

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA
CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA

MARCA D'ÁGUA PARA
DOCUMENTOS VIA MODULAÇÃO
DE LUMINÂNCIA

Tese de Doutorado submetida à
Universidade Federal de Santa Catarina
como requisito parcial à obtenção do grau de
Doutor em Engenharia Elétrica

PAULO VINICIUS KOERICH BORGES

Florianópolis, março de 2008.

MARCA D'ÁGUA PARA DOCUMENTOS VIA MODULAÇÃO DE LUMINÂNCIA

Paulo Vinicius Koerich Borges

Esta tese foi julgada adequada para a obtenção do título de *Doutor em Engenharia Elétrica*, área de concentração *Comunicações e Processamento de Sinais*, sendo aprovada em sua forma final pelo programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina.

Prof. Joceli Mayer, Ph.D.
orientador

Prof. Katia Campos de Almeida, Ph.D.
Coordenadora do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
da Universidade Federal de Santa Catarina.

Banca Examinadora

Prof. Joceli Mayer, Ph.D.

José Carlos Moreira Bermudez, Ph.D.

Vítor Heloiz Nascimento, Ph.D.

Hae Yong Kim, Dr.

Jean-Yves Tourneret, Dr.

Dedico esta tese à minha querida Andréia.

Agradecimentos

Agradeço aos professores Joceli Mayer, José Carlos Moreira Bermudez e Márcio Holsbach Costa, pelo apoio recebido e infra-estrutura concedida. Agradecimento especial ao professor Joceli, pela orientação e pelas inúmeras sugestões, fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço também aos professores Vitor Heloiz Nascimento, Hae Yong Kim e Jean-Yves Tournernet pela participação na banca examinadora. Agradeço ainda ao Prof. Ebroul Izquierdo, pela oportunidade e pelo apoio durante o meu estágio no Reino Unido.

Agradeço também a todos os amigos e colegas do LPDS, pelo saudável convívio e apoio.

Um agradecimento especial aos meus amigos “do bairro,” do surf e da capoeira, pela amizade e bom-humor, apesar da falta de curiosidade a respeito do meu trabalho... ☺

Agradeço a todos os meus familiares de Blumenau e do Rio de Janeiro, em especial à minha tia Ângela e ao meu avô Belarmino, por fazerem parte do meu crescimento.

Agradeço ainda, com extremo carinho, à minha querida esposa Andréia, pela sua paciência, apoio, doçura e companheirismo, que sem dúvida me deram ainda mais motivação para a conclusão deste trabalho.

Finalmente, gostaria de agradecer aos meus pais, Paulo Sergio e Hélia Maria, e à minha irmã Beatrice, pela ajuda emocional, carinho e convívio, além da educação e apoio financeiro recebidos ao longo da minha vida.

Resumo da Tese de Doutorado apresentada à UFSC como parte dos requisitos para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Elétrica.

MARCA D'ÁGUA PARA DOCUMENTOS VIA MODULAÇÃO DE LUMINÂNCIA

Paulo Vinicius Koerich Borges

Março/2008

Orientador: Joceli Mayer, Ph.D.

Área de concentração: Comunicações e Processamento de Sinais.

Palavras-chave: processamento de imagens, marcas d'água.

Número de páginas: 160.

RESUMO: Este trabalho discute um novo método de marcas d'água *hardcopy* para inserir informação escondida em documentos. O método é chamado de Modulação em Luminância de Texto (TLM). O método pode inserir informação em documentos compostos por qualquer tipo de conteúdo, desde que possam ser representados originalmente como documentos binários. Nesta abordagem, a mensagem é inserida por meio de uma modificação na luminância dos caracteres, sem causar um impacto perceptual relevante. Assim, uma modulação de tons de cinza é adicionada ao texto original. O sistema é projetado para sobreviver às operações de impressão e escaneamento, e marcas visíveis não são necessárias para sincronização na detecção, o que é uma tarefa desafiadora em marcas d'água *hardcopy*.

No processo de detecção, diversas métricas de detecção são propostas. Após o escaneamento do documento, a métrica de detecção mais simples é a luminância média de um caractere. Porém, explorando as características do *halftone* no processo de impressão, é mostrado que propriedades estatísticas tais quais a variância, a *skewness* e a *kurtosis* também são métricas de detecção eficientes. Além disso, a modulação de luminância simples é estendida para modulação de cor e de *halftone*, onde diferentes matrizes de *halftone* são usadas na impressão, de acordo com o bit inserido no caractere. As diferentes métricas são combinadas de acordo com o classificador de Bayes, melhorando significativamente o desempenho do sistema. Análises para a determinação da taxa de erro são apresentadas para cada uma dessas métricas, considerando o canal de impressão e escaneamento proposto. As análises e a aplicabilidade do métodos são validadas por experimentos.

Abstract of Thesis presented to UFSC as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor in Electrical Engineering.

HARDCOPY WATERMARKING VIA CHARACTER LUMINANCE MODULATION

Paulo Vinicius Koerich Borges

March/2008

Advisor: Joceli Mayer, Ph.D.

Area of concentration: Communications and Signal Processing.

Keywords: image processing, digital watermarking.

Number of pages: 160.

ABSTRACT: This work discusses a new hardcopy watermarking method to embed hidden data in office-like documents. The method is entitled Text Luminance Modulation (TLM). It can insert information in documents composed by any kind of content, as long as the content can be represented by binary text, logos, math symbols, and even line-drawings. In this approach, a watermark message is embedded by slightly modulating the luminance of documents characters while providing low perceptual impact. A grey level modulation is added to the original text resembling a Pulse Amplitude Modulation system, where the characters themselves are modulated. The system is designed to survive the print and scan operation, and visible marks are not required to achieve detection synchronization, a challenging task in hardcopy watermarking.

