

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE CAMPINAS

**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS, AMBIENTAIS E DE
TECNOLOGIAS**

FERNANDO LINO

**CARACTERIZAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DE
WEIBULL EM AMBIENTES *INDOOR***

CAMPINAS

2008

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE CAMPINAS

GRÃO-CHANCELER

Dom Bruno Gamberini

MAGNÍFICO REITOR

Prof. Pe. Wilson Denadai

VICE-REITORA

Prof^a. Dra. Ângela de Mendonça Engelbrecht

PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

Prof^a. Dra. Vera Engler Cury

**DIRETOR DO CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS, AMBIENTAIS E DE
TECNOLOGIAS**

Prof. Dr. Orandi Mina Falsarella

**COORDENADOR INTERINO DO PROGRAMA DE
PÓS-GRADUAÇÃO *STRICTO SENSU* EM ENGENHARIA ELÉTRICA
CURSO DE MESTRADO PROFISSIONAL EM GESTÃO DE REDES DE
TELECOMUNICAÇÕES**

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: GESTÃO DE REDES E SERVIÇOS

Prof. Dr. Orandi Mina Falsarella

CARACTERIZAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DE WEIBULL EM AMBIENTES *INDOOR*

Dissertação apresentada como exigência para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica, ao Programa de Pós-Graduação na área de concentração Gestão de Redes e Serviços, Pontifícia Universidade Católica de Campinas.

Orientador: Prof. Dr. Omar Carvalho Branquinho

PUC CAMPINAS

2008

Ficha Catalográfica
Elaborada pelo Sistema de Bibliotecas e
Informação - SBI - PUC-Campinas

t621.3845 Lino, Fernando.
L758c Caracterização da distribuição de Weibull em ambientes Indoor / Fernando Lino. -
Campinas: PUC-Campinas, 2008.
p.

Orientador: Omar Carvalho Branquinho.
Dissertação (mestrado) - Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Centro de
Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias, Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.
Inclui anexos e bibliografia.

1. Sistemas de comunicação sem fio. 2. Rádio - Transmissores e transmissão -
Desvanecimento. 3. Rayleigh, Ondas de. 4. Comunicações digitais. 5. Sistemas de
telecomunicação. I. Branquinho, Omar. II. Pontifícia Universidade Católica de Campinas.
Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias. Pós-Graduação em Engenharia
Elétrica. III. Título.

20.ed.CDD – t621.3845

FERNANDO LINO

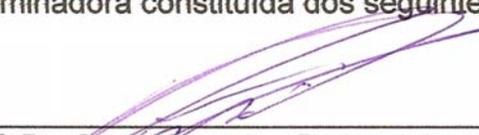
**CARACTERIZAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DE WEIBULL
EM AMBIENTES INDOOR**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado Profissional em Gestão de Redes de Telecomunicações do Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias da Pontifícia Universidade Católica de Campinas como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Gestão de Redes de Telecomunicações.

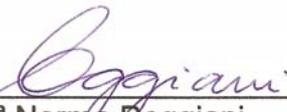
Área de Concentração: Gestão de Redes e Serviços .

Orientador: Prof. Dr. Omar Carvalho Branquinho

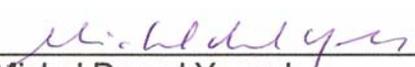
Dissertação defendida e aprovada em 08 de fevereiro de 2008 pela Comissão Examinadora constituída dos seguintes professores:



Prof. Dr. Omar Carvalho Branquinho
Orientador da Dissertação e Presidente da Comissão Examinadora
Pontifícia Universidade Católica de Campinas



Prof.ª Dr.ª Norma Reggiani
Pontifícia Universidade Católica de Campinas



Prof. Dr. Michel Daoud Yacoub
Universidade Estadual de Campinas

Dedico este trabalho aos meus pais por serem os responsáveis pela minha formação e em especial à minha esposa Doraci de Paula que me deu forças e soube entender a importância deste trabalho nas noites e feriados em que me ausentei para a dedicação ao mesmo.

AGRADECIMENTOS

A Deus,

Por atender a todo pedido de ajuda e me dar as forças necessárias.

Ao Prof. Dr. Omar Carvalho Branquinho,

Pela orientação e suporte nas horas de necessidade.

Ao José Flávio Fernandes de Freitas,

Que me deu a primeira oportunidade profissional na área de Engenharia Elétrica.

Aos amigos Lotito e Ranieri,

Pela amizade real e companheirismo nas atividades profissionais.

Aos alunos de graduação Samuel e Sona

Pela construção do robô, sem a qual este trabalho não estaria concretizado.

Aos alunos de Iniciação Científica Alberto e ao Montali,

Pela ajuda na realização das medições.

Aos professores e colegas do curso de mestrado,

Pela amizade e aprendizado.

À Sra. Fátima,

Que me deu suporte em toda atividade de secretariado.

RESUMO

LINO, Fernando. *Caracterização da distribuição de Weibull em ambientes indoor*. 2008. 76f. Dissertação (Mestrado em Gestão de Redes de Telecomunicações) – Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias, Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Campinas, 2008.

A literatura descreve a propagação *fast flat fading* em sistemas móveis como o modelo de distribuição Rayleigh com diferentes desvios padrões, o qual considera apenas um parâmetro para descrever o canal de desvanecimento. Na distribuição de Weibull existem dois parâmetros a serem modelados: fator de forma e fator de escala. A distribuição Rayleigh é um caso particular da distribuição de Weibull onde o fator de forma tem um valor igual a dois. Este trabalho tem o objetivo de avaliar, através de medidas práticas, ambos os parâmetros da distribuição de Weibull em um ambiente *indoor*. Os resultados irão mostrar os reais valores dos parâmetros de forma e de escala, indicando que a distribuição de Weibull é mais flexível para descrever um canal *flat fast fading* em uma propagação *indoor*.

Termos de Indexação: 802.11, WiFi, indoor, fading, Weibull, Rayleigh.

ABSTRACT

Lino, Fernando. *Characterization of the Weibull distribution in Indoor environments*. 2008. 76f. Dissertação (Mestrado em Gestão de Redes de Telecomunicações) – Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias, Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Campinas, 2008.

The literature describes the fast flat fading propagation model in mobile environment as a Rayleigh distribution with different standard deviations which considers only one parameter to describe the channel fading. In the Weibull distribution there are two parameters to be modeled: shape factor and scale factor. The Rayleigh distribution is a particular case of the Weibull distribution where the shape factor has a firm value equals to two. This work has the objective to evaluate, through practical measurements, both parameters in the Weibull distribution at an indoor environment. The results will show the real value of the shape factor parameter and the scale factor as well, indicating that the Weibull distribution is more flexible to describe a fast flat fading channel at an indoor propagation.

Index Terms: 802.11, WiFi, indoor, fading, Weibull, Rayleigh.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - RUÍDO COM GAUSSIANAS INDEPENDENTES NOS COMPONENTES I E Q EM UM.....	19
FIGURA 2 - DISTRIBUIÇÕES DE WEIBULL PARA DIFERENTES VALORES DE B , COM $\alpha = 5.3389$	24
FIGURA 3 - DIAGRAMA DE RADIAÇÃO DA ANTENA DO <i>ACCESS POINT</i>	27
FIGURA 4 – DIAGRAMA DE RADIAÇÃO DA ANTENA MONTADA SOBRE O ROBÔ.	28
FIGURA 5 - ROBÔ USADO COMO DISPOSITIVO MÓVEL.	28
FIGURA 6 - ÁREA UTILIZADA PARA AS MEDIÇÕES COM OS ELEMENTOS CONSTITUINTES.....	29
FIGURA 7 – TENSÃO (<i>VOLTS</i>) RECEBIDA PELO ROBÔ EM MOVIMENTO.	31
FIGURA 8 - EFEITOS DE <i>FADING</i>	32
FIGURA 9 – MÉDIA MÓVEL.	33
FIGURA 10 - DISTRIBUIÇÃO CUMULATIVA E DENSIDADE DE PROBABILIDADE.....	37
FIGURA 11 - REGRESSÃO LINEAR.	40
FIGURA 12 - MOVIMENTAÇÃO NA DIREÇÃO (A): SENTIDO X-Y.....	43
FIGURA 13 - MOVIMENTAÇÃO NA DIREÇÃO (A) - SENTIDO X-Y: COMPARATIVO ENTRE VALORES EXPERIMENTAIS COM AS DISTRIBUIÇÕES DE WEIBULL E RAYLEIGH.	44
FIGURA 14 - MOVIMENTAÇÃO NA DIREÇÃO (A) - SENTIDO X-Y: COMPARATIVO ENTRE VALORES EXPERIMENTAIS COM AS DISTRIBUIÇÕES DE WEIBULL E RAYLEIGH.	45
FIGURA 15 - MOVIMENTAÇÃO NA DIREÇÃO (A): SENTIDO Y-X.....	48
FIGURA 16 - MOVIMENTAÇÃO NA DIREÇÃO (A) - SENTIDO Y-X: COMPARATIVO ENTRE VALORES EXPERIMENTAIS COM AS DISTRIBUIÇÕES DE WEIBULL E RAYLEIGH.	49
FIGURA 17 - MOVIMENTAÇÃO NA DIREÇÃO (A) - SENTIDO Y-X: COMPARATIVO ENTRE VALORES EXPERIMENTAIS COM AS DISTRIBUIÇÕES DE WEIBULL E RAYLEIGH.	50
FIGURA 18 - MOVIMENTAÇÃO NA DIREÇÃO (B): SENTIDO U-V.	52
FIGURA 19 - MOVIMENTAÇÃO NA DIREÇÃO (B) - SENTIDO U-V: COMPARATIVO ENTRE VALORES EXPERIMENTAIS COM AS DISTRIBUIÇÕES DE WEIBULL E RAYLEIGH.	53
FIGURA 20 - MOVIMENTAÇÃO NA DIREÇÃO (B) - SENTIDO U-V: COMPARATIVO ENTRE VALORES EXPERIMENTAIS COM AS DISTRIBUIÇÕES DE WEIBULL E RAYLEIGH.	54
FIGURA 21 - MOVIMENTAÇÃO NA DIREÇÃO (B): SENTIDO V-U.	56
FIGURA 22 - MOVIMENTAÇÃO NA DIREÇÃO (B) - SENTIDO V-U: COMPARATIVO ENTRE VALORES EXPERIMENTAIS COM AS DISTRIBUIÇÕES DE WEIBULL E RAYLEIGH.	57
FIGURA 23 - MOVIMENTAÇÃO NA DIREÇÃO (B) - SENTIDO V-U: COMPARATIVO ENTRE VALORES EXPERIMENTAIS COM AS DISTRIBUIÇÕES DE WEIBULL E RAYLEIGH.	58
FIGURA 24 - MOVIMENTAÇÃO NA DIREÇÃO (C): SENTIDO T-Z.....	60

FIGURA 25 - MOVIMENTAÇÃO NA DIREÇÃO (C) - SENTIDO T–Z: COMPARATIVO ENTRE VALORES EXPERIMENTAIS COM AS DISTRIBUIÇÕES DE WEIBULL E RAYLEIGH.	61
FIGURA 26 - MOVIMENTAÇÃO NA DIREÇÃO (C) - SENTIDO T–Z: COMPARATIVO ENTRE VALORES EXPERIMENTAIS COM AS DISTRIBUIÇÕES DE WEIBULL E RAYLEIGH.	62
FIGURA 27 - MOVIMENTAÇÃO NA DIREÇÃO (C): SENTIDO Z-T.....	64
FIGURA 28 - MOVIMENTAÇÃO NA DIREÇÃO (C) - SENTIDO Z–T: COMPARATIVO ENTRE VALORES EXPERIMENTAIS COM AS DISTRIBUIÇÕES DE WEIBULL E RAYLEIGH.	65
FIGURA 29 - MOVIMENTAÇÃO NA DIREÇÃO (C) - SENTIDO Z–T: COMPARATIVO ENTRE VALORES EXPERIMENTAIS COM AS DISTRIBUIÇÕES DE WEIBULL E RAYLEIGH.	66

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - MONTAGEM DA PLANILHA.....	35
TABELA 2 - ORDENAÇÃO DOS VALORES DE <i>FAST FADING</i>	38
TABELA 3 - DADOS FINAIS PARA ESTIMATIVA DOS PARÂMETROS DE FORMA E DE ESCALA.	38
TABELA 4 - RESUMO DOS VALORES ESTIMADOS EM FUNÇÃO DA POSIÇÃO DO ROBÔ MOVIMENTANDO-SE EM RELAÇÃO AO <i>AP</i>	42
TABELA 5 – ERROS INCORRIDOS NA DISTRIBUIÇÃO CUMULATIVA PARA AS DISTRIBUIÇÕES DE WEIBULL E DE RAYLEIGH.....	47
TABELA 6 - ERROS INCORRIDOS NA DISTRIBUIÇÃO CUMULATIVA PARA AS DISTRIBUIÇÕES DE WEIBULL E DE RAYLEIGH.....	51
TABELA 7 - ERROS INCORRIDOS NA DISTRIBUIÇÃO CUMULATIVA PARA AS DISTRIBUIÇÕES DE WEIBULL E DE RAYLEIGH.....	55
TABELA 8 - ERROS INCORRIDOS NA DISTRIBUIÇÃO CUMULATIVA PARA AS DISTRIBUIÇÕES DE WEIBULL E DE RAYLEIGH.....	59
TABELA 9 - ERROS INCORRIDOS NA DISTRIBUIÇÃO CUMULATIVA PARA AS DISTRIBUIÇÕES DE WEIBULL E DE RAYLEIGH.....	63
TABELA 10 - ERROS INCORRIDOS NA DISTRIBUIÇÃO CUMULATIVA PARA AS DISTRIBUIÇÕES DE WEIBULL E DE RAYLEIGH.....	67
TABELA 11 – MÉDIA E DESVIO PADRÃO.	69
TABELA 12 – INTERVALO DE CONFIANÇA PARA OS PARÂMETROS DE FORMA E DE ESCALA.	71

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AP	=	Access Point
CD-R	=	Compact Disc-Recordable
cm	=	0,01 metros
CPU	=	Central Processing Unit
ETSI	=	European Telecommunications Standardization Institute
Gbytes	=	Giga bytes
Ghz	=	Giga Hertz
Giga	=	1.000.000.000
IEEE	=	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IETF	=	Internet Engineering Task Force
IP	=	Internet Protocol
ITU-T	=	International Telecommunication Union – Telecommunication
HTTP	=	HyperText Transfer Protocol
LOS	=	Line-Of-Sight
Mbytes	=	Mega bytes
Mega	=	1.000.000
mili	=	0,001
ms	=	0,001 segundos
QoS	=	Quality of Service
RAM	=	Random Access Memory
RAC	=	Reliability Analysis Center
RF	=	Rádio Freqüência
SNMP	=	Simple Network Management Protocol
SNR	=	Relação Sinal Ruído
VoIP	=	Voice over IP
VoWiFi	=	VoIP over WiFi
WiFi	=	Wireless Fidelity
WLAN	=	Wireless Local Area Network

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
	1.1 Contextualização do Problema.....	13
	1.2 Justificativa para o desenvolvimento do trabalho.....	14
	1.3 Objetivos do trabalho	15
	1.4 Resultados esperados.....	16
	1.5 Delimitação da pesquisa	16
	1.6 Organização da dissertação	16
2	UMA ABORDAGEM ESTATÍSTICA	18
	2.1 Distribuição de Rayleigh	18
	2.2 Distribuição de Weibull	20
	2.3 Modelos de distribuição de Weibull e de Rayleigh	23
3	MATERAIS E MÉTODOS	26
	3.1 Ferramentas estatísticas.....	26
	3.2 Ambiente e equipamentos	26
	3.3 Coleta de dados	30
	3.4 Metodologia.....	31
	3.5 Média móvel	33
	3.6 Estatística da flutuação de envelope referente ao <i>fast fading</i>	34
4	RESULTADOS	40

4.1	Resultados relativos aos testes realizados – movimentação X-Y	43
4.2	Resultados relativos aos testes realizados – movimentação Y-X	48
4.3	Resultados relativos aos testes realizados – movimentação U-V	52
4.4	Resultados relativos aos testes realizados – movimentação V-U	56
4.5	Resultados relativos aos testes realizados – movimentação T-Z	60
4.6	Resultados relativos aos testes realizados – movimentação Z-T	64
4.7	Média e desvio padrão na distribuição de Weibull	68
4.8	Intervalo de confiança	69
5	CONCLUSÕES E APLICAÇÕES	72
5.1	Contribuições do trabalho	72
5.2	Trabalhos futuros	73
6	REFERÊNCIAS	74
	ANEXOS	76

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização do Problema

As redes sem fio (*wireless*), inicialmente previstas para serem utilizadas onde a infraestrutura de acesso era de difícil implementação, estão se transformando com utilização muito mais abrangente do que se esperava.

Nos dias de hoje novos escritórios empresariais e redes internas residenciais já fazem uso da tecnologia *wireless*.

Até mesmo escritórios empresariais estão em constante substituição dos cabos usados nas redes locais pela tecnologia *wireless*.

A tecnologia *WiFi* já é uma realidade em ambientes públicos como *shopping centers* e praças de alimentação. Estes ambientes não possuem uma caracterização tão refinada quanto ambientes móveis atendidos por sistemas celulares. Para estes ambientes existem várias referências do comportamento da intensidade de sinal (YACOUB, 1993; RAPPAPORT, 1996). Já para ambientes *indoor* existe certa carência de estudos, principalmente experimentais, como é tratado nesta dissertação. Outro aspecto a ser considerado é o efeito do meio móvel em redes de comunicação de dados.

