UNIVERSIDADE SANTA CECÍLIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ARNALDO DE CARVALHO JUNIOR

PROPOSTA DE ESTIMADOR DE QUALIDADE DE ENLACE EM REDES DE SENSORES INDUSTRIAIS SEM FIO UTILIZANDO REDE NEURAL ARTIFICIAL PARACONSISTENTE

SANTOS / SP
2017

ARNALDO DE CARVALHO JUNIOR

PROPOSTA DE ESTIMADOR DE QUALIDADE DE ENLACE EM REDES DE SENSORES INDUSTRIAIS SEM FIO UTILIZANDO REDE NEURAL ARTIFICIAL PARACONSISTENTE

Dissertação apresentada à Universidade Santa Cecília como parte dos requisitos para obtenção de título de mestre no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, sob orientação de Prof. Dr. João Inácio da Silva Filho e coorientação do Prof. Dr. Mauricio Conceição Mario.

SANTOS / SP

2017

Autorizo a reprodução parcial ou total deste trabalho, por qualquer que seja o processo, exclusivamente para fins acadêmicos e científicos.

511.3 De Carvalho Junior, Arnaldo.
C327p Proposta de Estimador de Qualidade de Enlace em Redes de Sensores Industriais Sem Fio Utilizando Rede Neural Artificial Paraconsistente / Arnaldo de Carvalho Junior - 2017.
113 f.

Orientador: Prof. Dr. João Inácio da Silva Filho.
Coorientador: Prof. Dr. Mauricio Conceição Mario.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Santa Cecília, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Santos, SP, 2017.

1.Lógica Paraconsistente Anotada. 2. Filtro LPA2v. 3. Rede Neural Artificial Paraconsistente. 4.Rede de Sensores Industriais Sem Fio. 5. Estimador de Qualidade do Enlace.
I. Da Silva Filho, João Inácio. II. Mario, Maurício Conceição III. Título

Elaborada pelo SIBi – Sistema Integrado de Bibliotecas - Unisanta

Dedico este trabalho a meus pais, Arnaldo, in memoriam, por instigar a minha mente e Maria Helena, por me incentivar a aprender, sempre.

AGRADECIMENTOS

À Deus, em primeiro lugar, pois sem ele nada seria possível.

À minha amada esposa Silvana e aos nossos queridos filhos, Augusto e Alvaro, pela compreensão e apoio durante esta jornada.

Ao Professor Dr. João Inácio da Silva Filho, minha eterna gratidão por sua paciência e sábias orientações em Lógica Paraconsistente.

Ao Professor Dr. Maurício Conceição Mário, também por sua paciência, conhecimento e coorientação para a realização deste trabalho.

À equipe da secretaria de Mestrado, Sandra e Imaculada, pelo apoio e sempre pronto atendimento em todas as etapas do processo de estudos.

Aos colegas da turma de mestrandos da UNISANTA, em especial, Alessandro de Lima Marreiro e Silvio Clarindo da Silva parceiros na maioria das atividades em grupo.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo – IFSP, pelo programa de incentivo educacional e apoio que possibilitaram a realização deste trabalho.

RESUMO

Os Processos Industriais Conectados, também chamados de Internet das Coisas Industriais, são possíveis graças ao desenvolvimento de poderosos sistemas de análise de grandes conjuntos de dados e da enorme variedade de sensores eletrônicos, de dimensões reduzidas e grande poder de processamento. Os Sensores Industriais Sem Fio tornaram-se possíveis também devido ao desenvolvimento de sistemas de rádio eficientes e de baixo consumo de energia, possibilitando a instalação mais rápida e fácil, com menores requisitos de infraestrutura do que sistemas tradicionais de automação. Entretanto, vários fatores afetam a *performance* de um enlace de radiofrequência e podem representar um grande desafio ao projeto e implantação de uma rede de nós sensores sem fio em ambiente industrial. Nessas condições, a Lógica Paraconsistente pode ser uma alternativa à lógica clássica para o tratamento de sinais que podem representar informações contraditórias, incompletas ou contaminadas por ruído. O presente trabalho propõe a utilização de algoritmos extraídos dos fundamentos da Lógica Paraconsistente Anotada com anotação de dois valores (LPA2v) para filtrar as métricas de intensidade e qualidade do sinal recebido no enlace de radiofrequência, fornecidas pelos nós sensores sem fio, e utilizá-las para formular uma indicação única e confiável, através de um Estimador da Qualidade do Enlace, construído com Rede Neural Artificial Paraconsistente - RNAP, denominada neste trabalho de EQE-LPA.

Palavras-Chave: Lógica Paraconsistente Anotada. Filtro LPA2v. Rede Neural Artificial Paraconsistente – RNAP. Rede de Sensores Industriais Sem Fio. Estimador de Qualidade do Enlace.

ABSTRACT

The Industrial Connected Processes, also called Industrial Internet of Things, are made possible thanks to the development of powerful systems of analysis of large amount of data (Big Data) and the enormous variety of electronic sensing devices, with reduced dimensions and increased processing power. The Industrial Wireless Sensors are also possible due to the development of efficient and low energy consumption radio frequency systems, allowing a faster and easier installation, with less infrastructure requirements than traditional automation systems. However, several factors affect the performance of the radio link and may represent a great challenge to the design and deployment of a wireless sensor network in the industrial environment. Under these conditions, Paraconsistent Logic may be an alternative to classical logic for the treatment of signals that may represent contradictory, incomplete or noise-contaminated information. This work proposes the use of algorithms extracted from the fundamentals of the Paraconsistent Annotated Logic with annotation of two values (PAL2v) to filter the intensity and quality metrics of the received signal in the radio frequency link, provided by the wireless sensor nodes, and use them to formulate a unique, robust and reliable indication through a Link Quality Estimator, built with Paraconsistent Analysis Neural Artificial Network -PANNet, called in this work as LQE-PAL.

Keywords: Paraconsistent Annotated Logic. PAL2v Filter. Paraconsistent Analysis Neural Artificial Network - PANNet. Industrial Wireless Sensor Network. Link Quality Estimator.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Pilha de Protocolos IEEE 802.15.4 18
Figura 2 - Topologias da IEEE 802.15.4. Star (a) e Peer-to-Peer (b) 20
Figura 3 - Topologia Cluster Tree da IEEE 802.15.4 21
Figura 4 - Funções de Espalhamento e Modulação para o O-QPSK PHY 22
Figura 5 - Amostra de sequência de chips (banda base) e formatação do pulso 22
Figura 6 - Exemplo de Modulação O-QPSK 22
Figura 7 - Seleção de Canais IEEE 802.15.4 23
Figura 8 - Formato do Quadro MAC Geral 25
Figura 9 - Visão Esquemática do PPDU 25
Figura 10 - Pilha de Protocolos de RSSF comerciais 28
Figura 11 - Exemplo de Medição de PSR com Loopback (Range Test) 31
Figura 12 - Reticulado Finito de Hasse da LPA 34
Figura 13 - Reticulado representativo da LPA2v 36
Figura 14 - Reticulado da LPA2v com valores de G_C, G_{CT}, $G_{CmáxF}$ e $G_{CmáxV.}$ 37
Figura 15 - Ponto de Interpolação (G_C,G_{CT}), D e G_{CR}, para $G_C<0$ (a) e $G_C>0$ (b) 38
Figura 16 - Representação do Algoritmo LPA2v 39
Figura 17 - Símbolo da Célula Neural Artificial Paraconsistente Padrão (cNAPp). 41
Figura 18 - Símbolo da cNAPap. 42
Figura 19 - Valor 1 aplicado à entrada μ e resposta μ_E na saída de uma cNAPap. 43
Figura 20 - Valor 0 aplicado à entrada μ e resposta μ_E na saída de uma cNAPap. 43
Figura 21 - Rede de até 6 cNAPap como Extrator de Média Aritmética 45
Figura 22 - Filtro LPA2v 46
Figura 23 - Atenuação de Ruído com Filtro LPA2v 47
Figura 24 - cNAPap com elementos discretos (a) e em bloco (b). 47
Figura 25 - cNAPapxct com elementos discretos (a) e em bloco (b). 48
Figura 26 - Aplicação de Degrau com Ruído a Filtro com cNAPap e cNAPapxct. 48
Figura 27 - Atuação do Filtro LPA2v com 1, 3 e 6 cNAPap. 49
Figura 28 - Atuação do Filtro LPA2v com 1, 3 e 6 cNAPapxct e F_A = 0,5. 49
Figura 29 - Levantamento da Curva de Resposta em Frequência do Filtro LPA2v 50
Figura 30 - Resposta em Frequência do Filtro LPA2v para 1, 3 e 6 cNAPap. 50
Figura 31 - Filtros LPA2v com 6 cNAPap e 3 cNAPapxct com F_A=0,35. 51
Figura 32 - Diagrama de Blocos do Algoritmo EQE-LPA 52
Figura 33 - cNAPp em blocos discretos (a) e Integrado (b) no SIMULINK. 54

Figura 34 - RNAP Proposta para o EQE-LPA 54
Figura 35 - Câmera Sem Fio TRUST™ modelo TTA-30T (a) e Funcionamento (b) ..55
Figura 36 - Sobreposição de canais entre Interferente e IEEE 802.15.4 56
Figura 37 - Transceptor UBEE da Fractum® (a) e adaptador USB (b) 57
Figura 38 - Informação de RSSI e LQI fornecida por pacote recebido. 57
Figura 39 - Tela de Configuração da Interface Serial do Software RealTerm. 58
Figura 40 - Tela de Configuração de Envio de Dados no RealTerm. 58
Figura 41 - Configuração Ensaios de RSSI e LQI 59
Figura 42 - Normalização de RSSI para μ 60
Figura 43 - Normalização de LQI para λ 60
Figura 44 - Comportamento esperado do EQE-LPA em MS Excel. 61
Figura 45 - EQE-LPA no SIMULINK.....63
Figura 46 - EQE-LPA LB para PSR ao invés de LQI.....63
Figura 47 - Transceptor XBEE (a); ver. S1 (b); mod. XB24, Freescale MC13212.....64
Figura 48 - Janela da ferramenta Range Test, X-CTU, para transceptores X-BEE. .65
Figura 49 - Procedimento Ensaio Loopback com Módulos XBEE. 65
Figura 50 - Módulo Adaptador XBEE para Serial/USB modelo INT700. 66
Figura 51 - Normalização do RSSI para o EQE-LPA LB. 67
Figura 52 - Normalização do PER para o EQE-LPA LB. 68
Figura 53 - Comportamento esperado EQE-LPA LB em MS Excel. 68
Figura 54 - Ensaio 1, A=>B, 9,6 kbps, 1 metro, sem interferência. 70
Figura 55 - Ensaio 1, métricas RSSI e LQI.....72
Figura 56 - Ensaio 1, métricas RSSI e LQI filtradas e EQE-LPA.....72
Figura 57 - Ensaio 1, resultado EQE-LPA e máscara de classificação 73
Figura 58 - Ensaio 3, A=>B, 9,6 kbps, 5 metros, sem interferência 73
Figura 59 - Ensaio 3, métricas RSSI e LQI.....74
Figura 60 - Ensaio 3, métricas RSSI e LQI filtradas e EQE-LPA.....74
Figura 61 - Ensaio 3, resultado EQE-LPA e máscara de classificação. 75
Figura 62 - Ensaio 4, A=>B, 9,6 kbps, 5 metros, com interferência. 75
Figura 63 - Ensaio 4, métricas RSSI e LQI.....76
Figura 64 - Ensaio 4, métricas RSSI e LQI filtradas e EQE-LPA 76
Figura 65 - Ensaio 4, resultado EQE-LPA e máscara de classificação. 77
Figura 66 - Ensaio 32, B=>A, 115,2 kbps, 12 metros, com interferência. 77
Figura 67 - Ensaio 32, métricas RSSI e LQI.....78

Figura 68 - Ensaio 32, métricas RSSI e LQI filtradas e EQE-LPA.....78
Figura 69 - Ensaio 32, resultado EQE-LPA e máscara de classificação. 79
Figura 70 - Métricas RSSI e LQI para A=>B, 9,6 kbps sem interferência. 80
Figura 71 - EQE-LPA para ensaios de A=>B, 9,6 kbps sem interferência. 80
Figura 72 - Métricas RSSI e LQI para A=>B, 9,6 kbps com interferência. 80
Figura 73 - EQE-LPA para ensaios de A=>B, 9,6 kbps com interferência. 81
Figura 74 - Métricas RSSI e LQI para B=>A, 9,6 kbps sem interferência. 81
Figura 75 - EQE-LPA para ensaios de B=>A, 9,6 kbps sem interferência. 82
Figura 76 - Métricas RSSI e LQI para B=>A, 9,6 kbps com interferência. 82
Figura 77 - EQE-LPA para ensaios de B=>A, 9,6 kbps com interferência. 83
Figura 78 - Métricas RSSI e LQI para A=>B, 115,2 kbps sem interferência. 83
Figura 79 - EQE-LPA para ensaios de A=>B, 115,2 kbps sem interferência. 84
Figura 80 - Métricas RSSI e LQI para A=>B, 115,2 kbps com interferência. 84
Figura 81 - EQE-LPA para ensaios de A=>B, 115,2 kbps com interferência. 85
Figura 82 - Métricas RSSI e LQI para B=>A, 115,2 kbps sem interferência. 85
Figura 83 - EQE-LPA para ensaios de B=>A, 115,2 kbps sem interferência. 86
Figura 84 - Métricas RSSI e LQI para B=>A, 115,2 kbps com interferência. 86
Figura 85 - EQE-LPA para ensaios de B=>A, 115,2 kbps com interferência. 87
Figura 86 - Ensaio 39, A=>B, 115,2 kbps, obstáculos, com interferência. 88
Figura 87 - Ensaio 39, RSSI e LQI para A=>B, 115,2 kbps com interferência. 89
Figura 88 - Ensaio 39, métricas RSSI e LQI filtradas e EQE-LPA.....89
Figura 89 - EQE-LPA para ensaio 39, 115,2 kbps com interferência. 89
Figura 90 - 1º Ensaio Loopback. Gráfico (a) e Valores RSSI e PSR (b). 90
Figura 91 - 1º Ensaio Loopback com EQE-LPA LB.....90
Figura 92 - 1º Ensaio Loopback com Gráfico do EQE-LPA LB. 91
Figura 93 - 24º Ensaio Loopback. Gráfico (a) e Valores RSSI e PSR (b). 91
Figura 94 - 24º Ensaio Loopback com EQE-LPA LB.....92
Figura 95 - 24º Ensaio Loopback com Gráfico do EQE-LPA LB 92
Figura 96 - 30º Ensaio Loopback. Gráfico (a) e Valores RSSI e PSR (b) 93
Figura 97 - 30º Ensaio Loopback com EQE-LPA LB.....93
Figura 98 - 30º Ensaio Loopback com Gráfico do EQE-LPA LB. 94
Figura 99 - 39º Ensaio Loopback. Gráfico (a) e Valores RSSI e PSR (b). 94
Figura 100 - 39º Ensaio Loopback com EQE-LPA. 95
Figura 101 - 39º Ensaio Loopback com Gráfico do EQE-LPA.....95

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Bandas e Taxas Típicas da Camada PHY IEEE 802.15.4 19
Tabela 2 - Comparativo entre Padrões de RSSF Comerciais 28
Tabela 3 - Número de cNAPap x Erro Médio e Iterações 44
Tabela 4 - Relação entre Fo e Fc do Filtro LPA2v 50
Tabela 5 - Classificação EQE-LPA do Enlace em função do μ_{ER} 53
Tabela 6 - Normalização adotada do LQI x λ. 61
Tabela 7 - Comportamento esperado EQE-LPA em MS Excel 62
Tabela 8 - Normalização do PSR e PER 68
Tabela 9 - Comportamento esperado EQE-LPA LB em MS Excel 69
Tabela 10 - Ensaios para medições RSSI e LQI 71
Tabela 11 - Ensaios Loopback a 9,6 kbps e Resultados EQE-LPA LB. 96
Tabela 12 - Ensaios Loopback a 115,2 kbps e Resultados EQE-LPA LB 96

LISTA DE SIGLAS

ACK	Acknowledgement
bps	Bit Por Segundo
CRC	Cyclic Redundancy Check
CCA	Clear Channel Assessment
cNAP	Célula Neural Artificial Paraconsistente
cNAPp	Célula Neural Artificial Paraconsistente Padrão
cNAPap	Célula Neural Artificial Paraconsistente de Aprendizagem
cNAPapxct	Célula Neural Artificial Paraconsistente de Aprendizagem por Extração da Contradição
CSMA-CA	Carrier Sense Multiple Access / Collision Avoidance
dB	Decibel
DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum
ED	Energy Detection
EQE	Estimador da Qualidade do Enlace
EQE-LPA	Estimador da Qualidade do Enlace – Lógica Paraconsistente Anotada
FCC	Federal Communications Commission
FCS	Frame Check Sequence
FFD	Full-Function Device
FSL	Free Space Loss
GTS	Guaranteed Time Slot
Hz	Hertz
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IETF	Internet Engineering Task Force
IIoT	Industrial Internet of Things
IoT	Internet of Things
ISM	Industrial Scientific & Medical
IWSN	Industrial Wireless Sensor Network
LP	Lógica Paraconsistente
LPA	Lógica Paraconsistente Anotada
LPA2v	Lógica Paraconsistente Anotada com Anotação de Dois Valores
LQI	Link Quality Indicator
LQE	Link Quality Estimator

LQE-PAL	Link Quality Estimator – Paraconsistent Annotated Logic
MAC	Media Access Control
MFR	MAC Footer
MHR	MAC Header
MLME	MAC Sublayer Management Entity
MLME-SAP	MAC Sublayer Management Entity – Service Access Point
NAP	Nó de Análise Paraconsistente
NSSF	Nó Sensor Sem Fio
O-QPSK	Orthogonal-Quadrature Phase Shift Keying
PAL	Paraconsistent Annotated Logic
PER	Packet Error Rate
PHR	PHY Header
PPDU	PHY Protocol Data Unit
PRR	Packet Reception Rate
PSDU	PHY Service Data Unit
PSR	Packet Success Rate
PtP	Peer-to-Peer
RFC	Request for Comments
RFD	Reduced-Function Device
RNAP	Rede Neural Artificial Paraconsistente
RISSF	Rede Industrial de Sensores Sem Fio
RSSF	Rede de Sensores Sem Fio
RSSI	Received Signal Strength Indicator
SHR	Synch Header
SNR	Signal to Noise Ratio
TCP/IP	Transmission Control Protocol / Internet Protocol
TPE	Taxa de Pacotes Errados
WLAN	Wireless Local Area Network
WPAN	Wireless Personal Area Network
WSN	Wireless Sensor Node

LISTA DE SÍMBOLOS

τ	Reticulado finito
~	Operador de negação
μ	Grau de crença (ou de evidência favorável)
λ	Grau de descrença (ou evidência desfavorável)
$\mathbb{R}$	Conjunto dos números reais
T	Inconsistente
V	Verdadeiro
$\perp$	Paracompleto ou Indeterminado
P_{T}	Conotação de Inconsistente à proposição *P*
P_{V}	Conotação de Verdade à proposição *P*
P_{F}	Conotação de Falsidade à proposição *P*
$P\perp$	Conotação de Paracompleteza à proposição *P*
$P\mu$	Sentença proposicional
QUPC	Quadrado Unitário no Plano Cartesiano
G_C	Grau de Certeza
G_{CT}	Grau de Contradição
P	Proposição Inicial
S1,S2	Saídas da cNAP
$G_{CmáxV}$	Valor máximo para um estado lógico de Verdade
$G_{CmáxF}$	Valor máximo para um estado lógico de Falsidade
φ	Intervalo de certeza
$\varphi(\pm)$	Intervalo de Certeza sinalizado
φ_E	Intervalo De Evidência Resultante
$\varphi_E(\pm)$	Intervalo De Evidência Resultante Sinalizado

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 13
1.1 OBJETIVOS 15
1.1.1 OBJETIVOS GERAIS 15
1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS 15
1.2 JUSTIFICATIVA 15
1.3 RELEVÂNCIA DO TEMA 15
1.4 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO 16
2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS 17
2.1 SENSORES INDUSTRIAIS SEM FIO 17
2.1.1 O PADRÃO IEEE 802.15.4 17
2.1.2 PADRÕES BASEADOS NO IEEE 802.15.4 26
2.2 MÉTRICAS DE QUALIDADE DE ENLACE EM RSSF 29
2.2.1 TRATAMENTO DAS MÉTRICAS RSSI E LQI 29
2.2.2 MÉTRICA PSR E TESTE DE LOOPBACK 30
2.3 SISTEMAS DE ANÁLISE PARACONSISTENTE 32
2.3.1 LÓGICA PARACONSISTENTE 32
2.3.2 LÓGICA PARACONSISTENTE ANOTADA 33
2.3.3 LÓGICA PARACONSISTENTE ANOTADA COM ANOTAÇÃO DE DOIS VALORES 34
2.3.4 NÓ DE ANÁLISE PARACONSISTENTE 39
2.3.5 CÉLULAS NEURAIS ARTIFICIAIS PARACONSISTENTES 41
2.3.6 EXTRATOR DE MÉDIA MÓVEL COM RNAP 44
3. MATERIAIS E MÉTODOS 46
3.1 PROPOSTA DE FILTRO DE MÉDIA LPA2v PARA TRATAMENTO DE SINAIS 46
3.1.1 VALIDAÇÃO DO FILTRO LPA2v 47
3.2 ESTIMADOR DE QUALIDADE DO ENLACE LPA2v 52
3.2.1 EQE-LPA COM RSSI E LQI 52
3.2.2 EQE-LPA LB (LOOPBACK, RSSI E PSR/PER) 63
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES 70
4.1 MEDIÇÕES RSSI/LQI E RESPOSTA EQE-LPA 70
4.1.1 DISCUSSÃO SOBRE ENSAIOS EQE-LPA 87
4.2 MEDIÇÕES RSSI/PSR E RESPOSTA EQE-LPA LB 90

4.2.1 DISCUSSÃO SOBRE ENSAIOS EQE-LPA LB 97
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS 98
5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS 98
5.2 TRABALHOS FUTUROS 99
REFERÊNCIAS 100
APENDICE A - CÓDIGO EQE-LPA EM MATLAB® 104
PROGRAMA PRINCIPAL EQE-LPA 104
SUB-ROTINA EQE-LPA DE LEITURA RSSI E LQI 104
SUB-ROTINA EQE-LPA PARA GERAÇÃO DE GRÁFICOS 105
BLOCO FUNCIONAL NORMALIZADOR 1 - RSSI 105
BLOCO FUNCIONAL NORMALIZADOR 2 - LQI 106
APENDICE B - CÓDIGO EQE-LPA LB EM MATLAB® 107
PROGRAMA PRINCIPAL EQE-LPA LB 107
SUB-ROTINA EQE-LPA LB PARA GERAÇÃO DE GRÁFICO 109

1. INTRODUÇÃO

Desde que o protocolo TCP/IP, utilizado pelas redes de computadores, e a *Internet* começaram a se popularizar a partir de 1991, a ideia de conectar diferentes objetos é discutida. Primeiramente Bill Joy, cofundador da empresa Sun Microsystems, pensou sobre a conexão de Dispositivo para Dispositivo (*Device to Device - D2D*). O termo *Internet* das Coisas (*Internet of Things – IoT*) foi proposto por Kevin Ashton do MIT durante uma apresentação em 1999 e publicado 10 anos depois, por ele mesmo, em um artigo para o *RFID Journal* (ASHTON, 2009). Segundo Weiss et al. (2015), processadores e sensores de baixo consumo de energia e redes sem fio inteligentes, associados a sistemas de análise de grandes conjuntos de dados (*Big Data*) tem liderado uma forte demanda por sistemas industriais conectados, chamados de *Internet* das Coisas Industriais (*Industrial Internet of Things – IIoT*).

De acordo com Gungor et al. (2009), sistemas de transmissão por rádio frequência eficientes e de baixo consumo de energia possibilitam o aparecimento de diferentes tecnologias para Redes Industriais de Sensores Sem Fio - RISSF (*Industrial Wireless Sensor Network - IWSN*), que permitem uma rápida e fácil instalação com menores requisitos de infraestrutura, podendo assim melhorar a produtividade de sistemas industriais com maior sensibilidade, controle e integração de processos de negócios das empresas.

Para Werb (2014), a implantação de instrumentação industrial sem fio pode significar de 20 a 30% de economia, se comparado ao seu equivalente de sistema cabeado. As tecnologias adotadas estão fundamentadas em 2 padrões: Redes Locais Sem Fio (*Wireless Local Area Network - WLAN*) baseados na família de normas IEEE 802.11 e Rede de Área Pessoal Sem Fio (*Wireless Personal Area Network - WPAN*), na norma IEEE 802.15.4 (SILVA et al., 2013).

Vários padrões comerciais de RISSF são baseados na norma IEEE 802.15.4, tais como ZIGBEE®, WirelessHART®, ISA100 Wireless™ e 6LoWPAN; utilizando o espectro de frequências não licenciado para aplicações industriais, médicas e científicas (*Industrial, Scientific & Medical – ISM Band*), na banda de 2.4 GHz. Esse espectro está regulamentado pela resolução 506 (ANATEL, 2008) da Agência Nacional de Telecomunicações - ANATEL e todos os dispositivos, independente de licença, devem ser homologados para serem comercializados no Brasil.

A não exigência de licenciamento favorece o desenvolvimento de diversos dispositivos e tecnologias que precisam conviver na mesma banda de 2.4 GHz, tais

como as redes sem fio (WIFI™), telefones e câmeras sem fio, fornos de micro-ondas, controles de jogos eletrônicos, Bluetooth, entre outros. A questão da convivência vem se tornando tão crítica que em 2004 o IEEE criou um grupo técnico consultivo, chamado de IEEE 802.19 (*Wireless Coexistence Technical Advisory Group – TAG*) para discutir e desenvolver políticas que permitam uma convivência entre redes de espectro não licenciado (SHELLHAMMER, 2004).

Os enlaces de comunicação nas RISSF podem sofrer flutuações significativas de qualidade e conectividade fraca devido a vários fatores, tais como: baixa potência de transmissão, sensibilidade ao ruído, interferência, e distorção de multipercurso. Segundo Sexton et al. (2005), uma compreensão apropriada das características do canal de rádio é necessária de modo a determinar as margens de projeto, permitindo minimizar esforços de instalação e de reconfigurações de rede devido a alterações do ambiente no entorno da rede. Conforme observado por Baccour et al. (2014), uma indicação confiável da Estimativa da Qualidade do Enlace – EQE (*Link Quality Estimation – LQE*) é necessária para a implantação de RISSF e para a concepção da pilha de protocolos sobre a camada IEEE 802.15.4 em soluções comerciais, tais como os protocolos do controle da topologia, roteamento e mobilidade.

O padrão IEEE 802.15.4 estabelece serviços úteis definidos em *hardware* que podem ser usados para a estimativa da qualidade do enlace, incluindo a Detecção da Energia Recebida (*Receiver Energy Detection – ED*) ou Indicador da Intensidade do Sinal Recebido (*Received Signal Strength Indicator – RSSI*) que estima a potência total do sinal na largura de banda do canal e o Indicador da Qualidade do Enlace (*Link Quality Indicator – LQI*) que estima a qualidade de um pacote de dados recebido.

As amostras sucessivas de *RSSI* e *LQI* podem ser imprecisas, distorcidas ou contaminadas por ruído e interferência. Além disso, as medidas de *RSSI* e *LQI* podem guardar valores contraditórios entre si. Como apresentado em Da Silva Filho (2008) e Da Silva Filho (2012), quando múltiplas inferências apresentam inconsistências, a Lógica Paraconsistente Anotada - LPA, que é um tipo de lógica não clássica, em sua forma de anotação com dois valores (LPA2v), tem se mostrado adequada ajudando a resolver conflitos através do conhecimento de evidências.

Por suas características, a LPA2v pode ser investigada tanto no tratamento (filtragem) das métricas *RSSI* e *LQI* como na formulação de um Estimador de Qualidade de Enlace robusto e de baixa complexidade matemática que possibilite superar as dificuldades apresentadas pelas redes sem fio.

1.1 OBJETIVOS

Os objetivos gerais e específicos, a justifivativa e relevância do tema são apresentados a seguir, bem como a organização deste documento.

1.1.1 OBJETIVOS GERAIS

Esta pesquisa tem como objetivo geral estudar o comportamento dos indicadores utilizados em enlaces de comunicação por radiofrequência das Redes de Sensores Industriais sem fio para propor o desenvolvimento de novas técnicas que apresentem formas eficientes de filtragem de média de variáveis.

1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

O objetivo desta pesquisa é formular uma técnica de Estimador de Qualidade de Enlace com precisão e baixo custo computacional combinando as métricas disponíveis em *hardware* de dispositivos padrão IEEE 802.15.4 e algoritmos estruturados em Lógica Paraconsistente Anotada para melhor representar a qualidade efetiva de enlace de rádio em sistemas de sensores sem fio.

1.2 JUSTIFICATIVA

Para Jayasri et al. (2014), uma das melhores maneiras de preservar energia dos nós sensores sem fio é otimizando a comunicação de rádio, que consome parte significativa de energia. Uma estimativa da qualidade do enlace, baseado em métricas de potência do sinal e qualidade dos pacotes recebidos pode ser utilizada para controlar o enlace, prevenir perdas de pacotes e reduzir retransmissões. Assim sendo, uma técnica de estimativa de qualidade do enlace simples e de baixo custo é necessária.

1.3 RELEVÂNCIA DO TEMA

Nós Sensores Sem Fio – NSSF (*Wireless Sensor Nodes* – *WSN*) com elevada eficiência em termos de potência, transmissão, capacidade de computação, baixo consumo de energia e dimensões reduzidas oferecem diversas possibilidades de uso

em ambiente industrial e mais especificamente, nas linhas de transmissão modernas estruturadas, na *Internet* das coisas. A utilização de algoritmos baseados na Lógica Paraconsistente Anotada com Anotação de dois valores (LPA2v) aplicada na filtragem de variáveis e na formação de uma métrica única para Estimador em enlace de rádio apresenta-se como uma inovação para as redes industriais de sensores sem fio que buscam melhor confiabilidade e preservação de energia.

1.4 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está estruturada da seguinte forma:

O Capítulo 2 apresenta o fundamento teórico referente à Rede de Sensores Sem Fio (RSSF) e à Lógica Paraconsistente Anotada (LPA). Sobre RSSF são abordados os aspectos relevantes das camadas Física e MAC da norma IEEE 802.15.4, os padrões comerciais de RSSF e características das métricas *ED* (*RSSI*) e *LQI* descritas na norma, além da medição da métrica Taxa de Pacotes Transmitidos com Sucesso (*Packet Success Rate – PSR*). Neste capítulo são apresentados também uma breve introdução sobre a lógica LPA, as características e equações matemáticas da LPA2v e sua aplicação em células neurais artificiais paraconsistentes, com ênfase na cNAPap.

O Capítulo 3 apresenta a proposta de filtragem de sinais com Redes Neurais Artificiais Paraconsistentes – RNAP, composta por cNAPap ou cNAPapxct e sua validação, denominado como Filtro LPA2v. Neste mesmo capítulo são apresentados a proposta e desenvolvimento do Estimador de Qualidade de Enlace com LPA2v (EQE-LPA) e os materiais e métodos para a medição das métricas *RSSI* e *LQI* de modo a validar o Estimador. De forma alternativa, quando a métrica *LQI* não está disponível, um Estimador opcional é apresentado e desenvolvido, denominado EQE-LPA LB, fazendo uso das métricas *RSSI* e *PSR* obtidas através de ensaios de *Loopback*, cujos materiais e métodos são descritos neste capítulo.

O Capítulo 4 se inicia com os resultados de valores de *RSSI* e *LQI* medidos em diferentes situações, apresentados e submetidos ao algoritmo EQE-LPA proposto para análise e comentários. Da mesma forma, ensaios de *Loopback* em diferentes cenários são realizados e os resultados são aplicados ao algoritmo EQE-LPA LB para análise e comentários.

O Capítulo 5 encerra esta dissertação com as contribuições, considerações finais e sugestões de trabalhos futuros.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Uma fundamentação teórica de suporte à esta dissertação será apresentada neste capítulo, sobre o Padrão IEEE 802.15.4, base das principais tecnologias de Redes de Sensores Sem Fio - RSSF, sobre as métricas utilizadas para avaliação da qualidade de enlaces de rádio em RSSF e sobre à Lógica Paraconsistente Anotada (LPA) na formação de células neurais artificiais paraconsistentes - cNAP.

2.1 SENSORES INDUSTRIAIS SEM FIO

A evolução da microeletrônica permitiu o desenvolvimento de dispositivos com dimensões cada vez mais reduzidas, com alguma capacidade computacional, baixo consumo de energia e baixo custo. Este avanço tecnológico permitiu o surgimento de Nós Sensores Sem Fio (NSSF) (*Wireless Sensor Node – WSN*) possibilitando monitorar fenômenos físicos de um determinado ambiente via enlaces de rádio frequência de curta distância. Vários desses nós comunicando-se entre si e executando aplicações individuais formam uma Rede de Sensores Sem Fio – RSSF (*Wireless Sensor Network - WSN*) (AKYILDIZ, 2002).

2.1.1 O PADRÃO IEEE 802.15.4

Em 2003 o IEEE definiu o protocolo e a interconexão compatível para comunicação de dados utilizando dispositivos de baixa potência, baixa taxa de transmissão de dados e baixa complexidade para transmissões de rádio de curto alcance em redes de área pessoal sem fio (*Wireless Personal Area Network – WPAN*), sendo identificado como padrão 802.15.4. Várias revisões (2006, 2007, 2009, 2011) foram feitas e vem sendo realizadas de modo a eliminar ambiguidades e incorporar melhorias ao padrão.

O padrão IEEE 802.15.4 define apenas a camada física (PHY) e a camada de controle de acesso ao meio na interface aérea (MAC), incluindo o mecanismo CSMA-CA que evita que dois dispositivos transmitam ao mesmo tempo. A Figura 1 apresenta a pilha de protocolos do IEEE 802.15.4 e a conexão com as camadas superiores, que devem incluir o controle do enlace lógico (*Logical Link Control - LLC*), roteamento de mensagens, configuração de rede, manipulação, autocura (*self-healing*) em redes *mesh*, e camada de aplicação.

As funcionalidades da camada física incluem a ativação e desativação de um transceptor de rádio, detecção de energia (ED), indicação da qualidade do enlace (*LQI*), seleção do canal, avaliação do canal limpo (*clear channel assessment – CCA*), transmissão e recepção de pacotes através do meio físico.

A camada física fornece dois serviços: serviço de dados PHY (*PHY data service*) e serviço de gerenciamento PHY (*PHY management service*). O serviço de dados PHY estabelece a transmissão e recepção de unidades de dados do protocolo da camada física (*PHY protocol data unit - PPDU*) pelo canal físico de rádio. A carga útil de dados (*payload*) transportados na camada física e recebido da subcamada MAC é chamado de PSDU (*PHY Service Data Unit*).

A subcamada MAC também fornece dois serviços: o serviço de dados MAC (*MAC data service*) e o serviço de gerenciamento MAC conectando para a entidade de gerenciamento de subrede MAC (*MAC sublayer management entity - MLME*) ponto de acesso de serviço (*service access point – SAP*), conhecido como (MLME-SAP). O serviço de dados MAC permite a transmissão e recepção de unidades de dados do protocolo MAC (MPDU) através do serviço de dados PHY.

As funcionalidades da subcamada MAC são o gerenciamento de sinalizador (*beacon*), acesso ao canal, gerenciamento da Janela de Tempo Garantida (*Guaranteed Time Slot - GTS*), validação de quadro, reconhecimento de entrega de quadro, associação e desassociação de PAN. A subcamada MAC fornece ainda os “ganchos” para implementação de mecanismos próprios de segurança pela camada de aplicação (fora do escopo do padrão).

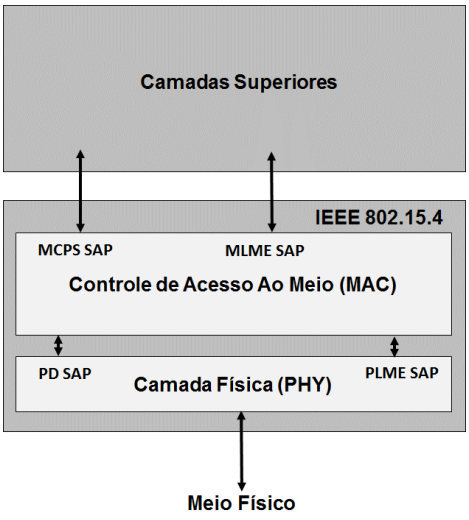


Figura 1 - Pilha de Protocolos IEEE 802.15.4

Fonte: IEEE 802.15.4 Standard (2011, p.11).

2.1.1.1 CAMADA FÍSICA

O padrão IEEE 802.15.4 2011 suporta uma série de bandas de frequências e taxas de dados, conforme Tabela 1. O escopo desta dissertação se concentrará em dispositivos que operam na banda de 2.4 GHz com espalhamento espectral de sequência direta (*PHY 2450 DSSS - Direct Sequence Spread Spectrum*).

Dois tipos de dispositivos podem participar de uma rede IEEE 802.15.4, o dispositivo com todas as funções (*full-function device – FFD*) e o dispositivo de funções reduzidas (*reduced-function device – RFD*). Um dispositivo FFD é capaz de servir como coordenador da rede PAN. Já o dispositivo RFD é mais simples, não tem a necessidade de enviar grandes quantidades de dados, não podendo exercer a função de coordenador e somente pode estar associado a uma PAN de cada vez.

Tabela 1 - Bandas e Taxas Típicas da Camada PHY IEEE 802.15.4

PHY (MHz)	Banda (MHz)	Parametros de Espalhamento		Parâmetros de Dados		
		Chip Rate (kcps)	Modulação	Taxa de bits (kbps)	Taxa Símbolos (ksps)	Símbolos
780	779 - 787	1000	O-QPSK	250	62,5	16-ary ortogonal
780	779 - 787	1000	MPSK	250	62,5	16-ary ortogonal
868/915	868-868,6	300	BPSK	20	20	Binário
	902-928	600	BPSK	40	40	Binário
950	950-956	-	GFSK	100	100	Binário
		300	BPSK	20	20	Binário
2450 DSSS	2400 - 2483,5	2000	O-QPSK	250	62,5	16-ary ortogonal

Fonte: IEEE 802.15.4 Standard (2011, p.147)

Dois dispositivos em uma única conexão ponto-a-ponto não formam uma rede, apenas um enlace. Nesse caso os dispositivos estarão operando em modo transparente, como um modem e não requerem endereçamento. Dois ou mais dispositivos comunicando no mesmo canal físico constituem uma WPAN, que inclui no mínimo um FFD funcionando como coordenador PAN e requerem endereçamento.

As topologias suportadas pelo padrão IEEE 802.15.4 são, a Estrela (*Star*) e Ponto-a-Ponto ou Par-a-Par (*Peer-to-Peer - PtP*), conforme a Figura 2. Na topologia Star todos os dispositivos somente podem comunicar com o coordenador. Já na topologia *PtP*, todos podem comunicar com todos, desde que estejam em alcance e somente em associação par-a-par. Dispositivos RFD somente podem formar um par de cada vez.

A topologia *PtP* permite a formação de redes mais complexas, como a rede em malha (*mesh*). Aplicações como monitoramento e controle industrial, redes de sensores sem fio, rastreamento de ativos e inventário, agricultura inteligente e segurança podem se beneficiar de uma topologia de rede *mesh*. Uma rede *PtP* permite múltiplos dispositivos (*hops*) rotear mensagens de qualquer dispositivo para qualquer dispositivo na rede. A função de roteamento deve ser adicionada por camadas de rede mais altas, que não fazem parte do escopo da norma IEEE 802.15.4. A topologia *mesh* é implementada pela maioria dos padrões comerciais em camadas adicionais sobre a pilha de protocolos do padrão IEEE 802.15.4.

