



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA  
E TECNOLOGIA DA PARAÍBA**  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



Dissertação de Mestrado

# **EFEITOS DA INTERFERÊNCIA GERADA POR FORNOS DE MICRO-ONDAS NAS REDES SEM FIO IEEE 802.11b/g/n**

Joalle José Rodrigues Barros  
Mestrando

Jefferson da Costa e Silva, Dr.  
Orientador

Joabson Nogueira de Carvalho, Dr.  
Co-orientador

Outubro, 2014  
João Pessoa – PB



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA  
E TECNOLOGIA DA PARAÍBA**  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



# **EFEITOS DA INTERFERÊNCIA GERADA POR FORNOS DE MICRO-ONDAS NAS REDES SEM FIO IEEE 802.11b/g/n**

Joalle José Rodrigues Barros

Dissertação de Mestrado submetida à Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, como requisito necessário à obtenção do grau de Mestre em Ciências no domínio da Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Eletromagnetismo Aplicado

Jefferson da Costa e Silva, Dr.  
Orientador

Joabson Nogueira de Carvalho, Dr.  
Co-orientador

João Pessoa – PB, outubro de 2014

©Joalle José Rodrigues Barros – joallebarros@yahoo.com.br

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação – CIP  
Biblioteca Nilo Peçanha – IFPB, *campus* João Pessoa

B277e

Barros, Joalle Jose Rodrigues.

Efeitos da interferência gerada por fornos de micro-ondas nas redes sem fio IEEE 802.11b/g/n / Joalle José Rodrigues

Barros. – 2014.

99 f. : il.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba – IFPB / Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2014.

Orientador: Prof. Dr. Jefferson da Costa e Silva.

Co-orientador: Prof. Dr. Joabson Nogueira de Carvalho

1. Redes sem fio. 2. Forno de Micro-ondas. 3. Interferência. 4. Taxa de erro de CRC. I. Título.

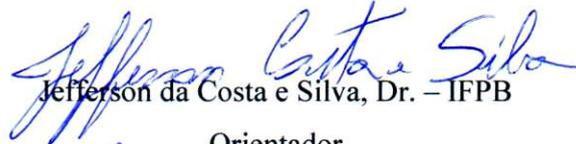
CDU 004.7

Joalle José Rodrigues Barros

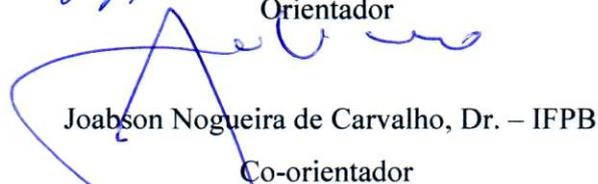
# EFEITOS DA INTERFERÊNCIA GERADA POR FORNOS DE MICRO-ONDAS NAS REDES SEM FIO IEEE 802.11b/g/n

Dissertação de Mestrado submetida à Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, como requisito necessário à obtenção do grau de Mestre em Ciências no domínio da Engenharia Elétrica.

## BANCA EXAMINADORA

  
Jefferson da Costa e Silva, Dr. – IFPB

Orientador

  
Joabson Nogueira de Carvalho, Dr. – IFPB

Co-orientador

  
Alfrêdo Gomes Neto, Dr. – IFPB

Examinador Interno

  
Adaildo Gomes D'Assunção Junior, Dr. – IFPB

Examinador Externo

  
José de Ribamar Silva Oliveira, Dr. – IFRN

Examinador Externo

João Pessoa – PB, outubro de 2014

©Joalle José Rodrigues Barros – joallebarros@yahoo.com.br

Biblioteca do Programa de Pós-graduação  
em Engenharia Elétrica - PPGEE  
IFPB - João Pessoa

“As pessoas, de início, não seguem causas dignas. Seguem líderes dignos que promovem causas dignas.”  
(James Clerk Maxwell)

---

# Agradecimentos

---

A Deus, pelo dom da vida.

A meus pais João e Lena, pela eterna dedicação aos filhos e pelo exemplo de vida.

Ao meu irmão Guipson, pelo companheirismo.

A minha amada esposa Gabrielle, por todo o apoio e compreensão durante as minhas ausências em razão dos estudos.

Ao meu chefe e amigo Giordano, pela colaboração na disponibilização dos recursos da Anatel os quais foram de fundamental importância para a elaboração deste trabalho.

Aos professores Jefferson e Joabson, pela motivação e orientação em todas as etapas dessa difícil jornada.

Ao professor Alfrêdo, pela confiança e pela importante contribuição na concepção deste trabalho.

Aos meus amigos Niedson e Hillner, pela amizade e parceria construídas durante todo o curso.

E aos demais professores, funcionários e amigos do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica – PPGEE do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba.

---

# Resumo

---

Fornos de micro-ondas domésticos são dispositivos de potência que utilizam a energia das ondas eletromagnéticas para indução de calor. Esses dispositivos, apesar de não transmitirem informações, radiam sinais na faixa não licenciada de 2,4 GHz, agindo como fontes não intencionais de interferência sobre outros dispositivos ISM, e sobre as redes sem fio que utilizam padrões IEEE 802.11b/g/n e operam nessa mesma faixa.

Nesta pesquisa são avaliados os efeitos da interferência gerada pelo forno de micro-ondas doméstico sobre o desempenho das redes sem fio que utilizam os padrões IEEE 802.11b/g/n, quando operando em um mesmo ambiente, sob diferentes configurações.

As características do sinal interferente, proveniente das ondas que escapam da cavidade ressonante do forno de micro-ondas, são analisadas nos seus aspectos fundamentais, tais como, intensidade, distribuição na frequência e variação no tempo, e ainda, quanto às suas características de propagação, a exemplo dos diagramas de radiação vertical e horizontal e da polarização.

Taxas de Erro de CRC de uma rede sem fio, operando em um ambiente com e sem a presença do sinal interferente, são obtidas, considerando, ainda, a utilização dos três padrões, associados à variação do canal utilizado e à mudança da posição relativa dos dispositivos.

A partir dos resultados obtidos, é possível avaliar se a influência da interferência gerada pelo forno de micro-ondas sobre as redes sem fio pode ser agravada ou amenizada, de acordo com a configuração utilizada. Desse modo, o padrão e o canal utilizados, assim como, a localização dos dispositivos sem fio em relação ao forno, podem ser pré-determinados de modo a minimizar os efeitos da interferência sobre o desempenho dessas redes.

Palavras-chave: Forno de Micro-ondas, Redes Sem Fio, Interferência, Taxa de Erro de CRC.

---

# Abstract

---

Domestic microwave ovens are power devices that use the energy of electromagnetic waves to heat induction. These devices, despite not transmitting information, radiate signals in the unlicensed 2.4 GHz band, acting as sources of unintentional interference over other ISM devices, and over wireless networks that use IEEE 802.11b/g/n standards, operating in the same band.

This research evaluates the effects of interference generated by the domestic microwave oven on the performance of wireless networks using the IEEE 802.11b/g/n standards, when operating in the same environment, under different setups.

The characteristics of the interfering signal, waves that escape from the resonant cavity of the microwave oven, are analyzed in its fundamental aspects, such as intensity, frequency distribution and variation over time, and also in its propagation characteristics, like vertical and horizontal radiation patterns and polarization.

CRC Error Rates of a wireless network, operating in an environment with and without the presence of the interfering signal, are obtained, considering the use of the three standards, associated with the variation of the channel and the change of relative position of the devices.

From the results obtained, it is possible to evaluate if the influence of the interference generated by the microwave oven over wireless networks can be aggravated or softened, according to the setup used. Thereby, the standard and the channel used, as well as the location of the wireless devices in relation to the oven, can be pre-determined in order to minimize the effects of interference in the performance of these networks.

Keywords: Microwave Oven, Wireless Networks, Interference, CRC Error Rate.

---

# Sumário

---

<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	<b>V</b>
<b>RESUMO</b> .....	<b>VI</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>VII</b>
<b>SUMÁRIO</b> .....	<b>VIII</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>XI</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	<b>XIII</b>
<b>LISTA DE SIGLAS</b> .....	<b>XIV</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS</b> .....	<b>XVIII</b>
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
<b>2. FORNO DE MICRO-ONDAS</b> .....	<b>5</b>
2.1. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO .....	6
2.2. COMPONENTES FUNDAMENTAIS.....	6
2.3. MAGNETRON .....	8
2.4. CARACTERÍSTICAS DAS ONDAS GERADAS .....	10
2.5. BLINDAGEM E LIMITES DE RADIAÇÃO .....	12
<b>3. PADRÕES IEEE 802.11B/G/N</b> .....	<b>15</b>
3.1. PADRÃO IEEE 802.11.....	15
3.1.1. CAMADA FÍSICA .....	17
3.1.2. CAMADA DE ENLACE DE DADOS.....	19
3.1.2.1. SUBCAMADA MAC.....	19
3.1.2.1.1. FUNÇÃO DE COORDENAÇÃO DISTRIBUÍDA – DFC .....	20
3.1.2.1.2. FUNÇÃO DE COORDENAÇÃO PONTUAL – PFC .....	21
3.2. EVOLUÇÃO DO PADRÃO IEEE 802.11 .....	21
3.3. PADRÃO IEEE 802.11B .....	22

3.3.1.	MODULAÇÕES DBPSK E DQPSK .....	23
3.3.2.	MODULAÇÃO CCK .....	24
3.4.	PADRÃO IEEE 802.11G .....	26
3.4.1.	<i>ORTHOGONAL FREQUENCY DIVISION MULTIPLEX (OFDM)</i> .....	27
3.4.2.	MODULAÇÃO QAM .....	30
3.5.	PADRÃO IEEE 802.11N .....	33
3.5.1.	LARGURA DE BANDA DE 40 MHz ( <i>CHANNEL BONDING</i> ) .....	34
3.5.2.	<i>MULTIPLE INPUT MULTIPLE OUTPUT (MIMO)</i> .....	35
<b>4.</b>	<b><i>CYCLIC REDUNDACY CHECK (CRC)</i></b> .....	<b>38</b>
4.1.	DEFINIÇÃO .....	38
4.2.	FUNDAMENTOS TEÓRICOS .....	38
4.3.	UTILIZAÇÃO PRÁTICA .....	40
4.3.1.	CRC-12 .....	40
4.3.2.	CRC-16 .....	41
4.3.3.	CRC-32 .....	41
4.3.4.	CRC-CCITT .....	42
<b>5.</b>	<b>INTERFERÊNCIA SOBRE REDES SEM FIO</b> .....	<b>43</b>
<b>6.</b>	<b>PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS</b> .....	<b>46</b>
6.1.	LOCAL DAS MEDIÇÕES .....	46
6.2.	INSTRUMENTOS E DISPOSITIVOS .....	47
6.3.	AIRMAGNET WIFI ANALYZER .....	48
6.4.	PROCEDIMENTOS DE MEDIÇÃO .....	50
6.4.1.	CARACTERIZAÇÃO DA INTERFERÊNCIA GERADA PELO FORNO DE MICRO-ONDAS ..	51
6.4.1.1.	NÍVEL DE SINAL RADIADO NOS DOMÍNIOS DA FREQUÊNCIA E DO TEMPO .....	51
6.4.1.2.	DIAGRAMAS DE RADIAÇÃO VERTICAL E HORIZONTAL .....	52
6.4.1.3.	NÍVEL DE SINAL RADIADO EM FUNÇÃO DA VARIAÇÃO DA POSIÇÃO, DISTÂNCIA E DA POLARIZAÇÃO DA ANTENA RECEPTORA .....	54
6.4.2.	OBTENÇÃO DAS TAXAS DE ERRO DE CRC (CRC-ER) .....	55
6.4.2.1.	CRC-ER EM FUNÇÃO DO PADRÃO E DO CANAL DE TRANSMISSÃO .....	56
6.4.2.2.	CRC-ER EM FUNÇÃO DA DISTÂNCIA E DA POSIÇÃO .....	58
<b>7.</b>	<b>RESULTADOS</b> .....	<b>60</b>

7.1.	CARACTERIZAÇÃO DA INTERFERÊNCIA GERADA PELO FORNO DE MICRO-ONDAS ..	60
7.1.1.	NÍVEL DE SINAL RADIADO NOS DOMÍNIOS DA FREQUÊNCIA E DO TEMPO .....	60
7.1.2.	DIAGRAMAS DE RADIAÇÃO VERTICAL E HORIZONTAL.....	62
7.1.3.	NÍVEL DE SINAL RADIADO EM FUNÇÃO DA VARIAÇÃO DA POSIÇÃO, DISTÂNCIA E DA POLARIZAÇÃO DA ANTENA RECEPTORA .....	64
7.2.	OBTENÇÃO DAS TAXAS DE ERRO DE CRC (CRC-ER).....	65
7.2.1.	CRC-ER EM FUNÇÃO DO PADRÃO DE TRANSMISSÃO.....	66
7.2.2.	CRC-ER EM FUNÇÃO DO CANAL DE TRANSMISSÃO.....	68
7.2.3.	CRC-ER EM FUNÇÃO DA DISTÂNCIA E DA POSIÇÃO .....	70
<b>8.</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>75</b>
8.1.	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	75
8.2.	TRABALHOS FUTUROS .....	76
	<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>77</b>

---

# Lista de figuras

---

Figura 1.1: Previsão de crescimento global de dispositivos móveis [1].....	1
Figura 2.1: Evolução do forno de micro-ondas [7]. ....	5
Figura 2.2: Efeito do campo elétrico da micro-onda sobre a molécula de água [10].....	6
Figura 2.3: Componentes do forno de micro-ondas [12]. ....	7
Figura 2.4: Componentes de um magnetron [10].....	9
Figura 2.5: Esquema de funcionamento de um magnetron [10].....	9
Figura 2.6: Ciclos de trabalho do magnetron [4].....	10
Figura 2.7: Forma de onda do sinal gerado por um forno de micro-ondas [14].....	11
Figura 2.8: Distribuição do sinal gerado pelo forno no domínio da frequência [14]. ....	11
Figura 2.9: Fotografia da porta frontal [10].....	12
Figura 2.10: Diagrama esquemático dos dispositivos de segurança da porta frontal [10]. ....	13
Figura 2.11: Variação do limite de emissão de radiação do forno de micro-ondas [10].....	14
Figura 3.1: Arquitetura básica de uma rede sem fio [17]. ....	16
Figura 3.2: Técnica de multiplexação FHSS [18]. ....	18
Figura 3.3: Disposição dos canais na faixa ISM de 2,4 GHz para a DSSS [19]. ....	18
Figura 3.4: Detecção de canal virtual com CSMA/CA [15].....	20
Figura 3.5: Diagrama de constelações para os sinais PSK [22]. ....	23
Figura 3.6: Sequência de códigos complementares [24]. ....	25
Figura 3.7: Estrutura de portadoras OFDM [26]. ....	29
Figura 3.8: Sinal 16 QAM [27]. ....	30
Figura 3.9: Constelação 16 QAM [27]. ....	32
Figura 3.10: Esquema de um modulador QAM [27].....	33
Figura 3.11: Máscara de espectro para o canal de 40 MHz IEEE 802.11n [30]. ....	34
Figura 3.12: Sistemas de comunicação SISO e MIMO [32]. ....	35
Figura 3.13: Técnicas de processamento de sinal MIMO [30]. ....	36
Figura 4.1: Diagrama de blocos CRC-12 [34].....	40
Figura 4.2: Diagrama de blocos CRC-16 [34].....	41

Figura 4.3: Diagrama de blocos CRC-32 [34].	42
Figura 4.4: Diagrama de blocos CRC-CCITT [34].	42
Figura 5.1: Diagrama básico de um sistema adaptativo [37].	44
Figura 5.2: Valores teóricos de BER e <i>throughput</i> em relação aos níveis de sinal/ruído para alguns esquemas de modulação utilizados em redes IEEE 802.11 [37].	44
Figura 6.1: Planta baixa do local de medição.	47
Figura 6.2: AirMagnet – Tela inicial.	48
Figura 6.3: Operação do AirMagnet Wifi Analyzer.	49
Figura 6.4: Tela de medição das CRC-ER do AirMagnet.	50
Figura 6.5: <i>Setup</i> de Medição I.	51
Figura 6.6: <i>Setup</i> de Medição II.	53
Figura 6.7: <i>Setup</i> de Medição III.	54
Figura 6.8: <i>Setup</i> de Medição IV.	56
Figura 6.9: <i>Setup</i> de Medição V.	58
Figura 7.1: Fotografia do <i>Setup</i> de Medição I.	61
Figura 7.2: Sinal radiado pelo forno de micro-ondas no domínio da frequência.	61
Figura 7.3: Sinal radiado pelo forno de micro-ondas no domínio do tempo.	62
Figura 7.4: Diagramas de radiação do forno de micro-ondas.	63
Figura 7.5: Curvas de intensidade de sinal recebido em função da variação da posição, da distância e da polarização da antena.	65
Figura 7.6: CRC-ER em função da variação do padrão de transmissão.	67
Figura 7.7: Comparativo das CRC-ER em função do padrão de transmissão.	68
Figura 7.8: CRC-ER em função do canal de transmissão.	69
Figura 7.9: Orientação das radiais de medição.	71
Figura 7.10: <i>Setup</i> de medição das CRC-ER em função da posição e da distância.	71
Figura 7.11: Gráfico comparativo das CRC-ER de acordo com a radial avaliada.	73
Figura 7.12: CRC-ER em função da posição e da distância.	74

---

# Lista de tabelas

---

Tabela 1: Principais características dos padrões IEEE 802.11b/g/n [19].	22
Tabela 2: Sequência complementar CCK [24].	25
Tabela 3: Sequência complementar CCK com modulação DQPSK [24].	25
Tabela 4: Taxas suportadas para as diferentes camadas físicas IEEE 802.11g [25].	27
Tabela 5: Modulação, taxa de codificação e velocidade no padrão IEEE 802.11g [26].	30
Tabela 6: Polinômios geradores de alguns modelos de CRC padrão [34].	40
Tabela 7: Medições de <i>throughput</i> com e sem a ocorrência de interferência na faixa de 2,4 GHz [35].	45
Tabela 8: Instrumentos e dispositivos utilizados nas medições de radiação do forno de micro-ondas.	47
Tabela 9: Variação das CRC-ER para as radiais A e B.	73

---

# Lista de siglas

---

AAL5	<i>ATM Adaptation Layer 5</i> (Camada Adaptativa 5 do ATM)
ACK	<i>Acknowledgement</i> (Reconhecimento)
AP	<i>Access Point</i> (Ponto de Acesso)
ARQ	<i>Automatic Repeat Request</i> (Requisição de Repetição Automática)
BER	<i>Bit Error Rate</i> (Taxa de Erro de Bit)
BSA	<i>Basic Service Area</i> (Área de Serviço Básico)
BSS	<i>Basic Service Set</i> (Conjunto de Serviço Básico)
CA	Corrente Alternada
CCK	<i>Complementary Code Keying</i> (Chaveamento por Código Complementar)
CRC	<i>Cyclic Redundancy Check</i> (Checagem de Redundância Cíclica)
CRC-ER	<i>Cyclic Redundancy Check Error Rate</i> (Taxa de Erro de Checagem de Redundância Cíclica)
CSMA/CA	<i>Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance</i> (Acesso Múltiplo por detecção de Portadora com Prevenção de Colisão)
CTS	<i>Clear to Send</i> (Liberado para Envio)
DBPSK	<i>Differential Binary Phase Shift Keying</i> (Chaveamento por Desvio de Fase Diferencial Binária)
DCF	<i>Distributed Coordination Function</i> (Função de Coordenação Distribuída)
DFWMAC	<i>Distributed Foundation Wireless Media Access Control</i> (Controle de Acesso ao Meio Sem Fio por Base de Distribuição)
DOD	<i>Department of Defense</i> (Departamento de Defesa)
DPSK	<i>Differential Phase Shift Keying</i> (Chaveamento por Desvio de Fase Diferencial)

DQPSK	<i>Differential Quadrature Phase Shift Keying</i> (Chaveamento por Desvio de Fase Diferencial em Quadratura)
DS	<i>Distribution System</i> (Sistema de Distribuição)
DSSS	<i>Direct Sequence Spread Spectrum</i> (Espalhamento Espectral por Sequência Direta)
ERP	<i>Extended Rate Physical</i> (Taxa Física Estendida)
ESS	<i>Extended Service Set</i> (Conjunto de Serviço Estendido)
FDDI	<i>Fiber Distributed Data Interface</i> (Interface de Dados Distribuída por Fibra)
FHSS	Frequency Hopping Spread Spectrum (Espalhamento Espectral por Saltos em Frequência)
GF	<i>Galois Field</i> (Campo de Galois)
GFSK	<i>Gaussian Frequency Shift Keying</i> (Chaveamento por Desvio de Frequência Gaussiana)
HR/DSSS	<i>High Rate / Direct Sequence Spread Spectrum</i> (Espalhamento Espectral por Sequência Direta de Alta Taxa)
HT	<i>High Throughput</i> (Alta Taxa de Transferência)
HT20	<i>High Throughput at 20 MHz</i> (Alta Taxa de Transferência a 20 MHz)
HT40	<i>High Throughput at 40 MHz</i> (Alta Taxa de Transferência a 40 MHz)
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i> (Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos)
IR	<i>Infrared</i> (Infravermelho)
ISM	<i>Industrial, Scientific and Medical</i> (Industrial, Científico e Médico)
ITU-TSS	<i>International Telecommunications Union - Telecommunication Standards Section</i> (União Internacional de Telecomunicações - Seção de Padrões de Telecomunicações)
ITU-R	<i>International Telecommunications Union – Radiocommunication Sector</i> (União Internacional de Telecomunicações – Setor de Radiocomunicações)
LLC	<i>Logic Link Control</i> (Controle Lógico de Enlace)

MAC	<i>Media Access Control</i> (Controle de Acesso ao Meio)
MIMO	<i>Multiple Input and Multiple Output</i> (Múltiplas Entradas e Múltiplas Saídas)
NAK	<i>Negative Acknowledgement</i> (Reconhecimento Negativo)
NAV	<i>Network Allocation Vector</i> (Vetor de Alocação da Rede)
NRZ	<i>Non Return to Zero</i> (Não Retorno a Zero)
NTIA	<i>National Telecommunications and Information Administration</i> (Administração Nacional das Telecomunicações e da Informação)
OFDM	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i> (Multiplexação por Divisão de Frequência Ortogonal)
PAPR	<i>Peak to Average Power Ratio</i> (Relação entre Potências de Pico e Média)
PBCC	<i>Packet Binary Convolutional Code</i> (Código Convolutacional de Pacotes Binários)
PCF	<i>Point Coordination Function</i> (Função de Coordenação de Ponto)
PSK	<i>Phase Shift Keying</i> (Chaveamento por Desvio de Fase)
QAM	<i>Quadrature Amplitude Modulation</i> (Modulação de Amplitude em Quadratura)
QPSK	<i>Quadrature Phase Shift Keying</i> (Chaveamento por Desvio de Fase Diferencial)
RBW	<i>Resolution Bandwidth</i> (Largura de Banda de Resolução)
RTS	<i>Request to Send</i> (Requisição de Envio)
SISO	<i>Single Input and Single Output</i> (Única Entrada e Única Saída)
SM	<i>Spatial Multiplexing</i> (Multiplexação Espacial)
SNR	<i>Signal to Noise Ratio</i> (Relação Sinal-Ruído)
STA	<i>Station</i> (Estação)
STBC	<i>Space-Time Block Coding</i> (Codificação de Blocos Espaço-Tempo)
TxBF	<i>Transmit Beamforming</i> (Transmissão por Formação de Feixe)
UIT	União Internacional de Telecomunicações
VBW	<i>Video Bandwidth</i> (Largura de Banda de Vídeo)
WAN	<i>Wide Area Network</i> (Rede de Área Larga)

WiFi      *Wireless Fidelity*

WLAN      *Wireless Local Area Network* (Rede de Área Local Sem Fio)

---

# Lista de símbolos

---

$\vec{E}$	Vetor campo elétrico
$L$	Indutor
$C$	Capacitor
$I$	Corrente elétrica
$T_{on}$	Período de operação
$f_{ca}$	Frequência da rede de corrente alternada
$S_m(t)$	Sinal modulado (PSK)
$g(t)$	Forma do pulso do sinal
$f_c$	Frequência de corte
$M$	Quantidade de fases da portadora
$m$	Fase da portadora
$c$	Palavra código complexa
$\varphi$	Fase
$S_i(t)$	Sinal modulado (QAM)
$E_0$	Energia do símbolo de menor amplitude
$t$	Tempo
$d_{min}$	Distância mínima entre dois pontos na constelação
$[a_i, b_i]$	Matriz quadrada (QAM)
$\emptyset$	Fase da componente QAM
$g(x)$	Polinômio gerador
$T(x)$	Polinômio resultante
$E(x)$	Polinômio com erro
$f(x)$	Polinômio da mensagem original
$r(x)$	Polinômio do resto da Divisão
$\alpha$	Ângulo de radiação horizontal
$\beta$	Ângulo de radiação vertical

---

# 1. Introdução

---

O aumento do número de dispositivos móveis que acessam redes sem fio em todo o mundo é um dos principais fatores que contribuem para o forte crescimento do tráfego global de dados sem fio. Todos os anos vários novos dispositivos de diferentes modelos e com capacidades e recursos incrementadas estão sendo introduzidos no mercado. Mais de meio bilhão (526 milhões) de conexões móveis foram ativadas em 2013. As conexões móveis globais cresceram, em 2013, de 6,5 para 7 bilhões [1], conforme pode ser observado no gráfico da Figura 1.1.

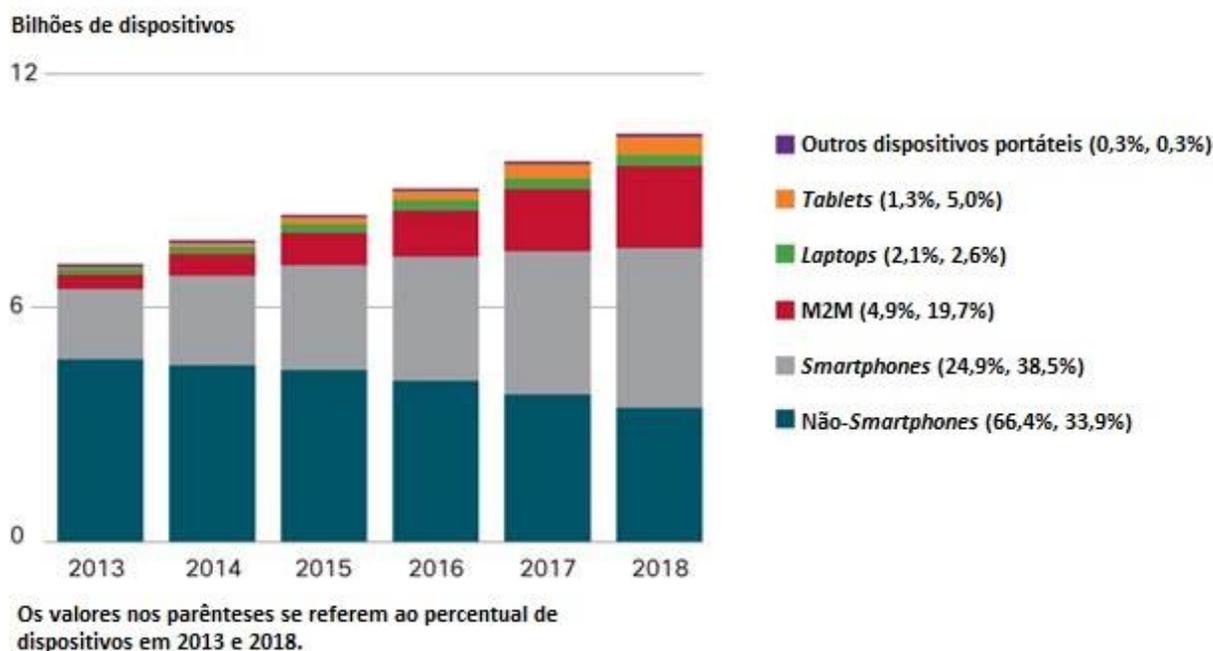


Figura 1.1: Previsão de crescimento global de dispositivos móveis [1].

