



**Ana Cristina  
Marques Ferreira  
Gomes**

**Estudo e Modelização da Cintilação  
Troposférica nas Bandas Ka e Q**





**Ana Cristina  
Marques Ferreira  
Gomes**

**Estudo e Modelização da Cintilação  
Troposférica nas Bandas Ka e Q**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Eletrónica e Telecomunicações, realizada sob a orientação científica do professor Doutor Armando Rocha, Professor Auxiliar do Departamento de Eletrónica, Telecomunicações e Informática da Universidade de Aveiro e da Professora Doutora Susana Mota, Professora Auxiliar do Departamento de Eletrónica, Telecomunicações e Informática da Universidade de Aveiro



## **O júri**

Presidente

Prof. Doutor Pedro Miguel da Silva Cabral  
Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro

Arguente principal

Prof. Doutor Sérgio Reis Cunha  
Professor Auxiliar da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Orientador

Prof. Doutor Armando Carlos Domingues da Rocha  
Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro



## **agradecimentos**

Em primeiro lugar gostaria de agradecer ao meu orientador, Professor Doutor Armando Rocha, e coorientadora, Professora Doutora Susana Mota, por toda a ajuda prestada e tempo disponibilizado na realização deste trabalho. Pelo constante incentivo e orientação para que o desenvolvimento do trabalho corresse da melhor forma.

Agradeço ao Departamento de Eletrónica, Telecomunicações e Informática e ao Instituto de Telecomunicações de Aveiro pelo apoio e condições de trabalho oferecidas.

Aos meus pais, irmãos e família que são o meu pilar, obrigada por todo o apoio, motivação e por estarem sempre lá para tudo.

Por fim, um agradecimento a todos os meus amigos e colegas que me apoiaram durante o meu percurso académico.



**Palavras-chave**

Índice de refração, desvanecimentos, reforços, cintilação, *AlphaSat*, *KaSat*, modelos ITU

**Resumo**

A utilização de frequências nas bandas Ka e Q tem ganho um enorme interesse para comunicações por satélite. Contudo os fenômenos atmosféricos podem causar impactos significativos no sinal recebido. A dissertação aborda a caracterização do fenômeno denominado de cintilação usando um conjunto de dados experimentais recolhidos ao longo de 5 anos a duas frequências (19.7 GHz e 39.4 GHz) bem como dados meteorológicos locais. São calculadas várias estatísticas respeitantes à intensidade do fenômeno com ênfase na variabilidade diária, mensal e anual. O desempenho de um conjunto de modelos disponíveis para a variância do sinal é avaliado e desenvolvido um modelo empírico. Os resultados mostram que o modelo de referência do ITU é satisfatório, mas de forma geral pessimista.



**Keywords**

Refraction index, *fades*, enhancements, scintillation, *AlphaSat*, *KaSat*, ITU-R models

**Abstract**

The use of frequencies in the Ka and Q bands has gained enormous interest for satellite communications. However, atmospheric phenomena can significantly impact the received signal. The dissertation addresses the characterization of the phenomenon called scintillation using a set of experimental data collected over 5 years at two frequencies (19.7 GHz and 39.4 GHz) as well as local meteorological data. Various statistics concerning the intensity of the phenomenon are calculated with an emphasis on the daily, monthly and annual variability. The performance of a set of available models for the signal variance is evaluated and an empirical model developed. The results show that the ITU's reference model is satisfactory, but generally pessimistic.



# Conteúdo

Lista de figuras .....	v
Lista de Tabelas .....	ix
Lista de acrónimos .....	xi
Lista de símbolos.....	xiii
1. Capítulo I .....	1
Introdução.....	1
1.1. Motivação.....	1
1.2. Objetivos .....	2
1.3. Estado da Arte .....	2
1.4. Estrutura da tese .....	3
2. Capítulo II: Conceitos de Propagação e Modelos de Cintilação.....	5
Introdução.....	5
2.1. Atenuação .....	5
2.2. Despolarização .....	7
2.3. Cintilação .....	9
2.4. Definição e parâmetros descritivos da cintilação .....	13
2.4.1. Amplitude .....	13
2.4.2. Variância e desvio padrão .....	16
2.4.3. Distribuição da amplitude .....	17
2.4.4. Espectro da cintilação .....	19

2.4.5.	Efeito da antena no fenómeno de cintilação .....	19
2.5.	Técnicas de Mitigação da Atenuação .....	21
2.6.	Modelos de cintilação .....	22
2.6.1.	Modelo ITU P.618-13.....	23
2.6.2.	Modelo Van de Kamp .....	25
2.6.3.	Modelo Otung .....	26
2.6.4.	Modelo Karasawa .....	29
2.7.	Comparação dos modelos de distribuição de amplitude.....	30
2.8.	Escalonamento de frequência.....	30
3.	Capítulo III: Base e Dados e Processamento da Cintilação .....	33
	Introdução.....	33
3.1.	Experiências AlphaSat e KaSat .....	33
3.2.	Campanha experimental .....	34
3.3.	Organização dos dados pré-processados .....	35
	Processamento dos dados de cintilação.....	36
4.	Capítulo IV: Análise da Base de Dados .....	39
4.1.	Função densidade cumulativa complementar-CCDF- do desvio padrão de cintilação	39
4.2.	Avaliação dos modelos.....	43
	Comparação do termo experimental <i>Nwet</i> com base de dados.....	46
	Previsão anual.....	49
	Previsão do mês médio.....	50
4.3.	Escalonamento da variância ou desvio padrão.....	52
4.4.	Modelo empírico .....	55
4.5.	Variabilidade horária.....	59
5.	Conclusões e trabalho futuro V.....	65

Referências.....	67
------------------	----



## Lista de figuras

Figura 1: Atenuação zenital de oxigênio e vapor de água [9].....	7
Figura 2: Componentes de despolarização [1] .....	8
Figura 3: Gotas de água de chuva [9].....	8
Figura 4: Radio refratividade (ppm).....	11
Figura 5: Variação do $N_{wet}$ , da humidade e temperatura .....	12
Figura 6: Variação do $N_{wet}$ , da humidade e da pressão .....	12
Figura 7: Variação do $N_{dry}$ , da humidade e temperatura .....	13
Figura 8: Variação do $N_{dry}$ , da humidade e pressão .....	13
Figura 9: Cintilação durante 1 dia .....	14
Figura 10: Cintilação durante 5 minutos.....	15
Figura 11: Atenuação durante 1 dia.....	15
Figura 12: Desvio padrão da cintilação ao longo de um dia .....	17
Figura 13: Distribuição da distribuição de probabilidade para valores de intensidade de cintilação .....	18
Figura 14: Fator de redução para diferentes diâmetros da antena.....	21
Figura 15: Modelo ITU - distribuição dos fades .....	24
Figura 16: Van de Kamp – distribuição da amplitude .....	26
Figura 17: Modelo Otung – distribuição da amplitude.....	28
Figura 18: Modelo Otung – distribuição pico-a-pico da amplitude .....	28
Figura 19: Modelo Otung – distribuição do desvio padrão .....	28

Figura 20: Modelo Karasawa -distribuição da amplitude .....	30
Figura 21: Rácio entre o desvio padrão para as frequências na banda Q e banda Ka.....	32
Figura 22: CCDF mensal do desvio padrão de cintilação entre 2016.04 a 2017.03 (esquerda) e 2017.04 a 2018.03 (direita).....	40
Figura 23: CCDF mensal do desvio padrão de cintilação entre 2018.04 a 2019.03 (esquerda) e 2019.04 a 2020.03 (direita).....	40
Figura 24: CCDF mensal do desvio padrão de cintilação entre 2020.04 a 2021.03.....	40
Figura 25: CCDF anual do desvio padrão de cintilação .....	41
Figura 26: CCDF do desvio padrão de cintilação do mês de dezembro (esquerda) e do mês de setembro (direita) .....	41
Figura 27: CCDF mensal do desvio padrão de cintilação entre 2016.04 a 2017.03 (esquerda) e 2017.04 a 2018.03 (direita).....	42
Figura 28: CCDF mensal do desvio padrão de cintilação entre 2018.04 a 2019.03 (esquerda) e 2019.04 a 2020.03 (direita).....	42
Figura 29: CCDF mensal do desvio padrão de cintilação entre 2020.04 a 2021.03.....	42
Figura 30: CCDF anual do desvio padrão de cintilação do beacon KaSat .....	43
Figura 31: CCDF do desvio padrão de cintilação do mês de Dezembro (esquerda) e do mês de Setembro (direita) .....	43
Figura 32: Média mensal da temperatura ambiente e da humidade relativa.....	46
Figura 33: Variação mensal do <i>Nwet</i> .....	46
Figura 34: Variação anual do <i>Nwet</i> .....	47
Figura 35: Fades – AlphaSat: meses de inverno (esquerda) e de verão (direita) .....	47
Figura 36: Enhancements - AlphaSat: meses de inverno (esquerda) e de verão (direita)	48
Figura 37: Fades – KaSat: meses de inverno (esquerda) e de verão (direita).....	48
Figura 38: Enhancements – KaSat: meses de inverno (esquerda) e meses de verão (direita) .....	49
Figura 39: Fades – AlphaSat: 2016.04-2017.03 (esquerda) e 2017.04-2018.03 (direita) .	49
Figura 40: Fades – AlphaSat: 2018.04-2019.03 (esquerda) e 2019.04-2020.03 (direita) .	50
Figura 41: Fades – AlphaSat: 2020.04-2021.03 .....	50

Figura 42: Fades – AlphaSat: janeiro (esquerda) e fevereiro (direita).....	50
Figura 43: Fades – AlphaSat: março (esquerda) e abril (direita) .....	51
Figura 44: Fades – AlphaSat: maio (esquerda) e junho (direita) .....	51
Figura 45: Fades – AlphaSat: julho (esquerda) e agosto (direita).....	51
Figura 46: Fades – AlphaSat: setembro (esquerda) e outubro (direita) .....	52
Figura 47: Fades – AlphaSat: novembro (esquerda) e dezembro (direita).....	52
Figura 48: Escalonamento do desvio padrão entre 2016.04 – 2017.03 (esquerda) e 2017.04 – 2018.03 (direita).....	53
Figura 49: Escalonamento do desvio padrão entre 2018.04 – 2019.03 (esquerda) e 2019.04 – 2020.03 (direita).....	53
Figura 50: Desvio padrão para as percentagens de referência entre 2020.04 – 2021.03	53
Figura 51: Escalonamento anual do rácio do desvio padrão .....	54
Figura 52: Desvio padrão para as percentagens de referência entre 2016.04 – 2021.03	54
Figura 53: Escalonamento do rácio do desvio padrão entre 2016.04 – 2021.03 .....	54
Figura 54: Fitting model – AlphaSat: 5 anos .....	55
Figura 55: Fitting model – AlphaSat: 2016.04 – 2017.03 (esquerda) e 2017.04 – 2018.03 (direita).....	56
Figura 56: Fitting model – AlphaSat: 2018.04 – 2019.03 (esquerda) e 2019.04 – 2020.03 (direita).....	56
Figura 57: Fitting model – AlphaSat: 2020.04 – 2021.03.....	56
Figura 58: Fitting model – KaSat: 5 anos.....	57
Figura 59: Fitting model – KaSat: 2016.04 – 2017.03 (esquerda) e 2017.04 – 2018.03 (direita).....	58
Figura 60: Fitting model – KaSat: 2018.04 – 2019.03 (esquerda) e 2019.04 – 2020.03 (direita).....	58
Figura 61: Fitting model – KaSat: 2020.04 – 2021.03 .....	58
Figura 62: Variação horária do desvio padrão entre 2016.04 a 2017.03 (esquerda) e 2017.04 a 2018.03 (direita).....	59

Figura 63: Variação horária do desvio padrão entre 2018.04 a 2019.03 (esquerda) e 2019.04 a 2020.03 (direita) .....	60
Figura 64: Variação horária do desvio padrão entre 2020.04 a 2021.03 .....	60
Figura 65: Variação horária anual do desvio padrão de cintilação do beacon AlphaSat..	60
Figura 66: Variação horária mensal do desvio padrão de cintilação do beacon AlphaSat61	
Figura 67: Variação horária do desvio padrão entre 2016.04 a 2017.03 (esquerda) e 2017.04 a 2018.03 (direita) .....	61
Figura 68: Variação horária do desvio padrão entre 2018.04 a 2019.03 (esquerda) e 2019.04 a 2020.03 (direita) .....	62
Figura 69: Variação horária do desvio padrão entre 2020.04 a 2021.03 .....	62
Figura 70: Variação horária anual do desvio padrão de cintilação do beacon KaSat .....	62
Figura 71: Variação horária mensal do desvio padrão de cintilação do beacon KaSat ....	63

## Lista de Tabelas

Tabela 2-1: Média mensal do <i>Nwet</i> recomendado.....	23
Tabela 2-2: Parâmetros dos modelos .....	30
Tabela 3-1 Coordenadas geográficas de Aveiro.....	33
Tabela 3-2 Características do Satélite KaSat e AlphaSat e parâmetros da ligação .....	34
Tabela 3-3: Classificação das flags .....	35
Tabela 3-4: Estrutura dos dados KaSat e AlphaSat .....	35
Tabela 3-5: Estrutura dos dados Meteo .....	36
Tabela 4-1: Parâmetros dos modelos de cintilação – banda Q .....	44
Tabela 4-2: Média mensal do <i>Nwet</i> .....	44
Tabela 4-3: Média mensal da temperatura ambiente.....	45
Tabela 4-4: Média mensal da humidade relativa .....	45
Tabela 4-5: Variação anual do <i>Nwet</i> .....	49
Tabela 4-6: Valores atribuídos ao grau do polinómio e o respetivo erro quadrático .....	55
Tabela 4-7: Erros médios quadráticos e os respetivos anos.....	57
Tabela 4-8: Valores atribuídos aos graus do polinómio e os respetivos erros quadráticos .....	57
Tabela 4-9: Erros quadráticos e os respetivos anos.....	59



## Lista de acrónimos

<b>LEO</b>	Low Earth Orbit
<b>MEO</b>	Medium Earth Orbit
<b>ESA</b>	European Space Agency
<b>XPD</b>	Cross-Polarization Discrimination
<b>DETI</b>	Departamento de eletrónica e telecomunicações
<b>PIMTs</b>	Propagation Impairment Mitigation Techniques
<b>ITU</b>	International Telecommunication Union
<b>FMT</b>	Fade Mitigation Techniques
<b>EIRP</b>	Effective Isotropic Radiated Power
<b>ULPC</b>	Uplink Power Control
<b>DLPC</b>	Downlink Power Control
<b>SBS</b>	Spot Beam Shaping
<b>HC</b>	Hierarchical Coding
<b>HM</b>	Hierarchical Modulation
<b>DRR</b>	Date Rate Reduction
<b>SD</b>	Site Diversity
<b>OD</b>	Orbital Diversity
<b>FD</b>	Frequency Diversity
<b>TD</b>	Time Diversity
<b>CPA</b>	Copolar Attenuation
<b>CCFD</b>	Função densidade cumulativa complementar

**BER** Bit error ratio

## Lista de símbolos

$X$	Amplitude de cintilação	(dB)
$\chi^+$	Fades - Amplitude de cintilação para valores positivos	(dB)
$\chi^-$	Enhancements - Amplitude de cintilação para valores negativos	(dB)
$\sigma^2 x$	Variância de cintilação	(dB <sup>2</sup> )
$\sigma_x$	Desvio padrão	dB
$N_{dry}$	Índice de refração seco	(ppm)
$N_{wet}$	Índice de refração húmido	(ppm)
$\sigma_{pre}$	Referência padrão da cintilação com as contribuições da antena	(dB)
$\sigma_{ref}$	Desvio padrão de referência em modelos de cintilação	(dB)
$n$	Índice de refração	
$N$	Rádio refratividade	
$P_d$	Pressão seca da atmosfera	(hPa)
$T$	Temperatura	(°C)
$e$	Pressão parcial do vapor de água	(hPa)
$e_s$	Pressão parcial de saturação do vapor de água	(hPa)
$P$	Pressão atmosférica total	(hPa)
$v_t$	Velocidade transversal do vento	(m/s)
$\eta$	Eficiência da antena	(%)
$D$	Diâmetro físico da antena	(m)
$k$	Número de onda rádio	(m <sup>-1</sup> )
$L$	Comprimento do trajeto turbulento	(m)

$D_e$	Diâmetro efetivo da antena	(m)
H	Altura da turbulência	(km)
$\theta$	Ângulo de elevação da antena	(°)
$W_{hc}$	Quantidade de água que uma nuvem densa contém	( $kg/m^2$ )
$f$	Frequência	Hz (ou GHz)
$f_c$	Frequência de canto do espectro de cintilação	(Hz)
$f_0$	Frequência de Fresnel	(Hz)

# 1. Capítulo I

## Introdução

### 1.1. Motivação

A comercialização das comunicações via satélite, que se iniciou nos anos 60, passou nos últimos anos de uma tecnologia alternativa para uma tecnologia de transmissão convencional [1]. A tecnologia de satélites possui diversas aplicações como comunicações radio, astronomia, recolha de dados meteorológicos e superfície terrestre para previsão do tempo e estudos ambientais e transmissão de dados entre sondas espaciais e a Terra.

A comunicação via satélite também se caracteriza pela capacidade de percorrer longas distâncias com atenuação reduzida e de cobrir locais por mais remotos que sejam, sem a necessidade de instalações por meio terrestre, que enfrentariam difíceis acessos. O aparecimento dos satélites LEO e MEO, vieram [2] facilitar a procura crescente pelas comunicações via satélite. Os satélites LEO caracterizam-se por apresentar altitudes inferiores (160 - 640 km) relativamente aos satélites GEO que se situam a uma distância nominal de 36 000 km. Esta característica traduz-se na existência de menor tempo de atraso, isto é, menor latência (10ms) e menor custo de lançamento [1]. Nos últimos anos estes satélites tem ganho grande força em projetos que visam ter uma cobertura global de satélites, como o caso das comunicações móveis 5G. Com o contínuo desenvolvimento da tecnologia e o aumento da utilização de satélites começou a surgir o congestionamento das bandas de frequências: L (1 – 2) GHz, S (2 – 4) GHz, C (4 - 8) GHz, X (8 - 12) GHz e Ku (12 - 18) GHz [2]. Dada a necessidade de ter maior largura de banda e taxas de transmissão de dados superiores, por forma a acompanhar a crescente procura de serviços com uma maior qualidade, tem-se vindo a recorrer a frequências mais elevadas.

Apesar das vantagens que as frequências superiores conseguem oferecer, estas tornam-se mais vulneráveis à degradação do sinal, uma vez que com o aumento da frequência os efeitos provocados pela atmosfera agravam-se [3].

No caso das bandas em estudo desta dissertação, as bandas Ka e Q, a troposfera é a camada da atmosfera responsável pelos fenómenos que mais condicionam as comunicações via satélite, levando a uma redução da sua qualidade. O sinal, ao se propagar na atmosfera, sofrerá efeitos como atenuação, que consiste na diminuição da amplitude do sinal recebido, despolarização, que se caracteriza pela alteração do estado original de polarização, e a cintilação que consiste em rápidas flutuações de amplitude em torno de um valor médio.

A principal causa dos efeitos atenuação e despolarização advém dos fenómenos meteorológicos como precipitação e nuvens. A cintilação resulta das variações aleatórias do índice de refração provocadas pela não homogeneidade da troposfera, onde existem variações temporais e espaciais da pressão, humidade e temperatura. De modo a garantir a qualidade das comunicações via satélite e visto que a propagação Terra-Satélite tem influência na amplitude do sinal recebido, é fundamental caracterizar os efeitos da atmosfera na propagação de modo a projetar sistemas que permitam contrariar essas interferências ao sinal, *Propagation Impairment Mitigation Techniques (PIMTs)*.

Vários estudos têm sido feitos, onde a agência Espacial Europeia (ESA) desempenha um papel fundamental dando na maioria dos projetos algum suporte financeiro a grupos de investigação e ainda pelo financiamento de *payloads* embarcados a bordo de satélites para a realização de experiências de propagação.

Campanhas de aquisição de dados foram realizadas maioritariamente na Europa, tendo sido utilizados os satélites experimentais: OTS, Olympus, Hot-Bird 6, *KaSat* e o ITALSAT apenas para citar alguns. Esta dissertação visa estudar a modelização da cintilação troposférica nas bandas Ka a 19.680 GHz do satélite *KaSat* e na banda Q a 39.40 GHz do satélite *AlphaSat* que está inserido num projeto da ESA. Uma vez que se encontram duas frequências em estudo, será relevante comparar os resultados entre duas estações que possuem diferentes frequências, ângulos de elevação e diâmetro da antena.

## **1.2. Objetivos**

O fenómeno cintilação é um tema com a sua importância para as comunicações via satélite dado o seu impacto na propagação das ondas eletromagnéticas. Até então os dados que existem a 40 GHz são escassos e por isso faz parte do objetivo do trabalho a modelação deste fenómeno. Será feita uma análise de 5 anos de dados que se encontram disponíveis. A cintilação caracteriza-se pela variância da amplitude, isto é, a intensidade de cintilação e pelas excursões do nível do sinal. Estes parâmetros apresentam variações tanto mensais como sazonais e por isso serão modelados com parâmetros meteorológicos que são medidos na estação meteorológica que se encontra localmente, em Aveiro.

A existência de dois sinais a monitorizar, na banda Ka e na banda Q é um aspeto que se distingue na comunidade dos investigadores. É possível fazer uma comparação de resultados entre duas estações diferentes que possuem diferentes valores de frequência, ângulo de elevação e diâmetro da antena. Por forma a comparar as duas estações irá ser analisado o escalonamento da intensidade de cintilação.

## **1.3. Estado da Arte**

O fenómeno de cintilação está ainda deficientemente caracterizado. Os modelos disponíveis são habitualmente baseados em bases de dados muito limitadas: geograficamente, temporalmente e parâmetros da ligação. As bases de dados envolvidas na validação do modelo ITU provêm na Europa de alguns locais com clima mais continental que o de Aveiro.

Os dados aqui analisados são uma contribuição significativa para o estudo do fenómeno pelo facto de englobarem um número significativo de anos (praticamente sem interrupções) o que permite uma análise em várias escalas temporais.

O assunto é ainda de extrema importância pois o crescimento explosivo de constelações MEO e LEO, que levarão à receção de sinais com baixo ângulo de elevação, leva à necessidade de avaliar o impacto do fenómeno.

#### **1.4. Estrutura da tese**

Esta dissertação encontra-se estruturada em 5 capítulos sendo o primeiro de cariz introdutório. Nele é feita uma breve descrição da motivação para a realização deste tema, nomeadamente a importância da previsão da cintilação nas comunicações por satélite.

No segundo capítulo serão abordados de forma sucinta os principais efeitos que a troposfera causa na propagação de ondas eletromagnéticas como a atenuação, despolarização e cintilação. De seguida serão descritos os principais aspetos característicos do fenómeno de cintilação. Também serão abordadas técnicas de mitigação que são usadas para contrariar os efeitos pela atmosfera provocados ao sinal. Por fim, a última secção deste capítulo incidirá sobre os modelos de previsão da cintilação existentes, nomeadamente o modelo *ITU*, o modelo *Van de Kamp*, o modelo *Otung* e o modelo *Karasawa*.

No terceiro capítulo será inicialmente descrito o suporte nas campanhas de propagação e os parâmetros dos dois satélites que permitem a realização deste trabalho. De seguida, será descrita a estação meteorológica e os recetores utilizados que se encontram em Aveiro. É também feita uma abordagem do pré-processamento dos dados e uma descrição de como estes são armazenados. Por fim, na última secção deste capítulo será abordado o processamento dos dados de cintilação.

No quarto capítulo será inicialmente feita uma análise da cintilação, seguindo-se uma avaliação dos modelos disponíveis e a comparação dos mesmos com os dados experimentais obtidos em Aveiro. Também é feita uma análise ao escalonamento do desvio padrão para as duas frequências. De seguida é extraído os coeficientes do polinómio que melhor se ajustam aos dados experimentais e feita uma avaliação dos coeficientes. Por fim, é abordado a variabilidade horária anual e mensal do desvio padrão para o *beacon AlphaSat* e o *beacon KaSat*.

O quinto capítulo e último, contém uma análise geral dos resultados obtidos e indicação de possível trabalho futuro.



