\xc1\x93.\x84Kw-\xe1\xe8\xdd.\x9f^\x9b.\x8b%\xf6/\x04\xb9\xcc/
\x86|6.\xfb\x86\xc2.n\xce\xa9.\xc9\x1db/HQ\xd7.\xfd\xd9\x87.&\xc9\xb9.\xb5z\xa9.
\x17\xd2$.\xee\x07\xa3/\x16!\xba/\x11[\x8c/<\xbe\xdc.\xa3\xe3\xd5/\x19\x902/
\x11\xfd\x05/J \x03/?\x8b\x14.\xd0\x15\x8e.7\xefb.\x8d%1.t\xdc\x87.\xc9\xba\xdf/(q
\xd3.\xba\xfee.\xa1\xfc\xab.\x81\xa9e.ZCD/&/\xeb/\x95\x87\xab/'$\x9f.\xd4(\xba.
\x83S\x94.z\xcfU.\xb1\x06'=/XN/=d\xac.!|xfa.\xf4\xd8!.\xdb\xb2\xf2.\xaa\x99\xe3.y
\xfa\x98.\x9e\xbb\x96.\xf8s\xab"
```

Figura A.3: Ficheiro binário da CODAR, resultado da leitura de alguns bytes em *python*.

A Figura A.4, apresenta o resultado do ficheiro do espectro ao aplicar a conversão da estrutura binária da CODAR.

```
(4, 3602296800L, 62, 2, 56, 'BMCL', 48, 15, 0, 0, 13.549629211425781, 2.0, 99.2593765258789, 0, 512, 95, 1,
1.5101467370986938, 0, 7.641827448612304e-11, 1.2010470396006667e-10, 1.363770624207561e-10,
7.230118587164824e-11, 8.263036782585331e-11, 7.232789367428438e-11, 7.223958237156936e-11,
2.2661402268586706e-11, 3.5671104958723276e-11, 1.801103294285511e-10, 1.6492179844007637e-10,
5.644836334472991e-11, 6.96972687896924e-11, 1.2777506830374818e-10, 2.1100478309055148e-10,
3.2611402467352946e-10, 3.229602418830524e-10, 1.7458366696754268e-10, 4.872308459469288e-11,
5.810516304216584e-11, 9.030523551167846e-11, 1.0254247451157994e-10, 1.5850543100270897e-10,
1.3501012807726198e-10, 2.7498162080696886e-10, 1.9784131277678085e-10, 1.0281068357764767e-10,
1.2941557547829774e-10, 1.29262253678597e-10, 7.161043286130209e-11, 1.0172927084051153e-10,
9.933363853686927e-11, 5.1476663209815143e-11, 5.3448585835003115e-11, 1.0702618652436158e-10,
3.344993726450696e-11, 1.0733568200915755e-10, 4.856627947025238e-11, 8.777011062388596e-11,
1.0963329549751322e-10, 8.386102229307468e-11, 2.0515350529493048e-10, 7.876975460785474e-11,
8.50224959880741e-11, 2.8457240036638964e-11, 6.79030720540652e-11, 5.631617741586048e-11,
3.015995439503705e-11, 5.5069959009612646e-11, 1.2195096321665488e-10, 6.539986607823067e-11,
1.0065036998296861e-10, 8.064444251276726e-11, 4.288940730345914e-11, 4.013511051281782e-11,
5.436997033148039e-11, 6.442124611538702e-11, 1.0311675818774901e-10, 6.016070280834285e-11,
2.5682950557937012e-11, 7.247288186240652e-11, 6.327731394417668e-11, 1.2071338373331741e-10,
2.4462715186857054e-10, 1.1438096303439949e-10, 5.4298485846482336e-11, 9.145641188812448e-11,
1.8218969388694717e-10, 1.154374859591023e-10, 3.792763672572086e-11, 8.25271587179266e-11,
3.452006736015534e-11, 1.0866976069001666e-10, 1.365440260858719e-10, 1.3220197159213853e-10,
1.7166307264560032e-10, 7.452852918143904e-11, 1.3966497403039568e-10, 1.327787463312191e-10,
1.8383165822921654e-10, 1.7420759279573872e-10, 9.46257378009463e-11, 4.182199725422109e-11,
```

Figura A.4: Ficheiro binário espectral da CODAR convertido.

A.3 Ficheiro NetCDF das correntes totais (.nc)

A Figura A.5 apresenta o cabeçalho de um ficheiro das correntes totais, na qual é possível identificar a dimensão, variáveis e atributos.

```
<type 'netCDF4._netCDF4.Dataset'>
root group (NETCDF3_CLASSIC data model, file format NETCDF3):
  netcdf_library_version: v2
  Conventions: CF-1.4
  title: Near-Real time Surface Ocean Velocity
  institution: Qualitas Remos
  source: HF Radar Derived Surface Currents obtained from CODAR combine method
  origin: CALH (measured);BMCL (measured);
  history: 06-Feb-2018 02:20:29
  references: .
  creator_name: Macu Ferrer
  creator_email: macu.ferrer@qualitasremos.com
  creator_url: http://www.qualitasinstruments.com/
  geospatial_lat_min: 31.8619
  geospatial_lat_max: 32.9575
  geospatial_lon_min: -17.9842
  geospatial_lon_max: -16.2461
  grid_resolution: 1.5km
  grid_projection: equidistal cylindrical
  grid_type: REGULAR
  UUID: 54264a6e-f51d-4ded-9da9-8dbc251bdcd2
  dimensions(sizes): lon(110), lat(82), time(1)
  variables(dimensions): int32 time(time), float32 lat(lat), float32 lon(lon),
float64 u(time,lat,lon), float64 v(time,lat,lon), float64 stdu(time,lat,lon),
float64 stdv(time,lat,lon), float64 cov(time,lat,lon)
  groups:
```

Figura A.5: NetCDF dataset do ficheiro das correntes totais da CODAR.

ANEXO B

Em anexo B as funções implementadas no âmbito da tese em *python 2.7*, editado no *spyder*, com as bibliotecas *numpy*, *matplotlib*, *basemap* e *netCDF4*.

B.1 Função para ler os ficheiros espectrais

```
def get_antena3_spect(ficheiro='', retantena='3'):
    ''' Le o ficheiro do espectro
    ... return antena3 amp por defeito ou escolher qual 1,2 ou 3
    ...
    if not isfile(ficheiro):
        print "STOP - File not found?"
        sys.exit("Nop - Verificar o path do ficheiro em get_antena3_spect")
    dados_file=ficheiro
    with open(dados_file, "rb") as binary_file:
        #Verificar se versao 4 caso contrario script nao funciona
        data = binary_file.read(2)
        conv_data = struct.unpack('>h', data)
        nCsaFileVersion = conv_data[0]
        if nCsaFileVersion != 4:
            print('Atencao - Necessario file.cs version 4')
            sys.exit('Atencao - Necessario file.cs version 4')
    with open(dados_file, "rb") as binary_file:
        data = binary_file.read(72)
        headerstructure = '>hIihi4siiiiffffiiiiifi'
        conv_data = struct.unpack(headerstructure, data)
        nCsaFileVersion = conv_data[0]          # SInt16 = 2 bytes
        nCsKind = conv_data[3]                 # SInt16 = 2 bytes
        nDopplerCells = conv_data[14]         # SInt32 = 4 bytes
        nRangeCells = conv_data[15]          # SInt32 = 4 bytes
    #data struture
    headerstructure = '>hIihi4siiiiffffiiiiifi'
    datastruture = ''
    compbytes = 72
    for rpt in range(nRangeCells):
        for num in range(nDopplerCells): #antena1
            datastruture = datastruture + str('f')
            compbytes = compbytes + 4
        for num in range(nDopplerCells): #antena2
            datastruture = datastruture + str('f')
            compbytes = compbytes + 4
        for num in range(nDopplerCells): #antena3
            datastruture = datastruture + str('f')
            compbytes = compbytes + 4
        for plex in range(nDopplerCells): #antena1
            datastruture = datastruture + str('ff')
            compbytes = compbytes + 8
        for plex in range(nDopplerCells): #antena2
            datastruture = datastruture + str('ff')
            compbytes = compbytes + 8
        for plex in range(nDopplerCells): #antena3
            datastruture = datastruture + str('ff')
            compbytes = compbytes + 8
    if nCsKind == 2:
        for num in range(nDopplerCells):
            datastruture = datastruture + str('f')
            compbytes = compbytes + 4
```

```

filestruture = headerstructure + datastruture
antena1amp = []
antena2amp = []
antena3amp = []
antena1plex = []
antena2plex = []
antena3plex = []
quality = []
posini=19
posfim=19+nDopplerCells-1
#Data Section
with open(dados_file, "rb") as binary_file:
    data = binary_file.read(compybytes)
    conv_data = struct.unpack(filestruture, data)
    for rpt in range(nRangeCells):
        antena1amp.append(conv_data[posini:posfim])
        posini=posfim+1
        posfim=posini+nDopplerCells-1
        antena2amp.append(conv_data[posini:posfim])
        posini=posfim+1
        posfim=posini+nDopplerCells-1
        antena3amp.append(conv_data[posini:posfim])
        posini=posfim+1
        posfim=posini+(nDopplerCells*2)-1
        antena1plex.append(conv_data[posini:posfim])
        posini=posfim+1
        posfim=posini+(nDopplerCells*2)-1
        antena2plex.append(conv_data[posini:posfim])
        posini=posfim+1
        posfim=posini+(nDopplerCells*2)-1
        antena3plex.append(conv_data[posini:posfim])
        if nCsKind == 2:
            posini=posfim+1
            posfim=posini+nDopplerCells-1
            quality.append(conv_data[posini:posfim])
            posini=posfim+1
            posfim=posini+nDopplerCells-1
    if retantena == '1':
        return antena1amp
    elif retantena == '2':
        return antena2amp
    else:
        return antena3amp

```

B.2 Função da criação da malha