Em ambientes *indoor* o sinal recebido é proveniente de *multipath* (multi-percurso), fazendo com que os múltiplos sinais recebidos pelo dispositivo portátil apresentem fase e amplitude diferentes do sinal original transmitido, causando o efeito de desvanecimento (*fading*). Isto faz com que o componente resultante dos sinais chegando ao receptor possa ter tanto uma contribuição construtiva, como também destrutiva, sendo variável esta composição ao longo do tempo e do espaço.

Para a análise deste efeito são usados modelos estatísticos de propagação. O modelo adotado para a análise de propagação em ambiente móveis caracteriza a variação do sinal utilizando a distribuição de Rayleigh (YACOUB, 1993) para o *flat fading* em ambientes móveis, que é a variação da intensidade de todos os componentes de frequência do sinal.

Devido à carência de estudos experimentais para a caracterização do modelo de propagação em ambientes *indoor*, este é um trabalho inicial exploratório para o *flat fading*, criando uma sistemática de análise que deverá ser continuado investigando o *fading* seletivo, sendo sugerido para trabalhos futuros.

1.2 Justificativa para o desenvolvimento do trabalho

Nos últimos anos, as redes sem fio baseadas no padrão IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) 802.11 vêm ganhando popularidade, sendo utilizadas na comunicação entre diversos dispositivos e em diferentes ambientes.

A Pontifícia Universidade Católica de Campinas (PUC-Campinas), através do seu Laboratório de Pesquisa em Sistemas Rádio (LPSiRa), juntamente com seu programa de pós-graduação nesta área, tem realizado inúmeras contribuições práticas em avaliações de modelos de propagação para redes *wireless* em ambientes *indoor*.

A investigação do comportamento de sinal em sistemas *indoor* é um tema importante atualmente em função da grande penetração de redes *Wireless Local Area Network (WLAN)* operando na frequência de 2,4 GHz¹. Esta análise deve ser feita principalmente para ambientes *indoor* que atendem locais públicos como, por exemplo, uma praça de alimentação de um *campus* universitário. Neste trabalho é feita uma caracterização de um ambiente com as particularidades mencionadas localizado no *campus* da PUC-Campinas que permitiu explorar vários cenários, onde

¹ Redes padrão IEEE 802.11 utilizam a faixa de frequência 2.4 GHz não licenciadas.

foram encontradas condições de propagação com diferentes distribuições. Com estes resultados foram realizadas análises estatísticas que demonstram a pertinência de se usar o modelo de distribuição de Weibull como um modelo apropriado para este ambiente. Esta possibilidade aumenta o grau de liberdade para a caracterização de diversos cenários.

Esta é uma área onde novos trabalhos de pesquisa estão em andamento (CHONG; YONG, 2005), que demonstra a pertinência em se verificar a efetiva contribuição da representação da variação da intensidade de sinal pela distribuição de Weibull.

1.3 Objetivos do trabalho

Este trabalho tem como proposta apresentar, através de medições práticas em um ambiente *indoor*, a conveniência de se utilizar o modelo estatístico de distribuição de Weibull.

Se analisarmos a distribuição de Rayleigh, a mesma apresenta somente um grau de liberdade em seu modelo estatístico de propagação. Considera-se neste modelo somente o grau de liberdade representado pelo fator de escala, relacionada com o desvio padrão de cada uma das Gaussianas que geram a distribuição de Rayleigh.

A distribuição de Weibull apresenta dois graus de liberdade, onde são considerados dois parâmetros para caracterizar os efeitos de propagação em um ambiente. Um dos parâmetros é o mesmo utilizado na distribuição de Rayleigh (fator de escala). O outro considera a forma da distribuição, denominada fator de forma.

O resultado deste trabalho verifica a pertinência na utilização das considerações acima mencionadas, identificando os reais valores dos parâmetros de forma e de escala, usados na modelagem da análise estatística do sinal recebido em ambientes *indoor* quando utilizamos a distribuição de Weibull.

1.4 Resultados esperados

O resultado esperado é validar o uso da distribuição de Weibull na modelagem estatística de propagação de ondas de RF em ambientes *indoor*, considerando-se o efeito *multipath* inerente à severidade aleatória imposta pelo meio.

Também se esperam contribuições para suporte a novos trabalhos de dissertação sendo realizados pelo LPSiRa nas áreas de *WLAN* (*Wireless Local Area Network*), como por exemplo, *VoIP over WiFi* e transmissão de *streamings* de vídeo sobre *WiFi*, que dependem da caracterização da propagação em ambientes *indoor*.

1.5 Delimitação da pesquisa

O presente trabalho restringe-se a avaliações de parâmetros da distribuição de Weibull em redes *WiFi* padrão IEEE 802.11 em ambientes *indoor* somente, modelando o canal de Rádio Freqüência (RF) na faixa de 2,4 GHz.

Como já observado esta delimitação atende locais públicos onde a tecnologia *wireless* tem se mostrado em crescimento, principalmente para redes de comunicação de dados.

1.6 Organização da dissertação

Este trabalho está dividido em cinco (5) capítulos e organizado como se descreve na seqüência.

O Capítulo 1 apresenta uma visão geral da dissertação, onde se resumem as características nas quais a mesma foi contextualizada, com uma visão da justificativa, objetivos e a metodologia utilizada. Faz-se um breve resumo dos resultados esperados e também da delimitação dos mesmos.

No Capítulo 2 é apresentada uma análise das estatísticas necessárias para o entendimento da dissertação.

Os equipamentos utilizados e os cenários de testes, bem como o ambiente utilizado para a realização do trabalho são apresentados no Capítulo 3.

O Capítulo 4 apresenta os resultados obtidos para justificar os pressupostos, onde se mostra como os parâmetros da distribuição de Weibull podem ser avaliados.

A conclusão deste trabalho é vista no Capítulo 5, onde se apresenta uma contribuição com outro trabalho de dissertação em que foi necessária a utilização de modelos de propagação *indoor* para avaliação de desempenho de serviço *VoIP*.

No Capítulo 5 é apresentada também uma sugestão de trabalhos futuros, no intuito de dar continuidade a este.

2 UMA ABORDAGEM ESTATÍSTICA

Os modelos de propagação em Rádio Freqüência (RF) são tratados através de modelos estatísticos. De forma geral é considerada a distribuição de Rayleigh em ambientes móveis para caracterizar o comportamento do envelope do sinal em ambientes com múltiplos percursos. A distribuição de Weibull será aqui considerada para caracterizar o comportamento do sinal recebido em ambientes *indoor*. Neste capítulo o intuito é tratar aspectos gerais da modelagem do sinal, pertinente para a análise dos resultados experimentais obtidos.

2.1 Distribuição de Rayleigh

O sinal recebido por um móvel raramente terá um linha de visada direta para o transmissor (*LOS – Line-Of-Sight*). O sinal recebido será a soma dos sinais formados pelo sinal transmitido disperso por obstruções aleatórias, impondo diferentes atenuações e diferenças de fase no sinal resultante. Este fenômeno é conhecido como propagação de multi-percurso. É razoável supor-se que as fases das ondas dispersas estão uniformemente distribuídas de 0 a 2π radianos e que as amplitudes e as fases são estatisticamente independentes entre elas. Consequentemente podemos esperar que em um determinado instante as ondas estejam em fase, produzindo uma amplitude elevada (interferência construtiva), enquanto que em outro instante as mesmas estejam defasadas, produzindo uma amplitude menor (interferência destrutiva). Trabalhando com estas afirmações, chega-se à função densidade de probabilidade de Rayleigh, como mostrado na Equação 1 (YACOUB, 1993).

$$p(r) = \frac{r}{\sigma_r^2} e^{-\left(\frac{r}{\sigma_r\sqrt{2}}\right)^2} \quad (1)$$

Uma interessante visão da obtenção da distribuição de Rayleigh é dada em (AGILENT TECHNOLOGIES, 2006). A Figura 1 mostra o efeito da variação dos componentes em fase I (*in-phase*) e em quadratura Q (*quadrature*) que representam as perturbações na intensidade de sinal através de duas Gaussianas, ocasionando a flutuação do envelope com a distribuição de Rayleigh.

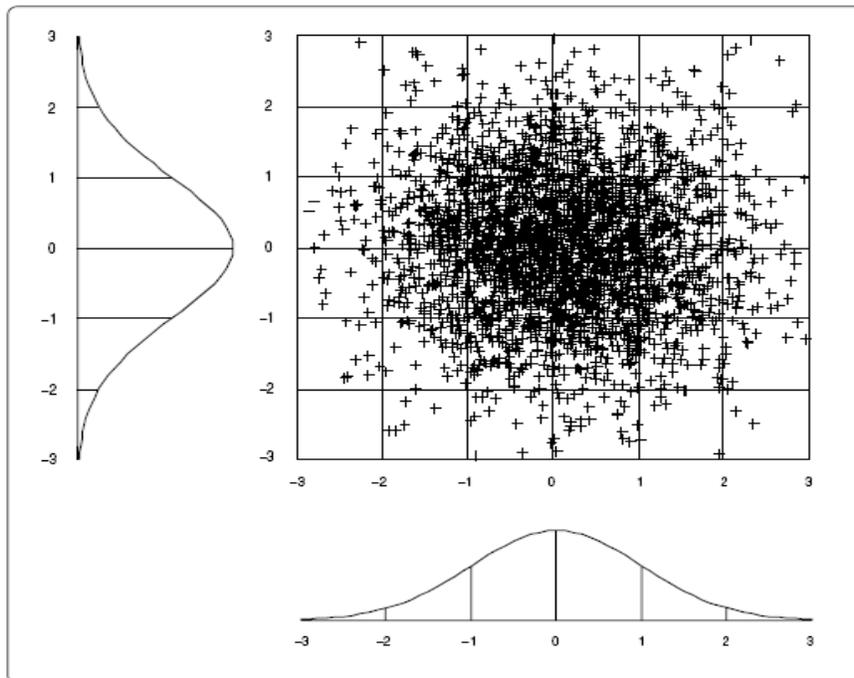


Figura 1 - Ruído com Gaussianas independentes nos componentes I e Q em um sinal de banda passante
Fonte: Agilent Technologies (2006)

Na Equação 1, σ_r é o desvio padrão na função densidade de probabilidade da Gaussiana. O desvio padrão de Rayleigh é $\sigma_r \sqrt{2 - \frac{\pi}{2}}$

A representação por Rayleigh das flutuações do sinal é a forma clássica de considerar os fenômenos de propagação com múltiplos percursos. A severidade do

meio é representada pela variação do desvio padrão das Gaussianas, que reflete na variância do envelope, podendo ser também chamado de fator de escala. Assim, a representação da severidade do meio se dá somente através da variação do desvio padrão das Gaussianas em fase e quadratura.

2.2 Distribuição de Weibull

Como será visto nos resultados experimentais obtidos, a distribuição de Rayleigh não foi a mais adequada para representar o comportamento das flutuações do sinal. Nestes casos a distribuição que mais se adequou foi a de Weibull que apresenta dois graus de liberdade, sendo um equivalente ao fator de escala da distribuição de Rayleigh e um segundo que representa o fator de forma. Assim, a distribuição de Weibull apresenta um grau de flexibilidade maior que a distribuição de Rayleigh para representar os fenômenos de propagação em ambientes *indoor*, que foi o objetivo do trabalho.

A distribuição de Weibull está apresentada na Equação 2, onde é possível identificar na mesma os dois graus de liberdade para representação dos fenômenos: α , chamado de fator de forma e β , chamado de fator de escala (LAW; KELTON, 1991).

$$f(x) = \frac{\alpha}{\beta^\alpha} x^{\alpha-1} e^{-\left(\frac{x}{\beta}\right)^\alpha} \quad (2)$$

Interessante observar que quando consideramos $\alpha = 2$ a distribuição de Weibull se transforma na distribuição de Rayleigh, pois $p(r) = f(x)$ e $\beta = \sigma_r \sqrt{2}$, obtendo a função densidade de probabilidade de Rayleigh como mostra a Equação 1.

A Equação 3 é a função distribuição cumulativa de probabilidade derivada da Equação 2 da distribuição de Weibull.

$$F(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x}{\beta}\right)^\alpha} \quad (3)$$

As Equações 2 e 3 estão relacionadas como mostra a Equação 4.

$$f(x) = \frac{d}{d(x)} F(x) \quad (4)$$

Para a caracterização dos fenômenos através dos experimentos devemos trabalhar a Equação 3, conforme se pode ver abaixo, onde será obtida a Equação 5. O objetivo é identificar a relação de $F(x)$ com α e β , como mostrado nas passagens abaixo, colocadas para clareza do resultado pretendido.

$$1 - F(x) = e^{-\left(\frac{x}{\beta}\right)^\alpha}$$

$$1 - F(x) = \frac{1}{e^{\left(\frac{x}{\beta}\right)^\alpha}}$$

$$\frac{1}{1 - F(x)} = e^{\left(\frac{x}{\beta}\right)^\alpha}$$

$$\ln\left(\frac{1}{1 - F(x)}\right) = \ln\left(e^{\left(\frac{x}{\beta}\right)^\alpha}\right)$$

$$\ln\left(\frac{1}{1 - F(x)}\right) = \left(\frac{x}{\beta}\right)^\alpha$$

$$\ln\left\{\ln\left[\frac{1}{(1 - F(x))}\right]\right\} = \ln\left[\left(\frac{x}{\beta}\right)^\alpha\right]$$

$$\ln\left\{\ln\left[\frac{1}{(1 - F(x))}\right]\right\} = \alpha \ln\left[\left(\frac{x}{\beta}\right)\right]$$

$$\ln\left\{\ln\left[\frac{1}{(1 - F(x))}\right]\right\} = \alpha[\ln(x) - \ln(\beta)]$$

Assim, obtemos a Equação 5 abaixo que será útil para estimativa dos resultados experimentais, encontrando os parâmetros α e β .

$$\ln \left\{ \ln \left[\frac{1}{(1 - F(x))} \right] \right\} = \alpha \ln(x) - \alpha \ln(\beta) \quad (5)$$

A distribuição de Weibull tem inúmeras aplicações. Uma aplicação onde a mesma tem grande utilização é na análise estatística de peças defeituosas em uma linha de produção.

Nesta aplicação, uma estimativa para o cálculo de $F(x)$ para cada ponto x é realizada usando-se o que chamamos de *median rank*, como mostra a Equação 6 (ROMEY, 2007).

O *median rank* é usado para se obter uma estimativa da não confiabilidade para cada falha em aplicações de linhas de montagem. É o valor que a verdadeira probabilidade de falha, $F(x_j)$, deveria ter na j -ésima falha de uma amostra de N unidades a nível de 50% de confiança. A Equação 6 é conhecida como aproximação de Benard (RELIASOFT CORPORATION, 2007).

$$F(x) \cong \frac{\text{Rank}(x) - 0,3}{n + 0,4} \quad (6)$$

Na Equação 6, n é considerado o número total de medições e $\text{Rank}(x)$ o valor da medida correspondente à posição x , quando os valores coletados das medidas forem disponibilizados em ordem crescente.

Se utilizarmos as Equações 7 e 8, obteremos uma função linear de u em função de t , como mostra a Equação 9.

$$u = \ln \left\{ \ln \left[\frac{1}{\left(1 - \frac{\text{Rank}(x) - 0,3}{n + 0,4} \right)} \right] \right\} \quad (7)$$

$$t = \ln(x) \quad (8)$$

$$u = at + b \quad (9)$$

Desta forma, poderemos avaliar tanto o parâmetro de forma (α), bem como o parâmetro de escala (β), como podemos ver nas Equações 10 e 11.

$$\alpha = a \text{ inclinação da reta} \quad (10)$$

$$b = -a \ln \beta$$

$$\ln \beta = -\left(\frac{b}{a}\right)$$

$$\beta = e^{-\left(\frac{b}{\alpha}\right)} \quad (11)$$

Com estes parâmetros avaliados, caracterizamos a distribuição de Weibull.

2.3 Modelos de distribuição de Weibull e de Rayleigh

O modelo de distribuição de Weibull conforme visto na Equação 2 leva em consideração dois graus de liberdade; ou seja, esse modelo é função das duas variáveis: fator de forma (α) e fator de escala (β).

Se construirmos gráficos com curvas de distribuição de Weibull, tomando-se $\alpha = 5.3389$, e assumindo diferentes valores de β (1.0, 1.1 e 1.3), obteremos os resultados apresentados na Figura 2.

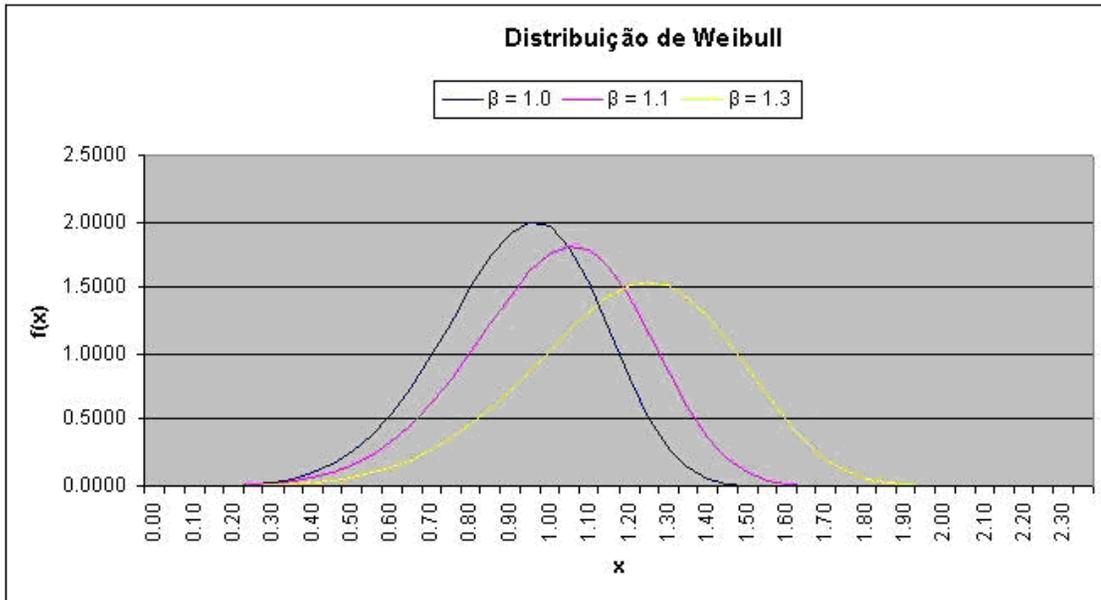


Figura 2 - Distribuições de Weibull para diferentes valores de β , com $\alpha = 5.3389$.