## 2. Capítulo II: Conceitos de Propagação e Modelos de Cintilação

### Introdução

A atmosfera é o meio de propagação das ondas eletromagnéticas em comunicações por satélite, pelo que é essencial conhecer a sua constituição e os efeitos que causam ao sinal. A atmosfera encontra-se em constante alteração e a troposfera apresenta desequilíbrios termodinâmicos resultantes das massas de ar existentes a diferentes temperaturas, pressões e humidades. Também existem fatores meteorológicos resultantes destes desequilíbrios como a chuva, nuvens e gelo. Para frequências superiores a 10 GHz a interação entre a onda eletromagnética e estes fenómenos meteorológicos causa impactos na frente de onda recebida, amplitude e fase, que se traduzem em fenómenos caracterizados como atenuação, despolarização e cintilação [4]. A precipitação e as nuvens são a principal causa da atenuação da amplitude e da alteração do estado de polarização em trajetórias com uma elevação superior a valores de 5° a 10°. O fenómeno cintilação deve-se à constante mistura turbulenta das massas de ar existentes na troposfera.

Os modelos existentes que visam prever a cintilação troposférica, e que serão abordados, têm como parâmetro meteorológico de entrada o termo  $N_{wet}$ , à exceção de *Van de Kamp* [5] que se destaca por ter adicionalmente um novo termo no seu modelo de previsão da cintilação para a quantidade de água, uma vez que considera que as nuvens *cumulus* [6] têm impacto na ocorrência de cintilação [7]. Na secção que se segue serão abordados, de forma sucinta exceto a cintilação, os principais efeitos que a troposfera causa na propagação de ondas eletromagnéticas. De seguida é dada uma definição e parâmetros descritivos da cintilação, nomeadamente a amplitude, variância e desvio padrão, espetro da cintilação e efeito da antena no fenómeno cintilação. Serão também mencionadas as técnicas de mitigação da atenuação utilizadas para contrariar os efeitos provocados pelo canal. É feita uma abordagem aos modelos de previsão da cintilação existentes, nomeadamente o modelo *ITU*, o modelo *Van de Kamp*, o modelo *Otung* e o modelo *Karasawa*. Por fim, será abordado o escalonamento de frequência.

### 2.1. Atenuação

Um dos principais fenómenos troposféricos que afeta a propagação do sinal é a atenuação. A atenuação consiste na perda de potência e diminuição da amplitude no sinal

recebido aquando da sua propagação na atmosfera. As principais causas da atenuação são a chuva, nuvens, gelo e gases, sendo a chuva o fator meteorológico com impacto significativo para frequências acima dos 10 GHz e, portanto, para as bandas em estudo [4]. O sinal ao atravessar gotas de chuva, vai ter a sua energia absorvida e dispersada pela gota, resultando numa diminuição da intensidade da frente de onda. As atenuações devido às gotas de chuva dependem das características dielétricas, formato, tamanho, frequência e taxa de precipitação da chuva.

Os tipos de chuva que mais contribuem para a atenuação são as chuvas estratiforme e convectiva. A chuva estratiforme caracteriza-se por ocorrer em regiões de altitude média e pode chegar a uma extensão na ordem das centenas de quilómetros. Também é caracterizado por ter longos períodos de precipitação, mas de intensidade ligeira. A chuva convectiva caracteriza-se por apresentar taxas de precipitação intensas de curta duração e por possuir uma extensão de poucos quilómetros [8].

A constante de atenuação é dada por:

$$\alpha \cong aR^b \quad [\text{dB/km}] \quad (2.1)$$

onde R é a taxa de precipitação que vem em mm/h e, a e b os parâmetros temperatura e frequência [1].

Por forma a medir a quantidade de chuva que cai na superfície da terra são utilizados vários instrumentos nomeadamente o pluviómetro de balde, de conta gotas e outros mais sofisticados como o disdrometro que usa uma barreira ótica para classificar as gotas por tamanho. Os pluviómetros disponíveis em Aveiro são o de balde e o de conta gotas. O de balde consiste na contagem do número de vezes que um pequeno balde é esvaziado após se ter enchido com uma determinada quantidade de água conhecida. No caso do conta gotas, a sua quantização é feita com recurso a uma barreira de infravermelhos que permite fazer a contagem do número de gotas doseadas que a interrompem ao cair [2].

Os gases atmosféricos possuem um papel menos significativo para a atenuação. Contudo, a frequências elevadas, ângulos de elevação baixos e sistemas de margem de atenuação limitados, a atenuação devido aos gases deve ser tida em consideração. Dentro dos gases existentes na atmosfera, os que mais influenciam a atenuação para as bandas em estudo, Ka e Q, são o vapor de água e o oxigénio. As moléculas de vapor de água e de oxigénio são responsáveis por introduzir dois picos de atenuação, Figura 1, visíveis em 22.2 GHz e 60 GHz, respetivamente [3].

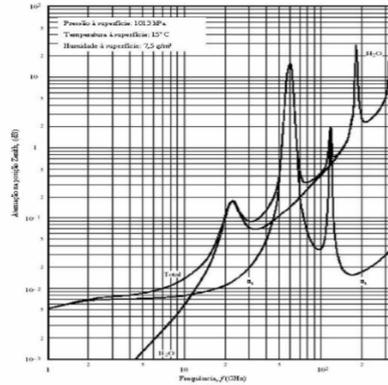


Figura 1: Atenuação zenital de oxigênio e vapor de água [9]

As nuvens contêm pequenas gotas de água com diâmetros inferiores a 0.1mm pelo que também são causadoras de atenuação, apesar de só terem um impacto considerável para frequências superiores a 12 GHz [1]. Para além de gotas de água, as nuvens podem conter cristais de gelo, como é o caso das nuvens *cirrus* que se encontram a elevadas altitudes. Neste caso, não há um impacto significativo na atenuação do sinal em comparação com a chuva, uma vez que o gelo apresenta um índice de refração na sua maioria real. Porém, para baixos ângulos de elevação, ou seja, com um maior trajeto a percorrer na atmosfera, o seu impacto poderá ter maior relevância [1].

## 2.2. Despolarização

A despolarização consiste na alteração do estado de polarização em que há transferência de potência da polarização original para uma polarização ortogonal, quando a onda atravessa um meio que contém hidrometeoros.

O sinal que mantém a polarização original e desejada é designado por *copolar* e o sinal que recebe a polarização ortogonal e indesejada é designado por *crosspolar*. Como se pode ver pela Figura 2, os campos elétricos representados por  $E_1$  e  $E_2$  são os sinais transmitidos (quasi) horizontalmente e (quasi) verticalmente de forma independente. Após a passagem no meio, vão emergir os campos elétricos correspondentes  $E_{11}$  e  $E_{22}$  que mantêm a polarização original e os campos elétricos  $E_{12}$  e  $E_{21}$  que foram convertidos para a polarização ortogonal, ou seja, resultam da despolarização [1].

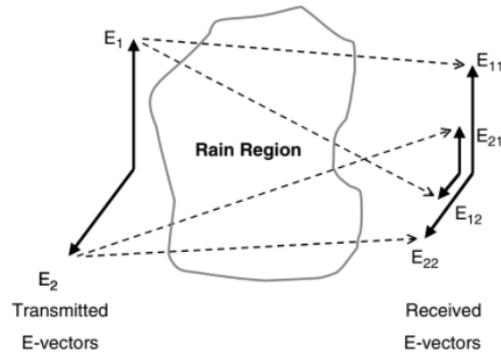


Figura 2: Componentes de despolarização [1]

Esta alteração do estado de polarização deve-se à existência de partículas no meio de propagação que possuem formas diversificadas, não esféricas, com orientação preferencial, como o caso das gotas de chuva e os cristais de gelo. Durante a precipitação as gotas de água deixam de ter uma forma esférica e passam a apresentar uma deformação na parte inferior que é consequência do conflito entre a força de atrito com a tensão superficial, como se pode ver pela Figura 3 [3].

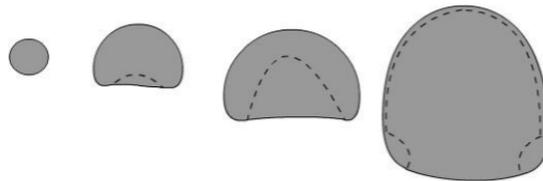


Figura 3: Gotas de água de chuva [9]

Para além da chuva, os cristais de gelo presentes em nuvens de elevada altitude, como o tipo *cirrus* e *cirrostratus*, também provocam a despolarização, causando desvios de fase diferencial. Os cristais de gelo variam de tamanho entre 0.1 e 1mm e de concentrações de  $10^3$  a  $10^6$  cristais/ $m^3$ . A forma irregular dos cristais de gelo, com uma tendência a apresentarem a forma de agulhas ou discos e a as forças dinâmicas exercidas sobre eles quando em queda que causam um alinhamento preferencial, dá origem a fenómenos de despolarização na ausência de atenuação significativa.

A despolarização devido aos cristais de gelo ocorre com mais frequência em estações terrestres que se encontram no interior pois as massas de ar continentais contêm mais núcleos de poeira [1]. Contudo, grande parte dos fenómenos de despolarização medidos em Aveiro na banda Ka mostram que até uma atenuação de 10 dB a principal causa de despolarização é o gelo.

A quantificação da despolarização é dada por:

$$XPD = -20 \log \left( \frac{A_{cx}}{A_{co}} \right) (dB) \quad (2.2)$$

onde,  $A_{cx}$  e  $A_{co}$  correspondem à amplitude do sinal recebido na polarização ortogonal e na polarização original, respetivamente [3]. A grandeza acima denomina-se de discriminação da polarização cruzada.

Uma das consequências da despolarização é o *crosstalk*, isto é, a interferência indesejada que um canal de transmissão usando uma polarização causa no outro. A reutilização de uma frequência, integrando canais de transmissão polarizados de forma independente é uma técnica utilizada para aumentar a capacidade do canal. Porém, devido ao desempenho não perfeito das antenas e estações terrestres, e dada a possibilidade de transferência de potência de um estado de polarização para o outro, existirá sempre alguma interferência entre os dois canais. O *crosstalk* para frequências superiores a 12 GHz torna-se um problema [1].

### 2.3. Cintilação

Uma onda eletromagnética ao percorrer o caminho terra-satélite passa por uma estrutura complexa onde existem misturas turbulentas de massas de ar a diferentes temperaturas, humidades e pressões. Todas estas misturas de massas de ar fazem com que o índice de refração atmosférico,  $n(r, t)$ , que depende temporalmente destas misturas de massas, apresente variações aleatórias. A onda ao atravessar este caminho turbulento vai sofrer perturbações na fase e na amplitude da frente de onda, que se refletem em flutuações rápidas (frequências bastante superiores aos fenómenos de atenuação por chuva) e aleatórias em torno de um valor médio. A estas flutuações de amplitude dá-se o nome de cintilação [4]. As amplitudes superiores ao valor médio denominam-se de *enhancements* e os sinais abaixo do valor médio designam-se de *fades*. De notar que a medição da fase não é considerada dada a sua complexidade.

A cintilação é mais forte na presença de nuvens e nos meses com temperatura e humidade elevadas pois, sob estas condições, a atmosfera é capaz de reter mais vapor de água dada a elevada pressão de saturação do vapor de água. Também no início da tarde se verifica uma cintilação mais intensa devido ao fenómeno *buoyancy*, que consiste na ascensão de massas de ar devido ao aquecimento solar do solo [6][8].

#### Índice de refração

Como mencionado, a atmosfera está em constante mudança buscando um equilíbrio e, por isso, é necessário encontrar uma relação entre os parâmetros atmosféricos e o índice de refração.

O índice de refração  $n(r, t)$ , é uma função estocástica no espaço e tempo dada por:

$$n = \sqrt{\varepsilon} = \frac{c}{v} \quad (2.3)$$

em que  $\varepsilon$  é a constante dielétrica do meio,  $c$  é a velocidade da luz no vácuo e  $v$  a velocidade da onda no meio. O índice de refração à superfície terrestre varia entre 1.00025 e 1.00040. Uma forma mais prática de lidar com o índice de refração  $n$  é usando uma quantidade

em escala,  $N$ , a radio refratividade, uma vez que o valor do índice de refração é muito próximo de 1 [1].

$$n = 1 + N \cdot 10^{-6} \quad (2.4)$$

onde  $N$  é dado pela soma das contribuições  $N_{dry}$  e  $N_{wet}$ .

Sendo:

$$N_{dry} = 77.6 \frac{P_d}{T} \quad (2.5)$$

$$N_{wet} = 72 \cdot \frac{e}{T} + 3.75 \cdot 10^5 \cdot \frac{e}{T^2} \quad (2.6)$$

vem que:

$$N = 77.6 \frac{P_d}{T} + 72 \cdot \frac{e}{T} + 3.75 \cdot 10^5 \cdot \frac{e}{T^2} \quad (2.7)$$

O parâmetro  $N_{dry}$  contém as contribuições da atmosfera seca (sem vapor de água) e quase constantes da atmosfera, como o caso da pressão seca,  $P_d$ . O parâmetro  $N_{wet}$  representa as contribuições devido ao vapor de água que variam ao longo do tempo e, por vezes, mesmo num prazo de algumas horas. O parâmetro  $e$  corresponde à pressão de vapor de água (hPa) e  $T$  à temperatura absoluta (K). O termo  $N_{wet}$  é importante uma vez que as variações da humidade nas massas de ar afetam o índice de refração húmido.

O valor da pressão de vapor de água é dado por:

$$e = \frac{H \cdot e_s}{100} \quad (2.8)$$

em que  $e_s$ , a pressão de vapor de saturação é dada por:

$$e_s = EF \cdot a \cdot \exp \left[ \frac{(b - \frac{t}{d}) \cdot t}{t + c} \right] \quad (2.9)$$

e

$$EF_{\text{água}} = 1 + 10^{-4} [7.2 + P \cdot (0.0320 + 5.9 \cdot 10^{-6} \cdot t^2)] \quad (2.10)$$

onde  $P$  é a pressão atmosférica e  $t$  a temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ). Os coeficientes  $a$ ,  $b$ ,  $c$  e  $d$  para a água são  $a = 6.1121$ ,  $b = 18.678$ ,  $c = 257.14$ ,  $d = 234.5$ . Se o valor de  $e$  aumentar, a radio refratividade também vai aumentar.

O índice de refração também varia com a altitude segundo:

$$n(h) = 1 + N_0 \cdot 10^{-6} \cdot e^{-\frac{h}{h_0}} \quad (2.11)$$

onde  $N_0$  é a média da radio refratividade ao nível do mar e  $h_0$  a altura de escala em km. Ambos os parâmetros podem ser determinados estatisticamente consoante o tipo de clima. Como referência os valores atribuídos são:  $N_0 = 315$  e  $h_0 = 7.35 \text{ km}$ .

Sendo o parâmetro  $h$  a altitude em km: se esta aumentar o índice de refração diminui. A maiores altitudes a capacidade de reter vapor de água é menor em comparação com baixas altitudes e, portanto, também será menor. Assim a cintilação é mais forte para altitudes mais baixas [10]. Contudo, a propensão a turbulência de camadas mais elevadas, nomeadamente a *boundary layer*, também deve ser levada em conta.

### Exemplo do cálculo do $N_{wet}$ e $N_{dry}$

Com as recomendações do *ITU* mencionadas em 2.3, foi calculado o valor da radio refratividade,  $N$ , e os valores de  $N_{wet}$  e  $N_{dry}$  para o dia 13 de Setembro de 2016.

Na Figura 4 é possível observar a variação da radio refratividade ao longo do dia.

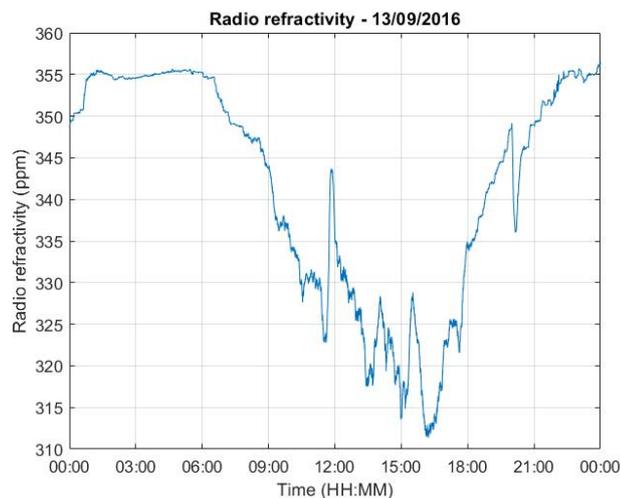


Figura 4: Radio refratividade (ppm)

Para o cálculo do  $N_{wet}$  são necessários como parâmetros de entrada a humidade relativa, temperatura e pressão. De modo a ser mais simples a observação destes parâmetros, seguem-se duas figuras: a Figura 5 apresenta a variação ao longo do dia do  $N_{wet}$  com a humidade relativa e a temperatura e a Figura 6 apresenta a variação do  $N_{wet}$  com a humidade e a pressão.

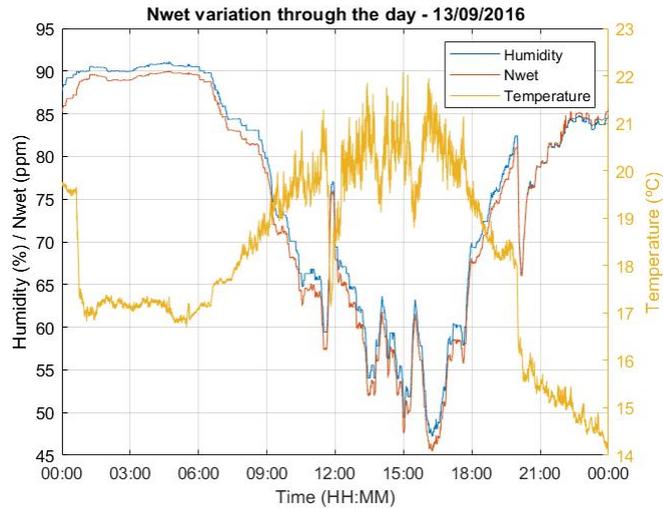


Figura 5: Variação do  $N_{wet}$ , da humidade e temperatura

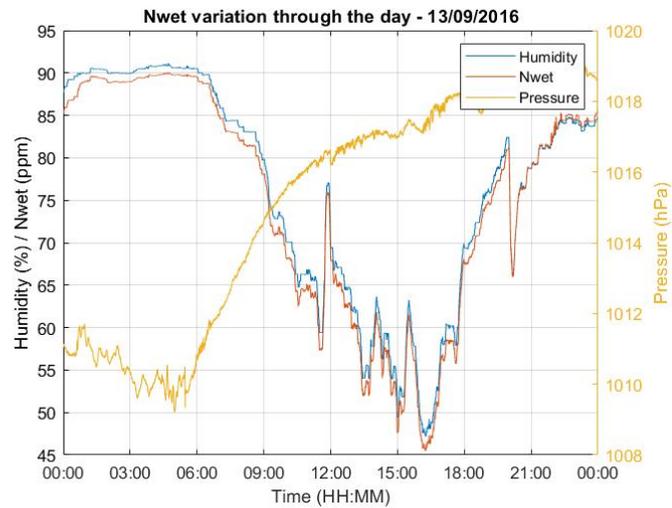


Figura 6: Variação do  $N_{wet}$ , da humidade e da pressão

Segundo a Figura 5 e a Figura 6 é possível observar que a variação ao longo do dia do  $N_{wet}$  e da humidade é bastante similar. Também é possível observar que a temperatura e a pressão (em particular neste dia) apresentam valores elevados no intervalo entre as 6:00h e as 21:00h.

Comparando a Figura 4 e a Figura 6, observa-se que a radio refratividade apresenta uma similaridade com o termo  $N_{wet}$ . Tal é explicado pelo facto de a radio refratividade depender dos termos  $N_{wet}$  e  $N_{dry}$ , sendo o parâmetro  $N_{wet}$  uma representação das contribuições devido ao vapor de água que variam ao longo do tempo.

Para o cálculo do  $N_{dry}$  procedeu-se do mesmo modo. A Figura 7 contém a variação ao longo do dia do  $N_{dry}$ , da temperatura e humidade e a Figura 8 a variação ao longo do dia do  $N_{dry}$ , da humidade e da pressão.

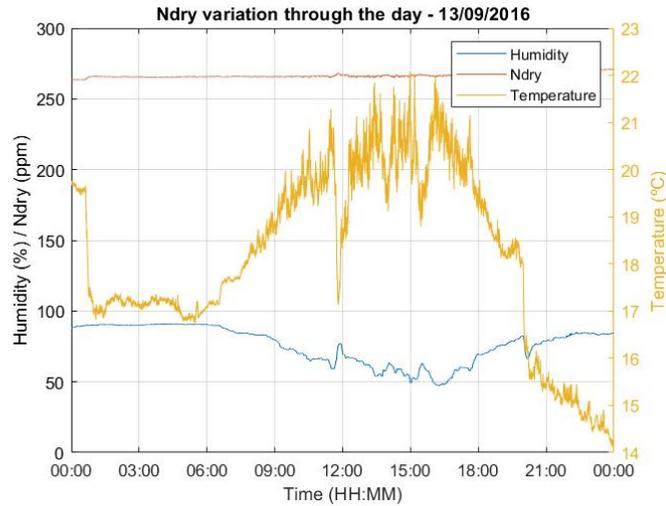


Figura 7: Variação do  $N_{dry}$ , da humidade e temperatura

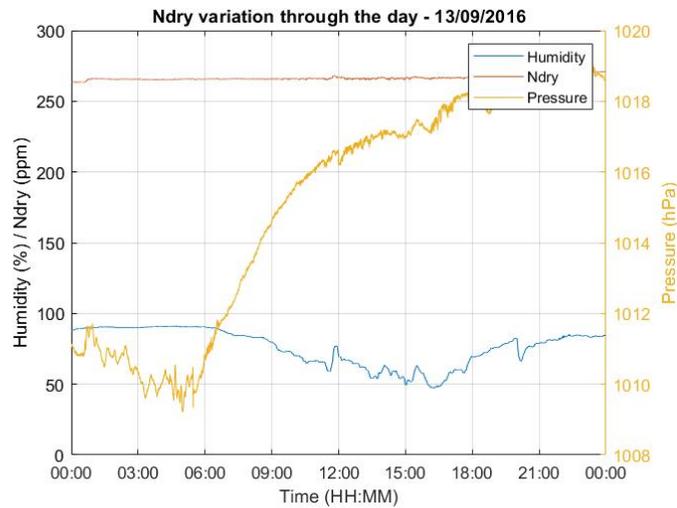


Figura 8: Variação do  $N_{dry}$ , da humidade e pressão

Através das duas figuras, Figura 7 e Figura 8, é possível observar que o valor de  $N_{dry}$  é aproximadamente constante, não se verificando similaridade vincada com nenhum dos parâmetros temperatura, pressão e humidade. O termo  $N_{dry}$  contém as contribuições da atmosfera seca (sem vapor de água) e quase constantes da atmosfera, pelo que é esperado este comportamento quase constante.

## 2.4. Definição e parâmetros descritivos da cintilação

### 2.4.1. Amplitude

Uma onda ao se propagar num meio turbulento vai sofrer flutuações rápidas em torno de um valor médio, o que se traduz em flutuações em amplitude e fase. Sendo a amplitude

instantânea do sinal recebido na estação terrestre dada por  $A(t)$  e  $A_0$  a média do nível do sinal sob condições de céu limpo, segundo a aproximação de Rytov [6], vem que:

$$\frac{A(t)}{A_0} = e^{x(t)} \quad (2.12)$$

onde  $x(t)$  é um processo aleatório em nepers. Passando para a escala de decibéis vem que:

$$X(t) = 20 \log_{10} \left( \frac{A(t)}{A_0} \right) (dB) \quad (2.13)$$

A dinâmica do fenómeno de cintilação e de atenuação tem sido amplamente estudada. Os conteúdos de frequência da atenuação raramente excedem 20 mHz ao contrário da cintilação que pode alcançar 1 Hz. Por outro lado, as lentas (muitas dezenas de minutos) variações da potência radiada pelo satélite e de ganho dos recetores devem ser removidas das séries temporais. Assim, as séries temporais são normalmente filtradas com um filtro passa-alto de forma a remover componentes que variam de forma lenta: habitualmente é usado um filtro envolvendo um tempo de integração da ordem de 1 minuto.

Um exemplo da amplitude de cintilação encontra-se na Figura 9. O evento ocorreu no dia 13 de setembro de 2016 recolhido pelos dois recetores, *AlphaSat* da banda Q e *KaSat* da banda Ka. Como se pode observar, existem flutuações rápidas em torno de um valor médio, zero. A variação pico a pico durante um dia foi de 5.09 dB. Neste dia ocorreu elevada atenuação, sendo visível o seu máximo entre as 00:00h e as 03:00h. Neste caso e sob estas condições, estes dados não serão tratados uma vez que só são considerados períodos de tempo com reduzida atenuação para o estudo da cintilação.