```
def get_grid_inters_radar():
    ''' Devolve arrays com os pontos geo-ref de intersecao das duas estacoes
        ... E as range cell de cada estacao
        ...
    '''
    #Coordenadas decimais Latitude Longitude
    coord_BMCL=[32+38.960/60.0, -(16+58.775/60.0)]
    coord_CALH=[32+43.267/60.0, -(17+10.750/60.0)]
    max_raio_radar_km=57 #maxima distancia km
    min_raio_radar_km=6 #min distancia km - eliminar junto costa de 1.5 em 1.5
    ini_rng_cell=3 #range cell 0 => 1.5 km tem de se acertar com mim_raio
    d=np.sqrt((coord_BMCL[1]-coord_CALH[1])**2+
              (coord_BMCL[0]-coord_CALH[0])**2) #em Deg
    LatGridPoints=[]
    LonGridPoints=[]
    rngcell_BMCL=[]
    rngcell_CALH=[]
    #rangecell BMCL #range cell 0 => 1.5
    for rngcell_B,raioBkm \
    in enumerate(np.arange(min_raio_radar_km,max_raio_radar_km,1.5)):
        #rangecell CALH
        for rngcell_C,raioCkm \
        in enumerate(np.arange(min_raio_radar_km,max_raio_radar_km,1.5)):
            raio_BMCL=(raioBkm/110.54)
            raio_CALH=(raioCkm/110.54)
            if d > (raio_BMCL+raio_CALH):
                #print "nao intersecta - circulos separados"
                pass
            elif d < (abs(raio_BMCL-raio_CALH)):
                #print "nao intersecta - circulo dentro do outro"
                pass
            elif (d == 0) and (raio_BMCL == raio_CALH):
                #print "nao intersecta - mesmo circulo"
                pass
            else:
                r0=raio_BMCL
                r1=raio_CALH
                a=(r0*r0 - r1*r1 + d*d)/(2*d)
                h=np.sqrt(r0*r0 - a*a)
                P2x=coord_BMCL[1]+a*(coord_CALH[1]-coord_BMCL[1])/d
                P2y=coord_BMCL[0]+a*(coord_CALH[0]-coord_BMCL[0])/d
                P4x=P2x-h*(coord_CALH[0]-coord_BMCL[0])/d
                P4y=P2y+h*(coord_CALH[1]-coord_BMCL[1])/d
                LatGridPoints.append(P4y)
                LonGridPoints.append(P4x)
                rngcell_BMCL.append(rngcell_B+ini_rng_cell)
                rngcell_CALH.append(rngcell_C+ini_rng_cell)
    res=[]
    res.append('Lat_Lon_rngBMCL_rngCALH')
    res.append(LatGridPoints)
    res.append(LonGridPoints)
    res.append(rngcell_BMCL)
    res.append(rngcell_CALH)
    return res
```

B.3 Função de associar os pontos do espectro aos pontos da malha

```
def get_coord_espect(Est_grid_points, Est1DadosEspect, Est2DadosEspect):
    ''' Corresponder o rng ao espectro
        Devolve arrays com os pontos da grid lat e lon e o espectro das 2 est.
        ...
    LatGridPoints=[]
    LonGridPoints=[]
    Espectro_BMCL=[]
    Espectro_CALH=[]
    #Percorrer os pontos e adiciona o espectro de cada rng associado
    for index,i in enumerate(Est_grid_points[1]):
        LatGridPoints.append(Est_grid_points[1][index])
        LonGridPoints.append(Est_grid_points[2][index])
        Espectro_BMCL.append(Est1DadosEspect[Est_grid_points[3][index]])
        Espectro_CALH.append(Est2DadosEspect[Est_grid_points[4][index]])
    coord_espect=[]
    coord_espect.append(['Lat_Lon_EspectBMCL_EspectCALH'])
    coord_espect.append(LatGridPoints)
    coord_espect.append(LonGridPoints)
    coord_espect.append(Espectro_BMCL)
    coord_espect.append(Espectro_CALH)
    return coord_espect
```

B.4 Função de extrair direção do vento constante ao longo do radial

```
def get_radar_wind_Vconst(Grid_espect, data, modo=True):
    ''' Vento constante ao longo da radial
        Grid_espect => valores do espectro em cada ponto das duas estacoes
        data => YY_MM_DD_HHMM
        modo: True => formula de Paduan et al. 1999
        modo: False => formula de Fernandez et al. 1997
    ...

    theta_BMCL=[]
    theta_CALH=[]
    theta_TOTL=[]
    Lat=[]
    Lon=[]
    for index,i in enumerate(Grid_espect[1]):
        #theta CALH
        zeta=get_zeta(Grid_espect[4][index], modo)
        if modo==False:
            theta_Est1_Pindex=get_calc_met1997(zeta)
        else:
            theta_Est1_Pindex=get_calc_met1999(zeta)
        theta_CALH.append(theta_Est1_Pindex)
        #theta BMCL
        zeta=get_zeta(Grid_espect[3][index], modo)
        if modo==False:
            theta_Est2_Pindex=get_calc_met1997(zeta)
        else:
            theta_Est2_Pindex=get_calc_met1999(zeta)
        theta_BMCL.append(theta_Est2_Pindex)
        #Soma vectorial
        theta_TOTL.append(calc_media(theta_Est1_Pindex, theta_Est2_Pindex))
        Lat.append(Grid_espect[1][index])
        Lon.append(Grid_espect[2][index])
    res=[]
    res.append(['M1:Lat_Lon_thetaTOTL_theta1CALH_theta2BMCL_data'])
    res.append(Lat)
    res.append(Lon)
    res.append(theta_TOTL)
    res.append(theta_CALH)
    res.append(theta_BMCL)
    res.append(data)
    return res
```

B.5 Função de extrair direção do vento a variar ao longo do radial

```
def get_radar_wind_Vvaria(V1_Grid_espect,data, modo=True):
    ''' Vento varia ao longo da radial
        Grid_espect => valores do espectro em cada ponto das duas estacoes
        data => YY_MM_DD_HHMM
        modo: True => formula de Paduan et al. 1999
        modo: False => formula de Fernandez et al. 1997
    ...
    theta_BMCL=[]
    theta_CALH=[]
    R1=[]
    R2=[]
    WindBeta=[]
    Lat=[]
    Lon=[]
    for index,i in enumerate(V1_Grid_espect[1]):
        #theta CALH
        zeta=get_zeta(V1_Grid_espect[4][index], modo)
        if modo==False:
            theta_Est1_Pindex=get_calc_met1997(zeta)
        else:
            theta_Est1_Pindex=get_calc_met1999(zeta)
        theta_CALH.append(theta_Est1_Pindex)
        #theta BMCL
        zeta=get_zeta(V1_Grid_espect[3][index], modo)
        if modo==False:
            theta_Est2_Pindex=get_calc_met1997(zeta)
        else:
            theta_Est2_Pindex=get_calc_met1999(zeta)
        theta_BMCL.append(theta_Est2_Pindex)

        ponto_lat_lon=[V1_Grid_espect[1][index], V1_Grid_espect[2][index]]
        BetaL1,BetaR1,BetaL2,BetaR2=get_BetaLR(ponto_lat_lon,
                                             theta_Est1_Pindex, theta_Est2_Pindex)

        R1.append(BetaR1)
        R2.append(BetaR2)
        WindBeta.append(calc_media(BetaR1, BetaR2))
        Lat.append(V1_Grid_espect[1][index])
        Lon.append(V1_Grid_espect[2][index])
    res=[]
    res.append(['M2:Lat_Lon_Beta_theta1CALH_theta2BMCL_data'])
    res.append(Lat)
    res.append(Lon)
    res.append(WindBeta)
    res.append(theta_CALH)
    res.append(theta_BMCL)
    res.append(data)
    return res
```

B.6 Função de extrair direção do vento constante ao longo do radial com resolução de ambiguidade

```
def get_radar_wind_VconstRAmbi(V1_Grid_espect,data, modo=True):
    theta_BMCL=[]
    theta_CALH=[]
    L1=[]
    R1=[]
    L2=[]
    R2=[]
    Par=[]
    WindBeta=[]
    Lat=[]
    Lon=[]
    for index,i in enumerate(V1_Grid_espect[1]):
        #theta CALH
        zeta=get_zeta(V1_Grid_espect[4][index], modo)
        if modo==False:
            theta_Est1_Pindex=get_calc_met1997(zeta)
        else:
            theta_Est1_Pindex=get_calc_met1999(zeta)
        theta_CALH.append(theta_Est1_Pindex)
        #theta BMCL
        zeta=get_zeta(V1_Grid_espect[3][index], modo)
        if modo==False:
            theta_Est2_Pindex=get_calc_met1997(zeta)
        else:
            theta_Est2_Pindex=get_calc_met1999(zeta)
        theta_BMCL.append(theta_Est2_Pindex)
        ponto_lat_lon=[V1_Grid_espect[1][index], V1_Grid_espect[2][index]]
        BetaL1, BetaR1, BetaL2, BetaR2 = get_BetaLR(ponto_lat_lon,
                                                    theta_Est1_Pindex, theta_Est2_Pindex)

        L1.append(BetaL1)
        R1.append(BetaR1)
        L2.append(BetaL2)
        R2.append(BetaR2)
        Lat.append(V1_Grid_espect[1][index])
        Lon.append(V1_Grid_espect[2][index])
    #Calculo do menor Par
    for index,i in enumerate(L1):
        BetaL1=L1[index]
        BetaR1=R1[index]
        BetaL2=L2[index]
        BetaR2=R2[index]
        par1=abs(BetaL1-BetaL2)
        par2=abs(BetaR1-BetaR2)
        par3=abs(BetaL1-BetaR2)
        par4=abs(BetaR1-BetaL2)
        menor = par1
        menorstr='par1'
        wind_lado=(BetaL1+BetaL2)/2.0
        if menor > par2:
            menor = par2
            menorstr='par2'
```

```

        wind_lado=(BetaR1+BetaR2)/2.0
if menor > par3:
    menor = par3
    menorstr='par3'
    wind_lado=(BetaL1+BetaR2)/2.0
if menor > par4:
    menor = par4
    menorstr='par4'
    wind_lado=(BetaR1+BetaL2)/2.0
Par.append(menorstr)
if wind_lado < 0:
    wind_lado=wind_lado+360
elif wind_lado > 360:
    wind_lado=wind_lado-360
if (wind_lado) >=0 and (wind_lado <= 180):
    wind_dir=(theta_CALH[index]+theta_BMCL[index])/2.0
else:
    wind_dir=-((theta_CALH[index]+theta_BMCL[index])/2.0)
if wind_dir < 0:
    wind_dir=wind_dir+360
elif wind_dir > 360:
    wind_dir=wind_dir-360
WindBeta.append(wind_dir)
res=[]
res.append(['M3:Lat_Lon_Beta_theta1CALH_theta2BMCL_data'])
res.append(Lat)
res.append(Lon)
res.append(WindBeta)
res.append(theta_CALH)
res.append(theta_BMCL)
res.append(data)
return res

```

B.7 Função de extrair direção do vento a variar ao longo do radial com resolução de ambiguidade