In the detection procedure, several detection metrics are proposed. After the document is scanned, the simplest detection metric is the mean luminance of a character. However, exploiting characteristics of halftoning in the printing process, it is shown that other statistical properties such as the variance, the skewness and the kurtosis are also efficient detection metrics. In addition, simple luminance modulation is extended to colour modulation and halftone modulation, where different halftone screens are used for printing, according to the bit to be embedded in the character. The different metrics are combined according to the Bayes classifier, providing a significantly better performance than using the metrics separately. Analyses to determine the bit error rate are presented for each of the metrics, considering a proposed print-scan channel model. The analyses and applicability of TLM are validated by experiments.

Sumário

1	INTRODUÇÃO	1
2	APLICAÇÕES E PROPRIEDADES	6
2.1	Aplicações	6
2.1.1	Proteção de Direitos Autorais	6
2.1.2	Fingerprinting	7
2.1.3	Proteção Contra Cópias Ilegais	7
2.1.4	Monitoramento de Transmissões	8
2.1.5	Autenticação de Conteúdo	8
2.1.6	Indexação de Dados	9
2.2	Propriedades	9
2.2.1	Fidelidade	10
2.2.2	Capacidade	10
2.2.3	Robustez	11
2.2.4	Segurança	11
2.2.5	Detecção Cega e Não-Cega	12
2.3	Conclusões	12
3	TÉCNICAS EXISTENTES	13
3.1	Métodos Clássicos	13
3.1.1	Método Básico por Correlação	13
3.1.2	Marcas D'Água via SS-CDMA	16
3.1.3	Marca D'Água via QIM	17
3.1.4	Bits Menos Significativos	18
3.2	Efeitos da Impressão e do “Escaneamento”	19
3.2.1	Características dos Dispositivos	20
3.2.2	O Processo de Halftoning	22
3.3	Marcas d'Água Hardcopy	23
3.3.1	Marca d'Água para Imagens	23
3.3.2	Marcas D'Água para Texto	25
3.4	Conclusões	28
4	CANAL DE IMPRESSÃO E “ESCANEAMENTO” PROPOSTO	29
4.1	Modelo de Canal de Impressão e “Escaneamento” Proposto	29
4.1.1	Distorções nos Valores de Pixel	30
4.1.2	Modificações Propostas	30
4.1.3	Distorções Geométricas	33
4.2	Efeitos Causados pelo Halftone	34

4.2.1	Variância Amostral	35
4.2.2	Skewness Amostral	35
4.2.3	Curtose Amostral	36
4.2.4	Comentários sobre σ_b^2 , γ_{1b} e γ_{2b}	37
4.3	Conclusões	41
5	MÉTODO PROPOSTO - TLM	42
5.1	Solução Proposta	42
5.1.1	Inserção Genérica	44
5.1.2	Limite Superior para Capacidade	44
5.1.3	Implementação Prática	47
5.1.4	Limiarização	48
5.2	Conclusões	49
6	MÉTRICAS PARA DETECÇÃO	51
6.1	Suposições Estatísticas para as Distorções	52
6.2	Métricas de Detecção Estatísticas	53
6.2.1	Detecção pela Média Amostral	53
6.2.2	Detecção pela Variância Amostral	55
6.3	Detecção Usando Momentos Estatísticos de Ordem Elevada	58
6.3.1	Skewness Amostral	58
6.3.2	Curtose Amostral	59
6.4	Detecção Espectral	59
6.5	Combinando Diferentes Métricas	62
6.6	Conclusões	63
7	OUTRAS APLICAÇÕES	64
7.1	Códigos de Barra 2-D Multi-Nível	64
7.2	Protocolo Prático para Autenticação de Documentos	65
7.2.1	Codificação	66
7.2.2	Decodificação	67
7.2.3	Ambiente com Ruído	69
7.3	Codificação baseada em Posição	70
7.3.1	Modulação Seqüencial	71
7.3.2	Codificação Posicional	71
7.3.3	Distorção de PBC Versus SM	72
7.3.4	Detecção	73
7.4	Segmentação de Documentos em Imagens Ruidosas	76
7.5	Conclusões	78
8	O USO DA COR	79
8.1	Motivação para o Uso da Cor	80
8.2	Comentários sobre Impressão Colorida	80
8.2.1	Modelo Analítico para o Canal PS Colorido	81
8.3	O Processo de Detecção	82
8.3.1	Métrica de Detecção	83
8.3.2	Limite de Bhattacharyya na Taxa de Erro	87
8.4	Medida Perceptual da Modulação da Cor	88

8.5	Métrica Auxiliar para Melhor Desempenho na Detecção	90
8.6	Conclusões	91
9	EXPERIMENTOS	92
9.1	Parâmetros de Ruído e Distorção	93
9.2	Experimento 1	94
9.3	Experimento 2 - TLM 1	97
9.4	Experimento 3 - TLM 2	105
9.5	Experimento 4 - TLM 3	107
9.6	Experimento 5 - Detecção Espectral	107
9.6.1	Halftone Tipo Ruído Azul	107
9.6.2	Halftone Tipo Ruído Verde	108
9.6.3	Taxa de Erro para Detecção Espectral	110
9.7	Experimento 6 - Códigos de Barra 2-D Multi-nível	111
9.8	Experimento 7 - Protocolo de Autenticação	112
9.8.1	Carteira de Identificação	112
9.8.2	Taxa de Erro	113
9.9	Experimento 8 - PBC	114
9.9.1	PBC	114
9.9.2	Taxa de Erro	115
9.9.3	PBC Vs. SM	116
9.10	Experimento 9: Usando TCM	116
9.10.1	Modulação do Canal Azul	116
9.10.2	Modulação no Canal Vermelho	117
9.10.3	Modulação Combinada	118
9.10.4	Detecção Auxiliar por Ângulo	119
9.10.5	Ganho de Modulação Variável	119
9.11	Conclusões	121
10	CONCLUSÕES	122
10.1	Resultados Principais	123
10.2	Trabalho Futuro	125
A	Variância da Variância Amostral	127
A.1	Média	127
A.2	Variância	128
A.3	Valor Médio Quadrático	128
B	Momento de Terceira Ordem	130
C	Momento de Quarta Ordem	132
D	Valor Esperado e Variância da Potência Média Amostral	133
D.1	Valor Esperado	133
D.2	Variância	136
E	Análise PBC-1	145