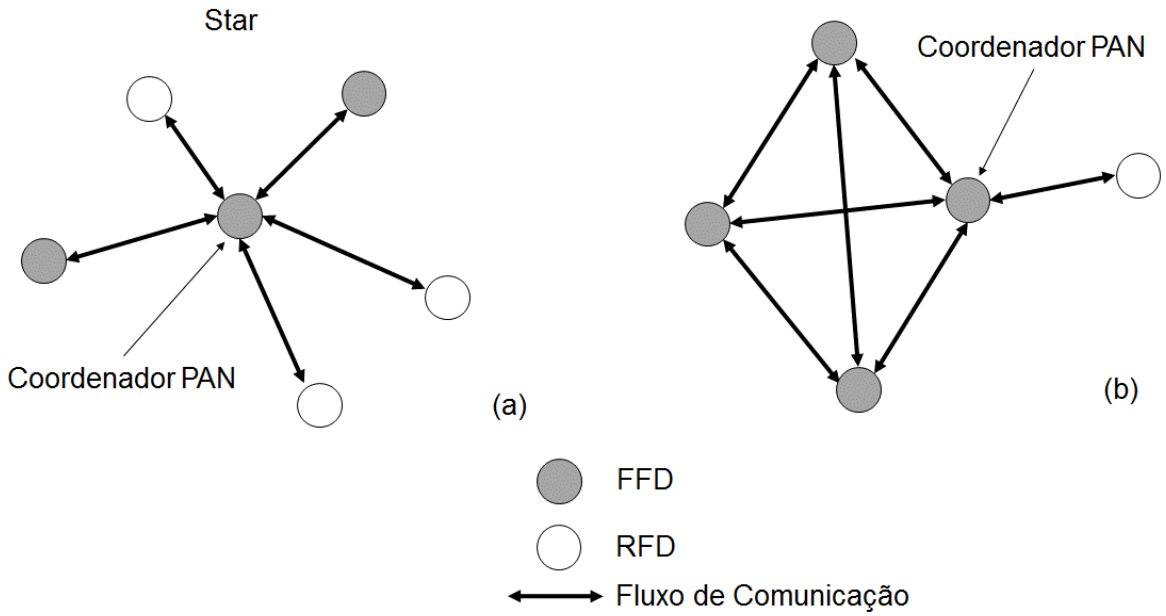


Figura 2 - Topologias da IEEE 802.15.4. Star (a) e *Peer-to-Peer* (b)

Fonte: Adaptado de IEEE 802.15.4 Standard (2011, p.9).

Cada rede PAN possui um identificador único. Isso permite a comunicação entre dispositivos de uma mesma PAN utilizando endereços curtos e também a comunicação através de redes independentes. Um exemplo de comunicação *PtP* com múltiplos PAN e vários dispositivos FFD é a topologia árvore (*cluster tree*), conforme Figura 3. Uma grande topologia de árvore única é possível. Topologias de múltiplas árvores (*multi-cluster tree*) é possível com a implementação de *mesh*. A grande vantagem de topologia *multi-cluster tree* é o aumento da área de cobertura, com a contrapartida de aumento da latência das mensagens.

Conforme apresentado na Tabela 1, a modulação adotada pelo IEEE 802.15.4 na banda de 2.4 GHz é o Modulação por Deslocamento de Fase em Quadratura Ortogonal (*Orthogonal-Quadrature Phase Shift Key - O-QPSK*), com taxa de 250 kbps na camada física.

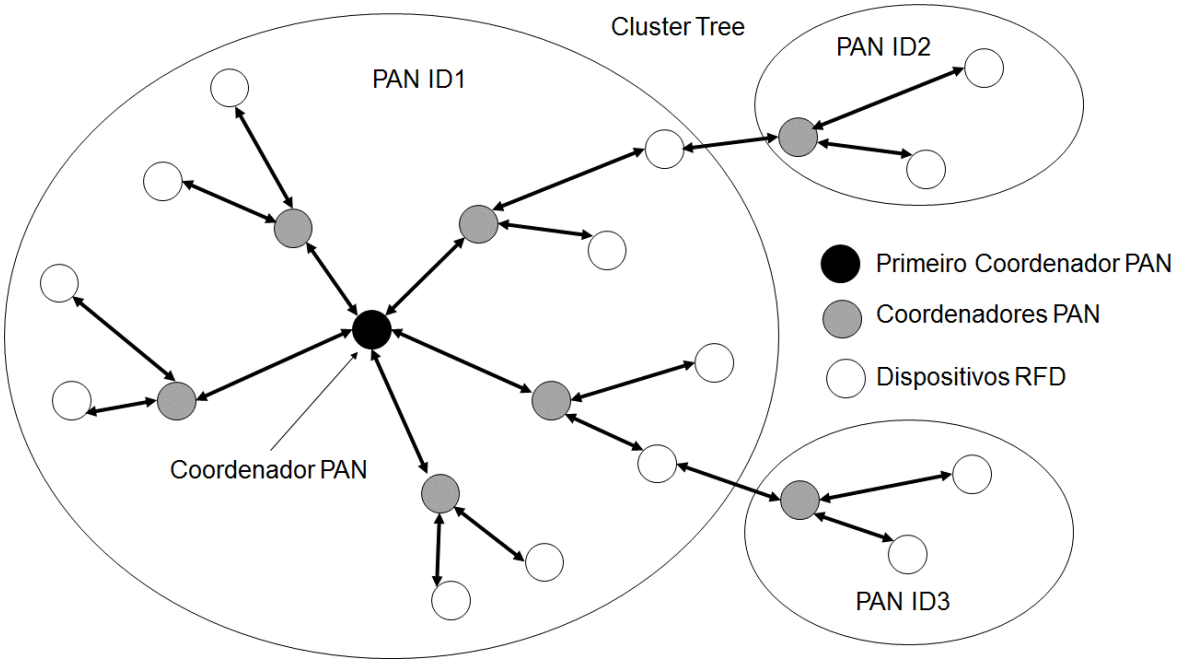


Figura 3 - Topologia *Cluster Tree* da IEEE 802.15.4

Fonte: Adaptado de IEEE 802.15.4 Standard (2011, p.10)

O processo de espalhamento espectral, codificação e modulação é conforme apresentado na Figura 4. Cada Byte de dados binários que formam o PPDU é quebrado em 2 metades. A metade de bits mais significativos (*most significant bits - MSB*) e menos significativos (*least significant bits – LSB*), formando assim sequencias de 4 bits. Cada sequência corresponde, sendo então mapeada, a 1 de 16 símbolos de dados (*data symbol*) possíveis. Em seguida os símbolos de dados são mapeados a uma de 16 sequencias pseudo-ruído (pseudo-noise – PN) de 32 bits cada, ou *chips*. Finalmente cada *chip* é aplicado ao modulador O-QPSK. Os bits pares da sequência PN são aplicados ao modulador *I* enquanto os bits impares, ao modulador *Q*, defasado em 90º do modulador *I*. A saída de ambos os moduladores é somada, formando um sinal modulado com 4 fases possíveis. O resultado é uma taxa de símbolos de 62,5 k símbolos/seg. A Figura 5 apresenta uma amostra de sequencias de *chip* aplicadas aos moduladores *I* e *Q*. A Figura 6 apresenta um exemplo de modulação O-QPSK, pela soma das modulações dos sinais *I* e *Q*.

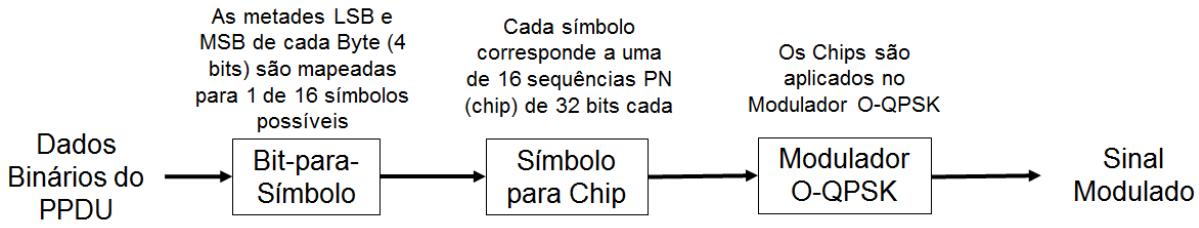


Figura 4 - Funções de Espalhamento e Modulação para o O-QPSK PHY

Fonte: Adaptado de IEEE 802.15.4 Standard (2011, p.161)

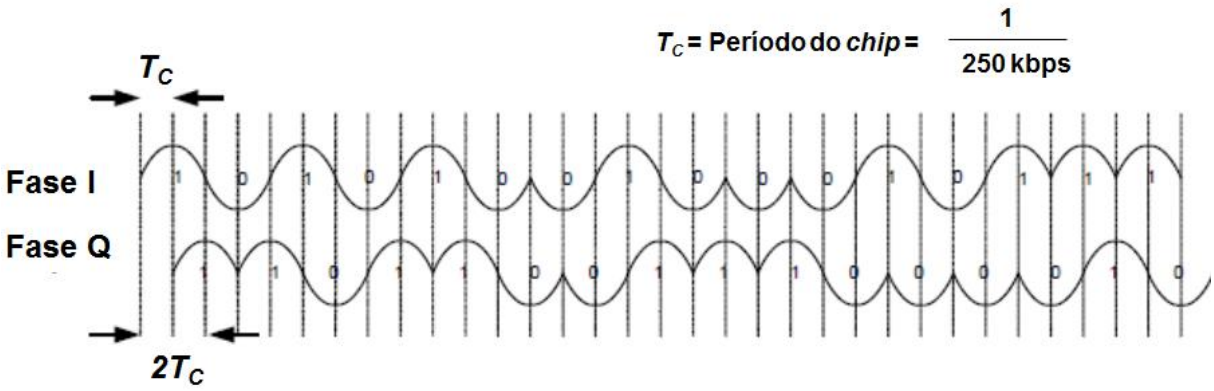


Figura 5 - Amostra de sequência de *chips* (banda base) e formatação do pulso

Fonte: Adaptado de IEEE 802.15.4 Standard (2011, p.164)

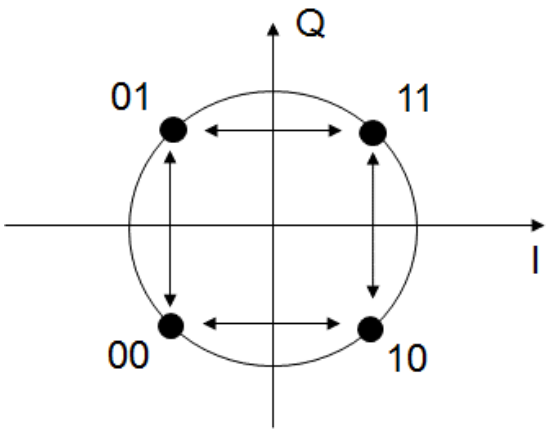


Figura 6 - Exemplo de Modulação O-QPSK

Fonte: National Instruments™ (2007)

De acordo com as especificações do IEEE 802.15.4, um dispositivo operando na banda de 2.4 GHz com modulação O-QPSK, deve apresentar uma sensibilidade

de recepção superior a -85 dBm, para pacotes PSDU de 20 Bytes, uma taxa de erro de pacotes inferior a 1%.

O padrão IEEE 802.15.4 operando na banda de 2.4 GHz possui 16 canais, com numeração de 11 a 26, com 2 MHz de largura de banda ocupada por cada canal e portadoras espaçadas de 5 MHz, conforme representado na Figura 7.

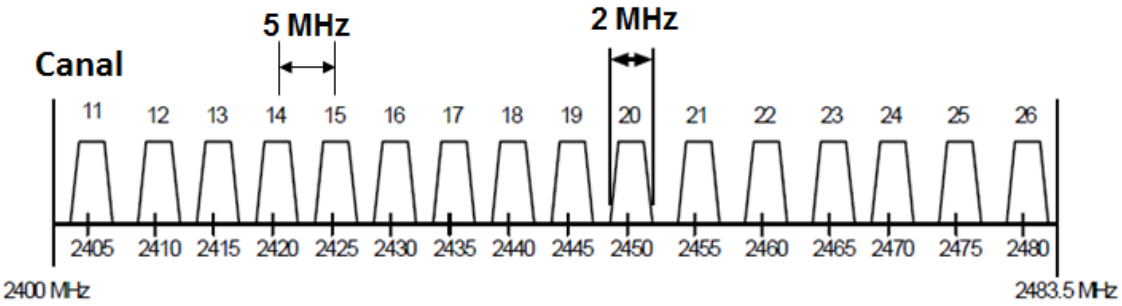


Figura 7 - Seleção de Canais IEEE 802.15.4

Fonte: Adaptado de IEEE 802.15.4 Standard (2003, p.640).

2.1.1.2 MÉTRICAS *ED* E *LQI* DA CAMADA FÍSICA

Entre os requerimentos da camada física estão a capacidade de detecção da energia do canal corrente (*energy detection – ED*) e o indicador da qualidade do enlace (*Link Quality Indicator – LQI*) para pacotes recebidos. A norma IEEE 802.1.5.4 define como um serviço da camada física o fornecimento das métricas *ED* e *LQI* para as camadas superiores.

A medição do receptor *ED* é utilizada pela camada de rede como parte de um algoritmo de seleção de canal (*channel scan*). Ela é uma estimativa da potência do sinal recebida dentro da largura de banda do canal. Nenhuma tentativa de identificar ou demodular o sinal deve ser realizado no processo de medição do *ED*. O tempo de medição *ED*, acima da média, deve ser igual a um período de 8 símbolos ou 128 μseg.

O resultado da medição *ED* deve ser reportado para a próxima camada. A faixa de valores da métrica *ED* deve ser de no mínimo 40 dB. Dentro dessa faixa, o mapeamento da potência recebida em dB para valores *ED* deve ser linear com uma precisão de ± 6 dB.

Como colocado por Zacharias et al. (2012), o valor *ED* é também largamente conhecido como valor de *RSSI*. Como nenhuma identificação ou decodificação é

realizada, o *RSSI* pode tanto ser usado para detector ruído no canal como para indicar a qualidade de um pacote quando medido durante a recepção.

De acordo com o IEEE 802.15.4 a medição do *LQI* é uma caracterização da intensidade e/ou qualidade de um pacote recebido. A medida pode ser implementada usando receptor *ED*, um estimador de razão sinal-ruído (*signal-to-noise ratio*) ou a combinação dos dois métodos. O uso do *LQI* para propósitos da camada de rede (roteamento) ou de aplicação está fora do escopo do padrão.

Ainda de acordo com o padrão, a medição de *LQI* deve ser realizada para cada pacote recebido. Os valores mínimos e máximos de *LQI* (de 00 a FF em hexadecimal ou 0 a 255 decimal) devem ser associados com o sinal de menor e maior qualidade detectável pelo receptor, sendo que os valores *LQI* devem estar uniformemente distribuídos entre os dois limites. No mínimo, oito valores de *LQI* devem ser usados.

2.1.1.3 A SUBCAMADA MAC

De acordo com o padrão IEEE 802.15.4 a subcamada MAC controla todo o acesso para o canal físico de rádio e é responsável pelas seguintes tarefas:

a. Gerar sinalizador (*beacons*) de rede se o dispositivo for um coordenador;
b. Sincronização para *beacons* de rede;
c. Suportar a associação e desassociação da PAN;
d. Suportar segurança do dispositivo;
e. Empregar o mecanismo de CSMA-CA para o acesso ao canal;
f. Controlar e manter o mecanismo GTS;
g. Fornecer um enlace confiável entre 2 entidades MAC pares.

O padrão IEEE 802.15.4 define 4 estruturas de quadros MAC:

h. Quadro *beacon*, usado por um coordenador para transmitir *beacons*;
i. Quadro de dados, usado por todos os dispositivos para transferência de dados;
j. Quadro de reconhecimento (*Acknowledgement – ACK frame*), usado para confirmar a recepção de um quadro com sucesso;
k. Quadro de comando MAC, usado para gerenciar o controle de transferência de dados de todas as entidades MAC pares.

Uma estrutura de superquadro (*superframe*) pode ser adicionalmente definida pelo coordenador, caso em que dois *beacons* atuam como limitadores e proporcionam sincronização com outros dispositivos, bem como informações de configuração. Um

superquadro consiste de 16 slots de igual comprimento, que podem ser divididos em uma parte ativa e uma parte inativa, para economia de energia. Um dispositivo coordenador pode dedicar partes (*slots*) do superquadro para as aplicações. Essas partes são chamadas intervalos de tempo garantidos (*Guaranteed Time Slot - GTS*).

Os quadros MAC são passados para a camada física como PSDU, que se torna assim a carga útil (*payload*) da camada física. A Figura 8 apresenta a estrutura geral de quadro MAC do IEEE 802.15.4. Já a Figura 9 apresenta a visão esquemática de como um quadro MAC (PSDU) se insere na camada PHY (PPDU).

O campo Sequência de Verificação de Quadro (*Frame Check Sequence – FCS*) é utilizado para a validar um quadro recebido. O transmissor executa o algoritmo de Verificação de Redundância Cíclica (*Cyclic Redundancy Check – CRC*) de 16 bits, de acordo com a norma ITU-T, com o quadro a ser transmitido. O resultado é um campo de 16 bits que é adicionado ao final do quadro MAC. Este campo será utilizado pelo receptor, de acordo com o mesmo algoritmo CRC, para verificar a integridade do quadro MAC e se o mesmo foi recebido com sucesso ou com erro.

<table>
<tr><td>Octetos: 2</td><td>1</td><td>0/2</td><td>0/2/8</td><td>0/2</td><td>0/2/8</td><td>0/5/6/10/14</td><td>Variável</td><td>2</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Controle do Quadro</td><td rowspan="2">Número de Sequência</td><td>Identificador PAN Destino</td><td>Endereço Destino</td><td>Identificador PAN Fonte</td><td>Endereço Fonte</td><td rowspan="2">Cabeçalho Auxiliar de Segurança</td><td>Carga Útil do Quadro (Dados)</td><td>FCS</td></tr>
<tr><td colspan="4">Campos de Endereçamento</td><td rowspan="2">Carga Útil MAC</td><td>MFR</td></tr>
<tr><td colspan="7">MHR</td></tr>
</table>

Figura 8 - Formato do Quadro MAC Geral

Fonte: Adaptado de IEEE 802.15.4 Standard (2011, p.57)

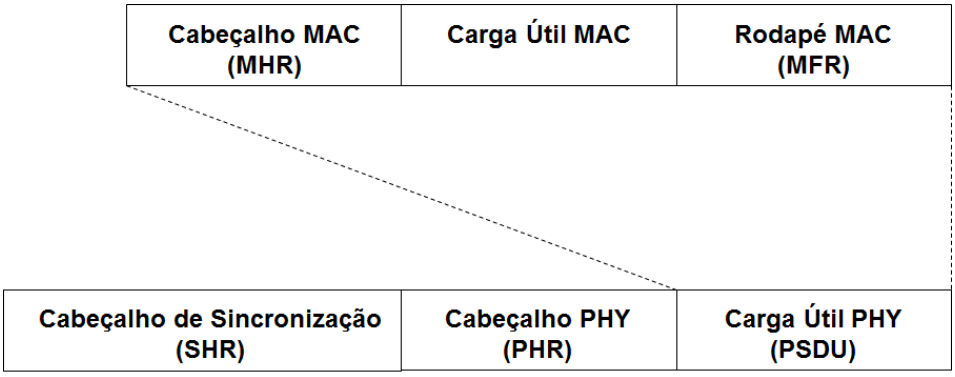


Figura 9 - Visão Esquemática do PPDU

Fonte: Adaptado de IEEE 802.15.4 Standard (2011, p.14).

2.1.2 PADRÕES BASEADOS NO IEEE 802.15.4

O IEEE 802.15.4 é a base para as especificações como ZigBee®, ISA100 Wireless™, WirelessHART®, 6LoWPAN, entre outros. Cada uma delas estende ainda mais o padrão mediante o desenvolvimento das camadas superiores não cobertas pelo 802.15.4.

2.1.2.1 ZigBee®

O ZigBee® foi um dos primeiros padrões baseados no IEEE 802.15.4 de sucesso comercial. Ele é um padrão de rede sem fio para arquitetura em malha (*mesh*) de baixo custo, baixa potência e baixo consumo de energia. A baixa utilização de energia permite uma vida mais longa, com baterias de menores dimensões. As redes em malha permitem alta confiabilidade e alcance estendido. O ZigBee® adiciona a camadas de rede e segurança, aplicação e serviços sobre o padrão IEEE 802.15.4 (DHILLON et al., 2014).

2.1.2.2 WirelessHART®

O WirelessHART® é uma tecnologia de rede de sensores sem fio desenvolvida para ser compatível com o protocolo HART® (*Highway Addressable Remote Transducer Protocol*) de interconexão de dispositivos em automação industrial. O WirelessHART® utiliza uma arquitetura em malha sincronizada, auto organizada e auto ajustável, utilizando rádios padrão IEEE 802.15.4. O início do desenvolvimento do WirelessHART® remonta a 2004, sendo reconhecido pelo IEC como padrão IEC 62591 em 2007. Atualmente o desenvolvimento do padrão está sob o FieldComm Group™, que desde o início de 2015, combina todos os ativos dos grupos de trabalho anteriores chamados de Fieldbus Foundation™ e HART® Communication Foundation.

De modo a permitir a convivência entre a RSSF e outras tecnologias compartilhando a mesma banda, o padrão emprega uma sequência pseudoaleatória de salto de canal (*pseudo-random channel hopping sequence*) entre 15 canais disponíveis no IEEE 802.15.4 (canal 26 é bloqueado no WirelessHart). Uma lista negra também é possível para bloquear canais que estejam congestionados.

2.1.2.3 ISA100 WIRELESS™

O ISA100 Wireless™, também conhecido como ISA100.11a, é uma tecnologia de rede sem fio desenvolvida pela ISA (*International Society of Automation*), sendo descrito como *"Wireless Systems for Industrial Automation: Process Control and related Applications"*. Foi desenvolvido para permitir interoperabilidade com diferentes protocolos de redes industriais. A camada física é aderente ao IEEE 802.15.4, apesar de a camada MAC apresentar algumas diferenças. É o principal padrão concorrente do WirelessHART® no ambiente industrial, tendo sido ratificado pelo IEC com o número 62734 em 2010 (WERB, 2014). O padrão ISA100 Wireless também emprega salto de canais para evitar interferências, sendo o canal 26 opcional, e permite a implantação com IPv6.

2.1.2.4 6LoWPAN

Padrão que implementa o protocolo IPv6 sobre a Rede de Área Pessoal Sem Fio (*IPv6 over Low power Wireless Personal Area Networks – 6LoWPAN*), sendo este o nome do grupo de desenvolvimento deste padrão na IETF, através da elaboração de uma série de recomendações (*Request For Comments - RFC*) permitindo usar IPv6 nas redes IEEE 802.15.4. Entre as questões mais relevantes dessas recomendações estão a fragmentação/desfragmentação e a compressão dos cabeçalhos IPv6 (HUI et al., 2009). O 6LoWPAN baseia-se no conceito de que a Internet é totalmente construída sobre o protocolo IP, o que significa que cada dispositivo de baixa potência de uma RSSF deverá ter um endereço IP e assim fazer parte da Internet das Coisas (*IoT*). Devido ao esgotamento dos endereços no protocolo IPv4, o 6LoWPAN já nasce desde o seu conceito inicial desenvolvido com protocolo IPv6.

2.1.2.5 COMPARAÇÃO ENTRE OS PADRÕES COMERCIAIS DE WSN

Baseado na literatura, a Tabela 2 reúne um comparativo entre os padrões comerciais ZigBee®, WirelessHART®, ISA100 Wireless™ e 6LoWPAN.

Tabela 2 - Comparativo entre Padrões de RSSF Comerciais

CARACTERÍSTICA	ZIGBEE	ZIGBEE PRO	ISA-100.11a	WIRELESS HART	6LoWPAN
Tecnologia do Transceptor	IEEE 802.15.4	IEEE 802.15.4	IEEE 802.15.4	IEEE 802.15.4	IEEE 802.15.4
Banda (MHz)	2.4 - 2.483,5	2.4 - 2.483,5	2.4 - 2.483,5	2.4 - 2.483,5	2.4 - 2.483,5
Suporte para Roteamento MESH	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Habilidade para lidar com redes grandes	Não	Sim	Sim	Sim	Sim
Latência Determinística (Time Slot)	Não	Não	Sim	Sim	Não
Confiabilidade Determinística	Não	Não	Sim	Sim	Não
Funcionalidades de Segurança Disponíveis	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Suporte Cexistência com Outras Tecnologias (IEEE 802.19)	Não	Não	Sim	Sim	Sim
Aplicação	Automação Comercial, Domótica	Automação Comercial, Domótica	Industrial	Industrial	IoT
Organização	Zigbee Aliance	Zigbee Aliance	ISA	Fieldcomm Group	6LoWPAN IETF

Fonte: Adaptado de GREENPEAK (2008)

A norma IEEE 802.15.4 é a base para cada padrão comercial adicionar as camadas de protocolos necessários de acordo com a sua proposta de utilização. A Figura 10 apresenta a pilha de protocolo das principais tecnologias de redes sem fio.

Pilha de Protocolos	ZIGBEE	WIRELESS HART	ISA 100	6LOWPAN
Aplicação	Protocolo Zigbee	Protocolo HART	Protocolo ISA	Protocolo Aplicação
Transporte	Transporte Zigbee	Protocolo TCP tipo HART	UDP	UDP
Rede	Rede Zigbee	Roteamento / Endereçamento HART	6LoWPAN	6LoWPAN
Enlace de Dados (Data Link)	MAC IEEE 802.15.4	TDMA, Channel Hopping HART	Enlace Dados Superior ISA100	Adaptação IPv6
		MAC IEEE 802.15.4	MAC IEEE 802.15.4	MAC IEEE 802.15.4
Física (PHY)	PHY IEEE 802.15.4	PHY IEEE 802.15.4	PHY IEEE 802.15.4	PHY IEEE 802.15.4

Figura 10 - Pilha de Protocolos de RSSF comerciais

Fonte: Rohde & Schwarz (2017)

2.2 MÉTRICAS DE QUALIDADE DE ENLACE EM RSSF

A seguir serão apresentados estudos preliminares sobre as características e justificativa de tratamento das métricas *RSSI* e *LQI* utilizadas na verificação da qualidade dos enlaces entre NSSF e em Redes de Sensores Sem Fio (RSSF). Também é verificado um procedimento para obtenção da métrica *PSR* para avaliação da qualidade do enlace, quando da indisponibilidade da métrica *LQI*.

2.2.1 TRATAMENTO DAS MÉTRICAS RSSI E LQI

A métrica *RSSI* refere-se à intensidade de sinal de dado recebido durante uma transmissão, mas também indica a intensidade de ruído (piso de ruído ou *noise floor*) quando não há nenhuma transmissão ocorrendo no canal. O valor do *RSSI* é bastante influenciado por interferências, múltiplas reflexões (propagação multipercurso), margem de erro do *hardware*, temperatura e umidade, podendo as variações serem bastante significativas mesmo durante um curto espaço de tempo. Por essa característica, a métrica *RSSI* deve ser suavizada (ou filtrada), de modo que as variações possam ser superadas e utilizadas (JAYASRI et al., 2014).

A métrica *LQI*, oferecida pelo dispositivo sem fio indica a capacidade do receptor em demodular o sinal de dado, medindo a taxa de erro de *chip* (*chip error rate*) ou quanto facilmente a demodulação pode ser realizada, ao coletar a taxa de erros de *chips* através da comparação dos símbolos padrão e recebidos após a palavra de sincronização, no protocolo IEEE 802.15.4. O *LQI* possui um grande coeficiente de correlação com a Taxa de Recepção de Pacotes (*Packet Reception Rate – PRR*), tendo assim a habilidade de identificar se a qualidade de um enlace é boa ou ruim. (JAYASRI et al., 2014).

Conforme demonstrado por Srinivasan et al. (2006), em uma condição onde a qualidade do enlace é praticamente perfeita e a *PRR* é de 100% uma única leitura de *LQI* seria suficiente, já que o *LQI* apresenta pouquíssima variação. Para qualidades de enlace intermediárias, uma única leitura de *LQI* não é mais suficiente para estimar a qualidade do enlace. Assim, foi demonstrado que a métrica *LQI* deveria ser a média de uma grande quantidade de pacotes recebidos (de 40 a 120 pacotes) para fornecer uma estimativa mais precisa da qualidade do enlace. O *LQI* médio é mais eficiente que um único valor de *LQI* para estimar o enlace, já que o *LQI* médio é capaz de

rastrear um enlace altamente variável melhor que um único *LQI* (JAYASRI et al., 2014).

As métricas *RSSI* e *LQI* dos dispositivos sem fio podem guardar contradições entre si. Um valor de *RSSI* forte pode não significar que o enlace tenha confiabilidade. Da mesma forma, um valor alto de *LQI,* mas com *RSSI* fraco, pode significar que o enlace não tenha margem de segurança e possa rapidamente degradar caso ocorram variações bruscas da potência recebida. Conforme Srikanth et al. (2014), os seguintes cenários são possíveis.

a) Sinal fraco na presença de ruído apresentará baixo *RSSI* e baixo *LQI;*
b) Sinal fraco e total ausência de ruído apresentará baixo *RSSI* e alto *LQI*;
c) Sinal forte sem muito ruído apresentará alto *RSSI* e alto *LQI*;
d) Sinal muito forte na presença de ruído poderá apresentar alto *RSSI* e baixo *LQI*;
e) Ruído forte pode apresentar alto *RSSI* e baixo *LQI*.

As duas métricas podem ser utilizadas de forma combinada para melhor expressar a qualidade do enlace da RSSF (JAYASRI et al., 2014).

2.2.2 MÉTRICA *PSR* E TESTE DE LOOPBACK

A métrica de *RSSI* é bastante comum em sistemas sem fio. Entretanto, seja por limitações de *hardware* ou *firmware*, alguns fabricantes comerciais de transceptores não implementam maneiras de acessar a métrica *LQI*. Para esses casos, uma alternativa é a utilização da Taxa de Pacotes Com Sucesso (*Packet Success Rate – PSR*) em substituição à *LQI* para avaliação da qualidade do sinal recebido. Conforme Wettergren (2007), essa métrica pode ser obtida ativando-se um enlace fechado entre dois transceptores (*Loopback*), fazendo com que o mesmo pacote de dados viaje do dispositivo local para o remoto, que o retransmite de volta para o local (Figura 11), quando a *PSR* pode ser medida.

$$PER = 1 - PSR \tag{15}$$

A *PSR* difere da *PRR* por abordar o laço fechado. Por exemplo, supondo que de A para B de 100 pacotes enviados, a *PRR* registra 90% em B e que destes 90 pacotes agora enviados de volta para A, apenas 81 (ou *PRR* de 90% novamente em A) chegaram corretamente. Nesse caso, a *PRR* de cada enlace seria de 90%, enquanto que a *PSR* seria de 81%. Assim, pode-se considerar que a *PSR* é o produto entre o *PRR* do enlace de ida e do *PRR* do enlace de retorno. A *PRR* exibe uma maior

correlação com a confiabilidade de um enlace do que qualquer outra métrica, sendo definida como a razão da quantidade de pacotes recebidos, pela quantidade de pacotes transmitidos. Os valores de *PRR* somente são relevantes quando derivados de grande janela de tempo, pois eles apresentam baixa resolução quando computados sobre poucos pacotes de dados e assim, não são ideais para uma rápida avaliação (JAYASRI et al., 2014).

Figura 11 - Exemplo de Medição de *PSR* com *Loopback* (*Range Test*)

Fonte: (DIGI, 2017)

2.3 SISTEMAS DE ANÁLISE PARACONSISTENTE

Ao que tudo indica as bases da Lógica Clássica tem início com Aristóteles (384-322 a.C.) e outros filósofos de seu grupo, estabelecendo que uma proposição somente pode ser verdadeira ou falsa, não permitindo outros valores lógicos. Esta Lógica Aristotélica é estritamente binária e não permite contradições, sendo que uma dada proposição *A* somente pode valer *A* ou a negação de *A* (DA SILVA FILHO, 1999).

Os três princípios que formam a base da lógica clássica, são:

a. **Princípio da Identidade proposicional p → p**
   Toda proposição implica nela mesma.
b. **Princípio do Terceiro Excluído p v ¬ p**
   De duas proposições contraditórias, sendo que uma nega a outra, uma delas é verdadeira.
c. **Princípio da Não-contradição ¬ (p v ¬ p)**
   Entre duas proposições contraditórias, uma delas é falsa.

Segundo Da Silva Filho et al. (2008), a lógica clássica é binária, logo uma declaração é falsa ou verdadeira, não sendo admitido ao mesmo tempo ser parcialmente falsa e parcialmente verdadeira. Por sua natureza binária, a lógica clássica pode ser facilmente transcrita para Sistemas Computadorizados e de Controle aplicados a Automação Industrial e Robótica, assim como Sistemas Especialistas utilizados em Inteligência Artificial. Para estes sistemas a descrição de mundo, ou uma proposição, somente pode assumir um de dois estados possíveis. Estes sistemas não podem tratar adequadamente situações contraditórias, comuns em um mundo real (DA SILVA FILHO, 2006).

2.3.1 LÓGICA PARACONSISTENTE

A denominação Lógica Paraconsistente (LP) foi dada pelo filósofo peruano Francisco Miró Quesada, em substituição ao termo até então usado de Teoria dos Sistemas Formais Inconsistentes (DA COSTA, 1997). Entretanto, vários estudiosos vêm trabalhando ao longo dos séculos no estudo da contradição. O próprio Aristóteles menciona Heráclito como um dos que negavam o princípio da não contradição. Entre os precursores da Lógica Paraconsistente destacam-se o polonês Jean Lukasiewicz

(1876-1956) e seu discípulo também polonês Stanislaw Jaśkowski (1906 – 1965), além do russo Nicolai Vasiliev (1880 – 1940). No início do século XX (entre 1910 e 1913), Lukasiewicz e Vasiliev, de forma independente, haviam constatado que alguns princípios da lógica clássica admitiam revisão, inclusive o princípio da contradição (KRAUSE, 2004). Em 1948 Jaśkowski apresentou uma lógica para sistemas envolvendo contradições, chamada de lógica discursiva ou discussiva, porém sem ser trivial (KRAUSE, 2004). Os trabalhos do brasileiro Newton C. A. da Costa (1921 -), à partir da década de 1950, deram um tratamento tanto filosófico quanto matemático a sistemas lógicos envolvendo contradições.

Segundo Da Costa et al. (1999), a LP trabalha com situações onde ambos uma sentença e sua negação podem ser verdadeiras. Em adição aos estados lógicos verdadeiro e falso da lógica clássica, uma proposição pode ainda ter outros estados, como: inconsistente (T) e indeterminado (⊥) (DA SILVA FILHO, 2006).

2.3.2 LÓGICA PARACONSISTENTE ANOTADA

A Lógica Paraconsistente Anotada (LPA) é uma lógica não clássica pertencente a uma família de Lógicas Paraconsistentes que pode ser denotada através de um reticulado finito de Hasse de quatro vértices, denominado de *reticulado de valores-verdade*, representando estados lógicos extremos atribuídos a uma proposição (*P*), conforme Figura 11. Dessa forma, uma proposição *P* é acompanhada com anotação, ou valores correspondentes à fórmula proposicional, que pode ser composta de graus de evidência (μ) e pertencente a um reticulado finito τ.

De acordo com Da Silva Filho (2006), a anotação, através de seus graus, agrega uma conotação lógica a proposição que está sob análise. De forma intuitiva, na Lógica Paraconsistente Anotada, a fórmula atômica *Pμ* pode ser entendida como: *"creio na proposição P com grau de crença (ou de evidencia) de no máximo μ, ou até μ (≤ μ)"*. O grau de evidencia é uma constante anotacional do reticulado e, portanto, cada grau de evidencia atribuído à proposição está contido no conjunto de valores composto pelas constantes anotacionais do reticulado {T, V, F, ⊥}.

Através de um operador matemático cada anotação está relacionada à um único estado lógico atribuído à proposição *P* e representado em um dos quatros vértices do reticulado, tal como: ⊤= Inconsistente, V= Verdadeiro, F= Falso e ⊥= Paracompleto ou Indeterminado.

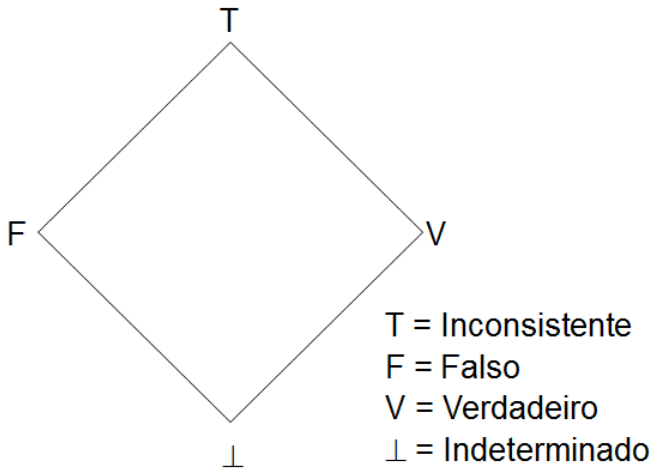


Figura 12 - Reticulado Finito de Hasse da LPA

Fonte: DA SILVA FILHO, ABE, LAMBERT-TORRES (2008, p.13)

As proposições são acompanhadas de anotações que por sua vez atribuem o grau de evidencia correspondente a cada variável proposicional. Cada proposição é acompanhada de um grau de evidencia que pode ser lido da seguinte forma:

P_V = A anotação, ou grau de evidencia, atribui uma conotação de Verdade à proposição *P*.

P_F = A anotação, ou grau de evidencia, atribui uma conotação de Falsidade à proposição *P*.

P_T = A anotação, ou grau de evidencia, atribui uma conotação de Inconsistência à proposição *P*.

$P_\perp$ = A anotação, ou grau de evidencia, atribui uma conotação de Indeterminação à proposição *P*.

Na LPA considera-se ainda um operador $\sim: |\tau| \rightarrow |\tau|$ que, intuitivamente, possui o "significado" da negação (DA SILVA FILHO et al., 2008). O operador ~ neste caso define-se como:

$\sim (1) = 0, \sim (0) = 1, \sim (T) = T$ e $\sim (\perp) = \perp$

2.3.3 LÓGICA PARACONSISTENTE ANOTADA COM ANOTAÇÃO DE DOIS VALORES

A anotação, ou grau de evidência, pode ser formada por 1, 2 ou *n* valores. De modo a atingir um maior poder de representação sobre como as anotações, ou evidências, expressam conhecimento sobre a proposição *P*, é possível usar um

reticulado no plano real formado por dois valores simbólicos (μ, λ). Nesse caso a lógica é chamada de Lógica Paraconsistente Anotada com Anotação de 2 valores (LPA2v).

Os valores dos graus de evidencia favorável μ e evidencia desfavorável λ são completamente independentes. A anotação de dois valores no reticulado τ será então:

$$\tau = \left\{ \left(\mu, \lambda \right) | \, \mu, \lambda \in \left[0,1 \right] \subset \Re \right\}$$

O operador "~" é agora definido como (DA COSTA et al., 1991):

$\sim (\mu, \lambda) = (\lambda, \mu)$, onde $\mu, \lambda \in \left[0,1 \right] \subset \Re$

A proposição *P* é suportada pelo grau de evidência favorável (μ) e o elemento (λ) representa o grau em que a evidência desfavorável nega ou rejeita a proposição *P*. $P(\mu,\lambda)$ é o sinal lógico paraconsistente. Conforme Subrahmanian (1987), dada a anotação como a associação de um par (μ, λ) para uma proposição *P*, significa que o grau de evidência favorável em *P* é μ, e o grau de evidência desfavorável é λ. De forma similar à LPA pode-se deduzir que:

$P_V = P_{(1,0)} \rightarrow$ indica existência de evidência favorável total e evidência desfavorável nula, assinalando uma conotação lógica de *Verdade* à proposição *P*.

$P_F = P_{(0,1)} \rightarrow$ indica existência de evidência favorável nula e evidência desfavorável total, assinalando uma conotação lógica de *Falsidade* à proposição *P*.

$P_T = P_{(1,1)} \rightarrow$ indica a existência de ambos, evidência favorável e desfavorável totais, atribuindo uma conotação lógica de *Inconsistência* à proposição *P*.

$P_\perp = P_{(0,0)} \rightarrow$ indica a existência de ambos, evidência favorável e desfavorável nulas, atribuindo uma conotação lógica de Indeterminação à proposição *P*.

A coleta de valores para os graus de evidencia favorável (μ) e de evidencia desfavorável (λ) objetivam solucionar o problema de sinais contraditórios, onde por meio de análises é possível modificar o comportamento de um Sistema de modo a diminuir a "intensidade" das contradições.

Segundo Da Silva Filho (2006), quando múltiplas inferências apresentam inconsistências, a LPA, em sua forma de anotação com dois valores (LPA2v), tem se apresentado adequada, ajudando a resolver conflitos através do conhecimento de evidências. A Figura 13 apresenta um reticulado de Hasse associado à LPA2v, onde a anotação correspondente, composta de dois valores, é indicada nos seus vértices.