Como consequência, a demanda por serviços de comunicação sem fio tem crescido rapidamente e muitos tipos de sistemas de radiocomunicação têm sido desenvolvidos para atender a essas demandas. A maioria desses sistemas de radiocomunicação opera na faixa de

frequência compreendida entre 1 e 3 GHz, e a expectativa é de que esta faixa de frequência será cada vez mais utilizada por outros sistemas desenvolvidos no futuro [2].

Dentro dessa realidade, o espectro radioelétrico tem se tornado um bem cada vez mais escasso e o compartilhamento das faixas de frequências entre diferentes aplicações tem sido essencial para possibilitar uma utilização mais eficiente desse meio. No entanto, a viabilização do compartilhamento passa, necessariamente, pelo conhecimento das características de emissão dos diversos dispositivos utilizados em cada uma das respectivas aplicações. Especificamente, no que concerne à faixa de 2,4 GHz, a necessidade de se ter um controle dessas emissões é ainda maior, em razão dos dispositivos de radiocomunicação, que dela se utilizam, compartilharem esta mesma faixa com os dispositivos ISM, cujas emissões podem atingir níveis bem mais elevados. É na faixa de 2,4 GHz onde se concentra grande parte da demanda por frequência, muito em razão da popularidade das redes sem fio dos padrões IEEE 802.11b/g/n, resultado da alta interoperabilidade e do baixo custo dos dispositivos sem fio que utilizam esses padrões, e ainda, devido esta faixa ser internacionalmente regulamentada para a utilização de dispositivos ISM e, desse modo, não requerer licença para sua utilização. Assim, o compartilhamento da faixa de 2,4 GHz entre as redes sem fio existentes já a torna bastante densa e, juntamente com a utilização dessa mesma faixa pelos dispositivos ISM, faz com que os seus receptores tenham que lidar constantemente com interferências provenientes de diferentes fontes de radiofrequência.

Entre essas fontes estão os cerca de um bilhão de fornos de micro-ondas residenciais distribuídos ao redor do mundo, operando na frequência nominal de 2,45 GHz, e radiando ondas eletromagnéticas com intensidade da ordem de  $110 \text{ dB}\mu \text{ V/m}$  [3]. Estes dispositivos, quando operando em ambientes com a presença de redes sem fio, a exemplo de residências, restaurantes, lanchonetes e escritórios, podem provocar o aumento das taxas de erro nos dados que trafegam nessas redes e, dessa forma, degradar seriamente o seu desempenho. Isto torna a interferência gerada pelos fornos de micro-ondas um fator preponderante a ser considerado no planejamento e na implementação das redes sem fio que operam na faixa ISM de 2,4 GHz. Assim sendo, a análise das características das ondas radiadas pelos fornos de micro-ondas, tais como, intensidade de campo elétrico, polarização, diagrama de radiação horizontal e vertical, e ainda, sua distribuição em função da frequência e do tempo, são parâmetros essenciais a serem avaliados como forma de compreender seus efeitos sobre os receptores das redes sem fio e,

consequentemente, tornar possível avaliar de que forma essa interferência degrada as transmissões de maneira mais leve ou mais intensa.

Vários estudos têm discutido as interferências emitidas por fornos de micro-ondas e seus efeitos no desempenho de vários sistemas de radiocomunicação, a exemplo dos realizados em [2], [4] e [5]. Entretanto, muitos desses estudos investigaram apenas as características das interferências geradas pelos fornos de micro-ondas com relação à sua distribuição estatística no tempo e na frequência, ignorando as suas características de propagação. Além disso, não se observa facilmente na literatura abordagens que aprofundem a análise dos efeitos dessa interferência sobre as redes sem fio para os padrões IEEE 802.11b/g/n.

Diante disso, considerando a grande exigência do mercado por redes cada vez mais velozes e confiáveis, a busca por um desempenho mais eficaz das redes sem fio, mesmo quando operando em conjunto com fornos de micro-ondas, se tornou um grande desafio a ser enfrentado pela comunidade científica. Partindo dessa premissa, este trabalho inicia a análise do problema considerando seguintes questionamentos:

- 1) Como ocorre e quais as características da interferência gerada pelo forno de micro-ondas doméstico?
- 2) A interferência provoca a perda de desempenho de redes sem fio que operam na faixa de 2,4 GHz? Em que grau?
- 3) Qual a relação do padrão e do canal utilizados pela rede sem fio com a perda de desempenho provocada pela interferência?
- 4) A variação da posição e da distância entre os dispositivos sem fio e o forno de micro-ondas provocam alteração dos efeitos da interferência no desempenho da rede?
- 5) Qual a configuração em que a rede sem fio, que opera sob os efeitos da interferência gerada pelo forno, sofre maior e menor perda de desempenho?

Nesse contexto, o presente trabalho propõe uma análise detalhada do comportamento das taxas de erro de CRC dos dados trafegados em uma rede sem fio, para os diferentes esquemas de funcionamento das redes que operam na faixa de 2,4 GHz, ou seja, os padrões IEEE 802.11b/g/n, sob os efeitos da interferência provocada pelo forno de micro-ondas doméstico, ambos inseridos em um mesmo ambiente, porém, dispostos em diferentes configurações, e ainda, considerando as características de emissão do forno e os diferentes parâmetros de operação dos dispositivos de rede sem fio. Tal análise permitirá a obtenção de

diagnósticos precisos acerca das condições de funcionamento de ambos os dispositivos, quando instalados em um mesmo ambiente. Buscando responder estas e outras perguntas, são apresentadas a seguir todas as etapas da pesquisa, bem como, os resultados obtidos a partir da análise dos dados extraídos dos experimentos realizados.

A estrutura do trabalho está distribuída da seguinte forma: a Introdução corresponde ao primeiro capítulo, onde é realizada uma abordagem inicial sobre o tema, apresentando as justificativas, relevância e a estrutura adotada para a dissertação; no Capítulo 2, é descrita a fundamentação teórica sobre fornos de micro-ondas: introdução, princípio de funcionamento, componentes fundamentais, magnetron, características das ondas geradas e blindagem e limites de radiação; no Capítulo 3, é descrita a fundamentação teórica das redes sem fio IEEE 802.11b/g/n: introdução, padrão IEEE 802.11b, padrão IEEE 802.11g, padrão IEEE 802.11n, análise comparativa entre os padrões; no Capítulo 4, é descrita a técnica Checagem de Redundância Cíclica: introdução, cálculo de CRC e funcionamento. No Capítulo 5, é apresentado o aplicativo AirMagnet Wifi Analyzer; no Capítulo 6, é realizada a caracterização do sinal radiado por um exemplar de um forno de micro-ondas nos seus aspectos fundamentais e de propagação; o Capítulo 7, é descrito processo de realização dos experimentos para obtenção dos dados correspondentes às Taxas de Erro de CRC: especificação dos dispositivos e instrumentos, metodologia e procedimentos, configuração e variáveis consideradas; no Capítulo 8, apresentados resultados numéricos obtidos por meio da realização dos experimentos. São realizadas análises comparativas, destacando-se relações e observações sobre as variáveis consideradas; e, finalmente, no capítulo 9, são expostas as conclusões gerais do trabalho, bem como sugestões para sua continuidade.

---

## 2. Forno de Micro-ondas

---

A ideia do forno de micro-ondas foi concebida por Percy L. Spencer em 1946 e patenteada em 1950. O seu mecanismo se baseia no princípio de produção de calor pelo atrito entre as moléculas de água, gordura e açúcar, quando submetidas a radiação por micro-ondas. Devido ao enorme tamanho dos primeiros fornos de micro-ondas, pesando mais de 300 kg e medindo mais de 1,5 metro de altura, eles foram principalmente utilizados em grandes restaurantes e empresas do ramo de alimentação. O primeiro forno de micro-ondas doméstico foi produzido pela Raytheon Corporation, em 1965 [6]. A Figura 2.1 apresenta fotografias do primeiro forno de micro-ondas e de um exemplar doméstico comercializado nos dias atuais.



(a) Primeiro forno de micro-ondas.



(b) Forno de micro-ondas atual.

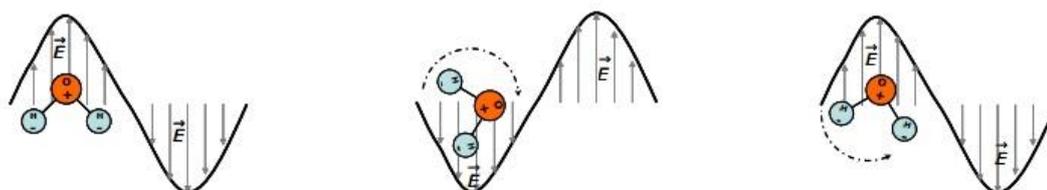
Figura 2.1: Evolução do forno de micro-ondas [7].

Atualmente, o forno de micro-ondas é uma das aplicações domésticas mais comuns, podendo ser encontrado na maioria das casas, lojas de conveniências e restaurantes. A razão de toda essa popularidade é que o forno de micro-ondas aquece o alimento em um intervalo de tempo bem menor que outros tipos de fornos. [8].

## 2.1. Princípio de funcionamento

O cozimento por micro-ondas acontece porque as micro-ondas nessa faixa de frequência usada nos fornos são fracamente absorvidas pelas moléculas de água, gorduras e açúcares presentes nos alimentos. As moléculas polares (que possuem polos nos seus extremos, um positivo e outro negativo) alinham-se com o campo elétrico incidente, mudando de direção de acordo com a frequência da radiação e, com isso, puxam outras moléculas vizinhas que, devido certa resistência da substância, se opõem a esse alinhamento, gerando um aquecimento do meio a partir do movimento destas, provocado pela oscilação do campo, o que produz calor no interior do alimento [9]. A Figura 2.2 ilustra o processo de aquecimento de uma molécula de água por micro-onda.

Somente as moléculas de água, gordura e açúcar entram em ressonância com as micro-ondas. Isso significa que apenas os alimentos que contêm essas moléculas são aquecidos pelo forno. Então, o ar, os recipientes de vidro, plástico ou outros materiais não são aquecidos, o que representa uma grande economia de energia. O ar e os recipientes colocados no interior da câmara de cozimento são aquecidos apenas por condução ou convecção através do alimento aquecido [10].



- (a) Molécula de água alinhada com o campo elétrico da onda.  
(b) Molécula de água girada induzida pela inversão do sentido do campo.  
(c) Molécula de água girada para a posição original pela nova inversão do sentido do campo.

Figura 2.2: Efeito do campo elétrico da micro-onda sobre a molécula de água [10].

## 2.2. Componentes fundamentais

Os componentes fundamentais de um forno de micro-ondas são a válvula magnetron, um guia de ondas, uma fonte de alta tensão, a cavidade ressonante ou câmara de cozimento e a porta frontal, conforme ilustrado na Figura 2.3 [11].

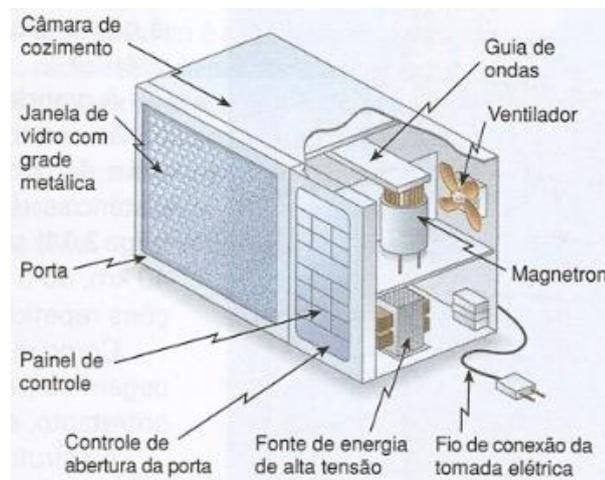


Figura 2.3: Componentes do forno de micro-ondas [12].

A seguir, são brevemente apresentadas as respectivas descrições e funções de cada um dos principais componentes de um forno de micro-ondas:

- **Magnetron:** é uma válvula que gera micro-ondas. Seu princípio de funcionamento é baseado no efeito de circuitos ressonantes [10]. Dentro do magnetron, no seu centro, existe um tubo chamado catodo, responsável por emitir elétrons acelerados. O catodo tem uma ligação com dois filamentos que também se ligam externamente com dois terminais do magnetron. Os elétrons acelerados são desviados por causa do campo magnético de dois ímãs permanentes e alcançam o anodo que é uma placa contendo diversas cavidades. Cada cavidade do anodo corresponde a uma bobina e um capacitor [9].
- **Guia de ondas:** é um tubo metálico capaz de refletir e direcionar as micro-ondas [11]. Tem a finalidade de conduzir as ondas até a cavidade ressonante [10].
- **Fonte de alta tensão:** consiste de um circuito constituído por um transformador elevador de tensão, um capacitor de alta tensão e um diodo. A partir aplicação da tensão de  $220 V_{ca}$  ou  $110 V_{ca}$ , fornecida pela rede, ao primário do transformador, a fonte funciona como uma associação em série de geradores que geram uma tensão total de aproximadamente  $4.000 V$ , que é aplicada diretamente no magnetron [10].
- **Cavidade ressonante ou câmara de cozimento:** geralmente é constituída de aço inoxidável, alumínio ou aço pintado, materiais capazes de refletir as micro-ondas que não são imediatamente absorvidas pelos alimentos. As ondas refletidas ricocheteiam

pela cavidade até serem absorvidas pela carga (alimento). A distância entre as paredes da cavidade ressonante deve ser aproximadamente um múltiplo inteiro de meio comprimento de onda da micro-onda utilizada no processo [10].

- **Porta frontal:** a parte frontal do forno contém uma porta com um mecanismo travador e uma janela transparente composta de uma grade metálica cujos orifícios têm dimensões muito menores que o comprimento de onda das micro-ondas. Esse dispositivo tem a função de impedir o vazamento das micro-ondas [10].

### 2.3. Magnetron

É no magnetron onde são geradas as micro-ondas, princípio fundamental de funcionamento de um forno de micro-ondas. Por este motivo, é essencial uma explanação mais detalhada acerca das características de construção e funcionamento desse componente.

Conforme já foi mencionado, o princípio de funcionamento do magnetron está baseado no efeito de circuitos ressonantes, conforme descrito a seguir.

O circuito ressonante tem a capacidade de gerar ondas e é formado pela ligação em paralelo de uma bobina e um capacitor. Quando ligamos uma bobina e um capacitor em paralelo, considerando, inicialmente, que o capacitor se encontra completamente carregado, a corrente no circuito é totalmente nula. No instante seguinte, surge uma corrente elétrica através da bobina, pois os elétrons da placa negativa do capacitor tendem a atingir a placa positiva. Neste momento, a corrente na bobina é máxima e a energia é armazenada na forma de energia magnética, até que a carga do capacitor seja reduzida a zero. A partir daí, o campo magnético armazenado no indutor induz o aparecimento de um fluxo de corrente elétrica no sentido contrário que irá carregar o capacitor com polaridade oposta à inicial. Após carregado, a placa negativa do capacitor torna-se positiva e novamente a corrente se torna nula. Finalmente, o capacitor provoca, novamente, o aparecimento de uma corrente elétrica, no sentido contrário ao anterior, que irá induzir o armazenamento de energia magnética pelo indutor. E assim esse ciclo se repete produzindo oscilações eletromagnéticas [10].

O magnetron utilizado nos fornos de micro-ondas domésticos é constituído de anodo, catodo, antena e imãs permanentes, conforme representado na Figura 2.4. O princípio de funcionamento é semelhante ao do circuito oscilante descrito acima. O anodo é uma peça metálica oca, geralmente feita de cobre ou ferro, contendo um número par de aletas na sua

cavidade, apontando para o catodo. O catodo é um filamento que é o emissor de elétrons e fica localizado dentro da cavidade do magnetron. A antena fica ligada a uma aleta do anodo e é responsável por conduzir as micro-ondas para a parte externa do magnetron [10].

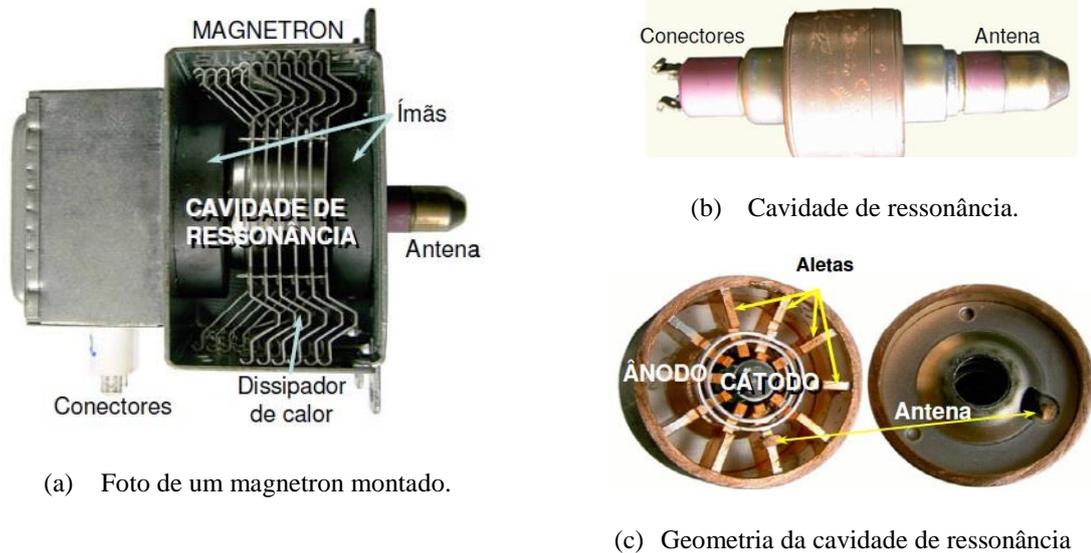


Figura 2.4: Componentes de um magnetron [10].

As aletas se comportam como um conjunto de capacitores e, juntamente com a parede da cavidade ressonante, como uma série de bobinas. Enquanto uma corrente elétrica circula na parede da cavidade e nas aletas, gerando campos magnéticos variáveis, formam-se campos elétricos variáveis nos espaços que as separam as aletas. Assim, o conjunto se comporta como um circuito ressonante com valores de indutância e capacitância muito pequenos, emitindo oscilações em alta frequência. A Figura 2.5 mostra um esquema que descreve como o magnetron se comporta como um circuito ressonante.

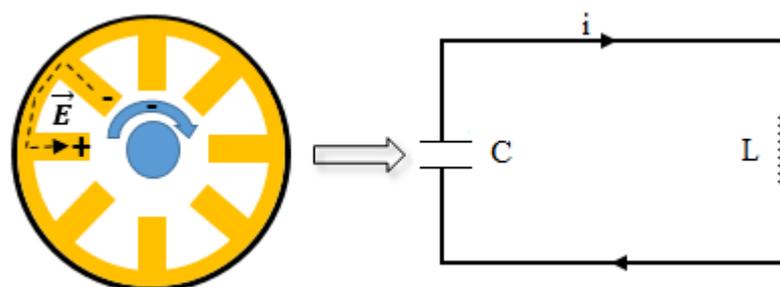


Figura 2.5: Esquema de funcionamento de um magnetron [10].

Enquanto os elétrons giram na cavidade e passam próximos das aletas, eles vão alternando as cargas elétricas positivas e negativas. Essa oscilação produzida pela alternância entre cargas positivas e negativas funciona como circuito ressonante, cujos ciclos se repetem 2.450.000 vezes por segundo e gera micro-ondas a 2,45 GHz. A antena capta e irradia a energia dessas ondas para a câmara de cozimento do forno através do guia de ondas.

## 2.4. Características das ondas geradas

Idealmente, os magnetrons utilizados nos fornos de micro-ondas domésticos produzem ondas sintonizadas em 2,45 GHz, exatamente no meio da faixa ISM de 2,4 GHz, e geram uma potência de saída entre 400 e 800 watts, operando em ciclos de “on” e “off”, sincronizados com a frequência da rede CA (60 Hz) [10]. Dessa forma, pode-se facilmente demonstrar em (1) que o magnetron radia efetivamente em 50% do seu período total de operação, em ciclos intercalados de 8,33 milissegundos [13].

$$T_{on(s)} = \frac{1}{F_{CA(Hz)}} \times 0,5 \quad (1)$$

Os magnetron geram ondas eletromagnéticas sempre que a tensão fornecida pela fonte estiver acima de um certo limiar. Do mesmo modo, quando a tensão de entrada estiver abaixo do limiar, não serão geradas ondas eletromagnéticas [4], conforme ilustrado na Figura 2.6.

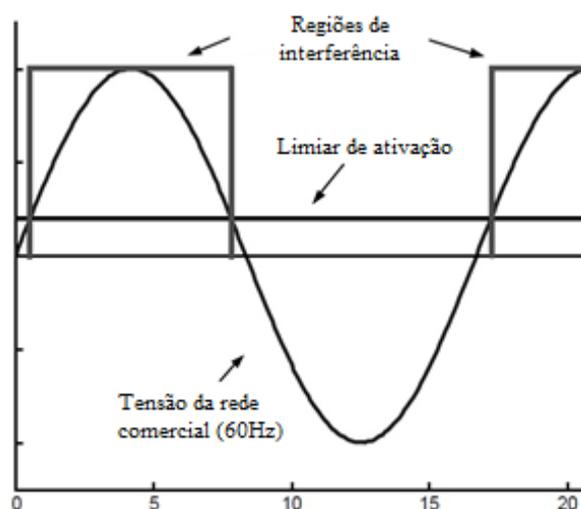


Figura 2.6: Ciclos de trabalho do magnetron [4].

Essa característica pulsada do sinal que escapa da blindagem do forno de micro-ondas faz com que durante o período de operação do magnetron existam janelas de tempo em que é possível a operação de outros dispositivos sem a interferência gerada pelo forno. Alguns autores, em suas pesquisas, propõem métodos para sincronização das transmissões de dispositivos de radiocomunicação com essas janelas de “off” dos fornos de micro-ondas como uma solução para o problema da interferência. A Figura 2.7 mostra o comportamento do sinal produzido pelo forno no domínio do tempo.

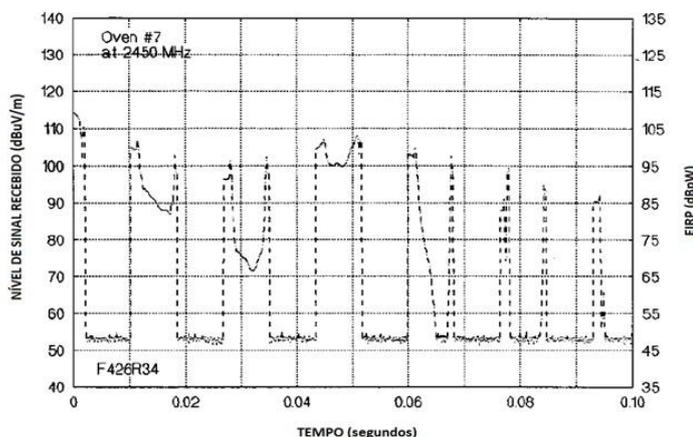


Figura 2.7: Forma de onda do sinal gerado por um forno de micro-ondas [14].

No domínio da frequência, o sinal produzido pelo forno de micro-ondas doméstico se espalha praticamente em toda a faixa compreendida de 2,3 a 2,6 GHz, com diferentes níveis de intensidade. O valor de pico da onda normalmente é centrado em 2,45 GHz, podendo variar de acordo com o modelo e o fabricante do forno [14]. A Figura 2.8 mostra a disposição do sinal gerado pelo forno no domínio da frequência.

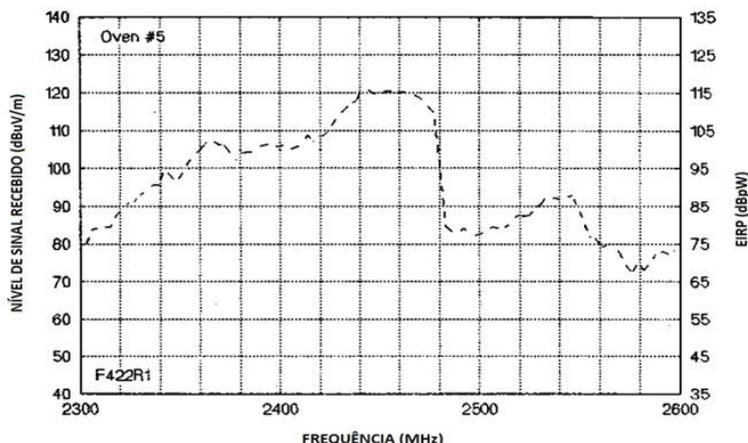


Figura 2.8: Distribuição do sinal gerado pelo forno no domínio da frequência [14].

## 2.5. Blindagem e limites de radiação

O projeto de um forno de micro-ondas é feito de forma a garantir que não haja vazamento de radiação, principalmente pela porta frontal, que é projetada de maneira que possua três dispositivos de segurança: o selo capacitivo; a cavidade de choque; e a vedação de absorção, que elimina grande parte da possibilidade de vazamento [10].

O mecanismo de travamento pressiona a porta frontal contra a moldura metálica do forno, formando o primeiro dispositivo de segurança conhecido como selo capacitivo. Esse ajuste da porta contra a moldura metálica mediada por um material isolante garante a reflexão da maior parte das ondas de volta para a cavidade ressonante, evitando vazamento e a formação de faíscas elétricas. A janela da porta é fabricada em três camadas: uma de vidro temperado ou plástico externo, uma grade metálica intermediária e um filme plástico translúcido interno. O vidro tem a função de permitir a passagem da luz e a camada de filme interno protege a grade metálica contra o acúmulo de sujeiras e corrosão. A grade metálica é projetada de maneira que as perfurações tenham um diâmetro muito maior do que o comprimento de onda da luz, de modo a permitir a visibilidade, porém, com diâmetro muito menor do que o comprimento de onda das micro-ondas, bloqueando e refletindo-as de volta para o interior da cavidade ressonante [10].

As Figuras 2.9 e 2.10 mostram a fotografia de uma porta frontal de um forno de micro-ondas e o diagrama esquemático dos seus dispositivos de segurança, respectivamente.



Figura 2.9: Fotografia da porta frontal [10].

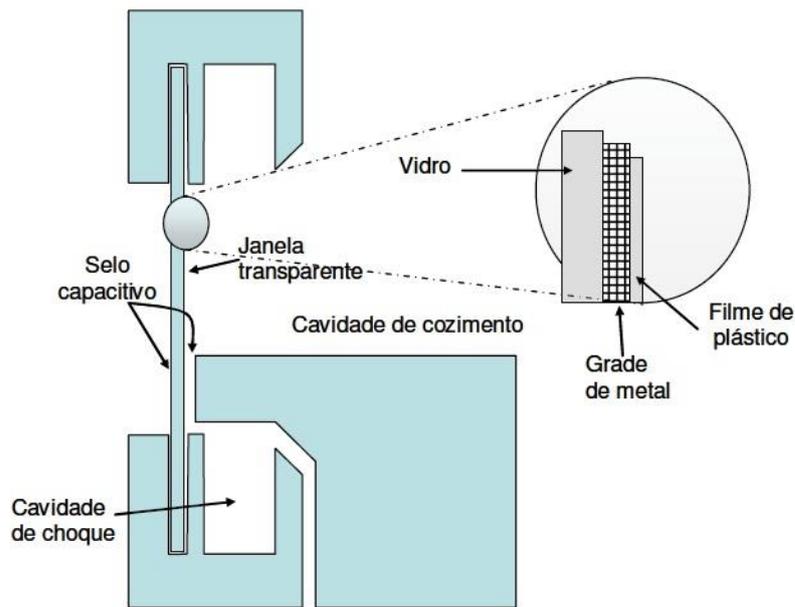


Figura 2.10: Diagrama esquemático dos dispositivos de segurança da porta frontal [10].