Este valor de $\alpha = 5,3389$ utilizado para a produção do gráfico da Figura 2 foi, como veremos adiante, um dos valores do resultado deste trabalho.

Quando na distribuição de Weibull fixamos o fator de forma (α) em dois (2), obteremos a distribuição de Rayleigh. Ou seja, a distribuição de Rayleigh nada mais é que um caso particular da distribuição de Weibull.

Podemos observar nesta figura que o fator de escala (β) diz respeito à abertura da curva; ou seja, é a medida mais comum da dispersão estatística (desvio padrão).

No caso em que $\alpha = 2$, o fator de escala e o desvio padrão se relacionam como apresentado em 2.2 ($\beta = \sigma_r \sqrt{2}$); ou seja, teremos uma composição de duas

Gaussianas com média zero (0) e desvio padrão $\sigma_r = \frac{\beta}{\sqrt{2}}$, a qual caracteriza a distribuição de Rayleigh.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta fase são apresentados:

- as ferramentas estatísticas usadas para se trabalhar os dados coletados,
- o ambiente com os equipamentos utilizados,
- e a metodologia que foi aplicada para o desenvolvimento deste trabalho.

Considera-se aqui também todo o desenvolvimento da atividade para a obtenção dos parâmetros desejados para se efetivar a caracterização da distribuição de Weibull.

3.1 Ferramentas estatísticas

Foram necessárias a montagem de tabelas e a ordenação dos dados coletados, a construção de gráficos com os dados destas tabelas, gráficos e cálculos estatísticos, tais como estatística descritiva e média móvel para que o trabalho pudesse ser realizado. Os Anexos registram as medidas com os dados coletados, a montagem dos gráficos, a média móvel, a estatística descritiva e os histogramas para todos os testes realizados.

3.2 Ambiente e equipamentos

O ambiente escolhido foi a praça de alimentação dentro da própria universidade, com a existência de mesas de alumínio espalhadas pela área coberta, pessoas se movimentando e paredes servindo como obstáculos à propagação do sinal de Rádio Freqüência (RF).

Um robô com velocidade e intervalos de medições programáveis foi usado como dispositivo móvel para a coleta dos dados.

Um *Access Point* (AP), operando a 2,4 GHz, e uma antena setorial de 90°, com *down tilt* de 5% foram fixados em um dos cantos da área de testes, enquanto o robô se movimentava a uma velocidade fixa, coletando os valores de potência recebidos.

A Figura 3 mostra o digrama de radiação desta antena

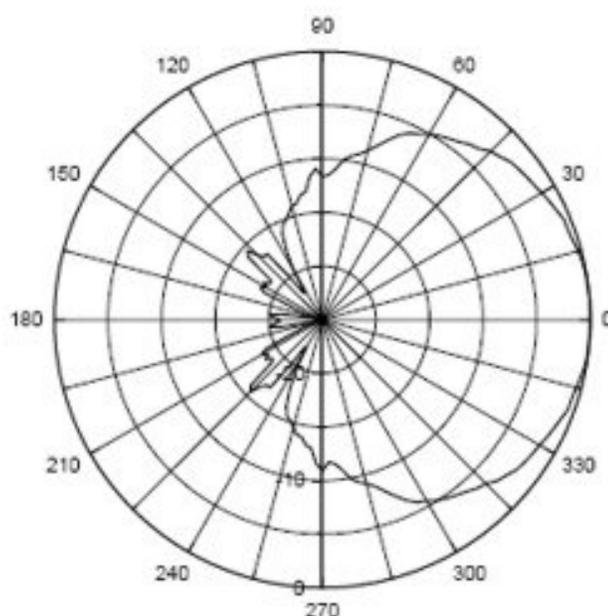


Figura 3 - Diagrama de radiação da antena do *Access Point*.
Fonte: TSM Antennas (2006a).

A velocidade do robô foi fixada em 1,62 metros/minuto e o intervalo entre leituras dos valores foi configurado em 200 ms; ou seja, uma amostra a cada 0,3 cm.

Foi utilizada uma antena de recepção omnidirecional montada no robô, cujo diagrama de radiação pode ser visto na Figura 4.

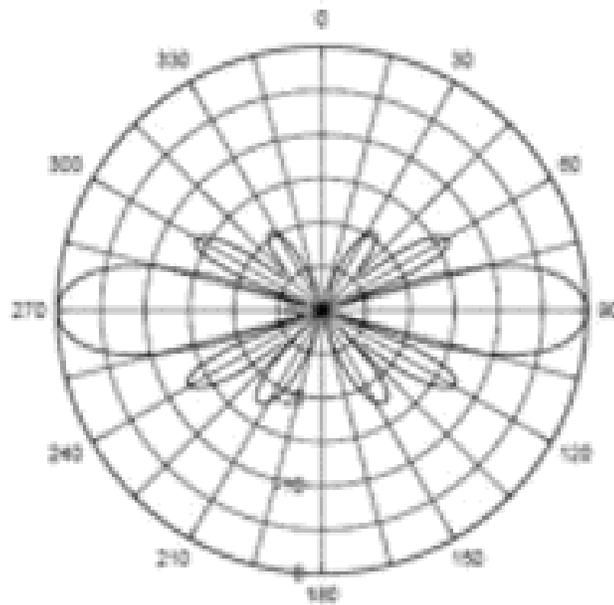


Figura 4 – Diagrama de radiação da antena montada sobre o robô.
Fonte: TSM Antennas (2006b)

A Figura 5 mostra o robô utilizado para a coleta dos dados.



Figura 5 - Robô usado como dispositivo móvel.

A Figura 6 mostra em plano a área utilizada para a realização das medições, mostrando os vários percursos realizados pelo robô, o posicionamento do AP e os elementos constituintes do ambiente.

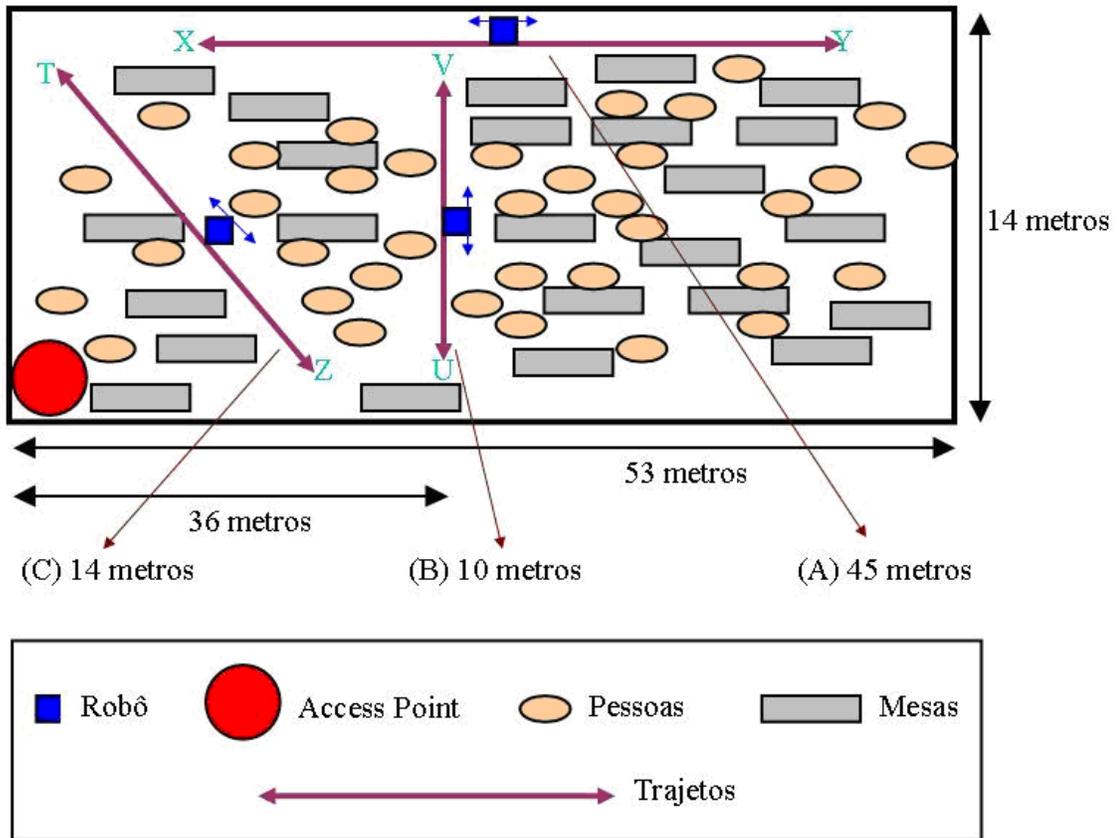


Figura 6 - Área utilizada para as medições com os elementos constituintes.

Três tipos de testes foram realizados para a coleta dos dados com um total de seis medições.

O primeiro teste foi realizado com o robô radialmente afastando-se ou aproximando-se do AP, cobrindo uma distância de 45 metros. Resultaram-se duas medidas práticas, tomadas nos sentidos X-Y e Y-X na direção (A), como mostrado na Figura 4.

O segundo tipo de medição foi realizado a uma distância de 36 metros em relação ao AP, cobrindo uma faixa de 10 metros, como mostrado na Figura 4 (direção (B)). Resultaram-se duas medidas: sentidos U-V e V-U.

O último teste foi realizado com o robô movimentando-se em ambos os sentidos, cobrindo medições numa faixa de 14 metros, como mostrado na Figura 4 (direção (C)). Com isso, duas novas medições puderam ser obtidas, sentidos Z-T e T-Z.

A trajetória do robô nesta última medição foi realizada de tal forma que os pontos de início e fim do percurso tivessem as mesmas distâncias relativas ao AP.

3.3 Coleta de dados

Os diferentes cenários serão apresentados nas seções seguintes. Os sinais de potência em *dBm* recebidos pelo robô foram registrados e armazenados. Considerando-se uma impedância de 1Ω , estes valores foram convertidos para *Volts*. Com estes dados, pôde-se colocar em um gráfico o sinal de voltagem em função do tempo.

O sinal de voltagem recebido pelo robô quando o mesmo se movimentava na direção (B), sentido U-V pode ser visto Figura 7.

Montagens de gráficos similares foram obtidas para todos os casos descritos em 3.2.

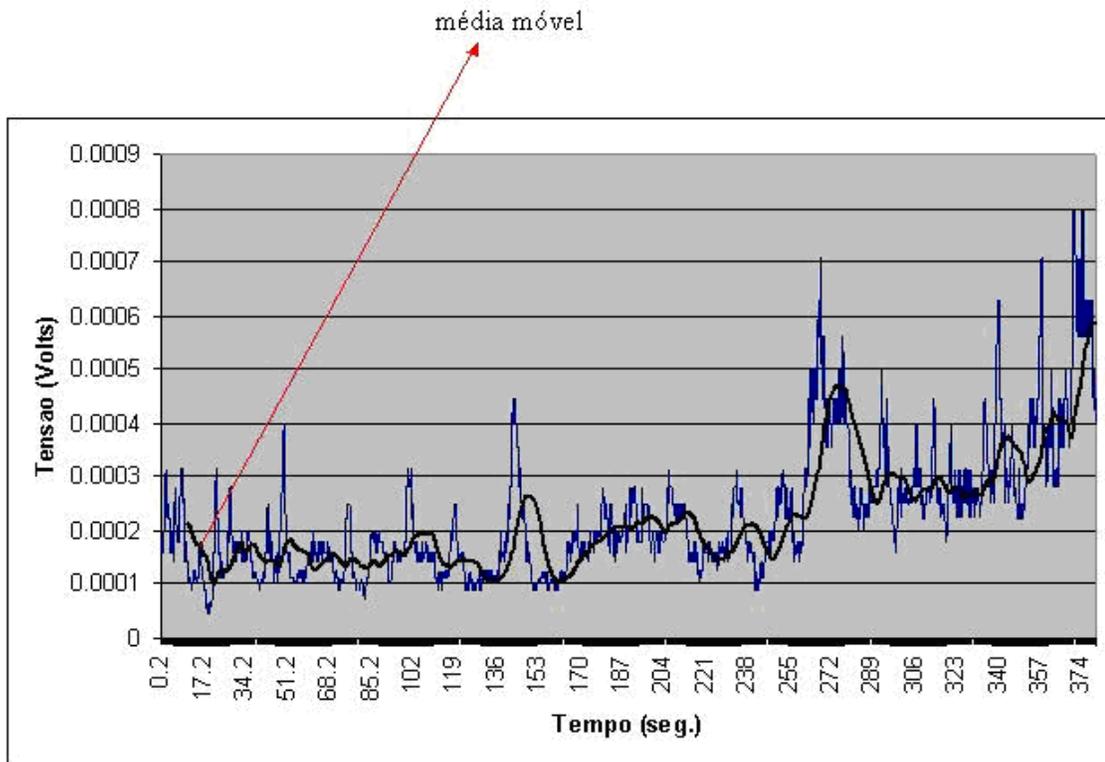


Figura 7 – Tensão (Volts) recebida pelo robô em movimento.

3.4 Metodologia

Conforme descrito, o objetivo do trabalho é a caracterização da distribuição de Weibull em ambientes *indoor* com características *flat fast fading*. *Flat* aqui significando que as frequências associadas aos sinais devido ao fenômeno *multipath* sofram a mesma atenuação.

O efeito de multi-percurso caracteriza-se pela soma dos sinais formada pelo sinal transmitido disperso por obstruções aleatórias vinculadas à aleatoriedade do meio.

Como podemos observar na Figura 7 existe um componente de voltagem de baixa frequência presente no sinal recebido pelo robô em movimento. Este componente de baixa frequência é resultante da atenuação do ambiente e será minimizado através

da média móvel. Quando um dispositivo está em movimento afastando-se ou aproximando-se do emissor de RF (Rádio Freqüência), o sinal recebido é atenuado. Nosso objetivo é determinar a flutuação do envelope referente ao *fast fading*, subtraindo a variação de baixa freqüência. A Figura 8 ilustra bem o item exposto.

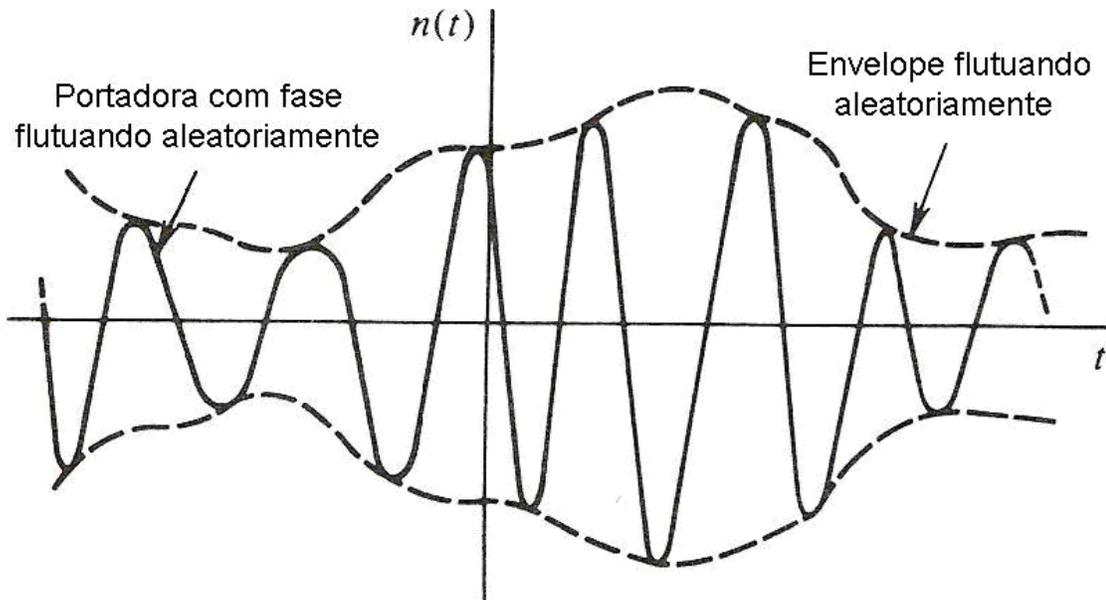


Figura 8 - Efeitos de *fading*.

Fonte: Adaptado de Peebles Junior (1987).

Uma média móvel foi aplicada a estes dados de voltagem coletados; ou seja, a mesma foi aplicada para minimizar o efeito da variação da intensidade do sinal medido. Uma breve explicação sobre a média móvel será apresentada adiante no Item 3.5.

Quando nos referimos aqui aos dados de voltagem coletados, estaremos nos referindo aos valores de potência em *dBm* registrados pelo robô em movimento e que foram convertidos para *Volts* considerando-se uma impedância de 1Ω , como descrito no item 3.3.

A média móvel corresponde aos sinais de baixa freqüência que em seguida foram subtraídos do sinal original.