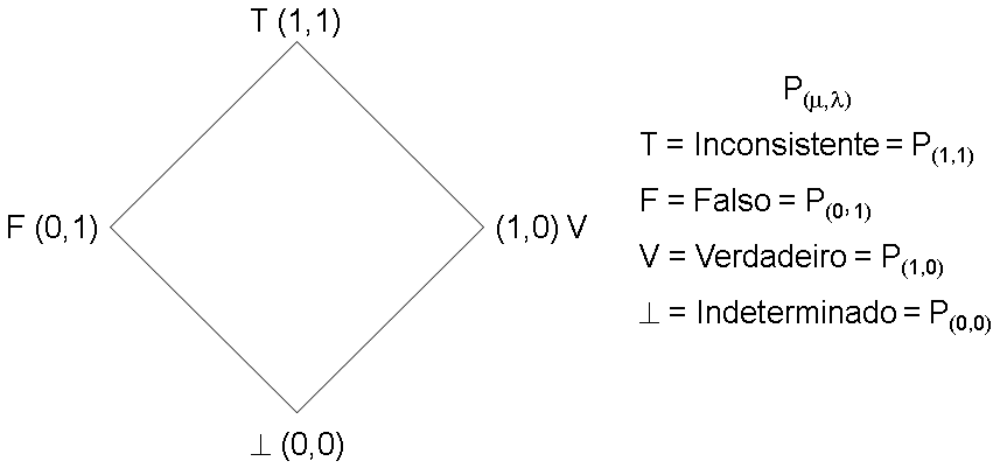


Figura 13 - Reticulado representativo da LPA2v

Fonte: DA SILVA FILHO, ABE, LAMBERT-TORRES (2008, p.13)

Através de transformações lineares em um Quadrado Unitário no Plano Cartesiano (QUPC) e o reticulado associado à LPA é possível se chegar a seguinte transformação:

$$T(X,Y) = (x - y, x + y - 1) \quad (1)$$

De acordo com a nomenclatura usualmente adotada da LPA2v, tem-se que:

$x = \mu$ Grau de Evidência Favorável

$y = \lambda$ Grau de Evidência Desfavorável

Do primeiro termo do par ordenado da equação de transformação *T(X,Y),* tem-se que $x - y = \mu - \lambda$**,** denominado de Grau de Certeza (G_C). Assim sendo:

$$G_C = \mu - \lambda \quad (2)$$

Os valores de G_C pertencem ao conjunto $\Re$ e variam no intervalo fechado [+1,-1], sendo aplicados no eixo horizontal do reticulado da LPA2v, denominado de “Eixo dos Graus de Certeza”. Para o caso de G_C resultar em um valor máximo de +1 significa que o estado lógico final da análise paraconsistente é Verdadeiro (V), e caso G_C resultar em -1 significa que o estado lógico final da análise é Falso (F).

Do segundo termo do par ordenado da equação de transformação *T(X,Y),* tem-se que $x + y - 1 = \mu + \lambda - 1$**,** denominado de Grau de Contradição (G_{CT}). Assim sendo:

$$G_{CT} = \mu + \lambda - 1 \quad (3)$$

Os valores de G_{CT} pertencem ao conjunto $\Re$ e variam no intervalo fechado [+1,-1], sendo aplicados no eixo vertical do reticulado da LPA2v, denominado de “Eixo dos Graus de Contradição”. Para o caso de G_{CT} resultar em um valor máximo de +1

significa que o estado lógico resultante da análise paraconsistente é Inconsistente (T), ao passo que, caso G_{CT} resultar em -1 significa que o estado lógico resultante da análise é Indeterminado ou Paracompleto (⊥). A Figura 14 apresenta um reticulado representativo da LPA2v, com a anotação dos valores de μ e λ, bem como G_C e G_{CT}.

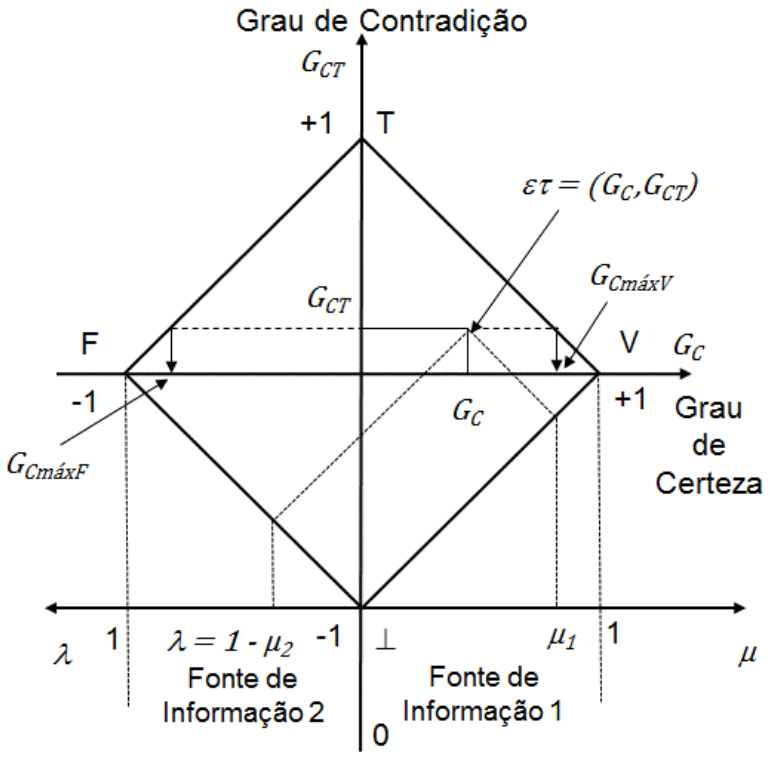


Figura 14 - Reticulado da LPA2v com valores de G_C, G_{CT}, $G_{CmáxF}$ e $G_{CmáxV}$.

Fonte: DA SILVA FILHO, ABE, LAMBERT-TORRES (2008, p.45)

Conforme Da Silva Filho et al. (2008), um sistema decisório capaz de analisar dados, cuja origem seja de conhecimento incerto, poderá ser mais robusto se, após concluída a análise, apresentar um resultado final cujos efeitos das incertezas foram filtrados, representando o valor da certeza puro. Assim, o Grau de Certeza Real (G_{CR}) representa o G_C livre dos efeitos da contradição e inconsistências das informações, e pode ser calculado a partir da Figura 15, conforme as equações (4) a (7).

$$D = \sqrt{\left(1-|G_C|\right)^2 + G_{CT}{}^2} \tag{4}$$

Para $G_C > 0$:

$$G_{CR} = \left(1 - D\right) \quad \text{ou} \quad G_{CR} = 1 - \sqrt{\left(1-|G_C|\right)^2 + G_{CT}{}^2} \tag{5}$$

Para $G_C < 0$:

$$G_{CR} = (D - 1) \qquad \text{ou} \qquad G_{CR} = \sqrt{\left(1 - |G_C|\right)^2 + {G_{CT}}^2} - 1 \qquad (6)$$

$$\varphi = \left(1 - |G_{CT}|\right) \qquad (7)$$

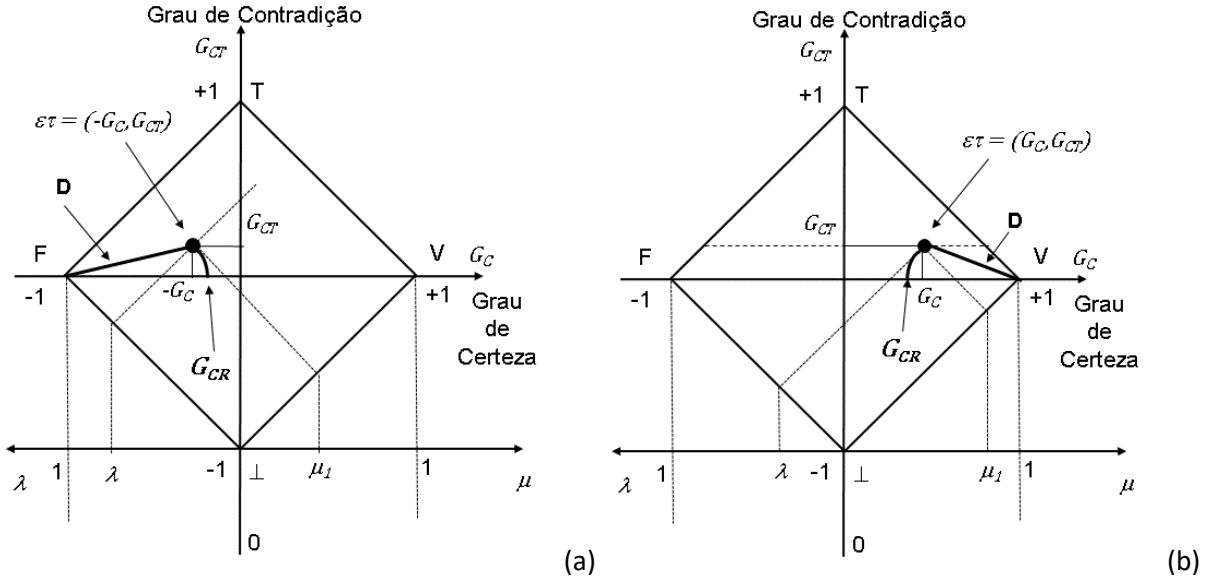


Figura 15 - Ponto de Interpolação (G_C,G_{CT}), D e G_{CR}, para G_C<0 (a) e G_C>0 (b)

Fonte: DA SILVA FILHO, ABE, LAMBERT-TORRES (2008, p.56).

A Distância *D* é o segmento de reta que vai do ponto máximo de Grau de Certeza *V*, para G_C positivo, ou do ponto máximo de Grau de Certeza *F*, para G_C negativo, ao ponto $\varepsilon\tau(G_C, G_{CT})$.

De acordo com Da Silva Filho (2012), o sinal de saída de um sistema paraconsistente de tratamento de incertezas fornecerá o resultado de Grau de Certeza Resultante Real (G_{Crr}) representado pelos valores ($G_{CR}, \varphi_{(\pm)}$). O Grau de Certeza Real (G_{CR}) pode ser obtido conforme (5) ou (6) e o intervalo de certeza (φ), conforme (7). Se o G_{CT} tende a inconsistente, φ é marcado como "+"; já se G_{CT} tende a indeterminado, φ é marcado como "-".

Importante notar que, de acordo com a análise detalhada realizada por Da Silva Filho et al. (2008), para *D* maior ou igual a 1, o Grau de Certeza Real será nulo! Consequentemente, o Grau de Evidência Resultante Real (μ_{ER}) nessa condição será de 0,5.

Conforme visto anteriormente, a análise paraconsistente gera valores de G_C e G_{CT} entre [+1,-1]. Para ser consistente com as entradas (μ, λ), pode haver necessidade

de, em aplicações práticas, G_C e G_{CT} serem normalizados e seus valores limitados a [0,1]. Assim, o grau de evidência resultante (μ_E) é a saída normalizada de G_C (8) e o grau de contradição resultante, (μ_{CTR}) a saída normalizada de G_{CT} (9).

$$\mu_E = \frac{G_C + 1}{2} \tag{8}$$

$$\mu_{CTR} = \frac{G_{CT} + 1}{2} \tag{9}$$

Assim como G_C e G_{CT}, G_{CR} também apresenta valores entre [+1,-1], e em aplicações práticas pode precisar ser normalizado, com seus valores limitados a [0,1]. Assim sendo, o grau de evidência resultante real (μ_{ER}) é a saída normalizada de G_{CR} (10). O intervalo de evidência resultante (φ_E) é o valor normalizado do intervalo de certeza, calculado conforme (11).

$$\mu_{ER} = \frac{G_{CR} + 1}{2} \tag{10}$$

$$\varphi_E = 1 - |2\mu_{CTR} - 1| \tag{11}$$

2.3.4 NÓ DE ANÁLISE PARACONSISTENTE

De acordo com Da Silva Filho (2012), é possível utilizar o conjunto de equações matemáticas da Lógica Paraconsistente Anotada e suas interpretações para formar um algoritmo chamado de Nó de Análise Paraconsistente (NAP). A Figura 16 mostra uma representação do algoritmo LPA2v.

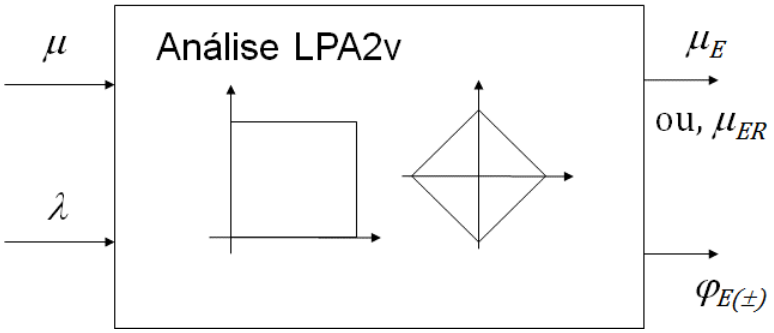


Figura 16 - Representação do Algoritmo LPA2v

Fonte: DA SILVA FILHO, ABE, LAMBERT-TORRES (2008, p.64).

O algoritmo de análise paraconsistente para determinação do Grau de Certeza real e do Intervalo de Certeza é apresentado a seguir:

Entre com os valores de Entrada.

μ */ Grau de Evidência favorável 0 ≤ μ ≤1

λ */ Grau de Evidência desfavorável 0 ≤ λ ≤1

Calcule o Grau de Contradição Normalizado.

$$\mu_{CTR} = \frac{G_{CT} + 1}{2} = \frac{\mu + \lambda}{2}$$

Calcule o Intervalo de Evidência Resultante

$$\varphi_E = 1 - |2\mu_{CTR} - 1|$$

Calcule o Grau de Certeza.

$$G_C = \mu - \lambda$$

Calcule o Grau de Contradição

$$G_{CT} = \mu + \lambda - 1$$

Calcule a distância D

$$D = \sqrt{\left(1 - |G_C|\right)^2 + G_{CT}{}^2}$$

Calcule o Grau de Certeza Real

Se *Gc*>0, G_{CR} = (1 - *D*)

Se *Gc*<0, G_{CR} = (*D* - 1)

Determine o sinal da Saída

Se φ_E ≤ 0,25 ou *D* > 1, então faça:

S1 = 0,5 e S2= $\varphi_{E(\pm)}$; Indefinição e vá para o fim.

Senão vá para o próximo item

Calcule o Grau de Evidência Resultante real

$$\mu_{ER} = \frac{G_{CR} + 1}{2}$$

Determine a sinalização do Intervalo de Evidência resultante

Se μ_{ctr}<0,5 ; sinalize negativo $\varphi = \varphi_{E(-)}$

Se μ_{ctr}>0,5 ; sinalize positivo $\varphi = \varphi_{E(+)}$

Se μ_{ctr}=0 ; sinalize zero $\varphi = \varphi_{E(0)}$

Apresente os resultados na saída.

Faça S1=μ_{ER} e S2= $\varphi_{E\ (\pm)}$

Fim.

2.3.5 CÉLULAS NEURAIS ARTIFICIAIS PARACONSISTENTES

Segundo Mário et al. (2007), o Nó de Análise Paraconsistente é o bloco básico da Célula Neural Artificial Paraconsistente (cNAP) ou padrão (cNAPp) e seu símbolo é apresentado na Figura 17. Na cNAPp, as entradas Ft_{CT} (Fator de Tolerância à Contradição), Ft_C (Fator de Tolerância à Certeza), FT_D (Fator de Tolerância à Decisão) e F_A (Fator de Aprendizagem) são valores externos de ajuste entre (0,1). Valor “1” é máximo e “0” é mínimo quando aplicado a esses fatores externos.

O algoritmo da cNAPp abrange todas as equações e condicionais da LPA, sendo que vários tipos de células podem ser derivados a partir dela. A associação de várias cNAP em diferentes combinações permite criar Redes Neurais Artificiais Paraconsistentes (RNAP).

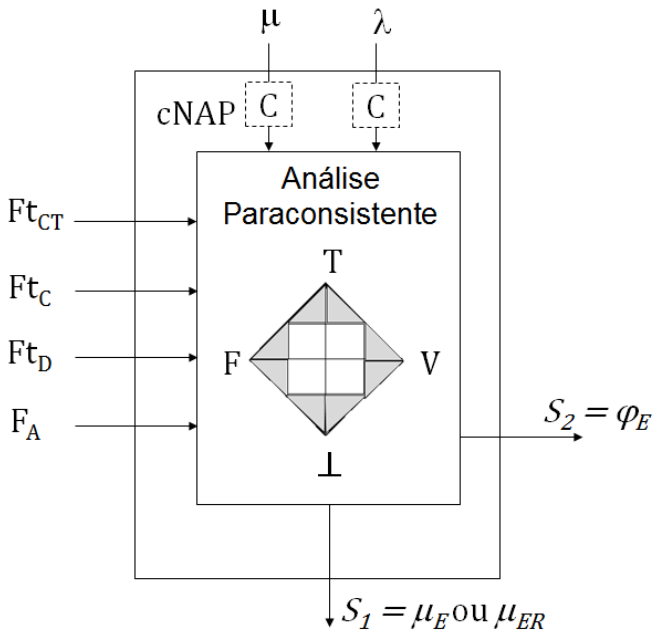


Figura 17 - Símbolo da Célula Neural Artificial Paraconsistente Padrão (cNAPp).

Fonte: DA SILVA FILHO, ABE, LAMBERT-TORRES (2008, p.208).

Uma cNAP bastante interessante é a Célula Neural Artificial Paraconsistente de Aprendizagem (cNAPap). Conforme os resultados expostos em Da Silva Filho et al. (2016), a Célula Neural Artificial Paraconsistente de Aprendizagem (cNAPap), é muito importante e útil para análise e processamento de sinais e pode ser derivada da cNAP básica, conectando-se a saída μ_E à entrada λ, conforme apresentado na Figura 18.

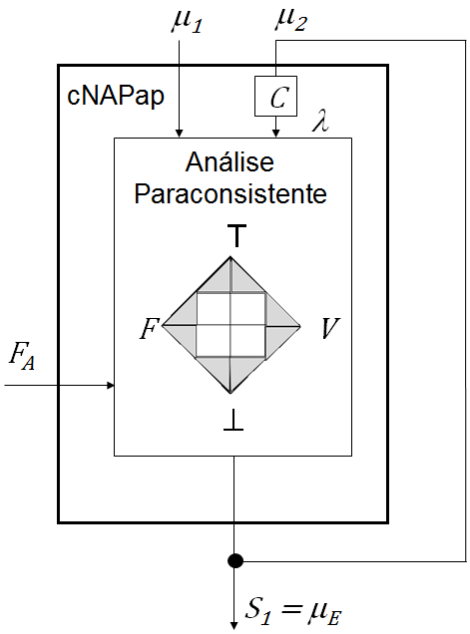


Figura 18 - Símbolo da cNAPap.

Fonte: DA SILVA FILHO, ABE, LAMBERT-TORRES (2008, p.238).

O processo de aprendizagem da cNAPap é feito através de uma sequência de iterações (ou treinamento), aplicando-se sucessivamente um padrão em sua entrada μ_1 até que as contradições sejam reduzidas. Desde que a cNAPap possui uma realimentação, ela necessita de uma sequência de amostras, ou valores no tempo.

A cNAPap é utilizada em RNAP como unidades de memórias e sensores de padrões em camadas primárias (DA SILVA FILHO et al., 2001). Uma CNAPap pode, por exemplo, ser treinada para aprender um padrão utilizando o método de análise paraconsistente aplicado através de um determinado algoritmo.

De acordo com Da Silva Filho (2007), em uma cNAPap, o valor do grau de evidência resultante atual (μ_{Ek}) no instante de tempo *k* é dado por (12) e o valor do grau de evidência desfavorável atual (λ_k), calculado em (13).

$$\mu_{Ek} = \frac{\{(\mu_k - \lambda_k) * F_A\} + 1}{2} \tag{12}$$

$$\lambda_k = 1 - \mu_{E(k-1)} \tag{13}$$

Mário et al. (2007) demonstrou que o fator F_A permite controlar quanto rápida a cNAPap aprenderá. Se um valor de “1” é usado, o fator de aprendizagem máximo é considerado. A Figura 19 apresenta uma simulação em *software* Microsoft® Excel do aprendizado da cNAPap para o valor 1 aplicado à sua entrada μ, com F_A igual a 1,

condição semelhante à de uma Função Degrau Ascendente. Já a Figura 20 apresenta uma simulação semelhante de aprendizado da cNAPap, para o valor 0 aplicado à sua entrada μ, também com F_A igual a 1, condição semelhante à de uma Função Degrau Descendente.

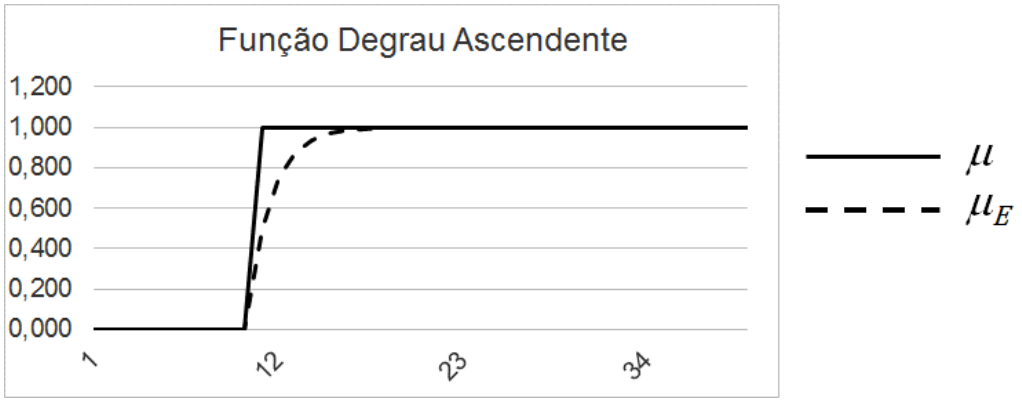


Figura 19 - Valor 1 aplicado à entrada μ e resposta μ_E na saída de uma cNAPap.

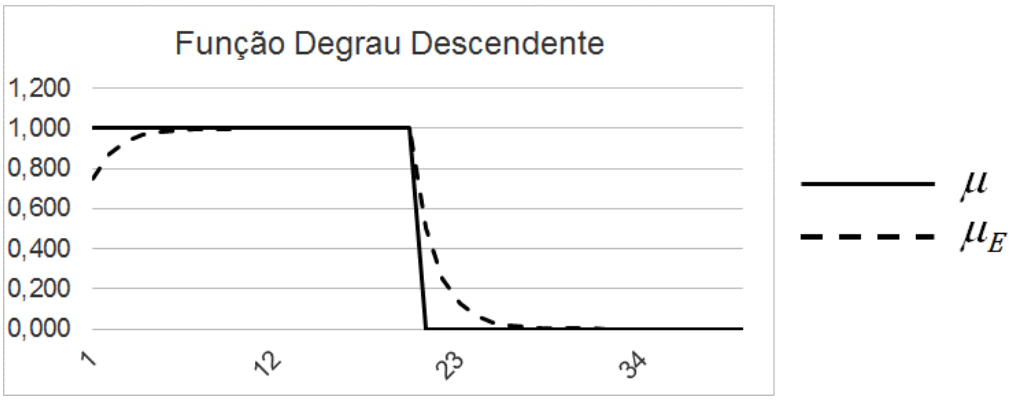


Figura 20 - Valor 0 aplicado à entrada μ e resposta μ_E na saída de uma cNAPap.

De acordo com as simulações apresentadas nas Figuras 19 e 20, a cNAPap foi capaz de aprender completamente o valor aplicado repetidamente em sua entrada μ_1, e apresentar a saída μ_E, no caso, após 18 iterações sucessivas. O processo de aprendizagem da cNAPap é semelhante ao de um integrador (DA SILVA FILHO, 2007).

Como relatado por Minicz et al. (2014), é possível notar que ao se variar o fator de aprendizagem F_A e também o padrão de entrada μ_1, a equação (12) converge para um valor diferente daquele do padrão aplicado na entrada μ_1, razão pela qual foi proposta uma alteração nas equações da cNAPap, chamada de cNAPap por extração do efeito da contradição, ou cNAPapxct, apresentada em (14).

$$\mu_{Ek} = \mu_{E(k-1)} + G_{CT} * F_A \qquad (14)$$

As demais equações permanecem como para a cNAPap.

O Fator de Aprendizagem deve estar no intervalo $0 \leq F_A \leq 1$, tal que:

a. $F_A = 0{,}0$ – não há aprendizado.
b. $F_A = 0{,}5$ – aprendizado natural.
c. $F_A = 1{,}0$ – função degrau

A cNAPapxct recebe esse nome pois a cada iteração o Grau de Contradição é reduzido.

2.3.6 EXTRATOR DE MÉDIA MÓVEL COM RNAP

Foi demonstrado por Cruz (2015) que ao se aplicar sucessivamente valores 0 e 1 na entrada da primeira célula de uma rede de cNAPap em cascata, com F_A em seu valor máximo, a saída da última célula converge para a média aritmética (0,5), conforme reproduzido na Figura 21, para uma rede com até 6 células. Quanto maior o número de células, menor o erro da média aritmética na saída, conforme a equação (16). Por outro lado, maior o número de iterações para se atingir a média com o menor desvio, conforme Tabela 3. Assim sendo, deve-se estabelecer um compromisso entre o erro desejado e o número de iterações requeridas. Por exemplo, conforme a tabela, uma rede de cNAPap com 6 células apresenta um desvio de 0,137% do valor médio de 0,5.

$$Erro = \pm \frac{3^{-n_{cNAPap}}}{2} \tag{16}$$

Tabela 3 - Número de cNAPap x Erro Médio e Iterações

Células	Erro (%)	Iterações
1	33,334	19
2	11,112	21
3	3,705	23
4	1,235	26
5	0,412	29
6	0,137	33
7	0,046	33
8	0,015	37
9	0,005	41
10	0,003	37

Fonte: Adaptado de CRUZ (2015, p.52)

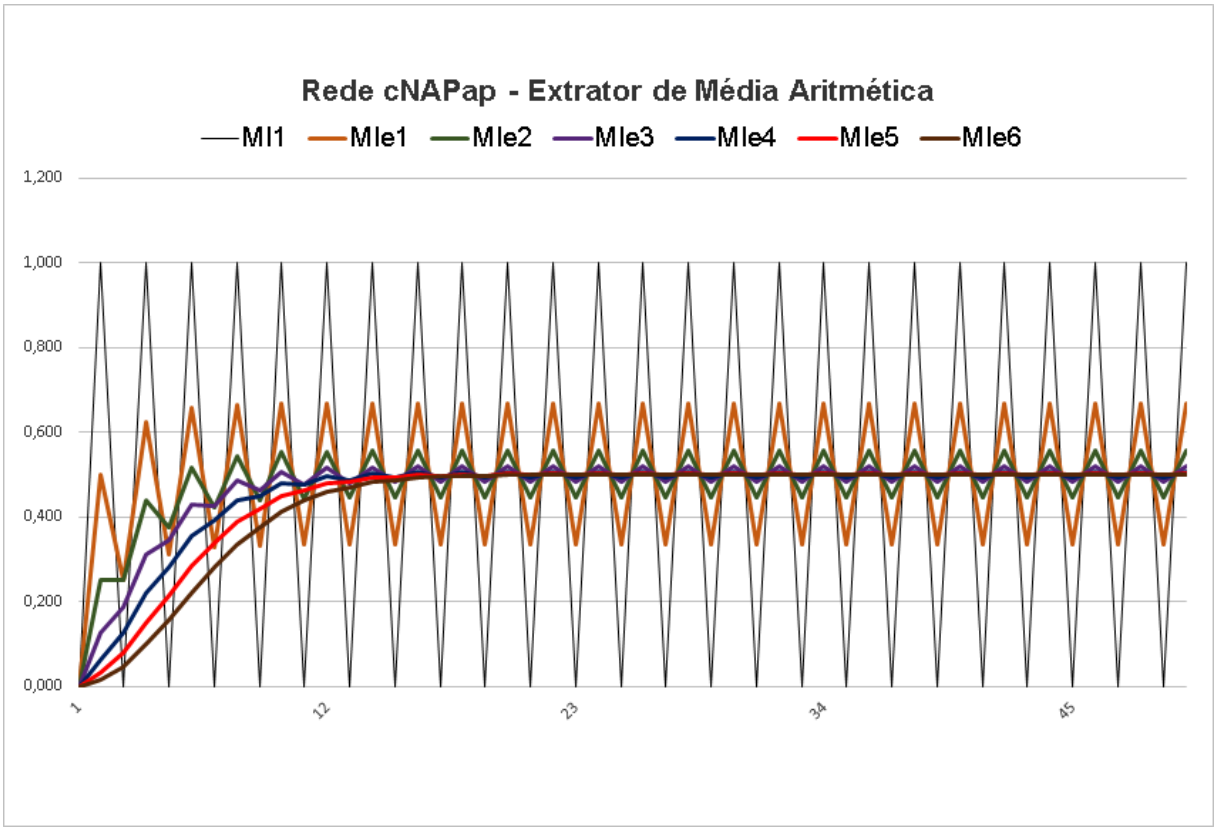


Figura 21 - Rede de até 6 cNAPap como Extrator de Média Aritmética

Fonte: CRUZ (2015, p.50)

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentados os estudos preliminares realizados para o desenvolvimento do Filtro LPA2v, a proposta de estimador da qualidade de enlace e a descrição de materiais utilizados para a elaboração do EQE-LPA utilizando as métricas *RSSI* e *LQI*, do EQE-LPA LB alternativo utilizando as métricas *RSSI* e *PSR* e o método para realização dos ensaios a fim de verificar o desempenho dos estimadores de qualidade de enlace desenvolvidos.

3.1 PROPOSTA DE FILTRO DE MÉDIA LPA2v PARA TRATAMENTO DE SINAIS

Utilizando-se o mesmo conceito apresentado por Cruz (2015) para a extração da média móvel, propõe-se o uso utilizando uma rede de cNAPap, ou cNAPapxct, em cascata como filtro de média para diminuir ruídos e oscilações indesejadas de sinais, sendo denominado nesse caso de Filtro LPA2v (*PAL2v Filter*). A Figura 22 apresenta o Filtro LPA2v.

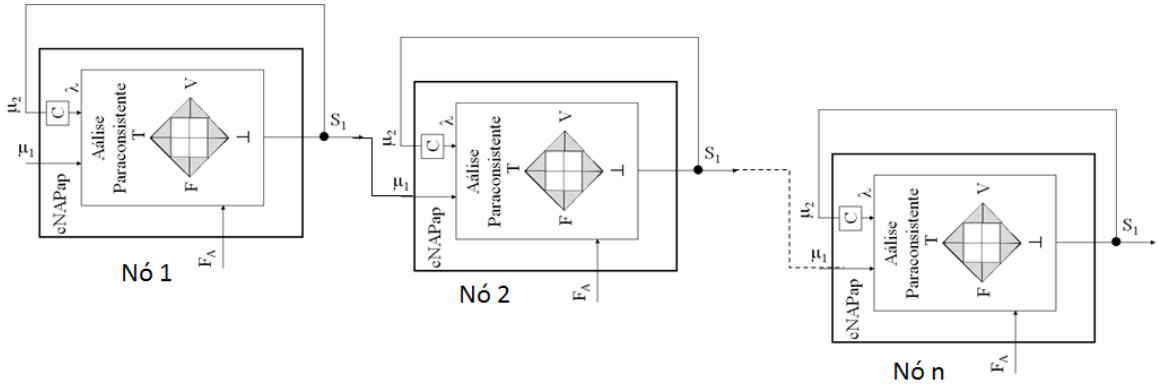


Figura 22 - Filtro LPA2v

A Figura 23 apresenta um exemplo de simulação em MS Excel de uma variável correspondente ao grau de evidência (μ) de 0,5 contaminado por um ruído simulado (valor aleatório sobreposto entre +0,1 e -0,1) e a passagem pelo Filtro LPA2v com 2, 4 e 6 cNAPap, mantido F_A igual a 1,0. Percebe-se que assim como para o extrator de média aritmética, o filtro com 6 cNAPap “suaviza” mais o sinal em sua saída, porém apresenta um retardo maior na resposta, em função da necessidade de mais iterações.

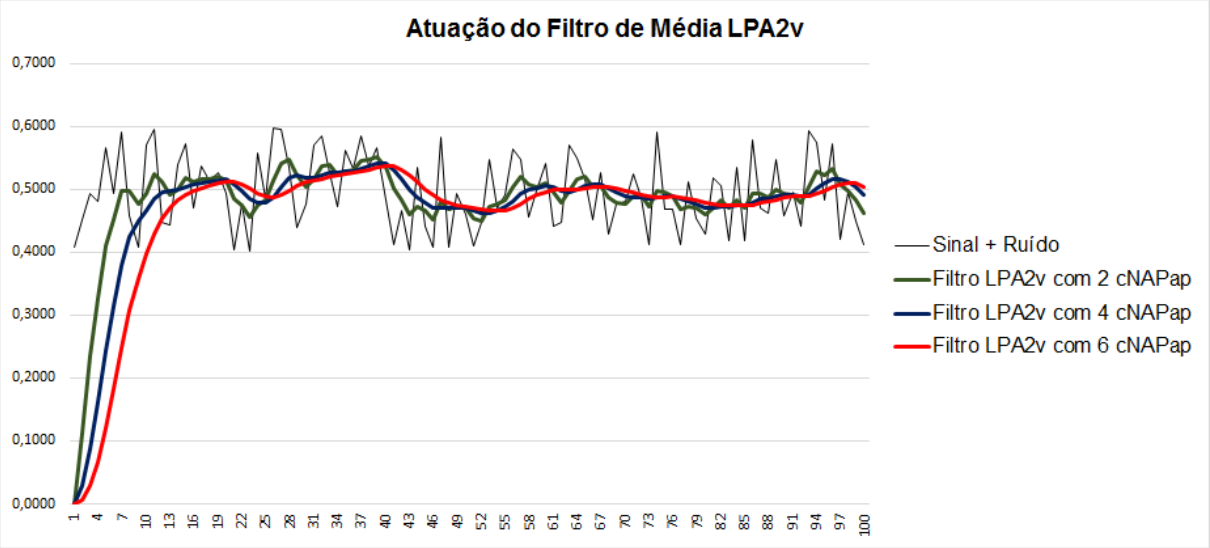


Figura 23 - Atenuação de Ruído com Filtro LPA2v

É importante destacar que o Filtro deve respeitar os conceitos da Lógica Paraconsistente Anotada. Assim sendo, em aplicações práticas, deve-se garantir que os sinais de variáveis ou medidas, convertidos em graus de evidência, estejam contidos entre os limites previstos na lógica, portanto entre o intervalo [0,1].

3.1.1 VALIDAÇÃO DO FILTRO LPA2v

Para verificação do Filtro LPA2v com sinais reais, foram criadas as células cNAPap e cNAPapxct no SIMULINK, conforme as Figuras 24 e 25. Dois Filtros LPA2v foram construídos, como mostrado na Figura 26, sendo um com cNAPap (Filtro 1) e outro com cNAPapxct (Filtro 2), e comparados aplicando-se uma função degrau com ruído aleatório sobreposto.

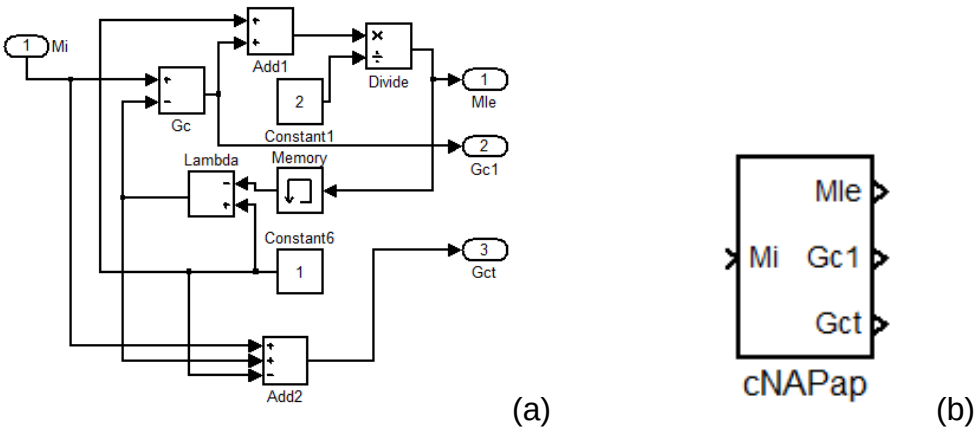


Figura 24 - cNAPap com elementos discretos (a) e em bloco (b).

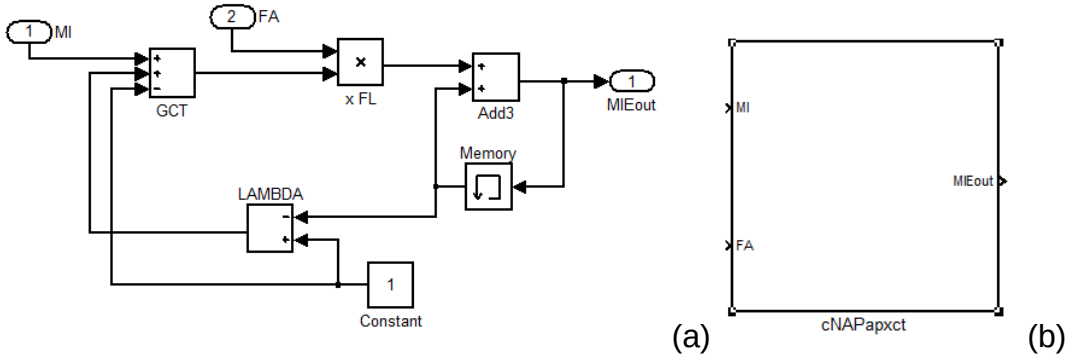


Figura 25 - cNAPapxct com elementos discretos (a) e em bloco (b).

Os resultados são conforme apresentados pelas Figuras 27 e 28. A simulação foi realizada em uma janela de 0 a 5 segundos e tempo de amostragem 0,01 segundos. A função degrau foi ajustada entre 0,2 e 0,8 para que com a adição do ruído (variância de 0,005) não ultrapassasse os limites da LPA [0,1]. Para o Filtro 2 com cNAPapxct foi aplicado primeiramente um F_A de 0,5. Comparando-se a Figura 27 com a Figura 28 percebe-se que com o fator de aprendizagem de 0,5 a resposta do Filtro 2 com cNAPapxct é exatamente igual ao do Filtro 1 com cNAPap com F_A=1.

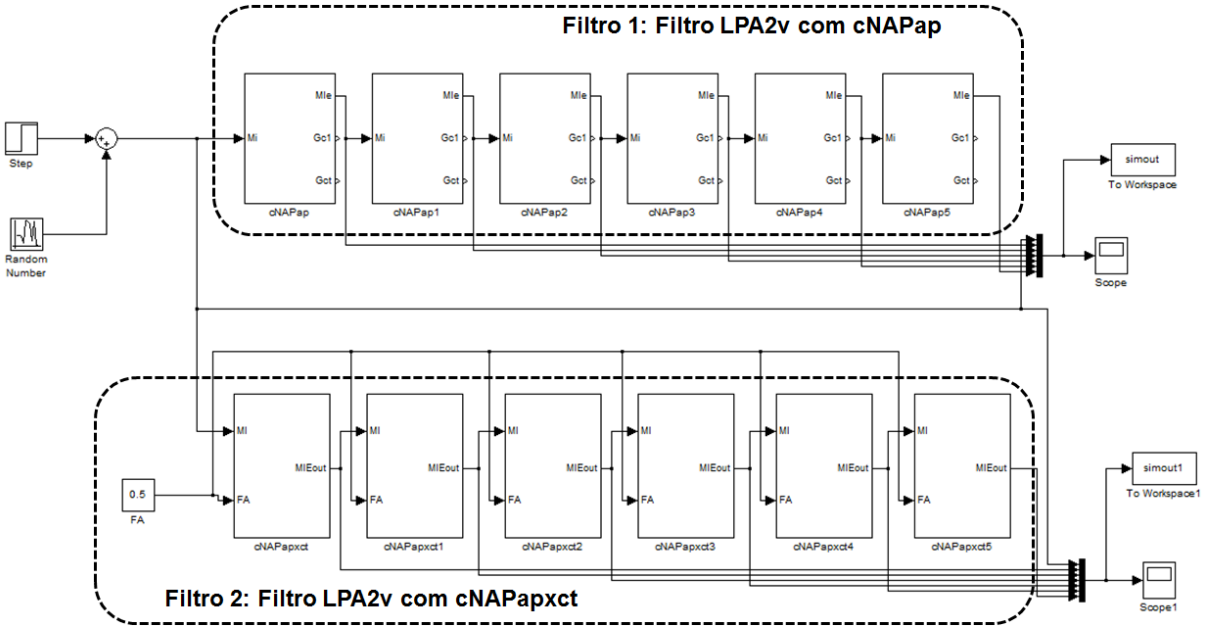


Figura 26 - Aplicação de Degrau com Ruído a Filtro com cNAPap e cNAPapxct.