Caso haja a passagem de ondas pelo selo capacitivo, existe outro dispositivo que bloqueia a sua passagem denominado cavidade de choque. As dimensões da cavidade de choque correspondem a  $\frac{1}{4}$  de comprimento de onda da micro-onda gerada pelo forno. A onda que vaza pelo selo capacitivo incide no fundo da cavidade de choque e é refletida retornando até o ponto de vazamento com uma defasagem que resulta no seu cancelamento [10].

Por último, há a vedação de absorção, fabricada em ferrite emborrachada, que possui a capacidade de absorver ondas com frequências próximas de 2,45 GHz que venham a transpor a cavidade de choque. As tiras de ferrite são projetadas para absorver frequências próximas de 2,45 GHz de baixa energia e são colocadas ao redor da borda da porta frontal garantindo um ajuste perfeito entre a porta e a borda do forno [10].

Apesar de todo o aparato de segurança utilizado na fabricação dos fornos de micro-ondas, sua blindagem não é perfeita e, desse modo, nem toda a radiação permanece confinada na cavidade ressonante. Parte das micro-ondas vazam pelas “brechas” presentes na vedação eletromagnética da cavidade ressonante do forno. No entanto, há limites estabelecidos por organismos nacional e internacionais, quanto à máxima densidade de potência aceitável a extrapolar os limites da cavidade do forno.

No Brasil, a Norma Técnica NBR IEC/CISPR11:2012 [15], publicada pela Associação Brasileira de Normas Técnicas, estabelece limites de radiação para dispositivos ISM que operam na faixa de 0 a 400 GHz, baseados na publicação CISPR 11 da ITU-R, com o objetivo

de reduzir os efeitos da interferência não intencional, gerada por esses dispositivos, sobre equipamentos de radiocomunicação. O limite especificado para radiação eletromagnética emitida por fornos de micro-ondas domésticos, na faixa de 2,4 GHz, é de 110 dB $\mu$ V/m para um nível de pico medido a três metros de distância da fonte.

Anvisa estabelece, ainda, padrões de segurança para a operação de aparelhos que utilizam radiações no seu funcionamento, visando garantir que a utilização desses aparelhos não acarretará risco à saúde dos seus usuários. Para os fornos de micro-ondas, os padrões obrigatórios, relativos a vazamentos permissíveis a uma distância de cinco centímetros em relação à porta frontal do forno não podem ultrapassar um miliwatt por centímetro quadrado (1 mW/cm<sup>2</sup>) para o forno recém fabricado, e cinco miliwatts por centímetro quadrado (5 mW/cm<sup>2</sup>), para modelos usados [10]. O gráfico inserido na Figura 2.11 representa a variação desse limite em relação à distância entre o usuário e a porta frontal do forno.

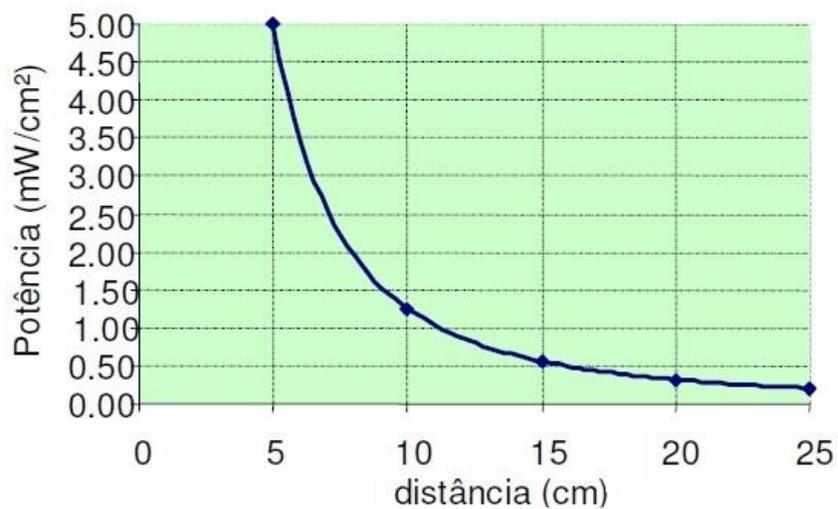


Figura 2.11: Variação do limite de emissão de radiação do forno de micro-ondas [10].

---

## 3. Padrões IEEE 802.11b/g/n

---

Quase na mesma época em que surgiram os notebooks, muitas pessoas sonhavam com o dia em que entrariam em um escritório e magicamente seu notebook se conectaria à Internet. Em consequência disso, diversos grupos começaram a trabalhar para descobrir maneiras de alcançar esse objetivo. A abordagem mais prática foi equipar o escritório e os notebooks com transmissores e receptores de rádio de ondas curtas para permitir a comunicação entre eles. Esse trabalho levou rapidamente à comercialização das redes sem fios por várias empresas [16].

O problema era encontrar redes que fossem compatíveis. Essa proliferação de padrões significava que um computador equipado com um rádio da marca X não funcionaria em uma sala equipada com uma estação base da marca Y. Finalmente, a indústria decidiu que um padrão de redes sem fio poderia ser uma boa ideia, e assim o comitê do IEEE, que padronizou as redes cabeadas, recebeu a tarefa de elaborar um padrão das redes sem fio [16].

Assim, em junho de 1997, o IEEE publicou o padrão IEEE 802.11 que definiu uma série de regras para as camadas física e de acesso ao meio para as redes sem fio, para operar no segmento de frequência compreendido entre 2.400 e 2.483,5 MHz, destinado pela UIT para operação de dispositivos ISM [17].

### 3.1. Padrão IEEE 802.11

O padrão IEEE 802.11 define uma arquitetura para as redes sem fio, baseada na divisão da área coberta pela rede em células. Essas células são denominadas de BSA (*Basic Service Area*). O tamanho da BSA (célula) depende das características do ambiente e da potência dos transmissores e receptores usados nas estações [18]. A Figura 3.1 ilustra o que seria a arquitetura básica de uma rede sem fio IEEE 802.11.

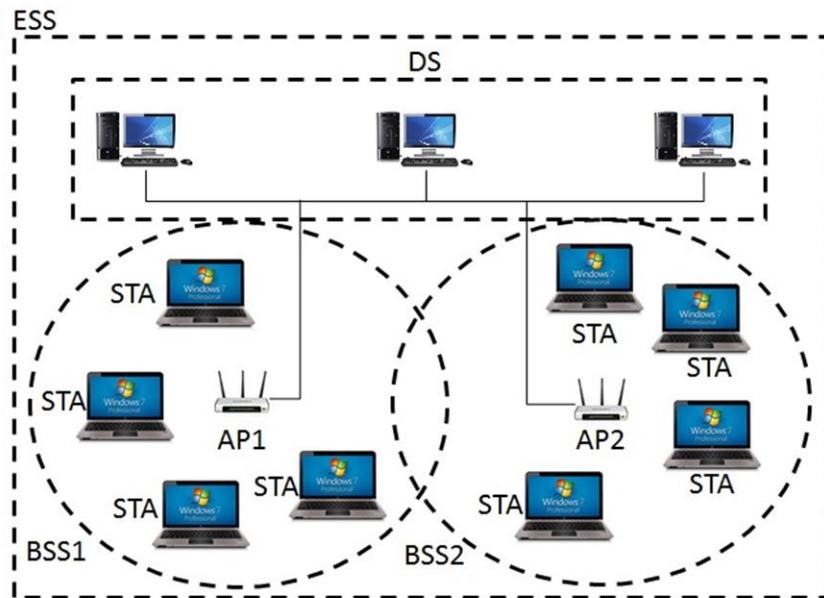


Figura 3.1: Arquitetura básica de uma rede sem fio [17].

Outros elementos que fazem parte do conceito da arquitetura de rede sem fio são descritos a seguir:

- a) **Conjunto de serviço básico (*Basic Service Set* – BSS):** representa um grupo de estações comunicando-se por radiodifusão ou infravermelho em uma BSA [17];
- b) **Estações de Trabalho (*Wireless LAN Station* – STA):** representam as estações (clientes) da rede [17];
- c) **Ponto de acesso (*Access Point* – AP):** são dispositivos de uma rede sem fio que realizam a interconexão entre todos os dispositivos móveis. Em geral se conectam a uma rede cabeada servindo de ponto de acesso para uma outra rede, como por exemplo a Internet [17];
- d) **Sistema de distribuição (*Distribution System* - DS):** representa uma infraestrutura de comunicação (*backbone*) que interliga múltiplas BSAs para permitir a construção de redes cobrindo áreas maiores que uma célula [17];
- e) **Conjunto de serviço estendido (*Extended Service Set* - ESS):** representa um conjunto de estações formado pela união de vários BSSs cujos APs estão conectados a uma mesma rede convencional por um sistema de distribuição. Nestas condições uma STA pode se movimentar de uma célula BSS para outra permanecendo conectada à rede. Este processo é denominado de Roaming [17].

Numa rede WLAN sem infraestrutura, conhecidas por redes *Ad Hoc*, as estações se comunicam entre si numa mesma célula, sem a necessidade de estações especiais, ou seja, sem necessidade dos APs para estabelecer as comunicações. Numa rede local com infraestrutura, é necessária a interconexão de múltiplos BBSs, formando um ESS. Nesse caso, a infraestrutura é representada pelos APs, e pelo sistema de distribuição que interliga esses APs [18].

### 3.1.1. Camada Física

A camada física do padrão 802.11 original foi definida com três técnicas de multiplexação: *Infrared (IR)*, *Frequency Hopping Spread Spectrum (FHSS)* e *Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS)* [19].

- ***Infrared (IR)***: usa transmissão difusa (isto é, não linear) a 0,85 ou 0,95 microm. São permitidas duas velocidades: 1 Mbps e 2 Mbps. A 1 Mbps, é usado um esquema de codificação no qual um grupo de 4 bits é codificado como uma palavra de código de 16 bits, contendo quinze bits 0 e um único bit 1, empregando o que é conhecido como código de Gray. Esse código se caracteriza pela propriedade de um pequeno erro na sincronização resultar em apenas um erro de bit na saída. A 2 Mbps, a codificação ocupa 2 bits e produz uma palavra de código de 4 bits, também com apenas um bit 1, que pode ser 0001, 0010, 0100 ou 1000. Os sinais de infravermelho não podem atravessar paredes; assim, células situadas em salas diferentes ficam bem isoladas umas das outras [16]. O uso dessa técnica em redes sem fio não foi bem aceita pelo mercado, não tendo, dessa forma, implementações comerciais bem sucedidas.
- ***Frequency Hopping Spread Spectrum (FHSS)***: consiste em transmitir a informação em uma dada frequência por um curto período de tempo e, logo após, chavear para outra frequência de acordo com um padrão de salto em frequência pré-definido e conhecido tanto pelo transmissor quanto pelo receptor, dentro de uma determinada faixa. A faixa ISM de 2,4 GHz é dividida em canais de 1 MHz e o transmissor modifica o canal utilizado a cada 400 milissegundos ou menos. A frequência é definida de acordo com o padrão de salto e é, então, modulada utilizando o esquema 2-GFSK para 1 Mbps e 4-GFSK para 2 Mbps [19]. A Figura 3.2 ilustra o funcionamento da técnica FHSS.

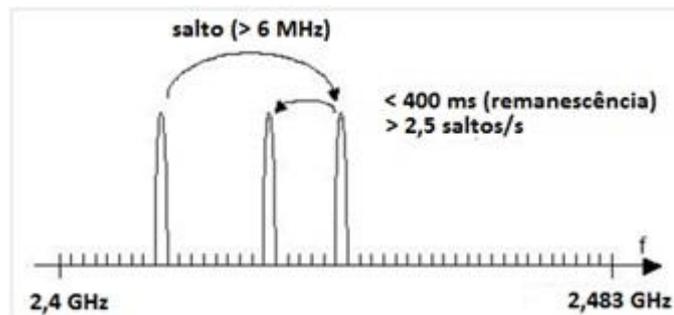


Figura 3.2: Técnica de multiplexação FHSS [18].

- a) **Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS):** consiste em múltiplos dados sendo transmitidos através de uma sequência binária de dados pseudoaleatória (PRN), a uma taxa de bit mais alta, chamada *chipping sequence*. Desse modo, a informação é recuperada desde que a *chipping sequence* seja conhecida. Essa técnica separa a faixa ISM de 2,4 GHz em 11 canais sobrepostos espaçados em 5 MHz, na qual o transmissor sempre envia símbolos a 11 Mbps, que requer 22 MHz de largura de banda. O transmissor utiliza as modulações DBPSK e DQPSK, que resulta nas taxas de transmissão de 1 Mbps e 2 Mbps [19]. A Figura 3.3 mostra a disposição dos canais DSSS na faixa ISM de 2,4 GHz.

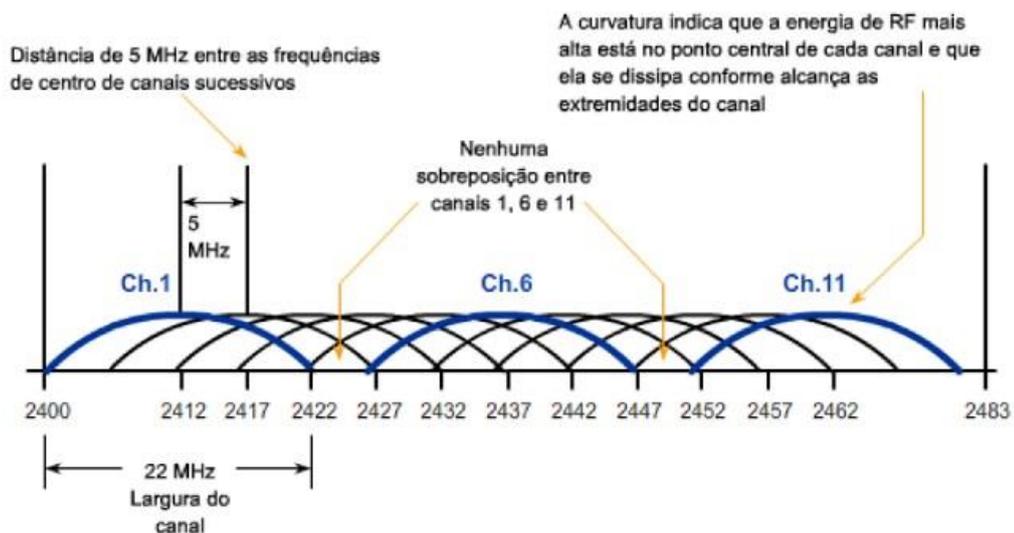


Figura 3.3: Disposição dos canais na faixa ISM de 2,4 GHz para a DSSS [20].

### 3.1.2. Camada de Enlace de Dados

Esta camada está dividida em duas subcamadas: a Subcamada MAC e a Subcamada LLC (Controle de enlace).

- b) **Subcamada MAC (Controle de acesso ao meio):** Suporta o serviço de acesso ao meio para transmissão dos *frames* (quadros). Dependendo do padrão, este tipo de acesso pode ser suportado com esquemas baseado em contenção ou transmissão livre [20].
- c) **Subcamada LLC (Controle de enlace):** é responsável pela condução às conexões lógicas e interface com as camadas superiores. Dependendo do padrão, a subcamada de controle de enlace deve suportar: esquemas de retransmissão e detecção de erros usando algoritmos ARQ (*Automatic Repeat Request*); Controle de admissão; Gerenciamento de conexões; e Controle de recursos rádio [20].

#### 3.1.2.1. Subcamada MAC

Além de definir um mecanismo para transmissão física usando radiofrequência ou infravermelho, o IEEE definiu um protocolo de acesso ao meio (subcamada MAC do nível de enlace de dados), denominado de DFWMAC (*Distributed Foundation Wireless Medium Access Control*), que suporta dois métodos de acesso: um método distribuído básico, que é obrigatório, e um método centralizado, que é opcional, podendo esses dois métodos coexistirem. O protocolo de acesso ao meio das redes 802.11 também tratam de problemas relacionados com estações que se deslocam para outras células (*roaming*) e com estações perdidas (*hidden node*) [20].

O método de acesso distribuído forma a base sobre a qual é construído o método centralizado. Ambos, que também podem ser chamados de funções de coordenação (*Coordination Functions*), são usados para dar suporte à transmissão de tráfego assíncrono ou tráfego com retardo limitado (*time bounded*) [20].

Uma função de coordenação é usada para decidir quando uma estação tem permissão para transmitir. Na função de coordenação distribuída (*Distributed Coordination Functions - DCF*), essa decisão é realizada individualmente pelos pontos da rede, podendo, dessa forma, ocorrer colisões. Na função de coordenação centralizada, também chamada de função pontual

(*Point Coordination Function* - PCF), a decisão de quando transmitir é centralizada em um ponto especial, que determina qual estação deve transmitir em que momento, evitando teoricamente a ocorrência de colisões [20].

### 3.1.2.1.1. Função de Coordenação Distribuída – DFC

Ao se empregar o modo DCF, o 802.11 utiliza um protocolo chamado CSMA/CA, ou CSMA com abstenção de colisão. Nesse protocolo, são usadas tanto a detecção do canal físico quanto a do canal virtual. O CSMA/CA admite dois métodos de operação. No primeiro, quando uma estação quer transmitir, ela verifica a disponibilidade do canal. Se ele estiver ocioso, a estação simplesmente começará a transmitir. Ela não monitora o canal enquanto está transmitindo, mas emite seu quadro inteiro, que pode muito bem ser destruído no receptor devido à interferência. Se o canal estiver ocupado, a transmissão será adiada até o canal ficar disponível, e então a estação começará a transmitir. Se ocorrer uma colisão, as estações que colidirem terão de esperar um tempo aleatório, usando o algoritmo de recuo binário exponencial das redes Ethernet, e então tentarão novamente mais tarde [16].

O outro modo de operação do CSMA/CA se baseia no MACAW e emprega a detecção de canal virtual, como ilustra a Figura 3.4. Nesse exemplo, A quer transmitir para B. C é uma estação dentro do alcance de A (e possivelmente dentro do alcance de B, mas isso não importa). D é uma estação dentro do alcance de B, mas não dentro do alcance de A. O protocolo começa quando A decide transmitir dados para B. Ela inicia a transmissão enviando um quadro RTS para B, a fim de solicitar permissão para enviar um quadro. Quando recebe essa solicitação, B pode decidir conceder a permissão e, nesse caso, envia de volta um quadro CTS. Após a recepção do CTS, A envia seu quadro e inicia um timer ACK. Ao receber corretamente o quadro de dados, B responde com um quadro ACK, concluindo a troca de quadros. Se o timer ACK de A expirar antes do quadro ACK voltar a ele, o protocolo inteiro será executado novamente [16].

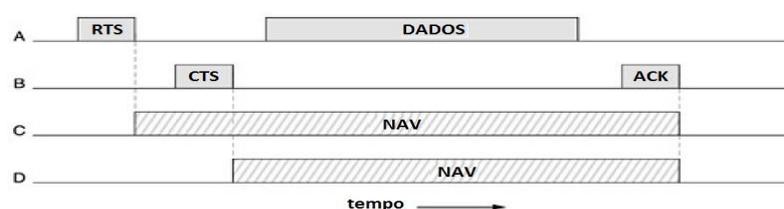


Figura 3.4: Detecção de canal virtual com CSMA/CA [16].

Agora, considerando essa troca sob os pontos de vista de C e D. C está dentro do alcance de A, e então pode receber o quadro RTS. Se o fizer, C perceberá que alguém vai transmitir dados em breve e assim desiste de transmitir qualquer coisa até a troca ser concluída. A partir das informações fornecidas na solicitação RTS, C pode avaliar quanto tempo a sequência irá demorar, incluindo o ACK final, e assim reivindica uma espécie de canal virtual ocupado por ela própria, indicado por NAV (vetor de alocação de rede) na Figura 3.4. D não escuta o RTS, mas escuta o CTS, e assim também reivindica o sinal NAV para ela própria. Observe que os sinais NAV não são transmitidos; eles são apenas lembretes internos de que a estação deve se manter inativa por um determinado período de tempo [16].

### 3.1.2.1.2. Função de Coordenação Pontual – PFC

O outro modo permitido é o PCF, no qual a estação base efetua o *polling* das outras estações, perguntando se elas têm algum quadro a enviar. Tendo em vista que a ordem de transmissão é totalmente controlada pela estação base em modo PCF, não ocorre nenhuma colisão. O padrão prescreve o mecanismo de *polling*, mas não a frequência, a ordem, ou mesmo se todas as estações precisam receber um atendimento idêntico [16].

O mecanismo básico consiste na difusão periódica pela estação base de um quadro de baliza (de 10 a 100 vezes por segundo). O quadro de baliza contém parâmetros do sistema, como sequências de saltos (*hops*) e tempos de parada (para o FHSS), sincronização do *clock*, etc. Ele também convida novas estações a se inscreverem no serviço de *polling*. Depois que uma estação se inscreve para receber o serviço de *polling* a uma certa taxa, ela tem a garantia efetiva de uma certa fração da largura de banda, tornando possível assim oferecer garantias de qualidade de serviço [16].

## 3.2. Evolução do Padrão IEEE 802.11

Quase imediatamente após a implementação do padrão IEEE 802.11, os fabricantes e usuários reclamaram que ela era muito lenta, e assim, o IEEE iniciou os trabalhos em padrões mais rápidos.

Dessa forma, nos anos seguintes, após passar por revisões, o padrão IEEE foi subdividido em vários outros padrões, de acordo com as técnicas de multiplexação utilizadas, os tipos de modulação implementados, as faixas de frequência de operação e as taxas de transmissão permitidas. A presente pesquisa abordou os padrões IEEE 802.11b, 802.11g e 802.11n, em razão destes serem padrões largamente utilizados atualmente, e ainda, por utilizarem a faixa ISM de 2,4 GHz e, por isso, estarem sujeitos aos efeitos das interferências provocadas pelos fornos de micro-ondas. A Tabela 1 mostra as principais características dos padrões IEEE 802.11b/g/n.

Tabela 1: Principais características dos padrões IEEE 802.11b/g/n [19].

Padrão	802.11	802.11b	802.11g	802.11n
Faixa de operação	2400–2483,5 MHz	2400–2483,5 MHz	2400–2483,5 MHz	2400–2483,5 MHz 5725–5850 MHz
Largura de banda	20 MHz	20 MHz	20 MHz	20 MHz e 40 MHz
Taxa máxima de transmissão	2 Mbps	11 Mbps	54 Mbps	600 Mbps
Acesso ao meio	CSMA/CA com ACK	CSMA/CA com ACK	CSMA/CA com ACK	CSMA/CA com ACK
Multiplexação	FHSSS e DSSS	DSSS e HR/DSSS	DSSS e OFDM	OFDM/MIMO
Modulação	DQPSK e DBPSK	DQPSK, DBPSK e CCK	CCK, BPSK, QPSK, 16 QAM e 64 QAM	BPSK, QPSK, 16 QAM e 64 QAM

### 3.3. Padrão IEEE 802.11b

Lançado em 1999, o padrão IEEE 802.11b foi o primeiro padrão derivado do IEEE 802.11 originais. Foi definido para operar na mesma faixa ISM de 2,4 GHz utilizando a técnica de multiplexação DSSS combinado com as modulações DBPSK e DQPSK, provendo taxas de 2 Mbps e 1 Mbps, respectivamente. Ainda, para este padrão, foram definidas duas outras taxas de transmissão, uma de 5,5 Mbps e outra de 11 Mbps, através da utilização da HR/DSSS combinado com a modulação CCK [20].

A técnica de multiplexação *High Rate Direct Sequence Spread Spectrum* (HR/DSSS) é uma extensão da DSSS que introduziu no padrão IEEE 802.11 taxas de transmissão mais elevadas de 5,5 e 11 Mbps. Assim como a DSSS, a HR/DSSS utiliza um dos onze canais de 22 MHz da faixa de 2,4 GHz para transmitir e receber dados por meio da utilização de um código de espalhamento ou técnica de codificação diferente da DSSS, a CCK [21].

### 3.3.1. Modulações DBPSK e DQPSK

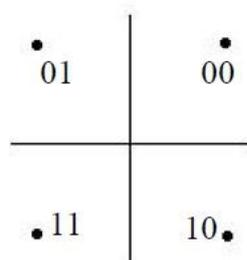
O funcionamento da modulação *differential phase shift keying* (DPSK) pode ser melhor explicado após o entendimento do funcionamento da modulação *phase shift keying* (PSK). Na modulação PSK, as formas de onda do sinal  $M$  são representadas conforme mostra a expressão (2) [22].

$$S_m(t) = g(t) \times \cos\left[2\pi f_c t + \frac{2\pi}{M}(m-1)\right] \quad \therefore m = 1, 2, \dots, M \quad (2)$$

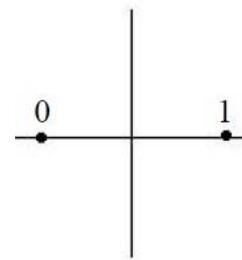
$$S_m(t) = g(t) \times \underbrace{\cos\left[\frac{2\pi}{M}(m-1)\right]}_{\text{Componente de quadratura}} \times \underbrace{\cos(2\pi f_c t)}_{\text{Portadora}} - g(t) \times \underbrace{\sin\left[\frac{2\pi}{M}(m-1)\right]}_{\text{Componente de quadratura}} \times \underbrace{\sin(2\pi f_c t)}_{\text{Portadora}} \quad (3)$$

Onde,  $g(t)$  é a forma do pulso no sinal e  $M$  representa a quantidade de fases da portadora que transporta a informação transmitida [22].

Desse modo, a modulação BPSK é obtida através da equação 3, com  $M = 2$ , duas fases, enquanto a modulação QPSK é obtida com  $M = 4$ , quatro fases [22], conforme ilustrado na Figura 3.5.



(a) Modulação QPSK.



(b) Modulação BPSK.

Figura 3.5: Diagrama de constelações para os sinais PSK [22].

A modulação DPSK difere da PSK pois nela não há uma atribuição de fase direta para os símbolos da informação modulada. Ao invés disso, o modulador detecta a diferença entre as fases atual e anterior, e essa mudança de fase indica a mudança no símbolo transmitido [22].

O DPSK foi empregado no padrão IEEE 802.11b porque a modulação diferencial torna desnecessária a detecção coerente, necessária em sistemas PSK. Em outras palavras, não há necessidade de se estimar a fase da portadora, portanto, a implementação dos receptores é bem mais simples [23].

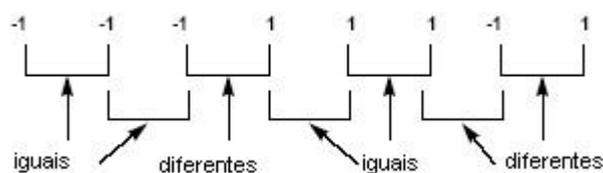
A utilização das modulações DBPSK e DQPSK, em conjunto com a técnica DSSS, permitem aos sistemas que utilizam o padrão 802.11b atingirem velocidades de transmissão de 1 Mbps e 2 Mbps, respectivamente.