F Análise PBC-2	147
Bibliografia	162

Lista de Figuras

2.1	Exemplo de como uma imagem pode ser manipulada sem que seja completamente corrompida.	7
2.2	Exemplo de como uma imagem digital pode ser manipulada.	9
3.1	Diagrama ilustrando a inserção no domínio espacial.	14
3.2	Valor da correlação para sementes diferentes. A posição 13 corresponde à correlação feita com a semente correta.	15
3.3	Diagrama ilustrando multiplexação por divisão de espaço.	16
3.4	Ilustração simples do QIM. Os pontos identificados por \circ 's e Δ 's correspondem a dois quantizadores diferentes. Se $b = 1$, o sinal original c_n é quantizado para o \circ mais próximo. Se $b = 0$, O sinal original é quantizado para o Δ mais próximo.	18
3.5	Imagem decomposta em planos de bits.	19
3.6	Resumo do processo de “escaneamento”.	21
3.7	Diagrama ilustrando a operação de binarização pixel-a-pixel usada em <i>ordered dithering</i>	23
3.8	Ilustração de <i>line-shift coding</i> . A linha central no parágrafo superior é ligeiramente movida para cima. No parágrafo inferior, o deslocamento é visível por meio da superposição da imagem original e da imagem marcada.	26
3.9	Exemplo de <i>word-shift coding</i> . Na frase superior, as palavras <i>sure</i> , <i>fortune</i> , <i>seek</i> e <i>you</i> , foram levemente deslocadas. Na frase inferior, o deslocamento é visível devido a superposição com a imagem original.	26
3.10	Exemplo de <i>character-shift coding</i>	26
3.11	Ilustração de dois pixels centrais em uma vizinhança 3×3 que teriam diferentes <i>flipping scores</i>	28
4.1	GUI dos “escaners” Genius HR6X Slim e HP 2300C.	33
4.2	Ilustração do efeito de uma curtose e uma <i>skewness</i> positivas e negativas.	35
4.3	Distribuição uniforme p_D assumida para os coeficientes da matriz de <i>halftone</i>	37
4.4	Distribuição of b	38
4.5	Distribuição do ruído η_2	38
4.6	Efeito da variância dependente da luminância de entrada.	39
4.7	Ilustração de blocos de <i>halftone</i>	39
4.8	Efeito da <i>skewness</i> dependente da luminância de entrada.	40
4.9	Efeito da curtose dependente da luminância de entrada.	40

5.1	Exemplos de documentos discutidos neste trabalho.	43
5.2	Ilustração de $a^2 + 1$ níveis distintos no processo de <i>halftoning</i> , para $a = 2$	45
5.3	Limite superior na taxa de transmissão atingível.	46
5.4	46
5.5	47
5.6	Modulação na luminância com um ganho muito alto.	48
5.7	Exemplo de texto “escaneado” em 300 ppi.	49
5.8	Efeito visual da variação do limiar de segmentação do texto.	50
6.1	A área sombreada (x a $+\infty$) representa a probabilidade de erro dada por $\text{erfc}(x)$	55
6.2	Típica distribuição da detecção baseada na luminância média.	56
6.3	Típica distribuição da detecção baseada na variância.	56
6.4	Ilustração exagerada de diferentes padrões de <i>halftone</i>	60
7.1	Ilustração do códigos de barra 2-D.	64
7.2	Diagrama do bloco de encriptação. O bloco ‘s/b’ representa conversão <i>string</i> de texto para representação binária. O bloco ‘ \mathcal{M} ’ representa um mapeamento de \mathbf{c}'_b a partir de $ \mathbf{c}_b $ bits para K bits. O símbolo \oplus representa a operação XOR.	67
7.3	Extraíndo $\hat{\mathbf{c}}$ e $\hat{\mathbf{w}}$ do documento recebido.	68
7.4	Diagrama de blocos da decodificação. O bloco ‘s/b’ representa a conversão <i>string</i> para binário. O bloco ‘ \mathcal{M} ’ representa o mapeamento de $\hat{\mathbf{c}}'_b$ com $ \mathbf{c}_b $ bits para K bits. O símbolo \oplus representa a operação XOR.	68
7.5	Capacidade do PBC em função de K e da distorção D	73
7.6	Capacidade em função da distorção D , para $K = 200$	74
7.7	Razão R_P/R_S , em função da distorção D	74
7.8	Razão R_P/R_S , em função da distorção D , para $K = 100$	74
8.1	Exemplo de um padrão de teste para <i>halftoning</i> , ilustrando os colorantes C, M, Y e K.	82
8.2	Exemplo de um histograma de três canais para um caractere modulado apenas no canal azul. O eixo horizontal representa a intensidade da cor (entre preto e branco).	83
8.3	Exemplo de um histograma de três canais para um caracter modulado apenas no canal vermelho. O eixo horizontal representa a intensidade da cor (entre preto e branco).	83
8.4	Limite superior de Bhattacharyya na probabilidade de erro usando o classificador de Bayes, em função da modulação nos canais vermelho e azul.	88
8.5	Impacto perceptual baseado no espaço de cor CIELAB causado pela modulação da cor do caractere, em função da modulação nos canais vermelho e azul.	89
8.6	Ilustração da distorção em função de w_B and w_R , considerando uma probabilidade de erro $P_e = 0.0001$	90

