

Alberto Gaspar Guimarães

**Radiolocalização de Terminais
de Comunicações Móveis**

Mitigação do erro de NLOS e
estudo da ambigüidade em
sistemas hiperbólicos de
localização

TESE DE DOUTORADO

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
Programa de Pós-graduação em
Engenharia Elétrica

Rio de Janeiro
Dezembro de 2004



Alberto Gaspar Guimarães

**Radiolocalização de Terminais de
Comunicações Móveis**

**Mitigação do erro de NLOS e estudo da
ambigüidade em sistemas hiperbólicos de
localização**

Tese de Doutorado

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica da PUC-Rio como parte dos requisitos parciais para obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Marco Antonio Grivet Mattoso Maia

Rio de Janeiro
Dezembro de 2004



Alberto Gaspar Guimarães

**Radiolocalização de Terminais de
Comunicações Móveis**
**Mitigação do erro de NLOS e estudo da
ambigüidade em sistemas hiperbólicos de
localização**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio como parte dos requisitos parciais para obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Marco Antonio Grivet Mattoso Maia

Orientador

Departamento de Engenharia Elétrica — PUC-Rio

Prof. José Mauro Pedro Fortes

PUC-Rio

Prof. Raimundo Sampaio Neto

PUC-Rio

Prof. Ernesto Leite Pinto

IME

Prof. Marcello Luiz Rodrigues de Campos

UFRJ

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico —

PUC-Rio

Rio de Janeiro, 9 de Dezembro de 2004

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Alberto Gaspar Guimarães

O autor é graduado e mestre em engenharia de telecomunicações pelo Instituto Militar de Engenharia (IME). Trabalha no mesmo instituto como professor do Departamento de Engenharia Elétrica.

Ficha Catalográfica

Guimarães, Alberto Gaspar

Radiolocalização de Terminais de Comunicações Móveis/ Alberto Gaspar Guimarães; orientador: Marco Antonio Grivet Mattoso Maia. — Rio de Janeiro : PUC-Rio, Departamento de Engenharia Elétrica, 2004.

198 f: il. ; 30 cm

Tese (doutorado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Elétrica.

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia Elétrica – Teses. 2. Radiolocalização de terminais de comunicações. 3. Comunicações Móveis. 4. Sistemas celulares. 5. Sistemas de comunicações. 6. Processamento de sinais. I. Maia, Marco Antonio Grivet Mattoso. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. III. Título.

CDD: 621.3

Agradecimentos

Ao professor Marco Grivet, pelos sólidos conhecimentos transmitidos, pelas enriquecedoras discussões, pela confiança depositada, e pelos agradáveis bate-papos nas pausas para o cafezinho.

Ao Exército Brasileiro, meu empregador, pela liberação durante três anos para dedicação exclusiva ao desenvolvimento deste trabalho.

A todos do IME e da PUC, que de alguma forma contribuíram para a execução deste trabalho, em especial ao companheiro Pinho do IME pelo valioso suporte no Linux, e ao amigo Ernesto, pela cuidadosa revisão de alguns pontos da tese.

Aos meus pais, pela educação, formação, apoio, carinho e principalmente pela silenciosa mas reconfortante torcida.

Ao trio Thiago, João Pedro e Lucas, turminha do barulho, cuja maravilhosa existência é uma alegria e um incentivo para sempre ir em frente.

Finalmente, um agradecimento especial à minha esposa, (santa) Maria Fernanda, pela paciência que teve durante estes quatro anos, sobrecarregada na função de mãe de três filhos, dona-de-casa, pesquisadora e esposa. Grande responsável pela maravilhosa família que tenho e da qual me orgulho, a ela dedico este trabalho.

Resumo

Guimarães, Alberto Gaspar; Maia, Marco Antonio Grivet Mattoso.
Radiolocalização de Terminais de Comunicações Móveis.
Rio de Janeiro, 2004. 198p. Tese de Doutorado — Departamento
de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de
Janeiro.