### 3.3.2. Modulação CCK

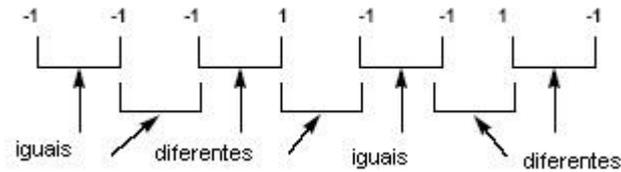
Em 1998, a Lucent Technologies e a Harris Semiconductor desenvolveram o esquema modulação chamado Chaveamento de Código Complementar (*Complementary Code Keying – CCK*) para alcançar taxas de transmissão de 5,5 Mbps e 11 Mbps em redes sem fio. O IEEE adotou o CCK e publicou a revisão IEEE 802.11b em 1999 [18].

A modulação CCK é uma forma de espalhamento espectral que utiliza códigos complementares binários. Esses códigos são sequências de mesmo comprimento, sendo que o número de pares de elementos iguais com uma separação determinada dentro de uma sequência é igual ao número de pares de elementos diferentes com esta mesma separação dentro da sequência complementar e vice-versa. Sequências complementares possuem autocorreção nula [24].

Os códigos complementares binários são um subgrupo dos códigos polifásicos que também são sequências com propriedades complementares, de modo similar aos códigos complementares descritos acima, porém seus elementos possuem parâmetros de fase que podem variar entre os elementos do conjunto  $\{1, -1, j, -j\}$  [24]. A Figura 3.6 ilustra duas sequências de códigos complementares.



(a) Sequência 1.



(b) Sequência 2.

Figura 3.6: Sequência de códigos complementares [24].

A sequência complementar binária inclui normalmente 8 bits (d7, d6, d5, d4, d3, d2, d1, d0) e é utilizada para a geração de uma palavra código complexa obtida pela fórmula:

$$c = [e^{j(\varphi_1+\varphi_2+\varphi_3+\varphi_4)} e^{j(\varphi_1+\varphi_3+\varphi_4)}, e^{j(\varphi_1+\varphi_2+\varphi_4)}, -e^{j(\varphi_1+\varphi_4)} e^{j(\varphi_1+\varphi_2+\varphi_3)}, e^{j(\varphi_1+\varphi_3)}, -e^{j(\varphi_1+\varphi_2)}, e^{j\varphi_1}] \quad (4)$$

Como pode ser visto, esta palavra código complexa compreende 8 elementos, os quais são denominados de *chips*. Estes *chips* são definidos pelos parâmetros de fase  $\varphi_1$  a  $\varphi_4$ , os quais são determinados pelos bits da sequência complementar binária [24], como ilustrado na Tabela 2.

Tabela 2: Sequência complementar CCK [24].

Par de bits	Parâmetro de fase
(d1, d0)	$\varphi_1$
(d3, d2)	$\varphi_2$
(d5, d4)	$\varphi_3$
(d7, d6)	$\varphi_4$

No caso do sistema CCK, a codificação destes parâmetros de fase é feita com base na modulação DQPSK, de modo que os resultados mostrados na Tabela 3 são obtidos.

Tabela 3: Sequência complementar CCK com modulação DQPSK [24].

Par de bits	Parâmetro de fase
(d1, d0)	0
(d3, d2)	$\pi$

(d5, d4)	$\pi/2$
(d7, d6)	$-\pi/2$

É importante notar que, em se utilizando a modulação ilustrada na Tabela 3 para os parâmetros de fase  $\phi_1$  a  $\phi_4$ , e aplicando seus valores correspondentes a função de geração da palavra código mencionada anteriormente, os únicos valores possíveis para os chips da palavra código são  $\{1, -1, j, -j\}$ . Portanto, cada 8 bits de sequência de código complementar recebidos no modulador de banda-base são utilizados para modular as fases  $\phi_1$  a  $\phi_4$  e em seguida formar a palavra código complexa constituída de  $\{1, -1, j, -j\}$  correspondente a esta sequência [24].

### 3.4. Padrão IEEE 802.11g

O padrão IEEE 802.11g foi aprovado em 12 de junho de 2003 para operar na faixa ISM de 2,4 GHz. O propósito desse padrão era aprimorar a velocidade o padrão 802.11 original para operar com taxas de transmissão de até 54 Mbps na faixa de 2,4 GHz, o que foi obtido por meio da utilização da técnica de multiplexação ortogonal por divisão de frequência (OFDM), utilizada anteriormente pelo padrão IEEE 802.11a, que opera na faixa ISM de 5 GHz [16].

Uma das principais vantagens do padrão IEEE 802.11g é sua compatibilidade com o padrão IEEE 802.11b. Por esta razão, combinada com as altas taxas de transmissão, compatíveis com o padrão 802.11a, o 802.11g passou a ser um dos padrões mais utilizados dentre os padrões da família 802.11 [25].

Enquanto o IEEE 802.11b utiliza apenas a técnica DSSS, o IEEE 802.11g utiliza alternativamente as técnicas DSSS ou OFDM, ou ambas combinadas. O uso combinado de ambas as técnicas DSSS e OFDM é obtido através da disponibilidade de quatro camadas físicas diferentes no IEEE 802.11g. Essas camadas, definidas no padrão como taxas físicas estendidas, ou *extended rate physicals* (ERP), coexistem durante a transmissão/recepção dos frames. Assim, o transmissor e o receptor têm a opção de selecionar e utilizar uma das quatro camadas, desde que ambos suportem a opção selecionada [25].

As quatro camadas físicas definida para o padrão IEEE 802.11g são:

- a) **ERP-DSSS/CCK:** A camada física utilizada pelo padrão IEEE 802.11b. A tecnologia DSSS é utilizada combinada com a modulação CCK. As taxas de transmissão suportadas são exatamente as mesmas do padrão 802.11b [25].
- b) **ERP-OFDM:** A camada física típica do padrão 802.11g. A técnica OFDM é utilizada para prover taxas de transmissão compatíveis com as taxas do padrão IEEE 802.11a, na faixa de 2,4 GHz [25].
- c) **ERP-DSSS/PBCC:** Esta camada física foi introduzida no padrão IEEE 802.11b e suporta as mesmas taxas de transmissão que a camada DSSS/CCK, utilizando a técnica DSSS com o algoritmo de codificação PBCC. No padrão IEEE 802.11g o conjunto de taxas de transmissão permitidos foi estendido, implementando as velocidades de 22 e 33 Mbps [25].
- d) **DSSS/OFDM:** Utiliza uma combinação híbrida de DSSS e OFDM. O cabeçalho do pacote é transmitido utilizando a técnica DSSS, enquanto o *payload* é transmitido utilizando OFDM. O objetivo deste método de transmissão híbrido é cobrir aspectos de interoperabilidade [25].

Das quatro camadas físicas apresentadas, as duas primeiras são mandatórias, ou seja, todos os dispositivos IEEE 802.11g devem suportá-las. As outras duas são opcionais. A Tabela 4 resume as taxas de transmissão suportadas para as diferentes camadas físicas do padrão IEEE 802.11g [25].

Tabela 4: Taxas suportadas para as diferentes camadas físicas IEEE 802.11g [25].

Camada física	Taxa de transmissão suportada [Mbps]
ERP-DSSS	1, 2, 5,5 e 11
ERP-OFDM	6, 9, 12, 18, 24, 36, 48 e 54
ERP-DSSS/PBCC	1, 2, 5,5, 11, 22 e 33
DSSS/OFDM	6, 9, 12, 18, 24, 36, 48 e 54

### 3.4.1. Orthogonal Frequency Division Multiplex (OFDM)

A técnica OFDM utiliza diversas portadoras ortogonais para transmitir uma informação dividida em várias partes [16].

No processo de transmissão utilizando OFDM, a largura de banda utilizável é dividida em várias faixas menores, onde subportadoras em frequências diferentes são utilizadas para transmitir simultaneamente a informação. Cada portadora transporta apenas alguns bits da informação original, após passar pelos processos de embaralhamento (*interleaving*) e incluir códigos de correção de erro. Estas portadoras são ortogonais entre si, para evitar que haja interferência entre elas. Isso significa que o espaçamento entre as portadoras é igual ao inverso da duração de um símbolo [26].

As portadoras de baixa velocidade resultantes da técnica OFDM são mais tolerantes ao desvanecimento provocado pelas múltiplas reflexões no percurso do sinal. Outra característica da OFDM é a alta relação entre potência de pico e potência média no tempo (*peak-to-average power ratio* – PAPR), e uma distribuição de energia que se assemelha ao ruído Gaussiano [26].

Antes do lançamento do padrão IEEE 802.11n, que será visto mais adiante, a técnica OFDM era baseada em apenas 52 portadoras (26 x 2), espaçadas entre si em 312,5 kHz, totalizando cerca de 16,8 MHz para operar em canais de 20 MHz de largura de banda. As alterações mais recentes dessa tecnologia, utilizadas no padrão IEEE 802.11n, acrescentam mais subportadoras para serem transmitidas em canais de maior largura de banda, de 40 MHz [26].

Baseado nessas características, dispositivos que utilizam a tecnologia OFDM podem operar em vários modos diferentes:

**a) Modo *Legacy Non HT (High Throughput)***

- Modo de operação original da técnica OFDM, onde são utilizadas 52 portadoras ocupando cerca de 16,8 MHz do canal de 20 MHz [26], conforme ilustrado na Figura 3.7a.

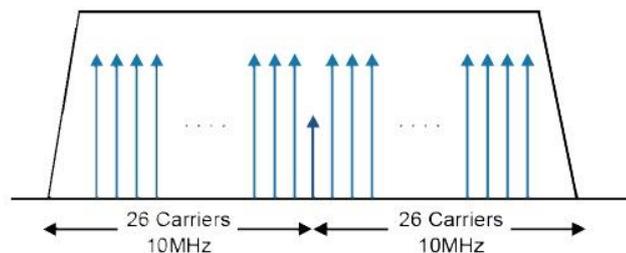
**b) Modo *Mixed HT (High Throughput)***

- No modo misto HT20, um canal de 20 MHz é ocupado incrementando-se o número de portadoras de 52 para 56 na porção HT, conforme Figura 3.7b. A porção original do preâmbulo ainda possui 52 subportadoras.
- No modo misto HT40, um canal de 40 MHz é ocupado utilizando dois canais adjacentes de 20 MHz, com um total de 114 portadoras (57 x 2) para a parte da informação. A parte original do preâmbulo possui um total de apenas 104

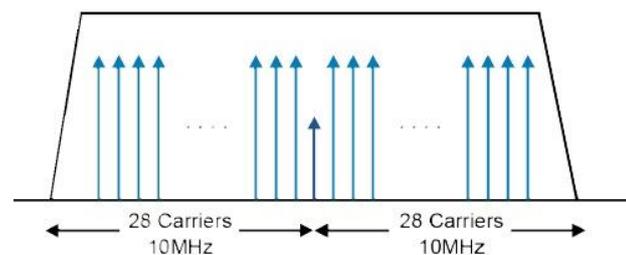
portadoras (52 x 2), conforme pode ser visto na Figura 3.7c. Os *frames* de controle são enviados em canais de 20 MHz com 52 portadoras, para possibilitar a interoperabilidade com o modo original [26].

c) **Modo *Greenfield HT (High Throughput)*:**

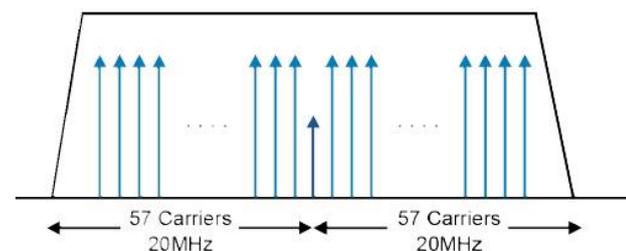
- No modo *Greenfield*, também disponível no HT20 e HT40, o número de portadoras é o mesmo definido no Modo *Mixed HT*. A principal diferença entre ambos é que no Modo *Greenfield* não possui o preâmbulo original, isto é, não há possibilidade de os dispositivos que utilizam a técnica OFDM original se comunicarem com este modo [26].



(a) Modulo *Legacy Non HT*.



(b) Modulo *Mixed* e *Greenfield HT20*.



(c) Modulo *Mixed* e *Greenfield HT40*.

Figura 3.7: Estrutura de portadoras OFDM [26].

O padrão IEEE 802.11g utiliza a técnica OFDM no modo *Legacy Non HT*. Nele, a taxa de transmissão varia de acordo com o esquema de modulação e a taxa de codificação utilizados, conforme mostra a Tabela 5.

Tabela 5: Modulação, taxa de codificação e velocidade no padrão IEEE 802.11g [26].

Modulação	Taxa de codificação	Taxa de transmissão [Mbps]
BPSK	1/2	6
BPSK	3/4	9
QPSK	1/2	12
QPSK	3/4	18
16 QAM	1/2	24
16 QAM	3/4	36
64 QAM	2/3	48
64 QAM	3/4	54

### 3.4.2. Modulação QAM

Na modulação QAM, tanto a fase como a amplitude da portadora variam de acordo com a informação digital a ser transmitida. A Figura 3.8 mostra o sinal 16 QAM para uma sequência de bits (1011, 0010 e 1101) contidas em cada símbolo [27].

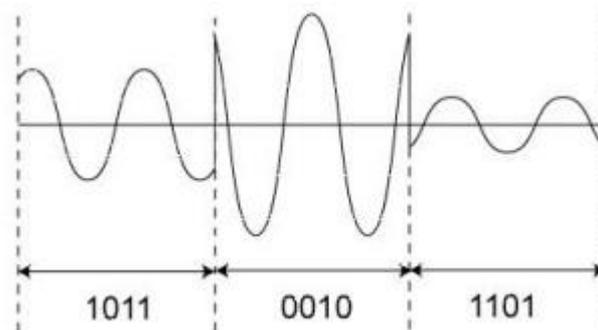


Figura 3.8: Sinal 16 QAM [27].

O sinal QAM transmitido para um símbolo  $i$  é descrito em (5), onde  $a_i$  e  $b_i$  são elementos de um par ordenado da constelação QAM transmitida e dependem de sua ordem,  $f_c$  é a frequência da portadora e  $E_0$  é a energia do símbolo que possui menor amplitude [28].

$$S_{i(t)} = \sqrt{\frac{2E_0}{T}} a_i \cos 2\pi f_c t - \sqrt{\frac{2E_0}{T}} b_i \sin 2\pi f_c t \quad (5)$$

Dessa forma, temos (6), onde  $d_{min}$  é a distância mínima entre dois pontos de mensagem na constelação [27].

$$\sqrt{E_0} = \frac{d_{min}}{2} \quad (6)$$

Dependendo do número  $M$  de símbolos possíveis, podem-se ter diferentes tipos de constelações QAM, onde  $M = 2^n$  e  $n$  é número de bits por símbolo. No caso da constelação QAM quadrada, os pares ordenados de coordenadas formam uma matriz quadrada do tipo:

$$[a_i, b_i] = \begin{bmatrix} (-n+1, n-1) & (-n+3, n-1) & \dots & (n-1, n-1) \\ (-n+1, n-3) & (-n+3, n-3) & \dots & (n+1, n-3) \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ (-n+1, -n+1) & (-n+3, -n+1) & \dots & (n-1, -n+1) \end{bmatrix} \quad (7)$$

Considerando a constelação 16 QAM, mostrada na Figura 3.9, a codificação dos pontos de mensagem ocorre da seguinte maneira [27]:

- a) Dois dos quatro bits, ou seja, os dois bits mais à esquerda, especificam o quadrante do plano (I, Q) onde o ponto de mensagem se situa. Dessa forma, iniciando pelo primeiro quadrante e prosseguindo no sentido anti-horário, os quatro quadrantes são representados pelos grupos de bits 11, 10, 00 e 01 [27].
- b) Os dois bits restantes são usados para representar um dos quatro símbolos possíveis que se situam dentro de cada quadrante do plano (I, Q) [27].

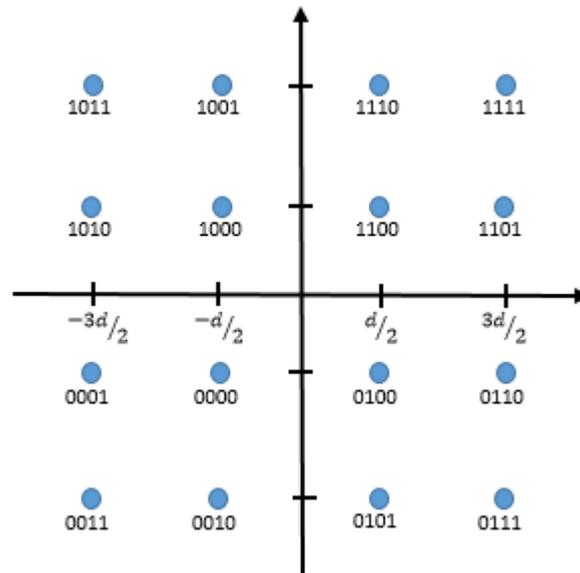


Figura 3.9: Constelação 16 QAM [27].

Para uma transmissão 16 QAM, a matriz da expressão (6) tem o seguinte valor:

$$[a_i, b_i] = \begin{bmatrix} (-3,3) & (-1,3) & (1,3) & (3,3) \\ (-3,1) & (-1,1) & (1,1) & (3,1) \\ (-3,-1) & (-1,-1) & (1,-1) & (3,-1) \\ (-3,-3) & (-1,-3) & (1,-3) & (3,-3) \end{bmatrix} \quad (8)$$

Na Figura 3.10 está ilustrado um esquema que mostra a geração de um sinal QAM. Primeiro, a sequência de dados binária é transformada para a forma polar por um codificador NRZ (*nonreturn-to-zero*). Assim, os bits “1” e “0” são representados por  $+E_0$  e  $-E_0$ , respectivamente. A forma de onda resultante é dividida por um demultiplexador em duas ondas separadas, consistindo de bits pares e ímpares [27]. Essas duas ondas são iguais à (9) e (10) que são usadas para modular um par de portadoras  $f_c$ . Os sinais resultantes da modulação (componentes em fase e em quadratura) são somados gerando o sinal QAM [27].

$$a_1 = \sqrt{E_0} a_i \quad (9)$$

$$a_2 = \sqrt{E_0} b_i \quad (10)$$

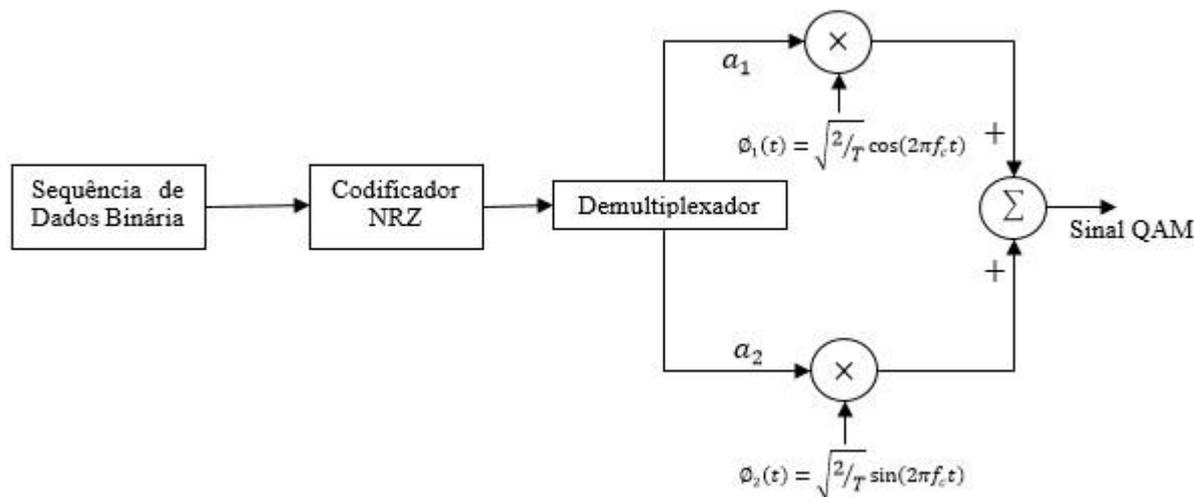


Figura 3.10: Esquema de um modulador QAM [27].

O receptor QAM consiste de um par de correlatores com entrada em comum, composto por um par de osciladores  $\phi_1$  e  $\phi_2$ , semelhantes ao do transmissor, seguidos por um filtro passa-baixa com largura de banda igual a  $L$  vezes o valor do período de bits. As saídas dos correlatores  $x_1(t)$  e  $x_2(t)$  são comparadas, nos dispositivos de decisão com valores de limiar, que irão depender da ordem da modulação QAM utilizada. Para um sistema, por exemplo, 16-QAM cada dispositivo de decisão terá 4 regiões de decisão. Para 64-QAM o número de regiões de decisão em cada dispositivo passa a ser 8 [27].

### 3.5. Padrão IEEE 802.11n

O padrão IEEE 802.11n foi aprovado em meados de 2003 pelo IEEE para operar nas faixas ISM de 2,4GHz e 5 GHz, com o objetivo de implementar modificações para as camadas física e de acesso ao meio de modo a possibilitar a obtenção de taxas de transmissão mais elevadas, bem como, assegurar a sua compatibilidade com os padrões anteriores [29].

Assim como o padrão IEEE 802.11g, o padrão IEEE 802.11n também utiliza a técnica de multiplexação OFDM. No entanto, para este padrão, a técnica OFDM suporta, além do modo *Legacy Non HT* para garantir a interoperabilidade com padrões anteriores, os modos *Mixed HT20/HT40* e *Greenfield HT20/HT40* [26], cujas características foram descritas no item anterior.

Com várias taxas de transmissão possíveis, o que garante sua compatibilidade com outros padrões, o padrão IEEE 802.11 utiliza os seguintes esquemas de modulação: BPSK, QPSK, 16 QAM e 64 QAM. Esses esquemas de modulação combinados com as taxas de codificação possíveis e com as configurações de diversidade espacial fazem com que o padrão IEEE suporte uma gama elevada de taxa de transmissão que vão de 6,5 Mbps a 600 Mbps [30].

### 3.5.1. Largura de Banda de 40 MHz (*Channel Bonding*)

*Channel Bonding*, ou junção de canais, consiste de usar dois canais de 20 MHz para formar um único canal de 40 MHz e, desse modo, dobrar a largura da banda utilizada possibilitando alcançar taxas de transferência mais elevadas [31]. Esse canal de 40 MHz de largura de banda é utilizado, opcionalmente, pelos dispositivos do padrão IEEE 802.11n quando operando com a técnica OFDM nos modos *Mixed HT40* e *Greenfield HT40*.

A Figura 3.11 mostra os parâmetros da máscara de espectro de um canal de 40 MHz utilizado pelo padrão IEEE 802.11n.

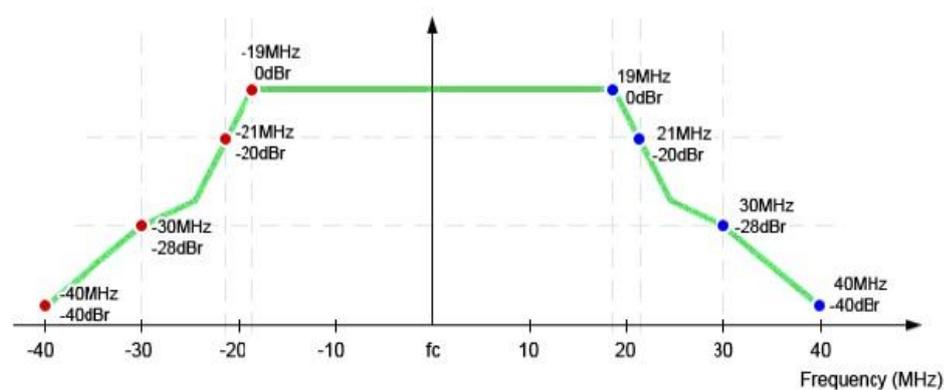


Figura 3.11: Máscara de espectro para o canal de 40 MHz IEEE 802.11n [30].

Transmitir num canal 802.11n de 40 MHz pode comprometer quase toda a faixa ISM de 2,4 GHz, consumindo 9 dos 11 canais disponíveis: a frequência central mais quatro canais à esquerda e quatro à direita. Há grande dificuldade de se encontrar tantos canais adjacentes disponíveis na faixa extremamente congestionada de 2,4 GHz, assim, a utilização do *Channel Bonding* dificilmente é viável [30].

### 3.5.2. Multiple Impult Multiple Output (MIMO)

Múltiplas Entradas e Múltiplas Saídas (*Multiple Impult Multiple Output – MIMO*) é uma tecnologia que utiliza múltiplas antenas para transmitir mais informações do que é possível usando uma única antena. Uma maneira de fornecer isso é através do SDM (*Spatial Division Multiplexing*) que tem o objetivo de transmitir vários fluxos de dados independentes, transferidos simultaneamente dentro de um canal específico. O SDM pode aumentar significativamente a taxa de transferência de dados como o número de fluxos de dados. Cada fluxo de dados requer uma antena no transmissor e outra no receptor. Além disso, a tecnologia MIMO requer um conversor analógico-digital separado para cada antena MIMO [32]. O padrão IEEE 802.11n define algumas configurações “M x N” para as antenas transmissoras (M) e receptoras (N), variando de 1 x 1 a 4 x 4 [30].

A técnica espacial MIMO fornece uma solução bastante interessante para o problema dos multipercursos nas transmissões sem fio, utilizando múltiplos sinais em múltiplos percursos. Usando a dimensão espacial de um enlace de comunicação, os sistemas MIMO podem alcançar taxas significativamente mais elevadas do que os sistemas tradicionais de Entradas Simples e Saídas Simples (*Single Impult Single Output – SISO*). Os sistemas MIMO 2 x 2 produzem dois fluxos de dados espaciais que efetivamente dobram a taxa de transmissão máxima em relação aos sistemas SISO 1 x 1 [32]. A Figura 3.12 ilustra a diferença na operação de sistemas de comunicação SISO e MIMO.

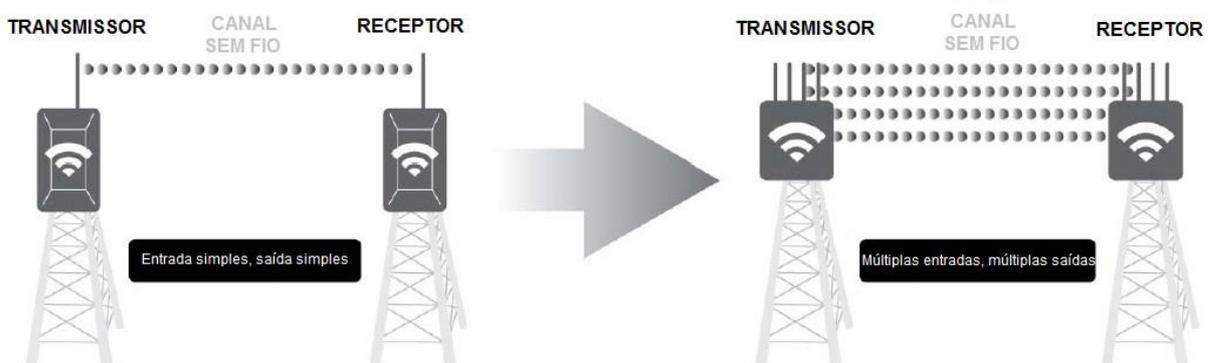


Figura 3.12: Sistemas de comunicação SISO e MIMO [32].

Em geral, quanto mais antenas um dispositivo IEEE 802.11n utilize simultaneamente, maior a taxa de transmissão máxima. No entanto, as múltiplas antenas não aumentam por elas

mesmas a taxa de transmissão de um sistema sem fio. Essas melhorias na velocidade vêm da maneira como o dispositivo MIMO utiliza essas múltiplas antenas, ou seja, as técnicas avançadas de processamento de sinal implementadas no 802.11n [30], conforme mostra a Figura 3.13.