8.7	Padrões de <i>halftone</i> filtrados filtro detector de bordas direcional de -45°	91
9.1	Comparação entre um caractere impresso e “escaneado” e um caractere distorcido com o modelo PS proposto.	94
9.2	Blocos com luminâncias variando de 0 a 1.	95
9.3	O efeito da variância dependente da luminância de entrada, depois do PS.	96
9.4	O efeito de <i>skewness</i> dependente da luminância de entrada, depois do PS.	96
9.5	O efeito de curtose dependente da luminância de entrada, depois do PS.	96
9.6	Histogramas com diferentes formatos ilustrando a mudança em <i>skewness</i> e em curtose de uma região PS, de acordo com a luminância de entrada s_0	97
9.7	Exemplo de texto segmentado, representado em escala negativa para visualização. As áreas com zoom ilustram a maior variância dos caracteres modulados.	98
9.8	Usando apenas a média amostral como métrica de detecção.	100
9.9	Usando apenas a variância amostral como métrica de detecção.	100
9.10	Usando apenas <i>skewness</i> amostral como métrica de detecção.	100
9.11	Usando apenas a curtose amostral como métrica de detecção.	101
9.12	Limiares de decisão usando as métricas de detecção separadamente, representadas na escala 0-255.	101
9.13	Limiares de decisão combinando duas métricas de detecção, representada na escala 0-255.	101
9.14	Espaço 3-D com superfície de decisão separando as duas classes, usando a média, a variância e <i>skewness</i> como métricas de detecção.	102
9.15	ROC correspondente à detecção pela média amostral.	102
9.16	ROC correspondente à detecção pela variância amostral.	103
9.17	Probabilidade de erro para diferentes ganhos, usando d_M como métrica de detecção.	106
9.18	Probabilidade de erro para diferentes ganhos, usando d_V como métrica de detecção.	106
9.19	Histograma da banda baixa como métrica de detecção.	108
9.20	Histograma da banda alta como métrica de detecção.	109
9.21	Ilustração das bandas baixa e alta para o ruído azul.	109
9.22	Gráfico 3-D ilustrando as bandas baixa, média e alta.	109
9.23	Distribuição de luminância média dos caracteres.	110
9.24	Probabilidade de erro para diferentes ganhos, usando <i>halftone</i> tipo ruído azul e verde para modular os caracteres.	111
9.25	A autenticação de documentos usando o protocolo proposto na Seção 7.2. Note a luminância dos caracteres modificados.	113
9.26	Documento de identificação “escaneado”. O último dígito da data de validade é modificado de 8 para 9, como indicado pela flecha.	113
9.27	Taxas de Erro de Detecção usando o detector de correlação no protocolo de autenticação.	114
9.28	Taxa de erro teórica em PBC.	115

9.29	Comparação entre as distorções em PBC e em SM como uma função do número de bits inserido, para um documento composto de $K = 200$ caracteres.	116
9.30	Histograma da métrica de detecção d_B , para o canal azul.	117
9.31	Histograma da métrica de detecção d_R , para o canal vermelho.	118
9.32	<i>Scatter plot</i> ilustrando a curva separando os pontos correspondentes ao bit 1 e ao bit 0.	119
9.33	<i>Plot</i> ilustrando a superfície separando os valores de detecção para o bit 1 e bit 0, usando d_b , d_r e d_a como métrica de detecção.	120
9.34	Probabilidade de erro para diferentes ganhos, usando $w_B = w_R = 0.97, 0.9, 0.84$. O eixo horizontal indica a diferença de luminância entre o caractere original e o modulado, para os canais vermelho e azul. A linha cheia representa a taxa de erro teórica derivada na Seção 8.3, e os pontos em cruz representam as taxas de erro experimental depois do PS.	121
F.1	Figura ilustrando a inequação em F.8.	148
F.2	Figura ilustrando o sistema de coordenadas (u', v') , baseado em uma versão rotacionada da Figura F.1.	149

Lista de Tabelas

9.1	Impressoras e “escaners” usados nos experimentos.	93
9.2	Taxas de erro experimental testando 30360 caracteres. A legenda para os dispositivos é dada na Tabela 9.1.	104
9.3	Taxa de erro experimental testando 30360 caracteres e combinando as métricas de detecção de acordo com o classificador de Bayes. A legenda para os dispositivos é dada na Tabela 9.1.	104
9.4	Taxa de Erro Experimental para THM e TLM.	110
9.5	Taxas de Erro Experimental para código de barras 2-D.	112
9.6	Taxas de erro experimentais.	115
9.7	Taxas de erro experimental para TCM e TLM.	118

Lista de Símbolos e Abreviações

Symbols

b	— Imagem <i>halftoned</i> .
\mathbf{b}	— Mensagem inserida em um sinal original.
b_i	— Elemento binário da mensagem \mathbf{b} .
b_l	— Elementos da mensagem \mathbf{b} .
$b(m, n)$	— Elemento m, n da imagem b .
b_0	— Imagem representando um bloco de halftone.
\mathbf{c}_h	— Vetor genérico representando um sinal original (vídeo, áudio, imagem, etc).
c	— Imagem original.
C	— Capacidade de um sistema de marca d'água, expressa em bits.
\mathbf{d}	— Métrica de detecção baseada na combinação de diferentes métricas d_i .
d	— Estatística de detecção baseada em correlação linear.
D_H	— Matriz de <i>halftone</i> em algoritmos <i>ordered dithering</i> .
d_M	— Métrica de detecção baseada na luminância média de um caractere.
d_V	— Métrica de detecção baseada na variância de um caractere.
Δ	— Parâmetro representando ruído no modelo de canal PS.
ϵ	— Erro de distorção usando TLM.
ϵ_{max}	— Máxima distorção permitida.
ε_{max}	— Função de inserção em TLM.
φ_2	— Parâmetro do canal PS usado para representar a variância do ruído causado pelo halftone.
$G_{\mathbf{w}}$	— Ganho em marca d'água baseadas em correlação.
γ_1	— Skewness.
γ_2	— Curtose.
$h(m, n)$	— Sistema linear modelando o efeito passa-baixas causado pela impressão e escaneamento.