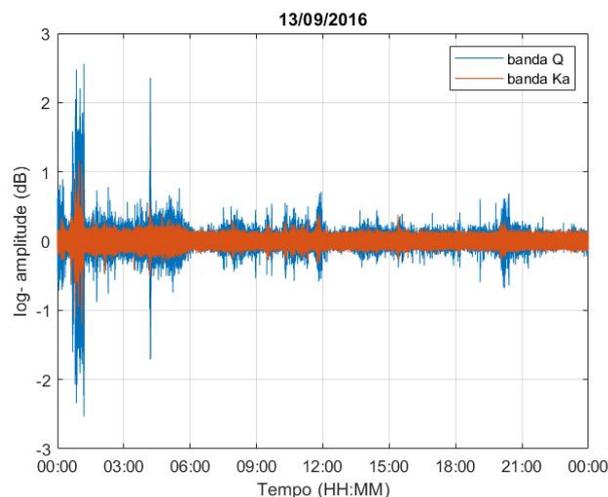


Figura 9: Cintilação durante 1 dia

Na Figura 10 encontra-se a amplitude de cintilação para ambos os recetores, mas num curto espaço de tempo, 5 minutos.

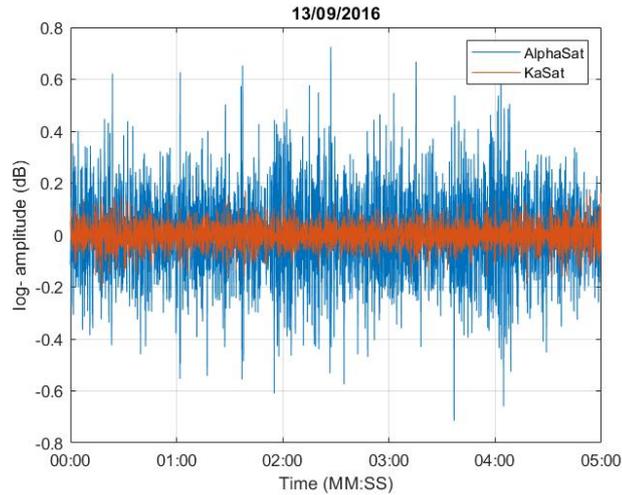


Figura 10: Cintilação durante 5 minutos

Na Figura 11 segue-se um exemplo da atenuação ao longo do dia 13 de setembro de 2016, recolhido pelos dois recetores, *AlphaSat* da banda Q e *KaSat* da banda Ka e onde é possível observar a elevada atenuação no intervalo entre as 00:00h e as 03:00h.

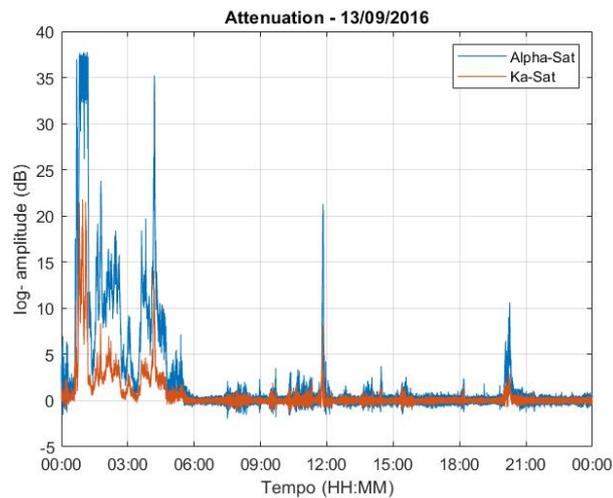


Figura 11: Atenuação durante 1 dia

A cintilação é caracterizada estatisticamente com base nas:

- Distribuições de amplitude –eventualmente separadas por *fades* e *enhancements*.
- Desvio padrão  $\sigma$  (dB) ou variância  $\sigma^2$  (dB<sup>2</sup>) que é calculada em janelas temporais de 1 minuto.
- Excursão pico a pico (*pk-pk*) também calculada em janelas temporais de 1 minuto.

## 2.4.2. Variância e desvio padrão

Para a distribuição do desvio padrão a longo prazo, *Karasawa* [4] observou que este é aproximado por uma distribuição Gamma, dada por:

$$p(\sigma) = \frac{(a/m)^a}{\Gamma(a)} \sigma^{a-1} e^{-a\sigma/m} \quad (2.14)$$

onde  $a = m_\sigma^2 / \sigma_\sigma^2$ ,  $m_\sigma$  é o valor médio de  $\sigma_\sigma$  e  $\Gamma$  a função Gamma

$$\Gamma(a) = \int_0^\infty x^{a-1} e^{-x} dx \quad (2.15)$$

A distribuição da variância é dada por:

$$p(\sigma^2) = \frac{p(\sigma)}{2\sigma} = \frac{(a/m_\sigma)^a}{2\Gamma(a)} (\sigma^2)^{a/2-1} e^{-a\sqrt{\sigma^2}/m_\sigma} \quad (2.16)$$

*Moulsley e Vilar* [4] no entanto propuseram uma distribuição lognormal para o desvio padrão:

$$p(\sigma) = \frac{1}{\ln 10 \sqrt{2\pi} \sigma_1 \sigma} e^{-(\log \sigma - m_1)^2 / 2\sigma_1^2} \quad (2.17)$$

em que  $m_1$  é a média de  $\log \sigma$  e  $\sigma_1$  o desvio padrão de  $\log \sigma$ . Uma vez que  $\log \sigma$  tem uma distribuição lognormal, também  $\log \sigma^2$  terá a mesma distribuição e assim, a variância seguirá também uma distribuição lognormal segundo:

$$p(\sigma^2) = \frac{1}{\ln 10 \sqrt{2\pi} \sigma_{12} \sigma^2} e^{-(\log \sigma^2 - m_{12})^2 / 2\sigma_{12}^2} \quad (2.18)$$

em que  $m_{12}$  é a média de  $\log_{10} \sigma^2$  e  $\sigma_{12}$  o desvio padrão de  $\log_{10} \sigma^2$ .

Um dos parâmetros para caracterizar a cintilação é o desvio padrão  $\sigma_x$  (dB) ou a variância  $\sigma_x^2$  (dB<sup>2</sup>). Na Figura 12 encontra-se um exemplo do desvio padrão da cintilação no dia 13/09/2016.

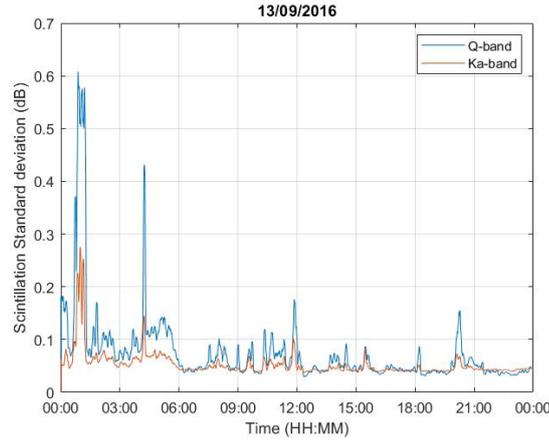


Figura 12: Desvio padrão da cintilação ao longo de um dia

### 2.4.3. Distribuição da amplitude

As flutuações do sinal em torno de um valor médio a curto prazo, isto é, em períodos curtos de cintilação apresentam uma distribuição gaussiana, podendo ser caracterizada por  $\sigma^2$ .

O facto de a distribuição ser gaussiana é explicado por *Strobehn, Wang e Speck* [11] em que assumiram que o recetor se encontrava dentro do meio onde existe a turbulência e que a quantidade de contribuições para o sinal era grande.

A distribuição gaussiana da amplitude do sinal  $\chi$  é dada por uma distribuição condicionada [4]:

$$p(\chi|\sigma_\chi) = \frac{1}{\sigma_\chi\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\chi^2}{2\sigma_\chi^2}} \quad (2.19)$$

Contudo, *Vilar e Banjo* [4] observaram que para cintilações de maior intensidade, a distribuição a curto prazo deixa de ser gaussiana, uma vez que para grandes flutuações de sinal se torna visível uma diferença entre os *fades* e os *enhancements*, sendo os *fades* mais profundos.

Sabendo que as nuvens são uma das causas da cintilação, uma hipótese mais realista segundo *Van de Kamp* [5] seria considerar que a turbulência é uma camada fina que se encontra longe do recetor a uma altura  $H$ . Sob estas condições a distribuição passaria a ser *Rice-NaKagami* [11]:

$$p(\chi) = \frac{\chi}{\sigma_\chi^2} e^{-\frac{(\chi^2 + \chi_0^2)}{2\sigma_\chi^2}} I_0\left(\frac{\chi\chi_0}{\sigma_\chi^2}\right) \quad (2.20)$$

onde  $\chi_0$  é a amplitude do principal sinal recebido,  $\chi$  a amplitude de cintilação,  $I_0$  a função de *Bessel* modificada de ordem zero e  $\sigma_\chi$  o desvio padrão da distorção.

Kamp [11] também verificou que para curto prazo, o sinal interferido tem uma relação de proporcionalidade com o sinal recebido e que  $\xi$ , que é a medida da intensidade da cintilação, é o parâmetro que caracteriza a distorção.

$$\sigma_\chi = \xi\chi_0 \quad (2.21)$$

O desvio do sinal da média, em escala dB, é dado por:

$$y = 20 \log_{10}(\chi/\chi_0) \quad (2.22)$$

e a distribuição de  $y$  é dada por:

$$p(y) = \frac{\ln 10}{20} * \frac{10^{\frac{2y}{20}}}{\xi^2} * e^{-\frac{\left(10^{\frac{2y}{20}}+1\right)}{2\xi^2}} * I_0\left(\frac{10^{\frac{y}{20}}}{\xi^2}\right) \quad (2.23)$$

Com o aumento da intensidade da cintilação, isto é, para cintilações de maior amplitude a distribuição a curto prazo torna-se assimétrica [11]. A

Figura 13 mostra a variação da distribuição de probabilidade,  $p(y)$  para vários valores de intensidade de cintilação,  $\xi$ , segundo a equação (2.23). Observa-se que para um valor de  $\xi = 0.1$ , a distribuição corresponde ao pico mais estreito e com o aumento da intensidade de cintilação a diferença entre os *fades* e os *enhancements* torna-se visível.

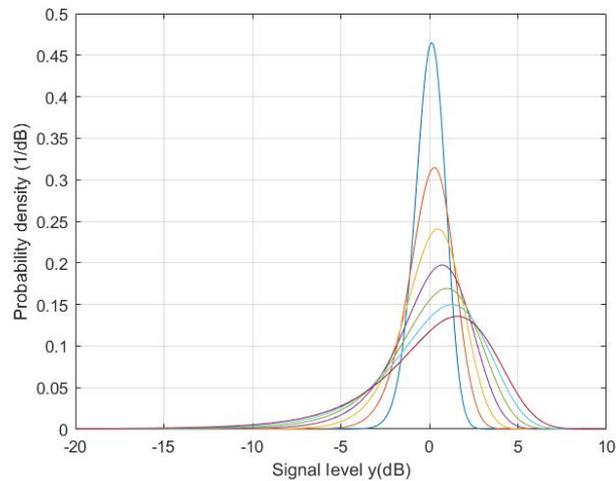


Figura 13: Distribuição da distribuição de probabilidade para valores de intensidade de cintilação

#### 2.4.4. Espectro da cintilação

O espectro de cintilação também tem sido objeto de estudo. O espectro de cintilação possui duas zonas: a primeira para baixas frequências que é caracterizada por ser plano e a segunda para frequências mais elevadas onde a função apresenta um decaimento de  $f^{-\frac{8}{3}}$ . A frequência em que ocorre a interseção destas duas assíntotas designa-se por frequência de canto,  $w_c$ , e tem uma relação com a frequência de *Fresnel* segundo:

$$w_c = 1.43w_0 \quad (2.24)$$

A frequência de *Fresnel*  $w_0$  é dada pela razão entre a componente transversal da velocidade do vento ao caminho,  $v_t$ , e o *eddy size* dominante  $\sqrt{\lambda L}$  [6]:

$$w_0 = v_t \sqrt{\frac{2\pi}{\lambda L}} \text{ (rads/s)} \quad (2.25)$$

onde,  $L$  é o comprimento do caminho turbulento e  $\lambda$  o comprimento de onda.

Uma maior velocidade do vento traduz-se numa variação mais rápida dos efeitos do meio aleatório sobre a abertura da antena. A densidade espectral é assim dada por duas assíntotas: uma para as frequências mais baixas,  $W_\chi^0(w)$  e outra para as frequências mais altas  $W_\chi^\infty(w)$ .

$$\begin{cases} W_\chi^0(w) = \frac{2.765}{w_0} \sigma^2(\chi) \text{ (dB}^2/\text{Hz)} \\ W_\chi^\infty(w) = \frac{7.13}{w_0} \sigma^2(\chi) \left(\frac{w}{w_0}\right)^{-\frac{8}{3}} \text{ (dB}^2/\text{Hz)} \end{cases} \quad (2.26)$$

#### 2.4.5. Efeito da antena no fenómeno de cintilação

As variações aleatórias do índice de refração da atmosfera causam distorções de fase e amplitude na frente de onda que se apresenta à antena. Poderemos antecipar que além dos parâmetros meteorológicos já discutidos o diâmetro da antena poderá influenciar os parâmetros da amplitude e do espectro de cintilação, sendo por isso necessário ter este parâmetro em consideração. Consoante o aumento do diâmetro  $D$  (m) de uma antena, as flutuações da frente de onda tornam-se mais descorrelacionadas em toda a abertura. A abertura de uma antena efetua uma média espacial da frente de onda e por isso, a antena vai atuar como um filtro passa baixo, atenuando a amplitude de cintilação para comprimentos de onda menores que o diâmetro da antena. Assim, as flutuações do sinal terão a amplitude de cintilação menor em comparação com uma antena pontual.

Igualmente será de prever que a cintilação aumente com a diminuição do ângulo de elevação,  $\theta$ , pois o sinal atravessará um trajeto mais longo nas camadas turbulentas.

*Haddon e Vilar* [4] apresentaram uma expressão para o denominado fator de redução da antena,  $G(x)$ , que resulta do rácio entre a variância da cintilação medida por uma antena de diâmetro  $D$  e a variância medida por uma antena pontual:

$$G(x) = 3.8637(x^2 + 1)^{\frac{11}{12}} \cdot \sin\left(\frac{11}{6} \arctan\frac{1}{x}\right) - 7.0835x^{\frac{5}{6}} \quad (2.27)$$

onde  $x$ , a razão entre o diâmetro efetivo da antena e o raio da zona de Fresnel é dado por:

$$x = \frac{0.0584D^2\eta k}{L} \quad (2.28)$$

O parâmetro  $\eta$  representa a eficiência da antena (tipicamente 70%),  $D$  o diâmetro físico da antena,  $k$  é o número de onda, dado por  $\frac{2\pi f}{c}$  e  $L$  o comprimento do caminho turbulento, que é dado por:

$$L = \frac{2h}{\sqrt{\sin^2\theta + \frac{2h}{a_e} + \sin\theta}} \quad (2.29)$$

onde  $a_e$  é o raio efetivo da terra, cujo valor é 8.5 M metros,  $h$  a altura da turbulência e  $\theta$  o ângulo de elevação da antena.

O modelo de *ITU* [12] segue a expressão de *Haddon e Vilar* e atribui ao valor de  $h$ , 1000 m.

Uma outra fórmula dada por trechos para  $G(D_e)$ , segundo *Karasawa* [5], é:

$$G(D_e) \begin{cases} 1.0 - 0.7\left(\frac{D_e}{\sqrt{\lambda L}}\right) \text{ para } 0 \leq \frac{D_e}{\sqrt{\lambda L}} \leq 1.0 \\ 0.5 - 0.2\left(\frac{D_e}{\sqrt{\lambda L}}\right) \text{ para } 1.0 \leq \frac{D_e}{\sqrt{\lambda L}} \leq 2.0 \\ 0.1 \text{ para } 2.0 < \frac{D_e}{\sqrt{\lambda L}} \end{cases} \quad (2.30)$$

O valor de  $D_e$  pode ser calculado através do diâmetro da antena,  $D$ , e da sua eficiência  $\eta$  segundo:  $D_e = D\sqrt{\eta}$ . O valor atribuído a  $h$  segundo *Karasawa* é de 2000 m.

De modo a ser observada a dependência do fator de redução da antena com o respetivo diâmetro, as equações (2.27) e (2.30) foram representadas na Figura 14.

As aproximações feitas por *Haddon e Vilar* e por *Karasawa* apresentam um comportamento muito similar. Quanto mais pequeno for o diâmetro da antena, maior é o fator

de redução  $G(x)$ . O *beacon AlphaSat* apresenta a maior frequência e menor diâmetro de antena e o *beacon KaSat* tem a menor frequência e o maior diâmetro da antena. Uma vez que a relação diâmetro da antena e comprimento de onda é determinante, (2.28), seria de esperar que o *beacon KaSat* apresentasse maior fator de redução.

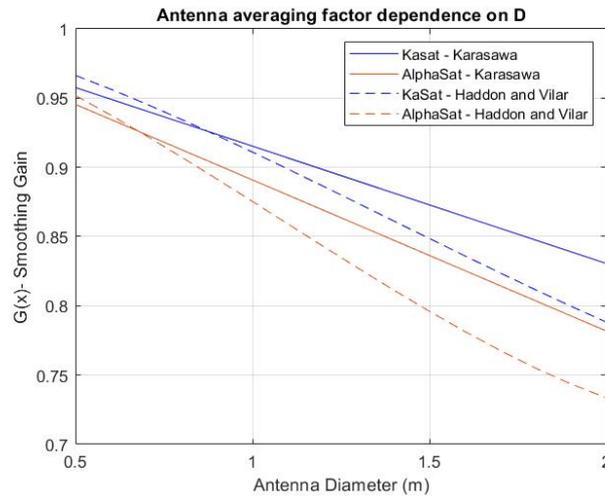


Figura 14: Fator de redução para diferentes diâmetros da antena

## 2.5. Técnicas de Mitigação da Atenuação

Para frequências superiores a 10 GHz, os impactos que a atmosfera tem no sinal são cada vez maiores, sendo por isso necessário aplicar técnicas FMT, *fade mitigation techniques*, de modo a garantir a qualidade do serviço. As técnicas FMT podem ser classificadas em três categorias [13]:

- EIRP control techniques.
- Adaptive transmission techniques.
- Diversity protection schemes.

A primeira técnica, *EIRP control techniques*, consiste na variação da potência ou do ganho da antena de modo a compensar as perdas de potência do sinal, que ocorreram devido aos efeitos de propagação na atmosfera. Este ajuste da potência pode ser efetuado na estação terrestre, designando-se por controlo de potência *uplink* (ULPC) ou no satélite, designando-se por controlo de potência *downlink* (DLPC). Outro tipo de controlo EIRP que também utiliza a variação do ganho da antena designa-se por SBS, *spot beam shaping*. Nesta técnica, o objetivo passa por ter a potência recebida na estação terrestre aproximadamente constante, mesmo sob a ocorrência de chuva.

A segunda técnica, *adaptive transmission technique*, consiste na alteração da forma com que o sinal é transmitido onde ocorreu degradação. Esta técnica pode ser dividida em 3 categorias: *hierarchical coding* (HC), *hierarchical modulation* (HM) e *data rate reduction* (DRR). Na primeira categoria, a codificação é adotada pelo sistema do satélite. Relativamente à HM, esta técnica reduz a relação de densidade de potência de ruído,  $\frac{E_b}{N_0}$  para um certo valor de taxa

de erro de bit, (BER), diminuindo a eficiência espectral. Na última categoria, DRR, é reduzida a taxa de dados de informação quando o sistema de controlo deteta a possibilidade de ocorrência de *deep fade* no próximo estado do canal.

A última técnica, *diversity protection schemes*, consiste na alteração da estação terrestre ou satélite de modo a evitar os *fades* causados pela chuva. Sendo a chuva uma das principais causas de atenuação, esta técnica é a mais eficiente para frequências superiores a 10 GHz. Esta categoria divide-se em *site diversity* (SD), *orbital diversity* (OD), *frequency diversity* (FD) e *time diversity* (TD). Mais informação relativa a estas técnicas encontra-se em [13].

## 2.6. Modelos de cintilação

Como já foi mencionado anteriormente, a cintilação resulta de variações do índice de refração causadas pelas características das massas de ar presentes na troposfera turbulenta. O sinal ao atravessar esse caminho turbulento vai sofrer rápidas flutuações em torno de um valor médio. A intensidade de cintilação aumenta na presença de nuvens e chuva, consoante o aumento da frequência podendo, para frequências acima dos 10 GHz, causar grande degradação do sinal especialmente para ligações com baixo ângulo de elevação. A cintilação poderia ser caracterizada se se conhecessem todos os parâmetros atmosféricos ao longo do trajeto, contudo tal não é possível pelo menos com resolução temporal suficientemente pequena. Assim uma descrição matemática que possa levar em conta os parâmetros medidos à superfície poderá ser uma solução.

A amplitude de cintilação é descrita pela função de distribuição cumulativa que se aproxima a uma distribuição gaussiana e, por isso, o desvio padrão é um parâmetro adequado para a caracterização da cintilação a curto prazo. Para curto prazo, e considerando intervalos de tempo curtos o suficiente (alguns minutos) para que os parâmetros meteorológicos sejam considerados constantes, é possível assumir uma atmosfera estacionária.

No caso de longo prazo isso deixa de ser possível. Terá que se recorrer à previsão do desvio padrão de modo a se obter a distribuição da amplitude de cintilação. Para isso, e com o objetivo de se conseguir prever o comportamento da cintilação tem-se vindo a desenvolver e testar vários modelos, como o caso do modelo de cintilação *ITU*, *Van de Kamp*, *Otung* e *Karasawa*. Cada um deles considera uma aproximação para o desvio padrão diferente. *Van de Kamp* distingue-se dos outros modelos por considerar o efeito das nuvens cumulus na cintilação. O modelo *ITU* é essencialmente baseado no modelo de *Karasawa*.

Apresentam-se de seguida os modelos que permitem obter estatísticas de cintilação a partir de parâmetros meteorológicos os quais poderão ser relevantes para os operadores. O desvio padrão de referência dos modelos para o cálculo das estatísticas depende do termo  $N_{wet}$  e por isso, nos modelos que se seguem será utilizado para esse parâmetro uma média mensal [12] recomendada dos meses cujas temperaturas são mais baixas (dezembro, janeiro e fevereiro) e dos meses cujas temperaturas são mais elevadas (junho, julho e agosto). Na Tabela 2-1 encontra-se a média mensal do  $N_{wet}$  recomendado.

Tabela 2-1: Média mensal do  $N_{wet}$  recomendado

Mês	$N_{wet}$
janeiro	47.44
fevereiro	48.00
março	50.74
abril	54.40
maio	62.50
junho	72.03
julho	75.83
agosto	76.22
setembro	72.80
outubro	67.51
novembro	56.95
dezembro	50.11

Para os meses de temperaturas baixas  $N_{wet} = 48.51$  e para os meses de temperaturas mais elevadas,  $N_{wet} = 74.70$ .

### 2.6.1. Modelo ITU P.618-13

O ITU tem uma série de recomendações que servem de referência ao cálculo de parâmetros de propagação e resultam da contribuição de vários investigadores ao longo dos anos. Pode, por isso, apresentar similaridades com outros modelos desenvolvidos por esses investigadores. Este modelo [12] é utilizado para prever a distribuição cumulativa da amplitude de cintilação troposférica para ângulos de elevação maiores que  $5^\circ$ , tendo sido testado para frequências entre 7 GHz e 14 GHz. Contudo o modelo é recomendado para frequências até aos 20 GHz.

O modelo baseia-se em médias mensais de temperatura e humidade. Uma vez que estas variam com a estação do ano, os *fades* de cintilação também vão variar consoante a estação. Os parâmetros necessários são:

$T$ : temperatura média mensal ( $^\circ\text{C}$ )

$H$ : humidade relativa média mensal (%)

$f$ : frequência,  $4 \text{ GHz} \leq f \leq 20 \text{ GHz}$  (GHz)

$\theta$ : ângulo de elevação,  $\theta \geq 5^\circ$

$D$ : diâmetro da antena (m)

$\eta$ : eficiência da abertura da antena (%)

O desvio padrão de referência da amplitude, que depende do termo  $N_{wet}$  é dado por:

$$\sigma_{ref} = 3.6 \cdot 10^{-3} + 10^{-4} N_{wet} \text{ (dB)} \quad (2.31)$$

O desvio padrão  $\sigma$  usado pelo modelo leva em conta a dependência da frequência, do fator de redução da antena e do ângulo de elevação sendo dado por:

$$\sigma = \sigma_{ref} f^{7/12} \cdot \frac{g(x)}{\sin^{1.2} \theta} \quad (2.32)$$

onde,  $g(x)$  é dado pela equação ((2.27) e, o comprimento do caminho turbulento,  $L$ , é dado por:

$$L = \frac{2h}{\sqrt{\sin^2 \theta + 2.35 \cdot 10^{-4}} + \sin \theta} \quad (2.33)$$

A razão entre o diâmetro efetivo da antena e o raio da zona de Fresnel é dado por:

$$x = 1.22 \cdot D_e^2 \cdot \left(\frac{f}{L}\right) \quad (2.34)$$

O *fade depth* é dado por:

$$A(p) = a(P) \cdot \sigma \quad (dB) \quad (2.35)$$

onde o fator  $a(P)$  para uma percentagem de tempo  $P$  entre  $0.01\% < P \leq 50\%$  é dado por:

$$a(P) = -0.061(\log P)^3 + 0.072(\log P)^2 - 1.71 \log P + 3.0 \quad (2.36)$$

A Figura 15 apresenta uma simulação do modelo ITU.