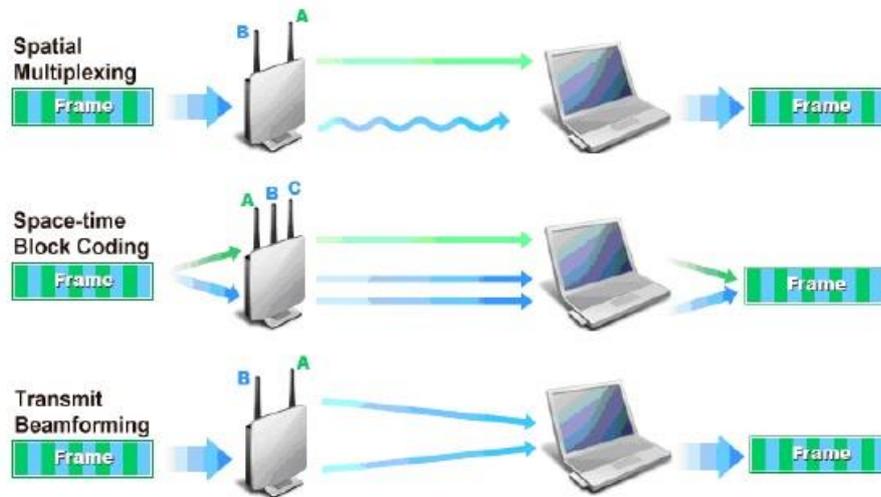


Figura 3.13: Técnicas de processamento de sinal MIMO [30].

Conforme pode ser observado na Figura 3.13, as técnicas de processamento de sinal utilizadas em sistemas MIMO são três:

- a) **Multiplexação Espacial (*Spatial Multiplexing* – SM):** Subdivide o fluxo de sinal de saída em múltiplas partes, transmitidas através de múltiplas antenas. Em razão de se propagarem por diferentes caminhos, esses “pedaços”, usualmente chamados de *streams*, chegam ao receptor com níveis de potência e atrasos diferentes entre si. Desde que os *streams* cheguem ao receptor com assinaturas espaciais suficientemente distintas, um receptor SM é capaz de montá-las de volta e refazer o sinal original. Todos os dispositivos IEEE 802.11n devem implementar pelo menos dois fluxos espaciais, até um máximo de quatro [30].
- b) **Codificação de Blocos Espaço-Tempo (*Space-Time Block Coding* – STBC):** Envia fluxos de sinal de saída com redundância utilizando até quatro *streams* espaciais diferentemente codificados, cada um transmitido através de diferentes antenas. Ao comparar os *streams* espaciais recebidos, o receptor tem melhores chances de determinar precisamente o fluxo de sinal original na presença de interferência

eletromagnética ou outras distorções. Ou seja, a STBC melhora a confiabilidade do sistema, reduzindo a taxa de erro para uma determinada relação sinal-ruído (SNR) [30].

- c) **Transmissão por Formação de Feixe (*Transmit Beamforming - TxBF*)**: Direciona um fluxo de sinal de saída para o receptor pretendido, concentrando energia de RF transmitida em uma determinada direção. Esta técnica aproveita os impactos aditivos e destrutivos do ambiente, explorando fenômenos RF como reflexão e multipercurso para melhorar a intensidade do sinal recebido e sustentar maiores taxas de dados do sinal. Para orientar o sinal na melhor direção, o transmissor precisa saber como esse sinal provavelmente será recebido. Este "conhecimento do canal" pode ser obtido implicitamente (assumindo que a propagação é idêntica em ambos os sentidos) ou explicitamente (através da obtenção do *feedback* do receptor). Este recurso opcional do padrão 802.11n ainda não é amplamente aplicado [30].

---

## 4. *Cyclic Redundancy Check (CRC)*

---

### 4.1. Definição

A Checagem de Redundância Cíclica (*Cyclic Redundancy Check – CRC*) é uma técnica de detecção de erros em sinais digitais, porém não para a correção dos erros detectados. No método CRC, um certo número de bits de checagem, geralmente chamado de *checksum*, é apensado à mensagem a ser transmitida. O receptor pode verificar se os bits de checagem coincidem ou não com os dados transmitidos, para determinar com um certo grau de confiabilidade se ocorreu ou não erro durante a transmissão. Se um erro ocorreu, o receptor envia uma sinalização, *negative acknowledgement* (NAK), de volta para o transmissor, solicitando que a mensagem seja retransmitida [33].

### 4.2. Fundamentos Teóricos

O CRC é baseado em aritmética polinomial, ou seja, sobre a computação do resto da divisão de um polinômio por outro, ambos em GF (2) (campo de Galois com 2 elementos) [34].

Um polinômio em GF (2) possui uma única variável  $x$  cujos coeficientes são 0 ou 1. A adição e subtração são feitas em módulo 2. A aritmética módulo 2 pode ser facilmente calculada através de uma operação lógica “ou-exclusivo” (do inglês “xor – *exclusive or*”) realizada bit a bit entre os coeficientes do polinômio, ou seja, dos dígitos binários [34].

Do mesmo modo, a multiplicação destes polinômios é simples. O produto de um coeficiente por outro dado pela lógica do operador “e” (do inglês “*and*”), e os produtos parciais são somados utilizando o operador “ou exclusivo”. A multiplicação não é necessária para calcular o *checksum* CRC [34].

No que diz respeito à divisão, existem diversas formas de realizar a divisão de módulo 2 entre dois números binários. A melhor maneira é fazer a representação polinomial do

dividendo “D” e do divisor “d”, e subtrair conseqüentemente os monômios do polinômio (D). Ao dividendo polinomial “D” inicial, é concatenado à sua direita tantos monômios quanto o grau do polinômio “d” [34]. A ideia é acrescentar um total de verificação ao final do quadro, de forma que o polinômio representado pelo quadro concatenado seja divisível por “D” [15].

No CRC os bits de *checksum* são adicionados ao trem de bits do *frame* para garantir que o *frame* recebido seja divisível por um polinômio  $g(x)$ , denominado polinômio gerador. Assim sendo, podemos transformar o *frame*  $f(x)$  num polinômio  $T(x)$  que é divisível por  $g(x)$ . Se houver erros em  $T(x)$ , estes assumem a forma de uma *string* diferente  $E(x)$  e, no final, os bits recebidos são  $T(x)+E(x)$  [34].

Quando o receptor recebe um *frame* correto, ele é dividido pelo polinômio  $g(x)$  e o resto da divisão obtida é nula. A questão que se coloca é quando o *frame* recebido  $T(x)+E(x)$  é dividido pelo  $g(x)$  retorna um resto de divisão não nulo [34].

- a) **Erro em um único bit:** Um erro num único bit significa que  $E(x)$  vai apenas ter um único termo. Se  $g(x)$  for de grau  $n$  ( $x^n + \dots + 1$ ) a divisão nunca vai ser nula [34].
- b) **Erro em múltiplos bits:** Diferentes polinômios geradores são usados com propriedades diferentes. Deve haver um fator no polinômio  $x^l + 1$  que assegura a detecção de erros em todos os bits ímpares (1, 3, 5, ...) [34].

### Exemplo:

$$\text{Frame: } f(x) = x^5 + x^3 + x^1 + 1 = 101011$$

$$\text{Polinômio gerador: } g(x) = x^4 + x^3 + 1 = 11001$$

$$\text{Polinômio concatenado: } 1010110000$$

Procedendo a divisão:

$$\begin{array}{r}
 1x^9 + 0x^8 + 1x^7 + 0x^6 + 1x^5 + 1x^4 + 0x^3 + 0x^2 + 0x^1 + 0 \\
 - (1x^9 + 1x^8 + 0x^7 + 0x^6 + 1x^5 + 0x^4 + 0x^3 + 0x^2 + 0x^1 + 0) \\
 \hline
 0x^9 - 1x^8 + 1x^7 + 0x^6 + 0x^5 + 0x^4 + 0x^3 + 0x^2 + 0x^1 + 0 \\
 - (0x^9 + 1x^8 + 1x^7 + 0x^6 + 0x^5 + 1x^4 + 0x^3 + 0x^2 + 0x^1 + 0) \\
 \hline
 0x^9 + 0x^8 + 0x^7 + 0x^6 + 0x^5 + 1x^4 + 0x^3 + 0x^2 + 0x^1 + 0 \\
 - (0x^9 + 0x^8 + 0x^7 + 0x^6 + 0x^5 + 1x^4 + 1x^3 + 0x^2 + 0x^1 + 1) \\
 \hline
 0x^9 + 0x^8 + 0x^7 + 0x^6 + 0x^5 + 0x^4 + 1x^3 + 0x^2 + 0x^1 + 1
 \end{array}
 \begin{array}{l}
 \left. \begin{array}{l} \overline{) 1x^4 + 1x^3 + 0x^2 + 0x^1 + 1} \\ \underline{1x^5 + 1x^4 + 1} \end{array} \right\} \\
 \text{Quociente} = 110001 \\
 \text{Resto: } r(x) = 1001
 \end{array}$$

$$\text{Frame com checksum: } f(x) + r(x) = T(x) = 1010111001$$



### 4.3.2. CRC-16

O CRC-16 é utilizado no protocolo de comunicações BISYNCH da IBM [34].

$$g(x) = x^{16} + x^{15} + x^2 + 1 \quad (12)$$

O diagrama de blocos é apresentado na Figura 4.2. Os dados são deslocados para a linha de entrada de dados. Após todos os dados serem deslocados, o resto será guardado nos registros de 0 a 15 [34].

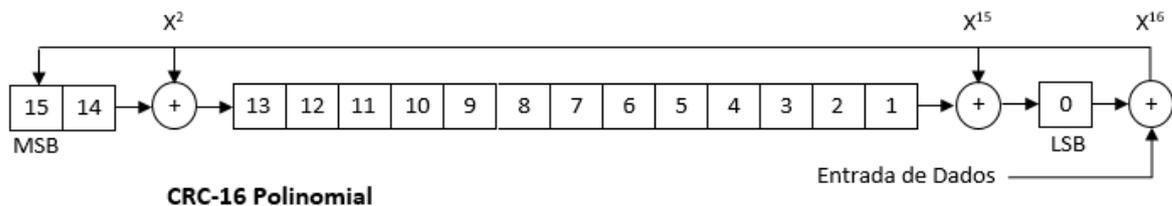


Figura 4.2: Diagrama de blocos CRC-16 [34].

### 4.3.3. CRC-32

CRC – 32 é também conhecido como AUTODIN-II e ITU-TSS (ITU-TSS definiu os polinômios de 16 e 32 bits). É usado em PKZip, Ethernet, AAL5, (ATM *Adaptation Layer 5*), FDDI (*Fiber Distributed Data Interface*), nos protocolos IEEE 802 e em algumas aplicações DOD [34].

$$g(x) = x^{32} + x^{26} + x^{23} + x^{22} + x^{16} + x^{12} + x^{11} + x^{10} + x^8 + x^7 + x^5 + x^4 + x^2 + 1 \quad (13)$$

O diagrama de blocos é apresentado na Figura 4.3. Os dados são deslocados para a linha de entrada de dados. Após todos os dados serem deslocados, o resto será guardado nos registros de 0 a 31 [34].

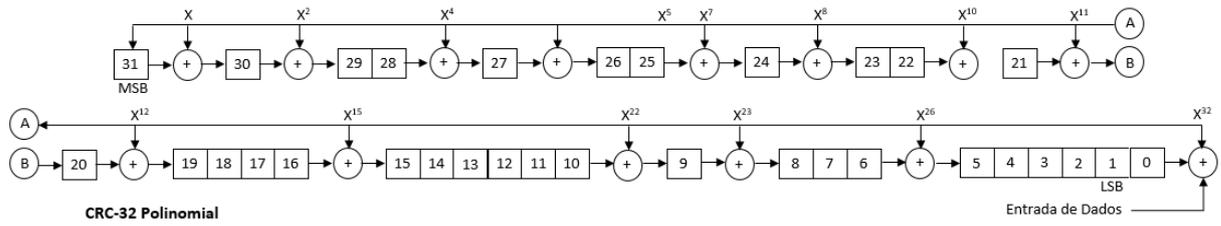


Figura 4.3: Diagrama de blocos CRC-32 [34].

### 4.3.4. CRC-CCITT

O CRC-CCITT, também conhecido como ITU-TSS, é usado em vários protocolos de comunicação como é o caso do XMODEM, X.25, IBM's SDLC e ISO's HDLC [34].

$$g(x) = x^{16} + x^{12} + x^5 + 1 \tag{14}$$

O diagrama de blocos é apresentado na Figura 4.4. Os dados são deslocados para a linha de entrada de dados. Após todos os dados serem deslocados, o resto será guardado nos registros de 0 a 15.

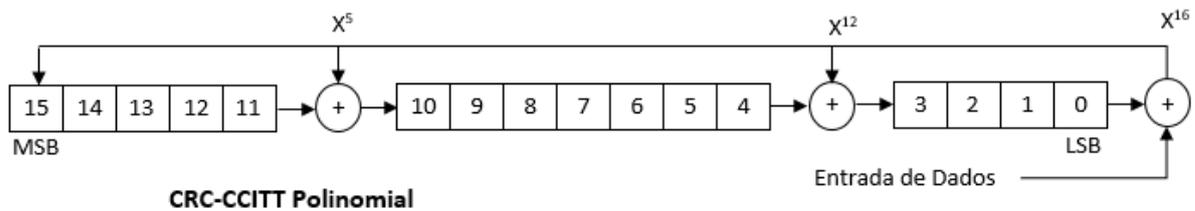


Figura 4.4: Diagrama de blocos CRC-CCITT [34].

---

## 5. Interferência sobre Redes sem Fio

---

As redes sem fio da família IEEE 802.11 operam nas faixas de frequências não licenciadas (ISM) de 2,4 GHz e 5 GHz, o que faz com que elas compartilhem o meio com uma grande variedade de outros dispositivos. Com exceção dos dispositivos *Bluetooth*, nenhum outro possui qualquer mecanismo de coexistência com as redes sem fio. Como resultado dessa realidade, quando um dispositivo interferente emite sinais sobre um canal que está sendo utilizado por uma rede sem fio, o desempenho dessa rede pode ser seriamente afetado [35].

Alguns dispositivos que agem como fontes de interferência sobre as redes sem fio IEEE 802.11 são:

- |                                      |                                  |
|--------------------------------------|----------------------------------|
| a) Telefones sem fio analógicos      | f) Fornos de micro-ondas         |
| b) Telefones sem fio digitais (FHSS) | g) Detectores de movimento       |
| c) Telefones sem fio digitais (DSSS) | h) Babás eletrônicas             |
| d) Câmeras sem fio                   | i) Dispositivos <i>Bluetooth</i> |
| e) Controles de vídeo games sem fio  |                                  |

A ocorrência das interferências descritas acima sobre as redes sem fio ocasiona a drástica queda da relação sinal/ruído (SNR) observada no receptor da rede e, conseqüentemente, o acentuado aumento das taxas de erro de bit (BER) e das taxas de erro de CRC (CRC-ER) na transmissão dos pacotes. Para combater esse problema, conforme os níveis de parâmetros como SNR, BER e CRC Error Rate ultrapassam alguns limiares (*thresholds*) estabelecidos nas camadas físicas dos receptores das redes IEEE 802.11, estes dispositivos implementam a seleção adaptativa do esquema de modulação (*Adaptive Modulation Selection Scheme*). Isto é, os receptores IEEE 802.11 selecionam de forma automática, dentre os esquemas de modulação suportados, um esquema de modulação mais robusto. Essa seleção ocorre até que o receptor escolha a modulação mais robusta, de forma a manter a rede operando mesmo com o

elevado nível de ruído do meio. Em outras palavras, o *throughput* da rede vai diminuindo até o seu menor nível, de acordo com a modulação selecionada, de modo a manter os níveis de BER e CRC-ER em patamares aceitáveis [36].

O diagrama de blocos presente na Figura 5.1 ilustra o esquema básico de implementação de um esquema adaptativo.

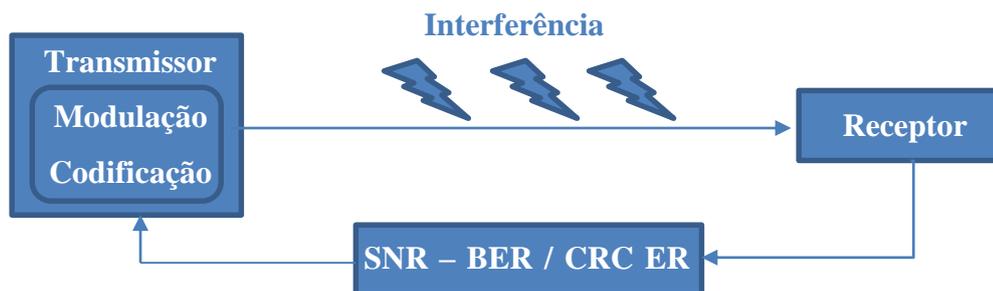


Figura 5.1: Diagrama básico de um sistema adaptativo [37].

As Figuras 5.2a e 5.2b apresentam as curvas teóricas das taxas de erro de bits (BER) e dos valores de *throughput* em relação aos níveis de relação sinal/ruído (SNR) de acordo com os esquemas de modulação utilizados.

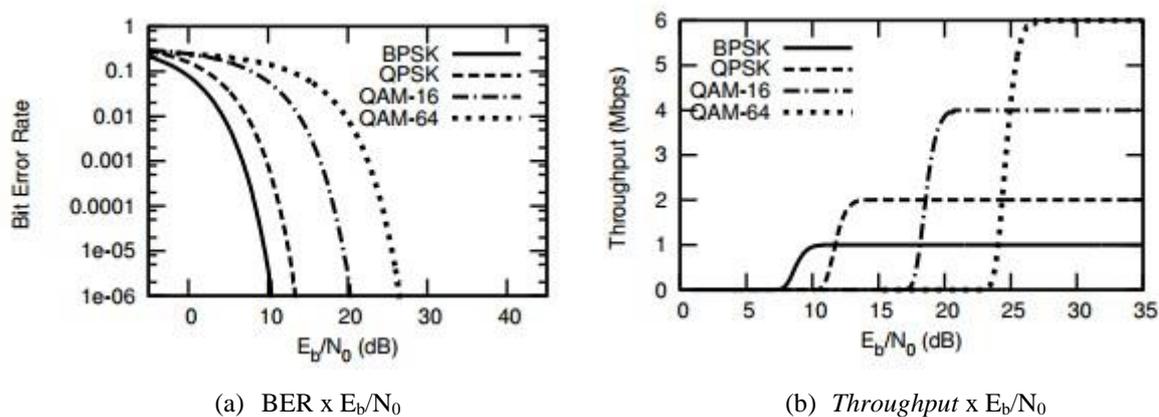


Figura 5.2: Valores teóricos de BER e *throughput* em relação aos níveis de sinal/ruído para alguns esquemas de modulação utilizados em redes IEEE 802.11 [37].

O impacto da interferência eletromagnética sobre as redes sem fio depende do tipo de dispositivo que gera essa interferência, das suas características de emissão e da sua localização em relação aos dispositivos da rede [35].

Em [35] foram realizados testes do efeito da interferência no *throughput* de uma rede sem fio que conecta um *access point* (AP) e um *notebook* (usuário) em um ambiente *indoor* em duas diferentes localizações. A Tabela 7 contém os resultados obtidos nos referidos testes.

Tabela 7: Medições de *throughput* com e sem a ocorrência de interferência na faixa de 2,4 GHz [35].

Dispositivo Interferente	Throughput [Mbps]								
	Canal 1			Canal 6			Canal 11		
	Sem Interf.	Com Interf.	Perda [%]	Sem Interf.	Com Interf.	Perda [%]	Sem Interf.	Com Interf.	Perda [%]
Câmera de vídeo sem fio	63	1,5	98	78	0	100	68	68	0
Forno de micro-ondas	63	58	8	78	30	62	66	19	71
Telefone s/ fio (FHSS)	77	16	79	65	10	85	67	15	78
Telefone s/ fio (DSSS)	63	0	100	78	12	85	66	66	0
Telefone s/ fio analógico	63	0	100	78	78	0	66	66	0
Dispositivo <i>Bluetooth</i>	63	63	0	74	74	0	68	65	4

De acordo com os valores constantes na Tabela 7, nenhum dos canais testados é imune a interferência. Para cada canal testado há pelo menos um dispositivo que degrada de forma significativa o *throughput* da rede sem fio [35].

Administrar redes sem fio de modo a manter desempenhos minimamente aceitáveis requer o monitoramento contínuo do espectro de frequência utilizado, possibilitando a identificação de fontes de interferência e, desse modo, ajustar as configurações de transmissão dos dispositivos da rede para lidar com a interferência. Idealmente, essa capacidade deve ser integrada aos dispositivos sem fio de maneira a permitir que estes ajustes sejam feitos de forma automática e dinâmica [35].

---

## 6. Procedimentos Experimentais

---

Para possibilitar a análise dos efeitos da interferência gerada pelo forno de micro-ondas no desempenho das redes sem fio dos padrões IEEE 802.11b/g/n, foram realizados experimentos para um modelo de forno de micro-ondas visando caracterizar a interferência por ele gerada, no que diz respeito aos seus aspectos fundamentais, tais como, frequência nominal, banda ocupada, nível de pico, período de operação (ciclos de *on* e *off*); e de propagação, tais como, diagramas de radiação vertical e horizontal, polarização e desvanecimento.

Num segundo momento, a partir das características do sinal interferente obtidas nas primeiras medições, foram realizados experimentos para a obtenção das Taxas de Erro de CRC reportadas pelos receptores de uma rede sem fio, operando com e sem a presença da interferência gerada pelo forno de micro-ondas, observando as seguintes variáveis:

- a) Padrão de transmissão (IEEE 802.11b, IEEE 802.11g e IEEE 802.11n).
- b) Canal de comunicação da faixa ISM de 2,4 GHz. (1 – 11).
- c) Polarização das antenas utilizadas pelos dispositivos da rede sem fio.
- d) Posição relativa dos dispositivos da rede e do forno de micro-ondas.
- e) Distância entre os dispositivos da rede e o forno de micro-ondas.

A seguir são especificados o local e os instrumentos utilizados nas medições, assim como as características do aplicativo AirMagnet Wifi Analyzer, ferramenta de monitoração e solução de problemas para redes sem fio, utilizado durante os experimentos, para a coleta das Taxas de Erro de CRC, e ainda, são detalhados os procedimentos utilizados para cada medição realizada.

### 6.1. Local das Medições

Os experimentos descritos a seguir foram realizados num ambiente *indoor* de maneira a evitar distorções provocadas por interferências de co-canal ou canal adjacente provenientes

de outras redes sem fio em operação na região. As dimensões do local escolhido, 12,1 m x 14,4 m x 2,7 m (D x L x H), foram consideradas de forma que o forno fosse posicionado o mais distante possível das paredes ao redor para assim atenuar os efeitos dos sinais refletidos nas medições. Ainda, todo o mobiliário foi retirado do local, deixando a área de medição completamente livre de obstruções ou reflexões provocadas pela presença de qualquer objeto alheio à realização das medições. A Figura 6.1 mostra a planta baixa do local de medição com a indicação dos pontos onde foram posicionados os equipamentos.

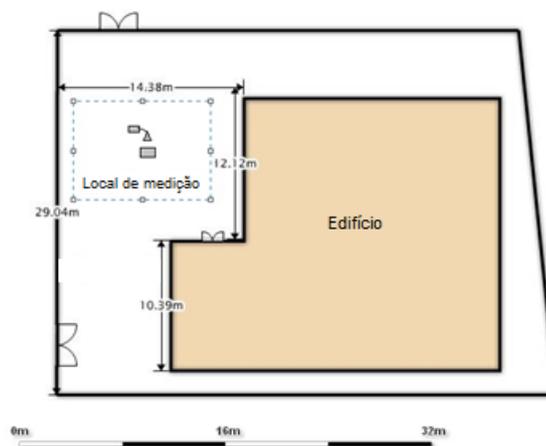


Figura 6.1: Planta baixa do local de medição.

## 6.2. Instrumentos e Dispositivos

Os experimentos foram realizados mediante a utilização dos instrumentos e dispositivos listados na Tabela 8.

Tabela 8: Instrumentos e dispositivos utilizados nas medições de radiação do forno de micro-ondas.

Descrição	Fabricante	Modelo	Faixa de Frequência
Forno de micro-ondas	General Electric	MG31DDI	-
Analizador de espectro	Agilent Technologies	N9344C	3 MHz a 20 GHz
Antena corneta	Rohde & Schwarz	HF906	1 GHz a 18 GHz
Cabo coaxial	Huber-Suhner	-	-
Notebook (equipado com placa de rede sem fio)	Hewlett-Packard	Pavilion g6	-
Notebook (equipado com placa de rede sem fio)	Hewlett-Packard	Compac	-
Placa de rede sem fio	Ubiquiti	SWX-SCR	2,4 GHz e 5,8 GHz
Antena onidirecional	Raicom	-	1 GHz a 8 GHz
AirMagnet WiFi Analyzer	AirMagnet	-	-
Roteador sem fio	D-Link	DIR-615	2,4 GHz e 5,8 GHz

### 6.3. AirMagnet Wifi Analyzer

O AirMagnet WiFi Analyzer é um *software* de gerenciamento de redes sem fio utilizado para os padrões IEEE 802.11a/b/g/n. Este aplicativo é a mais popular ferramenta de análise em campo das redes sem fio. O WiFi Analyzer contribui para que profissionais da área de TI resolvam os problemas de desempenho das redes, enquanto automaticamente detecta as ameaças de segurança e vulnerabilidades das redes. Embora compacto, o WiFi Analyzer tem muitas qualidades e características dedicadas a análise e monitoramento das redes sem fio. No centro do AirMagnet WiFi Analyzer se aloja o mecanismo AirWISE®, que detecta automaticamente a causa dos diversos problemas de segurança e desempenho, explica o significado dos alarmes em termos simples e oferece recomendações [38]. A Figura 6.2 mostra o *layout* da tela principal do AirMagnet.

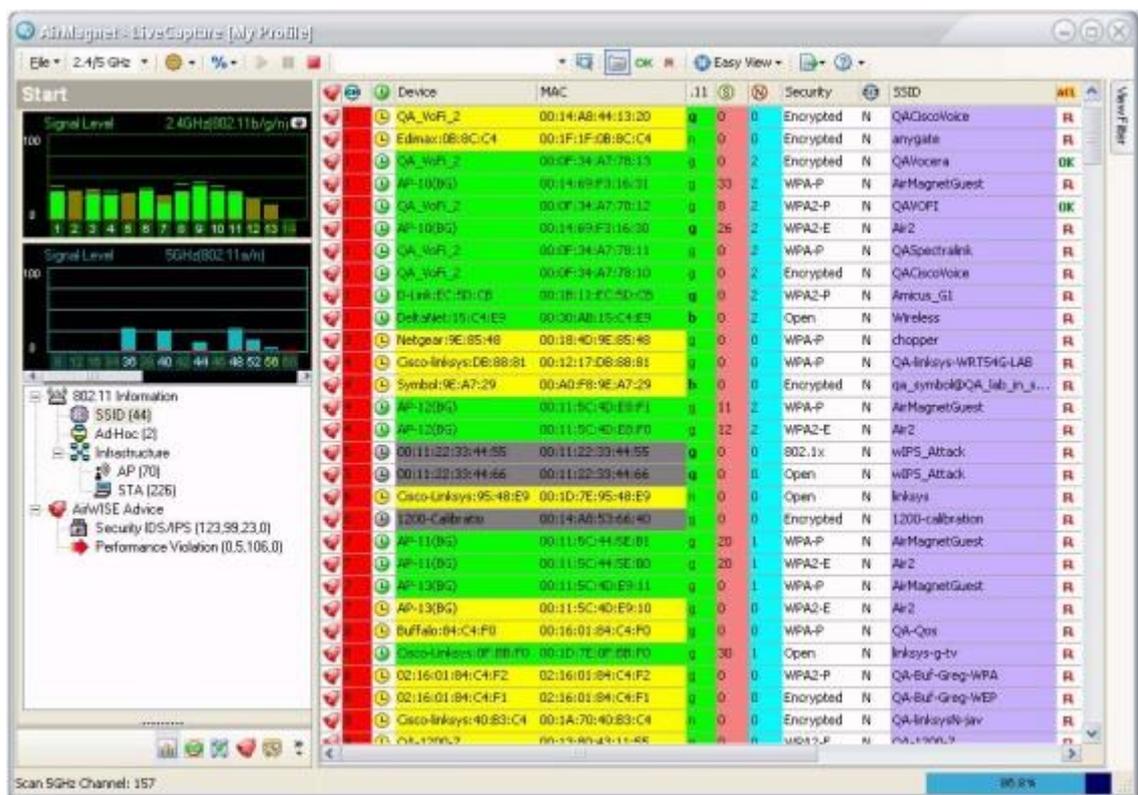


Figura 6.2: AirMagnet – Tela inicial.