Este trabalho lida com o problema de radiolocalização de terminais em um ambiente de comunicações móveis celulares. Desenvolve-se novas alternativas para a estimação da posição, admitindo-se que as medidas de *tempo de chegada* (ToA) obtidas no enlace-rádio estão corrompidas por ruído aditivo e apresentam erro médio positivo durante períodos aleatórios, devido à ausência de linha de visada (NLOS) entre terminal e estações radio-bases. Em uma das alternativas desenvolve-se um estimador assintoticamente eficiente do erro de NLOS, sob o critério de *mínimos quadrados ponderados* (WLS). Para esta estimativa, admite-se o conhecimento a priori do espalhamento temporal do canal, e que o perfil de potência do sinal pode ser calculado por uma média temporal de medidas independentes em um receptor RAKE. O esquema de localização apresentado incorpora também um teste de hipóteses desenvolvido sob o critério de Neyman-Pearson, para detectar, a cada instante de tempo, a ocorrência de transições entre os estados LOS/NLOS do canal.

Em outra contribuição do trabalho, as coordenadas do terminal são estimadas recursivamente utilizando-se algoritmos bayesianos, com a dimensão do espaço de estados aumentada para incluir o efeito do erro de NLOS sobre as medidas de ToA.

Resultados de simulação obtidos sob diferentes cenários comprovam a eficácia dos esquemas de estimação aqui desenvolvidos, quando comparados à única solução de que se tem conhecimento na literatura.

Apresenta-se ainda nesta tese uma análise para o problema de ambigüidade em métodos hiperbólicos de localização, cujo objetivo é identificar a região do plano em que este método fornece duas soluções fisicamente admissíveis. A área desta região é comparada com a área total de triangulação.

Palavras-chave

Comunicações-móveis; localização de terminais sem-fio; ToA; TDoA; NLOS; estimação bayesiana; estimação WLS; filtro de Kalman; filtro de partículas.

Abstract

Guimarães, Alberto Gaspar; Maia, Marco Antonio Grivet Mattoso.
Radiolocation of Mobile Communications Terminals. Rio de Janeiro, 2004. 198p. PhD. Thesis — Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This work addresses the radiolocation problem of a moving terminal in a cellular mobile communications environment. New alternatives are developed for position estimation, assuming that the *Time of Arrival* (ToA) measurements obtained from radio link are corrupted by additive noise and have positive mean error during random periods of time due to the non-line of sight (NLOS) propagation condition between the terminal and base stations.

In one of the proposals, an asymptotically efficient WLS estimator of the NLOS error is developed under the *Weighted Least Squares* criterion. It is assumed that the channel temporal scattering model is known and the mean power delay profile can be evaluated by time averaging independent measurements from a RAKE receiver. The location estimation scheme also includes a hypothesis testing based on Neyman-Pearson approach to detect at each instant of time the LOS/NLOS states transitions.

In another contribution, the terminal coordinates are recursively estimated using bayesian algorithms, with the state-space dimension augmented to include the NLOS error effect over ToA measurements.

Simulation results obtained under different scenarios show the effectiveness of the estimation schemes developed here when compared to the only alternative known from the literature.

An analysis concerning the ambiguity problem in hyperbolic location methods is also presented, aiming to determine the regions where this method gives two physically admissible solutions, and compare them to the total trilateration area.

Keywords

Mobile communications; wireless location; ToA; TDoA; NLOS; bayesian estimation; WLS estimation; Kalman filter; particle filter.

Sumário

1	Introdução	15
1.1	Radiolocalização: Histórico e Motivações	15
1.2	Fontes de erro em um sistema de localização	18
1.3	Métodos de Radiolocalização	21
1.4	Organização da Tese	28
1.5	Contribuições	30
2	Caracterização do canal de propagação em macrocélulas	33
2.1	Introdução	33
2.2	Caracterização determinística	33
2.3	Caracterização estatística	35
2.4	Modelos de espalhamento temporal em macro-células	39
2.5	Caracterização do estado de NLOS	50
2.6	Resumo do capítulo	55
3	Estimativa do erro de NLOS com base no espalhamento da potência recebida	56
3.1	Introdução	56
3.2	Receptor RAKE	56
3.3	Espalhamento temporal determinado pelo RAKE	58
3.4	Estimativa de $E[II]$	60
3.5	Estimativa de δ	67
3.6	Aplicação ao modelo de espalhamento gaussiano	77
3.7	Resumo do capítulo	79
4	Estrutura com RAKE e filtro de Kalman para radiolocalização em ambientes com NLOS	81
4.1	Introdução	81
4.2	Estrutura proposta	81
4.3	Estimador de ToA (E-ToA)	84
4.4	Teste de hipóteses para a identificação das transições de estado do canal	89
4.5	Verificação de desempenho	100
4.6	Resumo do capítulo	113
5	Estimação Bayesiana recursiva para radiolocalização em ambientes com NLOS	123
5.1	Introdução	123
5.2	Formulação do problema	124
5.3	Estimação por EKF	127
5.4	Estimação por PF	128
5.5	Verificação de Desempenho	132
5.6	Resumo do capítulo	137