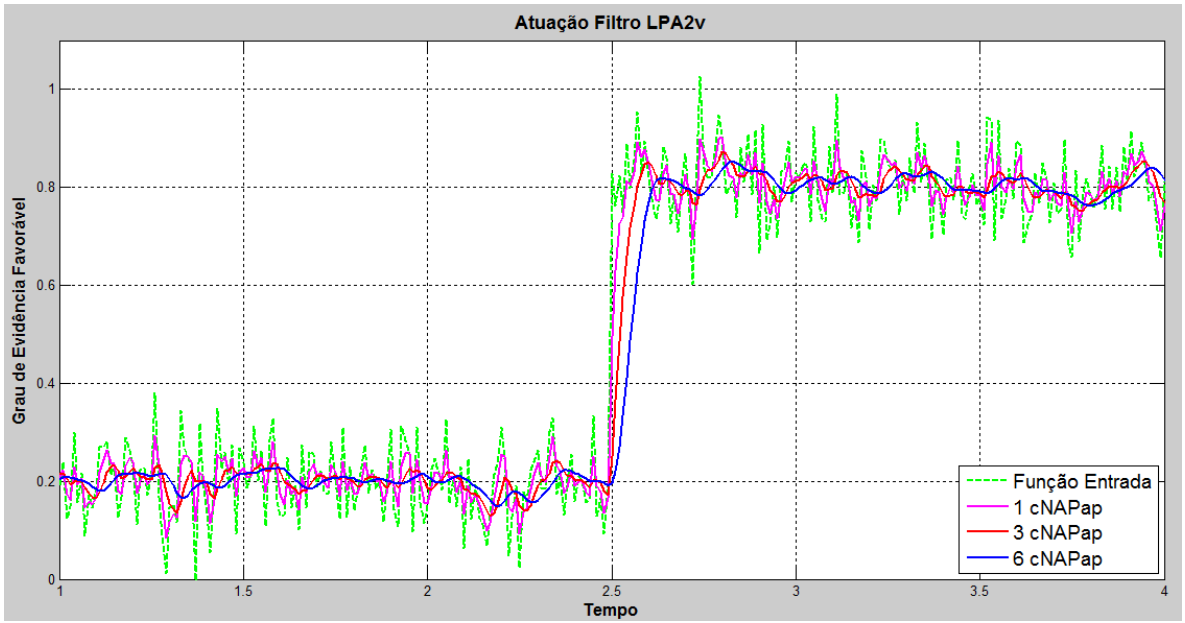


Figura 27 - Atuação do Filtro LPA2v com 1, 3 e 6 cNAPap.

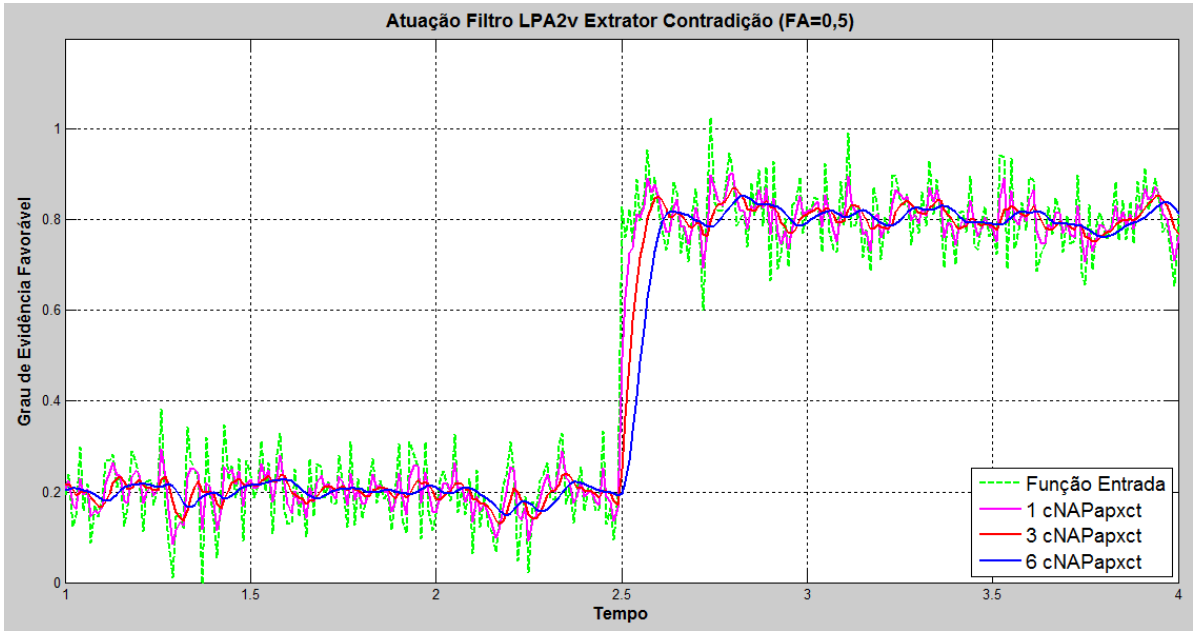


Figura 28 - Atuação do Filtro LPA2v com 1, 3 e 6 cNAPapxct e F_A = 0,5.

Aplicando-se um gerador de varredura (*Chirp Signal*) ao Filtro, pôde-se verificar a curva de resposta em frequência do mesmo. A Figura 29 apresenta o modelo para levantamento da curva de resposta em frequência. Já a Figura 30 apresenta a curva de resposta (diagrama de Bode) para o Filtro 1, com 1, 3 e 6 cNAPap.

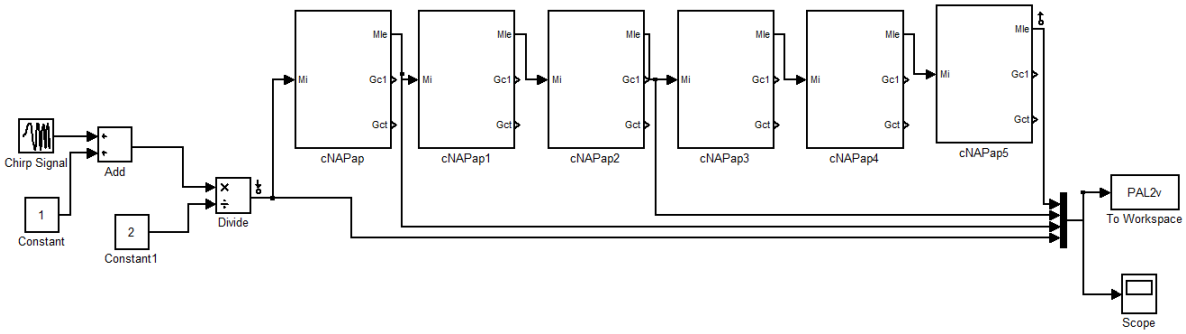


Figura 29 - Levantamento da Curva de Resposta em Frequência do Filtro LPA2v.

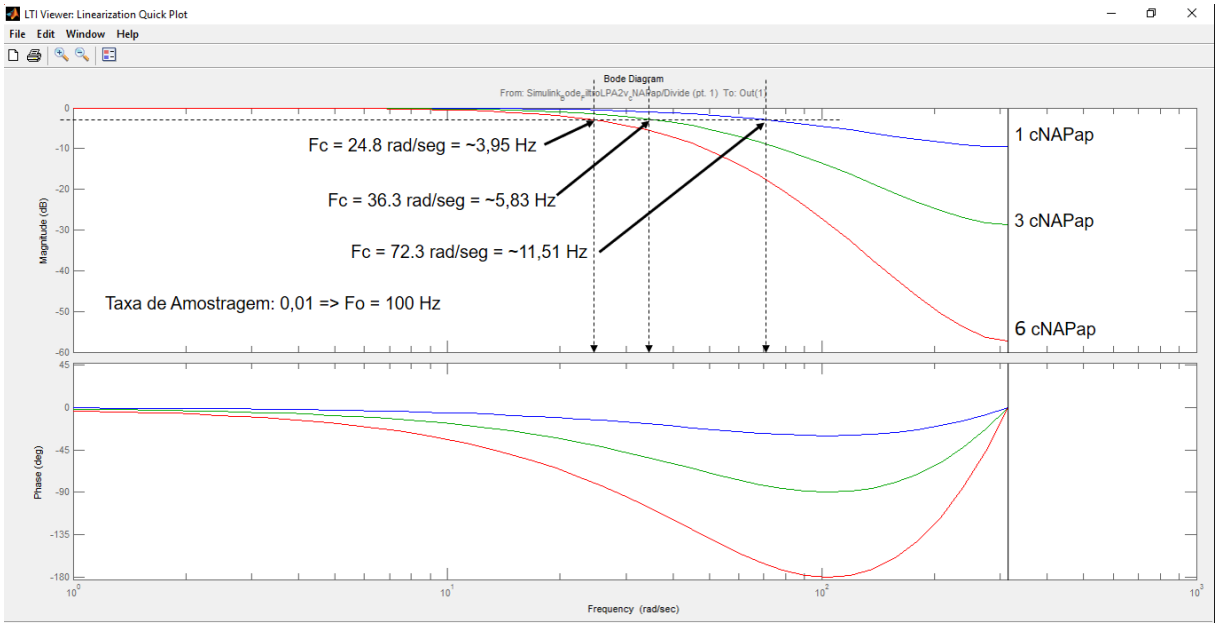


Figura 30 - Resposta em Frequência do Filtro LPA2v para 1, 3 e 6 cNAPap.

A cNAPap trabalha por iterações. Assim sendo, uma proporcionalidade é percebida para diferentes frequências de amostragem ensaiadas, conforme apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 - Relação entre Fo e Fc do Filtro LPA2v

Taxa de Amostragem	Fo (Frequência Amostragem)	Fc (Frequência de Corte)		
		1 cNAPap	3 cNAPap	6 cNAPap
0,001 seg	1000 Hz	117 Hz	57,8 Hz	39,5 Hz
0,01 seg	100 Hz	11,6 Hz	5,77 Hz	3,97 Hz
0,05 seg	20 Hz	2,33 Hz	1,15 Hz	0,787 Hz
0,1 seg	10 Hz	1,15 Hz	0,54 Hz	0,394 Hz

De acordo com valores obtidos diretamente sobre as curvas de diagrama de Bode, o Filtro LPA2v com 1 cNAPap tem uma frequência de corte *Fc* correspondendo a aproximadamente 11,7% da frequência de amostragem *Fo*. Com 3 cNAPap, *Fc* equivale a cerca de 5,78%**Fo* enquanto que com 6 cNAPap a *Fc* equivale a 3,95%**Fo*.

Após várias simulações com os Filtros LPA2v, com cNAPap e cNAPapxct, este último com diferentes valores de F_A, foi constatado que é possível construir um Filtro LPA2v com cNAPapxct utilizando menos células e com o mesmo comportamento do filtro com cNAPap, tanto em resposta quanto em atraso. A Figura 31 apresenta uma comparação entre o Filtro 1 (cNAPap) com 6 células e o Filtro 2 (cNAPapxct) com apenas 3 células e F_A ajustado para 0,35.

O Filtro LPA2v com cNAPapxct apresenta como vantagem a possibilidade de ajuste fino na atuação do filtro justamente alterando-se o Fator de Aprendizagem (F_A). Por esta razão, para o tratamento das métricas *RSSI* e *LQI*, adotou-se o Filtro LPA2v com 3 cNAPapxct e F_A em 0,35 como ajuste inicial.

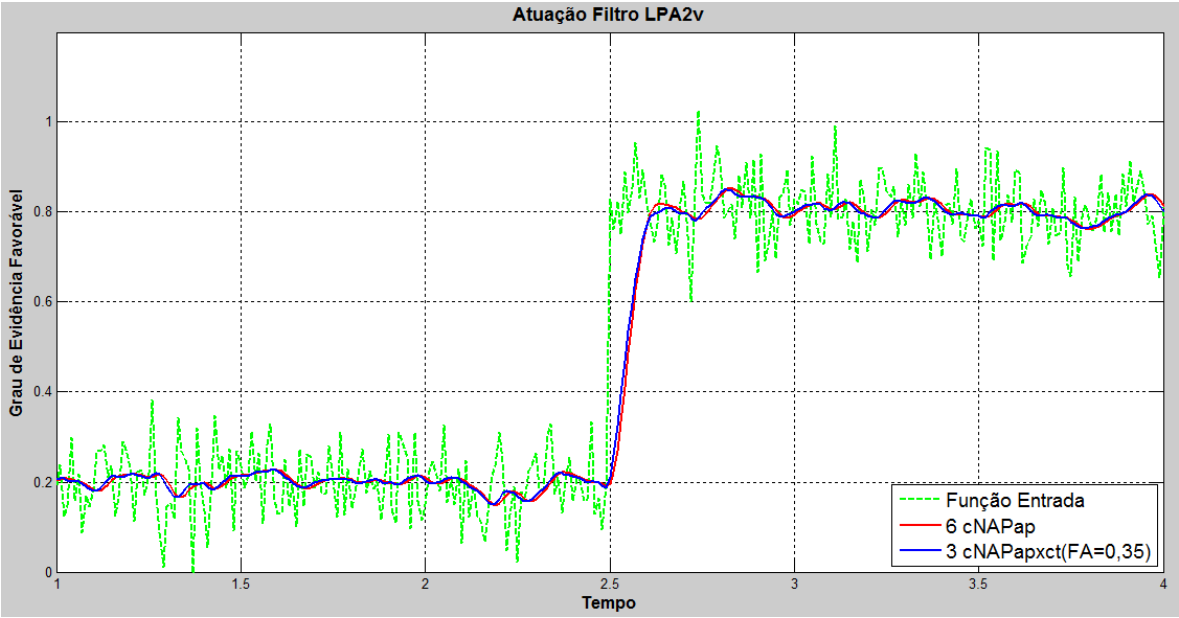


Figura 31 - Filtros LPA2v com 6 cNAPap e 3 cNAPapxct com F_A=0,35.

3.2 ESTIMADOR DE QUALIDADE DO ENLACE LPA2v

A proposta inicial de desenvolver um estimador de qualidade de enlace utiliza as métricas *RSSI* e *LQI* disponíveis em *hardware* nos transceptores utilizados por NSSF, que foi denominado neste trabalho como EQE-LPA (*LQE-PAL*). Alternativamente, quando a métrica *RSSI* está disponível, porém a *LQI* não, pode-se fazer uso do teste *Loopback* para obter a métrica *PSR*. Nesse caso, o estimador desenvolvido recebeu o nome de EQE-LPA LB.

3.2.1 EQE-LPA COM RSSI E LQI

Aproveitando que vários fabricantes de *chipset* disponibilizam medidas de *RSSI* e *LQI*, ao se utilizar as duas métricas em conjunto pode-se elaborar um Estimador da Qualidade do Enlace mais robusto. A LPA2v se apresenta como uma opção interessante para tratar as contradições entre essas duas métricas. O Filtro LPA2v pode extrair a média das variações das métricas *RSSI* e *LQI,* que aplicadas a um Nó de Análise Paraconsistente, ou uma cNAPp, pode fornecer um indicador único da qualidade do enlace, baseado tanto em intensidade quanto em qualidade. A Figura 32 apresenta de forma conceitual o Estimador da Qualidade do Enlace utilizando LPA2v, ou EQE-LPA.

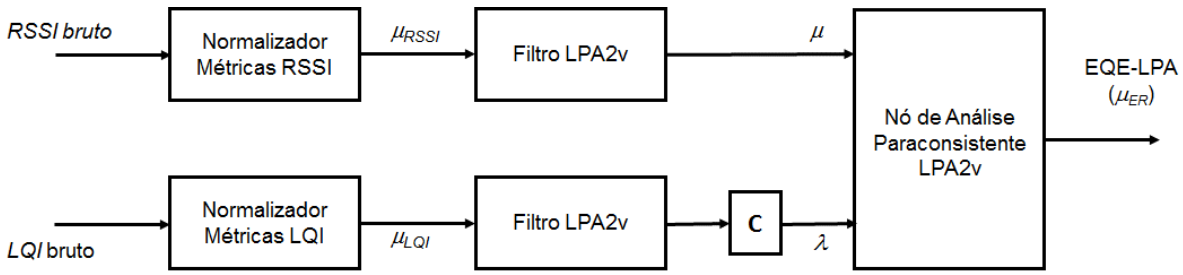


Figura 32 - Diagrama de Blocos do Algoritmo EQE-LPA

Blocos normalizadores convertem as métricas *RSSI* e *LQI* para a faixa de valores aceitáveis pela LPA [0,1]. Filtros LPA2v extraem a média dos valores brutos de *RSSI* e *LQI*. Os Valores filtrados de *RSSI* fornecerão os graus de evidência favoráveis do enlace (μ). Os valores filtrados e complementados de *LQI* serão o contraponto, fornecendo os graus de evidência desfavoráveis do enlace (λ). O Nó de Análise Paraconsistente, formado por uma cNAPp, usará a LPA2v para calcular então o grau de evidência resultante real (μ_{ER}) que será utilizado para estabelecer um único

indicador da estimativa da qualidade total do enlace, EQE-LPA. A correspondência entre o valor do grau de evidência resultante real (μ_{ER}) e a classificação do enlace pelo EQE-LPA pode ser observada na Tabela 5.

Tabela 5 - Classificação EQE-LPA do Enlace em função do μ_{ER}

Grau de Ev. Res. Real (μ_{ER})	EQE-LPA
> 0,9	EXCELENTE
0,7 < $\mu_{ER} \leq$ 0,9	BOM
0,5 < $\mu_{ER} \leq$ 0,7	RAZOÁVEL
0,3 < $\mu_{ER} \leq$ 0,5	POBRE
0,1 < $\mu_{ER} \leq$ 0,3	PÉSSIMO
$\leq$ 0,1	SEM CONEXÃO

O EQE-LPA proposto foi elaborado com software MATLAB® SIMULINK versão R2008a, de modo a poder construir a Rede Neural Artificial Paraconsistente composta pelos Filtros LPA2v para as métricas dinâmicas *RSSI* e *LQI* e a cNAPp para o indicador EQE-LPA da estimativa do enlace. Já o EQE-LPA LB não requer o uso do Filtro LPA2v pois as métricas *RSSI* e *PSR* obtidas nos ensaios referem-se apenas ao resultado final após o envio de uma série de quadros de dados. Nesse caso um algoritmo foi elaborado diretamente em MATLAB® para a entrada de dados, o Nó de Análise Paraconsistente e a apresentação dos resultados em forma de texto e gráfica.

3.2.1.1 RNAP PARA EQE-LPA

Além dos blocos Normalizadores e Filtros LPA2v, uma cNAPp é utilizada para a indicação do EQE-LPA, formada por um Nó de Análise Paraconsistente LPA2v e cuja saída é o Grau de Evidência Resultante Real (μ_{ER}). A Figura 33 apresenta a cNAPp criada por blocos discretos para este fim. A maior complexidade da cNAPp em relação à cNAPap se deve aos elementos decisórios para a saída do μ_{ER}.

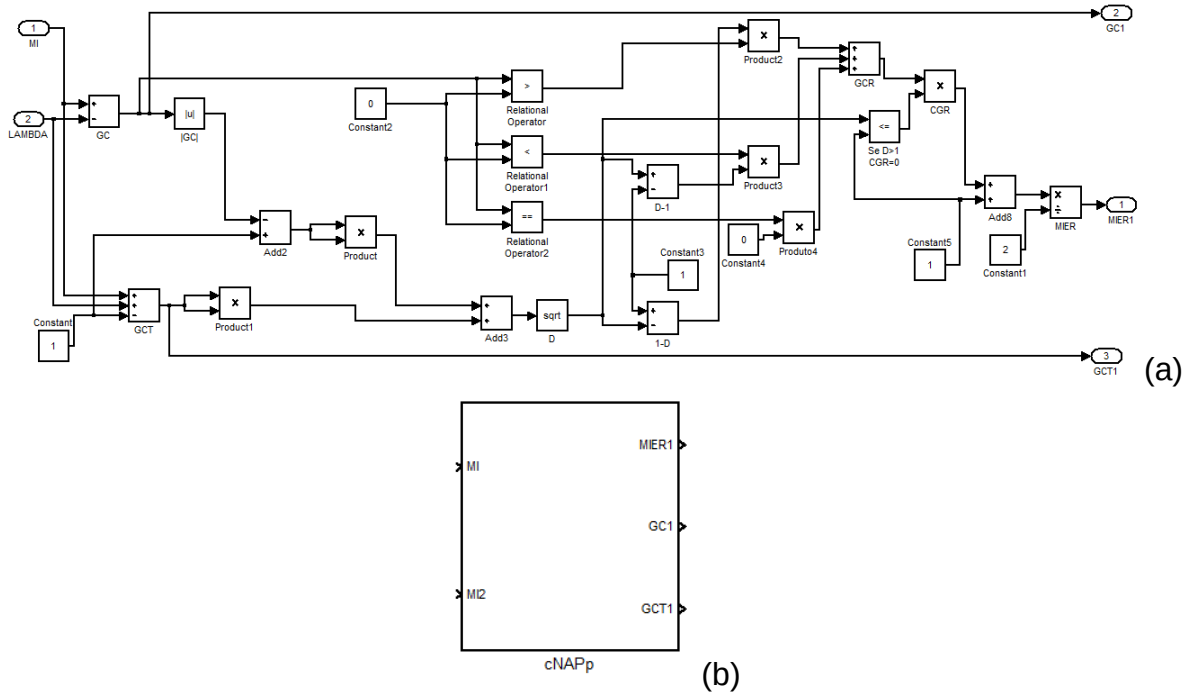


Figura 33 - cNAPp em blocos discretos (a) e Integrado (b) no SIMULINK.

O EQE-LPA é constituído assim por uma Rede Neural Artificial Paraconsistente (RNAP), sendo 3 cNAPapxct para cada Filtro LPA2v e 1 cNAPp para o Nó de Análise Paraconsistente (Figura 34).

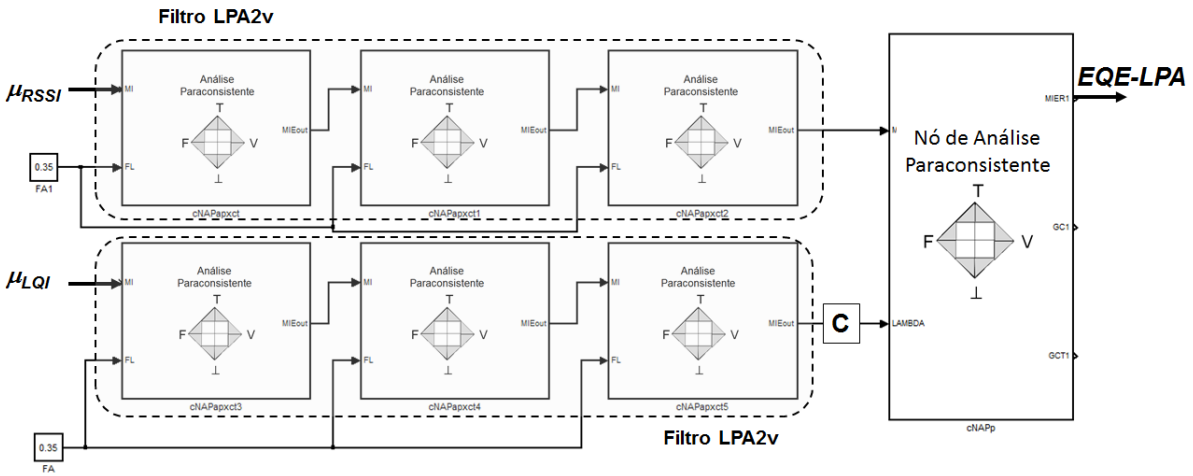


Figura 34 - RNAP Proposta para o EQE-LPA

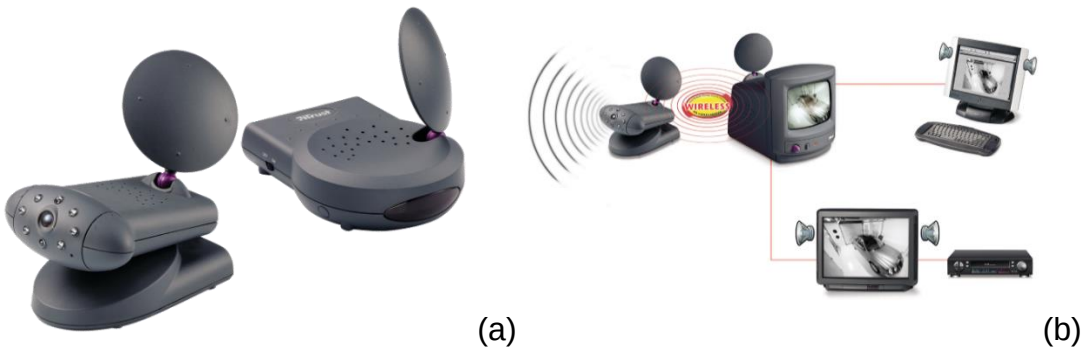
3.2.1.2 FONTE DE INTERFERÊNCIA

Vários dispositivos e tecnologias funcionam na banda de 2.4 GHz e poderiam interferir com os dispositivos sem fio baseados no padrão IEEE 802.15.4, já citados anteriormente. Dispositivos sem fio baseados no padrão IEEE 802.15.4 ou 802.11 possuem o algoritmo CSMA-CA (*Carrier Sense Multiple Access with Collision*

Avoidance) como parte da subcamada MAC. Neste algoritmo, antes de tentar transmitir um pacote, a estação verifica se o meio está livre. Caso o meio esteja livre, a estação transmite o pacote e informa para as demais estações sobre a transmissão e o tempo que será utilizado. Desta forma as demais estações poderão aguardar e evitar colisão de dados. Assim sendo, os dispositivos que utilizam este algoritmo não são de fato interferentes persistentes caso consigam detectar a frequência ocupada. Esta característica poderia afetar os resultados dos ensaios.

A fim de se gerar uma interferência que pudesse afetar as métricas *de qualidade do enlace* de forma persistente, foi utilizada uma Câmera Sem Fio modelo TRUST™ TTA-30T, do tipo utilizado para monitoramento de crianças (babá eletrônica) ou de idosos, por exemplo, transmitindo imagem e som para um Monitor de TV com o receptor adequado. Este modelo opera na banda de 2.4 GHz, porém com protocolo proprietário, não sujeito aos padrões IEEE 802 (sem o algoritmo CSMA-CA).

O dispositivo funciona como bloqueador de sinal (*JAMMER*), ou Negador de Serviço (*Denial Of Service – DoS*) em camada física que atua se a interferência for intensa ou, dependendo da distância em relação ao receptor, for capaz de degradar a qualidade do sinal e provocar perdas de pacotes. A Figura 35 apresenta uma foto do dispositivo e forma de utilização para o qual foi projetado originalmente. A escolha por este tipo de câmera se deve por questões de ordem prática. Trata-se de um dispositivo compacto, de pequenas dimensões, baixa potência (em função do alcance informado pelo fabricante e pelas regulamentações mundiais, como FCC dos EUA para esta banda), frequências facilmente configuráveis, podendo-se controlar a quantidade de degradação através da distância entre os dispositivos interferente e interferido, além de ser um uma fonte de interferência persistente.



(a) (b)

Figura 35 - Câmera Sem Fio TRUST™ modelo TTA-30T (a) e Funcionamento (b)

Fonte: TRUST (2017)

O dispositivo permite a seleção de 1 entre 4 canais possíveis na banda de 2.4 GHz. São eles: CH1 = 2,434 GHz; CH2 = 2,453 GHz; CH3 = 2,473 GHz; CH4 = 2,411 GHz (TRUST, 2017). A largura de banda utilizada pelo processo de modulação da câmera não é mencionada no manual do fabricante, bem como a potência máxima do dispositivo, apenas o alcance, máximo estimado de 100 metros.

Sobrepondo-se as portadoras dos quatro canais da câmera ao espectro de canais do padrão IEEE 802.15.4, conforme a Figura 36, percebe-se que todos os canais da câmera poderão interferir com os dispositivos baseados em IEEE 802.15.4, sendo que os canais CH1 e CH4 por estarem mais próximos do centro da portadora de um canal IEEE 802.15.4 funcionarão praticamente como um interferente cocanal enquanto que os canais CH2 e CH3 da câmera funcionarão mais como interferentes de canal adjacente.

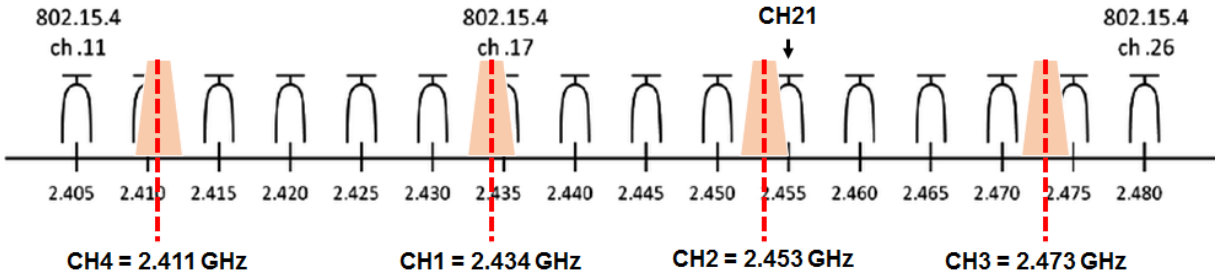


Figura 36 - Sobreposição de canais entre Interferente e IEEE 802.15.4

Fonte: Adaptado de WAGNER (2012).

Como o objetivo do interferente não é ser destrutivo e bloqueador de sinal, mas apenas causar uma degradação de *LQI* e *PSR*, foi adotado nos ensaios o canal CH2 (2.453 GHz) da câmera e os transceptores ajustados para o canal 21 (2.455 GHz) do IEEE 802.15.4.

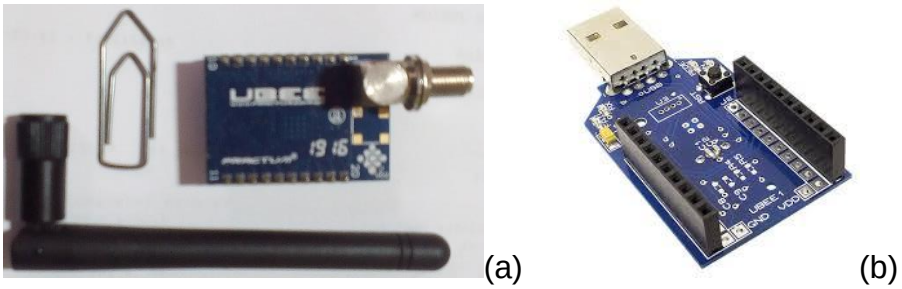
3.2.1.3 MEDIÇÕES DE RSSI E LQI

A metodologia utilizada para a obtenção das métricas *RSSI* e *LQI* consistiu em se estabelecer um enlace Ponto a Ponto, entre 2 dispositivos transceptores e disparar uma sequência de pacotes de um dispositivo local para um remoto, variando-se as distâncias entre os dois dispositivos, sem obstáculos diretos (espaço livre) e

aplicando-se ou não uma fonte de interferência, de modo a obter uma variedade significativa de medidas.

Os dispositivos sem fio utilizados, do fabricante FRACTUM® modelo UBEE, operam com *chip* transceptor IEEE 802.15.4, modelo MRF24J40 da Microchip. De acordo com a especificação técnica (MICROCHIP, 2006), em adição ao pacote IEEE 802.15.4, 2 Bytes de informação são anexados ao final do pacote após o campo de *FCS (Frame Check Sequence)*, correspondendo ao *LQI* e o *RSSI*. A Figura 37 apresenta os dispositivos sem fio utilizados e o adaptador USB para conectá-los diretamente a computadores.

O *firmware* do fabricante FRACTUM® permite o acesso às métricas *RSSI* e *LQI*, já convertidas em porcentagem, que pode ser lido por *software* emulador de terminal e salvo em arquivo Log no formato txt, como o HyperTerminal da Microsoft®. Para isso basta entrar no modo de configuração, e selecionar a opção 7 do menu, conforme exemplo da Figura 38. De acordo com o manual do transceptor, o valor da métrica *RSSI* refere-se à média dos últimos quatro pacotes recebidos.



(a) (b)

Figura 37 - Transceptor UBEE da Fractum® (a) e adaptador USB (b)

```
**** Modo de Configuracao ****
Digite uma das opcoes abaixo:
1 - BaudRate
2 - Canal de Operacao
3 - Identificador da Rede
4 - Restaurar as configuracoes de fabrica
5 - Exibir Configuracoes
6 - Especiais
7 - Nivel de Sinal
9 - Sair e Salvar
0 - Sair e Nao Salvar
Nivel de Sinal Recebido:
LQI = 045% RSSI = 060%|||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||
LQI = 045% RSSI = 074%|||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||
LQI = 046% RSSI = 071%|||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||
LQI = 043% RSSI = 064%|||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||
LQI = 045% RSSI = 061%|||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||
LQI = 016% RSSI = 056%|||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||
LQI = 043% RSSI = 061%|||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||
LQI = 031% RSSI = 052%|||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||
LQI = 045% RSSI = 043%|||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||
```

Figura 38 - Informação de *RSSI* e *LQI* fornecida por pacote recebido.

Para controlar o tipo de dados a serem transmitidos, taxa da *interface*, atraso entre envios, parâmetros da *interface*, etc., foi utilizado o *software* livre RealTerm, disponível na comunidade de *softwares* abertos Sourceforge. A Figura 39 apresenta a tela de configuração da *interface*, enquanto a tela de envio de pacotes do *software* pode ser vista na Figura 40.

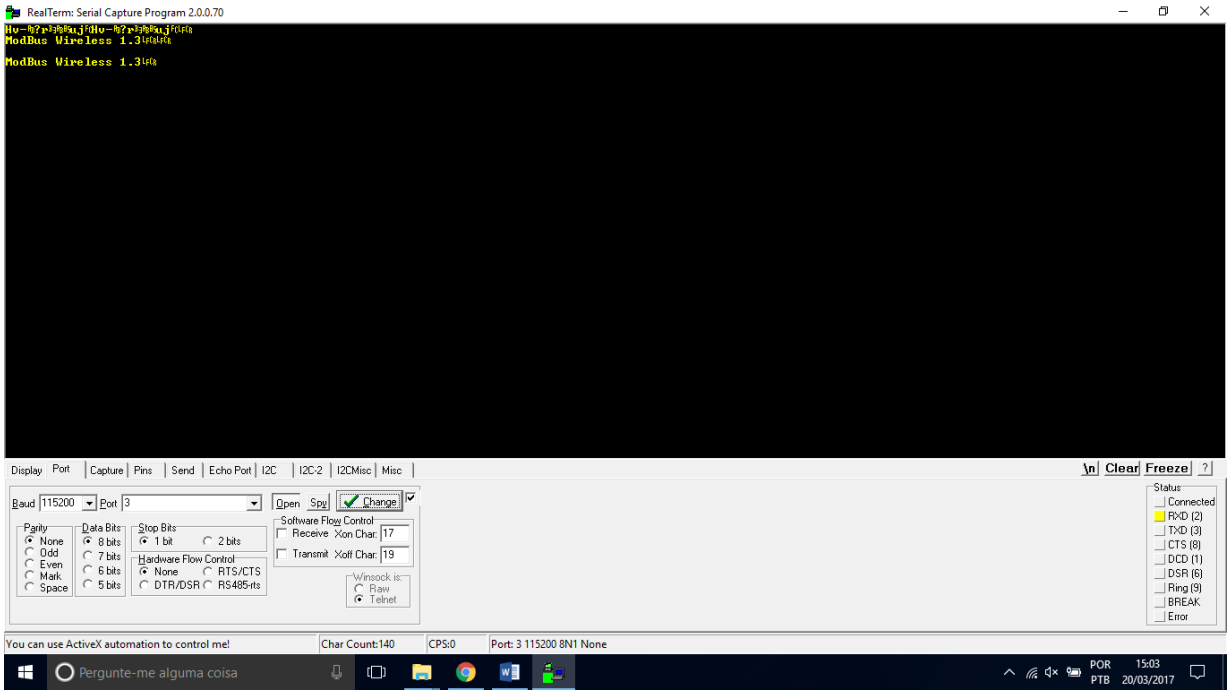


Figura 39 - Tela de Configuração da *Interface* Serial do *Software* RealTerm.

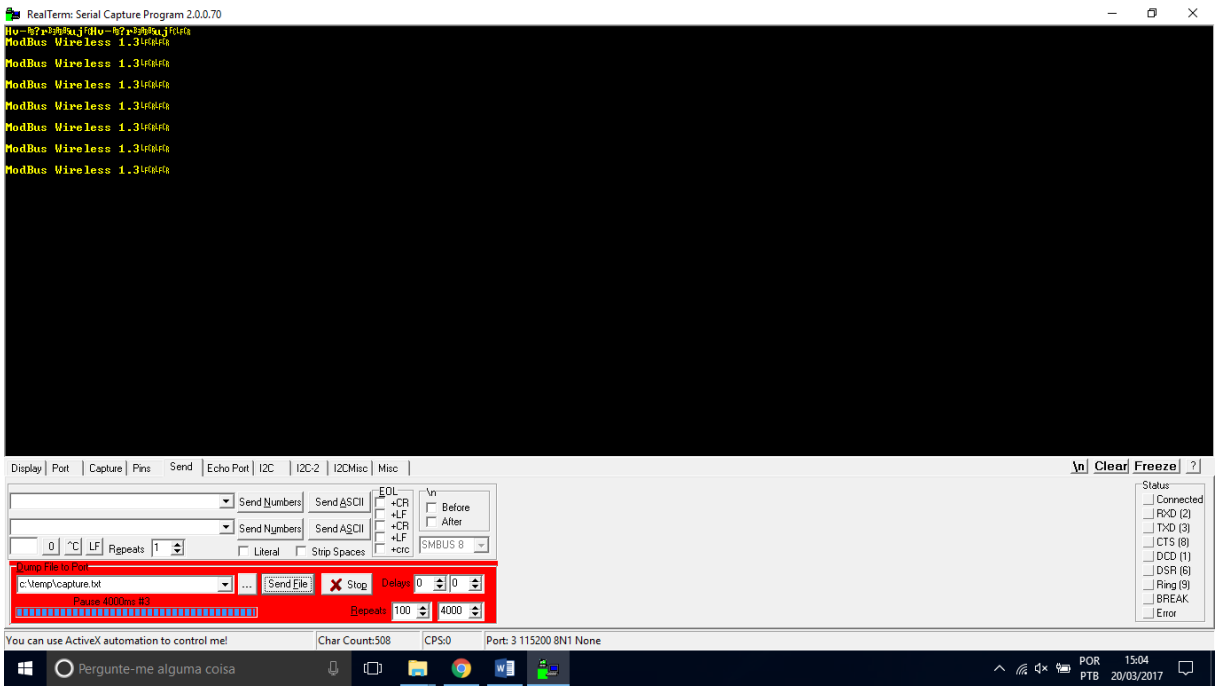


Figura 40 - Tela de Configuração de Envio de Dados no RealTerm.

A Figura 41 apresenta o procedimento de ensaios utilizados para a coleta de valores de *RSSI* e *LQI*. O ambiente onde os dispositivos foram posicionados é do tipo espaço livre entre eles (*Free Space Loss*). A distância entre o transceptor A e o transceptor B (d1) variou entre 1, 5, 10 e 12 metros. A distância entre o Interferente e o transceptor funcionando como receptor (d2), quando aplicado, foi mantida em 1 metro em todos os ensaios.