O AirMagnet WiFi Analyzer fornece blocos básicos para auditoria e solução de problemas de redes sem fio, com a possibilidade de detectar dispositivos, identificar

automaticamente problemas comuns e localizar fisicamente dispositivos específicos [38]. Suas principais funcionalidades são:

- a) Detecção automática de dispositivos de redes sem fio ativos;
- b) Identificação das vulnerabilidades das redes sem fio;
- c) Política de segurança;
- d) Testes de desempenho e interatividade das redes;
- e) Análise contínua de interferência WiFi;
- f) Análise detalhada de pacotes e *frames* das redes sem fio;
- g) Monitoração completa do *status* das redes através do AirWise®; e
- h) Geração de relatórios.

A operação do AirMagnet envolve a utilização de um *notebook*, uma placa de rede sem fio e uma antena onidirecional, especificados na Tabela 8. Juntamente com o *software* esses dispositivos são instalados no *notebook* e configurados de acordo com as especificações do fabricante. A Figura 6.3 mostra a operação do AirMagnet instalado no *notebook* HP, especificado na Tabela 8.

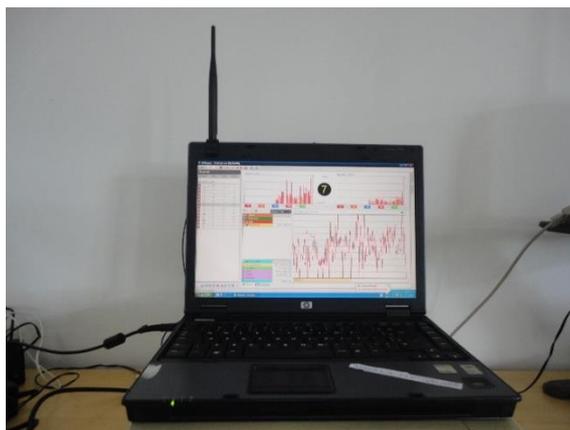


Figura 6.3: Operação do AirMagnet Wifi Analyzer.

Uma característica interessante do AirMagnet é que ele monitora as redes e os dispositivos sem fio sem que, para isso, necessite se conectar a estes, ou seja, o AirMagnet apenas “observa” as redes, mas não interage com elas.

Nas medições realizadas nesta pesquisa, o AirMagnet foi utilizado para a coleta das Taxas de Erro de CRC (CRC-ER) da rede sem fio. O aplicativo foi configurado para obter amostras a cada segundo, durante o período de cada medição. A Figura 6.4 apresenta a tela de medição do AirMagnet, utilizada nos experimentos deste trabalho.

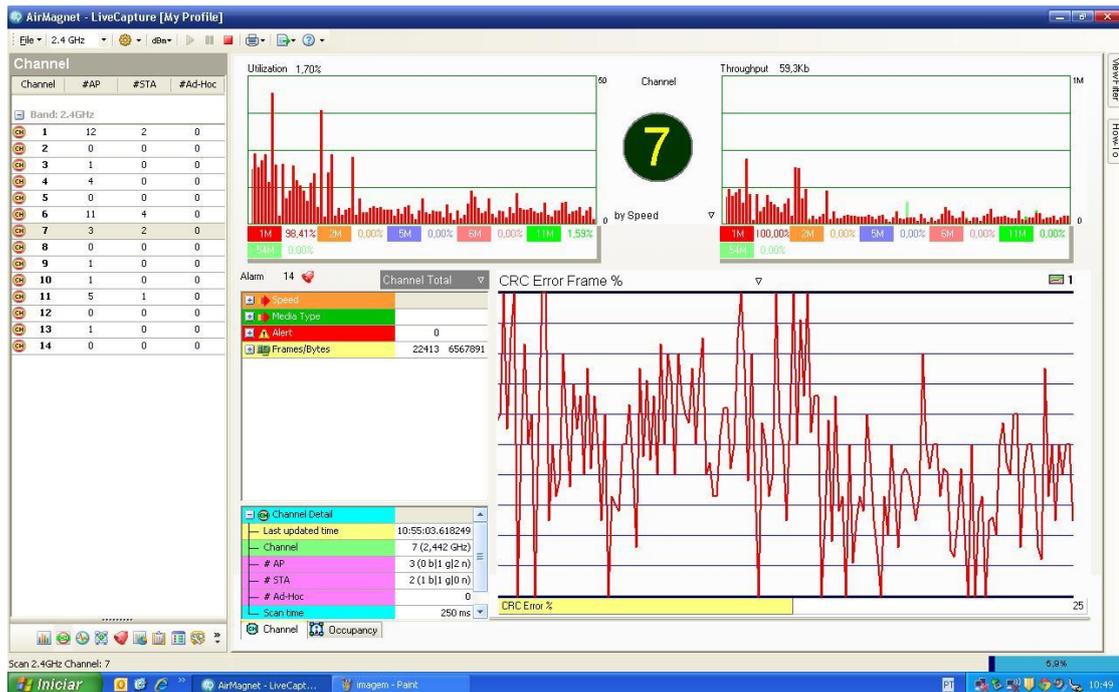


Figura 6.4: Tela de medição das CRC-ER do AirMagnet.

## 6.4. Procedimentos de Medição

Um relatório da Administração Nacional de Telecomunicações e Informação (NTIA), agência ligada ao Departamento de Comércio dos Estados Unidos, presente em [14], produziu resultados de medições dos sinais gerados por treze modelos de forno de micro-ondas. As medições incluíram as características de emissão e as formas de onda no tempo na faixa de frequência de 2,3 – 2,6 GHz, e ainda, as características das emissões harmônicas até a sétima ordem. Os parâmetros variáveis considerados nessas avaliações foram a carga (alimento) de aquecer, a temperatura de início, a orientação do forno e a largura de banda do receptor. Por se tratar de um dos relatórios mais completos que tratam do assunto, publicados até hoje, o mesmo foi tomado como referência para definição dos procedimentos utilizados para a realização dos experimentos descritos a seguir.

### 6.4.1. Caracterização da Interferência Gerada pelo Forno de Micro-ondas

Para a caracterização da interferência gerada pelo forno de micro-ondas, os procedimentos de medição foram definidos de acordo com o parâmetro a ser obtido em cada experimento:

- a) Nível de sinal radiado nos domínios da frequência e do tempo;
- b) Diagramas de radiação vertical e horizontal;
- c) Nível de sinal radiado em função da variação da posição, distância e da polarização da antena receptora.

#### 6.4.1.1. Nível de Sinal Radiado nos Domínios da Frequência e do Tempo

Para a realização destes experimentos, a antena corneta (receptora) foi conectada ao analisador de espectro, através do cabo coaxial, e posicionada de forma fixa e alinhada com a parte frontal do forno de micro-ondas, a uma distância de um metro, conforme ilustrado na Figura 6.5.

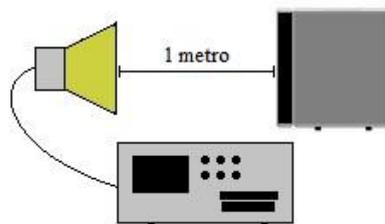


Figura 6.5: Setup de Medição I.

Os procedimentos definidos para a obtenção destes parâmetros, correspondentes à caracterização do sinal interferente do forno de micro-ondas foram:

#### a) Configuração do Analisador de Espectro

- a1) **Resolution Bandwidth (RBW):** 300 kHz.
- a2) **Video Bandwidth (VBW):** 300 kHz.
- a3) **Frequência Central:** 2,445 MHz.
- a4) **Span:** 20 MHz (domínio da frequência), 0 MHz (domínio do tempo).

**a5) Max Hold:** A função *max hold* foi habilitada para obtenção dos níveis máximos durante o período de cada medição.

**b) Operação do Forno de Micro-Ondas**

**b1. Carga (alimento):** Utilização de um recipiente de vidro contendo um litro de água posicionado na cavidade ressonante do forno, para funcionar como carga.

**b2. Warm-up:** Ativação da válvula magnetron do forno de micro-ondas pelo período de dois minutos para pré-aquecimento, uma vez que a variação da temperatura inicial do forno em relação à temperatura média nas medições seguintes, pode provocar distorções nos resultados das primeiras medidas.

**b3. Potência:** Configuração do forno para operar na potência alta, de modo que o magnetron permaneça ativado pelo máximo período durante cada medição.

**b4. Período de Funcionamento:** Dois minutos para cada medição.

**c) Antena Receptora**

**c1. Posição:** Alinhada com a parte frontal do forno de micro-ondas (fixa).

**c2. Distância:** 1 metro (fixa).

**c3. Polarização:** Vertical (fixa).

### 6.4.1.2. Diagramas de Radiação Vertical e Horizontal

Neste experimento, a antena corneta (receptora) foi conectada ao analisador de espectro, através do cabo coaxial, e posicionada a uma distância de um metro, de forma alinhada com a parte frontal do forno de micro-ondas, considerando esta sua posição inicial, ou seja,  $\alpha = 0^\circ$ , para o diagrama horizontal, e  $\beta = 0^\circ$ , para o diagrama vertical.

Para a obtenção do diagrama horizontal, o forno foi posicionado na sua posição normal, com a parte de baixo paralela ao solo e, para cada amostra da medição, o mesmo foi girado de  $5^\circ$  em  $5^\circ$  no sentido anti-horário até  $\alpha = 355^\circ$ . De modo similar, para obtenção do diagrama vertical, o forno foi posicionado com sua parte lateral direita paralela ao solo e, para cada amostra da medição, o mesmo foi girado de  $5^\circ$  em  $5^\circ$  no sentido anti-horário até  $\beta = 355^\circ$ .

As Figuras 6.6a e 6.6b ilustram a configuração do ambiente de medição para obtenção dos diagramas vertical e horizontal.

Cabe destacar que para cada amostra, foi considerado o valor de pico do sinal radiado pelo forno dentre os valores obtidos na faixa de 60 MHz medida.

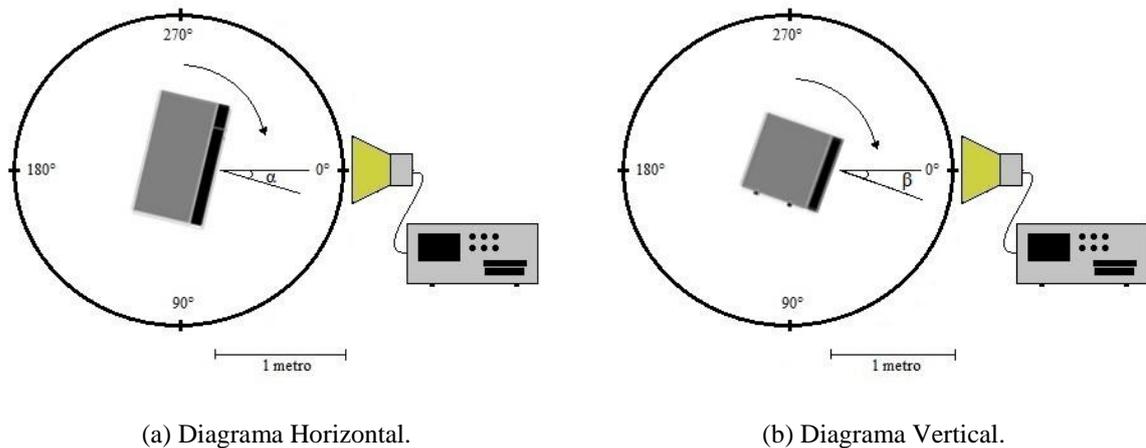


Figura 6.6: Setup de Medição II.

Os procedimentos definidos para a obtenção deste parâmetro correspondentes à caracterização do sinal interferente do forno de micro-ondas foram:

**a) Configuração do Analisador de Espectro**

**b1. Resolution Bandwidth (RBW):** 300 kHz.

**b2. Vídeo Bandwidth (VBW):** 300 kHz.

**b3. Frequência Central:** 2,445 GHz.

**b4. Span:** 60 MHz.

**b5. Max Hold:** A função *max hold* foi habilitada para obtenção dos níveis máximos durante o período de cada medição;

**b) Operação do Forno de Micro-ondas**

**b1. Carga (alimento):** Utilização de um recipiente de vidro contendo um litro de água posicionado na cavidade ressonante do forno, para funcionar como carga.

**b2. Warm-up:** Ativação da válvula magnetron do forno de micro-ondas pelo período de dois minutos para pré-aquecimento, uma vez que a variação da temperatura inicial do forno em relação à temperatura média nas medições seguintes, pode provocar distorções nos resultados das primeiras medidas.

**b3. Potência:** Configuração do forno para operar na potência alta, de modo que o magnetron permaneça ativado pelo máximo período durante cada medição.

**b4. Período de Operação:** Dois minutos para cada medição.

**c) Antena Receptora**

**c1. Posição:** Variável de  $5^\circ$  em  $5^\circ$  no sentido horário, de  $\alpha = 0^\circ$  até  $\alpha = 355^\circ$ .

**c2. Distância:** 1 metro (fixa).

**c3. Polarização:** Vertical (fixa).

### 6.4.1.3. Nível de Sinal Radiado em Função da Variação da Posição, Distância e da Polarização da Antena Receptora

Para a realização deste experimento, a antena corneta (receptora) foi conectada ao analisador de espectro, através do cabo coaxial, e posicionada de forma alinhada com as partes frontal, traseira, lateral esquerda e lateral direita do forno de micro-ondas. A distância entre ambos variou entre 1, 3 e 7 metros. Para cada posição e distância consideradas foram realizadas medidas com a antena receptora polarizada verticalmente e horizontalmente. A Figura 6.7 ilustra as configurações consideradas para este experimento.

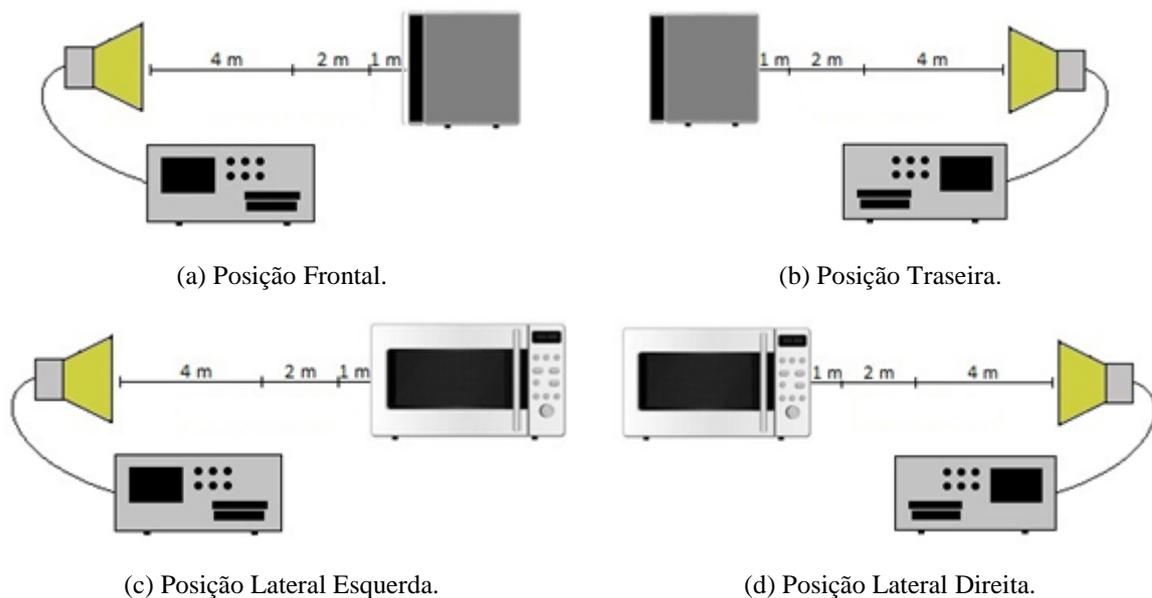


Figura 6.7: Setup de Medição III.

Os procedimentos definidos para a obtenção destes parâmetros, correspondentes à caracterização do sinal interferente do forno de micro-ondas foram:

**a) Configuração do Analisador de Espectro**

- a1. Resolution Bandwidth (RBW):** 300 kHz.
- a2. Vídeo Bandwidth (VBW):** 300 kHz.
- a3. Frequência Central:** 2,445 GHz.
- a4. Span:** 60 MHz.
- a5. Max Hold:** A função *max hold* foi habilitada para obtenção dos níveis máximos durante o período de cada medição;

**b) Operação do Forno de Micro-Ondas**

- b1. Carga (alimento):** Utilização de um recipiente de vidro contendo um litro de água posicionado na cavidade ressonante do forno, para funcionar como carga.
- b2. Warm-up:** Ativação da válvula magnetron do forno de micro-ondas pelo período de dois minutos para pré-aquecimento, uma vez que a variação da temperatura inicial do forno em relação à temperatura média nas medições seguintes, pode provocar distorções nos resultados das primeiras medidas.
- b3. Potência:** Configuração do forno para operar na potência alta, de modo que o magnetron permaneça ativado pelo máximo período durante cada medição.
- b4. Período de Funcionamento:** Dois minutos para cada medição.

**c) Antena Receptora**

- c1. Posição:** Alinhada com as partes frontal, traseira, lateral esquerda e lateral direita do forno de micro-ondas (variável).
- c2. Distância:** 1, 3 e 7 metros (variável).
- c3. Polarização:** Vertical e horizontal (variável).

**6.4.2. Obtenção das Taxas de Erro de CRC (CRC-ER)**

Conforme visto no Capítulo 4, as CRC-ER correspondem ao percentual de *frames* de CRC corrompidos ao fim de uma transmissão, que remetem ao receptor que as respectivas mensagens estão comprometidas, devendo, este, solicitar o reenvio dessas mensagens. Ou seja, a CRC-ER está diretamente relacionada com a BER, e pode ser considerada na avaliação da qualidade do meio utilizado pela rede, ou na aferição do desempenho da rede ao utilizar esse meio.

Para identificar como a interferência gerada pelo forno de micro-ondas interage com o desempenho de uma rede sem fio, foram realizados experimentos utilizando o aplicativo AirMagnet WiFi Analyzer para a coleta dos valores de CRC-ER, de acordo com cada variável a ser avaliada, a saber, o padrão, o canal, a polarização, a posição e a distância.

Assim, considerando os parâmetros obtidos após a realização das medições para caracterização da interferência gerada pelo forno de micro-ondas, foram montados diferentes *setups* para obtenção dos valores de CRC-ER correspondente a cada variável de forma isolada, conforme descrito a seguir.

Para todos os *setups* utilizados, foi ativada uma rede sem fio no modo infraestrutura onde foram conectados um notebook (cliente) e um *access point*, o qual foi conectado à Internet através da sua porta WAN.

#### 6.4.2.1. CRC-ER em Função do Padrão e do Canal de Transmissão

A obtenção das CRC-ER para cada um dos três padrões de transmissão abordados nesta pesquisa foi efetuada a partir da realização de medições considerando o *setup* abaixo. A posição do forno de micro-ondas em relação aos dispositivos sem fio foi definida de acordo com os ângulos  $\alpha$  e  $\beta$  correspondentes aos maiores níveis de radiação observados na elaboração dos diagramas vertical e horizontal do forno, conforme ilustrado na Figura 6.8.

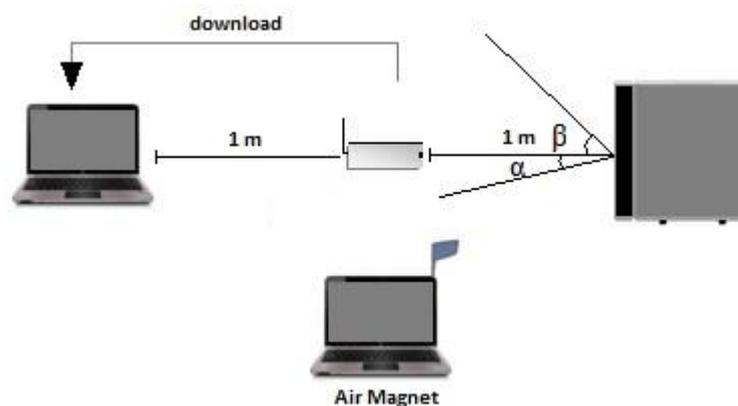


Figura 6.8: *Setup* de Medição IV.

Foi ativada uma rede sem fio e, em seguida, iniciado o *download* de um arquivo a partir da Internet até o notebook (cliente), com o objetivo de aumentar propositalmente o *throughput* da rede.

Para a obtenção da variação das CRC-ER em função do padrão de transmissão utilizado, as primeiras medições foram realizadas mediante a operação da rede sem fio através de um canal fixo, definido de forma que as transmissões ocorressem no canal mais próximo da frequência na qual o forno emite seu maior nível de radiação, dentro da faixa de 2,4 GHz, de acordo com os resultados obtidos em medições anteriores.

Em seguida as medições foram repetidas, nas mesmas condições especificadas nos parágrafos anteriores, dessa vez variando o canal de transmissão da rede sem fio de 1 até 11, dentro da faixa ISM de 2,4 GHz, possibilitando a obtenção das CRC-ER em função da variação do canal utilizado pela rede sem fio.

As medições foram realizadas com e sem a presença da interferência gerada pelo forno de micro-ondas, seguindo os seguintes procedimentos.

**a) Configuração do *Access Point***

- a1. Padrão de Transmissão:** IEEE 802.11b, IEEE 802.11g e IEEE 802.11n (variável)
- a2. Canal (1ª Medição):** Definido de acordo com o nível máximo de radiação do forno na faixa de 2,4 GHz (fixo).
- a3. Canal (2ª Medição):** De 1 a 11 (variável).
- a4. Polarização da antena:** Definida de acordo com a polarização de maior intensidade de radiação do forno de micro-ondas (fixa).
- a5. Distância em Relação ao Forno de Micro-ondas:** 1 metro (fixa).

**b) Operação do Forno de Micro-Ondas**

- b1. Carga (alimento):** Utilização de um recipiente de vidro contendo um litro de água posicionado na cavidade ressonante do forno, para funcionar como carga.
- b2. *Warm-up*:** Ativação da válvula magnetron do forno de micro-ondas pelo período de dois minutos para pré-aquecimento, uma vez que a variação da temperatura inicial do forno em relação à temperatura média nas medições seguintes, pode provocar distorções nos resultados das primeiras medidas.

**b3. Potência:** Configuração do forno para operar na potência alta, de modo que o magnetron permaneça ativado pelo máximo período durante cada medição.

**b4. Período de Funcionamento:** Dois minutos para cada medição.

#### 6.4.2.2. CRC-ER em Função da Distância e da Posição

Para análise da variação das CRC-ER em função da distância e da posição relativa entre o forno de micro-ondas e os dispositivos da rede sem fio, foram realizados experimentos considerando três distâncias, a saber, 1, 3 e 7 metros. Além da variação da distância, foram consideradas duas radiais de maneira que, juntamente com as distâncias especificadas, fosse possível definir as posições a serem avaliadas. Assim, foram definidas a radial A, para uma combinação de  $\alpha$  e  $\beta$  cujas posições estariam expostas ao maior nível de radiação gerada pelo forno, e a radial B, para uma combinação de  $\alpha$  e  $\beta$  cujas posições estariam expostas ao menor nível de radiação gerada pelo forno. Os valores de  $\alpha$  e  $\beta$  para as radiais A e B foram definidos de acordo com os diagramas de radiação horizontal e vertical do forno de micro-ondas, obtidos nas medições anteriores. A Figura 6.9 ilustra o *setup* de acordo com os parâmetros a serem considerados nesta medição.

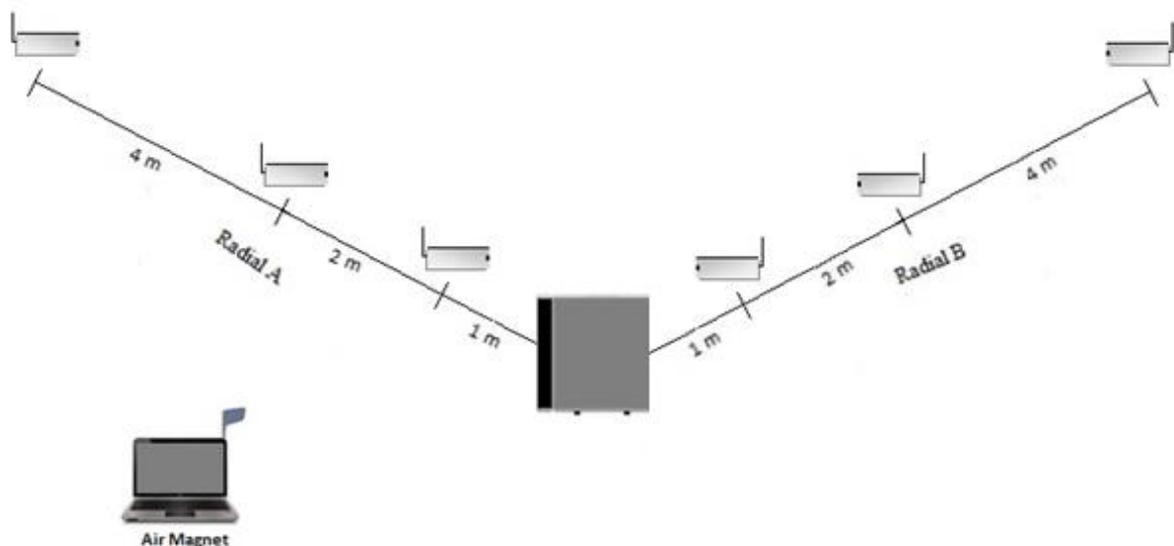


Figura 6.9: *Setup* de Medição V.

Assim como na medição especificada no item anterior, nesta medição foi ativada uma rede sem fio e, em seguida, iniciado o *download* de um arquivo a partir da Internet até o notebook (cliente), com o objetivo de aumentar propositalmente o *throughput* da rede.

Foram obtidas CRC-ER para cada um dos três padrões de transmissão, para cada distância e para cada posição especificada. O canal de transmissão da rede sem fio foi definido de forma que na medição para a posição de menor nível de radiação do forno fosse utilizado o canal cuja frequência central correspondesse também ao menor nível de radiação e, do mesmo modo, na medição para a posição de maior nível de radiação do forno foi utilizado o canal cuja frequência central corresponde ao maior nível de radiação emitido pelo forno de micro-ondas.

As medições foram realizadas seguindo os seguintes procedimentos.