```
def get_radar_wind_VvariaRAmbi(V1_Grid_espect,data, modo=True):
    theta_BMCL=[]
    theta_CALH=[]
    L1=[]
    R1=[]
    L2=[]
    R2=[]
    Par=[]
    WindBeta=[]
    Lat=[]
    Lon=[]
    for index,i in enumerate(V1_Grid_espect[1]):
        #theta CALH
        zeta=get_zeta(V1_Grid_espect[4][index], modo)
        if modo==False:
            theta_Est1_Pindex=get_calc_met1997(zeta)
        else:
            theta_Est1_Pindex=get_calc_met1999(zeta)
        theta_CALH.append(theta_Est1_Pindex)
        #theta BMCL
        zeta=get_zeta(V1_Grid_espect[3][index], modo)
        if modo==False:
            theta_Est2_Pindex=get_calc_met1997(zeta)
        else:
            theta_Est2_Pindex=get_calc_met1999(zeta)
        ponto_lat_lon=[V1_Grid_espect[1][index], V1_Grid_espect[2][index]]
        BetaL1, BetaR1, BetaL2, BetaR2 = get_BetaLR(ponto_lat_lon,
                                                    theta_Est1_Pindex, theta_Est2_Pindex)

        L1.append(BetaL1)
        R1.append(BetaR1)
        L2.append(BetaL2)
        R2.append(BetaR2)
        Lat.append(V1_Grid_espect[1][index])
        Lon.append(V1_Grid_espect[2][index])
    #Calculo do menor Par
    for index,i in enumerate(L1):
        BetaL1=L1[index]
        BetaR1=R1[index]
        BetaL2=L2[index]
        BetaR2=R2[index]
        par1=abs(BetaL1-BetaL2)
        par2=abs(BetaR1-BetaR2)
        par3=abs(BetaL1-BetaR2)
        par4=abs(BetaR1-BetaL2)
        menor = par1
        menorstr='par1'
        wind_dir=(BetaL1+BetaL2)/2.0
        if menor > par2:
            menor = par2
            menorstr='par2'
            wind_dir=(BetaR1+BetaR2)/2.0
```

```

if menor > par3:
    menor = par3
    menorstr='par3'
    wind_dir=(BetaL1+BetaR2)/2.0
if menor > par4:
    menor = par4
    menorstr='par4'
    wind_dir=(BetaR1+BetaL2)/2.0
Par.append(menorstr)
if wind_dir < 0:
    wind_dir=wind_dir+360
elif wind_dir > 360:
    wind_dir=wind_dir-360
WindBeta.append(wind_dir)
res=[]
res.append(['M4:Lat_Lon_Beta_theta1CALH_theta2BMCL_data'])
res.append(Lat)
res.append(Lon)
res.append(WindBeta)
res.append(theta_CALH)
res.append(theta_BMCL)
res.append(data)
return res

```

B.8 Função de extrair direção do vento pelo método de *Paduan et al.* (1999)

```
def get_radar_wind_1999(V1_Grid_espect,data):
    #theta radial em cada ponto
    theta_BMCL=[]
    theta_CALH=[]
    L1=[]
    R1=[]
    L2=[]
    R2=[]
    Par=[]
    WindBeta=[]
    Lat=[]
    Lon=[]
    snr_esq1=[]
    snr_dir1=[]
    snr_esq2=[]
    snr_dir2=[]
    for index,i in enumerate(V1_Grid_espect[1]):
        #1)Ambos os picos de Bragg excedem o nível de ruído em pelo menos 3 dB
        #1.1)Encontrar a posição dos picos em dB
        #CALH
        valoresDB1=10*np.log10(np.abs(V1_Grid_espect[4][index]))
        doppler_negativo1=valoresDB1[0:255]
        doppler_positivo1=valoresDB1[256:511]
        B_mais1=doppler_max(doppler_positivo1[50:150])
        B_menos1=doppler_max(doppler_negativo1[100:200])
        media_snr1=(np.sum(np.abs(V1_Grid_espect[4][index]))/
                    len(V1_Grid_espect[4][index]))
        media_snr_dB1=10*np.log10(np.abs(media_snr1))
        dif_snr_esq1=B_menos1-media_snr_dB1
        dif_snr_dir1=B_mais1-media_snr_dB1
        #BMCL
        valoresDB2=10*np.log10(np.abs(V1_Grid_espect[3][index]))
        doppler_negativo2=valoresDB2[0:255]
        doppler_positivo2=valoresDB2[256:511]
        B_mais2=doppler_max(doppler_positivo2[50:150])
        B_menos2=doppler_max(doppler_negativo2[100:200])
        media_snr2=(np.sum(np.abs(V1_Grid_espect[3][index]))/
                    len(V1_Grid_espect[3][index]))
        media_snr_dB2=10*np.log10(np.abs(media_snr2))
        dif_snr_esq2=B_menos2-media_snr_dB2
        dif_snr_dir2=B_mais2-media_snr_dB2
        #1.3) continuar se maior do que 3dB
        if (dif_snr_esq1>3 and dif_snr_dir1>3 and dif_snr_esq2>3
            and dif_snr_dir2>3):
            snr_esq1.append(dif_snr_esq1)
            snr_dir1.append(dif_snr_dir1)
            snr_esq2.append(dif_snr_esq2)
            snr_dir2.append(dif_snr_dir2)
        #2) solucoes de direcao esquerda e direita
        #theta CALH
        zeta=get_zeta(V1_Grid_espect[4][index])
```

```

theta_Est1_Pindex=get_calc_met1999(zeta)
theta_CALH.append(theta_Est1_Pindex)
#theta BMCL
zeta=get_zeta(V1_Grid_espect[3][index])
theta_Est2_Pindex=get_calc_met1999(zeta)
theta_BMCL.append(theta_Est2_Pindex)
#Calculo para referencial comum
ponto_lat_lon=[V1_Grid_espect[1][index], V1_Grid_espect[2][index]]
BetaL1, BetaR1, BetaL2, BetaR2 = get_BetaLR(ponto_lat_lon,
                                             theta_Est1_Pindex, theta_Est2_Pindex)

L1.append(BetaL1)
R1.append(BetaR1)
L2.append(BetaL2)
R2.append(BetaR2)
Lat.append(V1_Grid_espect[1][index])
Lon.append(V1_Grid_espect[2][index])
else: #falhou 1) condicao dos 3db
    print "fail index ponto: " + str(index)
    print str(dif_snr_esq1) + " " + str(dif_snr_dir1) + " " + \
          str(dif_snr_esq2) + " " + str(dif_snr_dir2)

#3) dentro de celulas de 3 km
raio=(3/110.54) #em deg
celulas=[]
for index, i in enumerate(Lat):
    tmpindex=[]
    minLat=Lat[index]-raio
    maxLat=Lat[index]+raio
    minLon=Lon[index]-raio
    maxLon=Lon[index]+raio
    index_Bool_existe = index in chain(*celulas)
    if not index_Bool_existe:
        for indexp, j in enumerate(Lat):
            index_Bool_existe = indexp in chain(*celulas)
            if not index_Bool_existe:
                if (Lat[indexp] >= minLat) and (Lat[indexp] <= maxLat):
                    if (Lon[indexp] >= minLon) and (Lon[indexp] <= maxLon):
                        tmpindex.append(indexp)
        celulas.append(tmpindex)

#4) media e 4 pares de solucoes
for index_cel, cel in enumerate(celulas):
    TBetaL1=0
    TBetaR1=0
    TBetaL2=0
    TBetaR2=0
    for index, i in enumerate(cel):
        TBetaL1=L1[index]+TBetaL1
        TBetaR1=R1[index]+TBetaR1
        TBetaL2=L2[index]+TBetaL2
        TBetaR2=R2[index]+TBetaR2
    MBetaL1=TBetaL1/len(cel)
    MBetaR1=TBetaR1/len(cel)

```

```

MBetaL2=TBetaL2/len(cel)
MBetaR2=TBetaR2/len(cel)
par1=abs(MBetaL1-MBetaL2)
par2=abs(MBetaR1-MBetaR2)
par3=abs(MBetaL1-MBetaR2)
par4=abs(MBetaR1-MBetaL2)
#5) menor diferenca angular
menor = par1
menorstr='par1'
if menor > par2:
    menor = par2
    menorstr='par2'
if menor > par3:
    menor = par3
    menorstr='par3'
if menor > par4:
    menor = par4
    menorstr='par4'
#6) Cmaior media sinal-ruído
for index, i in enumerate(cel):
    if ((snr_esq1[index]+snr_dir1[index])/2) > \
        ((snr_esq2[index]+snr_dir2[index])/2):
        #Est1
        if menorstr == 'par1':
            wind_dir=L1[index]
        elif menorstr == 'par2':
            wind_dir=R1[index]
        elif menorstr == 'par3':
            wind_dir=L1[index]
        else:
            wind_dir=R1[index]
    else:
        #Est2
        if menorstr == 'par1':
            wind_dir=L2[index]
        elif menorstr == 'par2':
            wind_dir=R2[index]
        elif menorstr == 'par3':
            wind_dir=R2[index]
        else:
            wind_dir=L2[index]
    Par.append(menorstr)
    if wind_dir < 0:
        wind_dir=wind_dir+360
    elif wind_dir > 360:
        wind_dir=wind_dir-360
    WindBeta.append(wind_dir)
res=[]
res.append(['M9:Lat_Lon_Beta_theta1CALH_theta2BMCL_\
Celulas_L1_R1_L2_R2_Par_data'])
res.append(Lat)

```

```
res.append(Lon)
res.append(WindBeta)
res.append(theta_CALH)
res.append(theta_BMCL)
res.append(celulas)
res.append(L1)
res.append(R1)
res.append(L2)
res.append(R2)
res.append(Par)
res.append(data)
return res
```

B.9 Função de extrair direção do vento constante ao longo da radial com base no método de *Paduan et al.* (1999)