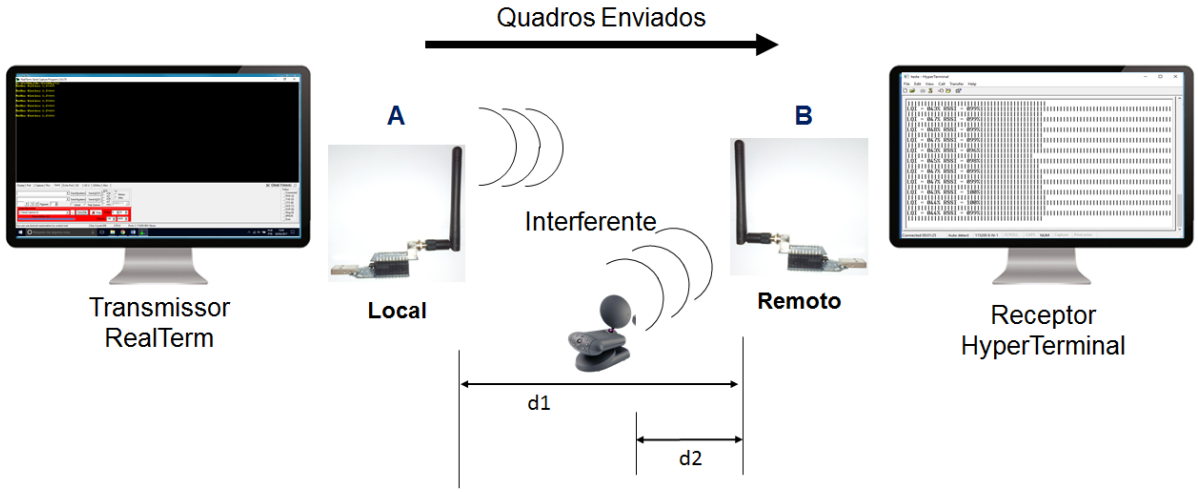


Figura 41 - Configuração Ensaios de *RSSI* e *LQI*

3.2.1.4 CONFIGURAÇÃO DO EQE-LPA

Conforme apresentado anteriormente na Figura 38, o *firmware* do transceptor utilizado já fornece as métricas de *RSSI* e *LQI* em porcentagem a cada pacote recebido. Entretanto, as fórmulas de conversão dos valores de *RSSI* e *LQI* não são informadas na folha de especificação pelos fabricantes do *chipset* e do transceptor. Ainda assim, uma normalização se faz necessária.

Os transceptores utilizados possuem uma antena omnidirecional, conforme pode ser revisto na Figura 37, que em função de seu ganho, melhora a performance do enlace e consequentemente da métrica *RSSI*. Nos ensaios com distância de 1m, sem interferência ou obstáculos, o dispositivo sem fio remoto registrou valores de *RSSI* entre 91% e 96%. Por outro lado, a sensibilidade mínima do dispositivo é de -91 dBm. Assim sendo, empiricamente foi adotado a normalização para a métrica *RSSI* desse dispositivo conforme apresentado na Figura 42.

Ainda que não ocorra perda de pacotes, nos ensaios preliminares, a métrica *LQI* nunca foi superior a 50%. Por outro lado, a perda total de pacotes e consequente perda de conexão ocorreu com valores de *LQI* abaixo de 10%. Perdas significativas

de pacotes ocorreram com *LQI* em torno de 20%. Assim sendo baseado nos diversos ensaios, foi adotado a normalização da métrica *LQI* de forma exponencial conforme a Tabela 6, gerando a equação (17), através de regressão não linear e correspondente gráfico apresentado pela Figura 43, onde λ é o complemento de μ_2.

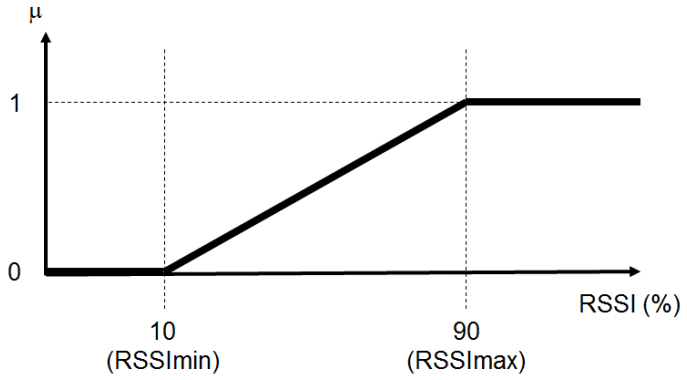


Figura 42 - Normalização de *RSSI* para μ .

$$\mu_2 = 0{,}4038 * LQI + 60{,}1341 - \frac{227{,}0068}{LQI} - 18{,}9804 * \ln(LQI) \qquad (17)$$

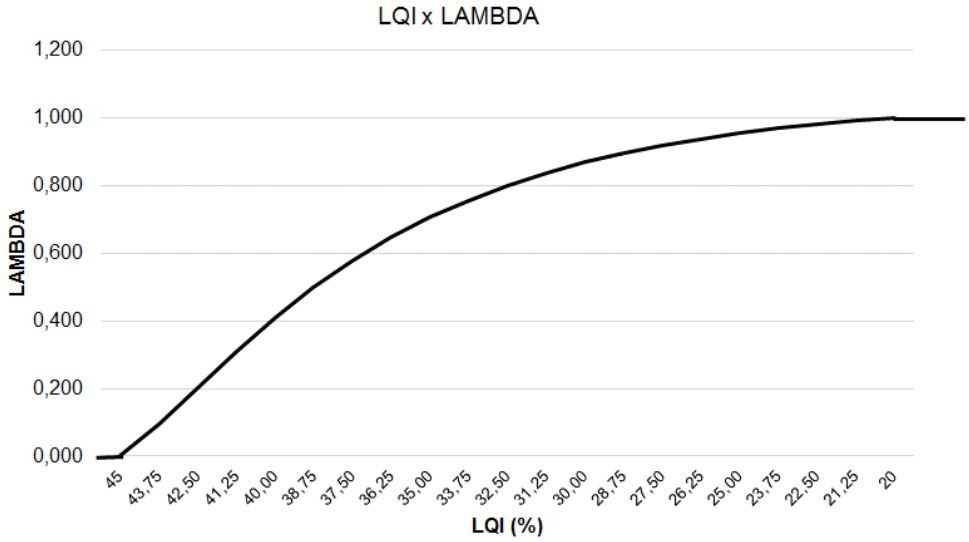


Figura 43 - Normalização de LQI para λ .

Tabela 6 - Normalização adotada do LQI x λ.

LQI (%)	μ_2	λ
45>	1,000	0,000
43,75	0,900	0,100
42,50	0,800	0,200
38,75	0,500	0,500
32,50	0,200	0,800
20	0,000	1,000
<20	0,000	1,000

A Tabela 7 apresenta o comportamento esperado do EQE-LPA proposto, para diferentes valores de *RSSI* e *LQI*, de acordo com uma simulação com valores estáticos (sem filtro) em MS Excel, utilizando os parâmetros de normalização e a LPA2v conforme apresentados. A Figura 44 apresenta a mesma simulação em forma gráfica.

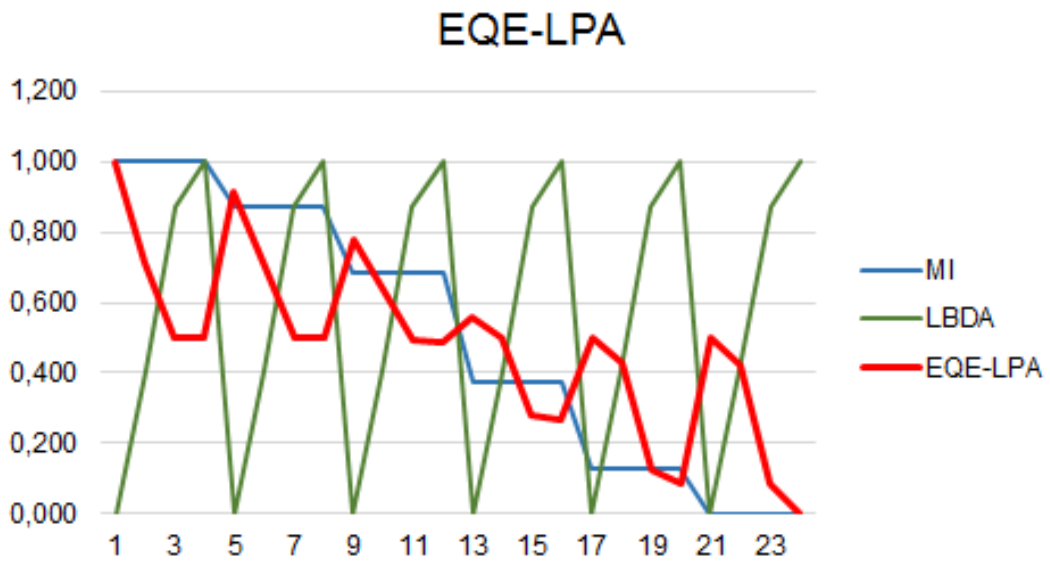


Figura 44 - Comportamento esperado do EQE-LPA em MS Excel.

Tabela 7 - Comportamento esperado EQE-LPA em MS Excel

RSSI (%)	LQI (%)	MI	LBDA	GCR	MIER
90,00	45,00	1,000	0,000	1,000	**1,000**
90,00	40,00	1,000	0,405	0,427	**0,713**
90,00	30,00	1,000	0,875	0,000	**0,500**
90,00	20,00	1,000	1,000	0,000	**0,500**
80,00	45,00	0,875	0,000	0,823	**0,912**
80,00	40,00	0,875	0,405	0,400	**0,700**
80,00	30,00	0,875	0,875	0,000	**0,500**
80,00	20,00	0,875	1,000	0,000	**0,500**
65,00	45,00	0,688	0,000	0,558	**0,779**
65,00	40,00	0,688	0,405	0,276	**0,638**
65,00	30,00	0,688	0,875	-0,012	**0,494**
65,00	20,00	0,688	1,000	-0,028	**0,486**
40,00	45,00	0,375	0,000	0,116	**0,558**
40,00	40,00	0,375	0,405	-0,006	**0,497**
40,00	30,00	0,375	0,875	-0,441	**0,280**
40,00	20,00	0,375	1,000	-0,470	**0,265**
20,00	45,00	0,125	0,000	0,000	**0,500**
20,00	40,00	0,125	0,405	-0,141	**0,430**
20,00	30,00	0,125	0,875	-0,750	**0,125**
20,00	20,00	0,125	1,000	-0,823	**0,088**
10,00	45,00	0,000	0,000	0,000	**0,500**
10,00	40,00	0,000	0,405	-0,159	**0,420**
10,00	30,00	0,000	0,875	-0,823	**0,088**
10,00	20,00	0,000	1,000	-0,999	**0,000**

O EQE-LPA completo, com os Filtros LPA2v, normalizadores de *RSSI* e *LQI* e cNAPp em SIMULINK é apresentado na Figura 45. Pode-se observar a adição de entradas e saídas para capturar arquivos dos ensaios e exibir o status do enlace. Um algoritmo no MATLAB® é utilizado para carregar o arquivo LOG em formato texto, executar o EQE-LPA no SIMULINK e gerar os gráficos correspondentes as métricas *RSSI*, *LQI* e ao Estimador EQE-LPA. Os blocos Normalizador 1 (*RSSI*) e Normalizador 2 (*LQI*) são blocos de programação em MATLAB® executados como blocos de função no SIMULINK. Esses blocos encontram-se no APÊNDICE A. Um programa em MATLAB® foi escrito (APÊNDICE A), de modo a ler diretamente o arquivo txt com o LOG das métricas *RSSI* e *LQI*, ativar o modelo EQE-LPA em SIMULINK e apresentar os resultados na forma de 3 gráficos, a saber: gráfico de *RSSI* e *LQI*, gráfico de *RSSI* (μ) e *LQI* filtrados ($\lambda=1-\mu_2$) e EQE-LPA (μ_{ER}) e um gráfico final do EQE-LPA sobre uma

escala de classificação do enlace. Os Filtros LPA2v utilizados para tratamento das métricas *RSSI* e *LQI* são do tipo cNAPapxct e estão com F_A ajustados em 0,35.

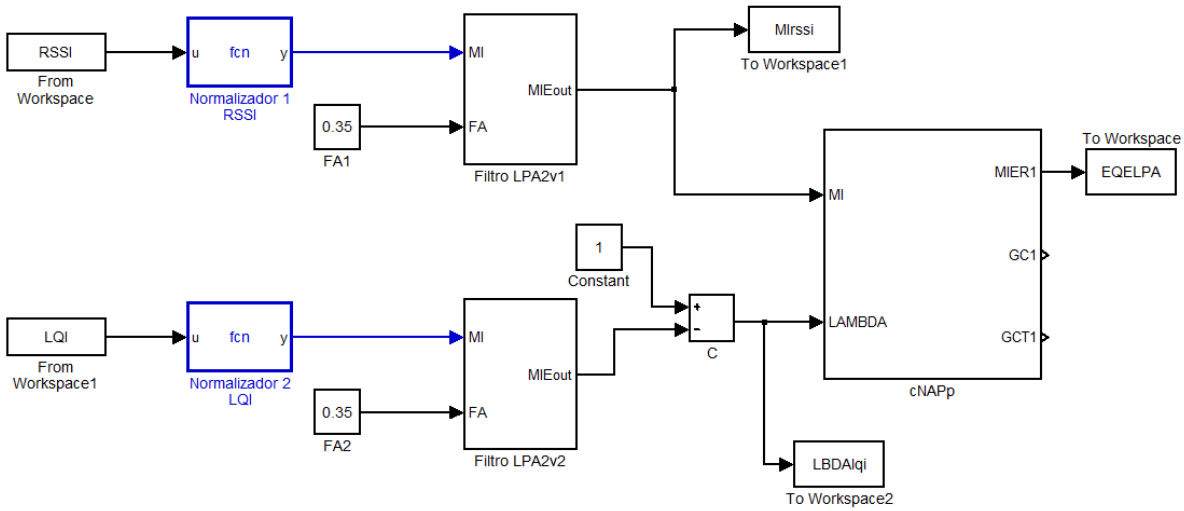


Figura 45 - EQE-LPA no SIMULINK

3.2.2 EQE-LPA LB (LOOPBACK, RSSI E *PSR*/PER)

O algoritmo do EQE-LPA alternativo, utilizando a métrica *PSR* (e *PER*) ao invés de *LQI*, chamado de EQE-LPA LB tem o seu diagrama de blocos proposto conforme Figura 46. O Filtro LPA2v para a métrica *RSSI* é opcional já que em algumas ferramentas disponibilizadas pelos fabricantes dos dispositivos sem fio, o teste de *Loopback* não permite o registro LOG dos valores do *RSSI*, sendo obtido diretamente a média ou última medida registrada.

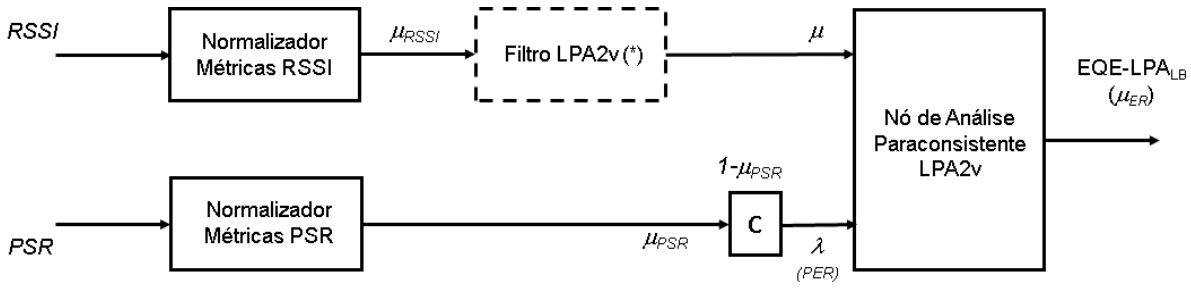


Figura 46 - EQE-LPA LB para *PSR* ao invés de *LQI*.

A correspondência entre o valor do grau de evidência resultante real (μ_{ER}) e a classificação do enlace pelo EQE-LPA LB é a mesma já apresentada na Tabela 4 para o EQE-LPA, porém de modo a diferenciar a saída de um estimador do outro, será adotada como EQE-LPA$_{LB}$.

A fonte de interferência para degradar o enlace, a obtenção das métricas *RSSI/PSR* é a mesma já descrita no item 3.2.1.2.

3.2.2.1 MEDIÇÕES DE RSSI E *PSR* (LOOPBACK)

Há situações em que o fabricante do *chipset* ou do *firmware* do dispositivo sem fio não disponibilizam a métrica de *LQI.* Para esses casos, uma alternativa proposta por vários fabricantes é a medição da taxa de pacotes enviados e recebidos com sucesso em um laço de retorno (Loopback).

Os dispositivos utilizados para este ensaio foram dois dispositivos padrão IEEE 802.15.4 do fabricante DIGI®, modelo XBEE XB-24 S1, *transceiver* Freescale MC-13212 de 1mW de potência (FREESCALE, 2009), que pode ser visto na Figura 47.

As medições foram realizadas utilizando-se a funcionalidade Range Test disponível no *software* X-CTU versão 6.3.2 do fabricante XBEE. O *software* é bastante simples de se usar, apresentando resultados em forma gráfica, apesar de não salvar arquivo LOG das medidas de *RSSI,* nem funcionar com dispositivos de outros fabricantes. A Figura 48 apresenta a tela dessa ferramenta. No *software* é possível selecionar o transceptor local (à esquerda superior) e o transceptor remoto (à direita, superior). Pode-se selecionar ou configurar a sequência de dados a ser utilizada (tamanho do pacote) e o tempo de espera de transmissão (mínimo 4000 mseg) e de recepção (mínimo de 1000 mseg.), além da quantidade de pacotes a serem transmitidos durante o *loop* (no caso, foram transmitidos 100 pacotes em cada ensaio).

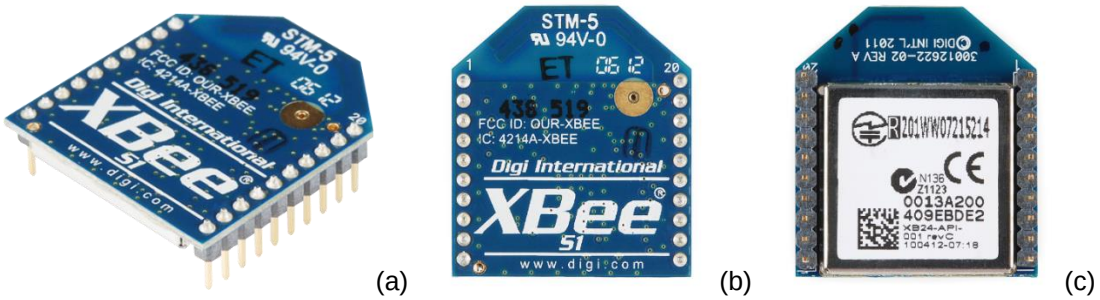


Figura 47 - Transceptor XBEE (a); ver. S1 (b); mod. XB24, Freescale MC13212.

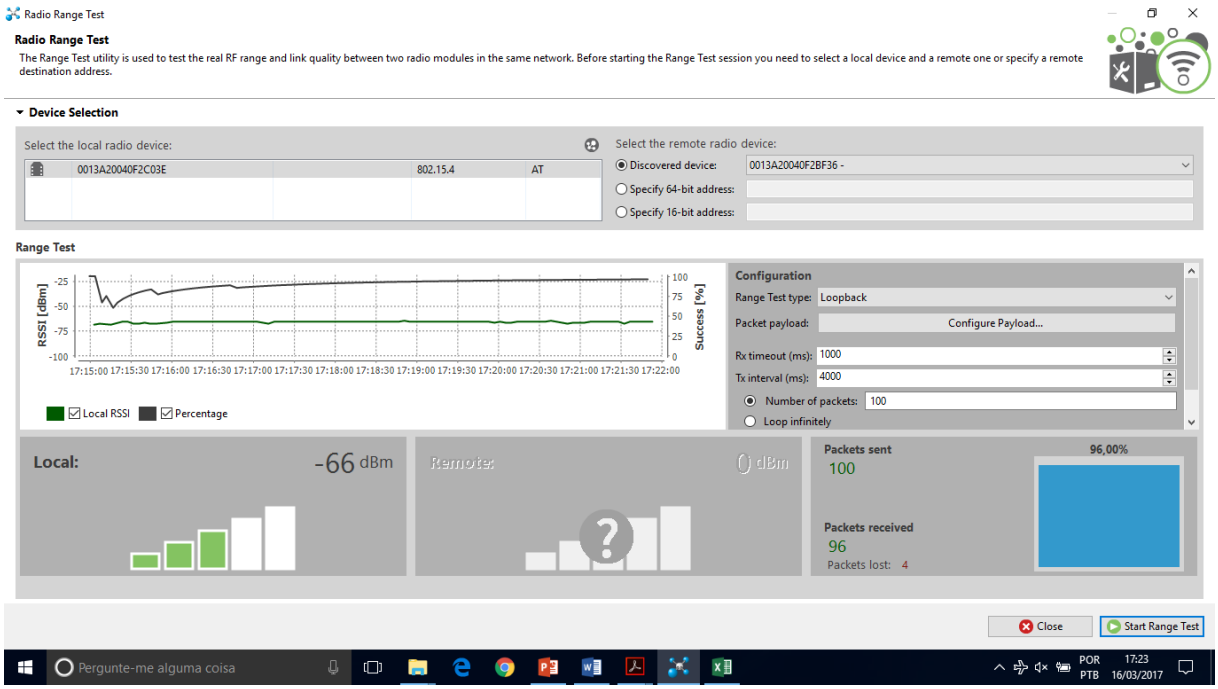


Figura 48 - Janela da ferramenta *Range Test*, X-CTU, para transceptores X-BEE.

Os ensaios foram realizados para distâncias entre transceptor local e remoto com 1, 5 e 10 metros; sem e com interferente à distância entre 1 e 2 metros do dispositivo remoto, em espaço livre (sem obstáculos diretos entre os transceptores) e repetidos três vezes. De modo a verificar os limites do alcance, uma medida a 15 metros com obstáculos e sem interferência foi realizada. Foram realizados ensaios para taxa da *interface* serial em 9,6 kbps com pacote de dados de 32 *Bytes* e em 115,2 kbps com pacote de dados de 80 *Bytes*. Já a Figura 49 apresenta o procedimento de ensaios utilizados para a coleta de valores de *RSSI* e *PSR*, no modo *Loopback*.

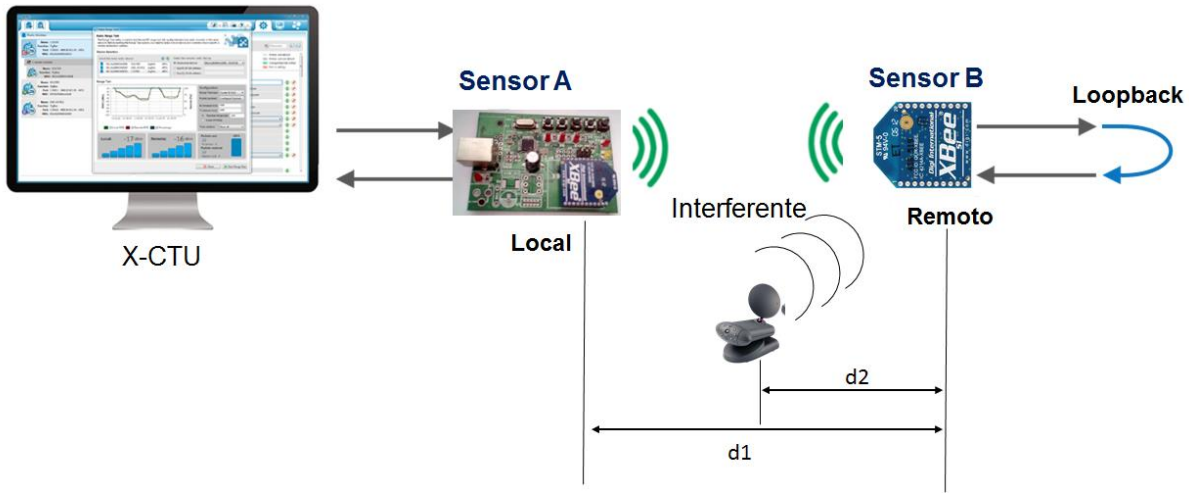


Figura 49 - Procedimento Ensaio *Loopback* com Módulos XBEE.

Para os transceptores XBEE, o modo *Loopback* é ativado no dispositivo remoto ao conectar-se a saída de dados – *Dout* (recebidos) no pino 2 com a entrada de dados - *Din* (a serem transmitidos) no pino 3.

Para a conexão entre o transceptor local e o computador foi utilizado o módulo adaptador INT700, conforme mostrado na Figura 50.

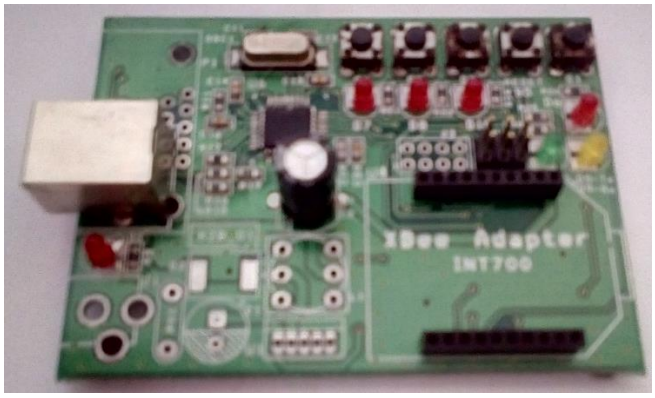


Figura 50 - Módulo Adaptador XBEE para Serial/USB modelo INT700.

O ambiente onde os dispositivos foram posicionados é do tipo espaço livre, semelhante ao utilizado para as medidas de *RSSI* e *LQI*. A distância entre os transceptores A e B (d1) variou entre 1, 5, 10 e 15 metros. A distância entre o Interferente e o dispositivo remoto (d2), quando aplicado, variou entre 1 e 2 metros.

3.2.2.2 CONFIGURAÇÃO DO EQE-LPA LB

Um programa em MATLAB® foi especialmente desenvolvido para a versão EQE-LPA LB (disponível no APÊNDICE B), onde valores individuais de *RSSI* e *PSR* são introduzidos manualmente em função dos resultados obtidos de ensaios de *Loopback*.

Cada modelo de *chipset* e ou *firmware* de dispositivo sem fio apresenta limites máximos e mínimos de métrica *RSSI*. De acordo com o modelo de propagação no espaço livre, para uma potência de transmissão de 1 mW (0 dBm), à uma distância de 1 m, espaço livre, desprezando-se ganhos de antena, a potência recebida no receptor será de aproximadamente -40,2 dBm. O padrão IEEE 802.15.4 estabelece como limite de sensibilidade (potência mínima) dos dispositivos sem fio melhor que -85 dBm. De acordo com as especificações do datasheet do transceptor utilizado, a sensibilidade é de -92 dBm para *PSR* < 1% (FREESCALE, 2009). Assim sendo, a

normalização da métrica *RSSI* para o EQE-LPA LB da Figura 21 foi adotado conforme a Figura 51, podendo os limites máximo e mínimo serem alterados pelo usuário, no código do MATLAB® elaborado.

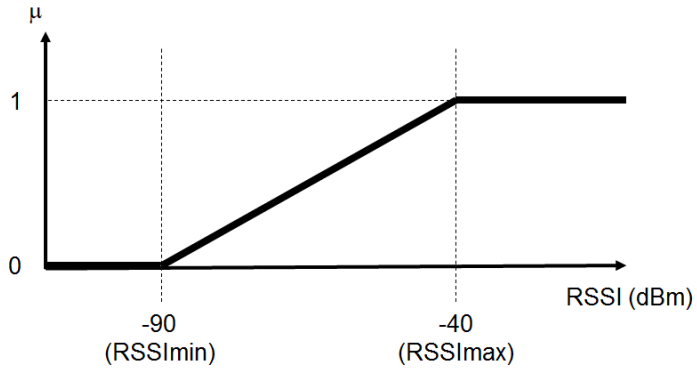


Figura 51 - Normalização do *RSSI* para o EQE-LPA LB.

A normalização da métrica *PSR*, por outro é em função de qual taxa de pacotes enviados e recebidos com sucesso é aceitável em um determinado projeto. Assim sendo, é critério do projetista. Para o código MATLAB® desenvolvido foi elaborado empiricamente o normalizador exponencial apresentado na Tabela 8, onde taxas muito próximas a 100% apresentam valores do grau de evidência desfavorável (λ) muito próximo de zero e que aceleram rapidamente para *PSR* menores que 90%, sendo considerado que *PSR* igual ou abaixo de 80% o valor lógico de 1. A partir dessa tabela, por regressão não linear chegou-se à equação 18, a seguir. A Figura 52 apresenta a curva de normalização de *PER* para λ. A conversão de *PSR* em *PER* é de acordo com a equação 16, apresentada anteriormente.

$$\lambda = \frac{PER}{(1.3742 * PER - 4.7579 * \sqrt{PER} + 13.7958)} \tag{18}$$

A Tabela 9 apresenta o comportamento esperado do EQE-LPA LB proposto, de acordo com uma simulação simplificada em MS Excel, utilizando os parâmetros de normalização e a LPA2v conforme apresentados. A Figura 53 apresenta a mesma simulação em forma gráfica para a saída EQE-LPA$_{LB}$ (μ_{ER}).

Tabela 8 - Normalização do *PSR* e PER

PSR (%)	MI	PER (%)	LAMBDA
100	1,000	0	0,000
99	0,900	1	0,100
98	0,800	2	0,200
95	0,500	5	0,500
90	0,200	10	0,800
80	0,000	20	1,000
<80	0,000	20>	1,000

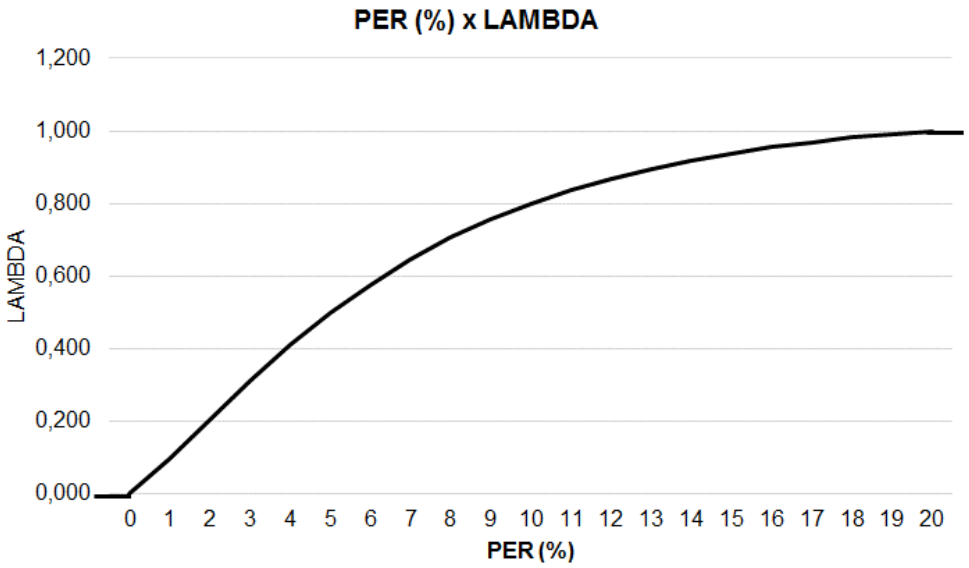


Figura 52 - Normalização do PER para o EQE-LPA LB.

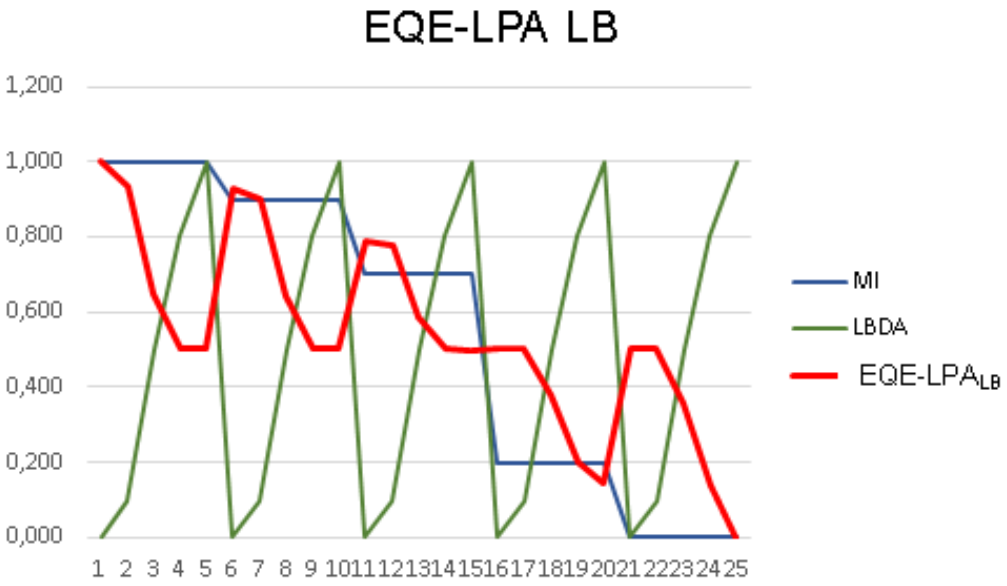


Figura 53 - Comportamento esperado EQE-LPA LB em MS Excel.

Tabela 9 - Comportamento esperado EQE-LPA LB em MS Excel

RSSI	PSR	PER	MI	LBDA	GCR	MIER
-40,000	100,000	0,000	1,000	0,000	1,000	**1,000**
-40,000	99,000	1,000	1,000	0,096	0,864	**0,932**
-40,000	95,000	5,000	1,000	0,499	0,295	**0,647**
-40,000	90,000	10,000	1,000	0,801	0,000	**0,500**
-40,000	80,000	20,000	1,000	1,000	0,000	**0,500**
-45,000	100,000	0,000	0,900	0,000	0,859	**0,929**
-45,000	99,000	1,000	0,900	0,096	0,804	**0,902**
-45,000	95,000	5,000	0,900	0,499	0,281	**0,640**
-45,000	90,000	10,000	0,900	0,801	0,000	**0,500**
-45,000	80,000	20,000	0,900	1,000	0,000	**0,500**
-55,000	100,000	0,000	0,700	0,000	0,576	**0,788**
-55,000	99,000	1,000	0,700	0,096	0,555	**0,777**
-55,000	95,000	5,000	0,700	0,499	0,177	**0,589**
-55,000	90,000	10,000	0,700	0,801	0,000	**0,500**
-55,000	80,000	20,000	0,700	1,000	-0,010	**0,495**
-80,000	100,000	0,000	0,200	0,000	0,000	**0,500**
-80,000	99,000	1,000	0,200	0,096	0,000	**0,500**
-80,000	95,000	5,000	0,200	0,499	-0,237	**0,382**
-80,000	90,000	10,000	0,200	0,801	-0,601	**0,200**
-80,000	80,000	20,000	0,200	1,000	-0,717	**0,141**
-90,000	100,000	0,000	0,000	0,000	0,000	**0,500**
-90,000	99,000	1,000	0,000	0,096	0,000	**0,500**
-90,000	95,000	5,000	0,000	0,499	-0,291	**0,355**
-90,000	90,000	10,000	0,000	0,801	-0,718	**0,141**
-90,000	80,000	20,000	0,000	1,000	-1,000	**0,000**

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados dos ensaios para obtenção de valores *RSSI*, *LQI* e *PSR* utilizando os transceptores em diferentes cenários e da atuação do Estimador de Qualidade do Enlace LPA2v desenvolvido em MATLAB® e SIMULINK, em suas duas versões (EQE-LPA e EQE-LPA LB).

4.1 MEDIÇÕES RSSI/LQI E RESPOSTA EQE-LPA

Todos os ensaios foram realizados na condição de espaço livre, ou seja, sem obstáculos diretos na linha de visada entre as antenas dos dispositivos local e remoto. De modo a forçar uma condição de redução do valor *RSSI*, nas medições à 12 metros de distância, a antena do dispositivo remoto foi desalinhada, colocando-se na posição horizontal (H). Para os ensaios nas demais distâncias as antenas de ambos os dispositivos foram sempre mantidas alinhadas na posição vertical (V). A Tabela 10 apresenta os ensaios realizados para a coleta das métricas *RSSI* e *LQI*.

Os valores de *RSSI* e *LQI* foram coletados no dispositivo receptor. A fim de se obter valores que não pudessem ser influenciados pela performance do dispositivo, foram feitos ensaios do transceptor A para o transceptor B e do transceptor B para o transceptor A, em momentos diferentes. Os ensaios foram realizados com o interferente a 1 metro do dispositivo receptor, exceto para os ensaios 33 a 38, onde o interferente foi posicionado a meia distância dos dispositivos local e remoto.

A Figura 54 apresenta as primeiras linhas do arquivo LOG do ensaio 1, com ao todo 43 amostras. Percebe-se por este ensaio que devido a pequena distância e sem a presença de interferência, os valores *RSSI* e *LQI* estão na melhor condição.

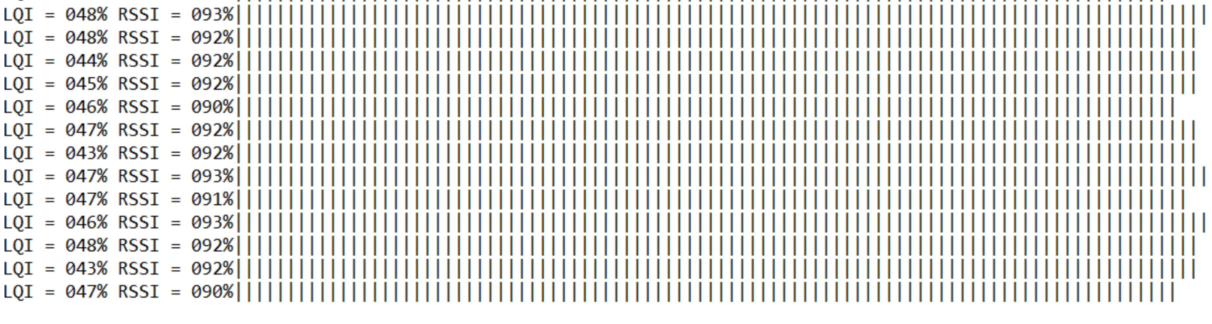


Figura 54 - Ensaio 1, A=>B, 9,6 kbps, 1 metro, sem interferência.

Tabela 10 - Ensaios para medições *RSSI* e *LQI*

ENSAIO	CENARIO			ENLACE	TAXA INTERFACE (kbps)
	DISTANCIA (m)	ANTENA	INTERFERENTE		
1	1	V / V	NÃO	A=>B	9,6
2	1	V / V	SIM ; 1,0 m	A=>B	9,6
3	5	V / V	NÃO	A=>B	9,6
4	5	V / V	SIM ; 1,0 m	A=>B	9,6
5	10	V / V	NÃO	A=>B	9,6
6	10	V / V	SIM ; 1,0 m	A=>B	9,6
7	12	V / H	NÃO	A=>B	9,6
8	12	V / H	SIM ; 1,0 m	A=>B	9,6
9	1	V / V	NÃO	A=>B	115,2
10	1	V / V	SIM ; 1,0 m	A=>B	115,2
11	5	V / V	NÃO	A=>B	115,2
12	5	V / V	SIM ; 1,0 m	A=>B	115,2
13	10	V / V	NÃO	A=>B	115,2
14	10	V / V	SIM ; 1,0 m	A=>B	115,2
15	12	V / H	NÃO	A=>B	115,2
16	12	V / H	SIM ; 1,0 m	A=>B	115,2
17	1	V / V	NÃO	B=>A	9,6
18	1	V / V	SIM ; 1,0 m	B=>A	9,6
19	5	V / V	NÃO	B=>A	9,6
20	5	V / V	SIM ; 1,0 m	B=>A	9,6
21	10	V / V	NÃO	B=>A	9,6
22	10	V / V	SIM ; 1,0 m	B=>A	9,6
23	12	V / H	NÃO	B=>A	9,6
24	12	V / H	SIM ; 1,0 m	B=>A	9,6
25	1	V / V	NÃO	B=>A	115,2
26	1	V / V	SIM ; 1,0 m	B=>A	115,2
27	5	V / V	NÃO	B=>A	115,2
28	5	V / V	SIM ; 1,0 m	B=>A	115,2
29	10	V / V	NÃO	B=>A	115,2
30	10	V / V	SIM ; 1,0 m	B=>A	115,2
31	12	V / H	NÃO	B=>A	115,2
32	12	V / H	SIM ; 1,0 m	B=>A	115,2
33	6	V / V	NÃO	A=>B	9,6
34	6	V / V	SIM ; 3,0 m	A=>B	9,6
35	6	V / V	NÃO	B=>A	9,6
36	6	V / V	SIM ; 3,0 m	B=>A	9,6
37	6	V / V	NÃO	B=>A	115,2
38	6	V / V	SIM ; 3,0 m	B=>A	115,2

De acordo com a Figura 55, percebe-se uma flutuação dos valores de *RSSI* e *LQI* em torno de um valor médio, razão pela qual há a necessidade de implantação dos Filtros LPA2v para extração de média.