J	—	Tamanho da lateral de uma matriz de halftone.
K	—	Número de elementos em um documento de texto.
$\kappa_{\mathbf{w}}$	—	Chave para geração de seqüência pseudo-aleatória.
L_0	—	Comprimento da mensagem de marca d'água, em bits.
L	—	Número de níveis de quantização -1 representando uma imagem digital.
λ	—	Limiar para a detecção da marca d'água.
Λ	—	Maior valor na escala de representação de uma imagem.
\mathcal{M}	—	Conjunto de índices representando diferentes mensagens em marcas d'água QIM.
$\mathbf{n}_{\mathbf{c}}$	—	Vetor representando um ruído genérico.
N	—	Número de pixels em uma imagem ou caractere.
η_1	—	Parâmetro representando ruído no modelo de canal PS.
η_2	—	Parâmetro representando ruído no modelo de canal PS.
η_3	—	Parâmetro representando ruído no modelo de canal PS.
ω_i	—	Elementos de Ω .
Ω	—	Conjunto contendo os possíveis valores de modulação usando TLM.
\mathcal{Q}	—	Conjunto de quantizadores em marcas d'água QIM.
Q_H	—	Quantizador usado pelo algoritmo de halftone.
r_p	—	Resolução de impressão.
r_s	—	Resolução de escaneamento.
s	—	Imagem digital anterior à impressão ou ao halftone.
$\mathbf{s}_{\mathbf{w}}$	—	Vetor marcado genérico (vídeo, áudio, imagem, etc).
$\mathbf{s}'_{\mathbf{w}}$	—	Sinal possivelmente marcado (vídeo, áudio, imagem, etc).
$s(m, n)$	—	Imagem marcada via TLM.
S	—	Cardinalidade de Ω .
T	—	Limiar para segmentação de texto do fundo.
$\mathbf{w}_{\mathbf{r}}$	—	Vetor de marca d'água genérico (vídeo, áudio, imagem, etc).
\mathcal{W}	—	Conjunto de padrões de marca d'água \mathbf{w}_i em CDMA.
w_i	—	Elemento de um vetor de marca d'água.
$\mathbf{w}_{\mathbf{m}}$	—	Sinal de marca d'água CDMA formada por L vetores $\mathbf{w}_{\mathbf{r}i}$.
$w(m, n)$	—	Função de modulação para marcar um caractere via TLM.
$\mathbf{y}_{\mathbf{n}}$	—	Sinal marcado genérico que sofreu ataques.
$\mathbf{y}'_{\mathbf{n}}$	—	Sinal com ataques possivelmente marcado.
y	—	Imagem impressa e escaneada.

Abreviações

AWGN	—	Additive White Gaussian Noise.
CCD	—	Charge Coupled Device.
CDMA	—	Code Division Multiple Access.
DCT	—	Discrete Cosine Transform.
DFT	—	Discrete Fourier Transform.
dpi	—	Dots Per Inch.
FFT	—	Fast Fourier Transform.
DWT	—	Discrete Wavelet Transform.
HVS	—	Human Vision System.
i.i.d.	—	Independent and Identically Distributed.
ISI	—	Intersymbol Interference.
TLM	—	Text Luminance Modulation.
THM	—	Text Halftone Modulation.
LPM	—	Log-Polar Mapping.
LSB	—	Least Significant Bit.
OCR	—	Optical Character Recognition.
PAM	—	Pulse Amplitude Modulation.
PCM	—	Pulse Code Modulation.
ppi	—	Pixels Per Inch.
PRS	—	Pseudorandom Sequence.
PS	—	Print and Scan.
QIM	—	Quantization Index Modulation.
RSC	—	Rotation, Scale and Cropping.
SS	—	Spread Spectrum.

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas a sociedade tem observado a conversão de sinais como imagens, áudio e vídeo do formato analógico para uma representação digital. Dados digitais apresentam inúmeras vantagens em comparação com a sua correspondente versão analógica, uma vez que a representação digital melhora a acessibilidade, portabilidade e eficiência da transmissão da informação. No entanto, com o crescimento da Internet e os avanços de dispositivos de cópia tais quais gravadores de CD e DVD, a duplicação e a disseminação ilegal de conteúdo protegido por direitos autorais tornaram-se extremamente fáceis. Visando prover proteção contra cópias ilegais e proteção de direitos autorais, duas técnicas complementares foram desenvolvidas: marcas d'água digitais e criptografia.

Métodos criptográficos não negam a presença da informação escondida, mas a fazem ilegível ou ininteligível por meio de diversas transformações [1]. Apesar do fato que a criptografia é efetivamente usada para proteger mensagens durante o processo de transmissão, após a etapa de recepção e decriptografia da mensagem, esta é idêntica à original e não está mais protegida. Dessa forma, nesse estágio é impossível garantir que essa mensagem desprotegida não será ilegalmente disseminada ou modificada. Nesse contexto, marcas d'água digitais podem complementar a criptografia através da inserção de um sinal escondido diretamente no sinal original, de forma que esse sinal adicional esteja idealmente sempre presente.