3.5 Média móvel

Uma excelente fonte de informação sobre média móvel pode ser encontrada em (YACOUB, 1993, p. 153), cujo tópico refere-se à separação do *slow* e do *fast fading*.

A i -ésima componente móvel com $(2k + 1)$ amostras, sendo k inteiro, de um conjunto de valores d pode ser expressa da seguinte forma:

$$m_i = \frac{1}{2k + 1} \sum_{j=-k}^k d_{i+j}$$

Para entendermos o que é a média móvel, vamos fazer uso da Figura 9 abaixo.

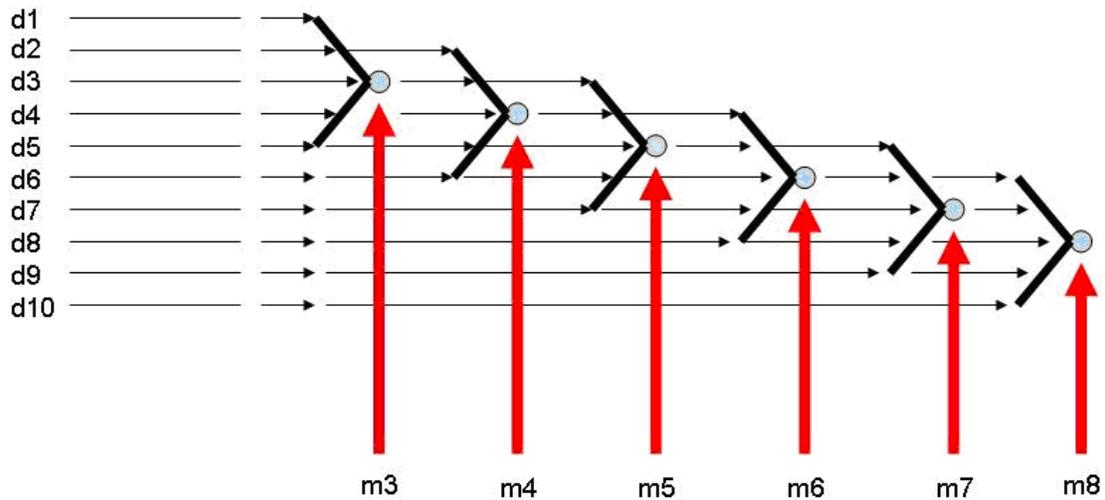


Figura 9 – Média Móvel.

Vamos supor que tenhamos um conjunto de medidas $\{d1, d2, d3, \dots, d10\}$. Vamos supor também que queiramos uma média móvel com cinco (5) pontos. Neste caso, $2k + 1 = 5$.

Observando a Figura 9, fazemos a média aritmética dos cinco (5) primeiros valores deste conjunto para o cálculo da primeira amostra móvel; ou seja:

$$m3 = (d1+d2+d3+d4+d5)/5$$

Para o cálculo da segunda amostra fazemos:

$$m4 = (d2+d3+d4+d5+d6)/5$$

E assim sucessivamente até finalizarmos com o sexto valor de amostra:

$$m8 = (d6+d7+d8+d9+d10)/5$$

3.6 Estatística da flutuação de envelope referente ao *fast fading*

O objetivo é determinar a flutuação do envelope referente ao *fast fading*, subtraindo a variação de baixa frequência.

A variação do sinal é medida em *dBm*; portanto, é necessário fazer-se a conversão para a variação de tensão. Para encontrarmos esta variação, é utilizada a passagem abaixo encontrada em (LEE, 1995).

Segue os passos para se encontrar a variação do envelope referente ao *fast fading*:

- Medida coletadas de variação de potência em *dBm* – $P[dBm]$
- Conversão para potência em *Watt* – $P[W]$
- Cálculo da tensão usando resistor de 1Ω – $E[V]$
- Média da tensão (média móvel) – $E_m[V]$
- Conversão da tensão média para *dBμV* – $E_m[dBμV]$
- Conversão da tensão para *dBμV* – $E[dBμV]$
- Variação do *fast fading* – $E_f[dB] = E[dBμV] - E_m[dBμV]$
- Conversão desta variação de *dB* para linear – E_f

E_f é a variação do envelope referente ao *fast fading* que será caracterizado.

$$\begin{array}{ccccccc}
 P[dBm] & - & P[W] & - & E[V] & - & E_m[V] \\
 & & & & \downarrow & & \downarrow \\
 & & & & E[dB\mu V] & - & E_m[dB\mu V] & - & E_f[dB] & - & E_f
 \end{array}$$

Onde E_m é a média e E_f é a flutuação do envelope relativa ao *fast fading*.

Na Tabela 1 podemos ver como foi montada a planilha para montagem do gráfico, com uma breve explicação sobre cada uma das colunas da mesma.

Tabela 1 - Montagem da planilha.

Tempo(s)	$P(dBm)$	$P(W)$	Tensão $E(V)$	Méd. Móvel $E_m(V)$	Tensão $E(dBuV)$	Méd. Móvel $E_m(dBuV)$	<i>Fast Fading</i> $E_f(dB)$	E_f
26.2	-48	1.58489E-08	0.000125893	0.000165897	42	44.39678281	-2.396782814	0.758858598
26.4	-48	1.58489E-08	0.000125893	0.000167492	42	44.47986489	-2.479864886	0.751634586
26.6	-48	1.58489E-08	0.000125893	0.000169086	42	44.56215979	-2.562159787	0.744546816
26.8	-48	1.58489E-08	0.000125893	0.000171032	42	44.66155729	-2.661557293	0.736075115
27	-48	1.58489E-08	0.000125893	0.00017247	42	44.73425031	-2.734250315	0.72994054

A primeira coluna foi preenchida com as referências de tempo em segundos; ou seja, o instante em que o valor de potência recebido foi lido e armazenado.

Estes valores de potência, correspondentes à segunda coluna da Tabela 1, estão em *dBm*.

Os valores de potência em *dBm* foram convertidos a *Watt* e inseridos na coluna 3.

Uma conversão para a tensão em *Volts*, tendo como base uma impedância de 1Ω foi efetuada como mostra a coluna 4 da tabela.

Fazendo-se uso de (YACOUB, 1993, p. 153), estimou-se um número de pontos para a média móvel associada a cada uma das trajetórias.

Os números de pontos estimados foram 261, 55, 55 e 77 para as medidas relativas às trajetórias indicadas na Figura 4 (X-Y, U-V e T-Z), respectivamente. Cada linha da coluna 5 desta tabela foi montada usando-se a média dos valores da coluna 4, calculada sobre o número de pontos estimado para a média móvel.

Os valores inseridos na coluna 6 da tabela nada mais são do que a conversão de *Volts* para $dB\mu V$ dos valores de voltagem da coluna 4.

Da mesma forma os valores de média móvel da coluna 5, em *Volts*, foram convertidos para $dB\mu V$, como mostrado na coluna 7.

A razão para esta conversão tem o intuito de se eliminar o componente de baixa frequência. Para que isto possa ser feito, uma diferença entre os sinais de tensão e média móvel, ambos em $dB\mu V$, deve ser feito, resultando numa unidade de *dB*. Estes valores estão apresentados na coluna 8 da Tabela 1.

Como os valores da coluna 8 nos mostram os valores em *dB* de uma relação de voltagem, a coluna 9 nos mostra os valores da flutuação da tensão do envelope, calculados usando-se a relação abaixo.

$$dB = 20\log(tensão)$$

Através do uso da estatística descritiva (termo utilizado pelo aplicativo *Excel*² da *Microsoft*), tendo como base a coluna 9 da tabela, o maior e o menor valor presentes em todas as medidas coletadas puderam ser registrados. Fazendo-se uso dos mesmos, definiram-se intervalos de blocos de valores para a montagem dos gráficos dos gráficos de densidade e de distribuição cumulativa de probabilidade para as seis medições realizadas. Esta atividade teve o objetivo de observarmos visualmente se os gráficos obtidos seguiam ou não o modelo de distribuição de Weibull.

² *Excel*[®] é marca registrada da *Microsoft*.

A Figura 10 mostra um dos gráficos de densidade de probabilidade (azul) e de distribuição cumulativa de probabilidade (rosa) referente a uma das seis medições.

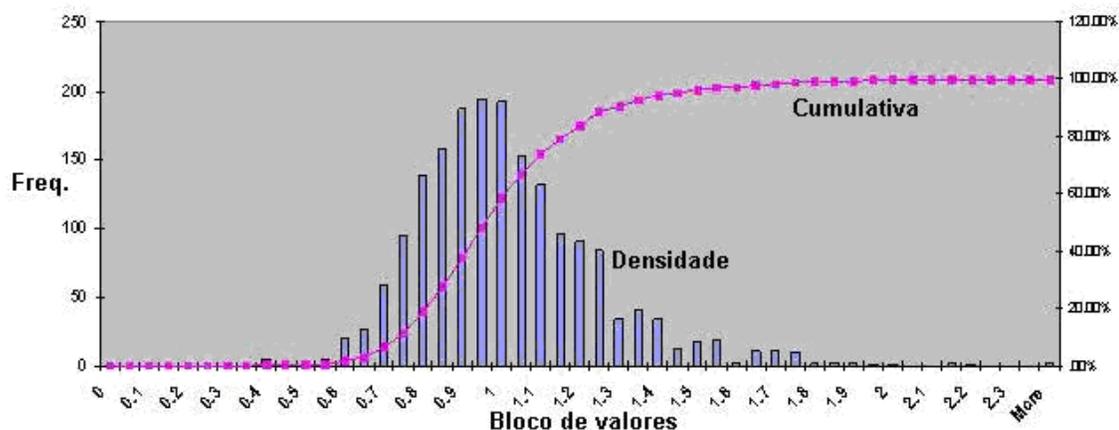


Figura 10 - Distribuição cumulativa e densidade de probabilidade.

A análise visual nos mostrou que as formas dos gráficos seguiam, pelo menos aparentemente, a distribuição de Weibull.

Para a estimativa dos valores de α (fator de forma) e β (fator de escala), os valores de alta frequência (*fast fading*), tomados da Tabela 1, coluna 9, foram ordenados em ordem crescente.

Os resultados foram montados como mostra a Tabela 2.

Tabela 2 - Ordenação dos valores de *fast fading*.

Posição	Valores ordenados
1	0.354171028
2	0.354795127
3	0.356289962
4	0.35798226
5	0.396688638

A Tabela 3 mostra os dados em planilha prontos para que os parâmetros de forma e de escala fossem avaliados.

Tabela 3 - Dados finais para estimativa dos parâmetros de forma e de escala.

Posição	A = Valores ordenados	$\ln(A)$	$P_x = (\text{Rank}(x) - 0,3)/(n + 0,4)$	$B = \ln(1/(1-P_x))$	$\ln(B)$
1	0.354171028	-1.037975354	0.000379322	0.000379394	-7.876936588
2	0.354795127	-1.036214764	0.000921209	0.000921634	-6.989362302
3	0.356289962	-1.032010381	0.001463097	0.001464169	-6.526467567
4	0.35798226	-1.027271846	0.002004985	0.002006998	-6.211115184
5	0.396688638	-0.924603594	0.002546873	0.002550122	-5.971614036

Ou seja, com os dados desta tabela pôde-se construir o gráfico tendo a coluna 6 ($\ln(B)$) como função da coluna 3 ($\ln(A)$).

Deveríamos esperar então uma função bem aproximada de uma reta, conforme já delineado.

Toda esta análise foi baseada na obra de Romeu (2007).

4 RESULTADOS

Como resultado da observação do gráfico construído obteve-se a curva em azul como mostrado na Figura 11.

Através da aplicação de uma regressão linear aos dados da curva azul, foi obtida a reta de cor preta.

Na Figura 11 podemos observar também a equação da reta gerada pela regressão linear.

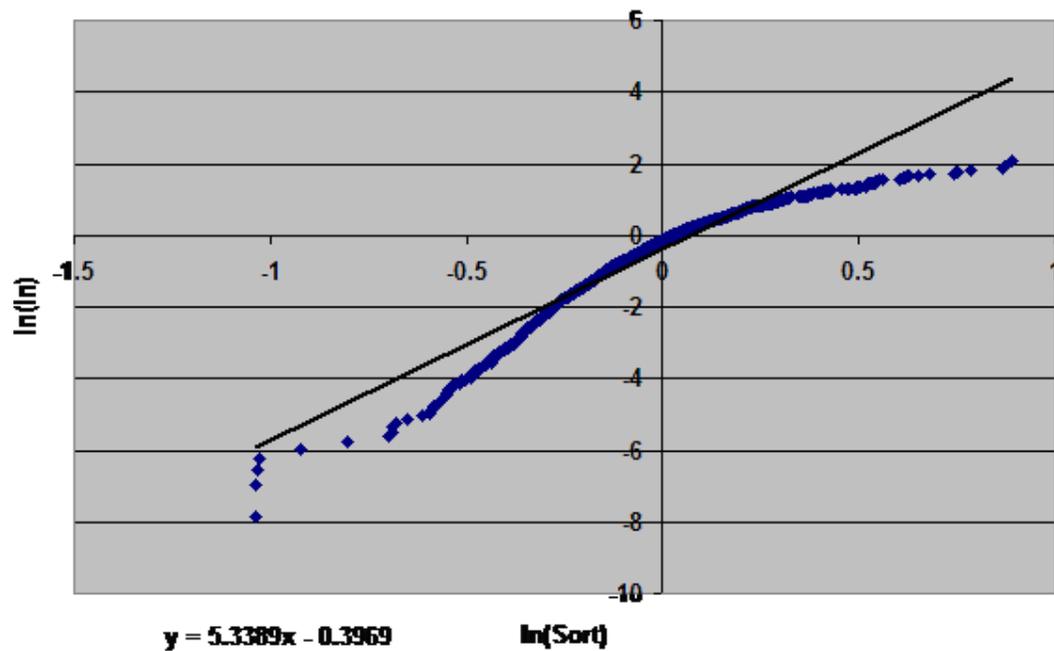


Figura 11 - Regressão Linear.

A Equação 12 descreve a função desta reta.

$$y = 5,3389x - 0,3969 \quad (12)$$

Como podemos ver pela Equação 10, o fator de forma (α) é a inclinação desta reta, ou seja,

$$\alpha = 5,3389$$

Tendo-se o fator de forma, podemos agora calcular o fator de escala (β), usando-se a Equação 11.

$$\beta = e^{-\left(\frac{b}{\alpha}\right)}$$

Ou seja, tomando-se $\alpha = 5,3389$ e $b = -0,3969$ (ponto de intersecção da reta com o eixo vertical),

$$\beta = 1,0772$$

Este mesmo procedimento foi usado para as outras cinco medições realizadas.

Um resumo para todas as medições efetuadas pode ser visto na Tabela 4, onde se mostram os vários cenários com os valores dos parâmetros de forma (α) e de escala (β) estimados.

A última coluna desta tabela nos mostra os intervalos de medição para cada cenário.

Tabela 4 - Resumo dos valores estimados em função da posição do robô movimentando-se em relação ao AP.

	Fator de escala (β)	Fator de forma (α)	Intervalo de medição (segundos)
Trajatória (A) – sentido X-Y	1.0969	3.6301	0.2-1801
Trajatória (A) – sentido Y-X	1.0904	3.8714	0.2-1801
Trajatória (B) – sentido U-V	1.0772	5.3389	0.2-344.4
Trajatória (B) – sentido V-U	1.0806	5.0386	0.2-379.8
Trajatória (C) – sentido T-Z	1.0900	4.3072	0.2-532
Trajatória (C) – sentido Z-T	1.0870	4.4376	0.2-532

As análises seguintes mostram os resultados obtidos para todas as medições realizadas.

Se pensarmos em utilizar o modelo de distribuição de Rayleigh aplicável a ambientes *indoor*, um comparativo entre a distribuição de Weibull e a de Rayleigh com os resultados experimentais é mostrado mais à frente para a distribuição cumulativa de probabilidade para os seis casos, onde se avaliam os erros incorridos ao usarem-se como modelos de propagação estatísticos estas distribuições.

Mostram-se também gráficos, onde se visualizam a forma da densidade de probabilidade para os valores experimentais e para os valores de distribuições de Rayleigh e Weibull.

Para a construção dos gráficos da distribuição de Weibull, tanto para densidade de probabilidade, bem como para a distribuição cumulativa de probabilidade, os valores dos parâmetros de forma (α) e de escala (β) utilizados foram os estimados como acima descrito.

Para a distribuição de Rayleigh, foram utilizados os mesmos parâmetros de escala (β) estimados. O valor utilizado neste caso para o parâmetro de forma (α) em todos os casos foi fixado em dois (2).

4.1 Resultados relativos aos testes realizados – movimentação X-Y

A Figura 12 nos mostra as curvas de função de densidade de probabilidade e de distribuição cumulativa de probabilidade para as medições realizadas com o robô afastando-se radialmente em relação ao AP.

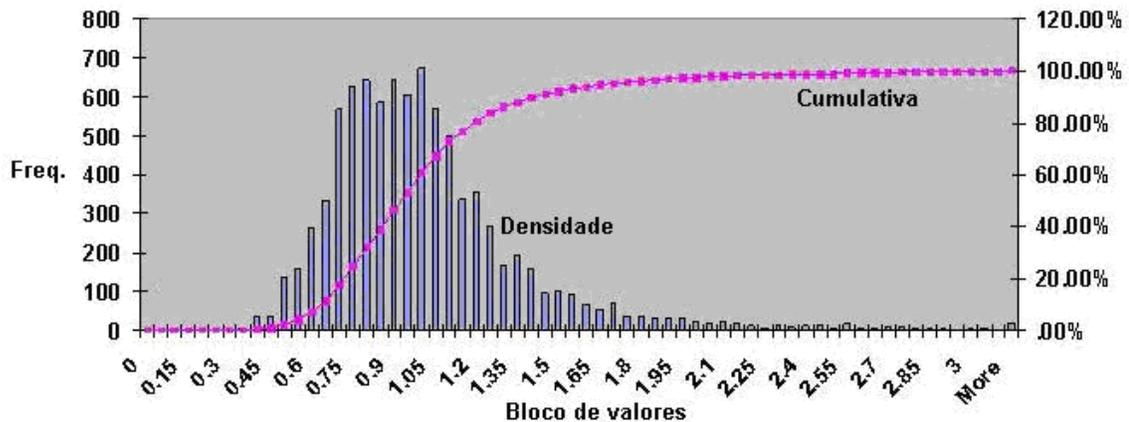


Figura 12 - Movimentação na direção (A): sentido X-Y.