**a) Configuração do Access Point**

- a1. Padrão de Transmissão:** IEEE 802.11b, IEEE 802.11g e IEEE 802.11n (variável).
- a2. Canal:** Definido de acordo com os níveis máximo e mínimo de radiação do forno na faixa de 2,4 GHz (fixo).
- a3. Polarização da antena:** Definida de acordo com a polarização de maior intensidade de radiação do forno de micro-ondas (fixa).
- a4. Distância em Relação ao Forno de Micro-ondas:** 1, 3 e 7 metros (variável).
- a5. Posição:** Definida de acordo com os níveis máximo e mínimo de radiação do forno, conforme os respectivos diagramas de radiação.

**b) Operação do Forno de Micro-Ondas**

- b1. Carga (alimento):** Utilização de um recipiente de vidro contendo um litro de água posicionado na cavidade ressonante do forno, para funcionar como carga.
- b2. Warm-up:** Ativação da válvula magnetron do forno de micro-ondas pelo período de dois minutos para pré-aquecimento, uma vez que a variação da temperatura inicial do forno em relação à temperatura média nas medições seguintes, pode provocar distorções nos resultados das primeiras medidas.
- b3. Potência:** Configuração do forno para operar na potência alta, de modo que o magnetron permaneça ativado pelo máximo período durante cada medição.
- b4. Período de Funcionamento:** Dois minutos para cada medição.

---

## 7. Resultados Experimentais

---

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos, a partir das medições realizadas, a respeito das características da radiação gerada pelo forno de micro-ondas e com relação aos efeitos dessa radiação sobre o desempenho da rede sem fio operando com os padrões IEEE 802.11b/g/n, a partir da análise das CRC-ER obtidas, para todas as variáveis consideradas.

Todos os resultados foram consolidados em gráficos de forma a permitir sua visualização de forma clara e objetiva, e ainda, para possibilitar uma análise comparativa entre os diferentes resultados.

Os resultados apresentados a seguir estão organizados por ordem de realização das respectivas medições, conforme foram dispostas no capítulo anterior.

- a) Caracterização da interferência gerada pelo forno de micro-ondas.
- b) Obtenção das taxas de erro de CRC (CRC-ER).

### 7.1. Caracterização da Interferência Gerada pelo Forno de Micro-ondas

A obtenção das características de radiação do forno de micro-ondas foi realizada em três etapas: nível de sinal radiado nos domínios da frequência e do tempo; diagramas de radiação vertical e horizontal; e nível de sinal radiado em função da variação da posição, distância e da polarização da antena receptora.

#### 7.1.1. Nível de Sinal Radiado nos Domínios da Frequência e do Tempo

Os resultados aqui apresentados foram obtidos a partir das medições realizadas no ambiente onde os instrumentos e dispositivos estiveram dispostos conforme especificado no capítulo anterior. A Figura 7.1 mostra o ambiente de medição utilizado.

Figura 7.1: Fotografia do *Setup* de Medição I.

A Figura 7.2, a seguir, mostra o sinal radiado pelo forno de micro-ondas no domínio da frequência, onde é possível observar seu espalhamento por uma faixa de 20 MHz, entre 2,435 e 2,455 GHz, com amplitudes superiores a -40 dBm, atingindo o nível de pico de 3,03 dBm na frequência de 2,449 GHz.

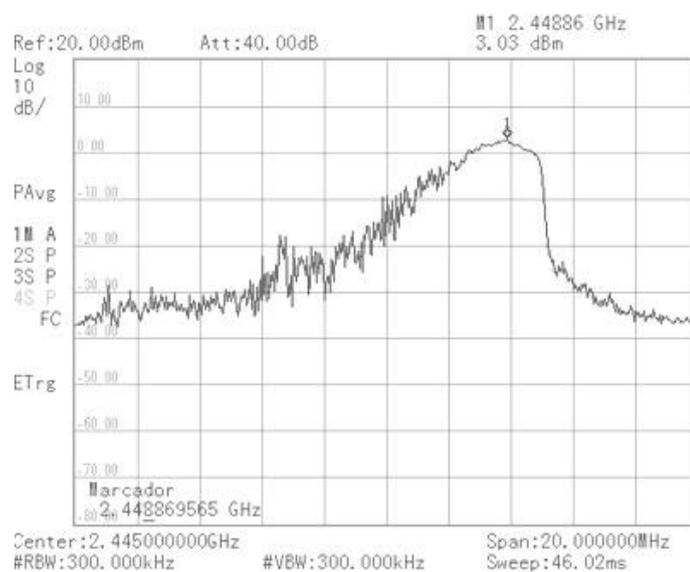


Figura 7.2: Sinal radiado pelo forno de micro-ondas no domínio da frequência.

O sinal radiado pelo forno no domínio do tempo está apresentado na Figura 7.3, na qual pode-se constatar a oscilação do sinal radiado em ciclos de *on* e *off*, com período total de 16,91 milissegundos.

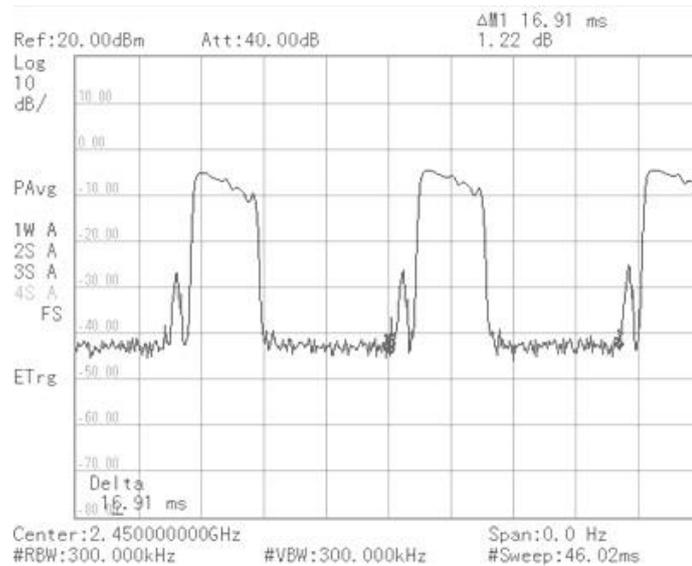
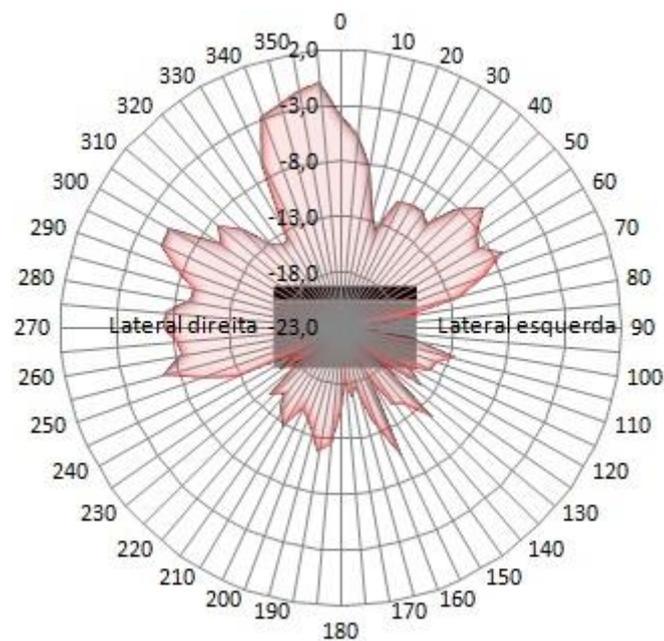


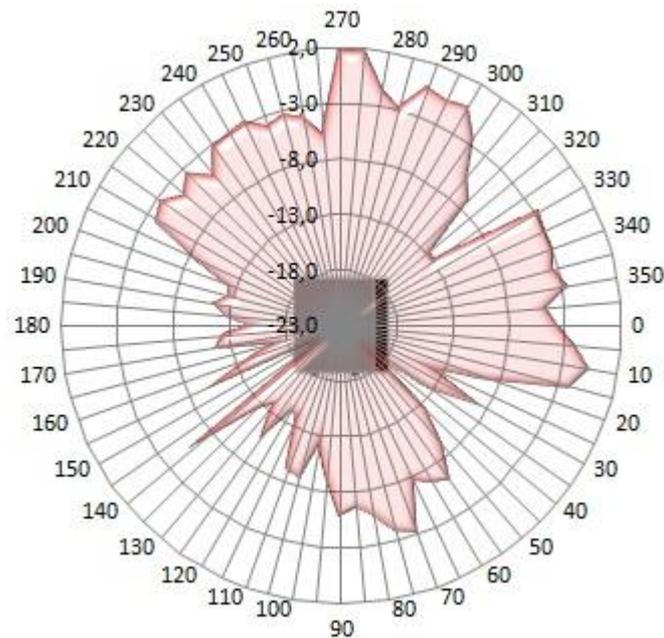
Figura 7.3: Sinal radiado pelo forno de micro-ondas no domínio do tempo.

### 7.1.2. Diagramas de Radiação Vertical e Horizontal

Os diagramas de radiação vertical e horizontal do forno foram obtidos obedecendo aos procedimentos apresentados no capítulo anterior, variando o ângulo a cada 5°. As Figuras 7.4a e 7.4b apresentam os diagramas polares de radiação obtidos em dBm.



(a) Horizontal.



(b) Vertical.

Figura 7.4: Diagramas de radiação do forno de micro-ondas.

Os diagramas de radiação obtidos permitem verificar a distribuição espacial do sinal que extrapola a blindagem do forno. No diagrama horizontal observa-se a maior parcela do sinal concentrada na região frontal do forno, onde o pico se encontra no ângulo de  $355^\circ$ , e a menor parcela localizada na parte lateral esquerda, apresentando um nulo em  $90^\circ$ . No diagrama vertical a maior parte do sinal interferente se espalha na região superior do forno, com o nível de pico em  $270^\circ$ , e é na região inferior do forno que a menor parcela do sinal escapa, apresentando um nulo em  $40^\circ$ .

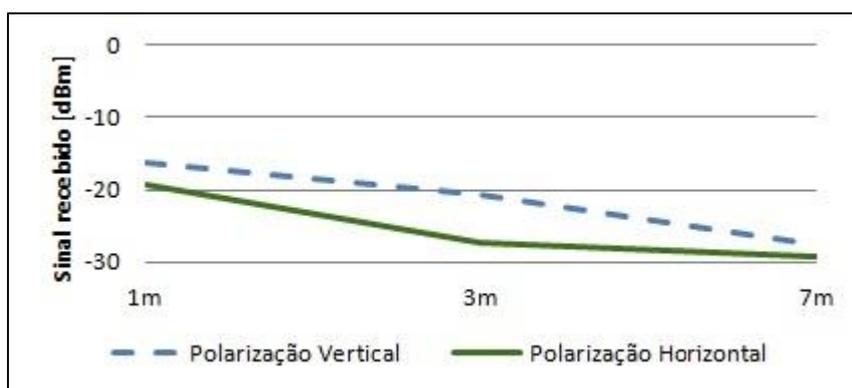
Dessa forma, considerando a distribuição espacial do sinal radiado pelo forno obtida para os dois planos, é possível determinar que para os níveis máximos de radiação os valores de  $\alpha$  e  $\beta$  serão  $355^\circ$  e  $270^\circ$ , respectivamente. E ainda, para os níveis mínimos de radiação os valores de  $\alpha$  e  $\beta$  serão  $90^\circ$  e  $40^\circ$ , respectivamente. Diante desses resultados, é possível definir as radiais A e B, para os valores de  $\alpha$  e  $\beta$  obtidos, como sendo as radiais de máxima e mínima radiação do forno de micro-ondas.

### 7.1.3. Nível de Sinal Radiado em Função da Variação da Posição, Distância e da Polarização da Antena Receptora

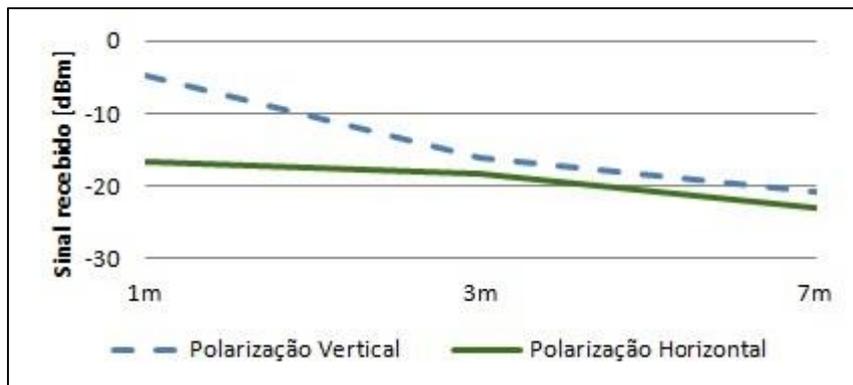
Para verificar a variação dos níveis do sinal radiado pelo forno de acordo com a posição, distância e polarização da antena receptora, foram realizadas medidas considerando as configurações definidas no capítulo anterior, cujos resultados estão dispostos nas Figuras 7.5a, 7.5b, 7.5c e 7.5d.



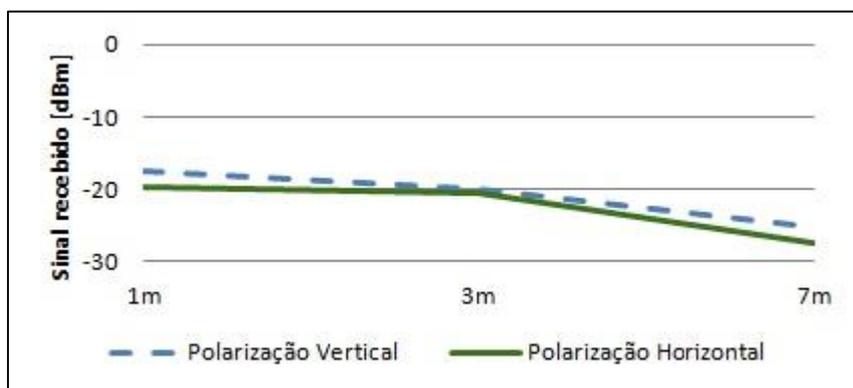
(a) Posição frontal.



(b) Posição traseira.



(c) Posição lateral direita.



(d) Posição lateral esquerda.

Figura 7.5: Curvas de intensidade de sinal recebido em função da variação da posição, da distância e da polarização da antena.

Dos gráficos produzidos é possível verificar em todas as configurações avaliadas um maior nível de sinal para a polarização vertical da antena receptora, ou seja, a maior parcela da energia do sinal radiado pelo forno se concentra na polarização vertical. De outro modo, foi constatada uma queda média do sinal radiado pelo forno de cerca de 6 dB, para a variação da distância de um a três metros, e de 4 dB para variação da distância de três a sete metros. Ou seja, o sinal sofre uma atenuação significativa com a variação da distância, independentemente da polarização e da posição da antena em relação ao forno.

## 7.2. Obtenção das Taxas de Erro de CRC (CRC-ER)

Para possibilitar a análise dos efeitos da interferência gerada pelo forno de micro-ondas no desempenho das redes sem fio dos padrões IEEE 802.11b/g/n, foram realizadas medições a

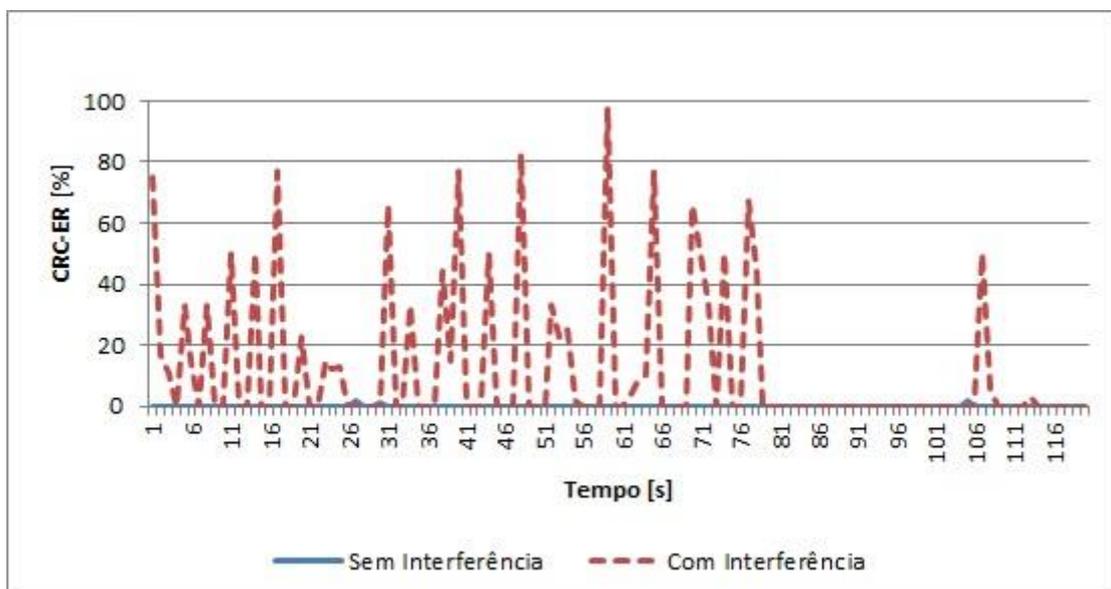
partir das quais foram obtidas CRC-ER, para os três padrões, em situações com e sem a presença do sinal interferente. As medições foram realizadas para cada uma das variáveis consideradas: padrão, canal, distância e posição.

### 7.2.1. CRC-ER em Função do Padrão de Transmissão

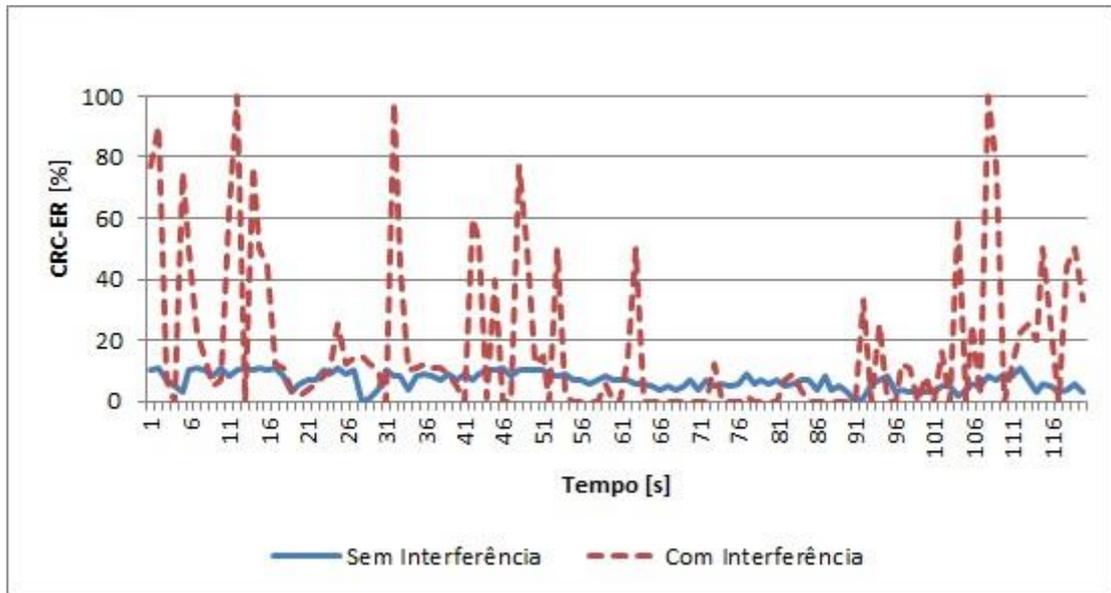
Conforme descrito na seção 7.1, verificou-se que o nível de pico dos sinais emitidos pelo forno de micro-ondas se encontra na frequência de 2,449 GHz. E ainda, foi constatado que a maior parcela da energia desses sinais se concentra na polarização vertical. Diante disso, com relação à configuração da rede sem fio, utilizada nas medições que possibilitaram a obtenção dos resultados expostos a seguir, foi definido o canal 8 para operação do *access point*, pois sua frequência central (2,447 GHz) é a que mais se aproxima da frequência do nível de pico do sinal gerado pelo forno. Foram, também, posicionadas as antenas da rede sem fio para a posição vertical.

Ambos os parâmetros foram definidos de modo que a rede se tornasse mais suscetível à interferência gerada pelo forno.

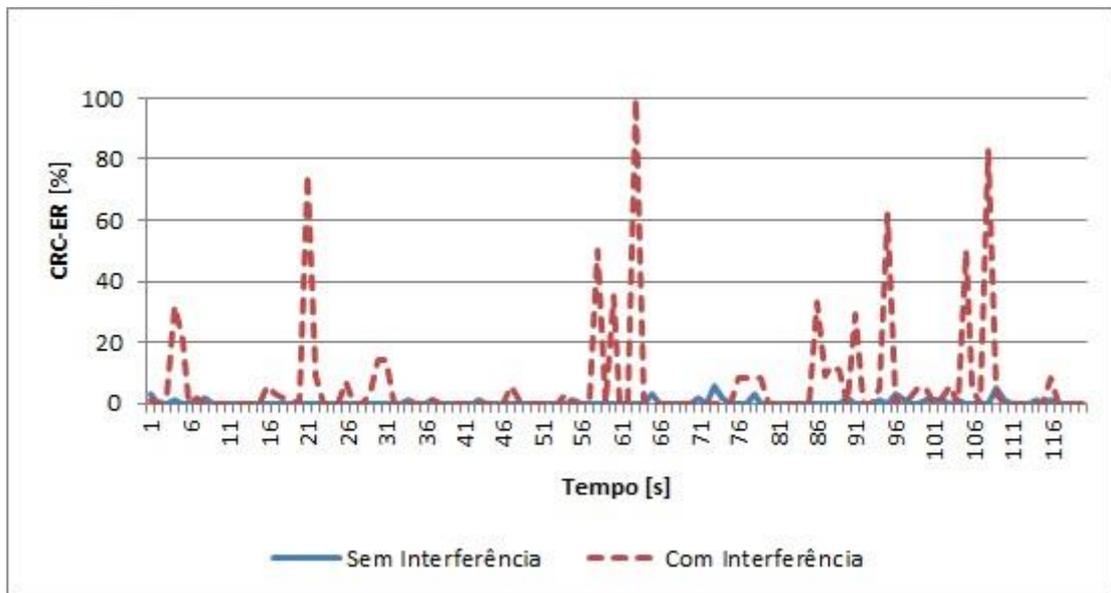
As Figuras 7.6a, 7.6b e 7.6c apresentam três gráficos contendo curvas correspondentes às respectivas CRC-ER obtidas para os três padrões por um período de dois minutos, com e sem a presença da interferência.



(a) Padrão IEEE 802.11b.



(b) Padrão IEEE 802.11g.



(c) Padrão IEEE 802.11n.

Figura 7.6: CRC-ER em função da variação do padrão de transmissão.

Da análise dos gráficos acima, é possível constatar um aumento acentuado nas CRC-ER da rede sem fio, independentemente do padrão utilizado. Cabe destacar que para as três medições com a presença do sinal interferente, após 65 segundos o *download* do arquivo, previamente iniciado, foi completamente interrompido, o que indica um nível crítico de comprometimento do desempenho da rede sem fio em operação nas condições avaliadas.

A Figura 7.7 a seguir apresenta um gráfico de blocos onde é possível comparar a variação das CRC-ER, em valores médios, para os três padrões avaliados, com e sem a presença do sinal interferente. Verifica-se claramente uma maior robustez do padrão IEEE 802.11n contra a interferência gerada pelo forno de micro-ondas, em relação aos demais padrões avaliados. Do outro lado, o padrão IEEE 802.11g apresentou alta suscetibilidade a interferências, inclusive, provenientes de outras fontes, uma vez que, mesmo sem a presença do sinal gerado pelo forno de micro-ondas, este padrão já apresentava uma elevada CRC-ER, em relação aos demais padrões.

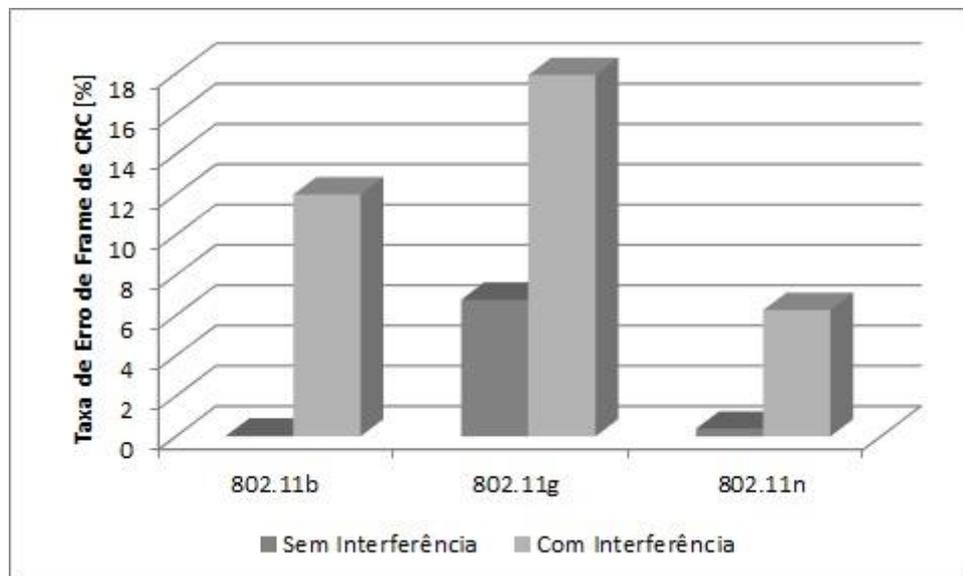
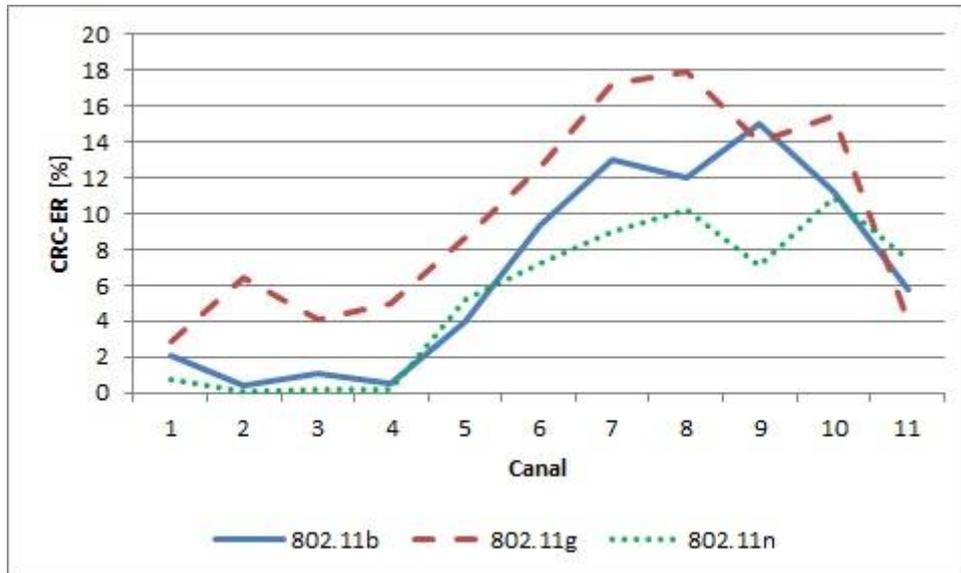


Figura 7.7: Comparativo das CRC-ER em função do padrão de transmissão.