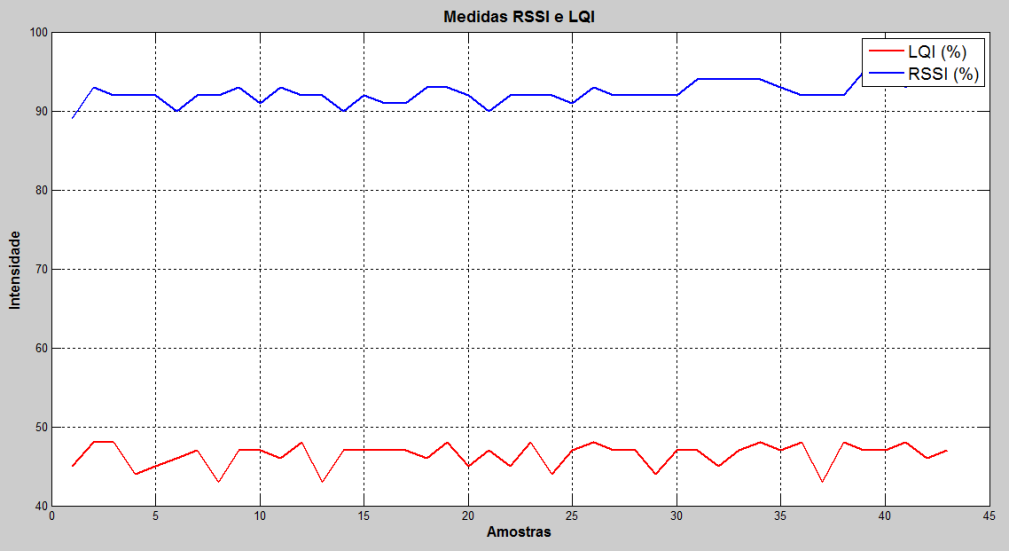


Figura 55 - Ensaio 1, métricas *RSSI* e *LQI.*

As Figuras 56 a 57 apresentam os resultados do programa do EQE-LPA para este ensaio.

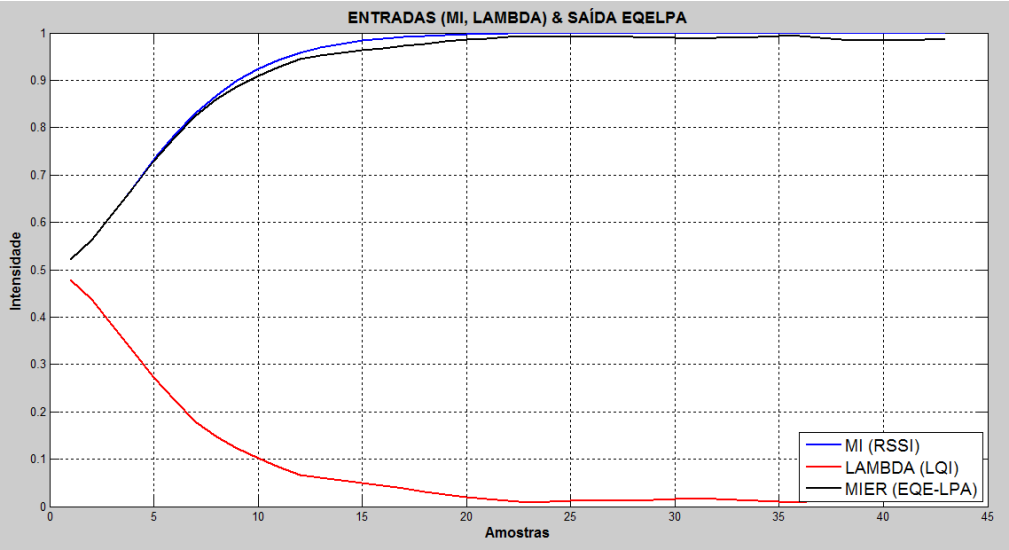


Figura 56 - Ensaio 1, métricas *RSSI* e *LQI* filtradas e EQE-LPA

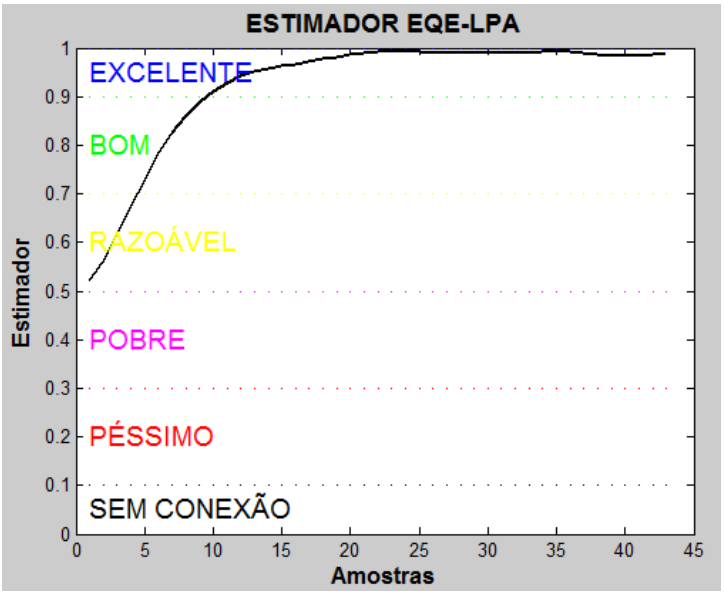


Figura 57 - Ensaio 1, resultado EQE-LPA e máscara de classificação

Pela Figura 56 pode-se perceber que os Filtros LPA2v foram capazes de filtrar os valores de *RSSI* e *LQI* e, como previsto, gastaram cerca de 23 iterações para alcançar a estabilidade. Dado que não há contradição, ou seja, *RSSI* e *LQI* são valores altos, o EQE-LPA tende a acompanhar o μ (*RSSI*). A Figura 57 apresenta o mesmo valor do EQE-LPA da Figura 56, porém sob uma máscara de classificação do enlace. Dadas as condições de medição com ambos, *RSSI* e *LQI* fortes, após a estabilização dos Filtros LPA2v, percebe-se que o enlace se manteve com classificação "EXCELENTE".

A seguir são apresentados os resultados do ensaio 3, de A=>B, 9,6 kbps, distância de 5 metros, sem interferência. A Figura 58 apresenta as primeiras linhas do arquivo LOG deste ensaio, com 46 amostras ao todo. Percebe-se uma degradação da métrica *RSSI* em função da maior distância. A Figura 59 apresenta os valores de *RSSI* e *LQI* obtidos para este ensaio, na forma gráfica.

Figura 58 - Ensaio 3, A=>B, 9,6 kbps, 5 metros, sem interferência

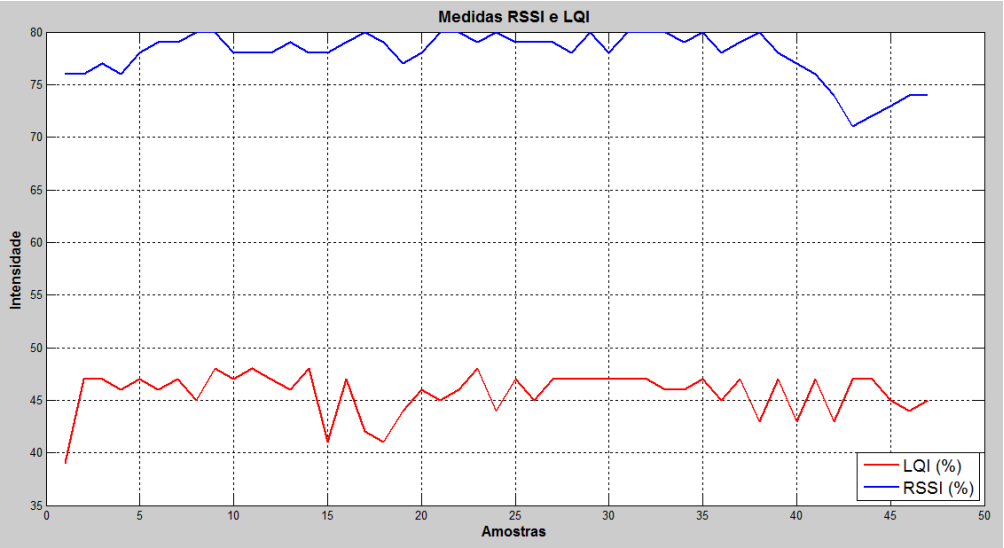


Figura 59 - Ensaio 3, métricas *RSSI* e *LQI*

Nota-se uma pequena degradação do *RSSI*, enquanto que o *LQI* se comporta aproximadamente como no ensaio 1. As Figuras 60 e 61 apresentam os resultados do programa EQE-LPA para este ensaio. Como a métrica *LQI* é forte, não havendo contradição, a saída do estimador tende a acompanhar o *RSSI* filtrado. O fato de haver um *LQI* forte, faz com que o estimador apresente uma indicação ligeiramente melhor do que o valor do *RSSI* convertido em μ. A classificação para este enlace na maior parte do tempo (ou amostras) foi na fronteira entre “BOM” e “EXCELENTE”, conforme a Figura 61.

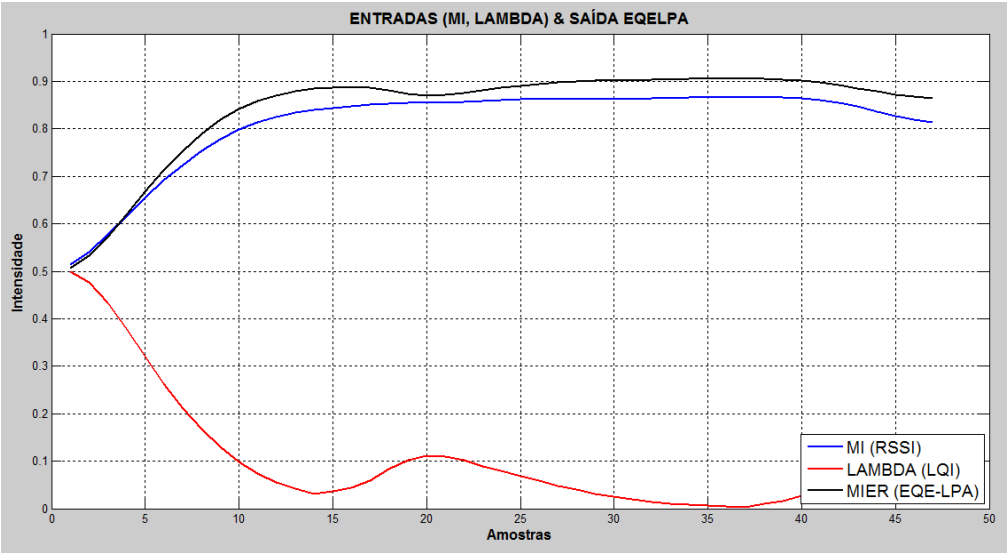


Figura 60 - Ensaio 3, métricas *RSSI* e *LQI* filtradas e EQE-LPA.

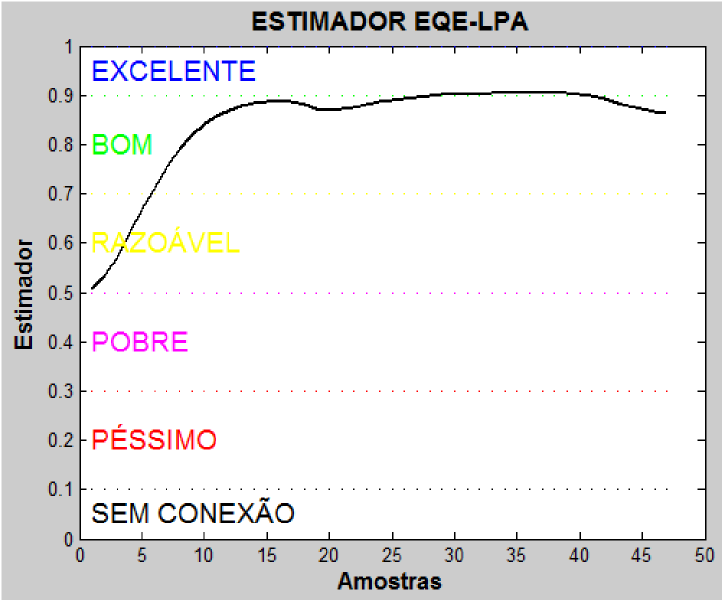


Figura 61 - Ensaio 3, resultado EQE-LPA e máscara de classificação.

A seguir são apresentados os resultados do ensaio 4, de A=>B, 9,6 kbps, distância de 5 metros, condições semelhantes à do ensaio 3, porém com interferência presente. A Figura 62 apresenta as primeiras linhas do arquivo LOG deste ensaio, com ao todo 57 amostras. Percebe-se uma degradação da métrica *LQI*, devido à interferência, ao passo que a métrica *RSSI* apresenta valores semelhantes aos do ensaio 3. A Figura 63 apresenta os valores de *RSSI* e *LQI* obtidos para este ensaio em forma gráfica. As Figuras 64 a 65 apresentam os resultados do programa do EQE-LPA para este ensaio.

```
LQI = 041% RSSI = 077%|||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||
LQI = 047% RSSI = 080%||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||
LQI = 043% RSSI = 076%||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||
LQI = 036% RSSI = 080%||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||
LQI = 045% RSSI = 077%|||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||
LQI = 036% RSSI = 079%|||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||
LQI = 047% RSSI = 081%|||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||
LQI = 047% RSSI = 076%||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||
LQI = 042% RSSI = 076%||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||
LQI = 032% RSSI = 078%||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||
LQI = 037% RSSI = 076%||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||
LQI = 036% RSSI = 078%||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||
LQI = 034% RSSI = 078%||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||
LQI = 043% RSSI = 074%||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||
LQI = 030% RSSI = 075%|||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||
LQI = 040% RSSI = 078%||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||
```

Figura 62 - Ensaio 4, A=>B, 9,6 kbps, 5 metros, com interferência.

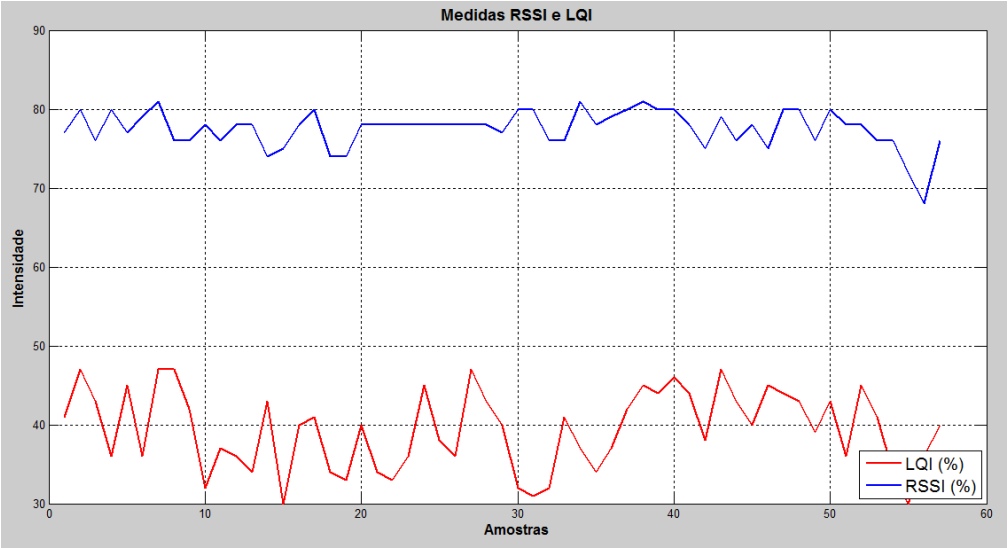


Figura 63 - Ensaio 4, métricas *RSSI* e *LQI*.

Conforme a Figura 64 novamente os Filtros LPA2v foram capazes de filtrar os valores de *RSSI* e *LQI*. Comparando-se os resultados deste ensaio com o ensaio 3, percebe-se que há uma degradação do valor de *LQI*, aparecendo uma contradição em relação à métrica *RSSI* e, portanto, dependendo dos valores obtidos, o EQE-LPA classifique o enlace alternadamente como “RAZOÁVEL” ou “BOM”.

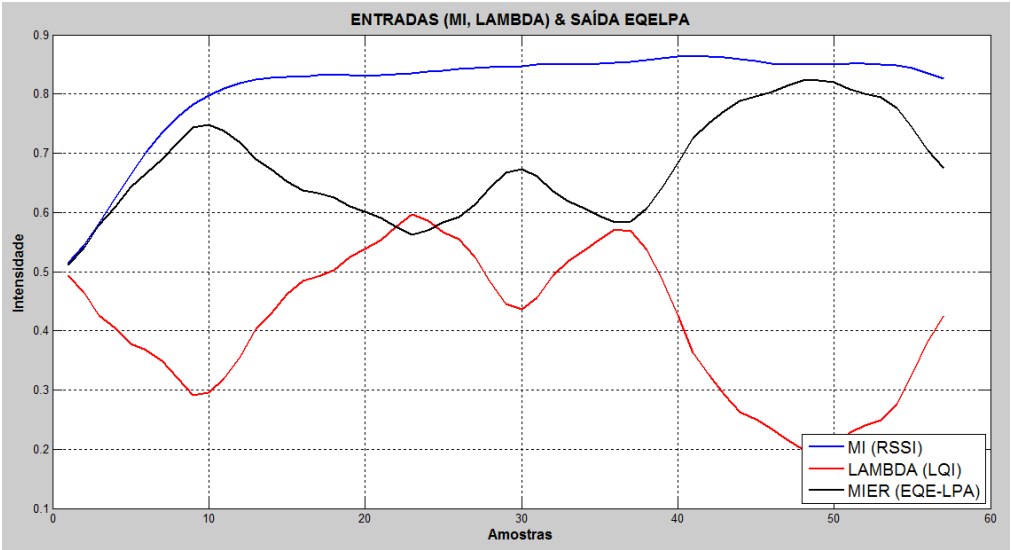


Figura 64 - Ensaio 4, métricas *RSSI* e *LQI* filtradas e EQE-LPA .

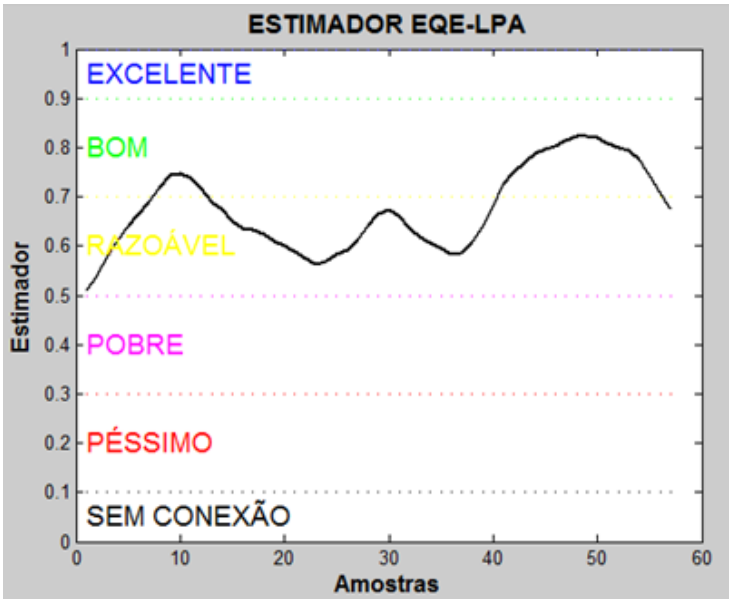


Figura 65 - Ensaio 4, resultado EQE-LPA e máscara de classificação.

Os ensaios com transceptores a 1 metro e sem interferência apresentam condições extremamente favoráveis. Já os ensaios com distância de 12 metros, antenas desalinhadas e interferência ativada são os com resultados mais desfavoráveis, com métricas *RSSI* e *LQI* baixas.

A Figura 66 apresenta as primeiras linhas do arquivo LOG para o ensaio 32, de B=>A, taxa da interface serial em 115,2 kbps, com interferência presente a 1 metro do dispositivo remoto, em um total de 100 amostras. A Figura 67 apresenta os valores de *RSSI* e *LQI* obtidos para este ensaio em forma gráfica. Percebe-se uma grande instabilidade da métrica *LQI*, devido à interferência, enquanto que a métrica *RSSI* apresenta valores bastante baixos devido à distância.

```
LQI = 039% RSSI = 018%|||||||||||||||||
LQI = 035% RSSI = 029%|||||||||||||||||||||||||
LQI = 034% RSSI = 023%|||||||||||||||||||||
LQI = 043% RSSI = 036%|||||||||||||||||||||||||||||||||
LQI = 045% RSSI = 028%|||||||||||||||||||||||||
LQI = 043% RSSI = 034%|||||||||||||||||||||||||||||||
LQI = 044% RSSI = 027%|||||||||||||||||||||||||
LQI = 042% RSSI = 035%|||||||||||||||||||||||||||||||
LQI = 022% RSSI = 024%|||||||||||||||||||||
LQI = 043% RSSI = 026%|||||||||||||||||||||||
LQI = 038% RSSI = 030%|||||||||||||||||||||||||||
LQI = 021% RSSI = 039%|||||||||||||||||||||||||||||||||||
LQI = 043% RSSI = 027%|||||||||||||||||||||||||
LQI = 044% RSSI = 030%|||||||||||||||||||||||||||
LQI = 045% RSSI = 029%|||||||||||||||||||||||||
```

Figura 66 - Ensaio 32, B=>A, 115,2 kbps, 12 metros, com interferência.

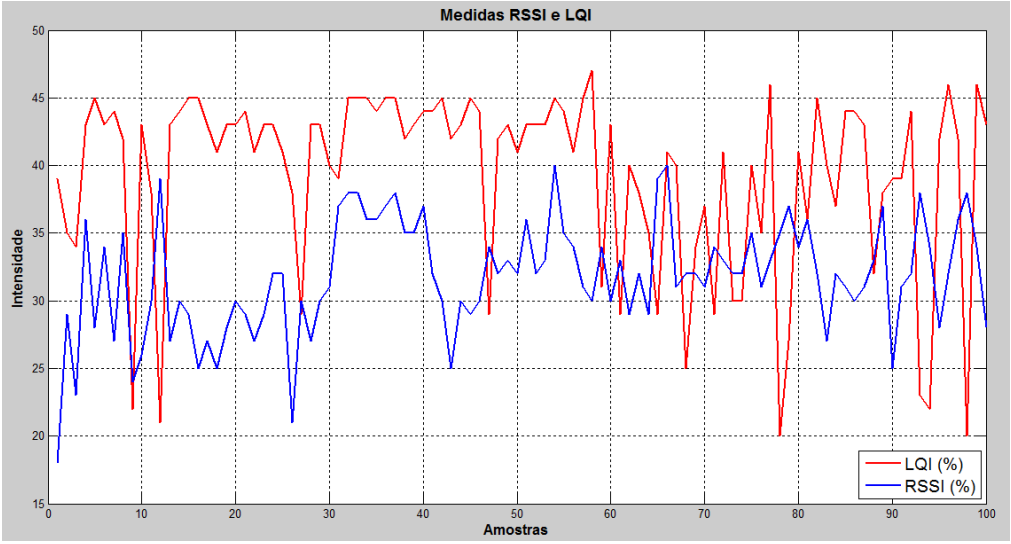


Figura 67 - Ensaio 32, métricas *RSSI* e *LQI.*

As Figuras 68 a 69 apresentam os resultados do programa do EQE-LPA para este ensaio. Nota-se no centro da Figura 68 (linha preta) que o EQE-LPA apresenta um valor de 0,5 durante várias amostras. Isso é devido a condição do algoritmo do Nó de Análise Paraconsistente da cNAPp, onde para valores de *D* maior ou igual a 1,0 o grau de evidência resultante real deve ser nulo, fazendo com que o μ_{ER} (e consequentemente EQE-LPA) seja de 0,5. Conforme a Figura 69, a classificação do enlace é “POBRE”.

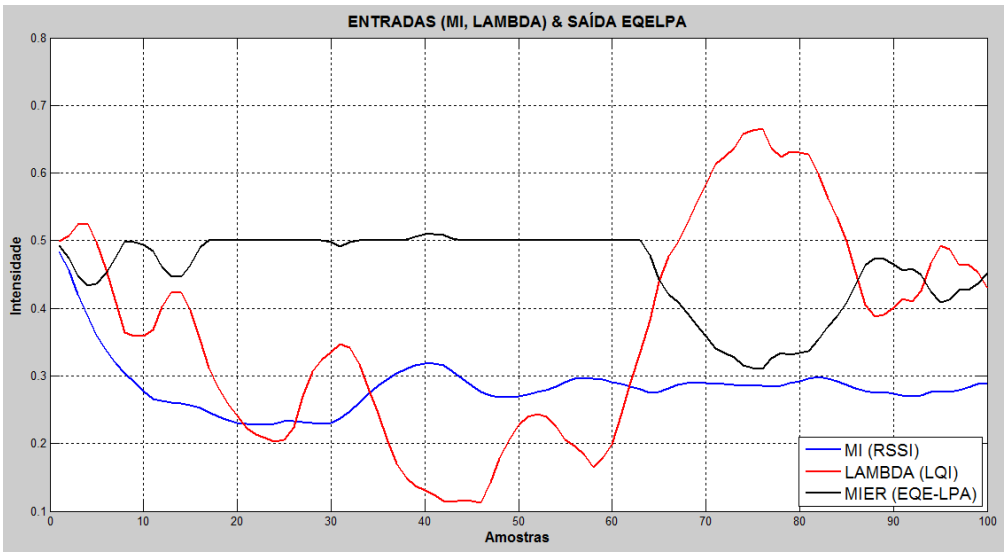


Figura 68 - Ensaio 32, métricas *RSSI* e *LQI* filtradas e EQE-LPA.

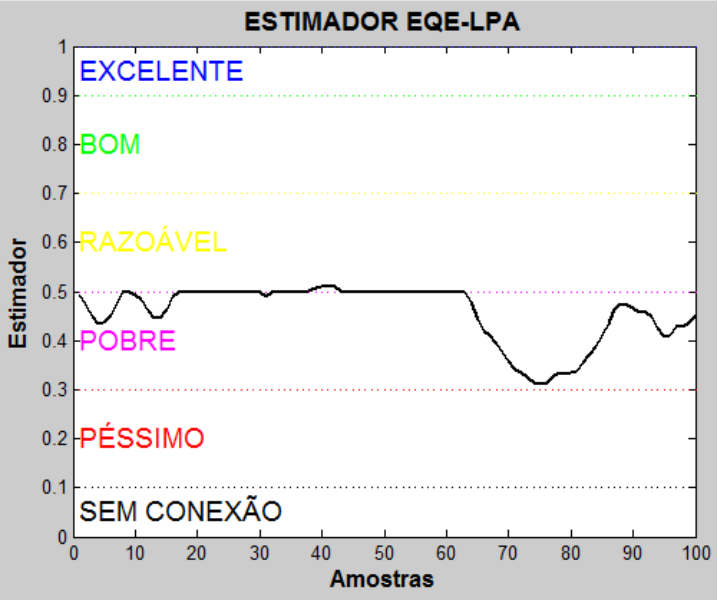


Figura 69 - Ensaio 32, resultado EQE-LPA e máscara de classificação.

A fim de apresentar os demais ensaios de forma resumida, os arquivos LOG de cada ensaio foram unificados, por categoria, variando-se apenas a distância. Assim, todas as medidas de A=>B, com velocidade de 9,6 kbps na *interface* serial, sem interferência, foram consolidadas em apenas 1 arquivo LOG. O mesmo para os demais ensaios. Esse critério não é realista do ponto de vista de radiofrequência, porém é aceitável para avaliação do EQE-LPA, haja visto que os ensaios de mesma direção de transmissão (A=>B, por exemplo) e de mesma taxa de transmissão (9,6 kbps nesse caso), foram feitos no mesmo período de tempo, variando-se apenas a distância e ativando-se ou não a interferência.

A Figura 70 apresenta o gráfico resultante de todas as amostras dos ensaios de A=>B, com velocidade de 9,6 kbps, sem interferência. Pode-se perceber pelos “degraus” de *RSSI*, a mudança de distância de 1 metro, 5 metros, 10 metros e por último 12 metros. Nesta condição sem interferência, percebe-se que em função da variação do *RSSI* com a distância, o EQE-LPA apresenta o estado do enlace variando de “EXCELENTE” a “RAZOÁVEL”, conforme a Figura 71.

A Figura 72 apresenta os valores de *RSSI* e *LQI* também de A=>B, 9,6kbps na *interface* serial, porém com interferência presente. Pode-se perceber pela Figura 73 que apesar da grande variação das métricas *RSSI* e *LQI*, o programa EQE-LPA foi capaz de filtrar esses valores e apresentar uma estimativa que variou entre “EXCELENTE” e “PÉSSIMO”.

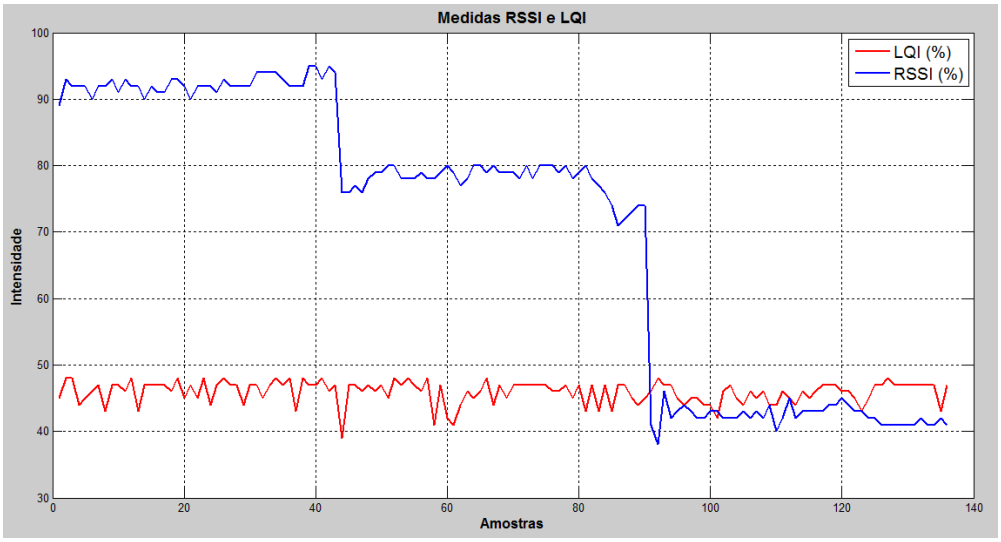


Figura 70 - Métricas *RSSI* e *LQI* para A=>B, 9,6 kbps sem interferência.

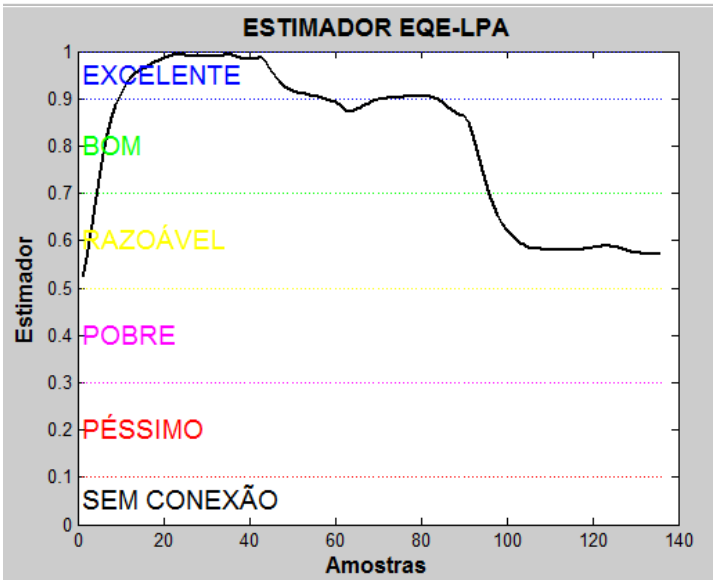


Figura 71 - EQE-LPA para ensaios de A=>B, 9,6 kbps sem interferência.

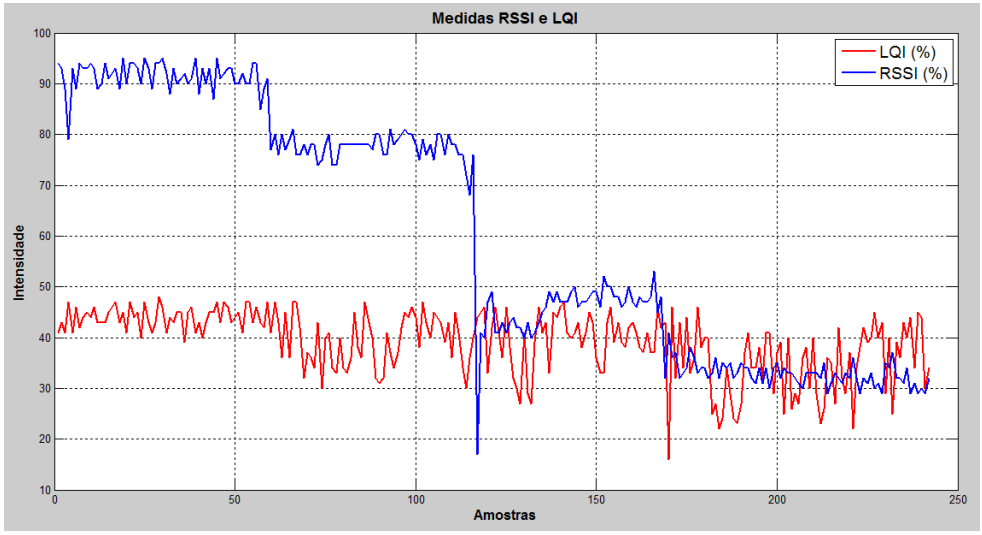


Figura 72 - Métricas *RSSI* e *LQI* para A=>B, 9,6 kbps com interferência.

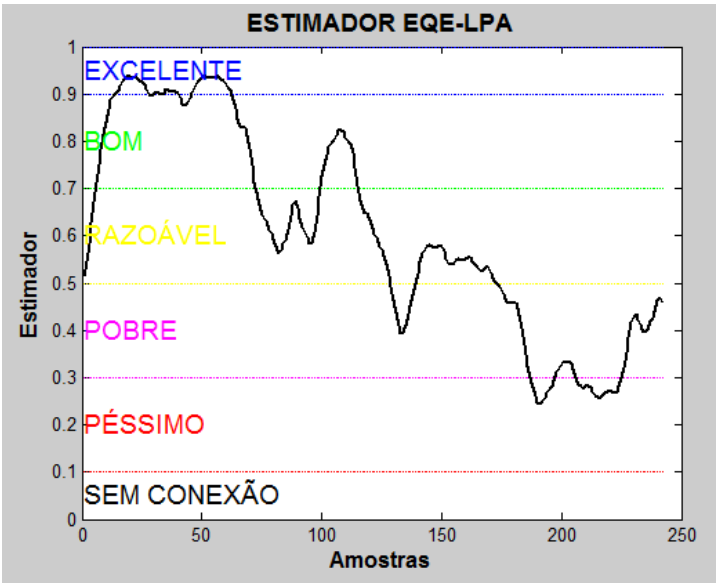


Figura 73 - EQE-LPA para ensaios de A=>B, 9,6 kbps com interferência.

A Figura 74 apresenta o gráfico resultante de todas as amostras dos ensaios de B=>A, com velocidade de 9,6 kbps, sem interferência. Pode-se perceber pelos "degraus" de *RSSI*, a mudança de distância de 1 metro, 5 metros, 10 metros e por último 12 metros. Nesta condição sem interferência, percebe-se que em função da variação do *RSSI* com a distância, o EQE-LPA na Figura 75 apresenta o estado do enlace variando de "EXCELENTE" a "RAZOÁVEL", no limiar para "POBRE". Comparando-se as Figuras 71 com 75, percebe-se a diferença de performance quando a transmissão é de A=>B ou de B=>A. O mesmo enlace, com interferência, é apresentado na Figura 76. Pode-se perceber que a métrica *LQI* com vários picos de variação, em função da degradação devido à interferência.

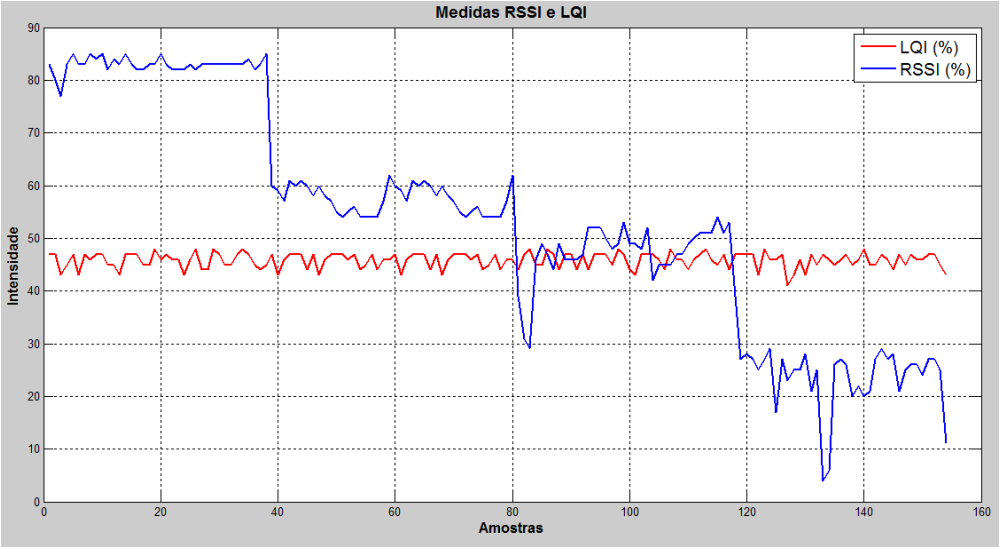


Figura 74 - Métricas *RSSI* e *LQI* para B=>A, 9,6 kbps sem interferência.

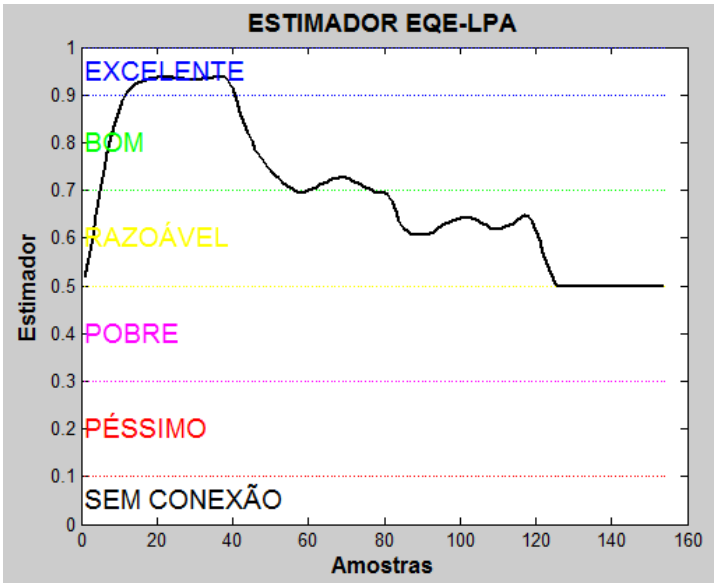


Figura 75 - EQE-LPA para ensaios de B=>A, 9,6 kbps sem interferência.

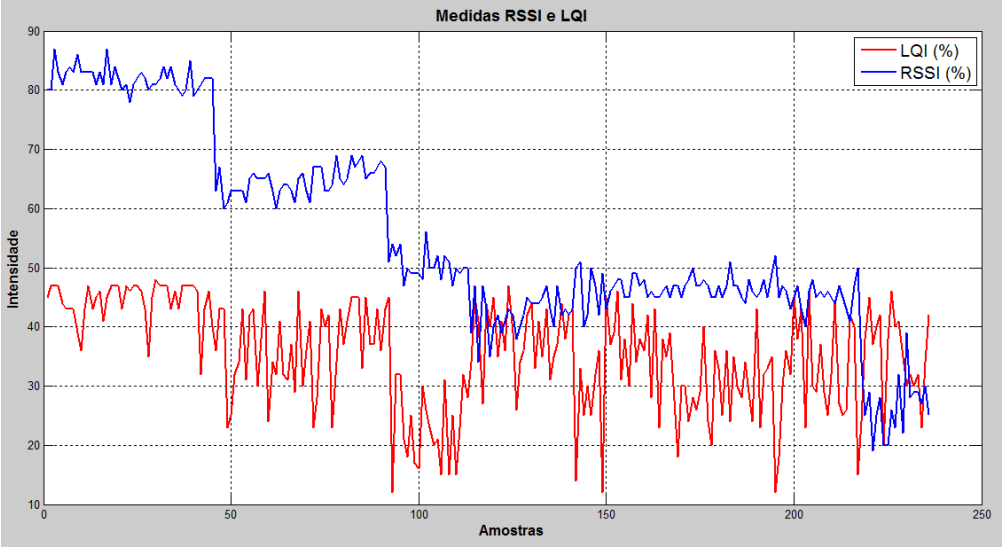


Figura 76 - Métricas *RSSI* e *LQI* para B=>A, 9,6 kbps com interferência.