6	Ambigüidade na determinação da posição em sistemas hiperbólicos	155
6.1	Introdução	155
6.2	Determinação da Região de Ambigüidade	156
6.3	Cálculo da área da região de ambigüidade	164
6.4	Resumo do capítulo	169
7	Conclusões e desenvolvimentos futuros	170
7.1	Conclusões	170
7.2	Desenvolvimentos futuros	173
	Referências Bibliográficas	176
	Glossário	184
A	Notações Matemáticas	186
B	Estimação Bayesiana Recursiva	189
B.1	Introdução	189
B.2	Estimação Bayesiana Recursiva	190
B.3	Métodos para estimação Bayesiana recursiva	192

Lista de Figuras

1.1	Sistema A-GPS.	22
1.2	Determinação da posição através das medidas nas bases dos ângulos de chegada (AoA) do sinal emitido pelo terminal.	23
1.3	Intersecção dos círculos originados das medidas de ToA's.	24
1.4	Determinação da posição por medida de TDoA.	27
1.5	Organização da Tese.	29
2.1	Geometria do espalhamento do sinal.	40
2.2	Geometria elíptica para a distribuição dos espalhadores.	41
2.3	Cálculo da função distribuição cumulativa de ToA.	42
2.4	Função densidade de probabilidade de τ considerando o modelo elíptico de espalhamento, para $D = 1000$ m.	42
2.5	Geometria circular para a distribuição dos espalhadores.	43
2.6	Cálculo da fdp de τ para o modelo circular.	44
2.7	Função densidade de probabilidade de τ considerando o modelo circular de espalhamento, para $D = 1000$ m e $R = 100$ m.	45
2.8	Função densidade de probabilidade de τ considerando o modelo gaussiano de espalhamento, para $D = 1000$ m e $\sigma_s = 150$ m.	46
2.9	Histograma relativo aos dados de AoA obtidos na cidade de Aarhus.	47
2.10	Histograma relativo aos dados de ToA obtidos na cidade de Aarhus.	47
2.11	Desvio padrão do espalhamento angular em função de σ_s/D , medido na cidade de Aarhus.	48
2.12	Comparação de $p_\beta(\beta)$ nos modelos gaussiano, circular e elíptico com as medidas obtidas em Aarhus.	49
2.13	Comparação de $p_\tau(\tau)$ nos modelos gaussiano, circular e elíptico com as medidas obtidas em Aarhus.	50
2.14	Anteparos <i>locais</i> e <i>celulares</i> em macro-células.	51
2.15	Comparação dos percursos em LOS e NLOS com difração em anteparo <i>celular</i> .	51
3.1	Diagrama em blocos do receptor RAKE.	57
3.2	Gráfico de $N^* \times \epsilon$: (a) $M = 3$; (b) $M = 4$	65
3.3	Estimação dos erros de NLOS $\delta_1, \dots, \delta_{L^*}$.	69
3.4	Gráfico de $\xi = c\sqrt{N} \times CRLB_\delta$ para $T_c = 0,81 \mu s$. (a) $D = 500$ m; (b) $D = 1000$ m .	79
4.1	Estimador de posição com medidas de ToA no enlace direto.	82
4.2	Bloco E_ToA _i proposto para a atenuação do ruído de medida e do erro de NLOS na estimação de ToA.	84
4.3	Bloco "receptor CDMA".	85
4.4	Probabilidades de falso alarme e de perda para δ_k uniformemente distribuída em $[0 \ 1000/c]$ e $\sigma_0 = 100/c$.	93