Fazendo-se uso da estatística descritiva, obtivemos o valor máximo e mínimo de voltagem da Tabela 1, coluna 9.

Com estes valores de máximo e mínimo, uma tabela foi montada, onde uma das colunas foi preenchida com os valores de voltagem e uma segunda coluna com os intervalos de valores com variação de 0,05 em 0,05 μV .

Usando-se de histogramas, os valores de distribuição cumulativa e de densidade de probabilidade foram registrados.

A Figura 13 nos mostra um comparativo entre os valores experimentais e os valores para as distribuições de Weibull e Rayleigh para o caso da distribuição cumulativa de probabilidade.

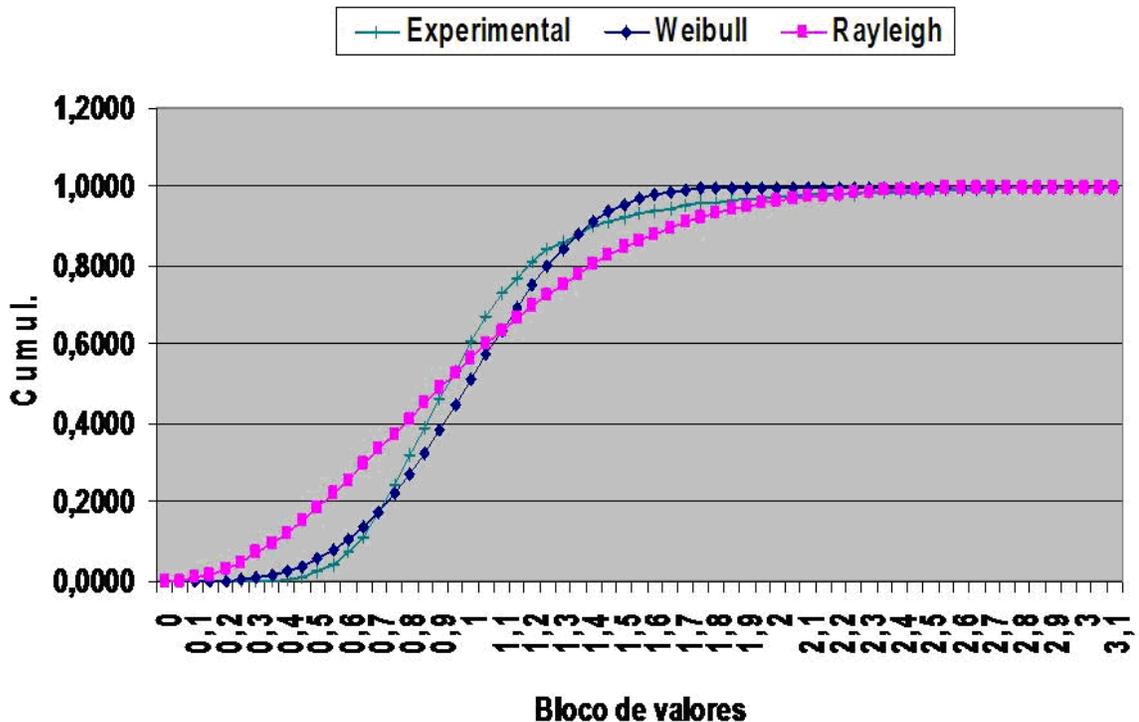


Figura 13 - Movimentação na direção (A) - sentido X–Y: Comparativo entre valores experimentais com as distribuições de Weibull e Rayleigh.

A curva azul é a curva de Weibull com valores de $\alpha = 3,6301$ e $\beta = 1,0969$ usando-se a Equação 3.

A curva verde nos dá os valores das medidas de voltagem em função dos blocos de valores, como utilizada na montagem do gráfico para o histograma.

A curva rosa foi gerada usando-se valores de $\alpha = 2,000$ e $\beta = 1,0969$, que é a distribuição de Rayleigh, e utilizando-se a mesma Equação 3.

A Figura 14 superior nos mostra o gráfico da função densidade de probabilidade para os valores experimentais de voltagem, cujos valores usados nos eixos X e Y do mesmo foram tomados a partir do histograma gerado.

Da mesma forma, utilizando-se os parâmetros de forma ($\alpha = 3,6301$) e de escala ($\beta = 1,0969$) estimados e inseridos na Equação 2, a Figura 14 inferior nos mostra a função densidade de probabilidade para a distribuição de Weibull na cor azul.

Utilizando $\alpha = 2$ como fator de forma e o mesmo valor para o fator de escala ($\beta = 1,0969$) na Equação 2, a Figura 14 inferior nos mostra também o gráfico de distribuição de Rayleigh na cor vermelha.

Como podemos observar a forma do gráfico para a distribuição de Weibull se aproxima bem mais à forma do gráfico dos valores experimentais que a distribuição de Rayleigh.

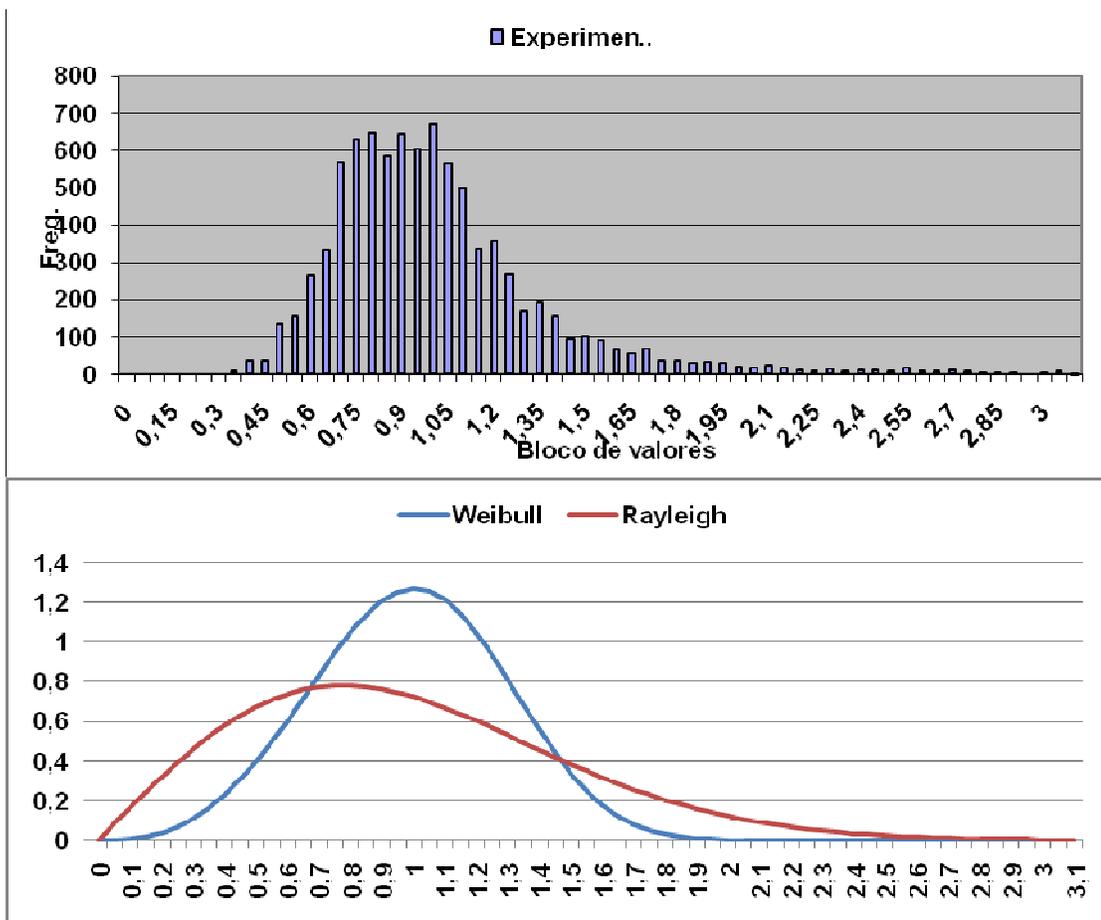


Figura 14 - Movimentação na direção (A) - sentido X-Y: Comparativo entre valores experimentais com as distribuições de Weibull e Rayleigh.

A Tabela 5 mostra alguns valores dos erros incorridos para a distribuição cumulativa de probabilidade quando comparamos as distribuições de Weibull e de Rayleigh com

os valores experimentais. Não devemos esquecer que a distribuição de Rayleigh é aplicável a ambientes móveis e aqui estamos tratando de ambientes *indoor* para comunicação de dados.

A comparação realizada teve o intuito de se mostrar que um modelo de distribuição mais apropriado deverá ser utilizado para a propagação em ambientes *indoor*. Para uma análise investigatória inicial, usamos como referência para comparação a distribuição de Rayleigh, a qual é aplicável a ambientes móveis e não a ambientes *indoor* que é o caso deste trabalho.

Os valores completos dos erros incorridos podem ser vistos nos Anexos.

Tabela 5 – Erros incorridos na distribuição cumulativa para as distribuições de Weibull e de Rayleigh.

Erro Weibull	Erro Rayleigh
...	...
-3.32%	-18.59%
-2.82%	-18.54%
-0.20%	-15.86%
2.54%	-12.56%
4.93%	-9.09%
6.16%	-6.27%
7.65%	-2.75%
8.40%	0.38%
9.78%	4.41%
9.94%	7.34%
9.46%	9.63%
7.40%	10.21%
5.99%	11.19%
4.09%	11.33%
1.64%	10.51%
0.10%	10.14%
...	...

Pelos resultados obtidos no caso em que o robô afasta-se radialmente do AP, observamos que a distribuição de Weibull seria uma aproximação inicial para uma modelagem de propagação em ambientes *indoor*.

Neste caso o erro calculado máximo para os valores de distribuição cumulativa foi da ordem de 10% para a distribuição de Weibull relativamente aos valores experimentais, comparado a erros da ordem de 18% para a distribuição de Rayleigh relativamente aos mesmos valores experimentais.

4.2 Resultados relativos aos testes realizados – movimentação Y-X

A Figura 15 nos mostra as curvas de função de densidade de probabilidade e de distribuição cumulativa de probabilidade para as medições realizadas com o robô aproximando-se radialmente em relação ao AP.

As tarefas aqui realizadas foram as mesmas descritas no item 4.1.

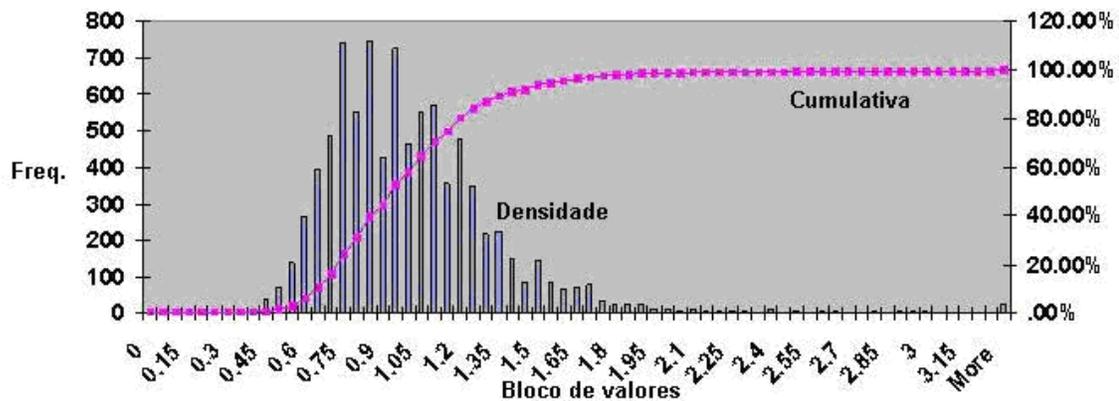


Figura 15 - Movimentação na direção (A): sentido Y-X.

A Figura 16 mostra o comparativo da distribuição cumulativa de Weibull (curva azul) e de Rayleigh (curva rosa) relativamente aos valores de voltagem experimentais (curva amarela).

Foram tomados os valores de $\alpha = 3,8714$ e $\beta = 1,0904$ para os gráficos da curva de distribuição cumulativa de Weibull.

Os valores de $\alpha = 2,0000$ e $\beta = 1,0904$ foram utilizados para o gráfico da curva de distribuição cumulativa de Rayleigh.

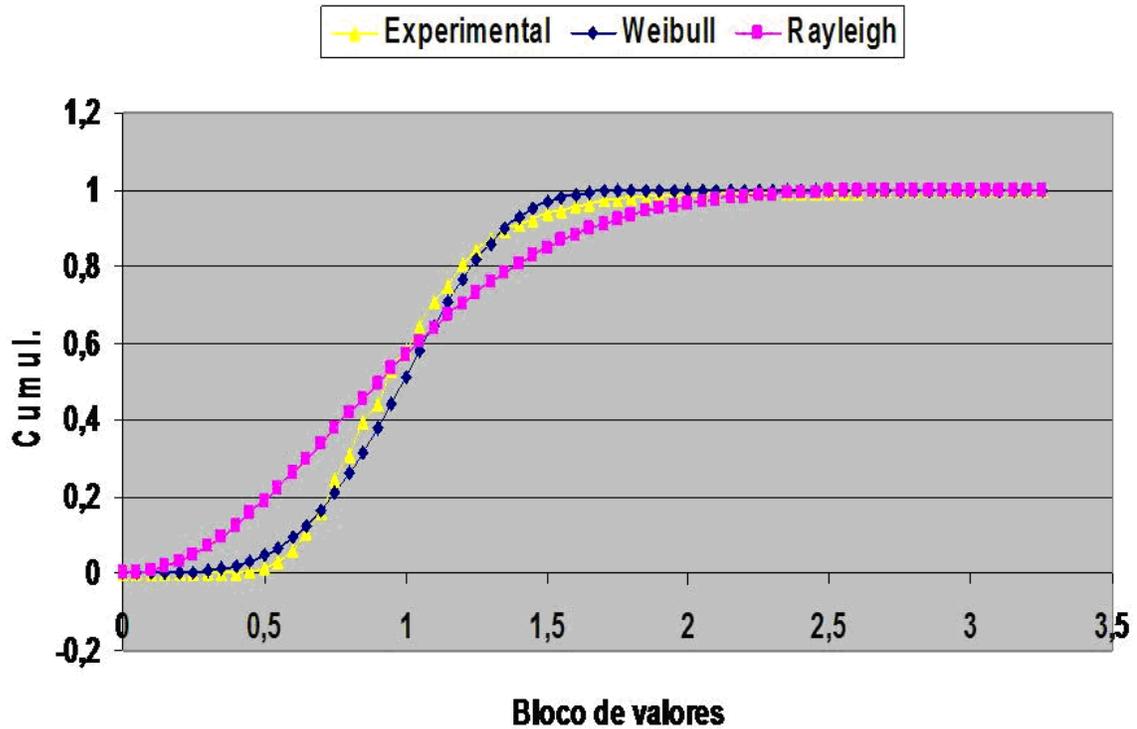


Figura 16 - Movimentação na direção (A) - sentido Y–X: Comparativo entre valores experimentais com as distribuições de Weibull e Rayleigh.

Os gráficos da Figura 17 superior e inferior mostram respectivamente, as formas dos gráficos de densidade de probabilidade para os valores experimentais e para as distribuições de Weibull e de Rayleigh, usando-se os mesmos valores de α e de β aplicados na construção gráfica da distribuição cumulativa de probabilidade.

Observamos também que a forma do gráfico da distribuição de Weibull se aproxima bem mais à forma do gráfico para os valores experimentais que a de Rayleigh.