```
def get_radar_wind_1999_Vconst(V1_Grid_espect,data,distraio=3):
    #theta radial em cada ponto
    theta_BMCL=[]
    theta_CALH=[]
    L1=[]
    R1=[]
    L2=[]
    R2=[]
    Par=[]
    WindBeta=[]
    Lat=[]
    Lon=[]
    snr_esq1=[]
    snr_dir1=[]
    snr_esq2=[]
    snr_dir2=[]
    for index,i in enumerate(V1_Grid_espect[1]):
        #1)Ambos os picos de Bragg excedem o nível de ruído em pelo menos 3 dB
        #1.1)Encontrar a posição dos picos em dB
        #CALH
        valoresDB1=10*np.log10(np.abs(V1_Grid_espect[4][index]))
        doppler_negativo1=valoresDB1[0:255]
        doppler_positivo1=valoresDB1[256:511]
        B_mais1=doppler_max(doppler_positivo1[50:150])
        B_menos1=doppler_max(doppler_negativo1[100:200])
        media_snr1=(np.sum(np.abs(V1_Grid_espect[4][index]))/
                    len(V1_Grid_espect[4][index]))
        media_snr_dB1=10*np.log10(np.abs(media_snr1))
        dif_snr_esq1=B_menos1-media_snr_dB1
        dif_snr_dir1=B_mais1-media_snr_dB1
        #BMCL
        valoresDB2=10*np.log10(np.abs(V1_Grid_espect[3][index]))
        doppler_negativo2=valoresDB2[0:255]
        doppler_positivo2=valoresDB2[256:511]
        B_mais2=doppler_max(doppler_positivo2[50:150])
        B_menos2=doppler_max(doppler_negativo2[100:200])
        media_snr2=(np.sum(np.abs(V1_Grid_espect[3][index]))/
                    len(V1_Grid_espect[3][index]))
        media_snr_dB2=10*np.log10(np.abs(media_snr2))
        dif_snr_esq2=B_menos2-media_snr_dB2
        dif_snr_dir2=B_mais2-media_snr_dB2
        #1.3) continuar se maior do que 3dB
        if (dif_snr_esq1>3 and dif_snr_dir1>3 and dif_snr_esq2>3
            and dif_snr_dir2>3):
            snr_esq1.append(dif_snr_esq1)
            snr_dir1.append(dif_snr_dir1)
            snr_esq2.append(dif_snr_esq2)
            snr_dir2.append(dif_snr_dir2)
        #2) solucoes de direcao esquerda e direita
        #theta CALH
        zeta=get_zeta(V1_Grid_espect[4][index])
```

```

theta_Est1_Pindex=get_calc_met1999(zeta)
theta_CALH.append(theta_Est1_Pindex)
#theta BMCL
zeta=get_zeta(V1_Grid_espect[3][index])
theta_Est2_Pindex=get_calc_met1999(zeta)
theta_BMCL.append(theta_Est2_Pindex)
#Calculo para referencial comum
ponto_lat_lon=[V1_Grid_espect[1][index], V1_Grid_espect[2][index]]
BetaL1, BetaR1, BetaL2, BetaR2 = get_BetaLR(ponto_lat_lon,
                                             theta_Est1_Pindex, theta_Est2_Pindex)

L1.append(BetaL1)
R1.append(BetaR1)
L2.append(BetaL2)
R2.append(BetaR2)
Lat.append(V1_Grid_espect[1][index])
Lon.append(V1_Grid_espect[2][index])
else: #falhou 1) condicao dos 3db
    print "fail index ponto: " + str(index)
    print str(dif_snr_esq1) + " " + str(dif_snr_dir1) + " " + \
          str(dif_snr_esq2) + " " + str(dif_snr_dir2)
#3) dentro de celulas de distraio
raio=(distraio/110.54) #em deg
celulas=[]
for index, i in enumerate(Lat):
    tmpindex=[]
    minLat=Lat[index]-raio
    maxLat=Lat[index]+raio
    minLon=Lon[index]-raio
    maxLon=Lon[index]+raio
    index_Bool_existe = index in chain(*celulas)
    if not index_Bool_existe:
        for indexp, j in enumerate(Lat):
            index_Bool_existe = indexp in chain(*celulas)
            if not index_Bool_existe:
                if (Lat[indexp] >= minLat) and (Lat[indexp] <= maxLat):
                    if (Lon[indexp] >= minLon) and (Lon[indexp] <= maxLon):
                        tmpindex.append(indexp)
        celulas.append(tmpindex)
#4) media e 4 pares de solucoes
for index_cel, cel in enumerate(celulas):
    TBetaL1=0
    TBetaR1=0
    TBetaL2=0
    TBetaR2=0
    for index, i in enumerate(cel):
        TBetaL1=L1[index]+TBetaL1
        TBetaR1=R1[index]+TBetaR1
        TBetaL2=L2[index]+TBetaL2
        TBetaR2=R2[index]+TBetaR2
    MBetaL1=TBetaL1/len(cel)
    MBetaR1=TBetaR1/len(cel)

```

```

MBetaL2=TBetaL2/len(cel)
MBetaR2=TBetaR2/len(cel)
par1=abs(MBetaL1-MBetaL2)
par2=abs(MBetaR1-MBetaR2)
par3=abs(MBetaL1-MBetaR2)
par4=abs(MBetaR1-MBetaL2)
#5) menor diferenca angular
menor = par1
menorstr='par1'
if menor > par2:
    menor = par2
    menorstr='par2'
if menor > par3:
    menor = par3
    menorstr='par3'
if menor > par4:
    menor = par4
    menorstr='par4'
#6) Cmaior media sinal-ruído
for index, i in enumerate(cel):
    if ((snr_esq1[index]+snr_dir1[index])/2) > \
        ((snr_esq2[index]+snr_dir2[index])/2):
        #Est1
        if menorstr == 'par1':
            wind_dir=theta_CALH[index]
        elif menorstr == 'par2':
            wind_dir=-theta_CALH[index]
        elif menorstr == 'par3':
            wind_dir=theta_CALH[index]
        else:
            wind_dir=-theta_CALH[index]
    else:
        #Est2
        if menorstr == 'par1':
            wind_dir=theta_BMCL[index]
        elif menorstr == 'par2':
            wind_dir=-theta_BMCL[index]
        elif menorstr == 'par3':
            wind_dir=-theta_BMCL[index]
        else:
            wind_dir=theta_BMCL[index]
    Par.append(menorstr)
    if wind_dir < 0:
        wind_dir=wind_dir+360
    elif wind_dir > 360:
        wind_dir=wind_dir-360
    WindBeta.append(wind_dir)
res=[]
res.append(['M10:Lat_Lon_Beta_theta1CALH_theta2BMCL_\
Celulas_L1_R1_L2_R2_Par_data'])
res.append(Lat)

```

```
res.append(Lon)
res.append(WindBeta)
res.append(theta_CALH)
res.append(theta_BMCL)
res.append(celulas)
res.append(L1)
res.append(R1)
res.append(L2)
res.append(R2)
res.append(Par)
res.append(data)
return res
```

B.10 Funções intermédias

```
def doppler_max(var_antena):
    return np.max(var_antena)

def get_calc_met1999(zeta):
    return -90.0*((zeta-24.0)/24.0)

def get_calc_met1997(zeta):
    s=4
    return np.rad2deg(2.0*np.arctan(10.0**(zeta/(s*10))))

def get_zeta(Grid_espect, met=True):
    valoresDB=10*np.log10(np.abs(Grid_espect))
    doppler_negativo=valoresDB[0:255]
    doppler_positivo=valoresDB[256:511]
    B_mais=doppler_max(doppler_positivo[50:150])
    B_menos=doppler_max(doppler_negativo[100:200])
    if met==True:
        zeta=B_mais-B_menos
    else:
        zeta=B_menos-B_mais
    return zeta

def calc_media(T1, T2):
    wind_dir=[]
    wind_dir=(T1+T2)/2.0
    return wind_dir

def ponto_a_esquerda(theta, alfa):
    BetaL=360-(theta-(90-alfa))
    BetaR=(90-alfa)+theta
    return BetaL, BetaR

def ponto_a_direita(theta, alfa):
    BetaL=360-((90-alfa)+theta)
    BetaR=theta-(90-alfa)
    return BetaL, BetaR

def ponto_a_esquerda_superior(theta, alfa):
    BetaL=(90+alfa)-theta
    BetaR=theta+alfa+90
    return BetaL, BetaR

def ponto_a_direita_superior(theta, alfa):
    BetaL=180+(90-alfa)-theta
    BetaR=180+(90-alfa)+theta
    return BetaL, BetaR
```

```

def get_BetaLR(ponto_lat_lon, theta_Est1_Pindex, theta_Est2_Pindex):
    coord_BMCL=[32+38.960/60.0, -(16+58.775/60.0)] #Latitude Longitude
    coord_CALH=[32+43.267/60.0, -(17+10.750/60.0)]

    c1=np.sqrt((coord_CALH[0]-ponto_lat_lon[0])**2+
               (coord_CALH[1]-ponto_lat_lon[1])**2) #em Deg
    b1=np.sqrt((coord_CALH[0]-ponto_lat_lon[0])**2) #em Deg
    alfa1=np.rad2deg(np.arcsin(b1/c1))
    c2=np.sqrt((coord_BMCL[0]-ponto_lat_lon[0])**2+
               (coord_BMCL[1]-ponto_lat_lon[1])**2) #em Deg
    b2=np.sqrt((coord_BMCL[0]-ponto_lat_lon[0])**2) #em Deg
    alfa2=np.rad2deg(np.arcsin(b2/c2))

    if coord_CALH[1]>ponto_lat_lon[1]: # pontos a esquerda das estacoes
        if coord_CALH[0]>ponto_lat_lon[0] and coord_BMCL[0]>ponto_lat_lon[0]:
            # Pontos abaixo das estações
            BetaL1, BetaR1 = ponto_a_esquerda(theta_Est1_Pindex, alfa1)
            BetaL2, BetaR2 = ponto_a_esquerda(theta_Est2_Pindex, alfa2)
        elif coord_CALH[0]>ponto_lat_lon[0] and coord_BMCL[0]<ponto_lat_lon[0]:
            # pontos entre est1 e est2
            BetaL1, BetaR1 = ponto_a_esquerda(theta_Est1_Pindex, alfa1)
            BetaL2, BetaR2 = ponto_a_esquerda_superior(theta_Est2_Pindex, alfa2)
        else:
            BetaL1, BetaR1 = ponto_a_esquerda_superior(theta_Est1_Pindex, alfa1)
            BetaL2, BetaR2 = ponto_a_esquerda_superior(theta_Est2_Pindex, alfa2)

    elif coord_BMCL[1]<ponto_lat_lon[1]: # pontos a direita das estacoes
        if coord_CALH[0]>ponto_lat_lon[0] and coord_BMCL[0]>ponto_lat_lon[0]:
            # Pontos abaixo das estações
            BetaL1, BetaR1 = ponto_a_direita(theta_Est1_Pindex, alfa1)
            BetaL2, BetaR2 = ponto_a_direita(theta_Est2_Pindex, alfa2)
        elif coord_CALH[0]>ponto_lat_lon[0] and coord_BMCL[0]<ponto_lat_lon[0]:
            # pontos entre est1 e est2
            BetaL1, BetaR1 = ponto_a_direita(theta_Est1_Pindex, alfa1)
            BetaL2, BetaR2 = ponto_a_direita_superior(theta_Est2_Pindex, alfa2)
        else:
            BetaL1, BetaR1 = ponto_a_direita_superior(theta_Est1_Pindex, alfa1)
            BetaL2, BetaR2 = ponto_a_direita_superior(theta_Est2_Pindex, alfa2)