4.5	Probabilidades de falso alarme e de perda para δ_k uniformemente distribuída em $[0 \ 1000/c]$ e $\sigma_0 = 100/c$. As probabilidades $P_{F,1}$ e $P_{M,1}$ (traçado contínuo) foram obtidas de (4-22) e (4-25) e $P_{F,2}$ e $P_{M,2}$ (traçado descontínuo) de (4-36) e (4-40).	96
4.6	Trajétórias e posições das bases consideradas na simulação.	101
4.7	ToA verdadeiro, medido e estimado entre o terminal e a base 2, para uma realização da trajetória 2 com $d_{0,5} = 100$ m, $\bar{L} = 200$ m e $\sigma_0 = 50/c$ s, empregando o método <i>OnOff</i> para eliminação do erro de NLOS.	111
4.8	Média de <i>EML</i> em função de σ_0 , para $d_{0,5} = 150$ e $\bar{L} = 200$.	115
4.9	Desvio-padrão de <i>EML</i> em função de σ_0 , para $d_{0,5} = 150$ e $\bar{L} = 200$.	115
4.10	Média de <i>EML</i> em função de σ_0 , para $d_{0,5} = 50$ e $\bar{L} = 200$.	116
4.11	Desvio-padrão de <i>EML</i> em função de σ_0 , para $d_{0,5} = 50$ e $\bar{L} = 200$.	116
4.12	Média de <i>EML</i> em função de σ_0 , para $d_{0,5} = 100$ e $\bar{L} = 300$.	117
4.13	Desvio-padrão de <i>EML</i> em função de σ_0 , para $d_{0,5} = 100$ e $\bar{L} = 300$.	117
4.14	Média de <i>EML</i> em função de σ_0 , para $d_{0,5} = 100$ e $\bar{L} = 200$.	118
4.15	Desvio-padrão de <i>EML</i> em função de σ_0 , para $d_{0,5} = 100$ e $\bar{L} = 200$.	118
4.16	Média de <i>EML</i> em função de σ_0 , para $d_{0,5} = 100$ e $\bar{L} = 100$.	119
4.17	Desvio-padrão de <i>EML</i> em função de σ_0 , para $d_{0,5} = 100$ e $\bar{L} = 100$.	119
4.18	Média de <i>EML</i> em função de σ_0 , com $d_{0,5} = 50$, $\bar{L} = 200$ e detecção <i>ideal</i> ou por <i>teste de hipóteses</i> do estado do canal.	120
4.19	Desvio-padrão de <i>EML</i> em função de σ_0 , com $d_{0,5} = 50$, $\bar{L} = 200$ e detecção <i>ideal</i> ou por <i>teste de hipóteses</i> do estado do canal.	120
4.20	Média de <i>EML</i> em função de σ_0 , com $d_{0,5} = 150$, $\bar{L} = 200$ e detecção <i>ideal</i> ou por <i>teste de hipóteses</i> do estado do canal.	121
4.21	Desvio-padrão de <i>EML</i> em função de σ_0 , com $d_{0,5} = 150$, $\bar{L} = 200$ e detecção <i>ideal</i> ou por <i>teste de hipóteses</i> do estado do canal.	121
4.22	Média de <i>EML</i> em função de σ_0 , com $d_{0,5} = 100$, $\bar{L} = 100$ e detecção <i>ideal</i> ou por <i>teste de hipóteses</i> do estado do canal.	122
4.23	Desvio-padrão de <i>EML</i> em função de σ_0 , com $d_{0,5} = 100$, $\bar{L} = 100$ e detecção <i>ideal</i> ou por <i>teste de hipóteses</i> do estado do canal.	122
5.1	Estimativa Bayesiana recursiva da posição com medidas de ToA no enlace direto.	124
5.2	Esquema de estimação híbrido.	129
5.3	Média de <i>EML</i> para estimação por EKF em que $\bar{L} = 100$ na Trajetória 1.	139
5.4	Média de <i>EML</i> para estimação por EKF em que $\bar{L} = 100$ na Trajetória 2.	139