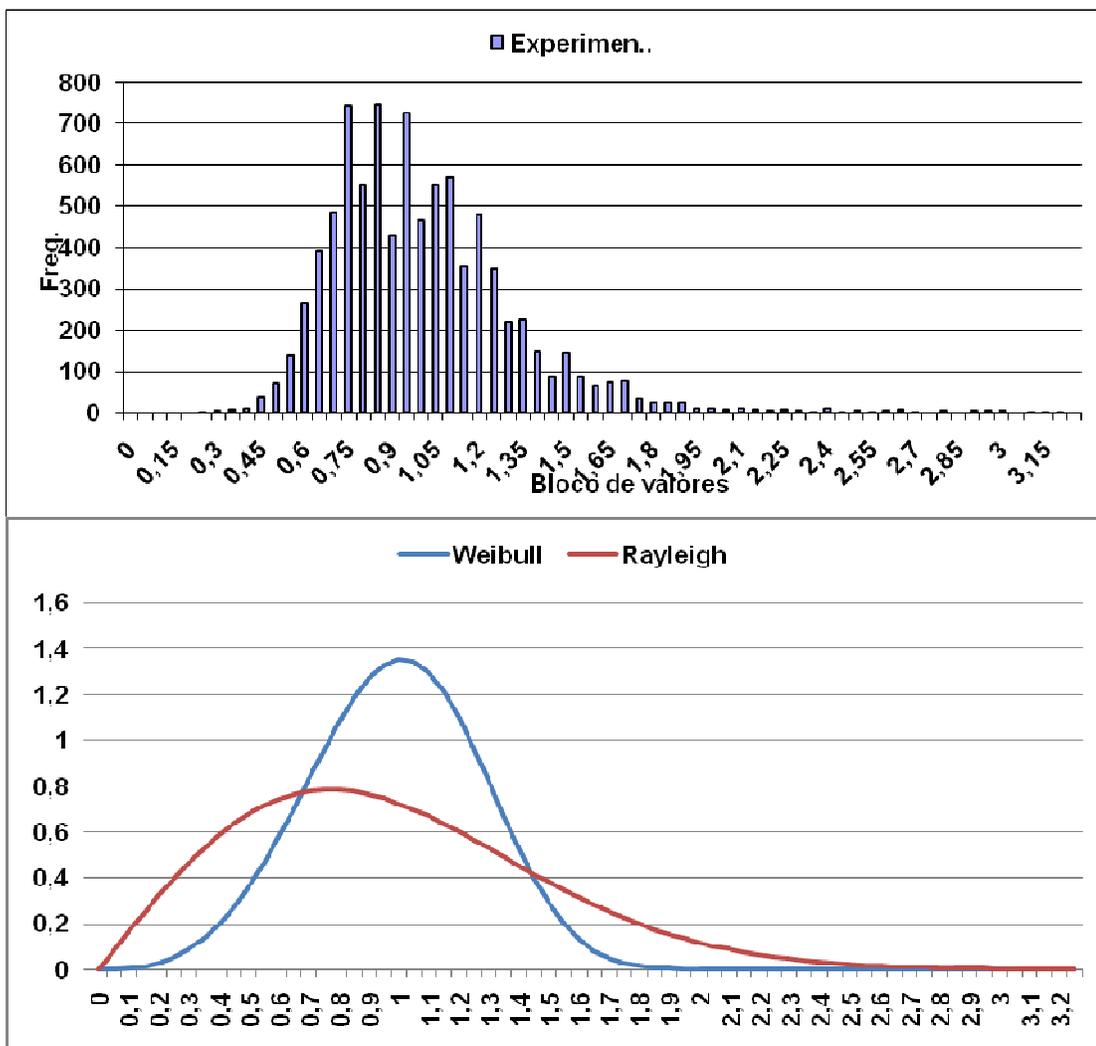


Figura 17 - Movimentação na direção (A) - sentido Y–X: Comparativo entre valores experimentais com as distribuições de Weibull e Rayleigh.

Da mesma forma, a Tabela 6 mostra alguns valores dos erros incorridos para a distribuição cumulativa de probabilidade quando comparamos as distribuições de Weibull e de Rayleigh com os valores experimentais.

Os valores completos dos erros incorridos podem ser vistos nos Anexos.

Tabela 6 - Erros incorridos na distribuição cumulativa para as distribuições de Weibull e de Rayleigh.

Erro Weibull	Erro Rayleigh
...	...
-0.32%	-5.11%
-0.61%	-7.22%
-1.06%	-9.63%
-1.78%	-12.33%
-2.52%	-14.98%
-3.28%	-17.47%
-3.75%	-19.39%
-3.33%	-20.03%
-2.04%	-19.32%
-0.32%	-17.64%
3.72%	-13.04%
4.94%	-10.66%
7.81%	-6.03%
6.55%	-5.00%
8.33%	-0.49%
6.93%	1.16%
...	...

Neste caso em que o robô aproxima-se radialmente do AP, observamos também que a distribuição de Weibull seria uma aproximação inicial para a modelagem de propagação em ambientes *indoor*.

O erro calculado máximo para os valores de distribuição cumulativa foi da ordem de 9% para a distribuição de Weibull relativamente aos valores experimentais, comparado a erros da ordem de 20% para a distribuição de Rayleigh relativamente aos mesmos valores experimentais.

4.3 Resultados relativos aos testes realizados – movimentação U-V

A Figura 18 nos mostra as curvas de função de densidade de probabilidade e de distribuição cumulativa de probabilidade para as medições realizadas quando o robô se movimentava a uma distância afastada do AP, no sentido U-V, como mostra a Figura 4.

Seguindo-se os mesmos procedimentos do item 4.1, as Figuras 19 e 20 para a função de distribuição cumulativa e de densidade de probabilidade, respectivamente, puderam ser graficamente construídos.

Os valores $\alpha = 5,3389$ e $\beta = 1,0772$ foram utilizados para a distribuição de Weibull.

Para a distribuição de Rayleigh utilizaram-se $\alpha = 2,0000$ e $\beta = 1,0772$.

Observamos também que a forma do gráfico para a distribuição de Weibull foi a que mais se aproximou da forma do gráfico para os valores experimentais.

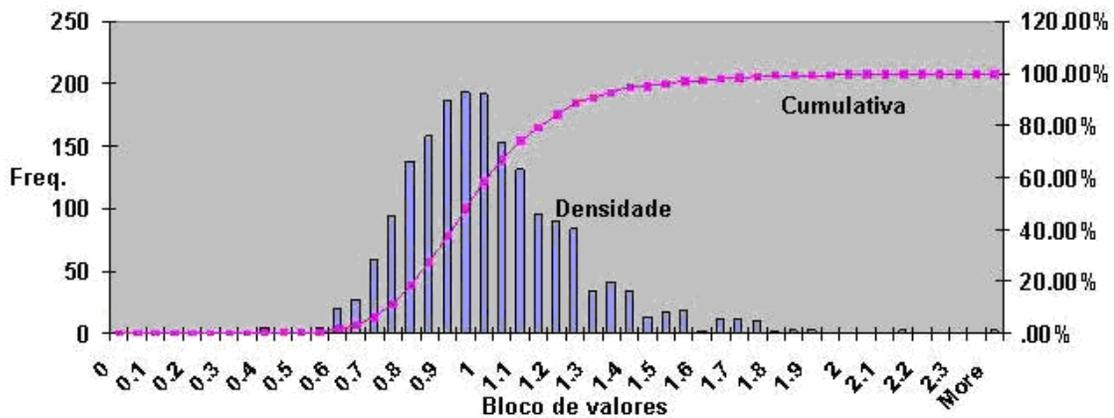


Figura 18 - Movimentação na direção (B): sentido U-V.

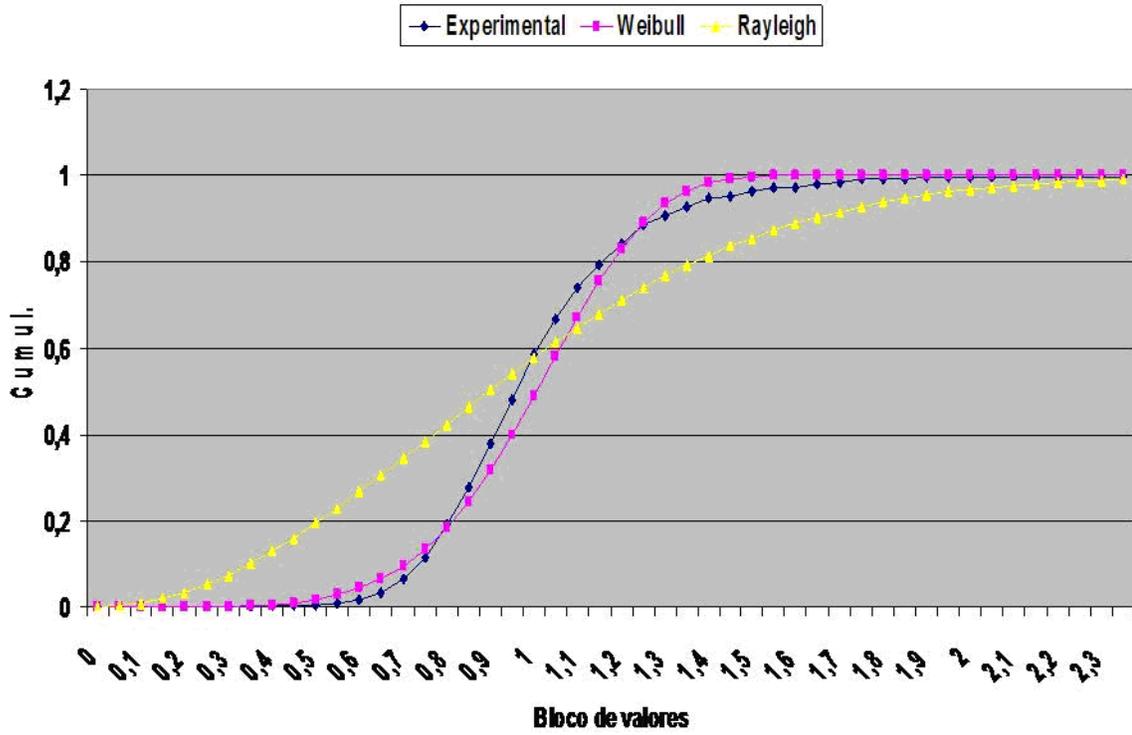


Figura 19 - Movimentação na direção (B) - sentido U–V: Comparativo entre valores experimentais com as distribuições de Weibull e Rayleigh.

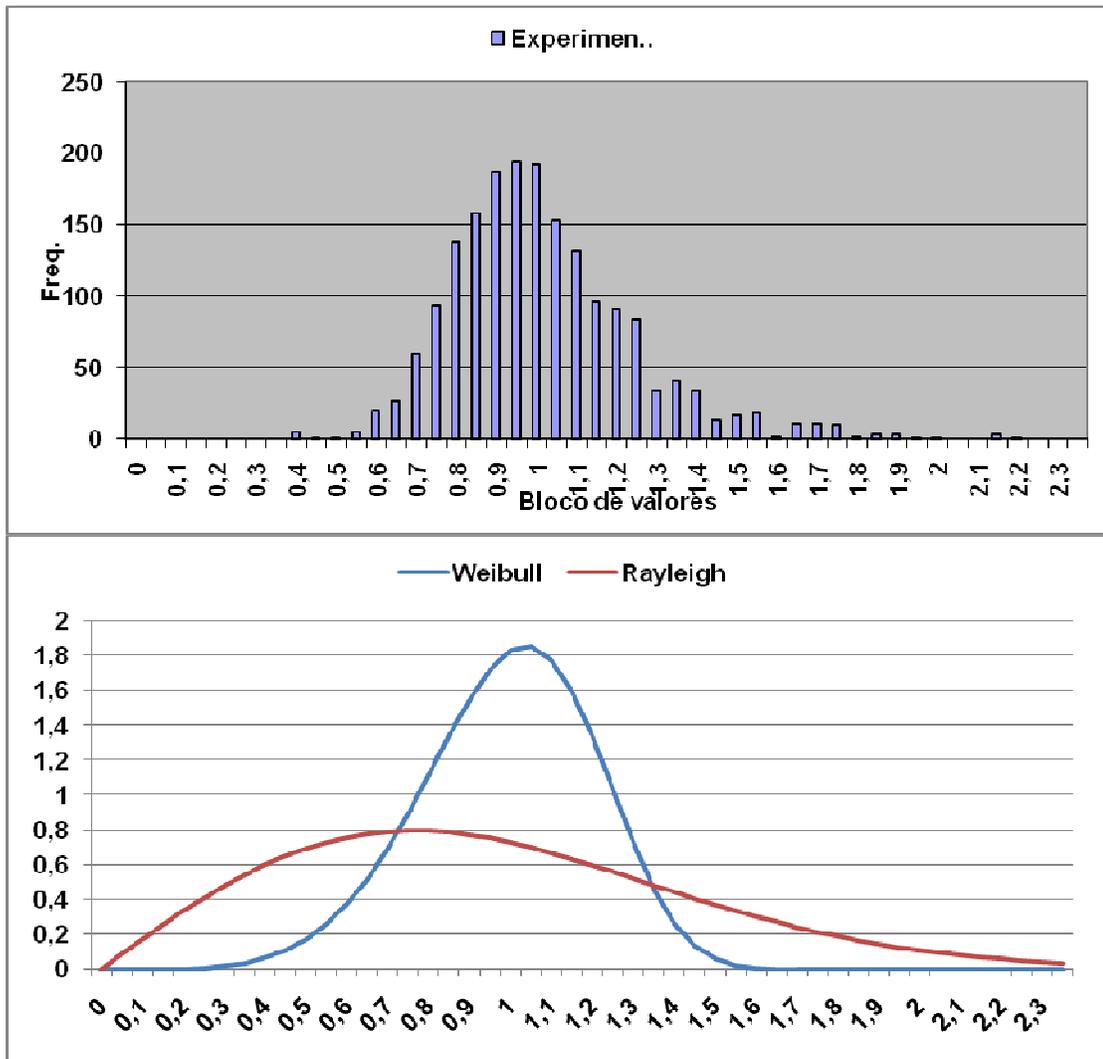


Figura 20 - Movimentação na direção (B) - sentido U–V: Comparativo entre valores experimentais com as distribuições de Weibull e Rayleigh.

A Tabela 7 mostra alguns valores dos erros incorridos para a distribuição cumulativa de probabilidade para as distribuições de Weibull e de Rayleigh.

Os valores completos dos erros incorridos podem ser vistos nos Anexos.

Tabela 7 - Erros incorridos na distribuição cumulativa para as distribuições de Weibull e de Rayleigh.

Erro Weibull	Erro Rayleigh
...	...
-0.11%	-7.46%
-0.25%	-10.02%
-0.23%	-12.61%
-0.62%	-15.69%
-1.27%	-19.00%
-2.08%	-22.30%
-2.57%	-24.94%
-3.32%	-27.32%
-3.13%	-28.05%
-1.98%	-26.93%
0.49%	-23.43%
2.93%	-18.82%
5.84%	-12.58%
8.15%	-5.87%
9.64%	0.83%
8.67%	5.55%
...	...

Para estas avaliações, observamos também que a distribuição de Weibull seria uma aproximação inicial para a modelagem de propagação em ambientes *indoor*.

Neste caso o erro calculado máximo para os valores de distribuição cumulativa foi da ordem de 10% para a distribuição de Weibull relativamente aos valores

experimentais, comparado a erros da ordem de 28% para a distribuição de Rayleigh relativamente aos mesmos valores experimentais.

4.4 Resultados relativos aos testes realizados – movimentação V-U

A Figura 21 nos mostra o histograma para o caso em que o robô se movimenta em sentido contrário ao descrito anteriormente.

Construções gráficas para as funções de distribuição cumulativa e de freqüência são vistas nas Figuras 22 e 23, respectivamente.

Os valores utilizados para a distribuição de Weibull foram $\alpha = 5,0386$ e $\beta = 1,0806$.

Para a distribuição de Rayleigh foram aplicados os valores de $\alpha = 2,0000$ e $\beta = 1,0806$.

Igualmente, a forma do gráfico para os valores de densidade de probabilidade de Weibull estão mais próximos da respectiva forma para os valores experimentais.

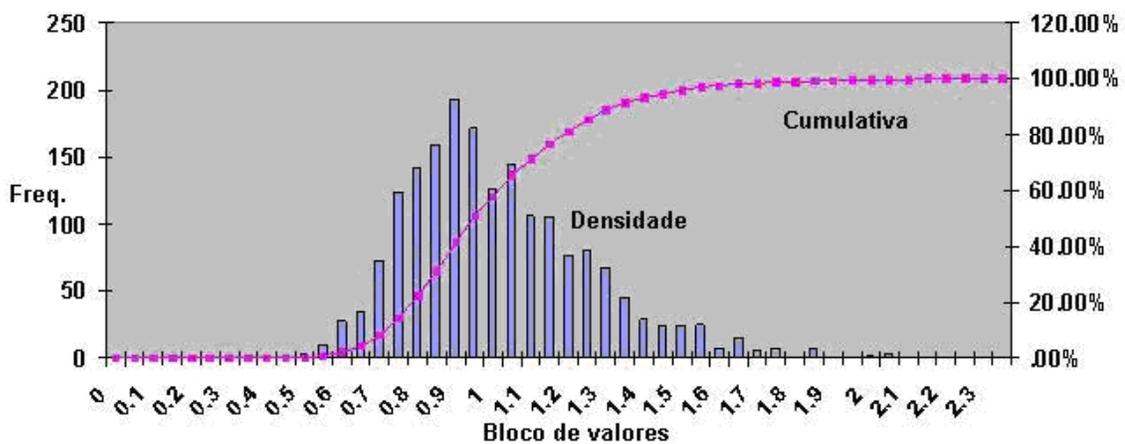


Figura 21 - Movimentação na direção (B): sentido V-U.