    else: # pontos a direita da est1 e a esquerda est2
        if coord_CALH[0]>ponto_lat_lon[0] and coord_BMCL[0]>ponto_lat_lon[0]:
            # Pontos abaixo das estações
            BetaL1, BetaR1 = ponto_a_direita(theta_Est1_Pindex, alfa1)
            BetaL2, BetaR2 = ponto_a_esquerda(theta_Est2_Pindex, alfa2)
        else: # pontos entre est1 e est2
            BetaL1, BetaR1 = ponto_a_direita(theta_Est1_Pindex, alfa1)
            BetaL2, BetaR2 = ponto_a_esquerda_superior(theta_Est2_Pindex, alfa2)

    return BetaL1, BetaR1, BetaL2, BetaR2

```

ANEXO C

Em anexo C demonstrou-se os cálculos realizados.

C.1 Cálculo da interseção de dois círculos

Para o cálculo da interseção de dois círculos, considerou-se a Figura C.1.

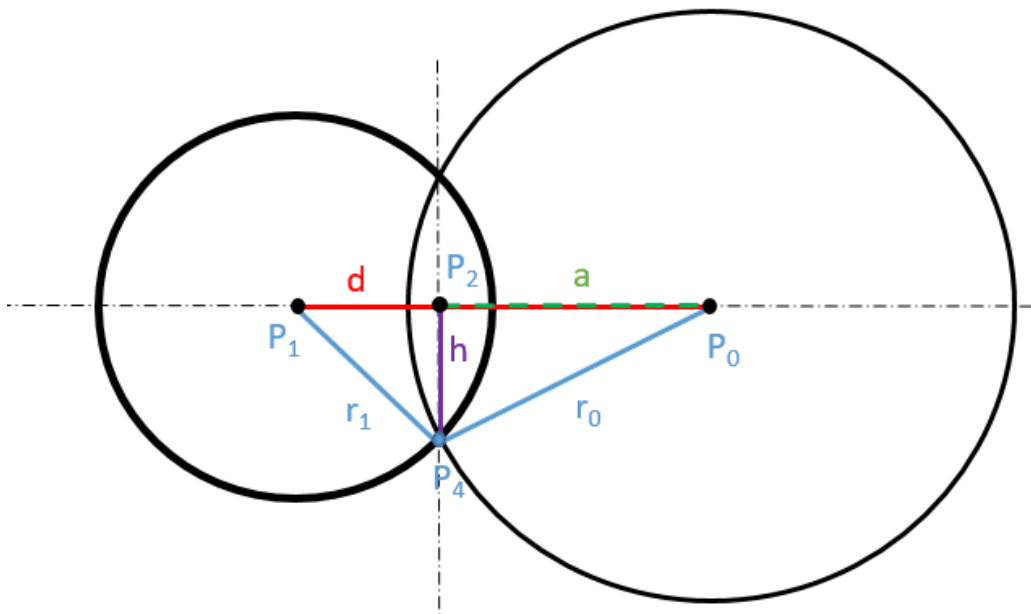


Figura C.1 Interseção de dois círculos.

De forma a verificar se existe interseção dos círculos, fez-se a comparação com base na distância de d com os raios da seguinte forma:

$d > (r_0 + r_1) \Rightarrow$ Não intersecta, círculos separados.

$d < |r_0 - r_1| \Rightarrow$ Não intersecta, círculo dentro do outro.

$d = 0 \ \& \ r_0 = r_1 \Rightarrow$ Mesmo círculos, pontos infinitos.

Caso contrário, calcula-se os pontos em que:

$$a = \frac{r_0^2 - r_1^2 + d^2}{2d}$$

$$h = \sqrt{r_0^2 - a^2}$$

$$P_2 = P_0 + a(P_1 - P_0)/d$$

$$P_4 = P_2 \pm h(P_1 - P_0)/d$$

C.2 Cálculo do ângulo radial no mesmo referencial

O ângulo de um ponto é calculado para o mesmo referencial comum em relação a uma estação. São abordadas quatro situações (pelas figuras seguintes) de acordo com a posição de cada ponto, se está a oeste ou a este da estação, ou se está a norte ou a sul da estação.

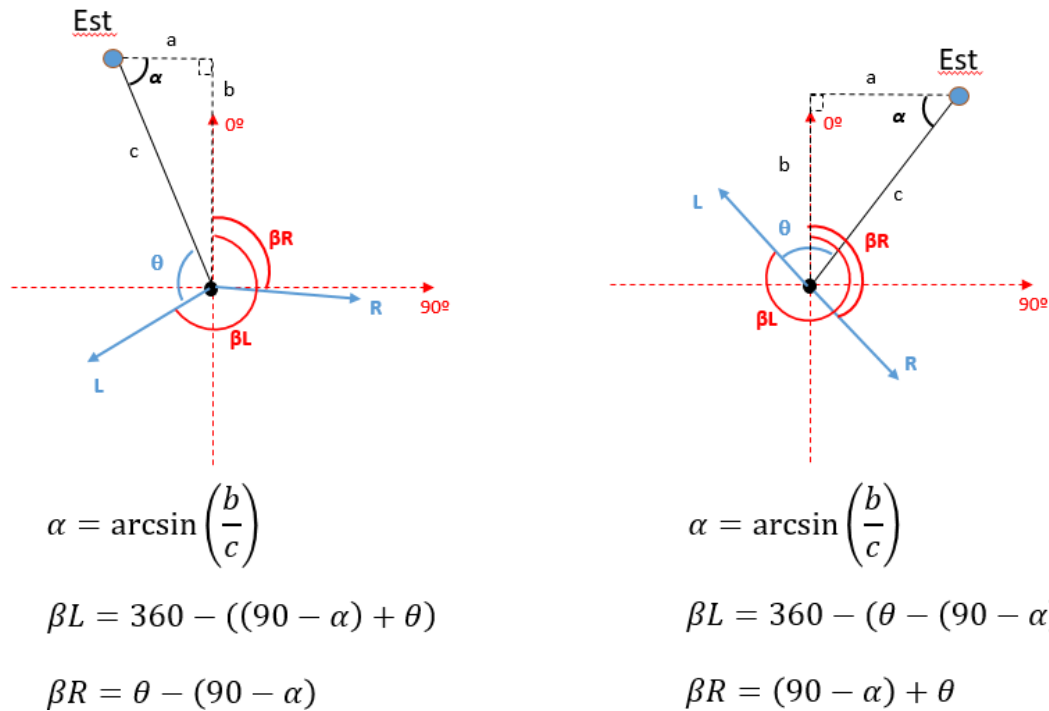


Figura C.2: Representação vetorial e respectivos cálculos para o referencial comum dos pontos a norte da estação.

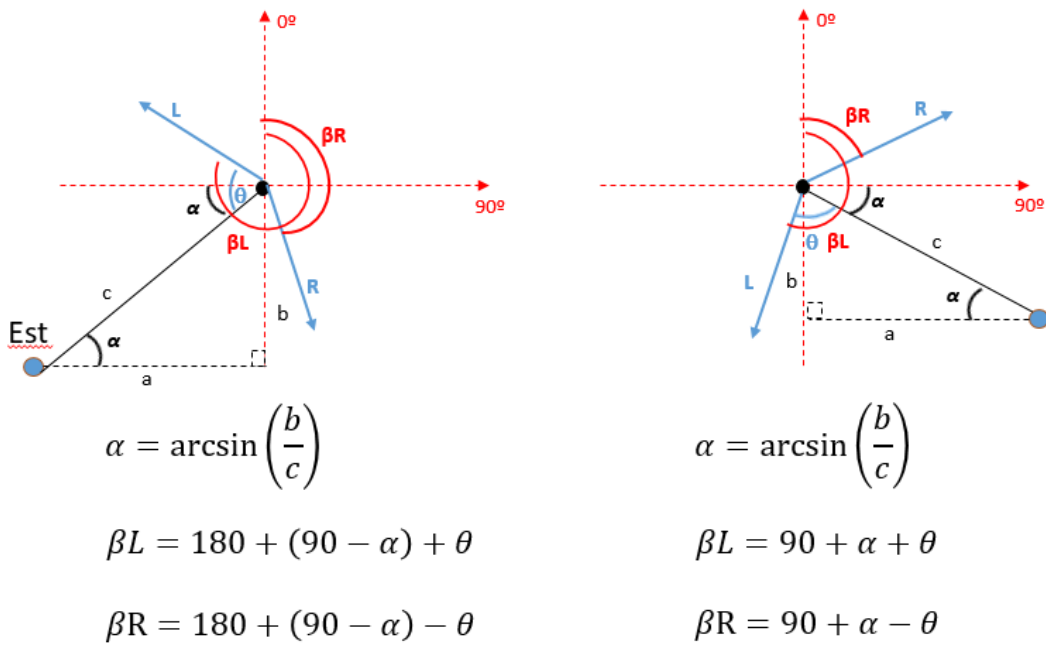


Figura C.3: Representação vetorial e respetivos cálculos para o referencial comum dos pontos a sul da estação

C.3 Cálculo dos quatro pares de soluções

Para o cálculo dos quatro pares de soluções, definiram-se três situações:

– **Ponto entre as duas estações**

Determinaram-se os ângulos (β_{L1} , β_{L2} , β_{R1} e β_{R2}) para o referencial comum com base nos ângulos radiais (θ_1 e θ_2) e coordenadas das estações (Est1 e Est2), pela Figura C.4 em que:

$$Est1 = (-17.1792, 32.7211)$$