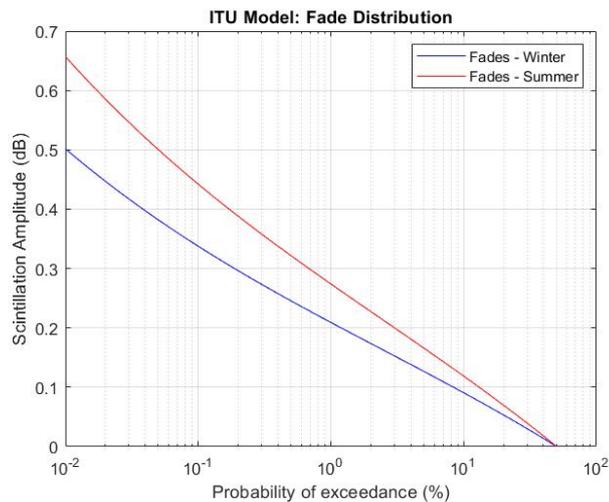


Figura 15: Modelo ITU - distribuição dos fades

## 2.6.2. Modelo Van de Kamp

*Van de Kamp* [5] assume que a intensidade da cintilação é fortemente relacionada com as nuvens cumulus e, portanto, considera que a camada turbulenta é uma camada fina que se encontra a uma altura  $h$  do recetor, sendo a distribuição obtida a de *Rice-Nakagami*. Esta distribuição vem comprovar a diferença que é observada entre a amplitude dos *fades* e dos *enhancements*. Numa distribuição a longo prazo a amplitude dos *fades* aumenta com o desvio padrão enquanto que os *enhancements* diminuem.

A distribuição dos *fades*  $y_f(P)$  e a distribuição dos *enhancements*  $y_e(P)$  são dadas por:

$$y_f(P) = \gamma(P) + \delta(P) \quad (2.37)$$

$$y_e(P) = \gamma(P) - \delta(P) \quad (2.38)$$

Para longo prazo as equações obtidas para a distribuição da amplitude do sinal ajustando à curva são [7][11]:

$$y(P) = -(0.0597 \log^3 P - 0.0835 \log^2 P - 1.258 \log P + 2.672)\sigma \quad (2.39)$$

$$\delta(P) = (0.100 \log^2 P - 0.375 \log P + 0.2997)\sigma^2 \quad (2.40)$$

Uma das vantagens deste modelo é a previsão teórica da assimetria verificada nas amplitudes.

Uma vez que o parâmetro  $N_{wet}$  não é um bom indicador para a turbulência das nuvens, foi considerado um novo parâmetro,  $W_{hc}$ , que corresponde à quantidade de água de “heavy clouds”. A quantidade de água que uma nuvem deste tipo contém é no mínimo cerca de  $0.70\text{kg/m}^2$ .

Assim, para a determinação do desvio padrão, foi adicionado um termo a longo prazo,  $Q$ , onde nele está incorporado o parâmetro  $W_{hc}$ .

$$\begin{aligned} \sigma &= \frac{\sqrt{G(x)f^{0.45}}}{\sin^{1.3} \theta} \cdot 0.98 \cdot 10^{-4}(N_{wet} + Q) & (2.41) \\ &= \frac{g(x)f^{\frac{0.45}{2}}}{\sin^{\frac{1.3}{2}} \theta} \cdot 0.98 \cdot 10^{-4}(N_{wet} + Q) \end{aligned}$$

$$Q = -39.2 + 56(W_{hc}) \quad (2.42)$$

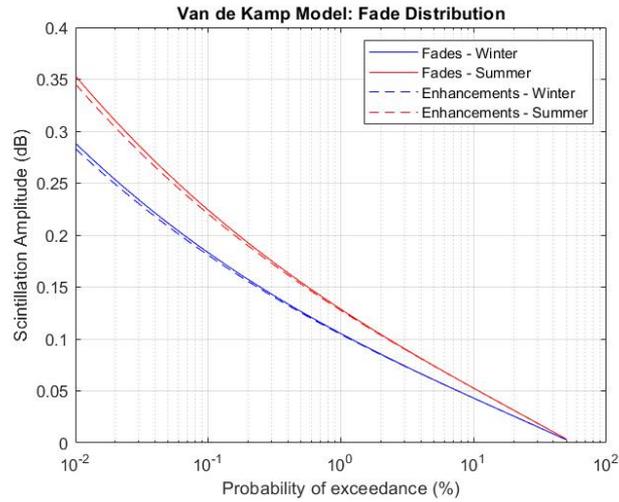


Figura 16: Van de Kamp – distribuição da amplitude

Segundo a Figura 16, que contém a simulação do modelo *Van de Kamp*, é possível observar que tanto os *fades* como os *enhancements* apresentam curvas da distribuição semelhantes.

### 2.6.3. Modelo Otung

No modelo de *Otung* [14] são dadas expressões para a distribuição cumulativa dos *fades* e *enhancements* anual e do pior mês e as amplitudes de cintilação pico a pico.

Relativamente ao desvio padrão este modelo é similar ao modelo de *ITU*, sendo que a diferença consiste no modo de obter o desvio padrão. Enquanto o *ITU* usa uma dependência empírica com o ângulo de elevação, *Otung* baseia-se em expressões teóricas.

O desvio padrão é dado por:

$$\sigma = \sigma_{ref} \sqrt{f^{\frac{7}{6}} G(x) / \sin^{\frac{11}{6}} \theta} = \sigma_{ref} \cdot f^{\frac{7}{12}} \cdot g(x) / \sin^{\frac{11}{12}} \theta \quad (2.43)$$

$G(x)$  é o fator de redução da antena e  $\sigma_{ref}$  o desvio padrão de referência.

$$\sigma_{ref} = 3.6 \cdot 10^{-3} + 1.03 \cdot 10^{-4} N_{wet} \quad (2.44)$$

e o termo  $N_{wet}$  é dado por:

$$N_{wet} = \frac{3.73 \cdot 10^{-5} e}{(T + 273)^2} \quad (2.45)$$

em que  $e$  é a pressão do vapor de água e  $T$  a temperatura média (°C) de um mês.

As equações da distribuição cumulativa anual dos *fades*  $\chi_{-a}$ , os *enhancements*  $\chi_{+a}$ , a amplitude pico a pico de cintilação  $\chi_{ppa}$ , e a intensidade de cintilação  $\sigma_{\chi a}$  excedidos de P% em que P se encontra entre  $0.01\% \leq P \leq 50\%$  são dados respetivamente por:

$$\chi_{-a}(P) = 3.6191 \exp \left[ -\frac{9.50142 \cdot 10^{-4}}{P} - (0.40454 + 0.00285 \cdot P) \ln(P) \right] \sigma \quad (2.46)$$

$$\chi_{+a}(P) = 3.1728 \exp[-0.0359654P - (0.272113 - 0.0048P) \ln P] \sigma \quad (2.47)$$

$$\chi_{ppa}(P) = 15.6912 \exp \left[ \left( \frac{2.25734 \cdot 10^{-5}}{P^2} \right) - 0.011558P - 0.216784 \ln P \right] \sigma \quad (2.48)$$

$$\sigma_{\chi a} = 2.847 \exp[-0.01827P - (0.345529 + 5.00745 \cdot 10^{-3}P) \ln P] \sigma \quad (2.49)$$

Para o pior mês, os valores da amplitude de cintilação excedidos de P% são dados pelas expressões que se seguem.

$$\chi_{-w}(P) = 6.8224 \exp[-10^{-4}(913.12/P + 1.8264P^2) - (0.023027/P^2 + 0.51664) \ln P] \sigma \quad (2.50)$$

$$\chi_{+w}(P) = 5.5499 \exp[-10^{-4}(946.849P + 4.4974P^2) + (0.023573P - 0.261135) \ln P] \sigma \quad (2.51)$$

$$\chi_{ppw}(P) = 21.5895 \exp \left[ \left( \frac{2.21698 \cdot 10^{-4}}{P^2} \right) - 0.0145353P - 0.204576 \ln P \right] \sigma \quad (2.52)$$

$$\sigma_{\chi w} = 4.9157 \exp \left[ 1.85218 \cdot \frac{10^{-4}}{P^2} - 0.0435448P - (0.26467 - 0.0078851P) \ln P \right] \sigma \quad (2.53)$$

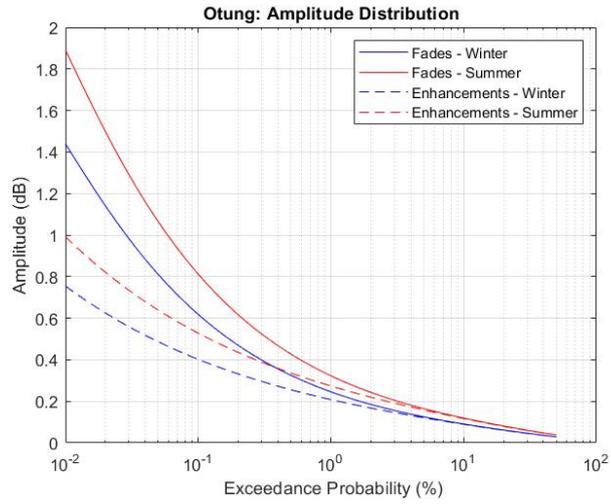


Figura 17: Modelo Otung – distribuição da amplitude

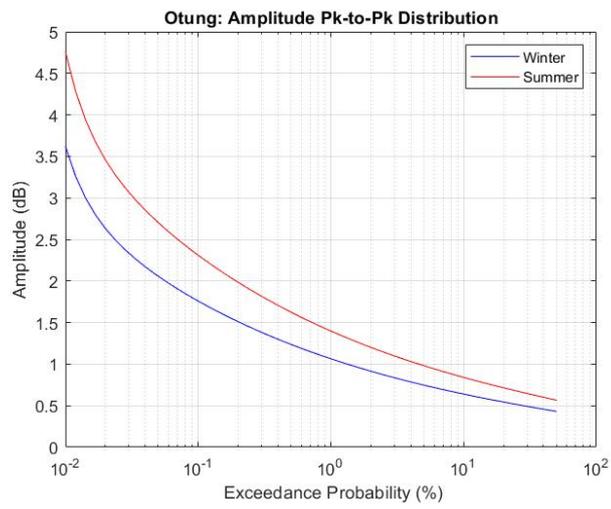


Figura 18: Modelo Otung – distribuição pico-a-pico da amplitude

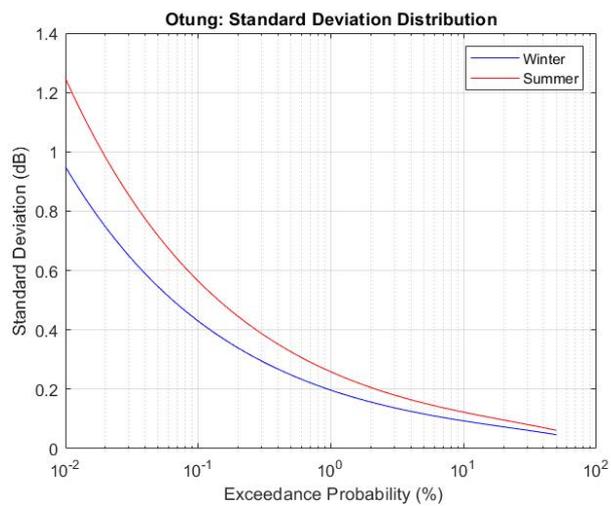


Figura 19: Modelo Otung – distribuição do desvio padrão

## 2.6.4. Modelo Karasawa

Segundo o modelo de *Karasawa*, o desvio padrão é dado por [5]:

$$\sigma = \sigma_{ref} \sqrt{\frac{f^{0.9} G(D_e)}{\sin \theta^{2.6}}} = \sigma_{ref} \cdot \frac{f^{\frac{0.9}{2}} g(D_e)}{\sin \theta^{\frac{2.6}{2}}} \quad (2.54)$$

em que

$$\sigma_{ref} = 3.42 \cdot 10^{-3} + 1.186 \cdot 10^{-4} \cdot N_{wet} \quad (2.55)$$

Por sua vez, o  $N_{wet}$  é dado por:

$$N_{wet} = \frac{22790 \cdot H \cdot e^{19.7 \cdot T / (T+273)}}{(T + 273)^2} \quad (2.56)$$

onde o parâmetro  $H$  corresponde à humidade relativa (%) e  $T$  (°C) à temperatura média de um mês.

O fator de redução  $G(D_e)$  é dado pela equação (2.30), o comprimento do caminho turbulento  $L$  é obtido segundo a equação (2.29) e  $x$  é dado pela equação (2.28).

A distribuição anual dos *enhancements*, excedido por uma percentagem  $P$  na gama  $0.01 \% < P \leq 50 \%$  é dada por:

$$y(P) = -(0.0597 \log^3 P - 0.0835 \log^2 P - 1.258 \log P + 2.672) \sigma \quad (2.57)$$

A distribuição anual dos *fades* é dada por:

$$y(P) = -(0.061 \log^3 P - 0.072 \log^2 P - 1.71 \log P + 3.0) \sigma \quad (2.58)$$

A Figura 20 apresenta o modelo *Karasawa*.

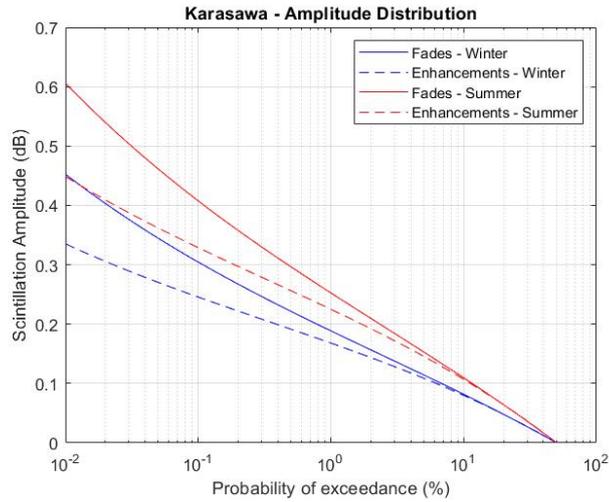


Figura 20: Modelo Karasawa -distribuição da amplitude

## 2.7. Comparação dos modelos de distribuição de amplitude

Os modelos *ITU*, *Karasawa*, *Van de Kamp* e *Otung* descritos anteriormente, na secção 2.6, apresentam diferentes dependências com a frequência e com o ângulo de elevação. A Tabela 2-2 contém o resumo desses parâmetros para cada modelo.

Tabela 2-2: Parâmetros dos modelos

Modelos	$f^n$ (Hz)	$(\sin \theta)^k$ (°)	$g$	$\sigma$ (dB)	$\sigma_{ref}$ (dB)	$h$ (m)
<i>ITU</i>	$f^{7/12} = f^{0.58}$	$(\sin \theta)^{1.2}$	0.845 5	0.0697	0.0085	1000
<i>Karasawa</i>	$f^{0.9/2} = f^{0.45}$	$(\sin \theta)^{2.6/2} = (\sin \theta)^{1.3}$	0.999 0	0.0629	0.0092	2000
<i>Van de Kamp</i>	$f^{0.45/2} = f^{0.45/2}$	$(\sin \theta)^{1.3/2} = (\sin \theta)^{0.65}$	0.845 5	0.0373	0.0116	1000
<i>Otung</i>	$f^{7/12} = f^{0.58}$	$(\sin \theta)^{11/12} = (\sin \theta)^{0.92}$	0.845 5	0.0679	0.0086	1000

O modelo *ITU* e o modelo *Karasawa* apresentam valores de dependência da frequência e de ângulo de elevação próximos. O modelo *Van de Kamp* é o modelo que apresenta maior dependência com os dois parâmetros e caracteriza-se pelas curvas semelhantes dos *fades* e dos *enhancements*. O modelo *Otung* apresenta a mesma dependência da frequência do modelo *ITU*, contudo menor valor para o ângulo de elevação. De notar que o modelo *Otung*, é o modelo que apresenta uma maior amplitude dos *fades* e dos *enhancements*.

## 2.8. Escalonamento de frequência

Um outro aspeto importante no estudo da cintilação será poder comparar os resultados entre duas estações distintas operando com diferentes frequências, ângulos de elevação e diâmetro da antena. Neste caso, em estudo encontram-se as frequências 39.4 GHz e 19.68 GHz.

Por forma a comparar as duas estações irá ser analisado o escalonamento da intensidade de cintilação.

As flutuações do sinal para curto prazo são descritas por uma distribuição em volta do seu nível médio e, portanto, para fazer uma comparação entre as duas frequências será usada a variância  $\sigma^2$ , visto que é o parâmetro que melhor descreve a variabilidade da amplitude de cintilação. O rácio de escalonamento de frequência consiste no rácio entre a variância nas duas frequências de sinais que se propagam no mesmo caminho e as medições realizadas num intervalo de tempo em que seja possível considerar que a turbulência é estacionária.

Sendo  $h$ , altura a que a turbulência se encontra, um parâmetro incerto e dado que a função depende desse mesmo parâmetro, a abordagem a adotar será considerar para a turbulência períodos na ordem de minutos de modo que esta possa ser considerada estatisticamente estacionária deixando de ter a dependência temporal que tornaria o procedimento mais complexo. O valor atribuído a  $h$  pelo modelo *ITU* [12] é cerca de 1000 m como foi referido. De notar que no caso prático as duas frequências não percorrem o mesmo caminho e, portanto, será de esperar que haja alguma descorrelação entre a variância nas duas frequências.

A relação entre a variância da cintilação a uma frequência  $f_1$  e a uma frequência  $f_2$  para o *slab model* ou o *exponencial model* é dado por [6]:

$$\frac{\sigma_1^2(\chi)}{\sigma_2^2(\chi)} \approx \left(\frac{f_1}{f_2}\right)^{7/6} \left(\frac{\sin \theta_2}{\sin \theta_1}\right)^{11/6} \frac{G(x1)}{G(x2)} \quad (2.59)$$

$$L \approx \frac{h}{\sin \theta} \quad (2.60)$$

onde  $\theta_1$  e  $\theta_2$  são os ângulos de elevação,  $h$  a altura da turbulência e  $L$  o comprimento do trajeto.

Aplicando os parâmetros da ligação para cada um dos *beacons* na equação (2.59) e para  $h = 1000 \text{ m}$  vem que:  $\frac{\sigma_Q(\chi)}{\sigma_{Ka}(\chi)} = 1.70$ .

A Figura 21 contém a representação gráfica do rácio entre o desvio padrão do *AlphaSat* e do *KaSat*, para valores de altura da turbulência entre 1000 m e 2000 m. Os valores são bastante semelhantes.

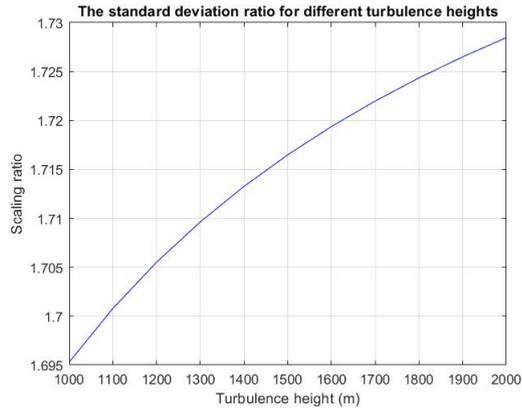


Figura 21: Rácio entre o desvio padrão para as frequências na banda Q e banda Ka

Considerando que a turbulência está concentrada numa camada estreita,  $\Delta L_1$  e  $\Delta L_2$ , a uma altura  $h$ , isto é, o denominado *thin layer model*, o escalonamento de frequência é dado por [2]:

$$\frac{\sigma_1^2(\chi)}{\sigma_2^2(\chi)} \approx \left(\frac{f_1}{f_2}\right)^{7/6} \left(\frac{L_2 \Delta L_2}{L_1 \Delta L_1}\right)^{11/6} \frac{G(x_1)}{G(x_2)} \quad (2.61)$$

## 3. Capítulo III: Base e Dados e Processamento da Cintilação

### Introdução

A secção 3.1, descreve o suporte experimental das campanhas de propagação e a caracterização dos parâmetros dos dois satélites que proporcionaram as experiências que aqui são alvo de estudo. Também é feita uma descrição da estação meteorológica e dos recetores utilizados. Na secção 3.3 será abordado o faseamento do pré-processamento e como os dados são armazenados. Por fim, será abordado o processamento das séries temporais de cintilação e nomeadamente como esta é extraída do nível de sinal, assim como a metodologia usada para extrair as estatísticas.

### 3.1. Experiências AlphaSat e KaSat

Dada a necessidade de conhecer as características do canal, por forma a garantir a qualidade e disponibilidade de serviços para altas frequências, têm sido realizadas longas campanhas experimentais. Nestas campanhas são adquiridos sinais contínuos provenientes de satélites. A agência espacial europeia, ESA, tem tido um papel fundamental nas campanhas de propagação, visto que fornece suporte financeiro sob a forma de projetos e recursos, como os *payloads* para os satélites.

O Instituto de Telecomunicações de Aveiro, IT-Aveiro, encontra-se envolvido num projeto da ESA, que engloba a caracterização do canal de propagação na Europa. Para além do IT-Aveiro, também estão associados ao projeto outros investigadores. Os parâmetros da cintilação têm variações sazonais pelo que é importante modelar com os parâmetros meteorológicos locais. Para isso, as medições dos fenómenos meteorológicos são feitas com recurso à estação meteorológica que se encontra instalada na estação IT-Aveiro, situada nas coordenadas da Tabela 3-1.

Tabela 3-1 Coordenadas geográficas de Aveiro

Coordenadas geográficas		
Latitude	Longitude	Altitude
40.63°N	-8.66°W	18m

Este projeto envolve a monitorização do sinal emitido pelo satélite geoestacionário, *KaSat*, na banda Ka, a uma frequência de 19.680 GHz. A antena encontra-se no topo do edifício de Departamento de Eletrónica, Telecomunicações e Informática (DETI).

O outro sinal recebido provém do satélite geoestacionário *AlphaSat*, na banda *Q*, a 39.4 GHz. A antena encontra-se num gabinete do departamento DETI, junto a uma janela. Sob esta condição é possível, para além de atrasar a degradação dos componentes de hardware e otimizar a manutenção, controlar a temperatura do escritório de modo a minimizar a variação dos ganhos do recetor ou, pelo menos, diminuir as amplitudes de excursão das temperaturas. Mais características encontram-se na Tabela 3-2.

Tabela 3-2 Características do satélite *KaSat* e *AlphaSat* e parâmetros da ligação

Parâmetros	Satélite <i>KaSat</i>	Satélite <i>AlphaSat</i>
Longitude	9.0°E	24.86°E
Frequência	19.680 GHz	39.4 GHz
Elevação	39.63°	31.88°
Azimute	153.95°	134.6°
Title Angle	-19.47°	-12.3°
Diâmetro da antena	1.5m	0.62m
CNR	56 dBHz	56 dBHz

A estação meteorológica, instalada também no telhado do DETI, é composta por dois pluviómetros, um de conta-gotas que tem uma resolução, 0.3 mm/h e um de balde com menor resolução: 6 mm/h. Com estes pluviómetros consegue-se obter taxa de precipitação (*rain rate*) (*mm/h*). Também são tiradas medidas da velocidade do vento, humidade relativa, temperatura e pressão atmosférica sendo estes últimos três parâmetros utilizados no estudo abordado nesta dissertação.

### 3.2. Campanha experimental

Os dados de atenuação, despolarização e meteorológicos são derivados por um software de pré-processamento para que as séries temporais dos dados em bruto sejam analisadas, a sua qualidade classificada e armazenadas para posteriormente proceder ao processamento estatístico.

O pré-processamento dos dados é realizado em períodos de 1 dia para melhor considerar as variações sistemáticas que impactam as séries recolhidas. Contudo, de modo a garantir a qualidade da obtenção de níveis de referência necessários nas transições entre dias, são carregados três dias: o dia anterior, o dia alvo e o dia seguinte. Inicialmente é feito o carregamento da informação em bruto, seguindo-se uma inspeção dos dados para que, caso seja possível, efetuar pequenas reparações ou na sua impossibilidade, desqualificá-los. Nesta fase, utilizam-se flags para classificar os dados nas categorias válido, inválido, reparado e interpolado recorrendo a uma codificação em valores inteiros, como se vê na Tabela 3 3

No primeiro caso, válido, significa que não houve qualquer alteração nos dados na fase de pré-processamento e, portanto, estão válidos para uso. Caso se verifique a *flag* inválido, os dados apresentam inconsistências, não sendo usados para a análise estatística. No caso dos dados reparados, estes sofreram alteração no pré-processamento, mas podem ser utilizados, caso pretendido. Os dados interpolados também podem ser utilizados.