A Figura 77 apresenta a saída do estimador EQE-LPA para o enlace B=>A, com *interface* serial a 9,6 kbps, em diferentes distâncias, com interferência presente, apresentado na Figura 76. Nesta situação o estado do enlace varia de “EXCELENTE” para a distância de 1 metro, passando por “RAZOÁVEL” para “POBRE” com o aumento da distância, em função da degradação de *RSSI* e *LQI*.

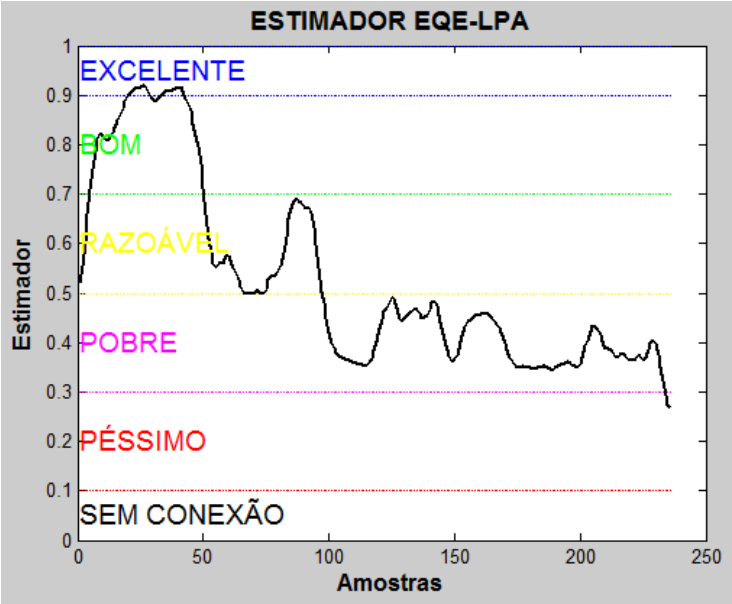


Figura 77 - EQE-LPA para ensaios de B=>A, 9,6 kbps com interferência.

Assim como para 9,6 kbps, foram realizados ensaios com a *interface* serial em 115,2 kbps. A Figura 78 apresenta os resultados consolidados para o enlace A=>B, sem interferência. Apesar da queda da métrica *RSSI* com a distância o *LQI* se manteve estável, e por esta razão na Figura 79 observa-se que o indicador EQE-LPA variou de “EXCELENTE” quando em 1 metro de distância para “RAZOÁVEL” para o ensaio na distância de 12 metros.

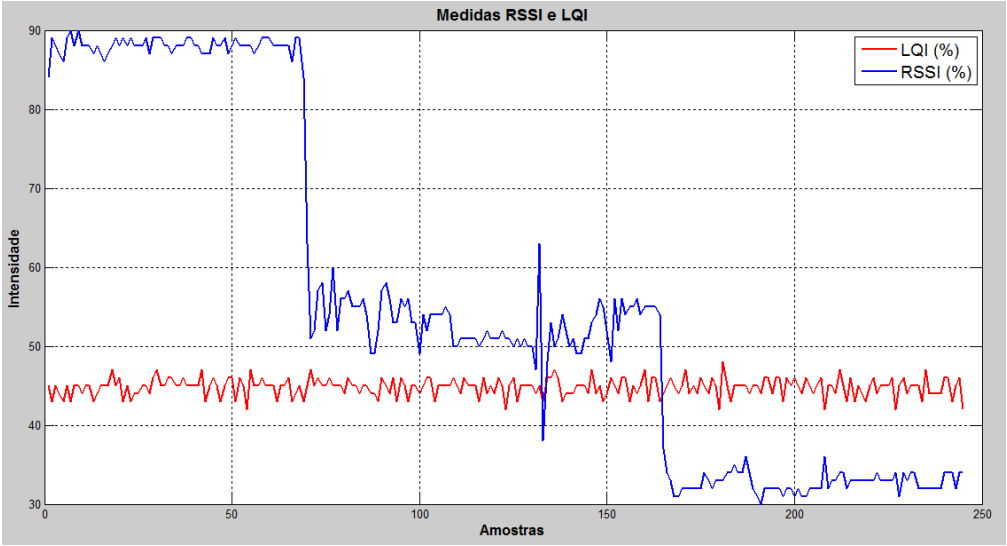


Figura 78 - Métricas *RSSI* e *LQI* para A=>B, 115,2 kbps sem interferência.

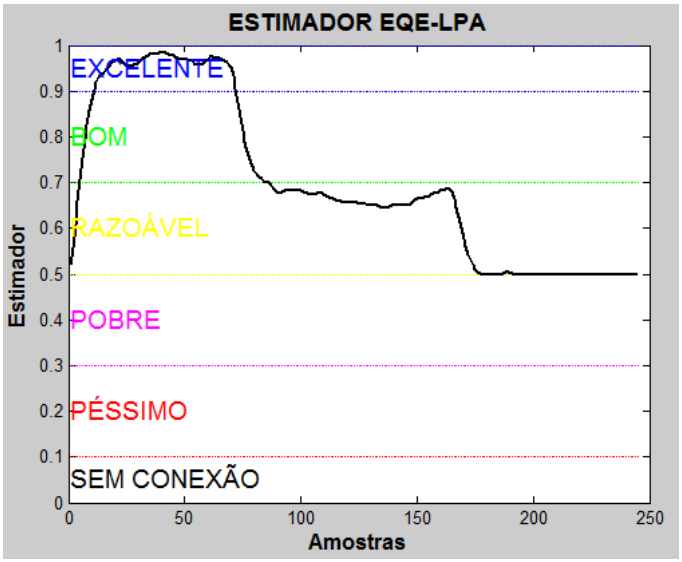


Figura 79 - EQE-LPA para ensaios de A=>B, 115,2 kbps sem interferência.

As Figuras 80 e 81 apresentam os ensaios em condição semelhante, porém com a adição da interferência. Nota-se na Figura 80 que o *LQI* apresenta variação de valores muito grande, devido a presença de interferência durante os ensaios. Como resultado, pode-se verificar pela Figura 81 que a qualidade do enlace, segundo o EQE-LPA varia de “RAZOÁVEL” a “PÉSSIMO”.

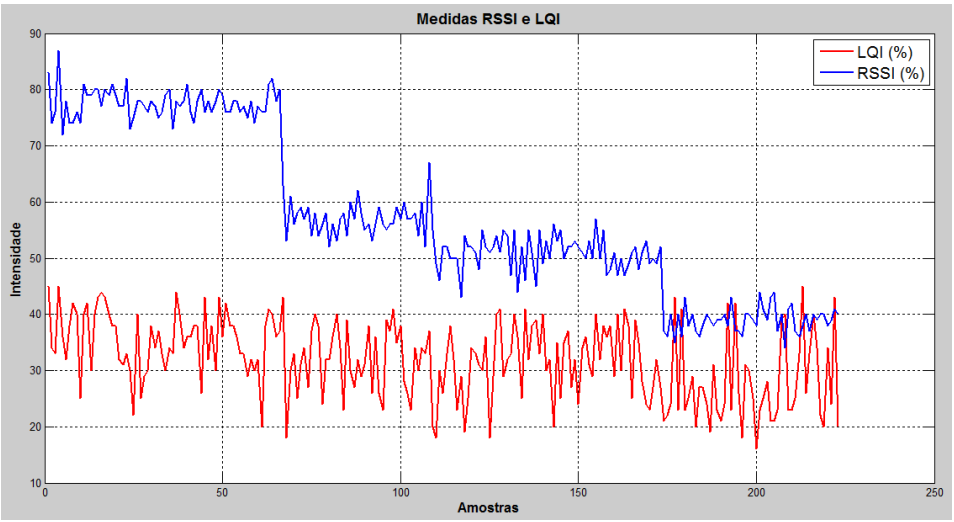


Figura 80 - Métricas *RSSI* e *LQI* para A=>B, 115,2 kbps com interferência.

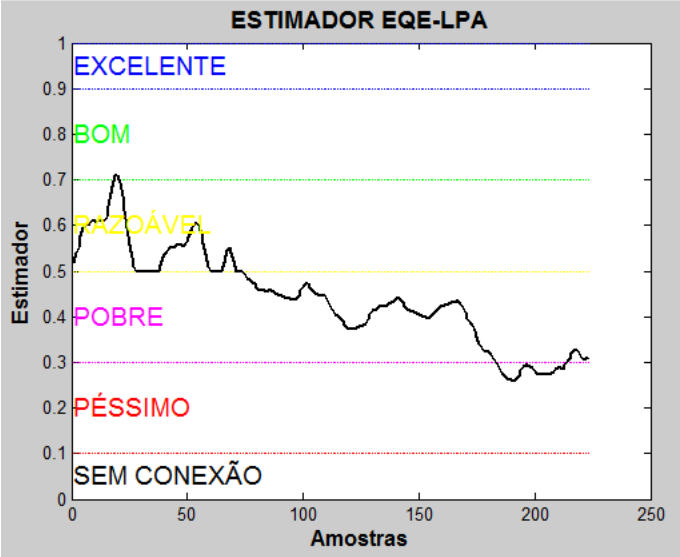


Figura 81 - EQE-LPA para ensaios de A=>B, 115,2 kbps com interferência.

As medidas reunidas dos ensaios do enlace B=>A, 115,2kbps, sem ruído são apresentadas na Figura 82. Apesar da performance dos transceptores estar fora do escopo desta dissertação, pode-se perceber ao comparar as Figuras 78 e 82 que de A=>B a métrica *RSSI* é mais estável do que de B=>A. Graças ao Filtro LPA2v, conforme Figura 83, a resposta do EQE-LPA é suavizada, podendo-se perceber claramente o estado do enlace como “EXCELENTE”, “BOM” e ‘RAZOÁVEL”, em função da variação da distância entre os dispositivos local e remoto.

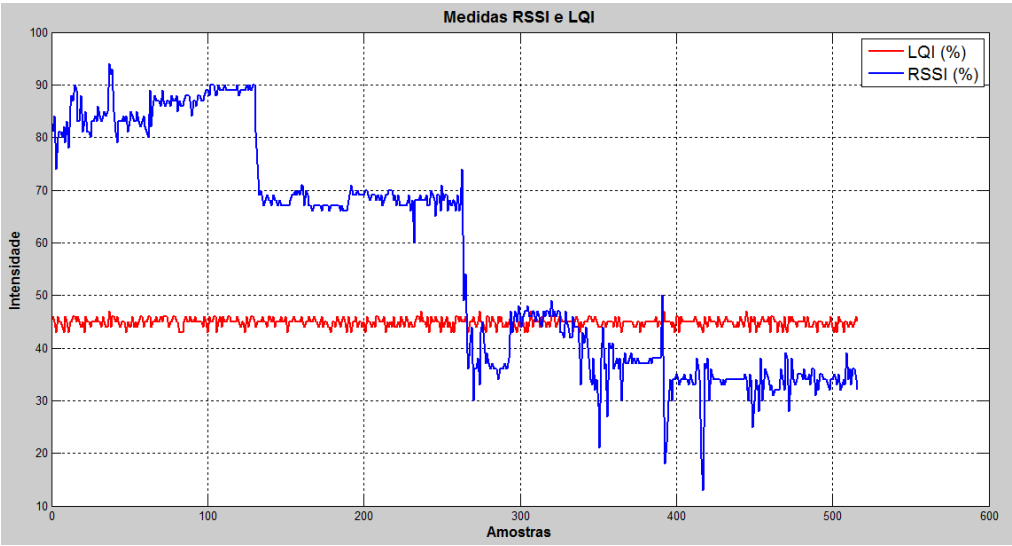


Figura 82 - Métricas *RSSI* e *LQI* para B=>A, 115,2 kbps sem interferência.

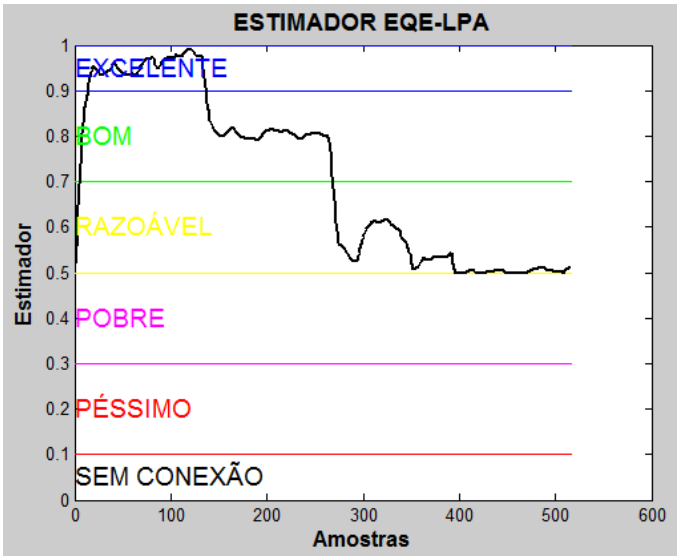


Figura 83 - EQE-LPA para ensaios de B=>A, 115,2 kbps sem interferência.

As medições dos ensaios do enlace B=>A, com interface serial em 115,2 kbps e interferência presente estão reunidas na Figura 84. Comparando-se a Figuras 83, sem interferência, com a Figura 85, com interferência, nota-se uma flutuação maior no indicador EQE-LPA, com maior degradação do enlace, chegando por poucas amostras a atingir o valor “PÉSSIMO” e apresentando resultado “POBRE” durante grande parte das amostras de maior distância.

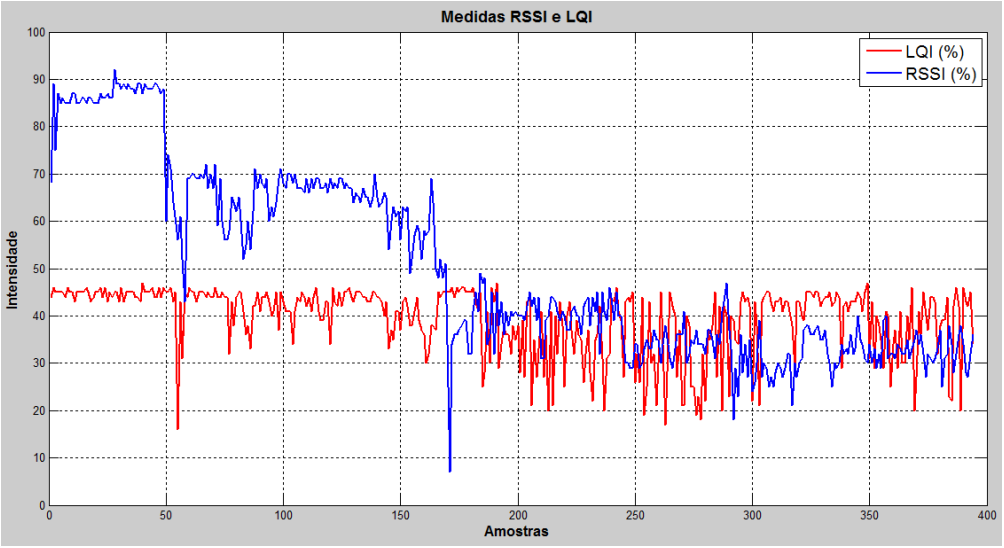


Figura 84 - Métricas *RSSI* e *LQI* para B=>A, 115,2 kbps com interferência.

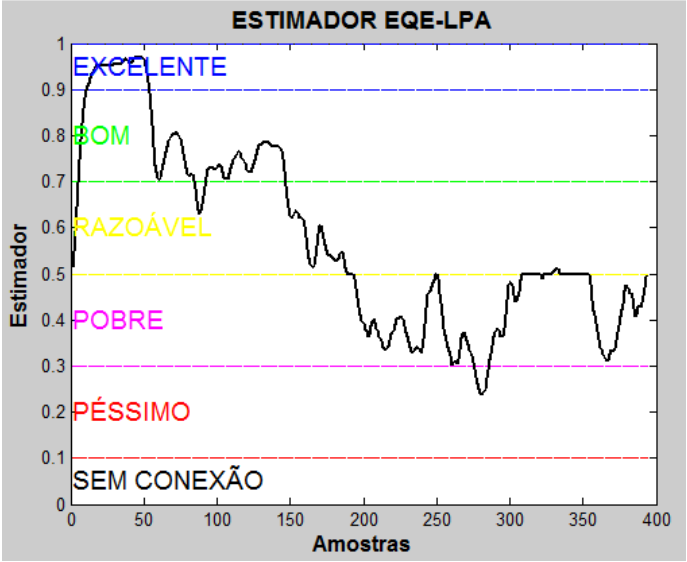


Figura 85 - EQE-LPA para ensaios de B=>A, 115,2 kbps com interferência.

4.1.1 DISCUSSÃO SOBRE ENSAIOS EQE-LPA

Os ensaios com dispositivo local e remoto distantes 6 metros entre si com e sem fonte de interferência a meia distância, não apresentaram resultados significativos para fins de avaliação do estimador de qualidade do enlace EQE-LPA, sendo considerado desnecessário o seu registro nesta dissertação.

Como as medições de *LQI* e *RSSI* são por pacote recebido, elas somente podem ser obtidas quando há conexão. Os transceptores utilizados durante estes ensaios somente registram um LOG quando em modo de configuração. Quando há perda de pacotes por um período que excede o tempo programado (*time out*) no *firmware* dos transceptores, os mesmos param de registrar e saem fora do modo de configuração. Por esta razão, nenhum dos ensaios realizados apresentou o EQE-LPA como “SEM CONEXÃO”, pois nesse caso não haveria registro LOG.

As normalizações utilizadas deveriam possibilitar a indicação de “SEM CONEXÃO” para medidas de *RSSI* e *LQI* que resultem em G_{CR} menor que -0,801, conforme previsto pela Tabela 6. Por exemplo, *RSSI* em 15% e *LQI* em 30%, resultando G_{CR} de -0,823 e μ_{ER} de 0,099 na saída da cNAPp. Essas medidas precisariam acontecer repetidamente durante um certo número de iterações, devido a atuação dos Filtros LPA2v, o que não ocorreu em nenhum dos ensaios realizados de forma estruturada. Como os ensaios aconteceram em ambiente de campo, não em ambiente controlado, como uma cabine blindada e geradores e atenuadores com

ajustes de potência e/ou atenuação, torna-se muito difícil encontrar o ponto certo para a realização das métricas.

Após várias tentativas, em ambiente com várias obstruções (perdas de paredes de tijolos e lajes), variações de distâncias da fonte de interferência e desalinhamento das antenas, foi possível obter medidas de *RSSI* e *LQI* que permitissem verificar se o EQE-LPA indica a classificação “SEM CONEXÃO”, ainda que de fato houvesse uma conexão extremamente frágil. A Figura 85 apresenta uma parte do arquivo LOG com as métricas de *RSSI* e *LQI* para esta situação. A Figura 87 apresenta o gráfico de *RSSI* e *LQI*, onde é possível perceber que ambas as métricas *RSSI* e *LQI* apresentam bastante variações. A Figura 88 apresenta os *valores de RSSI* e *LQI* após a atuação dos Filtros LPA2v e o indicador EQE-LPA. Já a Figura 89 apresenta o gráfico do EQE-LPA com a máscara de classificação, onde durante um breve intervalo, em torno da amostra 200, pode-se perceber que ele indica “SEM CONEXÃO”, como planejado. Comparando-se as Figuras 87 e 88 fica evidenciado a necessidade de filtragem das métricas *RSSI* e *LQI* para uma utilização prática como é a indicação da qualidade do enlace.

Através de todos os ensaios de *RSSI* e *LQI* foi possível ainda perceber que há diferença de resultados quando interface serial está em 9,6 kbps ou 115,2 kbps e também quando o enlace avaliado é de A=>B ou de B=>A. Apesar de interessante, as razões para essas diferenças não fazem parte do escopo desta dissertação.

```
LQI = 024% RSSI = 009%|||||||||
LQI = 024% RSSI = 011%||||||||||
LQI = 022% RSSI = 016%|||||||||||||||
LQI = 027% RSSI = 013%||||||||||||
LQI = 009% RSSI = 012%||||||||||||
LQI = 038% RSSI = 006%||||||
LQI = 024% RSSI = 011%||||||||||
LQI = 016% RSSI = 012%||||||||||||
LQI = 023% RSSI = 010%|||||||||
LQI = 028% RSSI = 012%||||||||||||
LQI = 025% RSSI = 009%|||||||||
LQI = 034% RSSI = 012%||||||||||||
LQI = 035% RSSI = 007%|||||||
LQI = 041% RSSI = 007%|||||||
LQI = 018% RSSI = 013%||||||||||||
LQI = 029% RSSI = 009%|||||||||
LQI = 016% RSSI = 012%||||||||||||
LQI = 027% RSSI = 009%|||||||||
LQI = 024% RSSI = 008%||||||||
```

Figura 86 - Ensaio 39, A=>B, 115,2 kbps, obstáculos, com interferência.

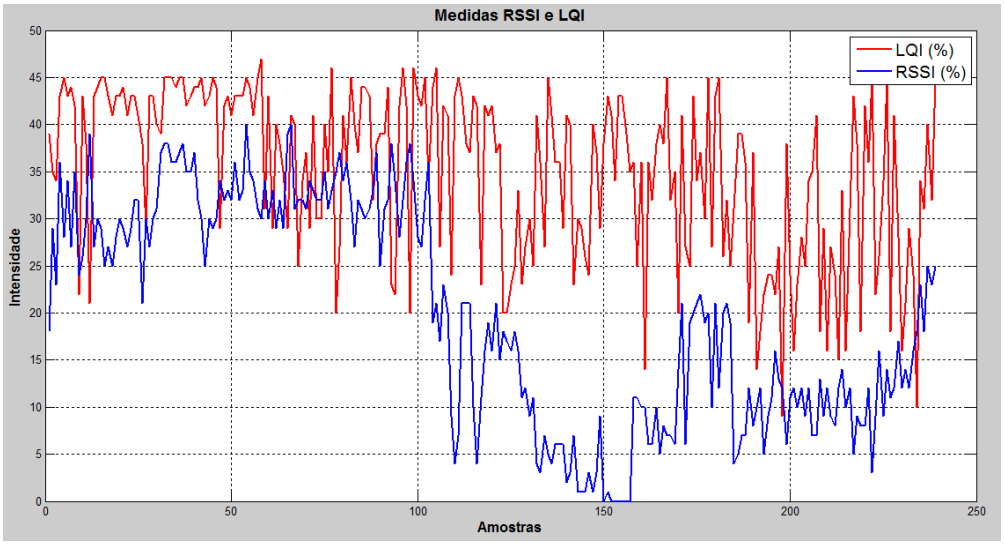


Figura 87 - Ensaio 39, *RSSI* e *LQI* para A=>B, 115,2 kbps com interferência.

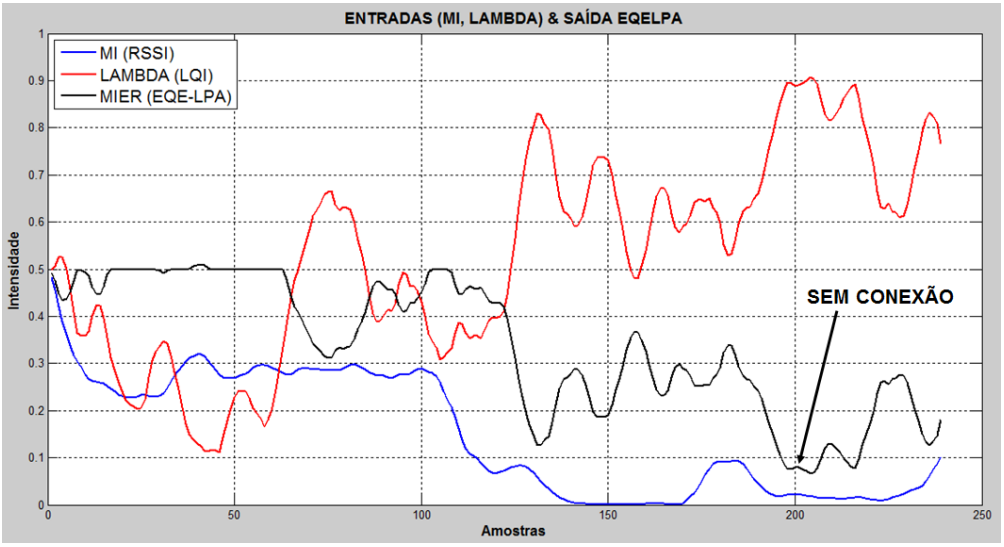


Figura 88 - Ensaio 39, métricas *RSSI* e *LQI* filtradas e EQE-LPA.

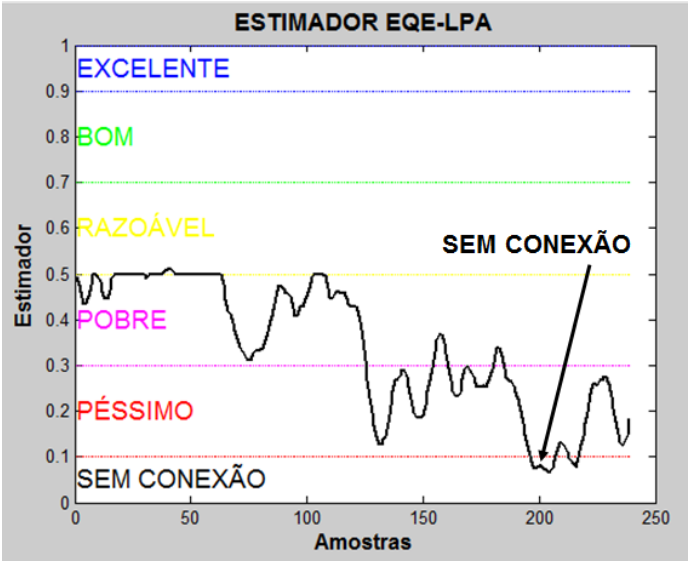
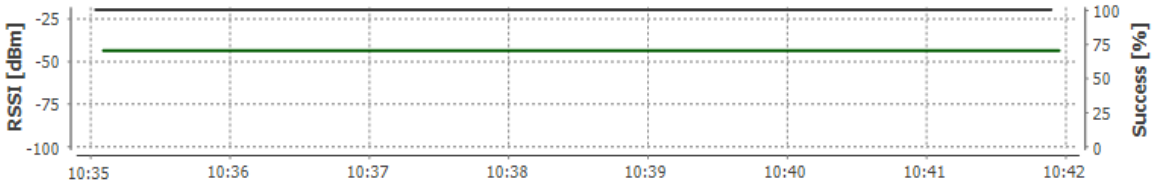


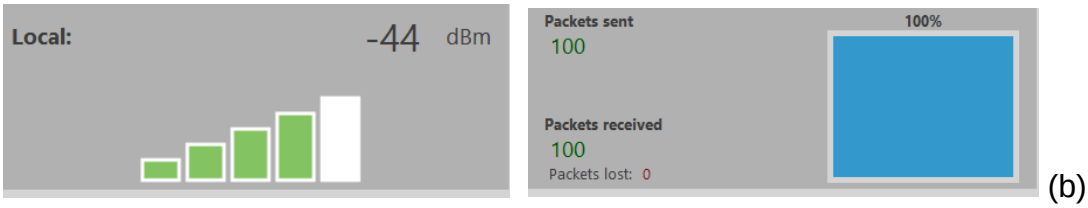
Figura 89 - EQE-LPA para ensaio 39, 115,2 kbps com interferência.

4.2 MEDIÇÕES RSSI/*PSR* E RESPOSTA EQE-LPA LB

39 ensaios de *Loopback* foram realizados. Todos em condição de espaço livre, sem obstruções, exceto o último. Cada ensaio foi anotado e os valores de *RSSI* e *PSR* foram introduzidos na tela do programa EQE-LPA LB e executados individualmente. A Figura 90 apresenta os resultados do primeiro ensaio pelo *software* X-CTU com *interface* serial configurada em 9,6 kbps, distância de 1 metro entre os transceptores, sem interferência. É possível constatar um sinal *RSSI* bastante estável.



(a)



(b)

Figura 90 - 1º Ensaio *Loopback*. Gráfico (a) e Valores *RSSI* e *PSR* (b).

A Figura 91 apresenta a tela do programa desenvolvido, com a introdução dos dados do primeiro ensaio e resultados (EQE-LPA$_{LB}$), que ainda fornece a resposta do EQE-LPA LB em forma de gráfico da LPA2v, conforme a Figura 92.

```
Command Window
ESTIMADOR DA QUALIDADE DO ENLACE LOGICA PARACONSISTENTE ANOTADA (EQE-LPA)

VERSÃO XBEE


Informe o RSSI mínimo (default = -90 dBm):

Informe o RSSI máximo (default = -40 dBm):

Informe o RSSI médio do Loopback Test (-X) em dBm: -44

Informe A Taxa de Sucesso (PSR) de Transmissão de Pacotes (%): 100

***** RESULTADOS *****

Grau de Certeza Real :  0.89
Intervalo de Certeza (PHI) : -0.92

Grau de Evidência Resultante Real :  0.94

****************

EQE-LPA : EXCELENTE

****************
Nova simulação? s ou n:
```

Figura 91 - 1º Ensaio *Loopback* com EQE-LPA LB.

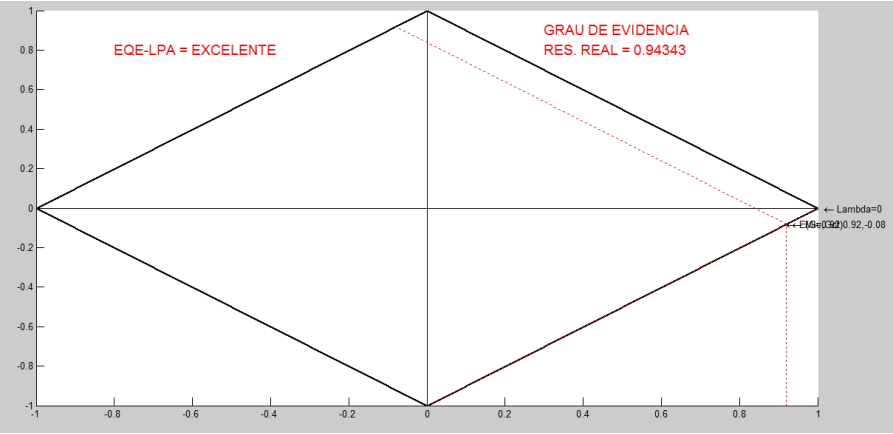


Figura 92 - 1º Ensaio *Loopback* com Gráfico do EQE-LPA LB.

A Figura 93 apresenta os resultados do ensaio 24 no *software* X-CTU, distância entre de 1 metro entre os dispositivos, taxa da *interface* a 115,2 kbps e interferente presente a 1,0 metro de distância do dispositivo remoto. Pode-se perceber que o sinal *RSSI* agora apresenta uma certa flutuação, de modo que o valor registrado pelo software X-CTU não necessariamente reflete a média, mas apenas o último valor obtido.

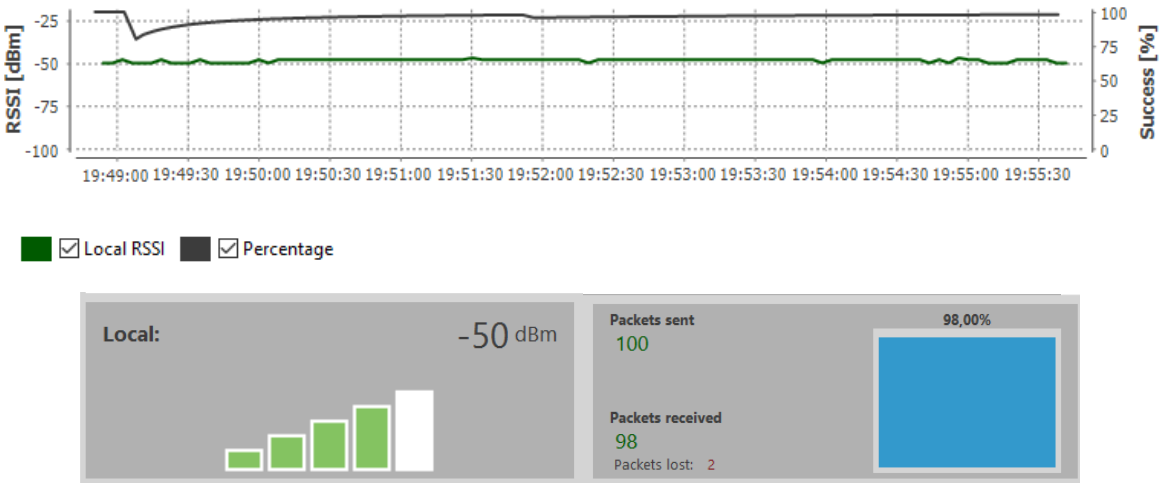


Figura 93 - 24º Ensaio *Loopback*. Gráfico (a) e Valores *RSSI* e *PSR* (b).

As Figuras 94 e 95, respectivamente, apresentam os resultados na ferramenta EQE-LPA LB na tela do MATLAB® e de forma gráfica. Neste ensaio o sinal de *RSSI* apresentou menor intensidade e a perda de pacotes (PER) chegou a 2% devido à interferência, o que provocou o grau de evidência resultante real (μ_{ER}) cair para 0,79811, alterando a classificação EQE-LPA$_{LB}$ do enlace para “BOM”.

```
Command Window
ESTIMADOR DA QUALIDADE DO ENLACE LOGICA PARACONSISTENTE ANOTADA (EQE-LPA)

VERSÃO XBEE


Informe o RSSI mínimo (default = -90 dBm):

Informe o RSSI máximo (default = -40 dBm):

Informe o RSSI médio do Loopback Test (-X) em dBm: -50

Informe A Taxa de Sucesso (PSR) de Transmissão de Pacotes (%): 98

***** RESULTADOS *****

Grau de Certeza Real :  0.60
Intervalo de Certeza (PHI) :  1.00

Grau de Evidência Resultante Real :  0.80

****************

EQE-LPA : BOM

****************
Nova simulação? s ou n:
```

Figura 94 - 24º Ensaio *Loopback* com EQE-LPA LB.

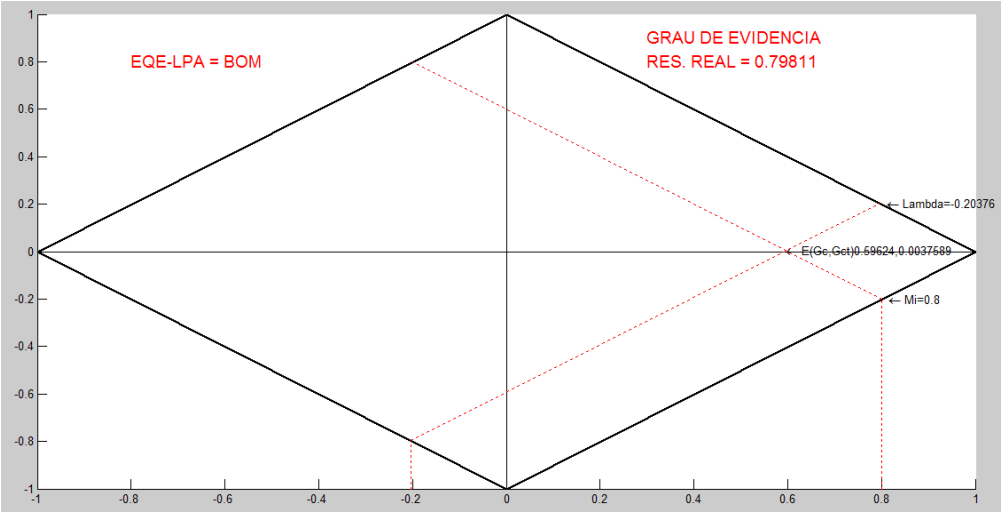


Figura 95 - 24º Ensaio *Loopback* com Gráfico do EQE-LPA LB

A Figura 96 apresenta os resultados do ensaio 30 no *software* X-CTU, distância de 5 metros entre os dispositivos, taxa da interface a 115,2 kbps e interferente presente a 1,5 metros de distância do transceptor remoto. Pelo gráfico percebe-se que o *RSSI* se mantém razoavelmente estável, porém o *PSR* cai drasticamente em função da interferência.

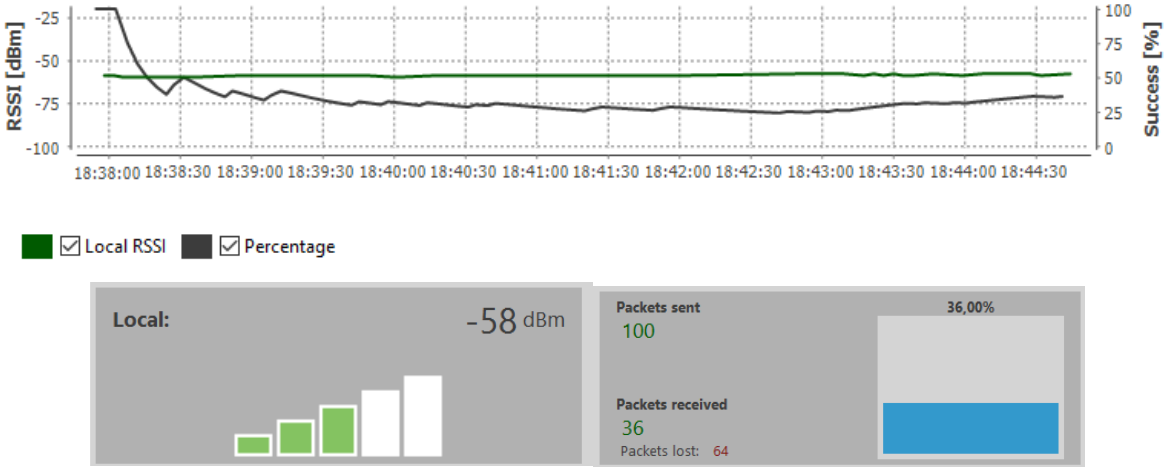


Figura 96 - 30º Ensaio *Loopback*. Gráfico (a) e Valores *RSSI* e *PSR* (b)

As Figuras 97 e 98, apresentam os resultados do ensaio 30 no EQE-LPA LB. Apesar de o *RSSI* com -58 dBm ser um sinal bom, a taxa de pacotes errados de 64% foi extremamente alta neste ensaio, derrubando o grau de evidência resultante real para 0,45255 e a correspondente classificação do EQE-LPA$_{LB}$ como “POBRE”.

```
Command Window
ESTIMADOR DA QUALIDADE DO ENLACE LOGICA PARACONSISTENTE ANOTADA (EQE-LPA)

VERSÃO XBEE


Informe o RSSI mínimo (default = -90 dBm): -90

Informe o RSSI máximo (default = -40 dBm): -40

Informe o RSSI médio do Loopback Test (-X) em dBm: -58

Informe A Taxa de Sucesso (PSR) de Transmissão de Pacotes (%): 36

***** RESULTADOS *****

Grau de Certeza Real : -0.09
Intervalo de Certeza (PHI) :  0.36

Grau de Evidência Resultante Real :  0.45

****************

EQE-LPA : POBRE

****************
Nova simulação? s ou n:
```

Figura 97 - 30º Ensaio *Loopback* com EQE-LPA LB.