O campo de estudo de marcas d'água é relativamente novo e bastante promissor, tendo ganhado força na década de 1990. Diversas aplicações comerciais já estão disponíveis, tais quais os sistemas de segurança desenvolvidos pela Digimarc [2] e AlpVision [3], que fazem uso de marcas d'água em seus produtos. Sistemas de distribuição gratuita também pode ser encontrados na Internet, como o sistema SAMD [4], por exemplo.

Por definição [5, 6, 1], o objetivo de um sistema de marca d'água é inserir informação escondida em um conteúdo digital tal qual música, voz, imagem, texto

ou vídeo. A técnica utilizada no processo de inserção não deveria causar alterações visíveis. De acordo com a literatura tradicional, o conteúdo digital que recebe a marca d'água será denominado 'conteúdo original' neste trabalho. Adicionalmente, o termo *marca d'água* será utilizado de forma relativamente ampla, podendo significar a mensagem a ser inserida, o sinal a ser inserido, ou a modificação feita sobre o sinal original.

Um grande número de modificações em diversos domínios podem ser usadas em técnicas de marca d'água. Antes da inserção da marca d'água, o sinal original pode ser transformado para outro domínio através da transformada discreta de Fourier (DFT) [7, 8], transformadas *wavelets* (DWT) [9, 10], ou transformada discreta do cosseno (DCT) [11, 12, 13]. Algumas das modificações possíveis nesses domínios são adição de ruído, reordenação de coeficientes, remoção de coeficientes, dentre outras. Além disso, considerando o sistema visual humano (HVS) e/ou modelos auditivos, os efeitos perceptuais das modificações sobre o sinal original podem ser reduzidas significativamente.

Assim como os trabalhos mencionados acima, a maioria dos métodos propostos na literatura são sistemas de marca d'água para imagens, seguidos por vídeo e áudio. Uma importante categoria de mídia, não tão freqüentemente estudada, é aquela de documentos tipo texto. Enquanto em imagens naturais existe uma rica escala de tons de cinza ou mesmo cores adequados para modificações, em documentos de texto normalmente não se pode beneficiar de um sinal original tão diverso. O problema torna-se ainda mais desafiador quando se considera que o documento marcado deve ser impresso e *manter-se* marcado. Neste cenário, a detecção da marca d'água em documentos impressos normalmente se dá com o auxílio de um "escaner" para digitalizar o documento e identificar a possível marca.

Um número moderado de trabalhos focados em marcas d'água digitais capazes de sobreviver ao processo de impressão e "escaneamento" (*print and scan* - PS) podem ser encontrados na literatura. Esses métodos são chamados de *hardcopy watermarking*, de acordo com a literatura inglesa. Cada um desses métodos é desenvolvido para um determinado tipo de conteúdo, como imagens coloridas ou em tons de cinza. O método apresentado nesta tese é específico para documentos de texto, já que esses possuem características distintas que não permitem a aplicação direta de métodos *hardcopy watermarking* para imagens.

Este estudo é motivado pelo fato de que o armazenamento e a troca de documentos com informação sensível ou confidencial fazem parte do dia-a-dia de qualquer sociedade. Suponha que uma instituição tal qual um cartório, um banco, a polícia, ou qualquer empresa pública ou privada possua uma versão em papel e uma versão eletrônica de um documento sensível. Exemplos de tais documentos são certidões de

nascimento, escrituras, relatórios confidenciais, petições, declarações, entre outros. Frequentemente, essas importantes cópias em papel são trocadas entre pessoas e/ou instituições. O desafio está em desenvolver um método confiável para a autenticação de documentos tipo *hardcopy*, de forma que a informação contida nessas cópias possam ser assumidas oficiais, originadas de fontes seguras e sem qualquer tipo de alteração maliciosa.

Métodos tradicionais de autenticação de documentos em papel incluem códigos de barra, selos plásticos e holográficos, marcas d'água físicas sobre o papel e assinaturas de pessoas autorizadas. No entanto, modificações no texto podem ser feitas de maneira imperceptível, alterando o sentido de frases ou mesmo do documento inteiro. Documentos com códigos de barra, por exemplo, podem ser “escaneados”, modificados e re-impresos, e o código de barra mantém-se o mesmo. Assinaturas manuais sempre podem ser falsificadas, assim como selos especiais. Adicionalmente, todas essas estratégias causam um impacto indesejável no documento original, o que é um aspecto frequentemente indesejado.

Nesta tese, um método é proposto para inserir de forma efetiva informação escondida em um documento. A informação lateral pode servir como uma marca de autenticação ou simplesmente como uma mensagem adicional. O método é chamado de modulação de luminância em texto, ou *text luminance modulation* (TLM). Sabe-se que a maior parte dos documentos do tipo “escritório” são compostos de texto preto sobre um fundo branco, sendo chamados de documentos binários. Usando a solução proposta, é possível inserir e recuperar informação em documentos compostos por qualquer tipo de conteúdo como texto, logos, desenhos e símbolos, desde que estes possam ser representados de forma binária (i.e., preto e branco). TLM permite a transmissão da informação permitindo tons de cinza em texto tradicional, ao mesmo tempo que mantém um baixo impacto perceptual. Uma modulação de tons de cinza é adicionada ao texto original, de forma análoga a um sistema tipo *pulse amplitude modulation* (PAM). Apesar de que essas modificações na luminância não alteram a qualidade de texto percebida, elas podem ser facilmente detectadas por um “escaner,” e podem ser decodificadas para a recuperação da mensagem inserida.

É importante observar que um método similar para autenticação de documentos foi desenvolvido paralelamente e de forma independente pelo *Computer Vision and Multimedia Laboratory* na Universidade de Genebra. Os seus principais resultados são apresentados em [14, 15], entre outros. No entanto, apesar de que a pesquisa desenvolvida na Suíça e a pesquisa apresentada nesta tese são baseadas na mesma idéia fundamental de modular a luminância dos caracteres, elas seguem focos diferentes. Nesse sentido, a intersecção entre as pesquisas ocorre basicamente no conteúdo do Capítulo 5, enquanto que os Capítulos 4, 6, 7 e 8 representam contribuições únicas

e inéditas. Uma breve descrição desses capítulos é dada a seguir.