5.5	Desvio-padrão de <i>EML</i> para estimação por EKF em que $\bar{L} = 100$ na Trajetória 1.	140
5.6	Desvio-padrão de <i>EML</i> para estimação por EKF em que $\bar{L} = 100$ na Trajetória 2.	140
5.7	Média de <i>EML</i> para estimação por EKF em que $\bar{L} = 300$ na Trajetória 1.	141
5.8	Média de <i>EML</i> para estimação por EKF em que $\bar{L} = 300$ na Trajetória 2.	141
5.9	Desvio-padrão de <i>EML</i> para estimação por EKF em que $\bar{L} = 300$ na Trajetória 1.	142
5.10	Desvio-padrão de <i>EML</i> para estimação por EKF em que $\bar{L} = 300$ na Trajetória 2.	142
5.11	Média de <i>EML</i> para estimação por PF em que $\bar{L} = 100$ na Trajetória 1.	143
5.12	Média de <i>EML</i> para estimação por PF em que $\bar{L} = 100$ na Trajetória 2.	143
5.13	Desvio-padrão de <i>EML</i> para estimação por PF em que $\bar{L} = 100$ na Trajetória 1.	144
5.14	Desvio-padrão de <i>EML</i> para estimação por PF em que $\bar{L} = 100$ na Trajetória 2.	144
5.15	Média de <i>EML</i> para estimação por PF em que $\bar{L} = 300$ na Trajetória 1.	145
5.16	Média de <i>EML</i> para estimação por PF em que $\bar{L} = 300$ na Trajetória 2.	145
5.17	Desvio-padrão de <i>EML</i> para estimação por PF em que $\bar{L} = 300$ na Trajetória 1.	146
5.18	Desvio-padrão de <i>EML</i> para estimação por PF em que $\bar{L} = 300$ na Trajetória 2.	146
5.19	Média de <i>EML</i> obtida para as técnicas <i>NEMPS</i> , <i>OnOff</i> , PF e EFK, no caso em que $\bar{L} = 100$ na Trajetória 1.	147
5.20	Média de <i>EML</i> obtida para as técnicas <i>NEMPS</i> , <i>OnOff</i> , PF e EFK, no caso em que $\bar{L} = 100$ na Trajetória 2.	147
5.21	Desvio-padrão de <i>EML</i> obtido para as técnicas <i>NEMPS</i> , <i>OnOff</i> , PF e EFK, no caso em que $\bar{L} = 100$ na Trajetória 1.	148
5.22	Desvio-padrão de <i>EML</i> obtido para as técnicas <i>NEMPS</i> , <i>OnOff</i> , PF e EFK, no caso em que $\bar{L} = 100$ na Trajetória 2.	148
5.23	Média de <i>EML</i> obtida para as técnicas <i>NEMPS</i> , <i>OnOff</i> , PF e EFK, no caso em que $\bar{L} = 300$ na Trajetória 1.	149
5.24	Média de <i>EML</i> obtida para as técnicas <i>NEMPS</i> , <i>OnOff</i> , PF e EFK, no caso em que $\bar{L} = 300$ na Trajetória 2.	149
5.25	Desvio-padrão de <i>EML</i> obtido para as técnicas <i>NEMPS</i> , <i>OnOff</i> , PF e EFK, no caso em que $\bar{L} = 300$ na Trajetória 1.	150
5.26	Desvio-padrão de <i>EML</i> obtido para as técnicas <i>NEMPS</i> , <i>OnOff</i> , PF e EFK, no caso em que $\bar{L} = 300$ na Trajetória 2.	150