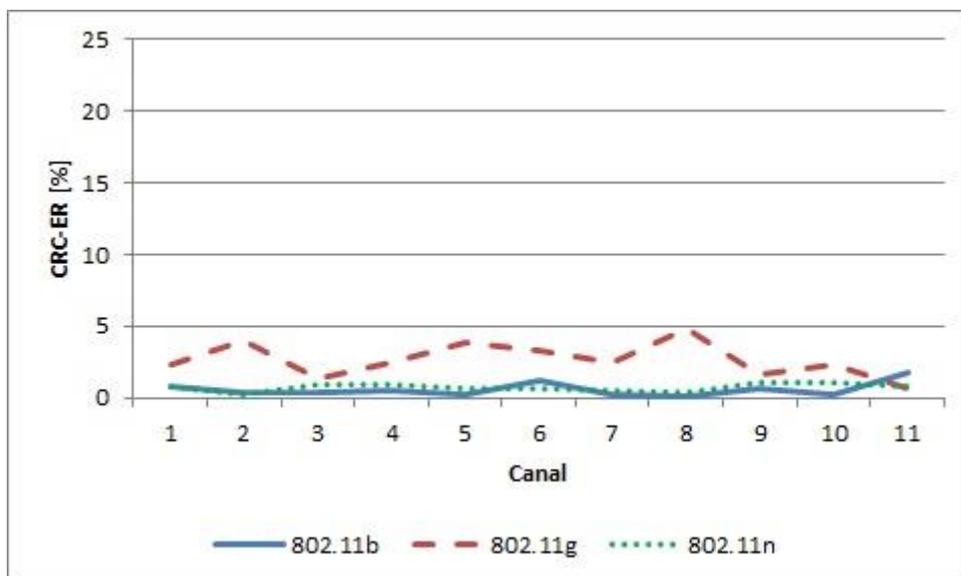
### 7.2.2. CRC-ER em Função do Canal de Transmissão

As medições correspondentes aos resultados apresentados nesta seção foram realizadas nas mesmas condições e configurações utilizadas na obtenção dos resultados apresentados na seção anterior, conforme especificado no capítulo 6. No entanto, esta seção apresenta os níveis de CRC-ER em função da variação do canal de transmissão da rede sem fio, ou seja, foram realizadas coletas das CRC-ER com a rede sem fio operando em cada um dos onze canais existentes na faixa ISM de 2,4 GHz, com e sem a presença da interferência gerada pelo forno de micro-ondas.

As Figuras 7.8a e 7.8b mostram gráficos contendo os valores médios de CRC-ER obtidos para os canais de 1 a 11 da faixa ISM de 2,4 GHz, com e sem a presença da interferência.



(a) Ambiente com interferência.



(a) Ambiente sem interferência.

Figura 7.8: CRC-ER em função do canal de transmissão.

Os resultados apresentados na Figura 7.8 mostram que na faixa compreendida entre os canais 6 e 10, ou seja, entre 2,437 GHz e 2,457 GHz, a rede apresenta as maiores CRC-ER, para os três padrões testados. Esses resultados apresentaram boa concordância com a

distribuição dos níveis do sinal radiado pelo forno no domínio da frequência, apresentada na Figura 7.2. Com relação à análise dos padrões de comunicação, verifica-se, conforme esperado, uma maior robustez do padrão IEEE 802.11n, justificada pela utilização das técnicas MIMO e OFDM combinadas.

### 7.2.3. CRC-ER em Função da Distância e da Posição

A partir dos resultados obtidos e apresentados na seção 7.1, foram definidos alguns parâmetros do *setup* das medições realizadas para a obtenção das CRC-ER em função da variação da distância e da posição relativa entre o forno de micro-ondas e os dispositivos da rede sem fio.

Inicialmente, foram definidas as radiais de medição. A radial A, para maior radiação do forno, isto é, onde os efeitos da interferência sobre o desempenho da rede sem fio são mais acentuados, e B, para menor radiação do forno, onde os efeitos da interferência são mínimos. Essas radiais podem ser identificadas a partir da análise dos diagramas horizontal e vertical do forno de micro-ondas, obtidos e apresentados na seção 7.1, onde a radial A corresponde a  $\alpha = 355^\circ$  e  $\beta = 270^\circ$ , e a radial B corresponde a  $\alpha = 90^\circ$  e  $\beta = 40^\circ$ .

Para a realização das medições na radial A, a rede sem fio foi configurada para operar no canal 8, em razão deste estar mais próximo da frequência de maior radiação do forno, e ainda, as antenas da rede foram posicionadas na posição vertical, onde a maior parte da energia do sinal radiado pelo forno se concentra. Para a realização das medições na radial B, a rede sem fio foi configurada para operar no canal 1, em razão deste estar mais próximo da frequência de menor radiação do forno, e ainda, as antenas da rede foram posicionadas na posição horizontal, onde a menor parte da energia do sinal radiado pelo forno se concentra.

Ainda, conforme especificado no capítulo anterior, foram realizadas medições em três pontos para cada radial, para as distâncias de 1, 3 e 7 metros entre o *access point* e o forno de micro-ondas.

A Figura 7.9 ilustra a orientação das radiais A e B de acordo com a perspectiva do forno de micro-ondas.

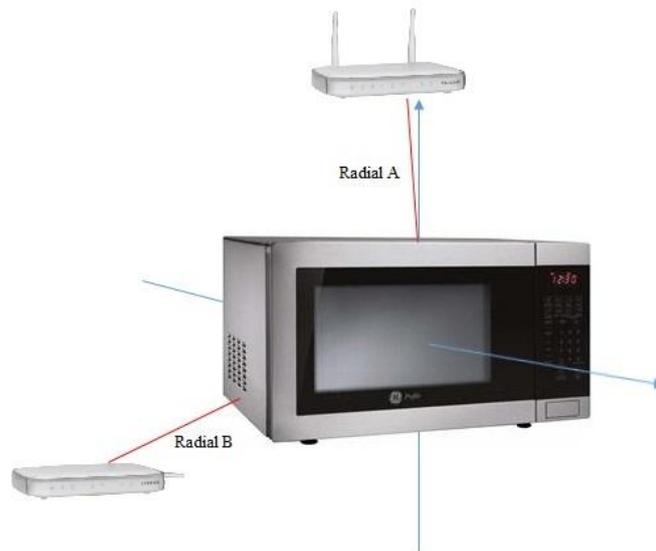


Figura 7.9: Orientação das radiais de medição.

Por conveniência prática, para as medições realizadas para a radial A o forno de micro-ondas foi posicionado com sua face lateral esquerda paralela ao solo. As medições para a radial B foram realizadas com o forno de micro-ondas na sua posição normal, com a parte de baixo paralela ao solo, conforme mostra a Figura 7.10.



(a) Radial A

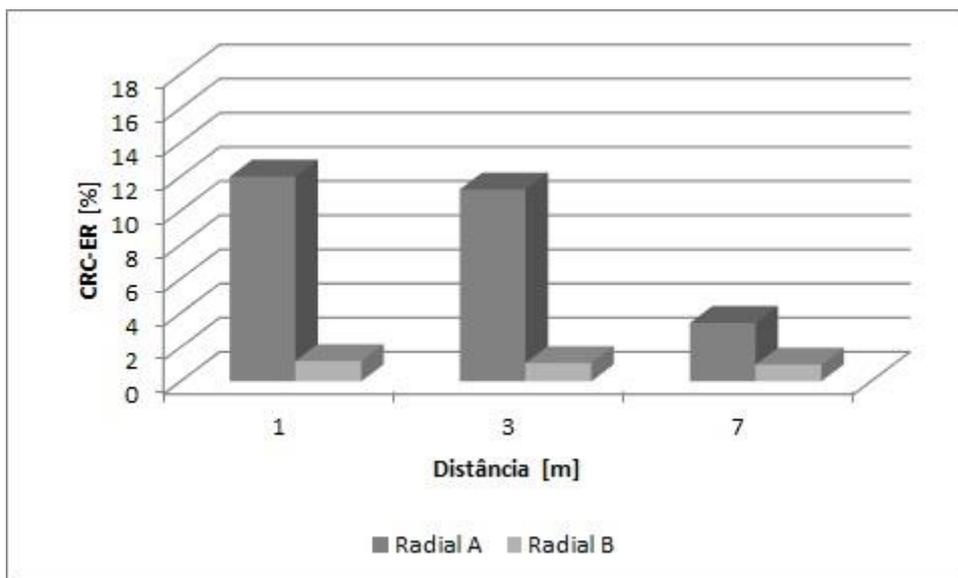


(b) Radial B

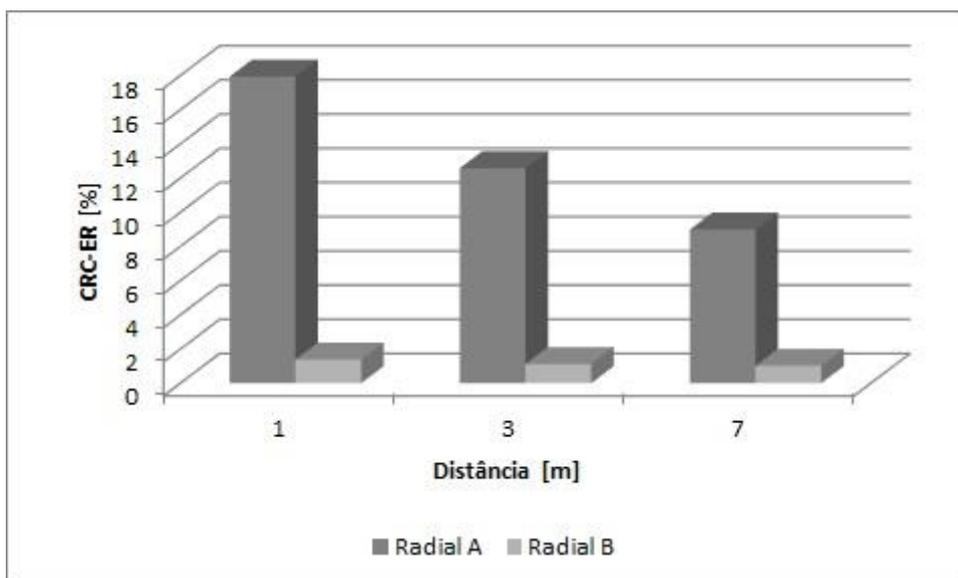
Figura 7.10: Setup de medição das CRC-ER em função da posição e da distância.

As Figuras 7.11a, 7.11b e 7.11c, apresentam os resultados obtidos nos experimentos realizados. A partir da análise desses resultados é possível constatar que, conforme esperado, a radial A concentra os casos mais críticos, ou seja, há maior incidência de *frames* de CRC que

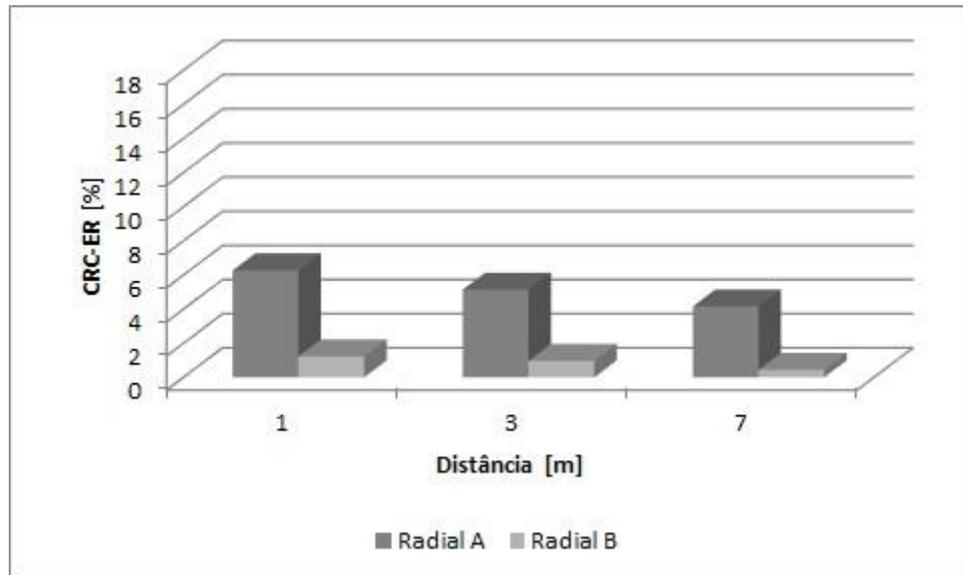
chegam aos receptores da rede com erro, provocado pelo sinal interferente do forno. Já na radial B, como as amostras de CRC-ER obtidas não atingiram sequer o patamar de 2 %, para todas as condições avaliadas, se verifica que nessa radial a rede sem fio opera com níveis de CRC-ER próximos aos níveis obtidos quando operando no ambiente sem a presença da interferência gerada pelo forno de micro-ondas.



(a) Padrão IEEE 802.11b.



(b) Padrão IEEE 802.11g.



(c) Padrão IEEE 802.11n.

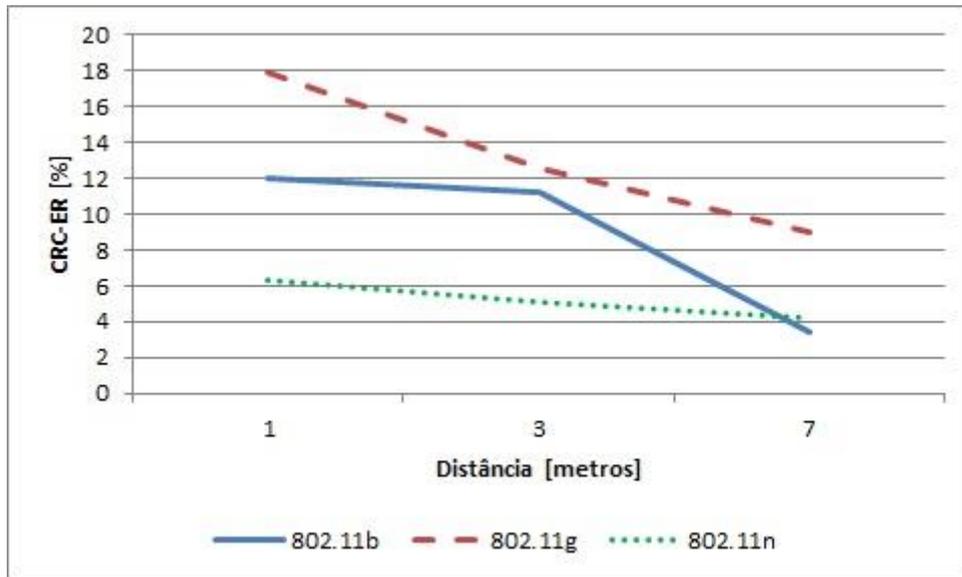
Figura 7.11: Gráfico comparativo das CRC-ER de acordo com a radial avaliada.

A Tabela 9 apresenta os valores médios das amostras obtidas nas medições e a variação percentual das CRC-ER entre a amostra obtidas nas radiais A e B.

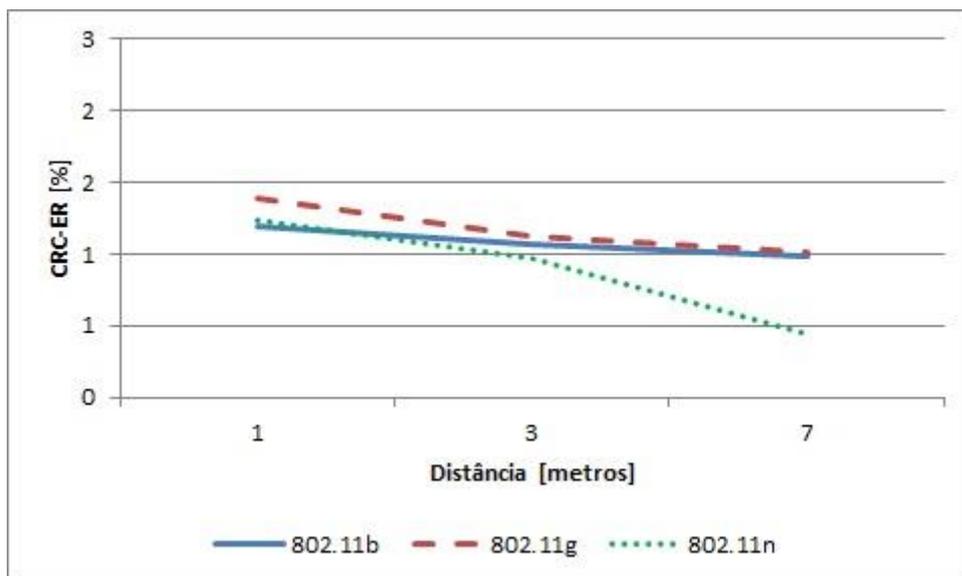
Tabela 9: Variação das CRC-ER para as radiais A e B.

Distância [metros]	Padrão de transmissão	CRC-ER [%]		Variação
		Radial A	Radial B	
1	802.11b	12,01	1,19	1009,24 %
	802.11g	17,93	1,38	1299,28 %
	802.11n	6,28	1,23	510,57 %
3	802.11b	11,25	1,07	1051,40 %
	802.11g	12,58	1,12	1223,21 %
	802.11n	5,14	0,97	529,90 %
7	802.11b	3,43	0,98	350,00 %
	802.11g	8,98	1,02	880,39 %
	802.11n	4,16	0,44	945,45 %

Adicionalmente, os gráficos apresentados nas Figuras 7.12a, e 7.12b, possibilitam uma visualização mais adequada da variação das CRC-ER em função da variação da distância e seus valores para cada padrão de transmissão.



(a) Radial A.



(b) Radial B.

Figura 7.12: CRC-ER em função da posição e da distância.

---

## 8. Conclusões

---

### 8.1. Considerações Finais

Neste trabalho foi apresentada uma análise do comportamento das taxas de erro de CRC – *Cyclic Redundancy Check*, correspondentes aos dados transmitidos por redes sem fio que utilizam a faixa de 2,4 GHz com os padrões IEEE 802.11b/g/n, quando expostas à interferência provocada por um forno de micro-ondas, ambos inseridos em um mesmo ambiente, porém, dispostos em diferentes configurações geográficas, considerando, ainda, as características de emissão do forno e a variação do canal de operação da rede sem fio.

Neste contexto, foi realizada uma revisão bibliográfica sobre o tema, na qual foram abordados conceitos e fundamentos do forno de micro-ondas doméstico, nas suas características de funcionamento e propriedades eletromagnéticas. Também foram abordadas as principais características dos padrões IEEE 802.11b/g/n, especificamente no que diz respeito aos parâmetros de transmissão definidos para suas respectivas camadas física e de acesso ao meio. Referências acerca da técnica de controle de erro CRC – *Cyclic Redundancy Check*, foram consultadas no que diz respeito ao seu princípio básico de funcionamento. Por fim, conceitos acerca da ocorrência de interferência eletromagnética sobre redes sem fio foram estudados e aludidos nesta pesquisa.

Foram realizados experimentos, cuja metodologia foi, em parte, fundamentada nos procedimentos utilizados em [14], a partir dos quais foi caracterizada a interferência gerada pelo forno de micro-ondas, nos seus aspectos fundamentais e nas suas características de propagação. Os resultados obtidos nesses experimentos foram essenciais na determinação das posições geográficas dos demais dispositivos em relação ao forno, a serem avaliadas nos experimentos seguintes.

Em seguida, foram realizados experimentos para obtenção das taxas de erro de CRC, considerando a variação do padrão IEEE, do canal de transmissão, da posição e da distância relativa do forno de micro-ondas e dos dispositivos das redes sem fio

Os resultados obtidos se mostraram coerentes com resultados apresentados em outras referências relacionadas, e satisfatórios do ponto de vista quantitativo, uma vez que os dados foram suficientes para evidenciar o impacto da interferência gerada pelo forno de micro-ondas no desempenho da rede sem fio nas condições avaliadas.

A partir desses resultados, foi possível diagnosticar a condição ótima de operação da rede sem fio com a presença da interferência gerada pelo forno de micro-ondas, dentro do contexto abordado neste trabalho, a saber:

- Padrão de transmissão: IEEE 802.11n.
- Canal de operação da rede: 1 (2,412 GHz).
- Polarização das antenas: Horizontal.
- Posição: Radial B.
- Distância: 7 metros.

Desse modo, a análise dos resultados obtidos permitiu constatar que os efeitos da interferência gerada pelo forno de micro-ondas sobre a rede sem fio podem ocorrer de forma mais ou menos crítica, a depender do padrão de transmissão e do canal utilizados. Além disso, os dados indicam que devem ser considerados outros parâmetros, tais como distância e posição relativa, para se obter um desempenho minimamente satisfatório da rede quando em situação de interferência.

## 8.2. Trabalhos Futuros

Como proposta de continuidade desse trabalho, novas pesquisas podem ser realizadas com o objetivo de ampliar as avaliações realizadas neste trabalho considerando novas configurações e, conseqüentemente, novas variáveis como:

- Avaliação da interferência gerada por fornos de micro-ondas industriais;
- Efeitos da interferência sobre redes de sensores em ambiente industriais;
- Efeitos da interferência sobre dispositivos sem fio móveis.
- Avaliação da variação de outros parâmetros de transmissão como *throughput* e taxa de erro de bit.

---

# Bibliografia

---

- [1] Cisco VNI Mobile, "Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2013–2018," San Jose, CA, 2014.
- [2] S. Miyamoto and N. Morinaga, "Effect of Microwave Oven Interference on the Performance of Digital Radio Communications Systems," *Communications, 1997. ICC '97 Montreal, Towards the Knowledge Millennium. 1997 IEEE International Conference on*, pp. 51 - 55 vol.1, 08 07 1997.
- [3] J. M. Osepchuk, "Microwave Ovens: An Overview: 2013," in *International Microwave Power Institutes Forum for Microwave Technology Discussion*, Concord, MA, 2013.
- [4] M. Kabra and J. Sarlo, "Microwave Oven Interference with 802.11," *CSE 222a: Computer Communications Networks*, 23 03 2006.
- [5] A. Kamerman e N. Erkoçevic, "Microwave Oven Interference on Wireless LANs Operating in the 2.4 GHz ISM Band," *Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 1997. Waves of the Year 2000. PIMRC '97., The 8th IEEE International Symposium*, pp. 1221 - 1227 vol.3, 09 01 1997.
- [6] N. Tai Kai e C. W. Chan, "Microwaves and Microwave Oven," *Enhancing Science Learning Through Electronic Library*, 2003.
- [7] "Papo Físico," 2013. [Online]. Available: <http://papofisico.tumblr.com/post/36105055409/como-funciona-um-forno-de-microondas>. [Acesso em 05 08 2014].
- [8] S.-K. Lee, "Principles of Microwave Oven," Department of Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University , Hong Kong, 2004.
- [9] R. P. d. Carvalho, *Micro-ondas*, São Paulo: Livraria da Física, 2005.
- [10] I. Mai, *Utilizando um Forno de Micro-ondas e um Disco Rígido de Computador como Laboratório de Física*, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul Porto Alegre, 2008.

- [11] K. S. . B. dos Santos, “Magnetron: Do Radar ao Forno de Micro-ondas,” Brasília, DF, 2011.
- [12] R. Bardine, “Cola da Web.com,” 07 06 2012. [Online]. Available: <http://www.coladaweb.com/curiosidades/forno-de-micro-ondas-como-funciona>. [Acesso em 08 05 2014].
- [13] T. W. Rondeau, M. F. D’Souza e D. G. Sweeney, “Residential Microwave Oven Interference on Bluetooth Data Performance,” *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, Vol. 50, No. 3, pp. 856 - 863, 8 10 2004.
- [14] P. Gawthrop, F. Sanders, K. Nebbia e J. Sell, “NTIA Technical Report TR-94-303-1: Radio Spectrum Measurements of Individual Microwave Ovens – Volume 1,” Publications Officer Institute for Telecommunication Sciences, Washington, USA, 1994.
- [15] Associação Brasileira de Normas Técnicas, “NBR IEC/CISPR11:2012,” Brasília, Distrito Federal, 2012.
- [16] A. S. Tanenbaum, *Computer Networks - Fourth Edition*, Amsterdam, NE: Campus, 2004.
- [17] K. D. Lowham, “Synchronization Analysis and Simulation of a Standard IEEE 802.11g OFDM Signal,” Dissertação de Mestrado, Naval Postgraduate School, Monterey, California, 2004.
- [18] B.-H. M. Barizon, “Medidas de Propagação em 2.4 Ghz para o Planejamento de Redes Locais de Acesso sem fio,” Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Rio De Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.
- [19] D. Bakin, “Evolution of 802.11 (physical layer),” 20 05 2007. [Online]. Available: <http://www.okob.net/texts/mydocuments/80211physlayer/>. [Acesso em 03 09 2013].
- [20] H. A. Costa, “Redes: Fundamentos,” Blogger, 08 03 2012. [Online]. Available: <http://phantomsys.blogspot.com.br/2012/03/wi-fi.html>. [Acesso em 15 05 2014].
- [21] M. P. F. Carvalho, *Análise do Desempenho de WLAN com a Implementação dos Protocolos de Segurança WEP e WPA/TKIP*, Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica, Campinas, 2008.
- [22] R. J. Bartz, *Certified Wireless Technology Specialist: Official Study Guide*, Indianapolis, USA: Sybex, 2009.

- [23] M. Fainberg, *A Performance Analysis of The IEEE 802.11b Local Area Network in the Presence of Bluetooth Personal Area Network*, Dissertação de Mestrado, Politechnic University, New York City, NY, 2001.
- [24] R. Read, *The Essence of Communications Theory*, Prentice Hall, 1998.
- [25] B. Pearson, “Complementary Code Keying Made Simple, Application Note 9850,” Intersil, 2000.
- [26] D. Vassis, G. Kormentzas, A. Rouskas e I. Maglogiannis, “The IEEE 802.11g Standard for High Data Rate WLANs,” *IEEE NETWORK MAGAZINE*, nº May/June 2005, pp. 21-26, .
- [27] LitePoint Corporation, *Practical Manufacturing Testing of 802.11 OFDM Wireless Devices*, Sunnyvale, CA, 2010.
- [28] D. V. N. Coelho, “Estudo sobre a Viabilidade de Utilização de Sistemas com Multiplexação por Subportadora,” Dissertação de Mestrado, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2007.
- [29] S. Haykin, *Communication Systems*, New York, USA: John Wiley & Sons, Inc, 2001.
- [30] F. L. MINOZZO, “Estudo Comparativo entre o Padrão IEEE 802.11g e o Draft 2.0 IEEE 802.11n,” São José, 2009.
- [31] AirMagnet Wireless Network Assurance, “White Paper: 802.11n Primer,” Sunnyvale, USA, 2008.
- [32] Xirrus, Inc, “802.11n Demystified - Tutorial,” Thousand Oaks, USA, 2008.
- [33] Inscope Data, “Introduction to 802.11n Outdoor Wireless Networks,” 2011.
- [34] H. S. Warren, *Hacker’s Delight*, Second Edition, Addison-Wesley Professional, 2012.
- [35] R. Barbosa, “Detecção de erros de comunicação de dados CRC,” Porto, POR, 2011.
- [36] BandSpeed, Inc, “Understanding the Effects of Radio Frequency (RF) Interference on WLAN Performance and Security,” 2010.
- [37] L. Qing , L. Bin, L. Yu e Z. Lin, “An Adaptive Modulation Selection Scheme Based on Error Estimating Coding,” *Mobile Ad-hoc and Sensor Networks (MSN), 2011 Seventh International Conference on*, pp. 330-334, 16 12 2011.
- [38] A. Hithnawi, “An On-Demand Rate-Adaptation Mechanism For IEEE 802.11 Networks,” Masters Thesis, Aachen, Germany, 2011.

- [39] AirMagnet, *Guia do Usuário - AirMagnet Wifi Analyzer*, 2008.