Esta tese é organizada da seguinte maneira. Este capítulo discutiu de maneira breve o campo de marcas d'água digitais e apresentou alguns aspectos práticos que motivam o estudo de métodos tipo *hardcopy watermarking*. Além disso, uma visão geral da solução proposta foi apresentada.

O Capítulo 2 discute algumas das mais importantes aplicações de marcas d'água digitais para diferentes tipos de mídia. Esse capítulo também comenta algumas das principais propriedades de sistemas de marca d'água, tais quais robustez, fidelidade, capacidade, entre outros, além da sua interdependência.

Uma revisão de sistemas clássicos de marca d'água é apresentada no Capítulo 3, servindo como base para um melhor entendimento das contribuições deste trabalho. Diversos métodos são discutidos, desde os mais básicos, como modificação dos bits menos significativos, até os relativamente mais complexos, tais quais modulação do índice de quantização (QIM) e acesso múltiplo por divisão de código (CDMA). Esse capítulo também apresenta descrições de importantes métodos desenvolvidos especificamente para sobreviver ao processo de impressão e “escaneamento,” tanto em imagens quanto em texto. Os efeitos do processo PS também são discutidos.

Sob uma perspectiva de comunicações, o processo PS pode ser visto como um canal de comunicações ruidoso. No Capítulo 4 um novo modelo analítico para o canal PS é proposto, o qual inclui todas as características que influenciam o desempenho do sistema e ainda permite uma tratabilidade matemática nas análises. Uma descrição detalhada do processo físico é apresentada, buscando justificar os modelos de ruído adotados.

Na seqüência, o Capítulo 5 apresenta o método proposto, discutindo pontos relativos ao método e à sua aplicação para segurança de documentos e comunicação secreta. Aspectos teóricos e práticos são abordados, assim como problemas de ataques e implementação.

No Capítulo 6 diversas métricas de detecção para determinar o bit inserido em cada caractere são propostas. É apresentada uma discussão relativa à luminância média, que é a mais simples métrica de detecção, assim como momentos de ordens elevadas e métricas espectrais. É mostrado que o desempenho do sistema é aumentado quando essas métricas são aplicadas ao processo de detecção.

O Capítulo 7 descreve aplicações alternativas baseadas na idéia de transmitir informação secreta através da modulação do nível de luminância. Especificamente, as contribuições apresentadas nesse capítulo são: (i) é indicado que o método de detecção proposto pode ser estendido para códigos de barra 2-D, reduzindo a sua taxa de erro; (ii) um protocolo prático para a autenticação de documentos é proposto, que pode ser aplicado para documentos eletrônicos e impressos. Em contraste com a con-

figuração originalmente proposta para TLM, que transmite uma mensagem secreta, o protocolo proposto classifica o documento como autêntico ou não autêntico; (iii) um esquema alternativo para TLM é proposto, que causa uma distorção reduzida ao texto mantendo a taxa de transmissão. Usando o método de codificação proposto, a informação é relacionada à posição dos caracteres modulados no documento.

O Capítulo 8 estende o conceito de TLM usando a cor do texto como uma característica modificável. São apresentadas uma métrica de detecção e uma análise determinando a taxa de erro em modulação de cor em texto, ou *text colour modulation* (TCM), considerando o canal PS assumido. Além disso, um modelo de impacto perceptual é aplicado para determinar a diferença perceptual entre um caractere modulado e não modulado. Combinando esse modelo de impacto perceptual e os resultados da análise de erro de detecção, é possível determinar os valores de modulação de cor.

O Capítulo 9 apresenta resultados relativos ao desempenho do método proposto neste trabalho e das aplicações propostas no Capítulo 7. O principal objetivo é ilustrar através de simulações de Monte Carlo a aplicabilidade de TLM em típicos documentos de escritório. Além disso, os experimentos buscam validar o modelo de canal PS proposto no Capítulo 4 e as análises teóricas relativas às taxas de erro apresentadas no Capítulo 6.

Finalmente, o Capítulo 10 é dedicado às conclusões e lista de realizações. Também, tópicos para pesquisa futura são discutidos.

No capítulo de referências bibliográficas, as referências [100 – 109] representam uma lista das publicações relativas ao trabalho apresentado nesta tese.

Capítulo 2

APLICAÇÕES E PROPRIEDADES

Apesar da questão envolvendo direitos autorais e segurança ter sido a maior propulsora da pesquisa inicial na área de marcas d'água digitais [16], existem inúmeras outras aplicações nas quais marcas d'água podem ser utilizadas. De forma geral, sempre que for útil associar a um sinal original qualquer informação adicional relativa a este, essa informação pode vir a ser inserida como uma marca d'água. Apesar deste trabalho estar basicamente focado em autenticação de documentos impressos, este capítulo menciona algumas das principais aplicações e vantagens que sistemas de marcas d'água têm sobre técnicas alternativas. São comentadas também as principais propriedades, que muitas vezes são conflitantes entre si. Deve ficar claro que cada uma das propriedades mencionadas pode estar ou não presente em um sistema de marca d'água bem projetado, dependendo da aplicação.

2.1 Aplicações

2.1.1 Proteção de Direitos Autorais

Para comprovar que têm direitos sobre uma dada produção, emissoras de TV geralmente colocam o seu logotipo em um dos cantos do vídeo. Em imagens, muitas vezes pode ser encontrado o nome do indivíduo e/ou empresa à qual a imagem pertence. Um exemplo de como métodos usuais fazem a comprovação de direitos autorais e prova de propriedade seria colocar um pequeno texto no canto de uma imagem, como ilustrado na Figura 2.1¹.