Tabela 3-3: Classificação das flags

Flags	
Válido	0
Inválido	1
Reparado	4
Interpolado	5

### 3.3. Organização dos dados pré-processados

Os dados pré-processados estão organizados no *MatLab* por estruturas (struct) designadas por: *KaSat*, *AlphaSat* e *Meteo*. As estruturas dos dados estão representadas respetivamente na Tabela 3-4 e na Tabela 3-5.

As estruturas *KaSat* e *AlphaSat* referem-se aos dois sinais que são amostrados a 8 S/s e 1S/s. A série de marcos temporais, TS, é guardada no formato de *datenums*, isto é, números de tempo real, que representam a diferença entre o tempo de aquisição e a data 0/1/0000. A estrutura *Meteo* contém os dados meteorológicos que são guardados a 1S/s. Cada canal tem associado a série temporal TS e a série de *flags*, FLAG. Os dados são posteriormente armazenados em ficheiros \*.mat com o formato ProAAAAMMDD, em que AAAA representa o ano, MM o mês e, DD o dia.

Os dados do *KaSat* contêm dados relativos à amplitude do sinal recebido na polarização ortogonal (crosspolar discrimination) que não são utilizados nesta dissertação.

Tabela 3-4: Estrutura dos dados *KaSat* e *AlphaSat*

	<i>KaSat</i>	<i>AlphaSat</i>
TimeStamps1	-	-
NSD1	TS	TS
	FLAG	FLAG
CPA1	TS	TS
	FLAG	FLAG
TimeStamps8	-	-
CPA8	TS	TS
	FLAG	FLAG
XPD	In	-
	Qu	-
	FLAG	-

Tabela 3-5: Estrutura dos dados Meteo

Meteo	TimeStamps	-
	Hum	TS
		FLAG
	Temp	TS
		FLAG
	WS	TS
		FLAG
	DropCounter	Counts
		FLAG
		RainRate
		IntegrationTime
	TippingBucket	Counts
		FLAG
		RainRate
		IntegrationTime
	Press	TS
FLAG		
WD	TS	
	FLAG	

## Processamento dos dados de cintilação

Este trabalho aborda os dados recolhidos nos últimos 5 anos em que cada ano de dados consecutivos começa no mês de abril. Foi neste mês que se iniciou a campanha de medições com o satélite *AlphaSat* e, portanto, teremos duas bases de dados concorrentes.

### Extração das séries de cintilação

Com o objetivo de fazer uma análise estatística de cintilação é necessário extrair a cintilação da atenuação *copolar*. A atenuação *copolar* que é guardada a 8 S/s para além de conter a cintilação também contém a atenuação devido aos fenómenos chuva e nuvens.

Para estimar a atenuação é usado um filtro passa baixo, tipicamente o raised cosine- $\cos^2$ . A extração da cintilação é feita subtraindo à série temporal a atenuação que resulta do filtro passa baixo. A atenuação é posteriormente decimada para 1S/s e guardada para classificação dos dados de cintilação [2].

Para a extração da cintilação apenas são considerados os períodos de tempo seco. Para isso é aplicado um patamar da atenuação para que, quando atingido esse valor, as amostras de cintilação sejam substituídas por NaN de forma a serem ignoradas na análise.

### Metodologia usada para extração das estatísticas

Por forma a analisar a cintilação foi utilizada a função densidade cumulativa complementar, CCDF, do desvio padrão de cintilação.

Para uma análise detalhada do seu comportamento pode ser importante observar várias estatísticas nomeadamente mensal, média mensal, anual, ou total de 5 anos. Assim, foram carregados os dados de cada mês e guardados os histogramas num cell array que, para além das suas vantagens em ter células com diferentes tipos de dados, irá tornar simples a sua utilização para a obtenção do tipo de estatística que se pretender. O cell array contém 5 linhas correspondentes a cada ano e 13 colunas em que as 12 primeiras correspondem aos meses do ano, desde abril a março, e a última coluna que contém a soma anual total. De seguida, e já com o cell array preenchido, é feita a soma cumulativa.

Partiu-se do mesmo princípio para a previsão da amplitude de cintilação a longo prazo que se encontra dividida em *fades* e *enhancements*. Relativamente aos modelos de previsão existentes e, uma vez que a diferença entre cada modelo se restringe ao valor de  $N_{wet}$  experimental inserido, para cada tipo de estatística anteriormente utilizada, foi utilizado o respetivo valor estatístico do termo  $N_{wet}$ , por forma a comparar a curva do modelo de previsão com a curva dos respetivos dados experimentais.

Para a obtenção dos termos  $N_{wet}$  foi criada uma estrutura (struct), com 5 linhas e 12 colunas, que tal como no caso anterior correspondem respetivamente aos anos e aos meses de dados. A estrutura contém um parâmetro soma com as séries de marcos temporais, TS, do termo  $N_{wet}$  válidas e o parâmetro nsamples que contém o número de amostras consideradas.



## 4. Capítulo IV: Análise da Base de Dados

Neste capítulo é feita uma análise da base de dados disponível. Na secção 4.1 é feita uma análise da cintilação às duas frequências. Na secção 4.2 é feita uma avaliação dos modelos disponíveis e comparação dos resultados com os dados experimentais de Aveiro. Na secção 4.3 é analisado o escalonamento da variância (ou desvio padrão). Na secção 4.4 é avaliado e desenvolvido um modelo empírico e, na última secção, 4.5, é abordada a variabilidade horária anual e mensal do desvio padrão de cintilação.

### 4.1. Função densidade cumulativa complementar-CCDF- do desvio padrão de cintilação

As figuras que se seguem apresentam a função densidade cumulativa complementar, CCDF, do desvio padrão de cintilação para o *beacon AlphaSat*.

As Figura 22, Figura 23 e Figura 24 contêm a CCDF dos 12 meses de cada ano. É possível observar que, de uma forma geral, os meses que apresentam maior intensidade de cintilação são os meses que se aproximam da época de verão, como o mês de junho. Tal vai de encontro com o esperado, pois meses como este são quentes e húmidos (em termos de humidade absoluta), o que faz com que o valor do índice de refração seja maior e, por sua vez que as amplitudes de cintilação resultantes da turbulência sejam maiores.

Em relação aos meses que apresentam menor valor de intensidade de cintilação vê-se que estes seguem um padrão que se caracteriza por apresentar valores de temperaturas mais baixos, como o caso dos meses de inverno.

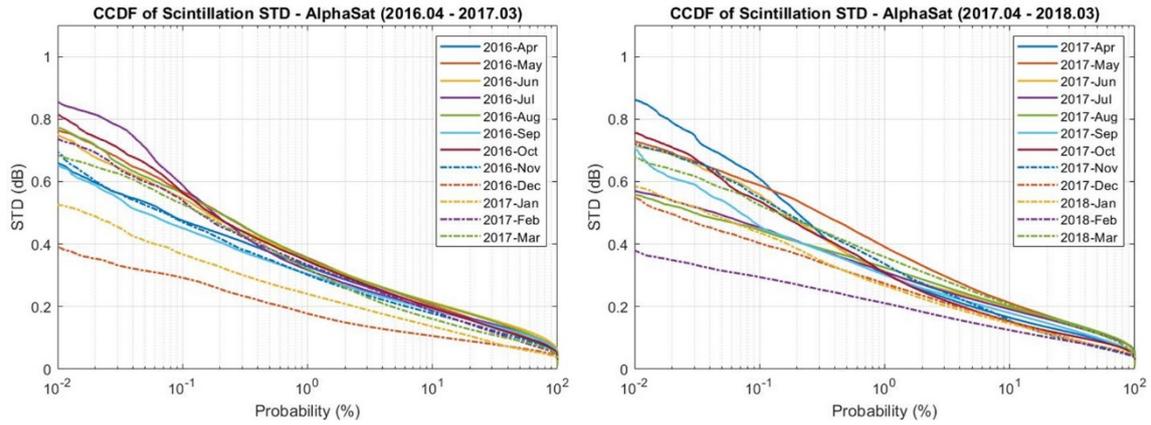


Figura 22: CCDF mensal do desvio padrão de cintilação entre 2016.04 a 2017.03 (esquerda) e 2017.04 a 2018.03 (direita)

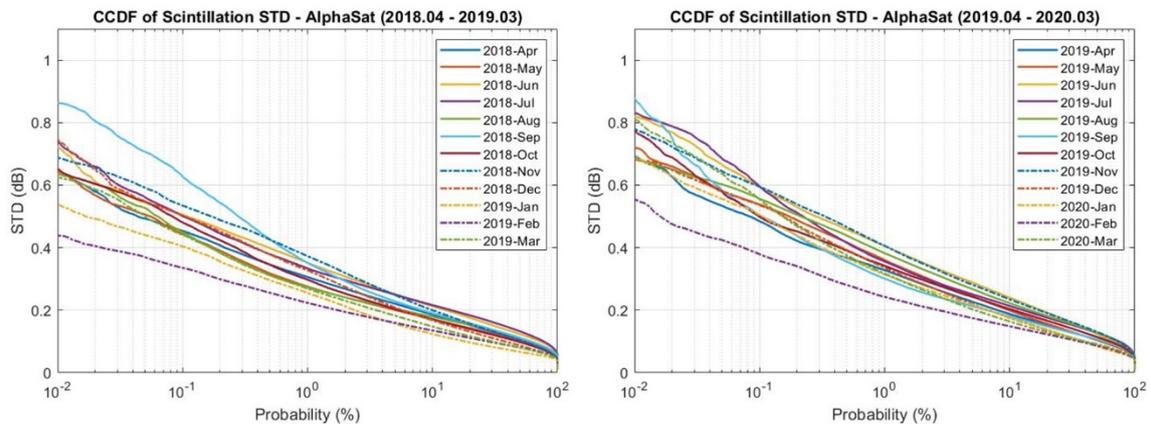


Figura 23: CCDF mensal do desvio padrão de cintilação entre 2018.04 a 2019.03 (esquerda) e 2019.04 a 2020.03 (direita)

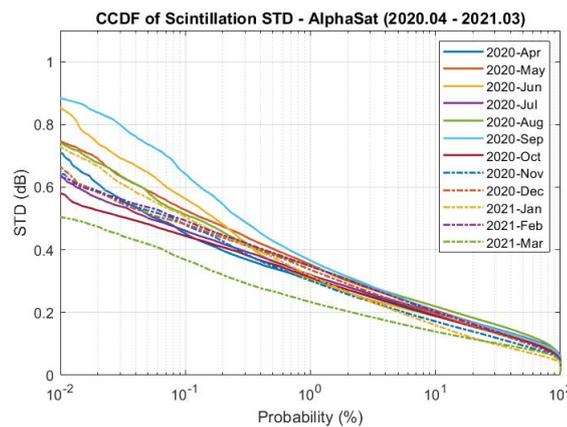


Figura 24: CCDF mensal do desvio padrão de cintilação entre 2020.04 a 2021.03

Também foi obtida a CCDF do desvio padrão de cintilação anual, Figura 25. Observa-se que no ano entre 2019 e 2020 o valor de intensidade de cintilação foi o maior, contudo os valores anuais são muito semelhantes.

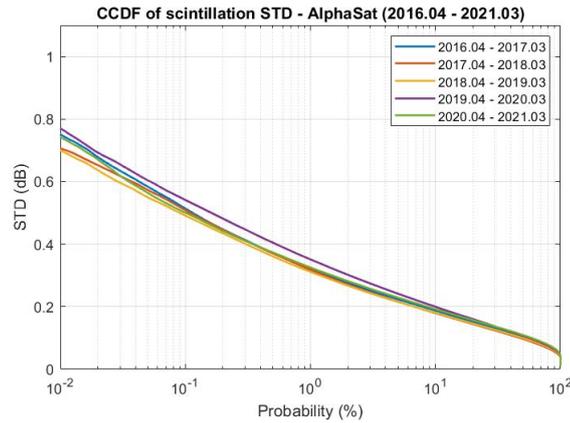


Figura 25: CCDF anual do desvio padrão de cintilação

A CCDF de cada mês para os 5 anos também foi obtida. De todos os meses, setembro foi o mês em que se observou maior valor de intensidade de cintilação nos anos 2018 e 2020. Em comparação, o mês em que se verificou menor valor de intensidade de cintilação foi dezembro. Frequentemente o mês de fevereiro também exibiu mínima intensidade de cintilação.

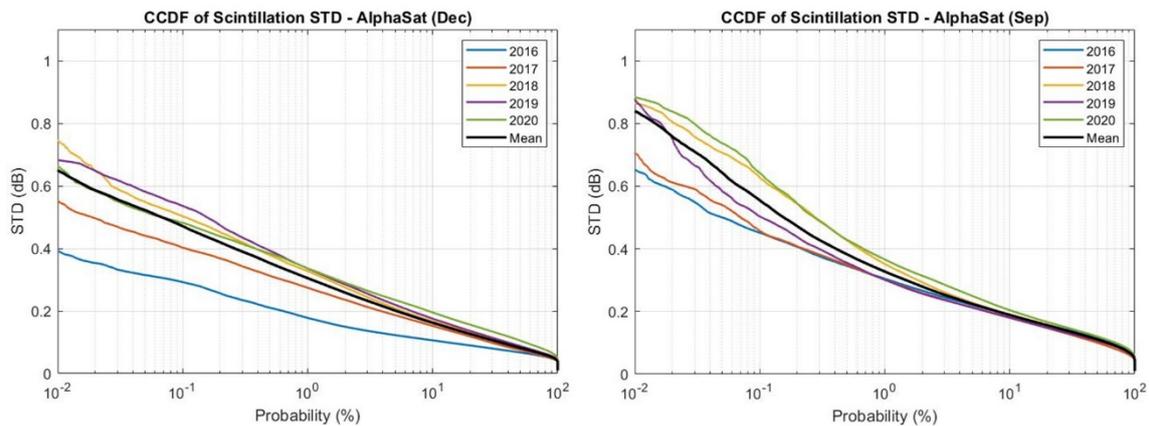


Figura 26: CCDF do desvio padrão de cintilação do mês de dezembro (esquerda) e do mês de setembro (direita)

Estas CCDFs foram obtidas para o *beacon AlphaSat*, porém será de esperar que o *beacon KaSat* tenha menores valores de amplitude de cintilação. Como já visto anteriormente, o *beacon KaSat* apresenta um maior fator de redução em relação ao *beacon AlphaSat*, Figura 14, além da frequência ser mais baixa e o ângulo de elevação ser superior.

Seguem-se figuras do *beacon KaSat* para termo de comparação com as figuras anteriores referente ao *beacon AlphaSat*.

As Figura 27, Figura 28 e Figura 29 contêm a CCDF dos 12 meses de cada ano do *beacon KaSat*. De modo geral, observa-se que os meses que apresentam maior intensidade de cintilação são também os meses que se aproximam da época de verão, como o caso de setembro. Os meses que apresentam menor valor de cintilação são geralmente os meses de inverno. Tal como dito anteriormente, é visível um menor valor de amplitude de cintilação.

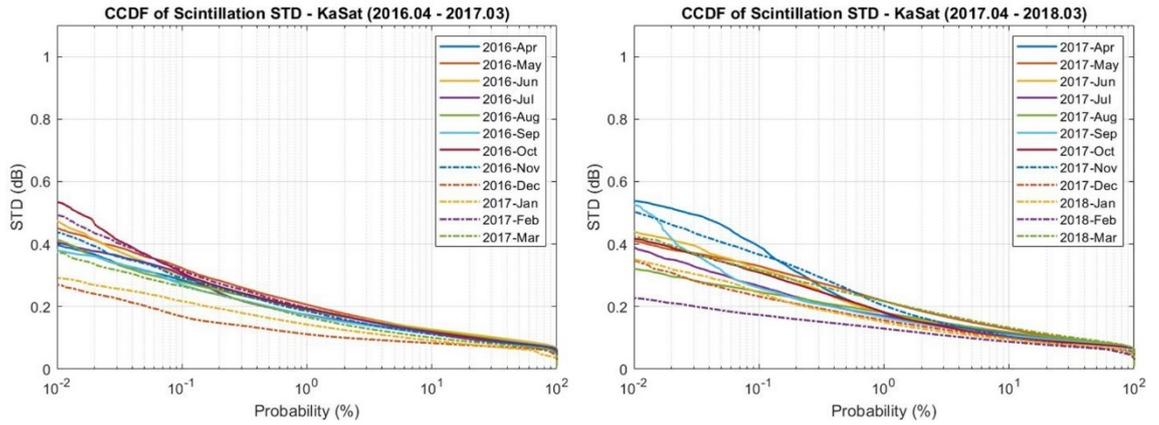


Figura 27: CCDF mensal do desvio padrão de cintilação entre 2016.04 a 2017.03 (esquerda) e 2017.04 a 2018.03 (direita)

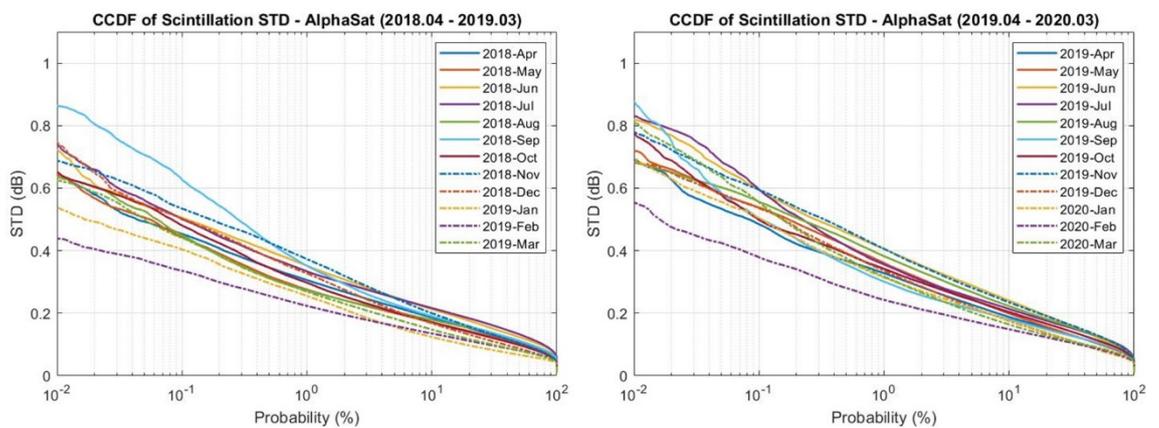


Figura 28: CCDF mensal do desvio padrão de cintilação entre 2018.04 a 2019.03 (esquerda) e 2019.04 a 2020.03 (direita)

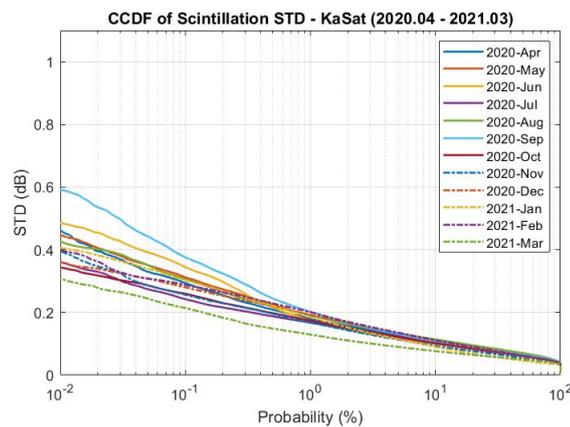


Figura 29: CCDF mensal do desvio padrão de cintilação entre 2020.04 a 2021.03

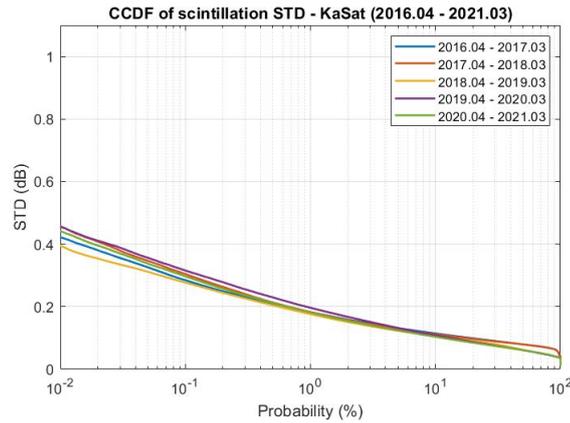


Figura 30: CCDF anual do desvio padrão de cintilação do beacon KaSat

A CCDF de um mesmo mês para cada um dos cinco anos foi obtida e encontra-se representada na Figura 31 para dois meses. Setembro foi o mês em que se observou, de modo geral, maior valor de intensidade de cintilação e o mês de dezembro assim como o mês de fevereiro, apresentaram menores valores de intensidade de cintilação.

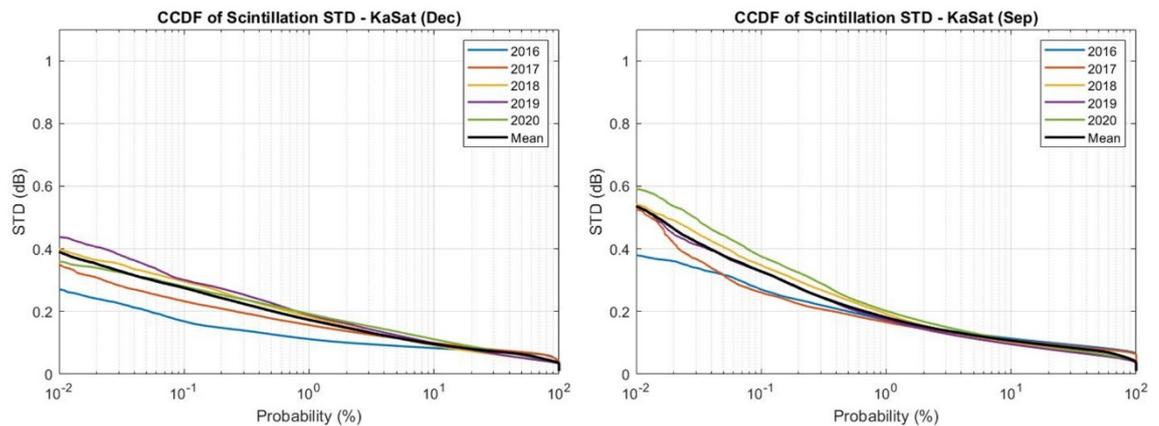


Figura 31: CCDF do desvio padrão de cintilação do mês de Dezembro (esquerda) e do mês de Setembro (direita)

## 4.2. Avaliação dos modelos

Como já foi mencionado na secção 2.6, para obter a amplitude de cintilação a longo prazo é necessário recorrer-se à previsão do desvio padrão através dos modelos que têm vindo a ser testados, como o caso do modelo de cintilação *ITU*, *Van de Kamp*, *Otung* e *Karasawa*. O modelo de *Van de Kamp* distingue-se dos outros modelos pelo facto de adicionar um novo parâmetro,  $W_{hc}$ , que considera o efeito das nuvens *cumulus* na cintilação. Neste caso, o valor atribuído a esse parâmetro foi de  $W_{hc} = 0.94 \text{ (kg/m}^2\text{)}$  [2].

Para um  $N_{wet} = 41.95$ , correspondente aos meses de dezembro, janeiro e fevereiro, os parâmetros dos modelos são os constantes da tabela seguinte.

Tabela 4-1: Parâmetros dos modelos de cintilação – banda Q

Parâmetros		G(x)	$\sigma_{ref}$	$\sigma$
Banda Q	ITU	0.9600	0.0078	0.1372
	Otung	0.9345	0.0079	0.1172
	Van de Kamp	0.9345	0.0079	0.1172
	Karasawa	0.9990	0.0084	0.1005
Banda Ka	ITU	0.8455	0.0078	0.0643
	Otung	0.8455	0.0079	0.0625
	Van de Kamp	0.8455	0.0109	0.0352
	Karasawa	0.9990	0.0084	0.0575

Um dos parâmetros de entrada dos modelos é o termo  $N_{wet}$  e, por isso, a Tabela 4-2 apresenta as estimativas mensais e anuais obtidas a partir dos dados experimentais. Como se pode observar o termo  $N_{wet}$  apresenta variações sazonais, sendo que os meses que de forma geral apresentam menor valor são os meses com temperaturas mais baixas, como dezembro, janeiro e fevereiro. Os valores mais elevados ocorrem nos meses com temperaturas mais elevadas, como junho, julho e agosto. Também é possível verificar que o mês de julho apresenta o valor mensal mais elevado.