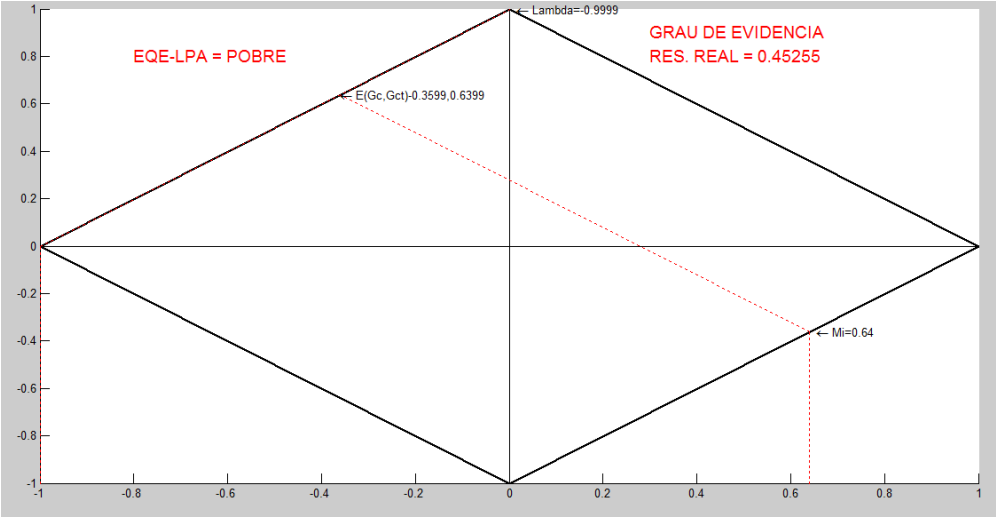


Figura 98 - 30º Ensaio *Loopback* com Gráfico do EQE-LPA LB.

Indicador *RSSI* muito baixo, próximo do limiar do transceptor, também provoca perda de pacotes, mesmo em ambiente sem interferência. O estimador EQE-LPA$_{LB}$ varia tanto por *PSR* como por *RSSI* baixo. Isso pode ser observado no 39° ensaio, que apesar de o *PSR* não ser tão baixo, devido ao *RSSI*, o indicador EQE-LPA$_{LB}$ da ferramenta EQE-LPA LB foi “PÉSSIMO”.

A Figura 99 apresenta os resultados obtidos no X-CTU, distância de 15 metros entre os transceptores, com obstruções, taxa da *interface* a 115,2 kbps e sem interferente presente. Apesar de ser um ambiente com obstruções, com efeito de propagação multipercurso, surpreendentemente o valor medido do *RSSI* se mostrou estável, ainda que em um nível muito baixo, de -88 dBm. Percebe-se pelo gráfico também que o *PSR* demorou quase metade do tempo (e dos pacotes) para se estabilizar no valor final de 94%. As Figuras 100 e 101 apresentam os resultados do ensaio 39 no EQE-LPA LB.

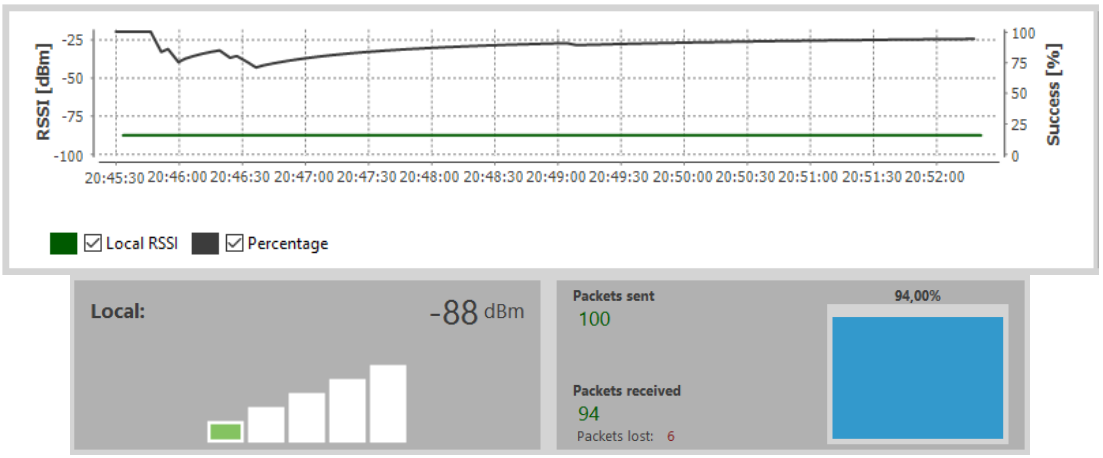


Figura 99 - 39º Ensaio *Loopback*. Gráfico (a) e Valores *RSSI* e *PSR* (b).

```
Command Window
ESTIMADOR DA QUALIDADE DO ENLACE LOGICA PARACONSISTENTE ANOTADA (EQE-LPA)

VERSÃO XBEE


Informe o RSSI mínimo (default = -90 dBm):

Informe o RSSI máximo (default = -40 dBm):

Informe o RSSI médio do Loopback Test (-X) em dBm: -88

Informe A Taxa de Sucesso (PSR) de Transmissão de Pacotes (%): 94

***** RESULTADOS *****

Grau de Certeza Real : -0.40
Intervalo de Certeza (PHI) : -0.62

Grau de Evidência Resultante Real :  0.30

****************

EQE-LPA : PÉSSIMO

****************
Nova simulação? s ou n:
```

Figura 100 - 39º Ensaio *Loopback* com EQE-LPA.

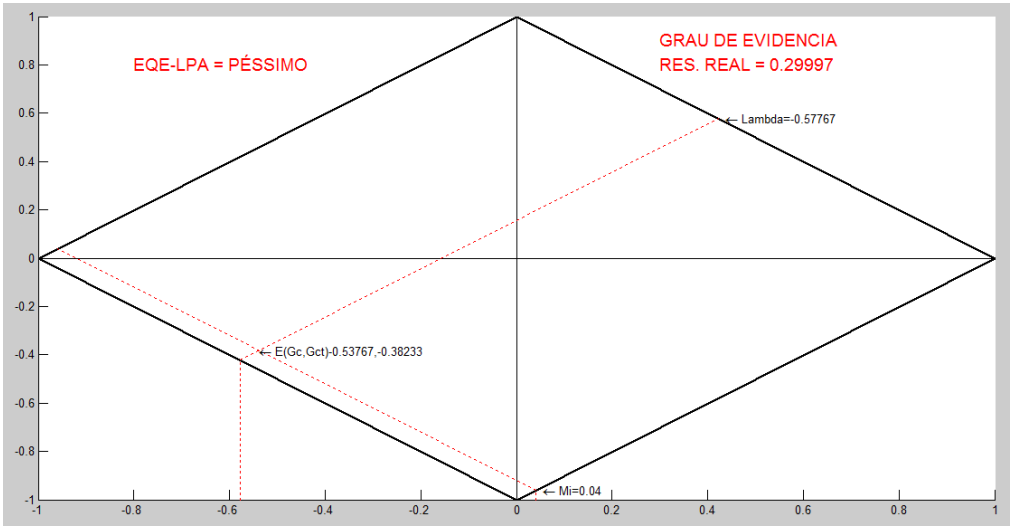


Figura 101 - 39º Ensaio *Loopback* com Gráfico do EQE-LPA.

Os resultados dos ensaios 1 a 19, com 9,6kbps na interface serial do computador estão resumidos na Tabela 11, enquanto que os ensaios 20 a 39, a 115,2 kbps na interface serial do computador são apresentados na Tabela 12.

Tabela 11 - Ensaios *Loopback* a 9,6 kbps e Resultados EQE-LPA LB.

ENSAIO	CENARIO			LOOPBACK			RESPOSTA	
	DISTANCIA (m)	ENLACE	INTERFERENTE	RSSI (dBm)	PSR (%)	PER (%)	GRAU DE EV. RES. REAL	EQE-LPA$_{LB}$
1	1	Livre	NÃO	-44	100	0	0,94343	EXCELENTE
2	1	Livre	NÃO	-44	100	0	0,94343	EXCELENTE
3	1	Livre	NÃO	-44	100	0	0,94343	EXCELENTE
4	1	Livre	SIM ; 1,0 m	-45	100	0	0,92929	EXCELENTE
5	1	Livre	SIM ; 1,0 m	-46	20	80	0,5	POBRE
6	1	Livre	SIM ; 1,0 m	-45	76	24	0,5	POBRE
7	5	Livre	NÃO	-56	100	0	0,77373	BOM
8	5	Livre	NÃO	-56	100	0	0,77373	BOM
9	5	Livre	NÃO	-56	100	0	0,77373	BOM
10	5	Livre	SIM ; 1,0 m	-59	62	38	0,43841	POBRE
11	5	Livre	SIM ; 1,0 m	-60	56	44	0,42426	POBRE
12	5	Livre	SIM ; 1,0 m	-61	11	89	0,41012	POBRE
13	10	Livre	NÃO	-67	100	0	0,61816	RAZOÁVEL
14	10	Livre	NÃO	-64	100	0	0,66059	RAZOÁVEL
15	10	Livre	NÃO	-65	100	0	0,64645	RAZOÁVEL
16	10	Livre	SIM ; 1,0 m	0	0	100	0,5	SEM CONEXÃO
17	10	Livre	SIM ; 2,0 m	-68	61	39	0,31113	POBRE
18	10	Livre	SIM ; 2,0 m	-68	57	43	0,31113	POBRE
19	10	Livre	SIM ; 2,0 m	-72	30	70	0,25456	PÉSSIMO

Tabela 12 - Ensaios *Loopback* a 115,2 kbps e Resultados EQE-LPA LB

ENSAIO	CENARIO			LOOPBACK			RESPOSTA	
	DISTANCIA	ENLACE	INTERFERENTE	RSSI (dBm)	PSR (%)	PER (%)	GRAU DE EV. RES. REAL	EQE-LPA$_{LB}$
20	1	Livre	NÃO	-44	100	0	0,94343	EXCELENTE
21	1	Livre	NÃO	-44	100	0	0,94343	EXCELENTE
22	1	Livre	NÃO	-44	100	0	0,94343	EXCELENTE
23	1	Livre	S ; 1,0 m	-48	94	6	0,57615	RAZOÁVEL
24	1	Livre	S ; 1,0 m	-50	98	2	0,79811	BOM
25	1	Livre	S ; 1,0 m	-50	93	7	0,52146	RAZOÁVEL
26	5	Livre	NÃO	-59	100	0	0,7313	BOM
27	5	Livre	NÃO	-60	100	0	0,71716	BOM
28	5	Livre	NÃO	-61	100	0	0,70302	BOM
29	5	Livre	S ; 1,0 m	0	0	100	0,5	SEM CONEXÃO
30	5	Livre	S ; 1,5m	-58	36	64	0,45255	POBRE
31	5	Livre	S ; 1,5m	-59	54	46	0,43841	POBRE
32	5	Livre	S ; 1,5m	-59	35	65	0,43841	POBRE
33	10	Livre	NÃO	-69	100	0	0,58988	RAZOÁVEL
34	10	Livre	NÃO	-68	100	0	0,60402	RAZOÁVEL
35	10	Livre	NÃO	-67	100	0	0,61816	RAZOÁVEL
36	10	Livre	S ; 2,0 m	-67	88	12	0,33815	POBRE
37	10	Livre	S ; 2,0 m	-66	96	4	0,53214	RAZOÁVEL
38	10	Livre	S ; 2,0 m	-69	93	7	0,38816	POBRE
39	15	Parede	NÃO	-88	94	6	0,29997	PÉSSIMO

4.2.1 DISCUSSÃO SOBRE ENSAIOS EQE-LPA LB

Quando a interferência é muito forte, fazendo com que haja uma saturação no receptor do dispositivo, 100% dos pacotes são perdidos, conforme os ensaios 16 e 29, nas tabelas 11 e 12. Nesses casos o *software* X-CTU apresenta “0 dBm” e uma interrogação. Ao introduzir *RSSI* e *PSR* nulos, o programa desenvolvido EQE-LPA LB computa como *RSSI* e *PSR* mínimos devido à normalização, classificando o valor do grau de evidência favorável (μ) como zero e grau de evidência desfavorável (λ) máximo. Como resposta, o algoritmo LPA apresentará um μ_{ER} de 0,5 o que categorizará o enlace como “POBRE”, mas com algum nível de conexão. Como 100% dos pacotes falharam, para evitar essa discrepância, foi introduzida uma regra no código do programa para que caso o *PSR* seja de 0%, apesar de o μ_{ER} continuar sendo apresentado como 0,5 em consistência com a LPA, o programa do EQE-LPA LB apresentará o indicador EQE-LPA$_{LB}$ como “SEM CONEXÃO”.

Como o procedimento do ensaio é de *Loopback*, os pacotes são enviados do dispositivo local para o remoto e do remoto para o local, sendo medidos apenas ao final do processo, no retorno ao transceptor local. Assim, não há como saber qual dispositivo está sofrendo interferência, se o local ou remoto. Como em todos os ensaios com interferência a fonte estava mais próxima do dispositivo remoto, presume-se que seja este o afetado. Esta é uma limitação do procedimento de *Loopback*.

Um detalhe interessante observado durante os ensaios é que há diferenças de *performance* ao se comparar os ensaios realizados com transmissão pela *interface* serial de 9,6 kbps e 115,2 kbps, conforme apresentado nas tabelas 8 e 9. Estas discrepâncias podem ocorrer por diferentes razões, como por exemplo, de *performance* do adaptador USB ou do transceptor utilizado. Uma investigação desses resultados, apesar de importante, está fora do escopo desta dissertação.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS

A seguir são apresentadas as considerações finais sobre a pesquisa desenvolvida para compor esta dissertação, e sugestões de trabalhos futuros.

5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O principal objetivo desta pesquisa foi alcançado e um Estimador da Qualidade do Enlace utilizando uma Rede Neural Artificial Paraconsistente foi desenvolvido, chamado de EQE-LPA, e testado com as métricas *RSSI* e *LQI* disponíveis conforme o padrão IEEE 802.15.4 e coletadas em uma série de ensaios com transceptores de uso comercial. Para dispositivos que não disponibilizam a métrica *LQI*, um estimador alternativo, chamado de EQE-LPA LB também foi desenvolvido e testado, para ser empregado com teste de *Loopback* e métricas *RSSI* e *PSR* em substituição à *LQI*.

O objetivo geral de desenvolver um filtro de média utilizando células neurais artificiais paraconsistentes também foi alcançado e uma aplicação prática com Filtro LPA2v foi elaborada, ao transformar os valores instantâneos de *RSSI* e *LQI* contaminados por ruído e imprecisões em métricas estáveis, permitindo a avaliação da qualidade do enlace pelo Nó de Análise Paraconsistente LPA2v da cNAPp.

As regras de normalização do *RSSI* e *LQI*, bem como a faixa de valores para classificação do enlace pelo EQE-LPA foram estabelecidos baseados em experiência pessoal e nos resultados alcançados durante os ensaios com os dispositivos utilizados. Essas regras podem sofrer alteração em função das características dos transceptores utilizados ou critérios de projeto. Assim sendo, podem ser alteradas no caso de o EQE-LPA ser incorporado a uma solução comercial ou projeto de rede de sensores industriais sem fio.

Por utilizar métricas disponíveis a cada pacote recebido, o EQE-LPA traz a vantagem de poder ser implementado em tempo real, por direção de enlace. Assim sendo, ele pode ser incorporado a um sistema de gerenciamento de rede de sensores sem fio como indicador em tempo real da condição do enlace. Além disso, o valor numérico do EQE-LPA (μ_{ER}) pode ser utilizado pelas aplicações acima do IEEE 802.15.4 para fins de roteamento de redes *mesh* de sensores sem fio, cálculo de estimativa de consumo de energia, entre outras aplicações.

O código do EQE-LPA foi concebido de forma modular, de modo que alterações podem ser realizadas sem se alterar o algoritmo principal. Assim sendo, alterações na

forma de coletar as métricas *RSSI* e *LQI* podem ser realizadas bastando-se alterar a sub-rotina “EQE-LPA de Leitura *RSSI* & *LQI*”. Da mesma forma, diferentes critérios de normalização podem ser implementados no SIMULINK alterando-se os parâmetros dos blocos de função “Normalizador 1 – *RSSI*” e “Normalizador 2 – *LQI*”.

O EQE-LPA LB, necessita de apenas 1 valor de *RSSI* e *PSR* para avaliar o estado do enlace, podendo ser incorporado facilmente nos *softwares* dos fabricantes comerciais de dispositivos para redes de sensores sem fio. Ele permite ainda um indicador confiável, simples e de fácil compreensão, mesmo para usuários de RSSF sem experiência com radiofrequência. Entretanto, requer a interrupção do serviço e ativação do circuito em laço fechado. A conexão de *Loopback* pode não ser ativada remotamente, exigindo a comutação do *hardware* manualmente. Além disso, nos ensaios realizados, com atraso mínimo de 4 segundos a cada pacote, cada procedimento de teste de *Loopback* com 100 pacotes transmitidos consome cerca de 7 minutos. Esse tempo pode ser demasiado para uma interrupção de monitoramento ou processo, comprometendo a sua aplicação prática em muitas situações.

Finalmente, o desenvolvimento do EQE-LPA e do EQE-LPA LB, apontam para um futuro promissor para as Lógicas não clássicas em aplicações na área de Redes de Sensores Sem Fio, seja para aplicações Industriais ou para a *Internet* das Coisas.

5.2 TRABALHOS FUTUROS

O EQE-LPA apresentou bons resultados nos ensaios realizados, porém vários desenvolvimentos podem ser feitos, conforme destacados abaixo:

a. Melhorar a *interface* gráfica para apresentação EQE-LPA;
b. Criar diferentes *interfaces*, ou “plug in”, para permitir coletar os valores de *RSSI* e *LQI* em tempo real, de dispositivos sem fio de diferentes modelos e fabricantes;
c. Verificar o desempenho do EQE-LPA e diferentes ajustes do Filtro LPA2v em ambientes não controlados;
d. Simular o EQE-LPA como critério para algoritmos de roteamento em redes *mesh*.

Novas perspectivas podem ser exploradas para o Filtro LPA2v, tais como:

e. Estimador de distância do enlace;
f. Sistema de localização e posicionamento de sensores sem fio;
g. Outras aplicações que envolvam filtros de média.

REFERÊNCIAS

AKYLDIZ, I. F.; SU, W.; SANKARASUBRAMANIAM, Y.; et al. **Wireless sensor networks: a survey**. Computer Networks, v.38, n. 4, pp. 393-422, 2002.

ANATEL. **REGULAMENTO SOBRE EQUIPAMENTOS DE RADIOCOMUNICAÇÃO DE RADIAÇÃO RESTRITA**. ANEXO À RESOLUÇÃO Nº 506, DE 1º DE JULHO DE 2008. Disponível em: http://www.anatel.gov.br/legislacao/resolucoes/2008/104-resolucao-506, acesso em 20 fev. 2017.

ASHTON, K. **That 'Internet of Things' Thing**. RFID Journal, 2009. Disponível em: http://www.rfidjournal.com/articles/view?4986, acesso em 20 fev.2017.

BACCOUR, N.; KOUBÂA, A.; YOUSSEF, H. et al. **A Fuzzy Link Quality Estimator for Wireless Sensor Networks**. In Proceedings of the 7th European Conference on Wireless Sensor Networks, pp. 240-255, 2010.

CRUZ, C. M. **APLICAÇÃO DA REDE NEURAL ARTIFICIAL PARACONSISTENTE EM CONTROLE ESTATÍSTICO DE PROCESSO**. UNISANTA, 2015. 76 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Santa Cecília, São Paulo, 2015.

DA COSTA, N. C. A. **A lógica da liberdade**. Entrevista, Folha de S. Paulo, Nov. de 1997. Disponível em http://almanaque.folha.uol.com.br/entrevista_filosofia_newton_da_costa.htm. Acesso em 10 mar. 2016.

DA COSTA, N. C. A.; ABE, J. M.; MUROLO, A. C. et al. **Lógica Paraconsistente Aplicada**. São Paulo: Atlas, 1999, ISBN 8524422184.

DA COSTA, N. C. A.; ABE, J. M.; SUBRAHMANIAN, V. S. **Remarks on annotated logic, Zeitschrift f. math**. Logik und Grundlagen d. Math. 37,Vol.37, pp. 561-570, 1991.

DA SILVA FILHO, J. I. **Introdução as Células Neurais Artificiais Paraconsistentes**. Revista Seleção Documental, n. 8, Dez, 2007.

DA SILVA FILHO, J. I. **Lógica Paraconsistente e Probabilidade Pragmática no Tratamento de Incertezas**. Revista Seleção Documental, n. 9, a.3, p.16-27, 2008.

DA SILVA FILHO, J. I. **Métodos De Aplicações da Lógica Paraconsistente Anotada com anotação com dois valores (LPA2v) com construção de algoritmo e implementação de circuitos eletrônicos**. USP, 1999. 226 p. Tese (Doutorado) - Departamento de Engenharia de Computação e Sistemas Digitais, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1999.

DA SILVA FILHO, J. I. **Métodos de Aplicações da Lógica Paraconsistente Anotada de anotação com dois valores-LPA2v**. Revista Seleção Documental, n. 1, pp. 18-25, Ed. Paralogike, Brasil, Março, 2006.

DA SILVA FILHO, J. I. **Treatment of Uncertainties with Algorithms of the Paraconsistent Annotated Logic**. Journal of Intelligent Learning Systems and Applications, v. 4, pp. 144-153, May, 2012.

DA SILVA FILHO, J. I., CRUZ, C. M., ROCCO, A. et al. **Paraconsistent Artificial Neural Network for structuring Statistical Process Control in Electrical Engineering.** Towards Paraconsistent Engineering Book, Springer International Publishing, pp. 77-102, 2016.

DA SILVA FILHO, J. I.; ABE, J. M. **Fundamentos das redes neurais artificiais paraconsistentes - Destacando Aplicações em Neurocomputação**. São Paulo: Editora Arte & Ciência, 2001, 291 p.

DA SILVA FILHO, J. I.; ABE, J. M.; LAMBERT-TORRES, G. **Inteligência Artificial com as Redes de Análises Paraconsistentes**. 1a. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008, 328 p.

DHILLON, P.; SADAWARTI, H. **A Review Paper on ZigBee (IEEE 802.15.4) Standard**. International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), V. 3, Issue 4, 2014.

DIGI DOCUMENTATION. **Perform a Range Test**. Disponível em https://www.digi.com/resources/documentation/digidocs/90001526/tasks/t_perform_a_range_test.htm, acesso em 08 mar. 2017.

FREESCALE SEMICONDUCTOR. **MC13211/212/213 ZigBee™- Compliant Platform - 2.4 GHz Low Power Transceiver for the IEEE® 802.15.4 Standard plus Microcontroller**. 2009. Disponível em http://www.nxp.com/assets/documents/data/en/data-sheets/MC1321x.pdf, acesso em 08 mar. 2017.

GREENPEAK, N. V. D. **Standards Will Fuel the Spread of Wireless Network Technologies**. RTC Magazine. Feb, 2008. Disponível em: http://rtcmagazine.com/articles/view/100932, acesso em 28 mar. 2017.

GUNGOR, V. C.; HANCKE, G. P. **Industrial Wireless Sensor Networks: Challenges, Design Principles, and Technical Approaches**. IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, v. 56, n. 10, 2009.

HUI, J.; CULLER, D. **6LoWPAN: Incorporating IEEE 802.15.4 into the IP architecture**. Internet protocol for Smart Objects (IPSO) Alliance, White Paper n. 3, 2009.

JAYASRI, T.; HEMALATHA, M. **Link Quality Estimation using Soft Computing Technique**. Middle-East Journal of Scientific Research, 21 (1), pp. 158-168, 2014.

KRAUSE, D. **Lógica Paraconsistente**. Scientific American Brasil, pp. 69-77, Novembro 2004.

MARIO, M. C., FERRARA, L. F. P., DA SILVA FILHO, J. I. **Treinamento de uma Célula Neural Artificial Paraconsistente de Aprendizagem**. Revista Seleção Documental, n. 6, pp. 11-16, São Paulo, Brasil, 2007.

MAXSTREAM. **XBee™/XBee-PRO™ OEM RF Modules - Product Manual v1.xAx - 802.15.4 Protocol** ,USA, 2007. Disponível em https://www.sparkfun.com/datasheets/Wireless/ZigBee/XBee-Manual.pdf, acesso em 08 mar. 2017.

MICROCHIP. **MRF24J40 Data Sheet - IEEE 802.15.4™ 2.4 GHz RF Transceiver**. 2006. Disponível em http://www.microchip.com/wwwproducts/en/en027752, acesso em 13 dez. 2016.

MINICZ, M. F., MATUCK, G. R., TASINAFFO, P. M. et al. **Célula Neural Artificial Paraconsistente de Aprendizagem por Extração do Efeito da Contradição**. Revista Seleção Documental, n. 33, São Paulo, Brasil. 2014.

NATIONAL INSTRUMENTS™. **OQPSK TUTORIAL**. 2007. Disponível em: http://www.ni.com/tutorial/5487/en/, acesso em 28 mar. 2017.

ROHDE & SCHWARTZ. **LR-WPAN – ZigBee, Thread, 6LoWPAN, WirelessHART, ISA100 device testing**. Disponível em: https://www.rohde-schwarz.com/us/solutions/wireless-communications/lr-wpan/ZigBee/lr-wpan-ZigBee_230610.html, acesso em 23 mar. 2017.

SEXTON, D.; MAHONEY, M.; LAPINSKI, M. et al. **Radio Quality in Industrial Wireless Sensor Networks**. Sensors for Industry Conference, Houston TX USA, 8 February 2005.

SHELLHAMMER, S. **IEEE 802.19 wireless coexistence TAG**. Montreal: IEEE, 2004. Disponível em: http://www.ieee802.org/19/, acesso em 20 fev. 2017.

SILVA, I.; LOPES, D.; DUARTE, A. et al. **TECNOLOGIAS EMERGENTES PARA REDES INDUSTRIAIS SEM FIO: WIRELESSHART VS ISA100.11a**. Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis - IBP, 2013.

SRIKANTH, K., VALLIKANNU, A. L. and MOHAN, P. **An Experimental Joint Modelling of *RSSI* and *LQI* to Reduce Energy Consumption in MANETs**. International Journal of Science and Research (IJSR), v. 3, I. 3, 2014.

SRINIVASAN, K., LEVIS, P. ***RSSI* is Under Appreciated**. In Proc. of the 3rd In. Workshop on Embedded Networked Sensors (EmNets'06), 2006.

SUBRAHMANIAN, V. S. **On the semantics of quantitative logic programs**. Proc. 4th. IEEE Symposium on Logic Programming, Computer Society Press, Washington D.C., pp. 173-182, 1987.

TRUST. **WIRELESS OBSERVATION SYSTEM 100M**. Disponível em: http://www.trust.com/pt/product/12429-wireless-observation-system-100m, acesso em 30 mar. 2017.

ZACHARIAS, S., NEWE, T.; O´KEEFFE, S. et al. **Identifying Sources of Interference in *RSSI* Traces of a Single IEEE 802.15.4 Channel**. The Eighth International Conference on Wireless and Mobile Communications - ICWMC, 2012.

WAGNER, R. S.; BARTON, R. J. **Performance Comparison of Wireless Sensor Network Standard Protocols in an Aerospace Environment: ISA100.11a and ZigBee Pro**. Conference Paper, IEEE Aerospace Conference Proceedings, March 2012.

WEISS, J.; YU, R. **Wireless Sensor Networking for the Industrial Internet of Things**. Dust Networks Product Group, Linear Technology, 2015. Disponível em: http://cds.linear.com/docs/en/article/DN15_EN-Wireless.pdf, acesso em 17 jun. 2016.

WERB, J. **ISA100 Wireless Applications, Technology, and Systems - A Tutorial White Paper**. ASCI - Automation Standards Compliance Institute, 2014.

WETTERGREN, A. **ZigBee in Industry**. Bachelor Thesis Performed in Computer Engineering, Institute of Technology, Linköping University, Sweden, 2007.

APENDICE A - CÓDIGO EQE-LPA EM MATLAB®

PROGRAMA PRINCIPAL EQE-LPA

```
% EQE-LPA
% Estimador da Qualidade do Enlace com Logica Paraconsistente Anotada
% Autor: Arnaldo de Carvalho Junior
% Março/2017
%Lê Medidas RSSI e LQI
%=====================================
%Instruções: Salvar arquivo txt com medidas RSSI e LQI como medidas.txt
%guardar arquivo medidas.txt na mesma pasta do programa EQE-LPA do MATLAB
%Executar programa Estimador_EQE_LPA
clc;clear;
medidas = importdata('medidas.txt'); %Arquivo de medidas em formato .txt
size=size(medidas,1);
StopTime=size;
StartTime=1;
EQE_LPA_LE_RSSI_LQI
%Abre e executa Simulink Model EQE_LPA
%=====================================
[t,x,y] = sim('EQE_LPA',[StartTime StopTime]);
a=0;
  EQE=zeros(StopTime,6);
for x=1:StopTime;
   a=a+1;
   if EQELPA.signals.values(a,1)>0.9
      EQE(a,1)=1;
   elseif EQELPA.signals.values(a,1)>0.7 && EQELPA.signals.values(a,1)<=0.9
      EQE(a,2)=1;
   elseif EQELPA.signals.values(a,1)>0.5 && EQELPA.signals.values(a,1)<=0.7
      EQE(a,3)=1;
   elseif EQELPA.signals.values(a,1)>0.3 && EQELPA.signals.values(a,1)<=0.5
      EQE(a,4)=1;
   elseif EQELPA.signals.values(a,1)>0.1 && EQELPA.signals.values(a,1)<=0.3
      EQE(a,5)=1;
   else
      EQE(a,6)=1;
   end
end
EQE_LPA_GERA_GRAFICOS
clear;clc;
disp('ESTIMADOR DA QUALIDADE DO ENLACE LOGICA PARACONSISTENTE ANOTADA (EQE-
LPA)');
disp('   ');
disp('ANÁLISE COMPLETADA');
disp('   ');
disp('VERIFIQUE OS RESULTADOS NOS GRÁFICOS');
```

SUB-ROTINA EQE-LPA DE LEITURA *RSSI* E *LQI*

```
%Converte Arquivo medidas.txt em Matrizes LQI e RSSI
%=====================================
b=regexp(medidas,'\d+?(\d+)?','match');
for x=1:StopTime;
   med(x,:)=b{x,1};
end
LQIm=med(:,1);
RSSIm=med(:,2);
LQIm=base2dec(LQIm,10);
RSSIm=base2dec(RSSIm,10);
```

```
a=0;
for x=1:StopTime;
   a=a+1;
   LQIm(x,2)=a;
   RSSIm(x,2)=a;
end
LQI=[LQIm(:,2),LQIm(:,1)]; % Variável entrada LQI para EQE-LPA
RSSI=[RSSIm(:,2),RSSIm(:,1)]; %Variável entrada RSSI para EQE-LPA
```

SUB-ROTINA EQE-LPA PARA GERAÇÃO DE GRÁFICOS

```
% Gerador de Gráficos do EQE-LPA
% Autor: Arnaldo de Carvalho Junior
% Março/2017
%================================================
plot(LQI(:,1),LQI(:,2),'r-',RSSI(:,1),RSSI(:,2),'b-','LineWidth',2); %Plot RSSI e LQI
xlabel ('Amostras','FontSize',12,'FontWeight','bold','Color','k');
ylabel ('Intensidade','FontSize',12,'FontWeight','bold','Color','k');
title ('Medidas RSSI e LQI','FontSize',14,'FontWeight','bold','Color','k');
LEG1=legend ('LQI (%)','RSSI (%)',4);
set(LEG1,'FontSize',14);
grid on;
figure
plot(RSSIm(:,2),MIRSSI.signals.values(:,1),'b-',RSSIm(:,2),LBDALQI.signals.values(:,1),'r-
',RSSIm(:,2),EQELPA.signals.values(:,1),'k-','LineWidth',2); %Plot MI, LAMBDA,EQELPA
xlabel ('Amostras','FontSize',12,'FontWeight','bold','Color','k');
ylabel ('Intensidade','FontSize',12,'FontWeight','bold','Color','k');
title ('ENTRADAS (MI, LAMBDA) & SAÍDA EQELPA','FontSize',14,'FontWeight','bold','Color','k');
LEG1=legend ('MI (RSSI)','LAMBDA (LQI)','MIER (EQE-LPA)',4);
set(LEG1,'FontSize',14);
grid on;
figure
REF1=1.0;
REF2=0.9;
REF3=0.7;
REF4=0.5;
REF5=0.3;
REF6=0.1;
REF7=0;
plot(t,REF1,'b-',t,REF2,'g-',t,REF3,'y-',t,REF4,'m-',t,REF5,'r-',t,REF6,'k-',t,REF7,'k-
',t,EQELPA.signals.values(:,1),'k','LineWidth',2);
xlabel ('Amostras','FontSize',12,'FontWeight','bold','Color','k');
ylabel ('Estimador','FontSize',12,'FontWeight','bold','Color','k');
title ('ESTIMADOR EQE-LPA','FontSize',14,'FontWeight','bold','Color','k');
text(1,0.95,'EXCELENTE','Color','blue','FontSize',14);
text(1,0.8,'BOM','Color','green','FontSize',14);
text(1,0.6,'RAZOÁVEL','Color','yellow','FontSize',14);
text(1,0.4,'POBRE','Color','magenta','FontSize',14);
text(1,0.2,'PÉSSIMO','Color','red','FontSize',14);
text(1,0.05,'SEM CONEXÃO','Color','black','FontSize',14);
```

BLOCO FUNCIONAL NORMALIZADOR 1 - *RSSI*

```
% NORMALIZADOR 1 - RSSI
% AUTOR: ARNALDO DE CARVALHO JUNIOR - MARÇO 2017
function y = fcn(u)
% This block supports the Embedded MATLAB subset.
% See the help menu for details.

y =(u/100-0.1)/0.8;
if y>=1
```

```
   y=1;
elseif y<=0
       y=0;
end
```

BLOCO FUNCIONAL NORMALIZADOR 2 - *LQI*

```
% NORMALIZADOR 2 - LQI
% AUTOR: ARNALDO DE CARVALHO JUNIOR - MARÇO 2017
function y = fcn(u)
% This block supports the Embedded MATLAB subset.
% See the help menu for details.
y =0.4038*(u)+60.1341-227.0068/(u)-18.9804*log(u);
if y>=1
   y=1;
elseif y<=0
       y=0;
end
```

APENDICE B - CÓDIGO EQE-LPA LB EM MATLAB®

PROGRAMA PRINCIPAL EQE-LPA LB

```
% ESTIMADOR DE QUALIDADE DE ENLACE LOGICA PARACONSISTENTE ANOTADA EQE-LPA
% PARACONSISTENT ANNOTATED LOGIC LINK QUALITY ESTIMATOR LQE-PAL
% XBEE VERSION S1 & S2 (LOOPBACK)
% Author: Arnaldo de Carvalho Junior  Mar/2017
resp='s';
while resp=='s' || resp=='S'
          clear all;
          clc;
disp('ESTIMADOR DA QUALIDADE DO ENLACE LOGICA PARACONSISTENTE ANOTADA (EQE-
LPA)');
disp('   ');
disp('VERSÃO XBEE');
disp('   ');
disp('   ');
RSSImin = input('Informe o RSSI mínimo (default = -90 dBm): '); % RSSI mínimo
if isempty(RSSImin)||(RSSImin>0)
    RSSImin = -90;
end
disp('   ');
RSSImax = input('Informe o RSSI máximo (default = -40 dBm): '); % RSSI máximo
if isempty(RSSImax)||(RSSImax>0)
    RSSImax = -40;
end
disp('   ');
RSSImed = input('Informe o RSSI médio do Loopback Test (-X) em dBm: '); % RSSI medido
disp('   ');
if RSSImed > RSSImax
   RSSI = RSSImax;
elseif isempty(RSSImed) || RSSImed==0 || RSSImed < RSSImin
   RSSI = RSSImin;
else
   RSSI = RSSImed;
end
MI=(RSSI-RSSImin)/(RSSImax-RSSImin); % Converte RSSI em MI
PSRmed = input('Informe A Taxa de Sucesso (PSR) de Transmissão de Pacotes (%): '); % Packet
Success Rate - PSR
if isempty(PSRmed)||(PSRmed<=0)
    PSRmed = 0;
end
PSR=PSRmed;
PER = 100-PSR;% Packet Error Rate - PER
if PER>20
   PER=20;
end
LAMBDA = PER/(1.3742*PER-4.7579*sqrt(PER)+13.7958); %Converte PER em LAMBDA

%================================================
%Aplica LPA
GC=(MI-LAMBDA); % Calcula Grau de Certeza
GCT=((MI+LAMBDA)-1); % Calcula Grau de Contradição
D = ((1-abs(GC))^2+GCT^2)^0.5; % Calcula Distância;
PHI=1-abs(GCT); % Calcula Intervalo de Certeza
%================================================
%Calcula Saída do Nó de Análise Paraconsistente
if D>1;
   GCR=0;
elseif GC>=0;
```

```
   GCR=1-D;
elseif GC<0;
   GCR=D-1;
end
S1=GCR;
if GCT>0
   S2=abs(PHI);
elseif GCT<0
   S2=-abs(PHI);
else
   S2=0;
end
MIER=(GCR+1)/2;

%=====================================================
% Exibe os Resultados
disp('   ');
disp('***** RESULTADOS *****'); % Exibe os resultados
disp('   ');
fprintf('Grau de Certeza Real : %5.2f\n',S1);
fprintf('Intervalo de Certeza (PHI) : %5.2f\n',S2);
disp('   ');
fprintf('Grau de Evidência Resultante Real : %5.2f\n',MIER);
disp('   ');
if MIER>0.9
EQELPA='EXCELENTE';
elseif MIER<=0.9 && MIER>0.7
   EQELPA='BOM';
elseif MIER<=0.7 && MIER>0.5
  EQELPA='RAZOÁVEL';
elseif MIER<=0.5 && MIER>0.3
   EQELPA='POBRE';
elseif MIER<=0.3 && MIER>0.1
   EQELPA='PÉSSIMO';
elseif MIER<=0.1
   EQELPA='SEM CONEXÃO';
end
if PSRmed==0;
   EQELPA='SEM CONEXÃO';
end
disp('****************');
disp('   ');
fprintf('EQE-LPA : %s\n',EQELPA);
disp('   ');
disp('****************');
   Lambda=-LAMBDA;

%=====================================================
Reticulado_EQELPA %Chama Rotina Exibir Reticulado EQE-LPA
%=====================================================
resp=input('Nova simulação? s ou n: ','s');
while resp~='s' && resp~='S' && resp~='N' && resp~='n'
disp('Responda somente s ou n');
resp=input('Nova simulação? s ou n: ','s');
          end
end
```

SUB-ROTINA EQE-LPA LB PARA GERAÇÃO DE GRÁFICO

```
%--------------------------------------------------------------------------------------
% MONTA GRÁFICO
%--------------------------------------------------------------------------------------

%desenha o reticulado
line([-1 0],[0 1], 'Color','k','LineWidth',2);
line([0 1], [1 0], 'Color','k','LineWidth',2);
line([1 0], [0 -1],'Color','k','LineWidth',2);
line([0 -1],[-1 0],'Color','k','LineWidth',2);
line([-1 1],[0 0], 'Color','k','LineWidth',1);
line([0 0], [-1 1],'Color','k','LineWidth',1);

%%%%%%%%%%%%%% inserindo valores no reticulado%%%%%%%%%%%%%%
%--------------------------------------------------------------------------------------
% Valores relacionados a Lambda
% monta a reta vertical para o valor de Lambda até encostar no reticulado
%   line([Lambda Lambda],[-1.1 (-1-Lambda)],'Color','r','LineWidth',1,'LineStyle',':');
line([Lambda Lambda],[-1 (-1-Lambda)],'Color','r','LineWidth',1,'LineStyle',':');

% monta a reta diagonal dentro do reticulado
line([Lambda (1+Lambda)],[(-1-Lambda) -Lambda],'Color','r','LineWidth',1,'LineStyle',':');

%--------------------------------------------------------------------------------------
% Valores relacionados a Mi
% monta a reta vertical para o valor de Mi até encostar no reticulado
line([MI MI],[-1 (-1+MI)],'Color','r','LineWidth',1,'LineStyle',':');

% monta a reta diagonal dentro do reticulado
line([MI (-1+MI)],[(-1+MI) MI],'Color','r','LineWidth',1,'LineStyle',':');

% monta a reta diagonal dentro do reticulado
line([MI (-1+MI)],[(-1+MI) MI],'Color','r','LineWidth',1,'LineStyle',':');

% exibe valores
   text(MI,(-1+MI),['  ','\leftarrow Mi=',num2str(MI)]);
   text((1+Lambda),(-Lambda),['  ','\leftarrow Lambda=',num2str(Lambda)]);
   text(GC, GCT,['\leftarrow E(Gc,Gct)',num2str(GC),',',num2str(GCT)]);
   text(0.3,0.9,'GRAU DE EVIDENCIA ','Color','red','FontSize',14);
   text(0.3,0.8,['RES. REAL = ',num2str(MIER)],'Color','red','FontSize',14);
   text(-0.8,0.8,['EQE-LPA = ',EQELPA],'Color','red','FontSize',14);
```