$$Est2 = (-16.9796, 32.6493)$$

$$Ponto = (-17.1689, 32.4363)$$

$$\theta_1 = 96^\circ$$

$$\theta_2 = 73.5^\circ$$

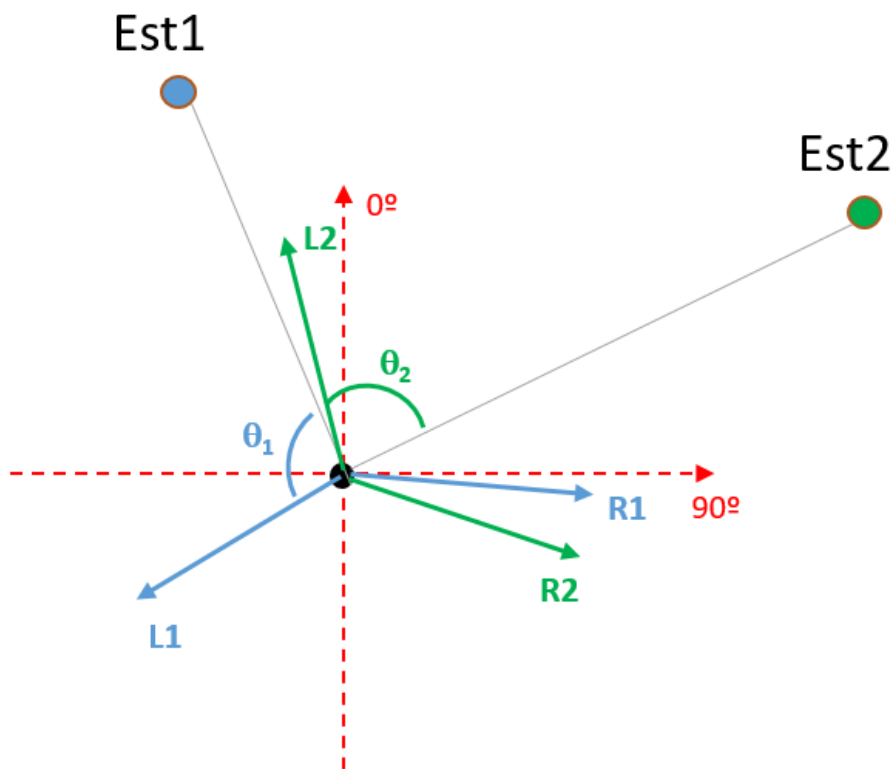


Figura C.4: Representação vetorial de soluções de um ponto entre as duas estações.

Para a estação 1, pela Figura C.5, obteve-se que:

$$\beta_{L1} = 360 - ((90 - \alpha_1) + \theta_1)$$

$$\beta_{R1} = \theta_1 - (90 - \alpha_1)$$

$$\alpha_1 = \arcsin\left(\frac{b1}{c1}\right)$$

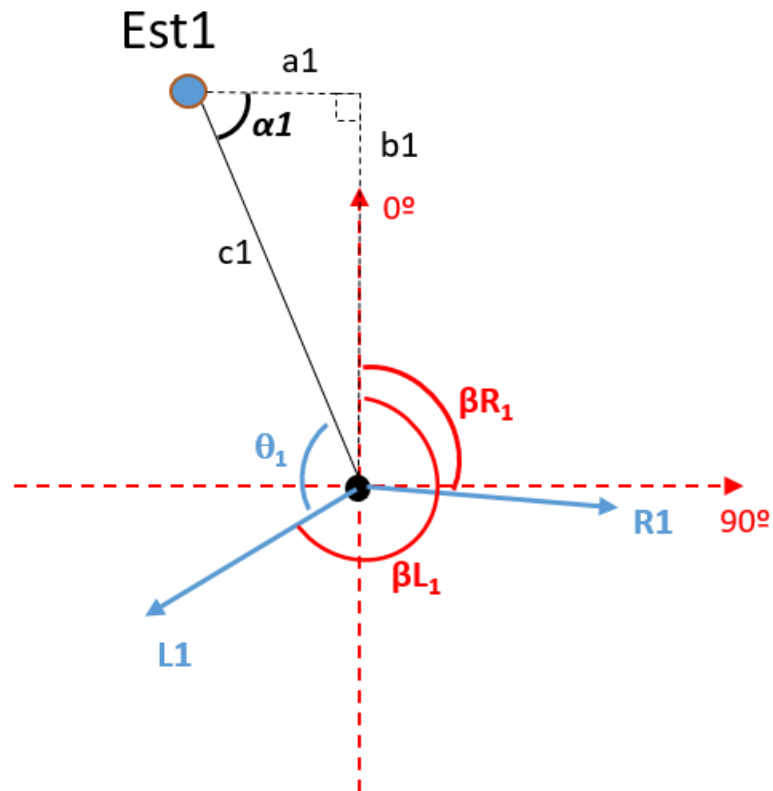


Figura C.5: Representação vetorial de soluções para estação 1.

Determinaram-se as distâncias c_1 e b_1 , da seguinte forma:

$$c_1 = \sqrt{(-17.1792 - (-17.1689))^2 + (32.7211 - 32.4363)^2} = 0.284986 \text{ deg}$$

$$b_1 = \sqrt{(32.7211 - 32.4363)^2} = 0.2847999 \text{ deg}$$

Substituiu-se os valores e obteve-se:

$$\alpha_1 = \arcsin\left(\frac{0.2847999}{0.284986}\right) = 87.9293^\circ$$

$$\beta_{L_1} = 360 - ((90 - 87.9293) + 96) = 262^\circ$$

$$\beta_{R_1} = 96 - (90 - 87.9293) = 94^\circ$$

Para a estação 2, pela Figura C.6, obteve-se que:

$$\beta_{L_2} = 360 - (\theta_2 - (90 - \alpha_2))$$

$$\beta_{R_2} = (90 - \alpha_2) + \theta_2$$

$$\alpha_2 = \arcsin\left(\frac{b_2}{c_2}\right)$$

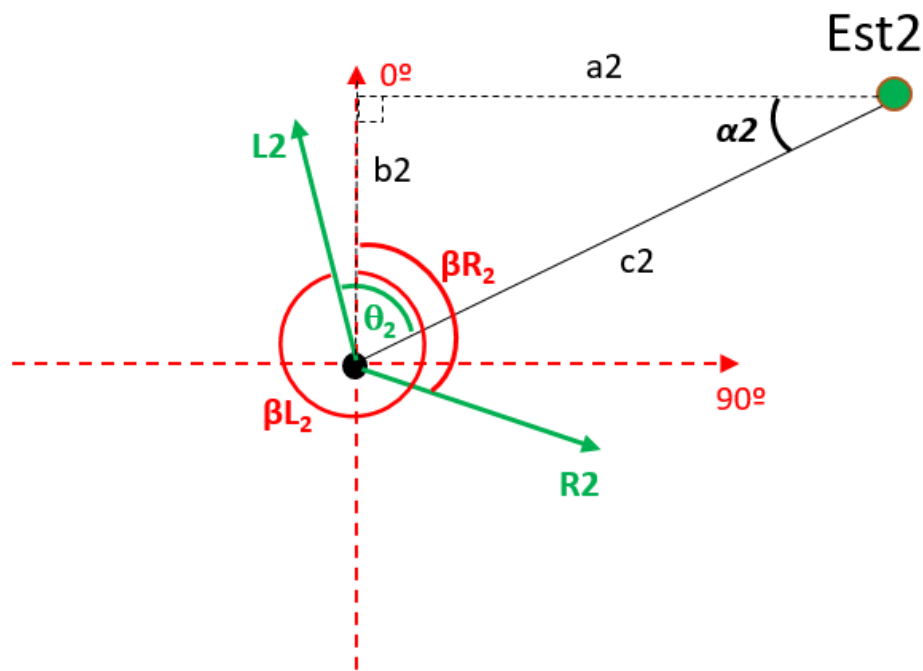


Figura C.6: Representação vetorial de soluções para a estação 2.

Determinaram-se c_2 e b_2 :

$$c_2 = \sqrt{(-16.9796 - (-17.1689))^2 + (32.6493 - 32.4363)^2} = 0.28496 \text{ deg}$$

$$b_2 = \sqrt{(32.6493 - 32.4363)^2} = 0.212999 \text{ deg}$$

Substitui-se os valores:

$$\alpha_2 = \arcsin\left(\frac{0.212999}{0.2849}\right) = 48.37168^\circ$$

$$\beta_{L_2} = 360 - (73.5 - (90 - 48.37168)) = 328^\circ$$

$$\beta_{R_2} = (90 - 48.37168) + 73.5 = 115^\circ$$

Resolveram-se os quatro pares de soluções:

$$Par_1 = |\beta L_1 - \beta L_2| = |262 - 328| = 66^\circ$$

$$Par_2 = |\beta R_1 - \beta R_2| = |94 - 115| = 21^\circ$$

$$Par_1 = |\beta L_1 - \beta R_2| = |262 - 115| = 147^\circ$$

$$Par_1 = |\beta R_1 - \beta L_2| = |94 - 328| = 234^\circ$$

– **Ponto no lado esquerdo das estações**

Pelo mesmo procedimento anterior, em que:

$$Ponto = (-17.3793, 32.5183)$$

$$\theta_1 = 96^\circ$$

$$\theta_2 = 78^\circ$$

Pela Figura C.7, obteve-se que:

$$\beta L_1 = 360 - (\theta_1 - (90 - \alpha_1))$$

$$\beta R_1 = (90 - \alpha_1) + \theta_1$$

$$\beta L_2 = 360 - (\theta_2 - (90 - \alpha_2))$$