Tabela 4-2: Média mensal do  $N_{wet}$

$N_{wet}$ mensal	2016.04 – 2017.03	2017.04 – 2018.03	2018.04 – 2019.03	2019.04 – 2020.03	2020.04 – 2021.03	Média mensal
abril	53.96	44.61	49.66	50.36	54.07	50.55
maio	59.71	62.04	54.72	50.55	61.84	57.77
junho	69.36	73.31	66.97	61.84	64.48	67.19
julho	67.12	68.07	75.53	75.55	65.45	70.34
agosto	67.09	66.81	70.60	71.48	68.53	68.92
setembro	70.72	62.79	70.36	57.10	58.54	63.90
outubro	65.83	49.41	44.94	60.51	54.26	54.99
novembro	50.45	41.61	49.56	54.28	49.14	49.01
dezembro	44.95	40.01	47.04	45.38	43.48	44.17
janeiro	38.41	41.80	38.07	40.52	39.08	39.57
fevereiro	47.14	34.08	36.15	48.28	44.68	42.11
março	48.03	41.91	38.50	46.15	35.45	42.01
<b>Média</b>	56.91	52.33	53.59	55.20	53.19	

A temperatura e a humidade relativa mensal e anual encontram-se respetivamente na Tabela 4-3 e na Tabela 4-4.

Tabela 4-3: Média mensal da temperatura ambiente

Temperatura mensal	2016.04 – 2017.03	2017.04 – 2018.03	2018.04 – 2019.03	2019.04 – 2020.03	2020.04 – 2021.03	Média mensal
abril	13.12	16.37	13.29	13.40	14.17	14.06
maio	15.41	17.61	15.37	17.16	18.08	16.73
junho	17.94	19.00	17.29	16.85	17.52	17.72
julho	19.44	18.73	19.37	19.16	19.83	19.31
agosto	20.14	18.70	19.71	18.98	19.04	19.31
setembro	18.17	16.51	18.90	18.88	19.29	18.35
outubro	17.43	17.51	16.98	16.20	15.31	16.68
novembro	13.37	12.98	13.16	13.15	14.63	13.46
dezembro	11.88	10.88	12.15	12.13	11.33	11.68
janeiro	9.92	10.40	9.95	10.83	9.02	10.02
fevereiro	12.28	10.12	12.08	12.80	13.03	12.07
março	13.00	11.45	13.69	12.35	13.67	12.83
<b>Média</b>	15.18	15.05	15.18	15.17	15.39	

Tabela 4-4: Média mensal da humidade relativa

Humidade mensal	2016.04 – 2017.03	2017.04 – 2018.03	2018.04 – 2019.03	2019.04 – 2020.03	2020.04 – 2021.03	Média mensal
abril	78.56	56.45	72.74	72.56	74.86	71.07
maio	77.39	71.29	70.89	62.15	70.44	70.43
junho	77.26	76.99	78.05	73.14	73.58	75.81
julho	71.09	73.37	77.64	78.61	68.10	73.76
agosto	69.57	72.55	73.78	75.61	72.30	72.78
setembro	78.29	76.16	76.14	63.57	63.27	71.49
outubro	75.99	60.30	54.87	74.16	70.62	67.18
novembro	72.61	61.38	73.00	77.57	66.22	70.16
dezembro	70.86	65.19	73.00	69.92	69.30	69.65
janeiro	66.06	71.40	67.18	67.00	68.98	68.13
fevereiro	73.00	58.75	58.95	72.74	66.82	66.10
março	72.22	67.05	57.22	70.62	52.81	63.99
<b>Média</b>	73.55	67.66	70.66	69.48	71.46	

A Figura 32 apresenta graficamente a variação mensal da humidade relativa e da temperatura. É possível observar que a humidade relativa tende a não variar muito ao longo dos meses, contudo o seu valor máximo ocorre para o mês de junho e o valor mínimo ocorre para o mês de março. Em relação à temperatura ambiente observa-se que para os meses de verão como julho, agosto e setembro, a temperatura apresenta os seus valores máximos.

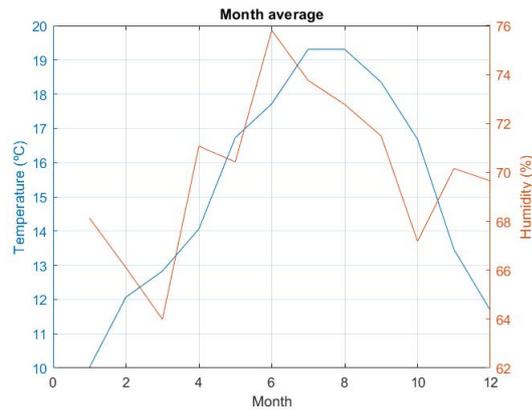


Figura 32: Média mensal da temperatura ambiente e da humidade relativa

### Comparação do termo experimental $N_{wet}$ com base de dados

De seguida e, por forma a avaliar e comparar os dados obtidos para o termo  $N_{wet}$ , procedeu-se a uma comparação entre os valores obtidos experimentalmente e os correspondentes valores recomendados que foram obtidos através dos mapas digitais fornecidos em [10].

A Figura 33 contém a variação mensal do  $N_{wet}$  recomendada resultante de uma base de dados de 36 anos (esquerda) e a variação mensal correspondente aos 5 anos de dados obtidos (direita). A Figura 34 contém a variação anual recomendada e a variação anual correspondente aos dados de Aveiro.

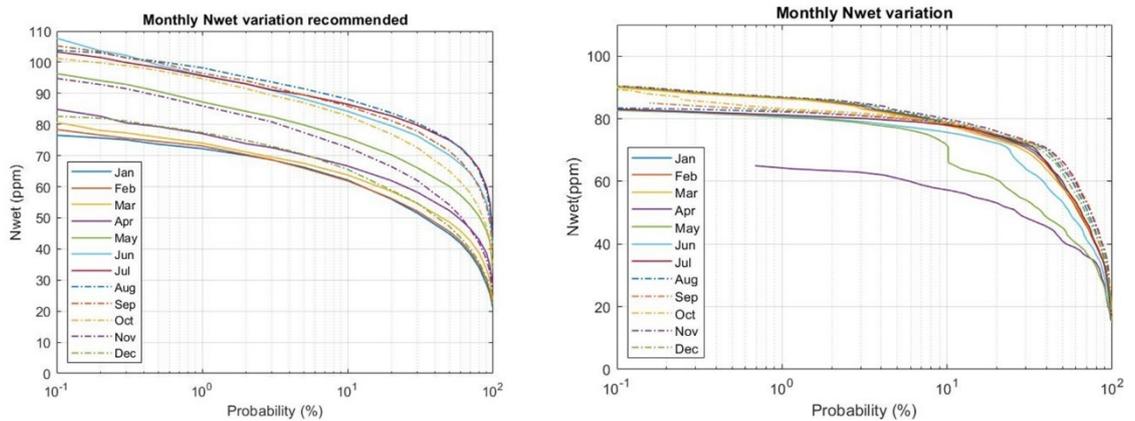


Figura 33: Variação mensal do  $N_{wet}$

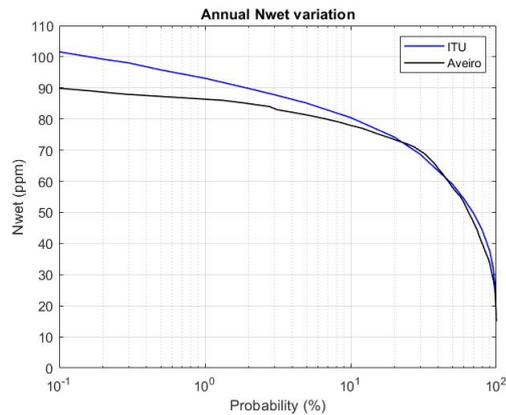


Figura 34: Variação anual do  $N_{wet}$

Uma vez que a diferença entre o número de anos de tratamento de dados recomendados, 36 anos, é muito superior aos dados disponíveis de Aveiro, 5 anos, seria de esperar que a sua gama de valores fosse maior, uma vez que engloba casos extremos de valores do termo  $N_{wet}$ . No entanto, a gama de valores obtidos encontra-se dentro do espectável.

Os dados de Aveiro possuem uma elevada disponibilidade temporal, porém, na Figura 33 (direita), relativamente à variação mensal correspondente aos 5 anos de dados obtidos, observa-se que o mês de abril se desvia dos restantes por razões desconhecidas.

Para a comparação dos modelos foram considerados dois valores de  $N_{wet}$ , com base nas médias mensais (5 anos) dos dados obtidos na Tabela 4-2. Para os meses de temperaturas baixas (dezembro, janeiro e fevereiro),  $N_{wet} = 41.95$  e para os meses de temperaturas mais elevadas (junho, julho e agosto),  $N_{wet} = 68.83$ .

Seguem-se as Figura 35 e Figura 36 que contêm respetivamente os modelos ITU, Van de Kamp, Otung e Karasawa para a previsão dos fades e os modelos Van de Kamp, Otung e Karasawa para a previsão dos enhancements referentes ao beacon AlphaSat.

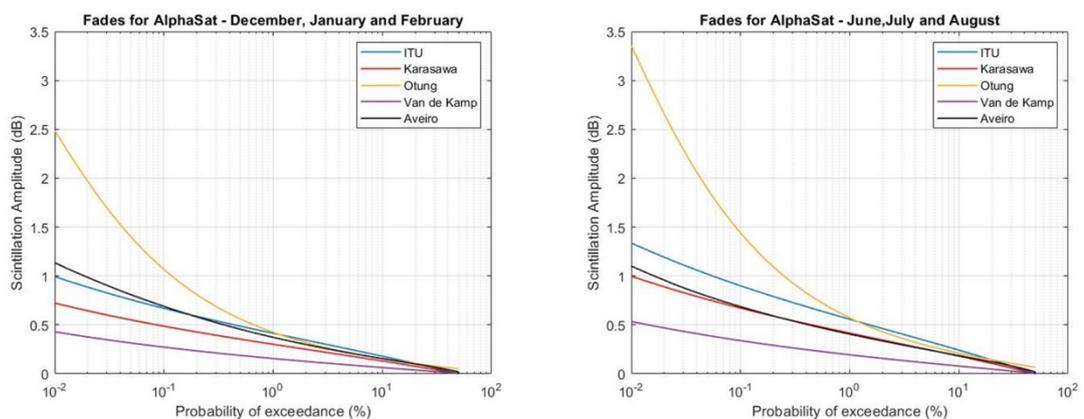


Figura 35: Fades – AlphaSat: meses de inverno (esquerda) e de verão (direita)

Na Figura 35 é possível observar os fades para o AlphaSat correspondente aos meses de dezembro, janeiro e fevereiro (à esquerda) e para os meses de junho, julho e agosto (à direita). Comparando os modelos com os dados de Aveiro, verifica-se que em ambos os casos, os

modelos *ITU* e *Karasawa* são os que mais se aproximam dos dados experimentais sendo a previsão dos mesmos aceitável. Tal como visto em 2.7, o modelo *ITU* e o modelo *Karasawa* têm similaridades tanto na dependência com a frequência como com o ângulo de elevação. Também é possível observar que o modelo de *Otung* e o modelo de *Van de Kamp* não são adequados para prever os *fades* dos dados de Aveiro.

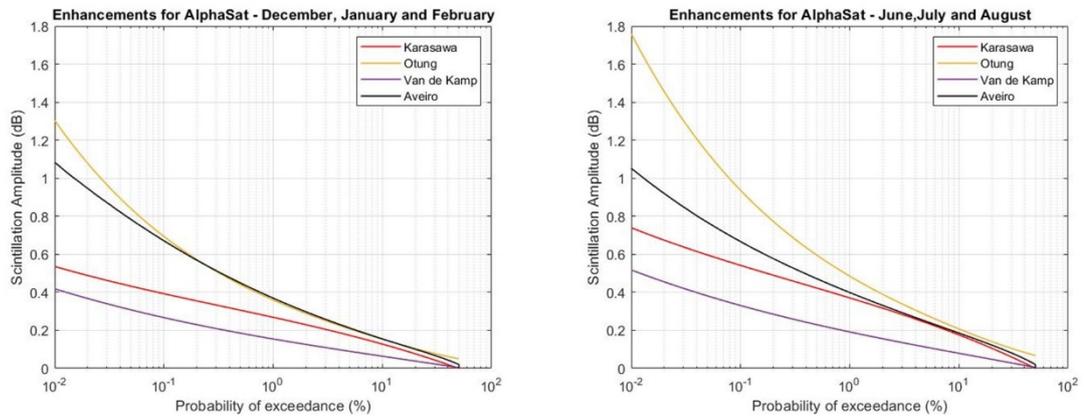


Figura 36: Enhancements - AlphaSat: meses de inverno (esquerda) e de verão (direita)

Observando a Figura 36, verifica-se que o modelo *Van de Kamp* também não é adequado para a previsão dos *enhancements*, contudo este peca por defeito para todas as gamas. O modelo *Otung*, assim como o modelo *Karasawa* descrevem razoavelmente os dados de Aveiro para baixas amplitudes, porém afastam-se para as amplitudes mais elevadas. Por isso, não são adequados para prever os *enhancements* dos dados de Aveiro.

Seguindo a metodologia utilizada para o *beacon AlphaSat*, foram comparados os modelos disponíveis com os dados de Aveiro para o *beacon KaSat*.

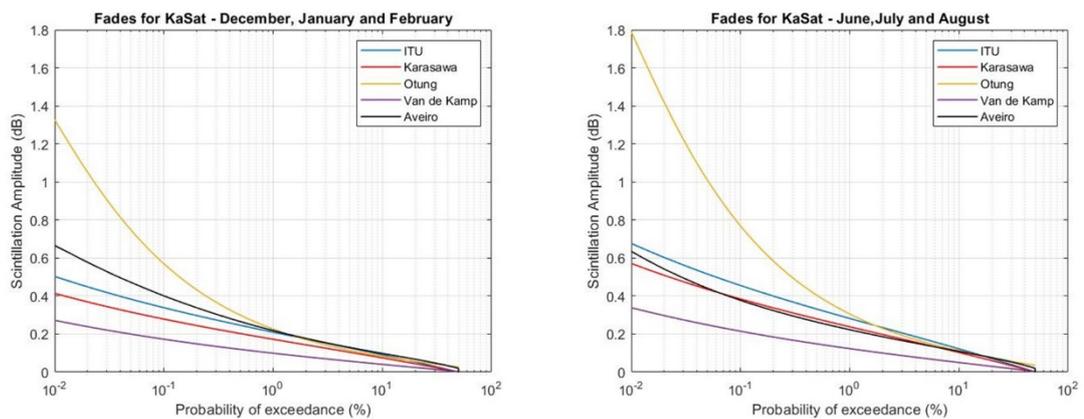


Figura 37: Fades – KaSat: meses de inverno (esquerda) e de verão (direita)

Observa-se da Figura 37 que a análise feita relativa aos *fades* do *beacon AlphaSat* (constantes da Figura 35) se mantém para o *beacon KaSat*, o que é espectável visto que a principal diferença entre ambos os *beacons* é a diminuição da amplitude de cintilação.

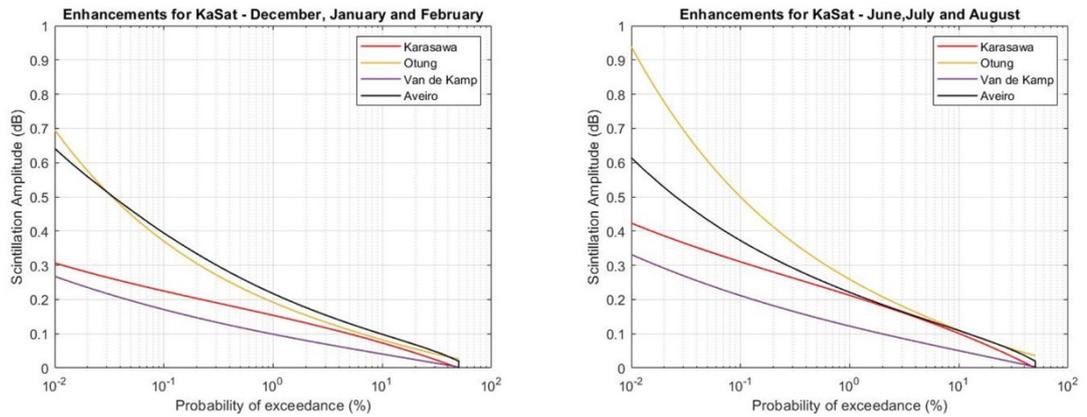


Figura 38: Enhancements – KaSat: meses de inverno (esquerda) e meses de verão (direita)

A análise para os *enhancements* do *beacon AlphaSat* revela os mesmos resultados da análise análoga respeitante ao *beacon KaSat*.

### Previsão anual

De modo a avaliar o comportamento dos modelos mais promissores no longo prazo, seguem-se as previsões anuais do modelo *ITU* e do modelo *Karasawa* dos *fades* para o *beacon AlphaSat*.

O valor atribuído ao parâmetro  $N_{wet}$  para os vários anos encontra-se na Tabela 4-5.

Tabela 4-5: Variação anual do  $N_{wet}$

Ano	$N_{wet}$
2016.04 – 2017.03	56.91
2017.04 – 2018.03	52.33
2018.04 – 2019.03	53.59
2019.04 – 2020.03	55.20
2020.04 – 2021.03	53.19

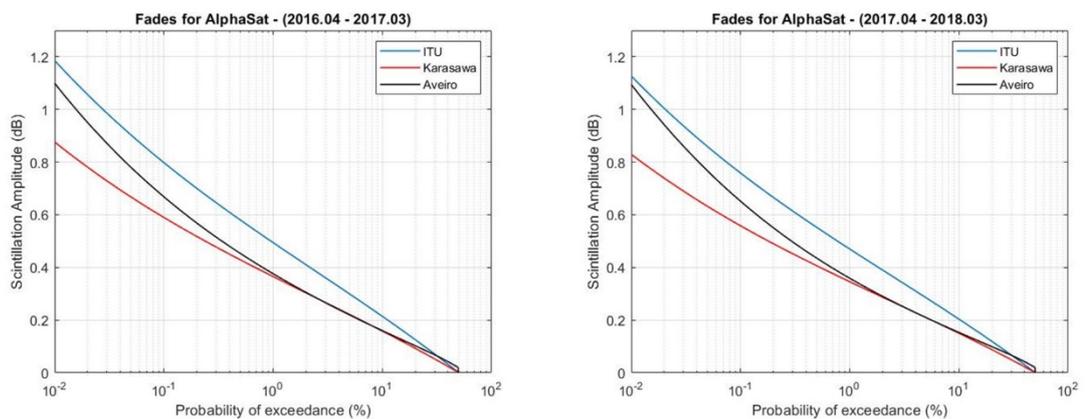


Figura 39: Fades – AlphaSat: 2016.04-2017.03 (esquerda) e 2017.04-2018.03 (direita)

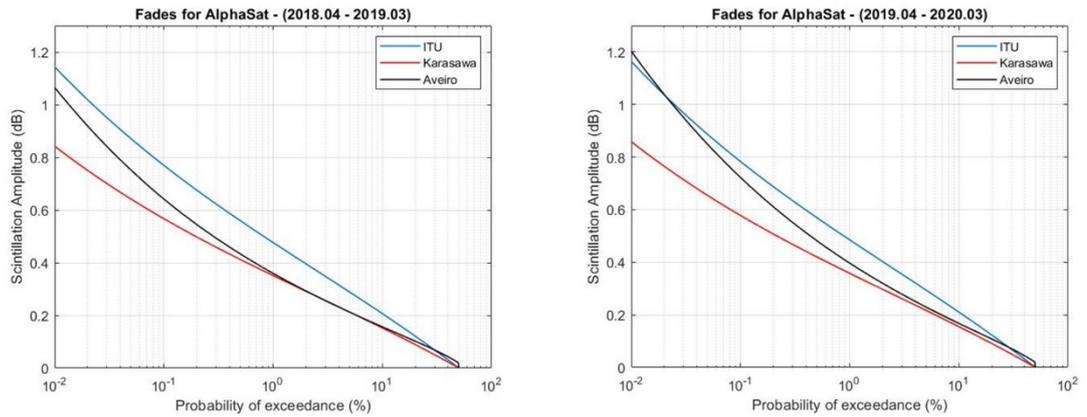


Figura 40: Fades – AlphaSat: 2018.04-2019.03 (esquerda) e 2019.04-2020.03 (direita)

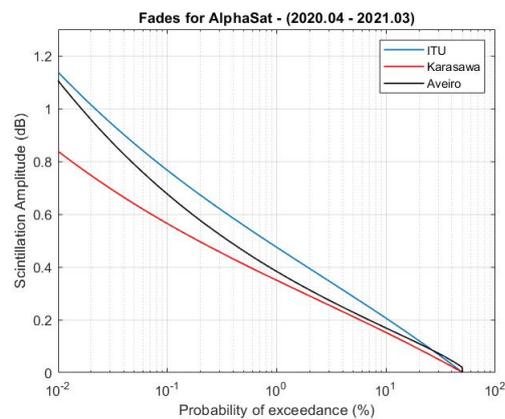


Figura 41: Fades – AlphaSat: 2020.04-2021.03

Observando as Figura 39, Figura 40 e Figura 41, verifica-se que o modelo *Karasawa* para baixas amplitudes é o que melhor se aproxima dos *fades* dos dados de *Aveiro* e, para amplitudes elevadas é o modelo de *Karasawa* que melhor se adequa à previsão dos *fades*.

### Previsão do mês médio

Seguem-se as previsões com base na média mensal do  $N_{wet}$  para os 5 anos de dados disponíveis. Os valores de  $N_{wet}$  atribuídos para os 12 meses encontram-se na Tabela 4-2.