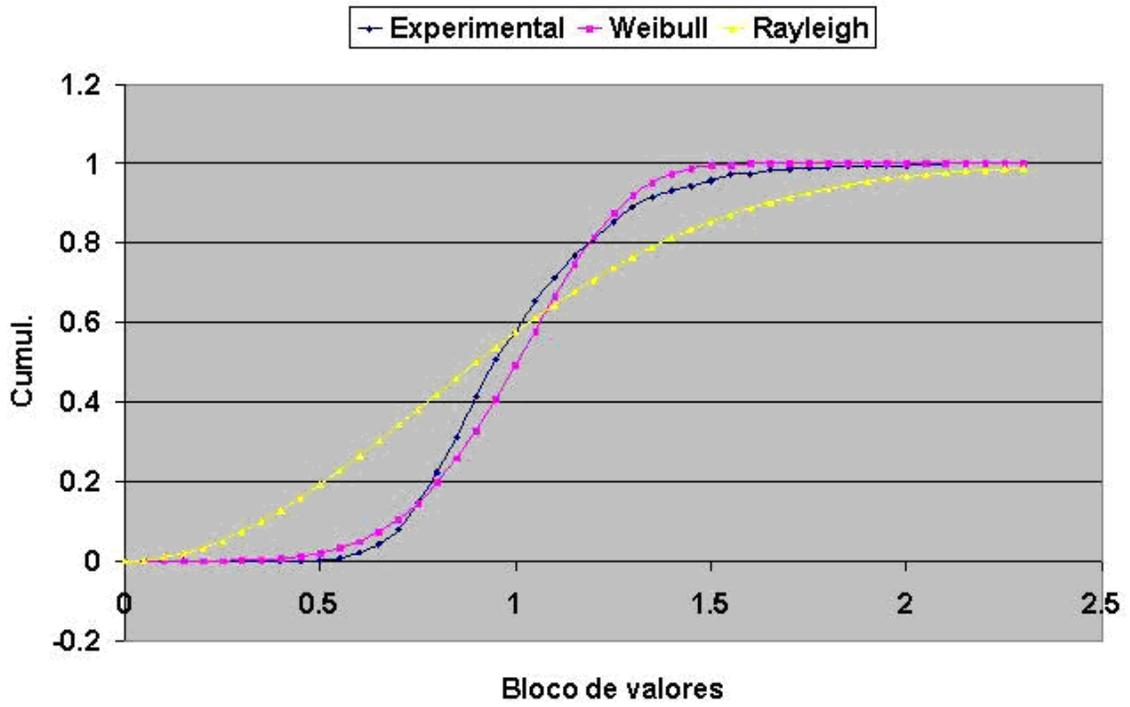


Figura 22 - Movimentação na direção (B) - sentido V-U: Comparativo entre valores experimentais com as distribuições de Weibull e Rayleigh.

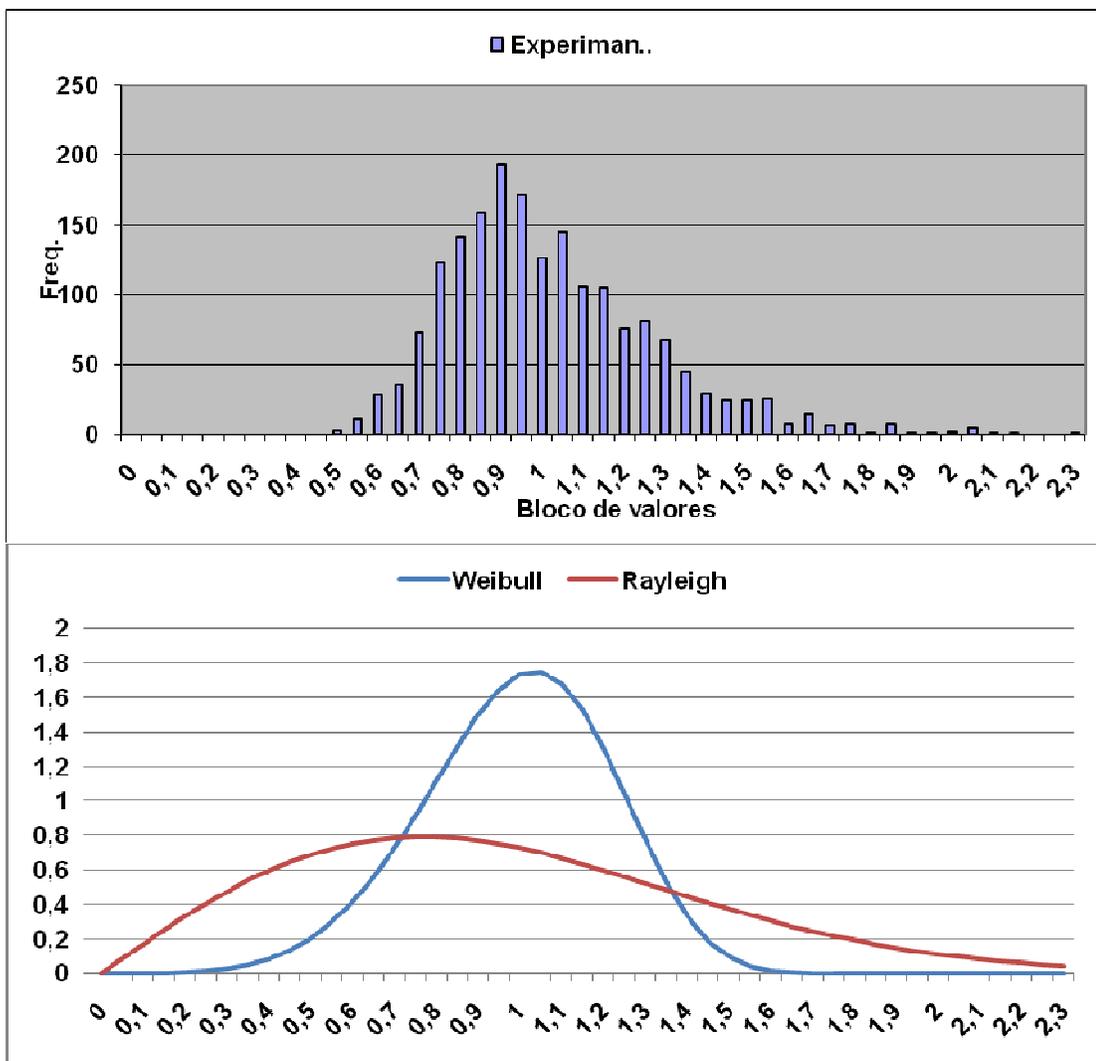


Figura 23 - Movimentação na direção (B) - sentido V–U: Comparativo entre valores experimentais com as distribuições de Weibull e Rayleigh.

A Tabela 8 mostra alguns valores dos erros incorridos para as distribuições cumulativas de probabilidade.

Os valores completos dos erros incorridos podem ser vistos nos Anexos.

Tabela 8 - Erros incorridos na distribuição cumulativa para as distribuições de Weibull e de Rayleigh.

Erro Weibull	Erro Rayleigh
...	...
-0.67%	-12.81%
-1.20%	-15.92%
-1.88%	-19.11%
-2.57%	-22.12%
-2.81%	-24.31%
-3.31%	-26.24%
-2.54%	-26.20%
0.06%	-23.49%
2.70%	-19.76%
5.26%	-15.08%
8.69%	-8.51%
10.14%	-2.99%
8.50%	0.14%
7.62%	4.43%
4.77%	6.75%
2.41%	9.18%
...	...

Também aqui observamos que a distribuição de Weibull seria uma aproximação inicial para a modelagem de propagação em ambientes *indoor*.

Neste caso o erro calculado máximo para os valores de distribuição cumulativa foi da ordem de 10% para a distribuição de Weibull relativamente aos valores

experimentais, comparado a erros da ordem de 26% para a distribuição de Rayleigh relativamente aos mesmos valores experimentais.

4.5 Resultados relativos aos testes realizados – movimentação T-Z

A Figura 24 faz as mesmas considerações com o robô movimentando-se como indicado na Figura 4 no sentido de T para Z.

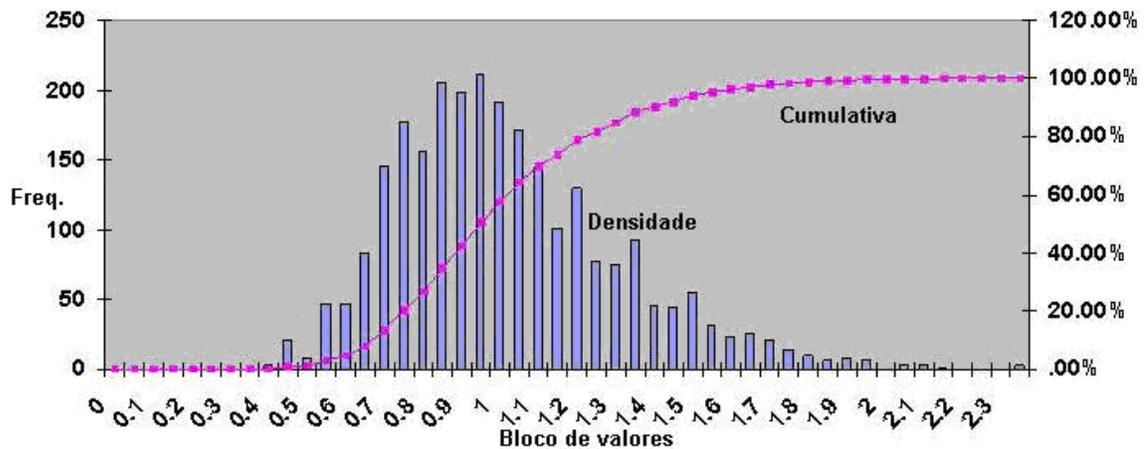


Figura 24 - Movimentação na direção (C): sentido T-Z.

Usando-se $\alpha = 4,3072$ e $\beta = 1,0900$ (Weibull) e $\alpha = 2,0000$ e $\beta = 1,0900$ (Rayleigh), foram construídos gráficos para as curvas de distribuição cumulativa e de frequência.

As Figuras 25 e 26 mostram as mesmas.

Como esperávamos, a forma da curva de densidade de probabilidade da distribuição de Weibull continua sendo a que melhor se aproxima da respectiva curva para os valores experimentais.

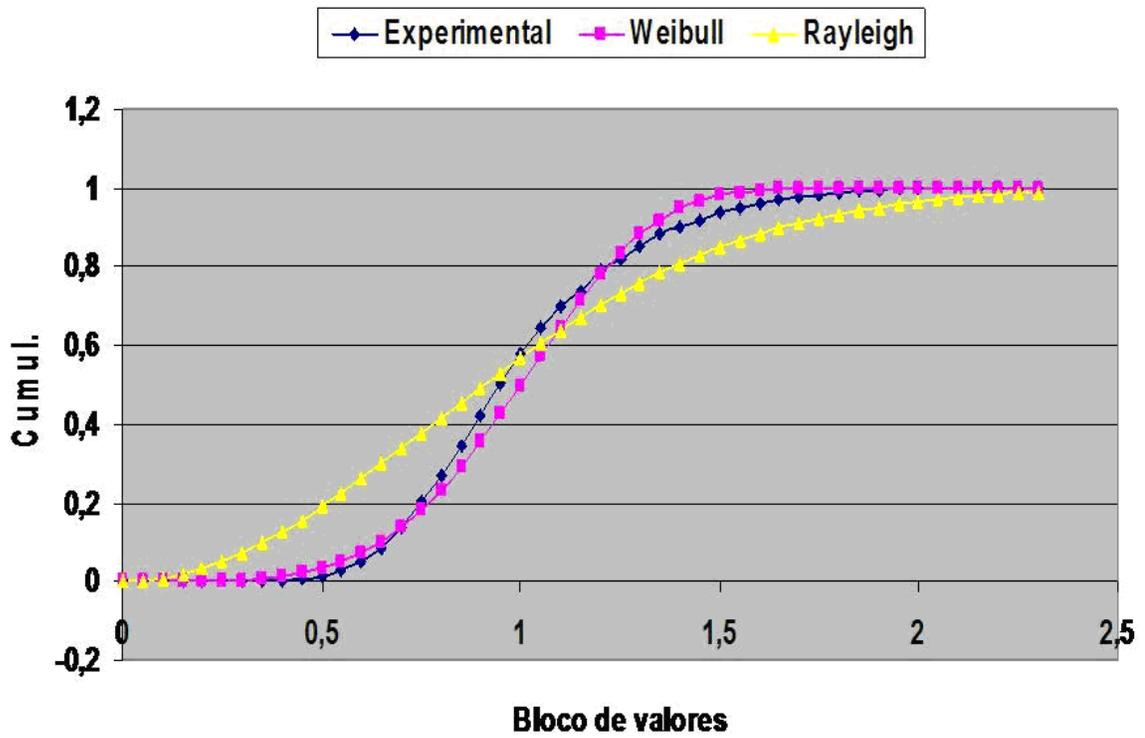


Figura 25 - Movimentação na direção (C) - sentido T–Z: Comparativo entre valores experimentais com as distribuições de Weibull e Rayleigh.

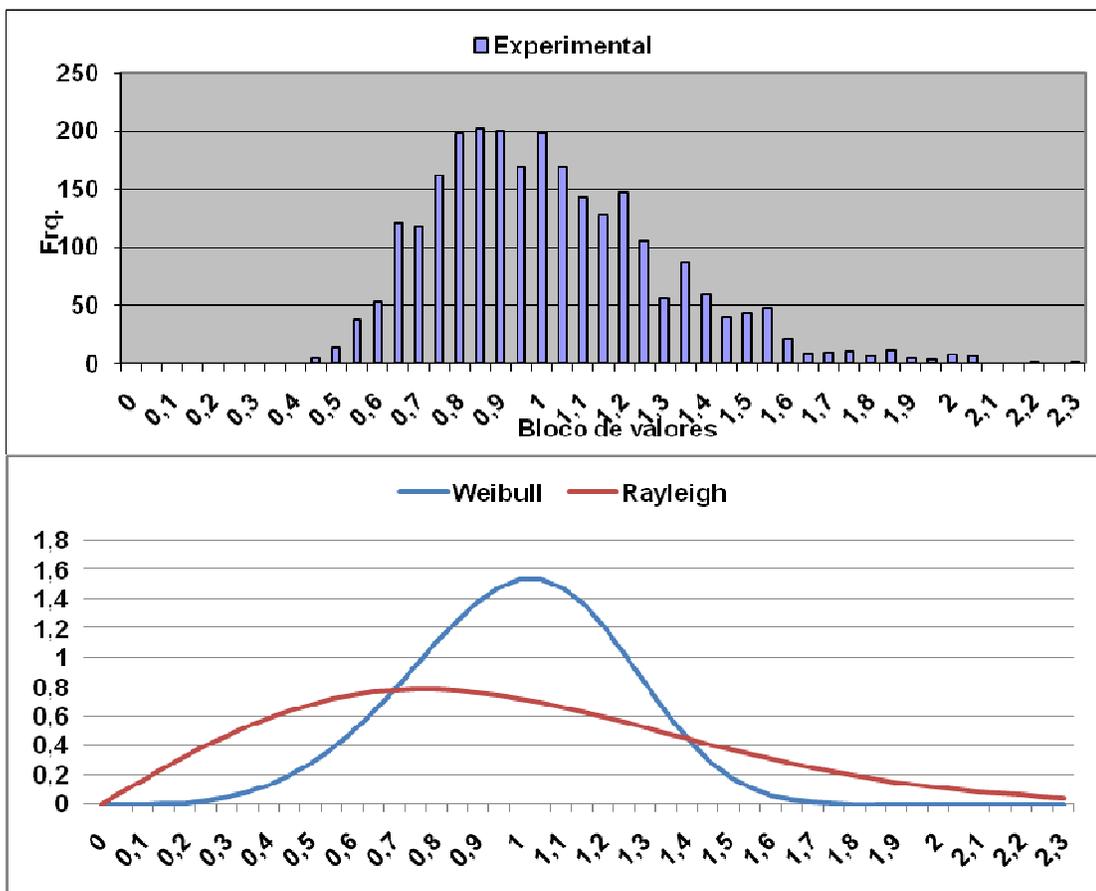


Figura 26 - Movimentação na direção (C) - sentido T–Z: Comparativo entre valores experimentais com as distribuições de Weibull e Rayleigh.

Alguns valores de erros incorridos nas distribuições cumulativas são vistos na Tabela 9.

Os valores completos desses erros podem ser vistos nos Anexos.

Tabela 9 - Erros incorridos na distribuição cumulativa para as distribuições de Weibull e de Rayleigh.

Erro Weibull	Erro Rayleigh
...	...
-0.75%	-9.80%
-1.21%	-12.48%
-1.26%	-14.74%
-2.19%	-17.74%
-2.06%	-19.42%
-2.48%	-21.27%
-2.14%	-21.84%
-0.10%	-20.10%
2.43%	-17.17%
3.39%	-15.06%
5.55%	-11.01%
6.73%	-7.21%
7.89%	-2.83%
7.97%	0.91%
7.12%	3.97%
5.34%	6.12%
...	...

Como podemos observar, aqui também a distribuição de Weibull seria uma aproximação inicial para a modelagem de propagação em ambientes *indoor*.

O erro calculado máximo para os valores de distribuição cumulativa foi da ordem de 8% para a distribuição de Weibull relativamente aos valores experimentais,

comparado a erros da ordem de 21% para a distribuição de Rayleigh relativamente aos mesmos valores experimentais.

4.6 Resultados relativos aos testes realizados – movimentação Z-T

A Figura 27 faz as mesmas considerações com o robô movimentando-se como indicado na Figura 4 no sentido de Z para T.

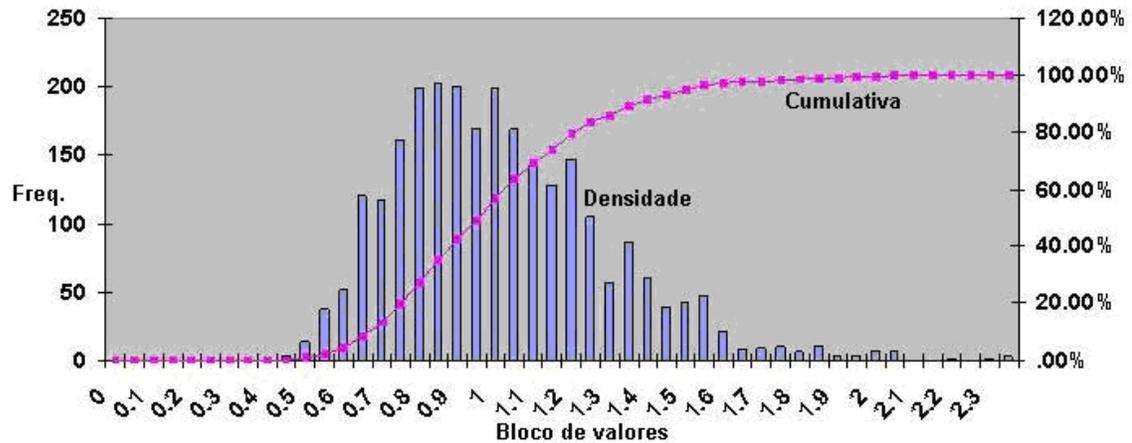


Figura 27 - Movimentação na direção (C): sentido Z-T.