$$\beta R_2 = (90 - \alpha_2) + \theta_2$$

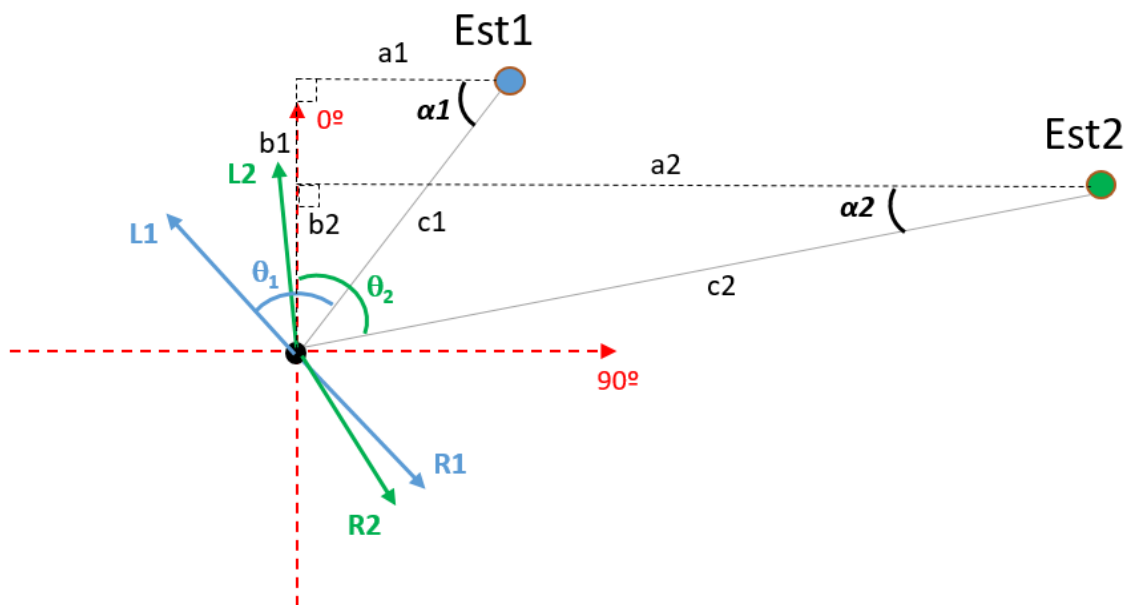


Figura C.7: Representação vetorial de soluções de um ponto ao lado esquerdo das duas estações.

Substituíram-se os valores e ficou-se com:

$$\alpha_1 = 45.38^\circ$$

$$\alpha_2 = 18.15^\circ$$

$$\beta L_1 = 309^\circ$$

$$\beta R_1 = 140^\circ$$

$$\beta L_2 = 354^\circ$$

$$\beta R_2 = 150^\circ$$

Resolveu-se os quatro pares de soluções:

$$Par_1 = |\beta L_1 - \beta L_2| = 45^\circ$$

$$Par_2 = |\beta R_1 - \beta R_2| = 10^\circ$$

$$Par_1 = |\beta L_1 - \beta R_2| = 159^\circ$$

$$Par_1 = |\beta R_1 - \beta L_2| = 214^\circ$$

– **Ponto no lado direito das estações**

Analogamente, em que

$$Ponto = (-16.9545, 32.3655)$$

$$\theta_1 = 94^\circ$$

$$\theta_2 = 73.5^\circ$$

Pela Figura C.8, obteve-se:

$$\beta L_1 = 360 - ((90 - \alpha_1) + \theta_1)$$

$$\beta R_1 = \theta_1 - (90 - \alpha_1)$$

$$\beta L_2 = 360 - ((90 - \alpha_2) + \theta_2)$$

$$\beta R_2 = \theta_2 - (90 - \alpha_2)$$

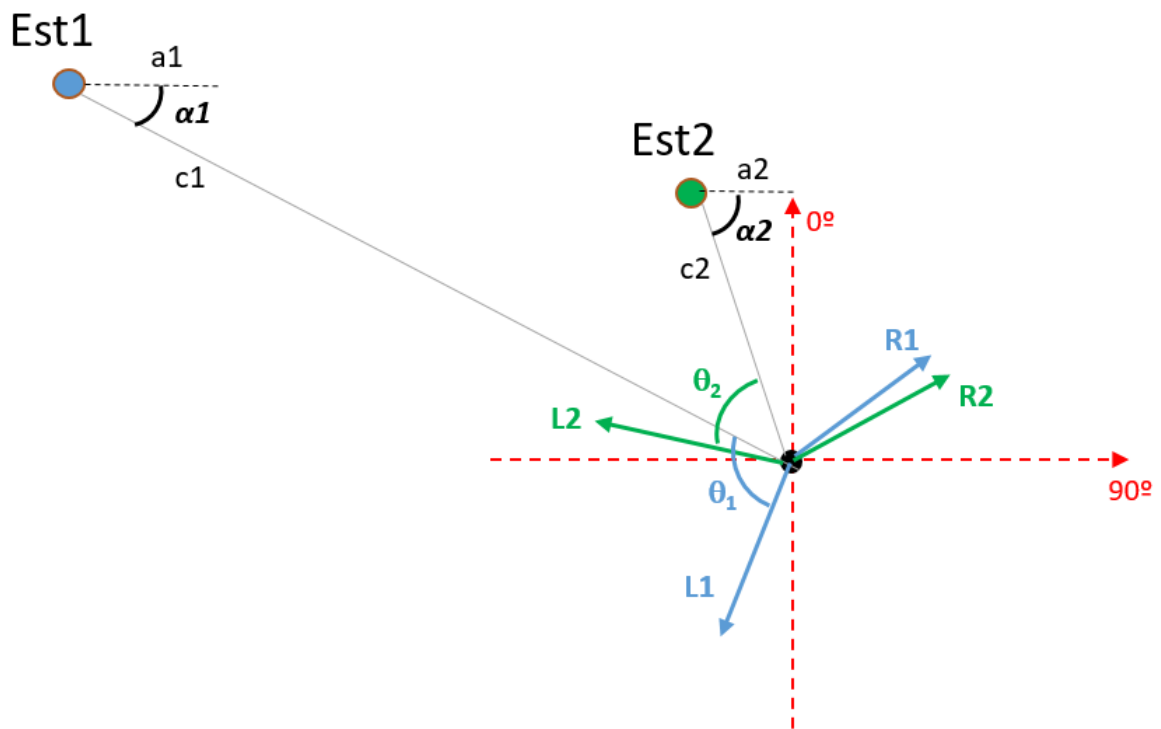


Figura C.8: Representação vetorial de soluções de um ponto ao lado direito das duas estações.

Substituíram-se os valores e ficou-se com:

$$\alpha_1 = 57.72^\circ$$

$$\alpha_2 = 84.95^\circ$$

$$\beta_{L_1} = 234^\circ$$

$$\beta_{R_1} = 61^\circ$$

$$\beta_{L_2} = 281^\circ$$

$$\beta_{R_2} = 68^\circ$$

Resolveu-se os quatro pares de soluções:

$$Par_1 = |\beta_{L_1} - \beta_{L_2}| = 47^\circ$$

$$Par_2 = |\beta_{R_1} - \beta_{R_2}| = 7^\circ$$

$$Par_1 = |\beta_{L_1} - \beta_{R_2}| = 166^\circ$$

$$Par_1 = |\beta_{R_1} - \beta_{L_2}| = 220^\circ$$

ANEXO D

D.1 Mapeamento da direção do vento a variar ao longo da radial

De acordo com o descrito no capítulo 6.3.2, a Figura D.1 apresenta o mapeamento da direção do vento a variar ao longo da radial para o segundo período.

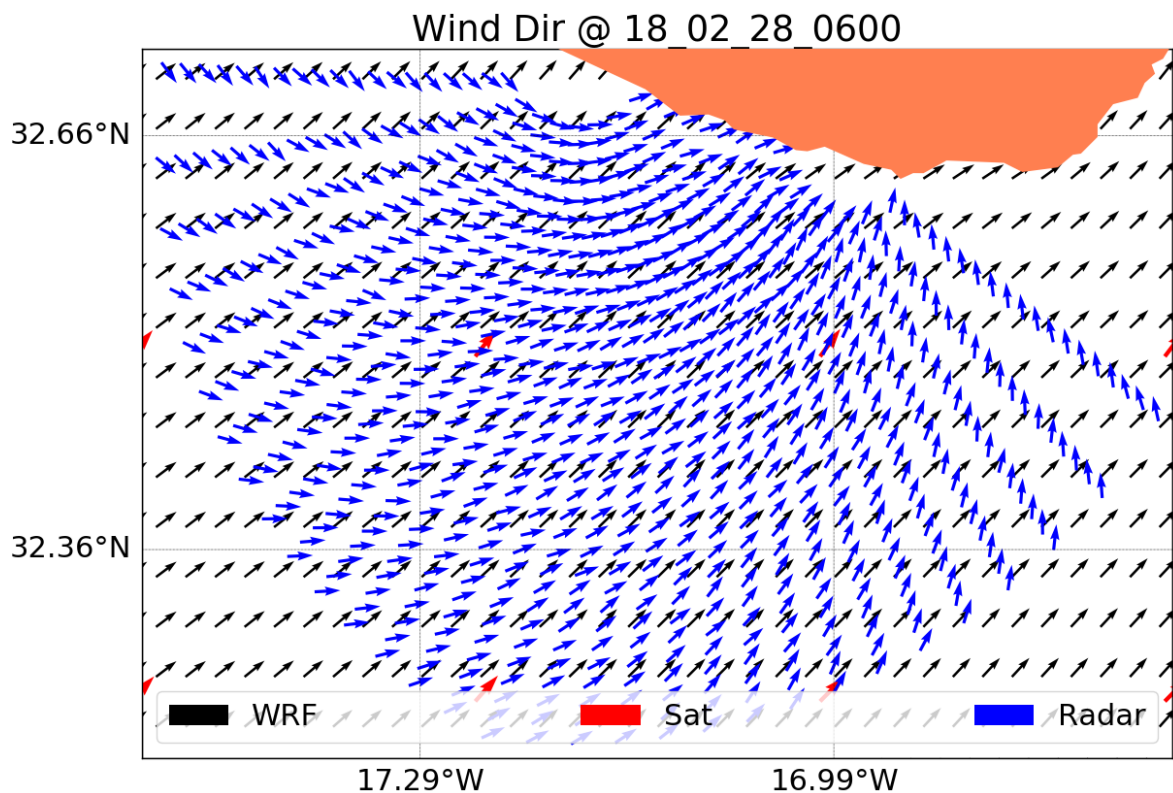


Figura D.1 Mapeamento da direção do vento para 2018-02-28_0600. Radar HF (ventos a variar) a azul, satélite a vermelho e modelo WRF a preto.

D.2 Mapeamento da direção do vento a variar ao longo da radial com resolução de ambiguidade

Conforme descrito no capítulo 6.3.4 a Figura D.2 e Figura D.3 apresenta o mapeamento da direção do vento a variar ao longo da radial, respectivamente, para o primeiro e segundo período.

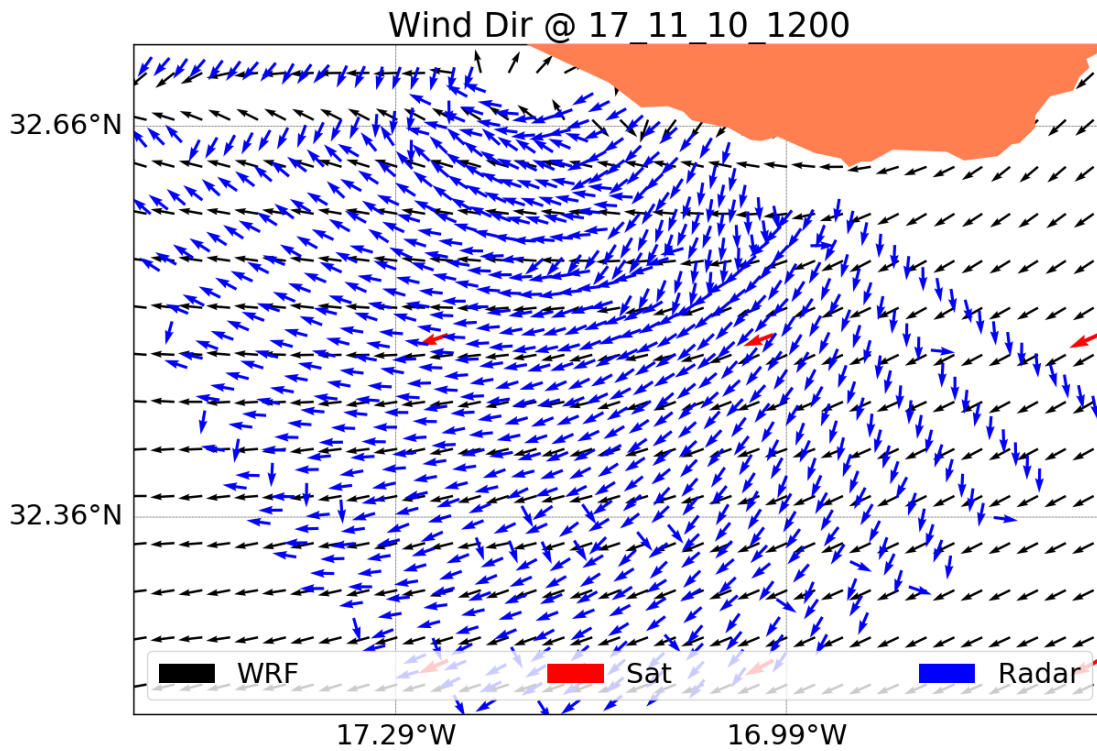