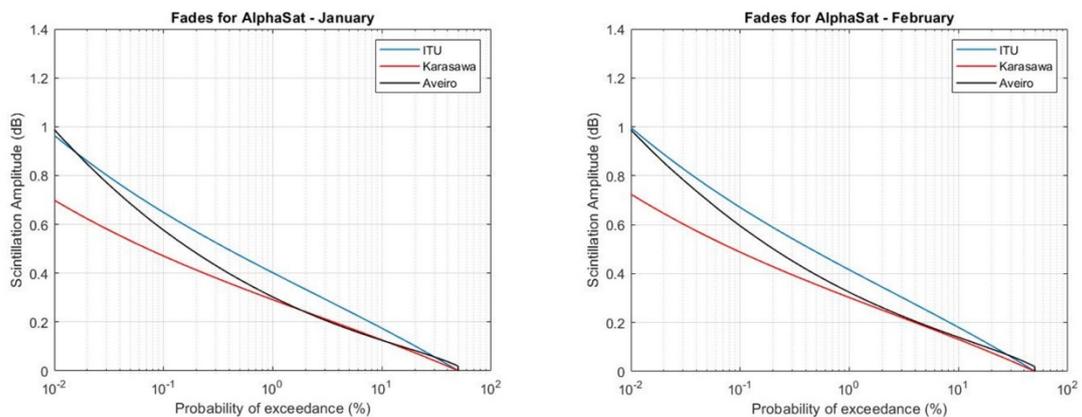


Figura 42: Fades – AlphaSat: janeiro (esquerda) e fevereiro (direita)

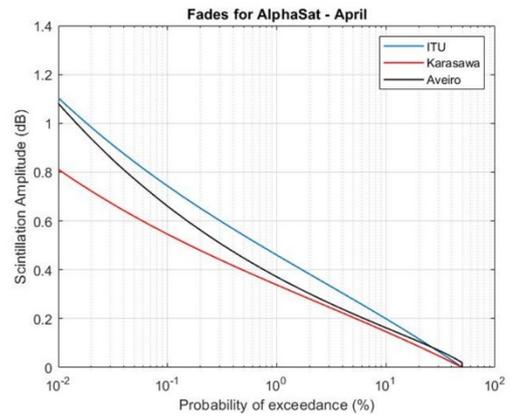
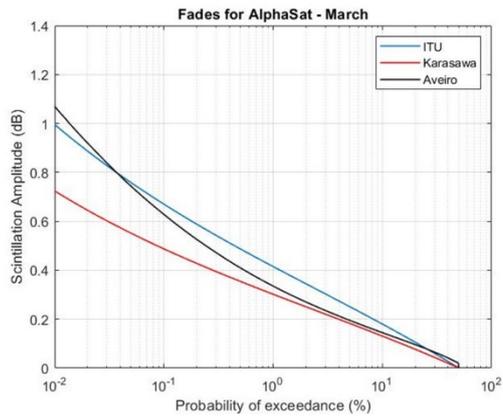


Figura 43: Fades – AlphaSat: março (esquerda) e abril (direita)

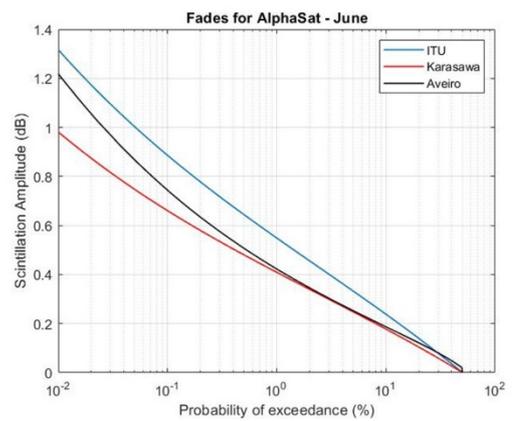
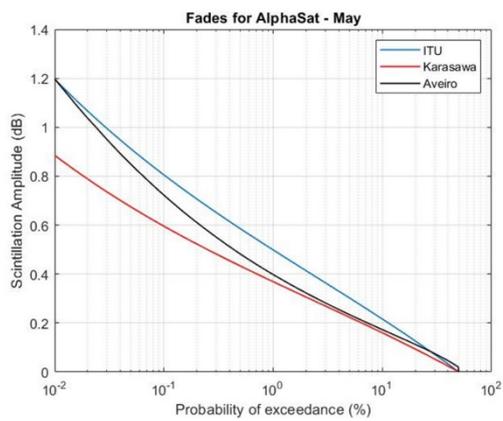


Figura 44: Fades – AlphaSat: maio (esquerda) e junho (direita)

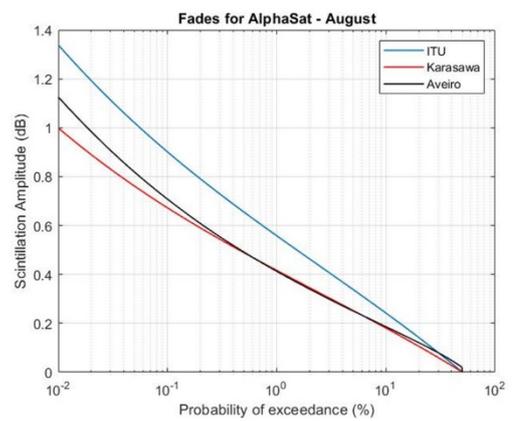
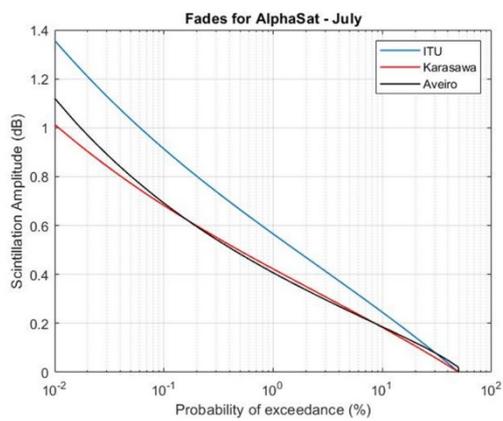


Figura 45: Fades – AlphaSat: julho (esquerda) e agosto (direita)

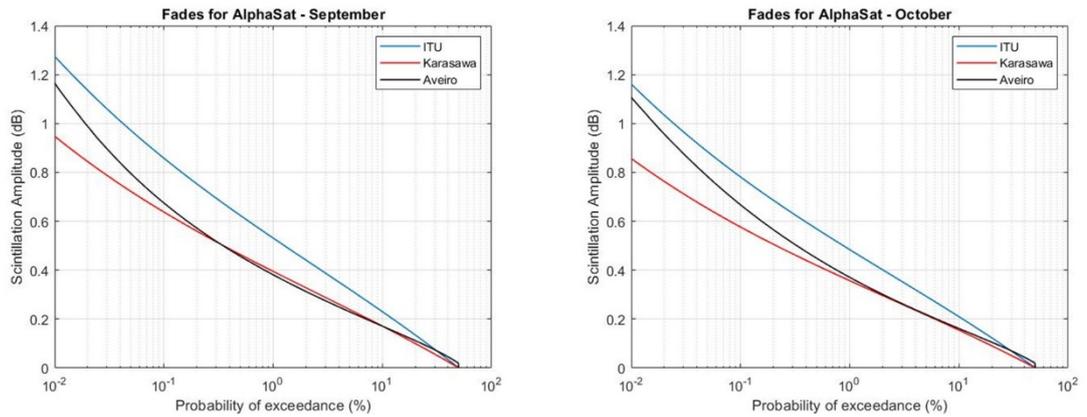


Figura 46: Fades – AlphaSat: setembro (esquerda) e outubro (direita)

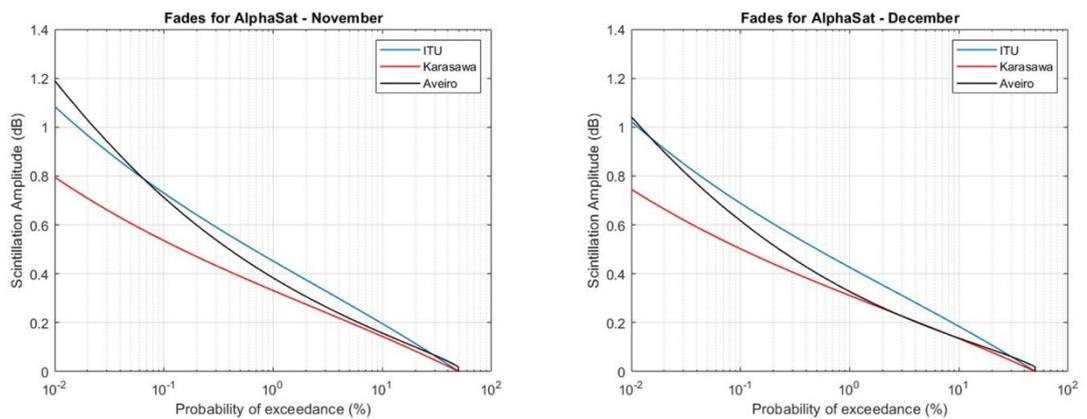


Figura 47: Fades – AlphaSat: novembro (esquerda) e dezembro (direita)

Tal como observado para a variação anual também a variação mensal dos *fades* de maior amplitude é, de modo geral, melhor descrita pelo modelo *ITU*, enquanto que para as baixas amplitudes é mais adequado o modelo *Karasawa*. Também se verifica que o modelo *ITU* apresenta uma sobre estimativa dos dados experimentais e o modelo *Karasawa* uma subestimativa.

### 4.3. Escalonamento da variância ou desvio padrão

Por forma a analisar o escalonamento do desvio padrão para as duas frequências, banda Ka e na banda Q, foram obtidas as CCDF do desvio padrão de cada ano, Figura 48, Figura 49 e Figura 50, e para os 5 anos, Figura 52.

De seguida foram obtidos, usando técnicas de interpolação, os valores do desvio padrão para um conjunto de percentagens habitualmente usadas nos modelos de propagação do ITU. Neste caso os valores usados foram 0.1 %, 0.5%, 1%, 2 %, 3 %, 5 % e 10%.

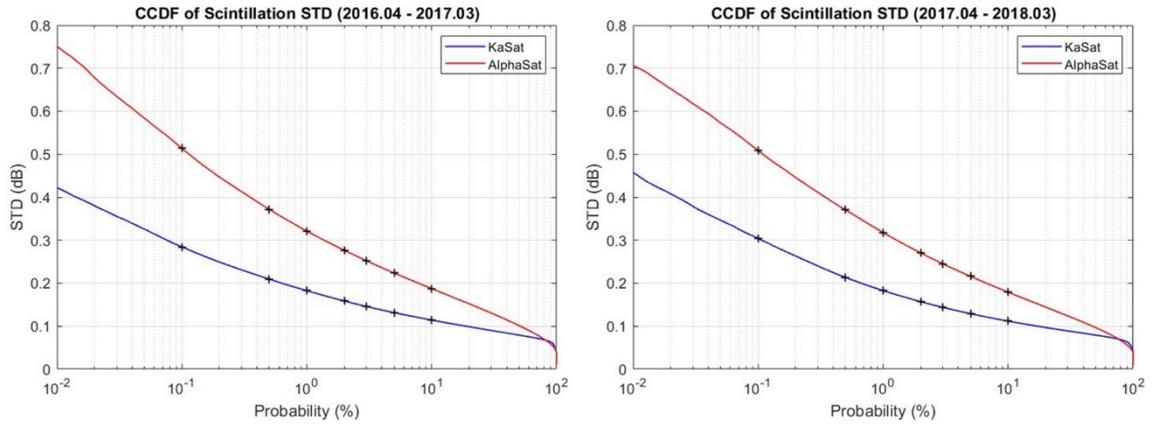


Figura 48: Escalonamento do desvio padrão entre 2016.04 – 2017.03 (esquerda) e 2017.04 – 2018.03 (direita)

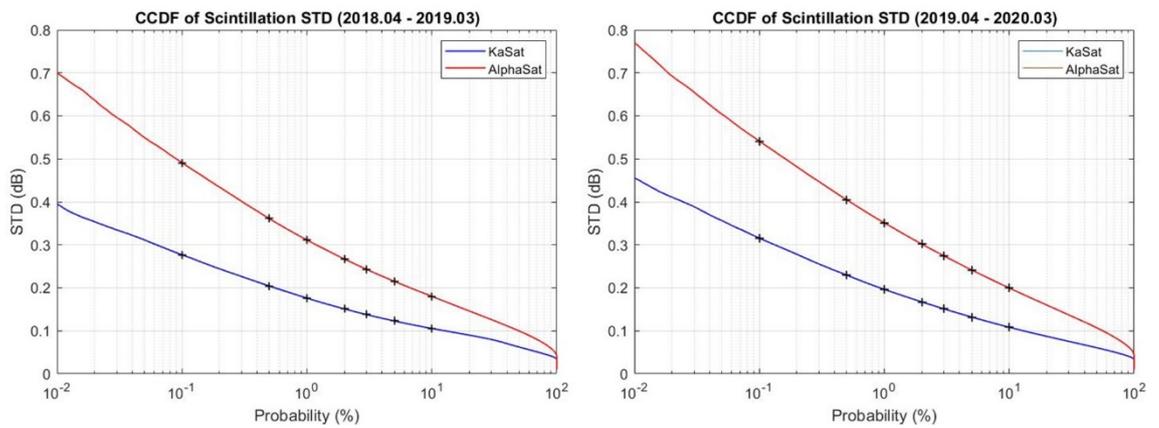


Figura 49: Escalonamento do desvio padrão entre 2018.04 – 2019.03 (esquerda) e 2019.04 – 2020.03 (direita)

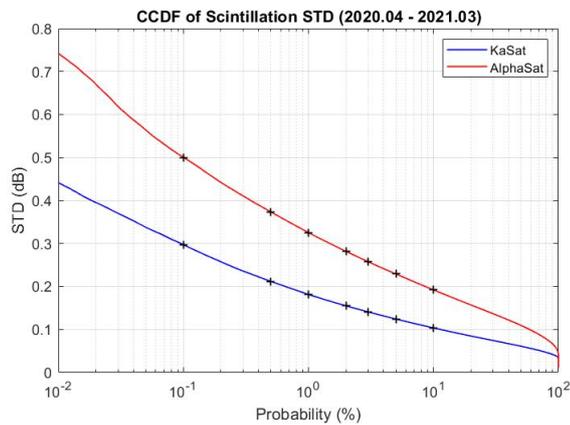


Figura 50: Desvio padrão para as percentagens de referência entre 2020.04 – 2021.03

A Figura 51 contém o rácio do desvio padrão entre o *beacon AlphaSat* e *beacon KaSat* para as diferentes probabilidades.

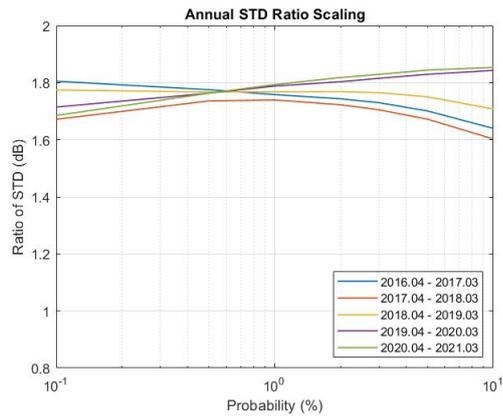


Figura 51: Escalonamento anual do rácio do desvio padrão

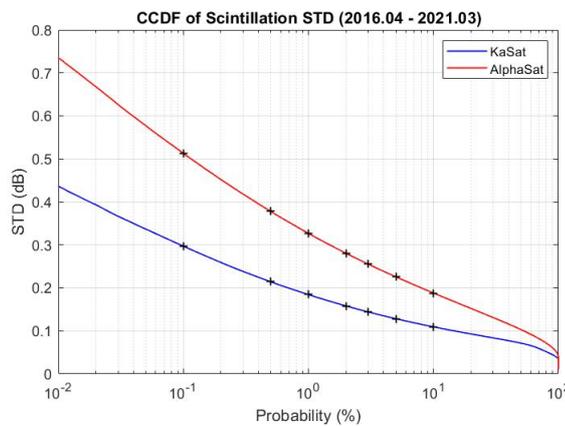


Figura 52: Desvio padrão para as percentagens de referência entre 2016.04 – 2021.03

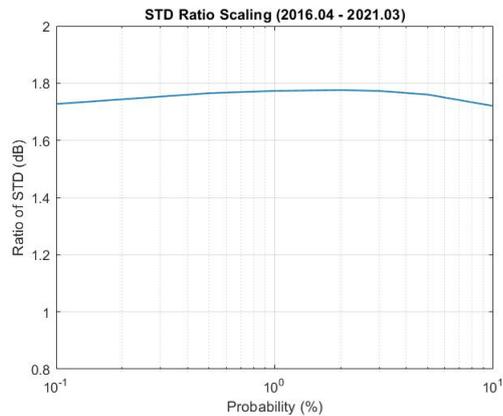


Figura 53: Escalonamento do rácio do desvio padrão entre 2016.04 – 2021.03

Segundo a Figura 53, verifica-se que os valores obtidos para o rácio do desvio padrão entre o *beacon AlphaSat* e o *beacon KaSat* são aproximadamente constantes. Comparando o escalonamento do desvio padrão obtido experimentalmente com a relação do desvio padrão estabelecido pelo modelo *ITU* e pelo modelo *Karasawa* para duas frequências, cuja representação se encontra na Figura 21, observa-se que ambos os valores se encontram aproximadamente na mesma gama.

#### 4.4. Modelo empírico

De seguida, procedeu-se à extração dos coeficientes do polinómio que melhor se ajusta à curva do desvio padrão dos 5 anos de dados para o *beacon AlphaSat*. De modo a selecionar o grau do polinómio, foram calculados os erros quadráticos correspondentes ao grau do polinómio os quais se encontram na Tabela 4-6. O valor do erro que se obtém, passando de um polinómio de grau 5 para um polinómio de grau 6 reduz-se em apenas 1%. Sendo esta percentagem baixa, deixa de ser benéfico aumentar a complexidade do polinómio, tendo sido por isso atribuído o valor 5 ao grau do polinómio. De notar que fora da gama de valores onde está a ser extraído o polinómio, este tende a ter comportamentos “imprevisíveis” e mais acentuados com o aumento do grau do polinómio. Para a extração do polinómio foi considerada a gama de percentagens:  $10^{-4} \geq P \geq 10^2$  uma vez que para percentagens inferiores a  $10^{-4}$ , a curva das probabilidades experimentais não apresentava um comportamento suave.

Tabela 4-6: Valores atribuídos ao grau do polinómio e o respetivo erro quadrático

Grau	Erro
4	0.0320
5	0.0194
6	0.0194

A representação gráfica da curva para os 5 anos e do respetivo *fitting* polinomial encontra-se na Figura 54. Uma vez que os coeficientes do polinómio e a avaliação do polinómio é feita para os mesmos dados experimentais é de esperar, tal como se apresenta, que as curvas se sobreponham.

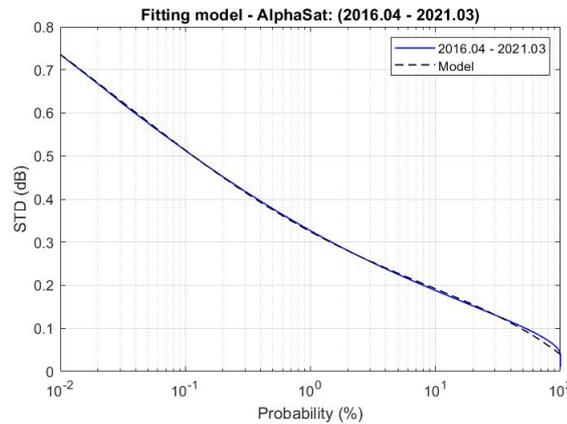


Figura 54: Fitting model – AlphaSat: 5 anos

O polinómio extraído tem a seguinte expressão:

$$\begin{aligned}
 y = & 6.18 \cdot 10^{-6}(\log P)^5 - 1.47 \\
 & \cdot 10^{-4}(\log P)^4 - 1.99 \\
 & \cdot 10^{-4}(\log P)^3 + 6.08 \cdot 10^{-3}(\log P)^2 - 6.86 \cdot 10^{-2}(\log P) \\
 & + 0.325
 \end{aligned}
 \tag{4.62}$$

De seguida, avaliou-se o polinómio anteriormente extraído para os valores anuais do desvio padrão.

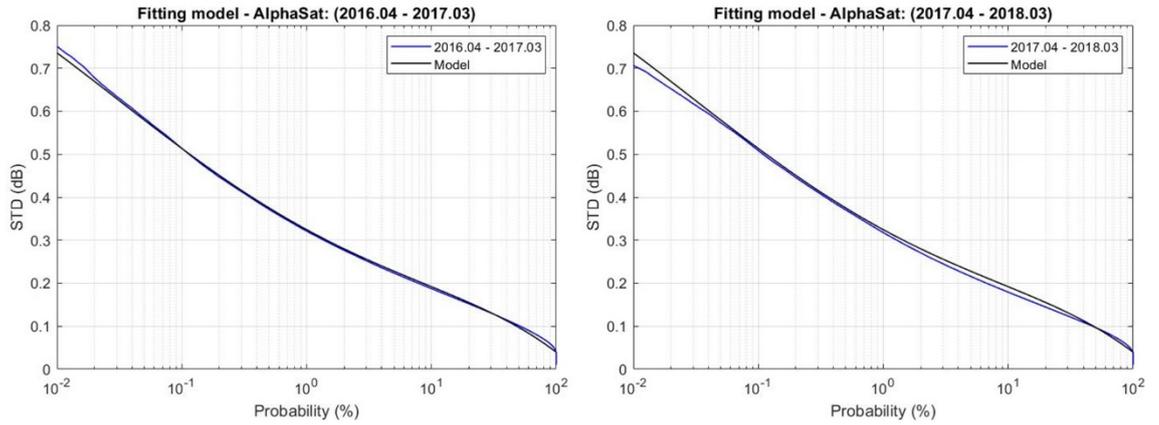


Figura 55: Fitting model – AlphaSat: 2016.04 – 2017.03 (esquerda) e 2017.04 – 2018.03 (direita)

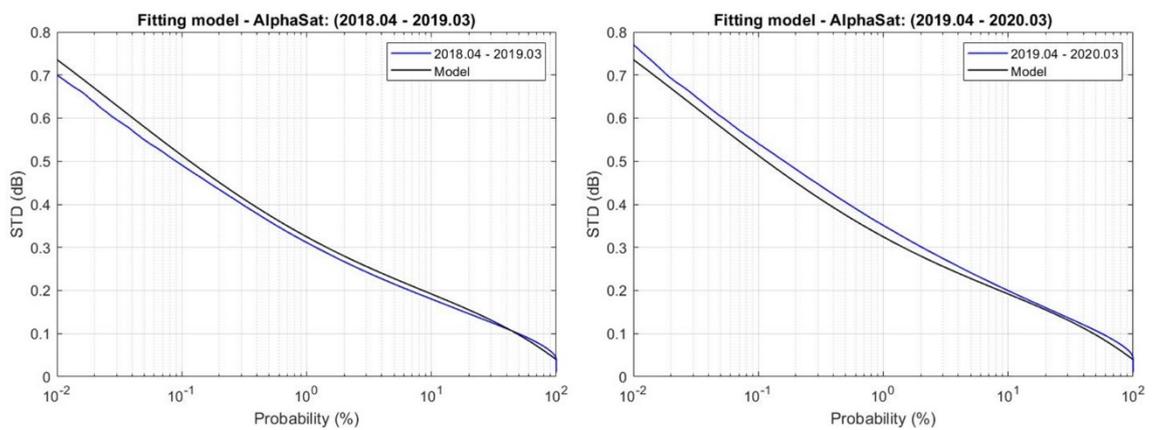


Figura 56: Fitting model – AlphaSat: 2018.04 – 2019.03 (esquerda) e 2019.04 – 2020.03 (direita)

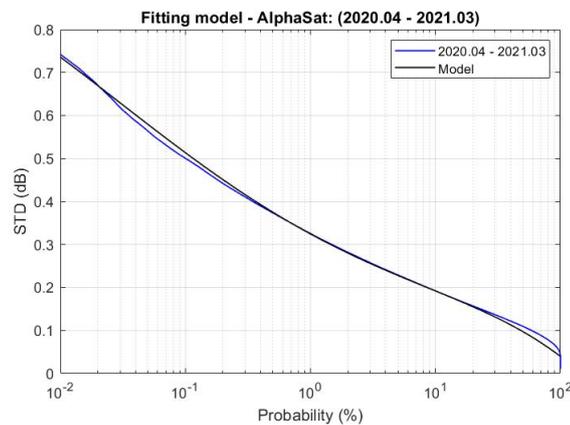


Figura 57: Fitting model – AlphaSat: 2020.04 – 2021.03

Observando as Figura 55, Figura 56 e Figura 57, verifica-se que existe uma sobre estimativa entre os anos 2017.04 – 2018.03 e 2018.04 – 2019.03 e uma subestimativa entre 2019.04 – 2020.03. Contudo, de modo geral, ambas as curvas apresentam semelhanças. Para cada ano foram obtidos os valores do erro médio quadrático do *fitting* polinomial, fazendo

$$\text{mean}(p_x - y_x)^2 \quad (4.63)$$

onde  $p_x$  simboliza os valores estimados resultantes da avaliação do polinómio e  $y_x$  simboliza os dados experimentais. Tal como foi considerado para a extração dos coeficientes dos polinómios também, para o cálculo do erro médio foi considerada a mesma gama de percentagens.

Na Tabela 4-7 encontram-se os anos e os respetivos valores do erro médio quadrático associados.

Tabela 4-7: Erros médios quadráticos e os respetivos anos

Ano	Amostras	Erro
2016.04 – 2017.03	978	$8.8701 \cdot e^{-05}$
2017.04 – 2018.03	968	$2.8685 \cdot e^{-04}$
2018.04 – 2019.03	952	$7.5397 \cdot e^{-04}$
2019.04 – 2020.03	984	$5.4049 \cdot e^{-04}$
2020.04 – 2021.03	986	$1.2522 \cdot e^{-04}$
2016.04 - 2021.03	981	$1.9825 \cdot e^{-04}$

Seguindo o mesmo procedimento, foi obtido o *fitting* polinomial dos 5 anos para o *beacon KaSat*, Figura 58.

A Tabela 4-8 apresenta os valores atribuídos ao grau do polinómio e o respetivo erro médio quadrático. O grau 5 do polinómio manteve-se.

Tabela 4-8: Valores atribuídos aos graus do polinómio e os respetivos erros quadráticos

Grau	Erro
4	0.0120
5	0.0090
6	0.0062

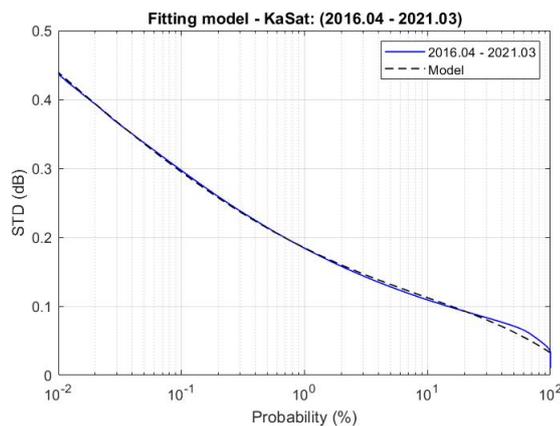


Figura 58: Fitting model – KaSat: 5 anos

O polinómio extraído tem a seguinte expressão:

$$y = -3.228 \cdot 10^{-6}(\log P)^5 - 7.2257 \cdot 10^{-5}(\log P)^4 - 2.0144 \cdot 10^{-4}(\log P)^3 + 0.0039(\log P)^2 - 0.0384(\log P) + 0.1847 \quad (4.64)$$

Segue-se a avaliação do polinómio para as curvas anuais de amplitude, Figura 59, Figura 60 e Figura 61.