Neste caso, com os valores de $\alpha = 4,4376$ e $\beta = 1,0870$ (Weibull) e $\alpha = 2,0000$ e $\beta = 1,0870$ (Rayleigh), foram construídos gráficos as curvas de distribuição cumulativa e de frequência.

As Figuras 28 e 29 mostram as mesmas.

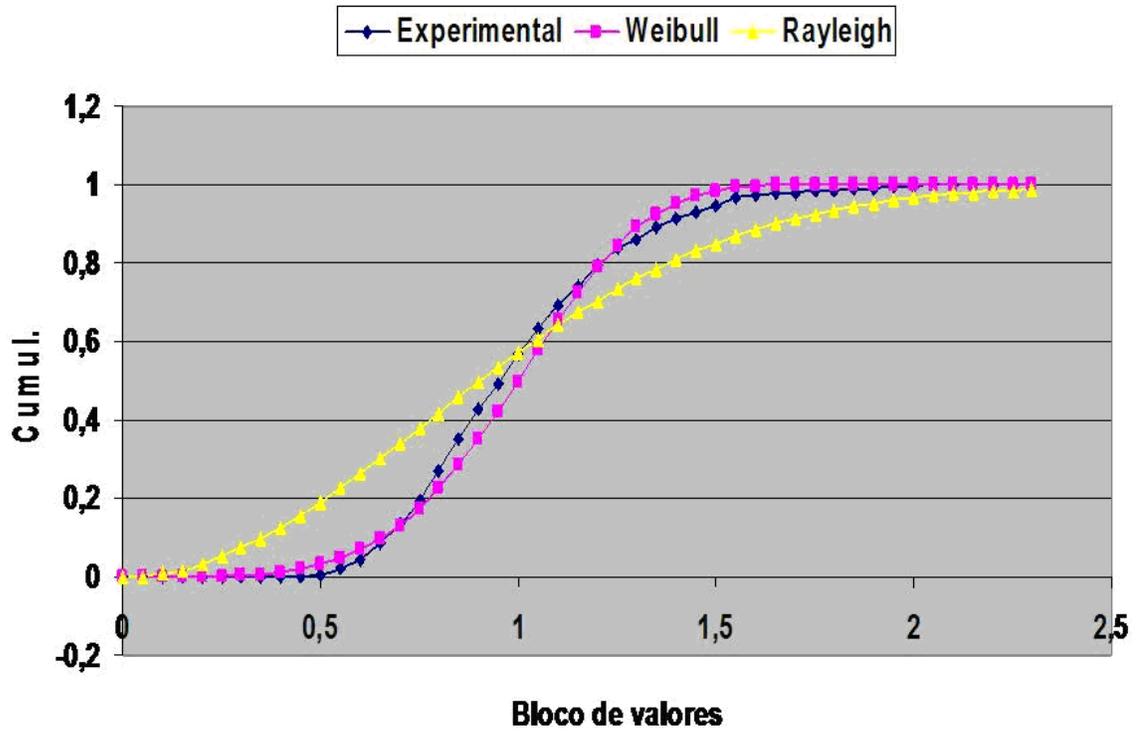


Figura 28 - Movimentação na direção (C) - sentido Z–T: Comparativo entre valores experimentais com as distribuições de Weibull e Rayleigh.

A forma da curva de densidade de probabilidade de Weibull se aproximou mais à respectiva forma da curva para os valores experimentais.

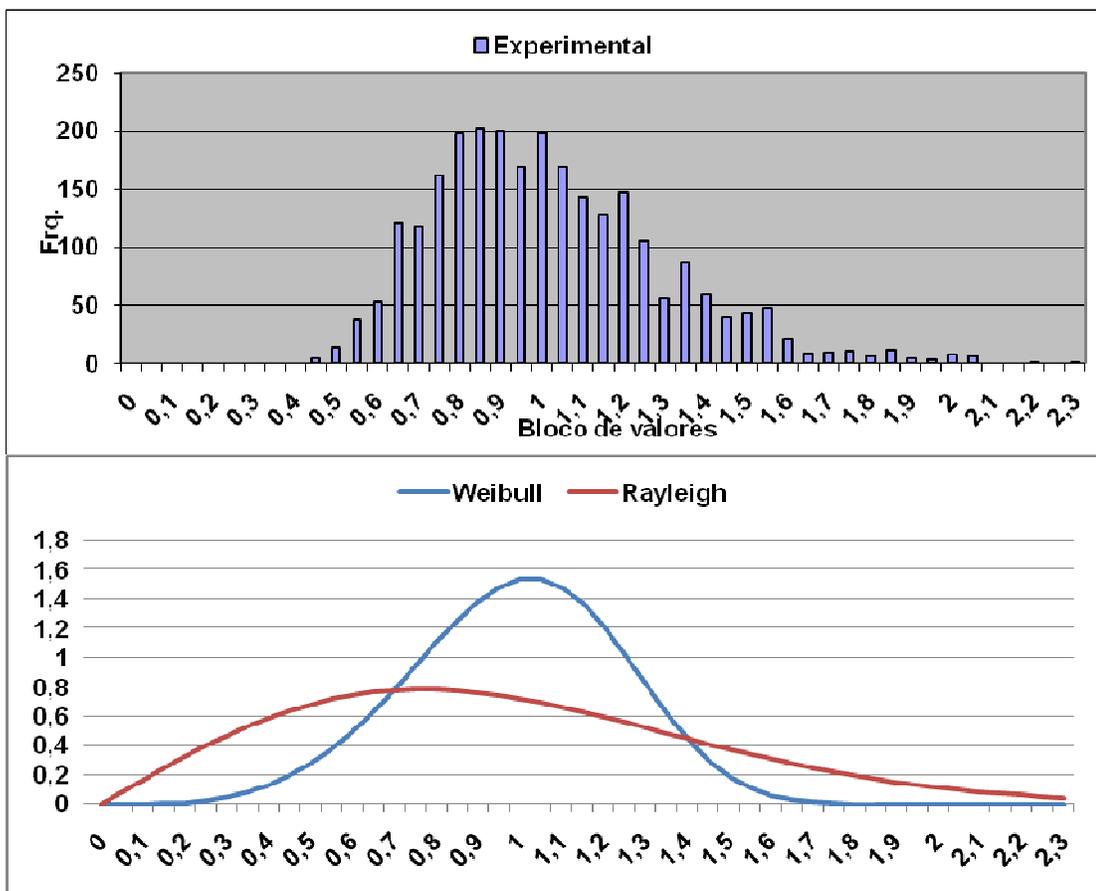


Figura 29 - Movimentação na direção (C) - sentido Z-T: Comparativo entre valores experimentais com as distribuições de Weibull e Rayleigh.

Alguns valores de erros incorridos nas distribuições cumulativas são vistos na Tabela 10.

Os valores completos desses erros estão registrados nos Anexos.

Tabela 10 - Erros incorridos na distribuição cumulativa para as distribuições de Weibull e de Rayleigh.

Erro Weibull	Erro Rayleigh
...	...
-0.65%	-9.85%
-1.18%	-12.67%
-1.82%	-15.60%
-2.48%	-18.41%
-2.66%	-20.50%
-2.81%	-22.16%
-0.96%	-21.32%
0.05%	-20.67%
1.98%	-18.38%
4.53%	-14.66%
6.46%	-10.76%
7.60%	-6.90%
6.95%	-4.15%
7.09%	-0.14%
5.92%	2.84%
3.84%	4.91%
...	...

Pela análise, novamente observamos que a distribuição de Weibull seria uma aproximação inicial para a modelagem de propagação em ambientes *indoor*.

O erro calculado máximo para os valores de distribuição cumulativa foi da ordem de 7% para a distribuição de Weibull relativamente aos valores experimentais,

comparado a erros da ordem de 22% para a distribuição de Rayleigh relativamente aos mesmos valores experimentais.

4.7 Média e desvio padrão na distribuição de Weibull

Para o cálculo da média e do desvio padrão para a distribuição de Weibull, usamos as fórmulas abaixo (LAW; KELTON, 1991).

$$\text{Média: } \frac{\beta}{\alpha} \Gamma\left(\frac{1}{\beta}\right)$$

$$\text{Desvio Padrão: } \sqrt{\frac{\beta^2}{\alpha} \left\{ 2\Gamma\left(\frac{2}{\alpha}\right) - \frac{1}{\alpha} \left[\Gamma\left(\frac{1}{\alpha}\right) \right]^2 \right\}}$$

Nestas fórmulas, $\Gamma(p)$ é chamada função gamma e tem seu cálculo como apresentado abaixo.

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

Com a estatística descritiva os valores da média e do desvio padrão para os valores experimentais foram avaliados.

Os parâmetros de forma e de escala avaliados foram usados nas equações para cálculo da média e do desvio padrão para cada uma das seis medições. A Tabela 11

nos mostra os valores obtidos com a estatística descritiva e os calculados usando-se as equações acima.

Tabela 11 – Média e Desvio Padrão.

	Fator de forma (α)	Fator de escala (β)	Média (Estatística Descritiva)	Média (Calculada)	Desvio Padrão (Estatística Descritiva)	Desvio Padrão (Calculada)
Sentido X-Y	3.6301	1.0969	0.9927	0.9889	0.3832	0.3028
Sentido Y-X	3.8714	1.0904	0.9902	0.9865	0.3781	0.2851
Sentido U-V	5.3389	1.0772	0.9932	0.9928	0.2394	0.2142
Sentido V-U	5.0386	1.0806	0.9930	0.9926	0.2514	0.2258
Sentido T-Z	4.3072	1.0900	0.9938	0.9922	0.2913	0.2603
Sentido Z-T	4.4376	1.0870	0.9924	0.9912	0.2847	0.2531

Os valores da função $\Gamma(p)$ foram calculados segundo aproximações (VOLFRAM).

4.8 Intervalo de confiança

Quando realizamos um conjunto de experimentos e obtemos a média e o desvio padrão das medidas, podemos usar um teste para validar o intervalo de confiança. Para este teste usamos a distribuição *Student's t* (STUDENT'S, 2008). Este teste nos dá a probabilidade do resultado estar em certo intervalo. Ou seja, suponha que em um experimento realizado n vezes, onde foram obtidas a média e o desvio padrão deste conjunto, se desejasse uma confiança de, por exemplo, 95%. Usando este teste, encontraremos um intervalo de valores centrados na média que significa: se realizarmos novamente este mesmo experimento n vezes, obter-se-á uma probabilidade de 95% de a média geral estar neste intervalo de valores encontrados.

O cálculo para o intervalo de confiança é feito da seguinte forma:

$$\bar{X} \pm t_{n-1, 1-\frac{\alpha}{2}} \frac{s}{\sqrt{n}}$$

Onde:

\bar{X} é a media geral dos experimentos

s é o desvio padrão

n é o número de vezes que o experimento foi executado

α é o intervalo de confiança pretendido

$t_{n-1, 1-\frac{\alpha}{2}}$ é tabelado pela distribuição-t

Usando-se da estatística descritiva, uma análise também foi feita para o cálculo do intervalo de confiança para as seis (6) medições, tanto para o parâmetro de forma (α), bem como para o parâmetro de escala (β).

Pela estatística descritiva, encontramos os valores de média e desvio padrão para os valores de ambos os parâmetros, estimados nas seis (6) medições.

Com estes dados, pela tabela de distribuição-t, encontramos o valor para $t_{5,0.975}$.

A Tabela 12 nos mostra os resultados, considerando-se um intervalo de confiança de 95% ($\alpha = 5\%$).

Tabela 12 – Intervalo de confiança para os parâmetros de forma e de escala.

	Média	Desvio Padrão	Intervalo de confiança
Parâmetro de forma	4,37240	0,65775	4,68210 < 4,37240 < 5,06270
Parâmetro de escala	1,08850	0,00715	1,08100 < 1,08850 < 1,09600

5 CONCLUSÕES E APLICAÇÕES

Este trabalho apresentou uma análise estatística através de medidas práticas em um ambiente *indoor* com a utilização de um robô com controles de direção e velocidade para representar um dispositivo móvel. Os resultados mostraram que os fenômenos de *fading* podem ser modelados como uma distribuição de Weibull. Se pensarmos em ambientes públicos onde a aleatoriedade do meio impõe alta severidade à propagação do sinal transmitido, a distribuição de Weibull representa de fato uma modelagem estatística mais realística.

5.1 Contribuições do trabalho

Este trabalho deu suporte à avaliação em uma bancada de emulação para avaliação de comunicação *VoIP*, usando a distribuição de Weibull, tendo como variáveis de entrada os fatores de forma e de escala, avaliados neste trabalho (BRANQUINHO, Omar C; BANDEIRA, Alessandra B; LINO, Fernando; GOES, Adriano; REGGIANI, Norma. *Weibull Distribution in WLAN Channel Emulation for VoIP evaluation* e BRANQUINHO, Omar C.; BANDEIRA, Alessandra B.; LINO, Fernando. *VoWiFi – Avaliação de VoIP Utilizando Weibull para Emulação do Canal*).

Dois artigos foram publicados onde esta dissertação teve sua contribuição: um deles no XXV Simpósio Brasileiro de Telecomunicações-SBrT 07 em Recife e outro no *Euro American Conference on Telematics and Information Systems* em Portugal.

5.2 Trabalhos futuros

Uma proposta que seria de grande valia para um trabalho futuro seria a modelagem de ambientes *indoor* usando a distribuição de Ricean (YACOUB, 1993, p. 95). Neste modelo de distribuição um dos parâmetros é função do meio em questão. Com isso, poderíamos ter uma comparação entre os dois (2) modelos avaliados: Weibull e Ricean.

6 REFERÊNCIAS

- AGILENT TECHNOLOGIES. *Spectrum analyzer measurements and noise*: application note 1303. Dec 16 2006. 36 p. Available from: <<http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5966-4008E.pdf>>. Cited: 2007.
- BRANQUINHO, Omar C; BANDEIRA, Alessandra B; LINO, Fernando. *VoWiFi: avaliação de VoIP utilizando Weibull para emulação do canal*. In: SIMPOSIO BRASILEIRO DE TELECOMUNICAÇÕES-SBrT 07, 25., Recife, 3-6 set. 2007.
- BRANQUINHO, Omar C; BANDEIRA, Alessandra B; LINO, Fernando; GOES, Adriano; REGGIANI, Norma. Weibull Distribution in WLAN Channel Emulation for VoIP evaluation. In: EURO AMERICAN CONFERENCE ON TELEMATICS AND INFORMATION SYSTEMS, 2007, Faro. *Proceedings...* Faro: Universidade do Algarve, May 14-17 2007. Available from: <<http://eatis.org/eatis2007>>.
- CERVO, Amado L.; BERVIAN, Pedro A. *Metodologia científica*. 5 ed. São Paulo: Prentice Hall, 2002.
- CHONG, C.-C; YOUNG, S. K. A generic statistical-based UWB channel model for high-rise apartments. *IEEE Transactions on antennas and propagation*, v. 53, n. 8, part 1, p. 2389–2399, 2005.
- JACQUELIN, Jean. A reliable algorithm for the exact median rank function. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, v. 28, n. 2, Apr. 2003.
- LAW, Averill M.; KELTON, David M. *Simulation modeling and analysis*. [S.l.]: McGraw-Hill, 1991. p.333-335.
- LEE, William C.Y. *Mobile cellular telecommunications: analog and digital systems*. 2 ed. [S.l.]: McGraw Hill, 1995.
- PEEBLES JUNIOR, Peyton. *Probability, random variables and random signals principles*. 2. ed. [S.l.]: McGraw Hill, 1987.
- RAPPAPORT, Theodore S. *Wireless communications: principles and Practice*. New Jersey: Prentice-Hall, 1996. Cap. 3-4.
- RELIASOFT CORPORATION. *Probability plotting*. Available from: <http://www.weibull.com/LifeDataWeb/probability_plotting.htm>. Cited: 13 Nov 2007.

ROMEU, J.L. Empirical assessment of weibull distribution. *RAC Start*, v. 10, n. 3, 6 p. Available from: <<http://src.alionscience.com/pdf/WEIBULL.pdf>>. Cited: 2007.

STUDENT'S. In: WIKIPEDIA, 21 Feb 2008 . Available from: <http://en.wikipedia.org/wiki/Student's_t-distribution>. Cited: 6 Feb 2008.

TSM Antennas. *Ominidirecional*: modelo OM24008. 2006b. Disponível em: <http://www.tsm.com.br/produto.php?id_modelo=131>. Acesso em: 23 set. 2007.

TSM Antennas. *Painel setorial*: modelo PS240012-90. 2006a. Disponível em: <http://www.tsm.com.br/produto.php?id_modelo=124>. Acesso em: 23 set. 2007.

WOLFRAM RESEARCH. *Mathematica reinvented*. Available from : <<http://functions.wolfram.com/webMathematica/FunctionEvaluation.jsp?name=Gamma>>. Cited: 19 Dec 2007.

YACOUB, Michel Daoud. *Foundations of mobile radio engineering*. [S.l.]: CRC Press, 1993.

ANEXOS

Uma *media* óptica em *CD-R* com todas as medições e citações referenciadas neste trabalho acompanha este texto.