Figura D.2: Mapeamento da direção do vento para 2017-11-10_1200. Radar HF (ventos variar, resolução de ambiguidade) a azul, satélite a vermelho e modelo WRF a preto.

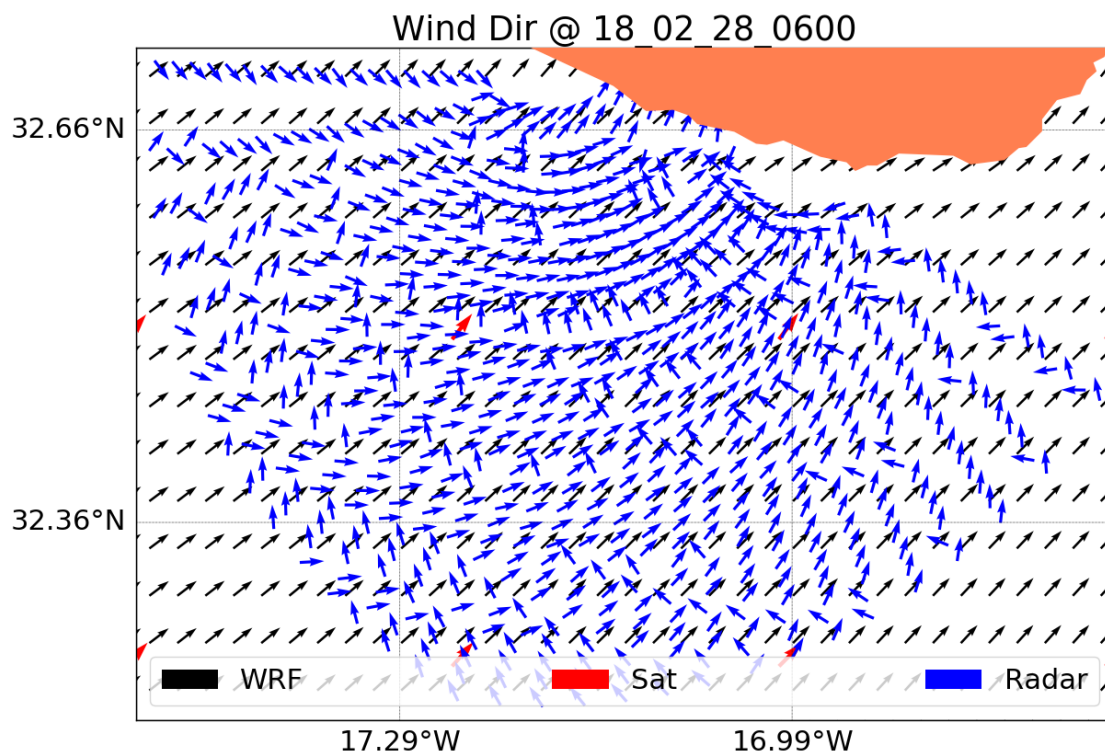


Figura D.3: Mapeamento da direção do vento para 2018-02-28_0600. Radar HF (ventos variar, resolução de ambiguidade) a azul, satélite a vermelho e modelo WRF a preto.

D.3 Métricas do erro e correlação

Realizou-se em *python 2.7*, com as funções das bibliotecas *numpy* e *scipy.stats*, a análise estatística do erro e correlação dos resultados, apresentados no capítulo 6.4 dos dados de satélite em relação ao WRF, V1, V2 e V3, com base nas seguintes métricas mais utilizadas para validação de modelos numéricos:

Erro absoluto médio (MAE – *Mean Absolute Error*): É a média das diferenças absolutas entre os resultados e a observação e mede a magnitude média do erro. Dessa forma, o erro absoluto médio é obtida por:

$$MAE = \frac{1}{N_p} \sum_{k=1}^{N_p} |F_k - O_k| \quad (D.1)$$

onde N_p é o número total de amostras, F são os valor esperados (*forecast*) e o O são os valores observados.

A raiz do erro quadrático médio (RMSE – *Root Mean Squared Error*): É a raiz quadrada da média das diferenças absolutas quadráticas entre os resultados e a observação e também mede a magnitude média do erro. É dada pela expressão:

$$RMSE^2 = \frac{1}{N_p} \sum_{k=1}^{N_p} (F_k - O_k)^2 \quad (D.2)$$

Coefficiente de correlação de *Pearson* (R): É um número entre -1 e 1 que indica até que ponto duas variáveis estão linearmente relacionadas. Se for 0 significa que as duas variáveis não têm nenhuma relação linear, mas pode existir alguma relação não linear entre elas.

D.4 Análise dos resultados entre as duas estações.

Utilizou-se os resultados da direção do vento de cada estação de V1, para o período em que os valores estão de acordo com o sentido da ambiguidade (2018-02-26 a 2018-03-07), e apresentou-se a Figura D.4 e Figura D.5. Nota-se em algumas situações que os valores da direção do vento entre as estações são relativamente próximos e conseqüentemente a respetiva média.

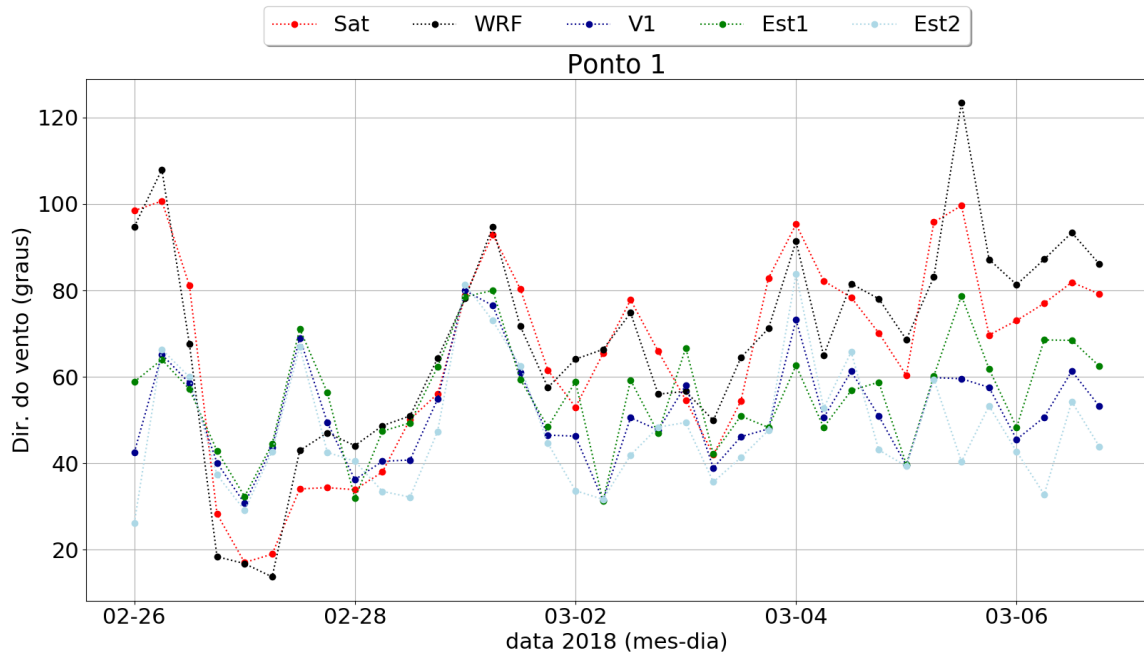


Figura D.4: Resultados da direção do vento de cada estação de V1 no ponto 1.

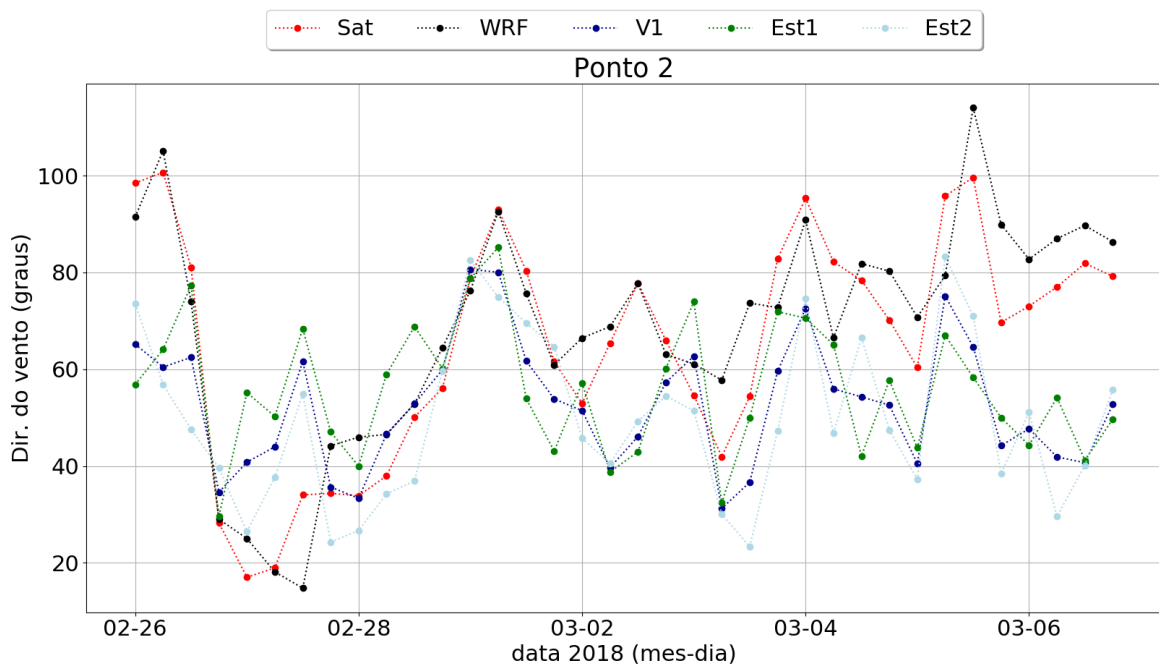


Figura D.5: Resultados da direção do vento de cada estação de V1 no ponto 2.