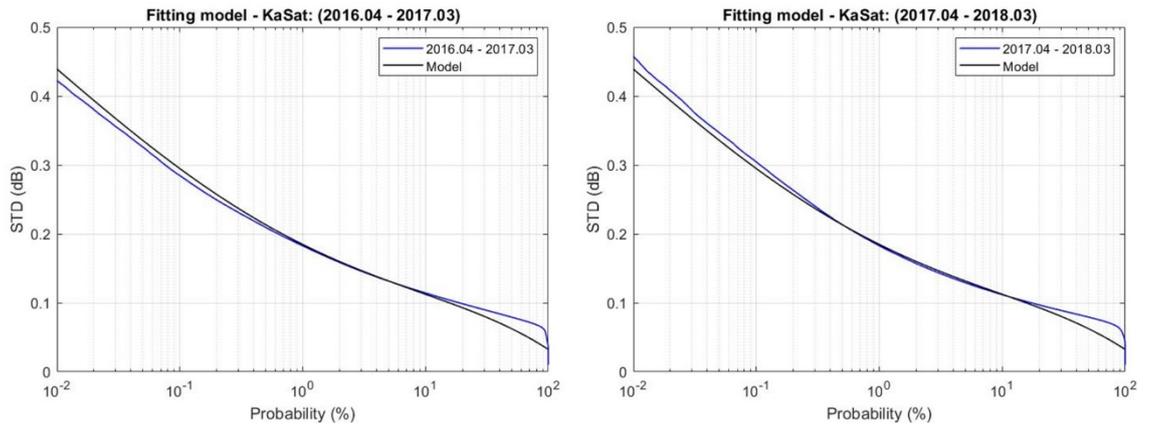


Figura 59: Fitting model – KaSat: 2016.04 – 2017.03 (esquerda) e 2017.04 – 2018.03 (direita)

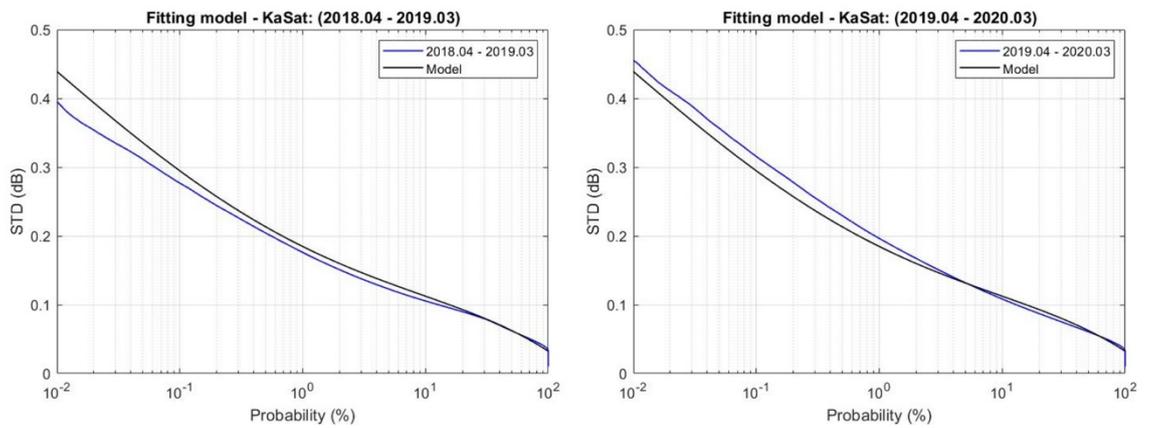


Figura 60: Fitting model – KaSat: 2018.04 – 2019.03 (esquerda) e 2019.04 – 2020.03 (direita)

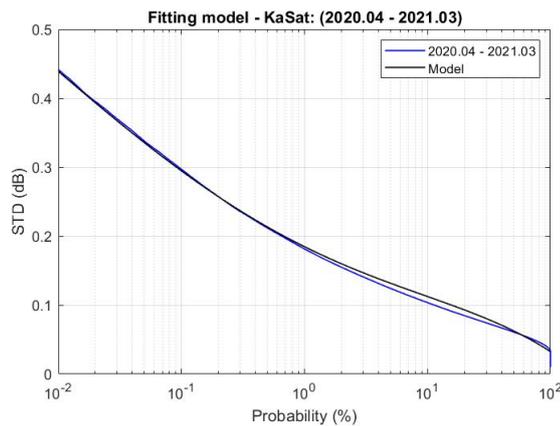


Figura 61: Fitting model – KaSat: 2020.04 – 2021.03

Para cada ano os valores do erro médio quadrático do *fitting* polinomial encontram-se na Tabela 4-9.

Tabela 4-9: Erros quadráticos e os respetivos anos

Ano	Samples	Erro
2016.04 – 2017.03	644	$4.8990 \cdot e^{-04}$
2017.04 – 2018.03	703	$4.0662 \cdot e^{-04}$
2018.04 – 2019.03	688	$7.4815 \cdot e^{-04}$
2019.04 – 2020.03	883	$3.800 \cdot e^{-03}$
2020.04 – 2021.03	683	$5.8871 \cdot e^{-05}$
2016.04 - 2021.03	715	$1.2522 \cdot e^{-05}$

Comparando os resultados obtidos para o *beacon AlphaSat* e para o *beacon KaSat*, o *AlphaSat* foi o que teve melhor *fitting* polinomial.

O caso do *KaSat* será na realidade previsivelmente melhor que os resultados apresentados caso as características do recetor em termos de figura de ruído tivessem sido constantes ao longo do período experimental aqui apresentado. De facto, o *front-end* foi substituído por outro, a cerca de metade do período experimental aqui usado, com um muito melhor desempenho em termos de ruído, mais baixa figura de ruído, que reduziu o patamar de desvio padrão inerente ao recetor. Este efeito é bem visível na Figura 58 e a constatação deste efeito foi referido na tese [2].

Será recomendável mitigar este efeito –talvez subtraindo a variância residual introduzida pelo recetor, para melhor avaliar o desempenho do modelo empírico.

#### 4.5. Variabilidade horária

Anteriormente, na secção 4.1, foi observada relação entre a intensidade de cintilação e os meses do ano, tendo se verificado que valores de maior intensidade ocorriam para meses mais quentes e os menores valores de intensidade ocorriam para os meses mais frios.

Nesta secção será abordada a variabilidade horária anual e mensal do desvio padrão de cintilação para ambos os beacons, *AlphaSat* e *KaSat*. As Figura 62, Figura 63 e a Figura 64 contêm a variabilidade horária do desvio padrão de cada mês do ano. A Figura 65 contém a variação horária anual do desvio padrão e a Figura 66 a variação horária mensal.

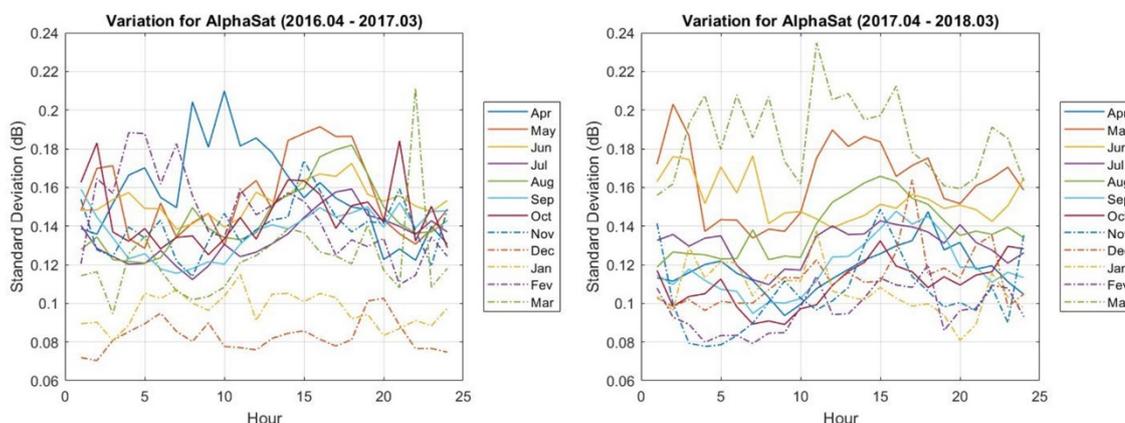


Figura 62: Variação horária do desvio padrão entre 2016.04 a 2017.03 (esquerda) e 2017.04 a 2018.03 (direita)

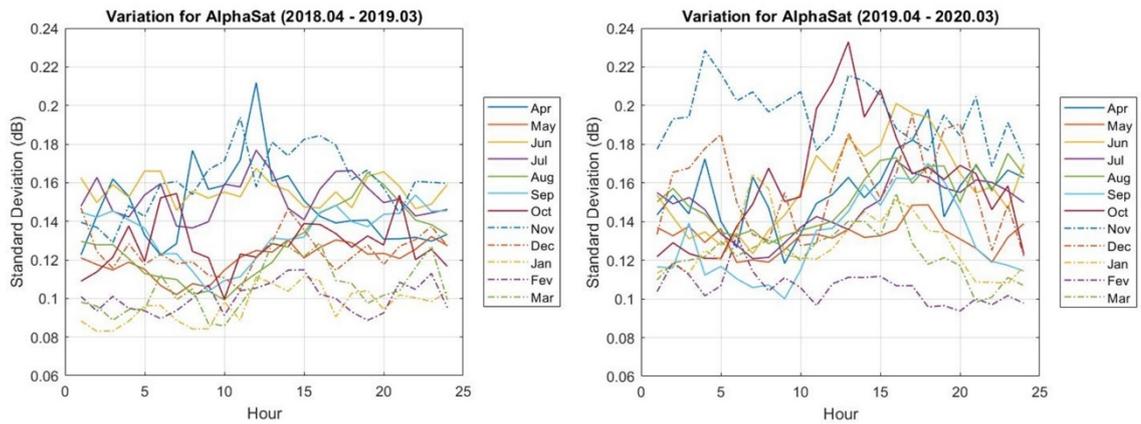


Figura 63: Variação horária do desvio padrão entre 2018.04 a 2019.03 (esquerda) e 2019.04 a 2020.03 (direita)

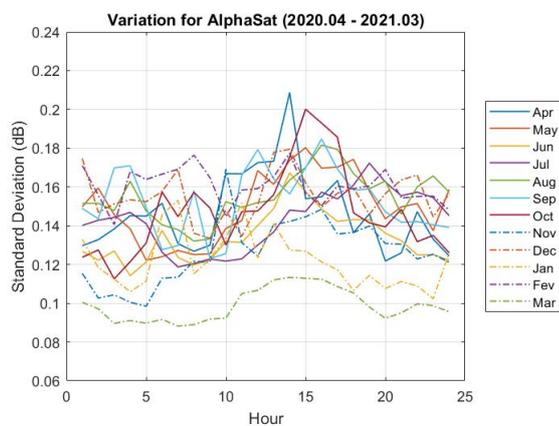


Figura 64: Variação horária do desvio padrão entre 2020.04 a 2021.03

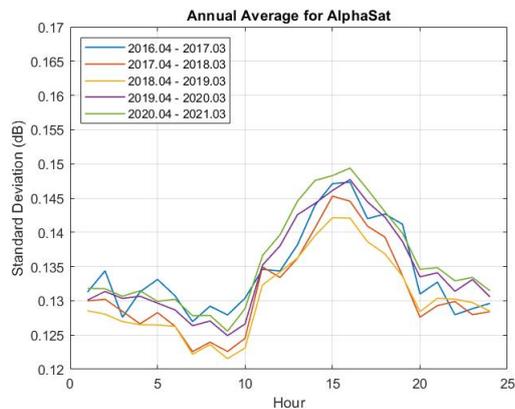


Figura 65: Variação horária anual do desvio padrão de cintilação do beacon AlphaSat

Foram também retiradas as variações horárias do desvio padrão mensalmente para os 5 anos de dados, Figura 66.

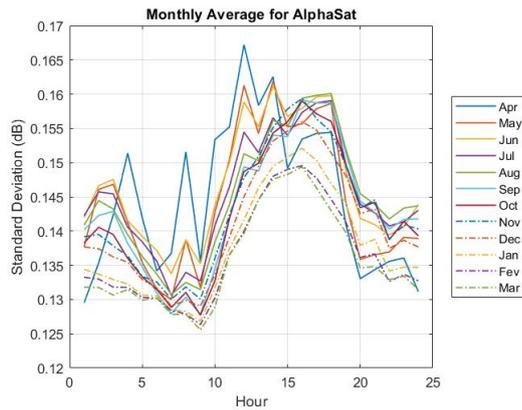


Figura 66: Variação horária mensal do desvio padrão de cintilação do beacon AlphaSat

Observando as figuras anteriores, verifica-se que a cintilação é mais intensa no início da tarde. Contudo, também se verifica que nas primeiras horas do dia a cintilação é acentuada principalmente para os meses mais quentes. Os meses mais frios, como março, fevereiro e janeiro, que se encontram a tracejado, apresentam menor intensidade comparativamente com os meses mais quentes. Nas Figura 65 e Figura 66 é evidenciado este comportamento.

Do mesmo modo foram obtidas as variações horárias do desvio padrão para o beacon KaSat.

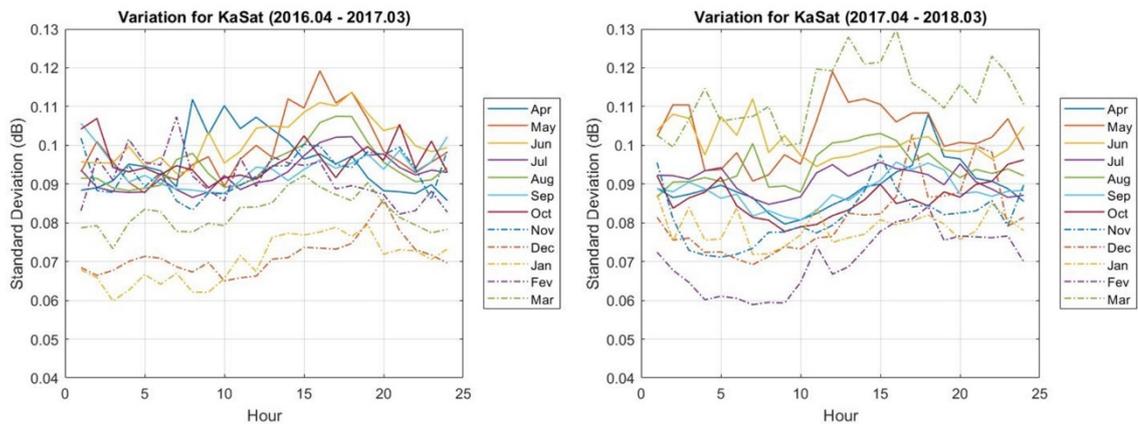


Figura 67: Variação horária do desvio padrão entre 2016.04 a 2017.03 (esquerda) e 2017.04 a 2018.03 (direita)

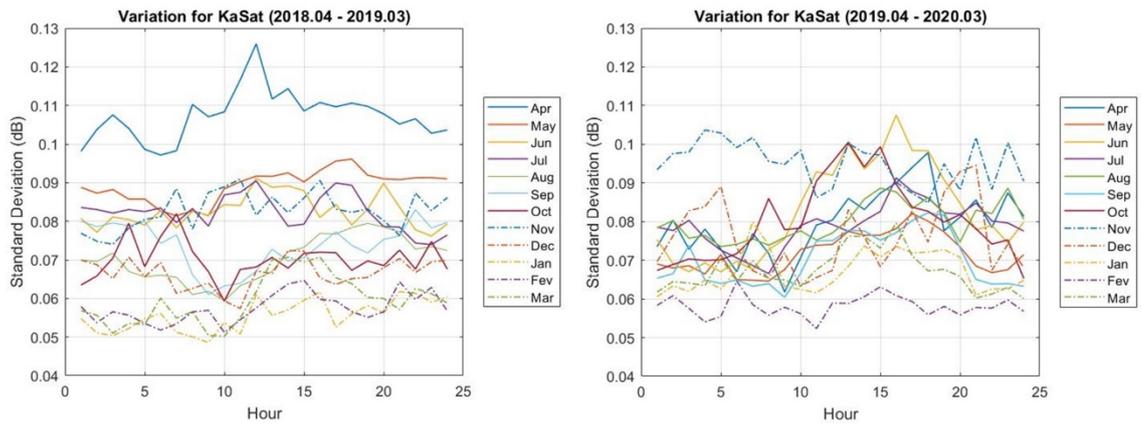


Figura 68: Variação horária do desvio padrão entre 2018.04 a 2019.03 (esquerda) e 2019.04 a 2020.03 (direita)

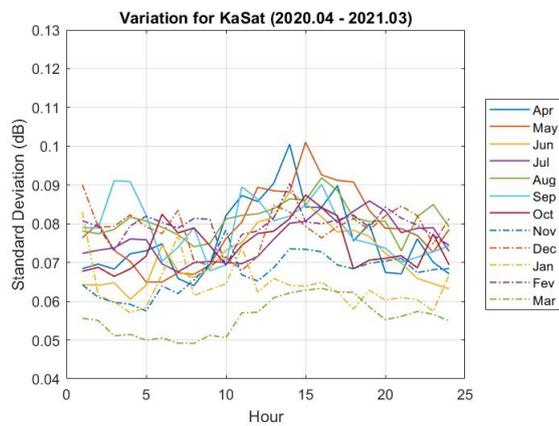


Figura 69: Variação horária do desvio padrão entre 2020.04 a 2021.03

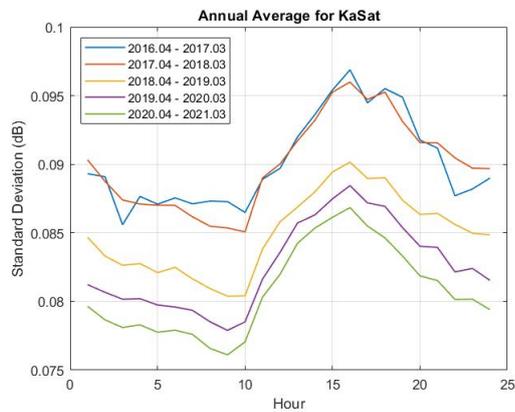


Figura 70: Variação horária anual do desvio padrão de cintilação do beacon KaSat

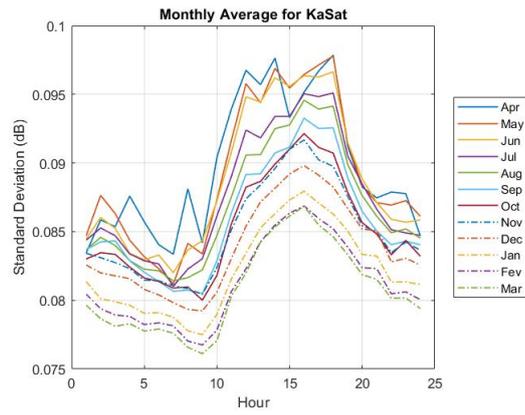


Figura 71: Variação horária mensal do desvio padrão de cintilação do beacon KaSat

Tal como observado para o *beacon AlphaSat*, também se verifica, observando a Figura 70 e Figura 71, o mesmo padrão para o *beacon KaSat*. Isto é, a cintilação apresenta dois períodos de maior intensidade, no início da tarde e nas primeiras horas do dia.



## 5. Conclusões e trabalho futuro V

Neste trabalho foi analisada uma base de dados extensa, de 5 anos, para duas frequências distintas nas bandas Ka a 19.680 GHz do satélite *KaSat* e na banda Q a 39.40 GHz do satélite *AlphaSat*. Esta base de dados de Aveiro possui uma grande disponibilidade temporal e tem a vantagem de ser constituída por dois conjuntos de medidas concorrentes.

Foram avaliados os modelos existentes na literatura, nomeadamente o modelo *ITU*, o modelo *Van de Kamp*, o modelo *Karasawa* e o modelo *Otung* para a previsão dos *fades* e dos *enhancements*. Verificou-se que nenhum dos modelos era ideal para a previsão dos dados de Aveiro. Todavia, para a previsão dos *fades*, o modelo *ITU* e o modelo *Karasawa* foram os que mais se aproximaram dos dados experimentais. Relativamente à previsão dos *enhancements* observou-se que tanto o modelo *Otung* como o modelo *Karasawa* não apresentam previsões aceitáveis. O modelo *Van de Kamp* foi o modelo que, em ambos os casos, não se adequava para as previsões.

Foram também avaliadas as dependências mensais da cintilação. Tal como verificado pela literatura, de modo geral observou-se que a maior intensidade de cintilação ocorre nos meses mais quentes como o mês de junho pois, em meses como este os valores de humidade absoluta são elevados, o que faz com que as amplitudes de cintilação sejam maiores. Por sua vez, os menores valores de cintilação ocorrem para os meses mais frios, geralmente os meses de inverno como o caso de dezembro. Estes meses apresentam valores mais baixos de humidade absoluta. Em termos de variabilidade horária do desvio padrão de cintilação, verifica-se que a cintilação mais intensa ocorre no início da tarde. Entre as 00h e as 03h também se verifica uma crescente intensidade de cintilação, contudo, a “fonte” meteorológica desta turbulência é, no entanto, desconhecida.

Também foi analisado o escalonamento com base nos valores de equiprobabilidade do desvio padrão para as duas frequências, banda Ka e na banda Q. Os resultados obtidos permitiram verificar que existe uma notável concordância com os modelos teóricos para escalonamento em frequência do desvio padrão constantes do modelo *ITU* e do modelo *Karasawa*.

Foi ainda analisado o escalonamento do desvio padrão para as duas frequências a longo prazo (anual), mas seria pertinente analisar futuramente o escalonamento instantâneo, isto é, para curtos prazos de tempo, por exemplo, alguns minutos.

O modelo *ITU*, habitualmente uma referência para os operadores, não descreve de forma completamente satisfatória os dados experimentais. Estes modelos têm sido desenvolvidos com um volume limitado de dados adquiridos no centro da Europa pelo que consideramos a base de dados disponível e a análise aqui apresentada como relevante neste contexto.

Mereceria alguma atenção ainda o estudo espectral do fenómeno e correlação das séries temporais da variância nas duas frequências.

## Referências

- [1] L. J. Ippolito, *Satellite communications systems engineering: Atmospheric effects, satellite link design and system performance*. 2017.
- [2] “Ana de Resende Gomes de Pinho Cintilação Troposférica nas bandas Ka e Q Tropospheric Scintillation in the Ka and Q bands,” 2019.
- [3] F. Jorge, “Modelos de Propagação Terra - Satélite e Separação das Contribuições para a Despolarização,” vol. 6.
- [4] T. U. Eindhoven and R. Magnificus, *Climatic Radiowave Propagation Models for the design of Satellite Communication Systems*, no. november. 1999.
- [5] C. Riva and F. S. Marzano, “Scintillation modelling : a review Abstract,” *Cost 280, PM4002*, pp. 1–25, 2002.
- [6] E. Vilar, J. Haddon, P. Lo, and T. J. Mousley, “Measurement and modelling of amplitude and phase scintillations in an earth-space path,” *J. Inst. Electron. Radio Eng.*, vol. 55, no. 3, pp. 87–96, 1985, doi: 10.1049/jiere.1985.0033.
- [7] M. M. J. L. Van De Kamp, J. K. Tervonen, E. T. Salonen, and J. Pedro V Polares Baptista, “Improved models for long-term prediction of tropospheric scintillation on slant paths,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 47, no. 2, pp. 249–260, 1999, doi: 10.1109/8.761064.
- [8] R. Teixeira, “Modelos de Cintilação na Banda Ka em Trajectória Terra- Satélite,” 2007.
- [9] P. M. da S. Gaspar, “Modelos de Propagação Terra-Satélite na Banda Ka,” p. 135, 2008.
- [10] ITU-R, “The radio refractive index : its formula and refractivity data,” *Itu-R*, vol. 10, pp. 453–10, 2012.
- [11] M. M. J. L. Van De Kamp, “Asymmetric signal level distribution due to tropospheric scintillation,” *Electron. Lett.*, vol. 34, no. 11, pp. 1145–1146, 1998, doi: 10.1049/el:19980805.
- [12] ITU-R, “Recommendation ITU-R P.618-13 Propagation data and prediction methods required for the design of Earth-space telecommunication systems P Series Radiowave propagation,” vol. 13, 2017, [Online]. Available: <http://www.itu.int/ITU-R/go/patents/en>.

- [13] N. Of, "S Atellite C Ommunications At," *Communications*, pp. 2–14, 2004.
- [14] I. E. Otung, "Prediction of tropospheric amplitude scintillation on a satellite link," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 44, no. 12. pp. 1600–1608, 1996, doi: 10.1109/8.546246.