- 5.27 Média de *EML* obtida para as técnicas *NEMPS*, *OnOff*, PF e EFK, sendo as duas últimas implementadas com erro na definição da equação de processo para o erro de NLOS $((\hat{\sigma}_\nu^2, \hat{a}) = (1, 1\sigma_\nu^2, 0, 9a))$, no caso em que $\bar{L} = 100$ na Trajetória 1. 151
- 5.28 Média de *EML* obtida para as técnicas *NEMPS*, *OnOff*, PF e EFK, sendo as duas últimas implementadas com erro na definição da equação de processo para o erro de NLOS $((\hat{\sigma}_\nu^2, \hat{a}) = (1, 1\sigma_\nu^2, 0, 9a))$, no caso em que $\bar{L} = 100$ na Trajetória 2. 151
- 5.29 Desvio-padrão de *EML* obtido para as técnicas *NEMPS*, *OnOff*, PF e EFK, sendo as duas últimas implementadas com erro na definição da equação de processo para o erro de NLOS $((\hat{\sigma}_\nu^2, \hat{a}) = (1, 1\sigma_\nu^2, 0, 9a))$, no caso em que $\bar{L} = 100$ na Trajetória 1. 152
- 5.30 Desvio-padrão de *EML* obtido para as técnicas *NEMPS*, *OnOff*, PF e EFK, sendo as duas últimas implementadas com erro na definição da equação de processo para o erro de NLOS $((\hat{\sigma}_\nu^2, \hat{a}) = (1, 1\sigma_\nu^2, 0, 9a))$, no caso em que $\bar{L} = 100$ na Trajetória 2. 152
- 5.31 Média de *EML* obtida para as técnicas *NEMPS*, *OnOff*, PF e EFK, sendo as duas últimas implementadas com erro na definição da equação de processo para o erro de NLOS $((\hat{\sigma}_\nu^2, \hat{a}) = (1, 1\sigma_\nu^2, 0, 9a))$, no caso em que $\bar{L} = 300$ na Trajetória 1. 153
- 5.32 Média de *EML* obtida para as técnicas *NEMPS*, *OnOff*, PF e EFK, sendo as duas últimas implementadas com erro na definição da equação de processo para o erro de NLOS $((\hat{\sigma}_\nu^2, \hat{a}) = (1, 1\sigma_\nu^2, 0, 9a))$, no caso em que $\bar{L} = 300$ na Trajetória 2. 153
- 5.33 Desvio-padrão de *EML* obtido para as técnicas *NEMPS*, *OnOff*, PF e EFK, sendo as duas últimas implementadas com erro na definição da equação de processo para o erro de NLOS $((\hat{\sigma}_\nu^2, \hat{a}) = (1, 1\sigma_\nu^2, 0, 9a))$, no caso em que $\bar{L} = 300$ na Trajetória 1. 154
- 5.34 Desvio-padrão de *EML* obtido para as técnicas *NEMPS*, *OnOff*, PF e EFK, sendo as duas últimas implementadas com erro na definição da equação de processo para o erro de NLOS $((\hat{\sigma}_\nu^2, \hat{a}) = (1, 1\sigma_\nu^2, 0, 9a))$, no caso em que $\bar{L} = 300$ na Trajetória 2. 154
- 6.1 Ramos de hipérbolas com 2 pontos de intersecção, resultando em soluções ambíguas para a estimativa de posição. 156
- 6.2 Configuração considerada para o cálculo da região de ambigüidade. 157
- 6.3 Polígono Ω que define os valores possíveis para α e β . 158
- 6.4 Curvas no interior do polígono Ω que definem $R = 0$ e $Q = 0$. 161
- 6.5 Regiões no plano $\alpha\beta$ onde $R > 0$ e $Q < 0$. 161
- 6.6 Regiões de ambigüidade no plano XY . 162
- 6.7 Gráfico de μ em função de $\bar{\omega}_R - \omega_T$, para $\alpha = 3$ e $\sigma_\omega = 12$ dB. 165
- 6.8 Gráfico de μ em função de r/R , para $\alpha = 3$, $\bar{\omega}_R - \omega_T = 15$ dB e $\sigma_\omega = 12$ dB. 166
- 6.9 Região de triangulação (área hachurada) e regiões de ambigüidade. 167

- 6.10 Posição das bases para o cálculo da área de ambigüidade comparada à área de triangulação. A terceira base encontra-se no 2º quadrante. 167
- 6.11 Arranjo hexagonal de células para o cálculo de Λ . 168

Lista de Tabelas

4.1	Tabela característica do Flip-Flop JK	87
4.2	Combinação possível de estados em t_k e t_{k+1} (supondo que t_{k-1} é LOS).	93
6.1	Razão Λ em função da posição da terceira base.	168
7.1	Características dos esquemas de localização.	172