Com freqüência, esse impacto visual sobre a imagem pode ser desejável, como uma marca ou nome que desejam ser notados ou divulgados. No entanto, dependendo da aplicação, o fato da informação extra ser perceptível ao ser humano é considerada uma “agressão” ao sinal original. Convém notar também que essas mar-

¹ Image from www.tim-mckenna.com.

cas estão geralmente em uma parte não tão significativa do sinal, como por exemplo próximas das bordas, no caso de imagens, ou no início de um *clip*, no caso de vídeo. Assim, além do aspecto estético muitas vezes negativo dessa técnica, ela permite que se corte um pedaço do vídeo, áudio ou imagem, sem que esses se tornem inutilizáveis. Caso essas marcas estivessem em uma região onde sua retirada estragasse o conteúdo, a própria marca já poderia ser vista como uma degradação demasiada. Para a proteção da propriedade intelectual, o dono do sinal original pode inserir neste uma marca d'água, representando a informação de seus direitos autorais. Essa marca d'água pode eventualmente comprovar na Justiça que o conteúdo em questão lhe pertence, e que alguém infringiu seus direitos autorais [5].



Figura 2.1: Exemplo de como uma imagem pode ser manipulada sem que seja completamente corrompida.

2.1.2 Fingerprinting

Para localizar a fonte de cópias ilegais, o proprietário pode usar a técnica de “impressão digital,” ou *fingerprinting*. Nesse caso, o proprietário pode inserir diferentes marcas d'água em cada cópia do conteúdo que é entregue aos seus diferentes clientes. *Fingerprinting* pode ser comparado a inserir um número de série que é relacionado com a identificação do comprador do conteúdo. Isso permite que o dono da propriedade intelectual possa identificar consumidores que não cumpriram o contrato de compra fornecendo o conteúdo em questão para terceiros [1].

2.1.3 Proteção Contra Cópias Ilegais

A informação contida em uma marca d'água pode diretamente controlar dispositivos de gravação digitais com a finalidade de controlar cópias. Nesse caso, a marca d'água representa um bit que simboliza “proibido copiar”, por exemplo. No gravador, detectores de marcas d'água determinam se o conteúdo presente pode

ser reproduzido ou não [17, 18]. Um exemplo um pouco diferente, porém bastante utilizado, é o sistema chamado *Macrovision's Videocassete Anticopy Process* (www.macrovision.com) [19]. Esse sistema é empregado em aparelhos de DVD e vídeos cassete, modificando o sinal de vídeo de forma a tentar confundir o controle automático de ganho em vídeos cassete. Assim, o sinal original aparece perfeito para quem o visualiza, porém uma cópia desse sinal em VHS torna-se embaralhada, sem condições de ser assistida. Se cada dispositivo de gravação tivesse acoplado um detector de marca d'água, esses dispositivos poderiam proibir a gravação sempre que uma marca d'água representando a instrução “não copiar” fosse encontrada. A primeira empresa a propor tal sistema em DVD's foi a IBM, em seu centro de pesquisa no Japão (*IBM's Tokyo Research Laboratory - TRL*) [20].

2.1.4 Monitoramento de Transmissões

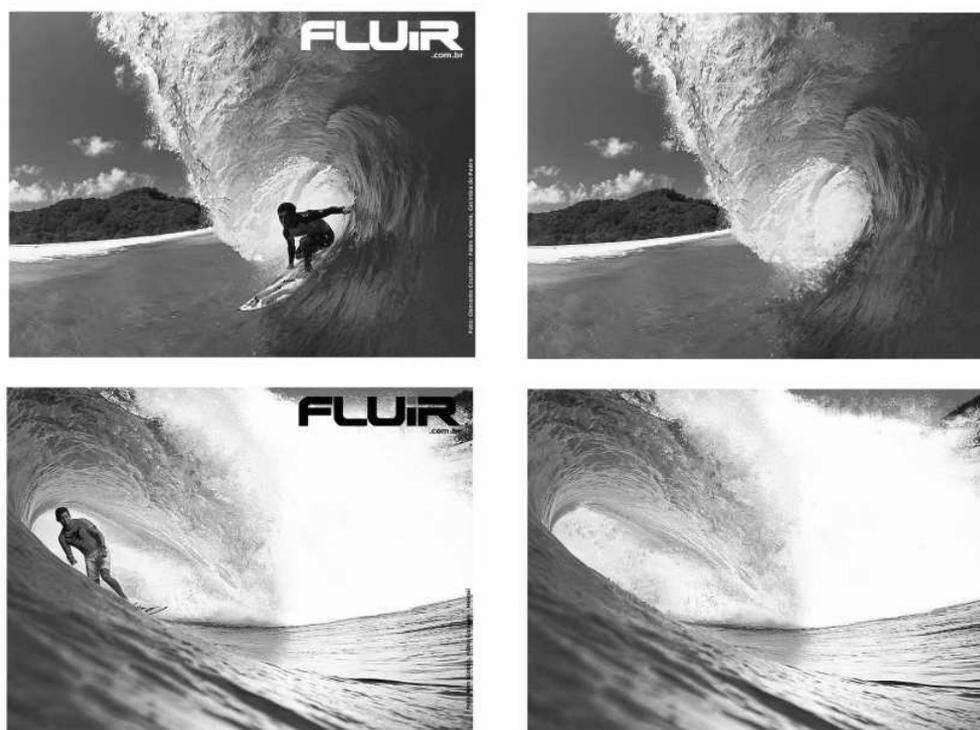
Em se tratando de transmissões de TV, a firma ou indivíduo que anuncia deseja, é claro, que sua propaganda seja transmitida no horário e com a frequência com que foi negociada e paga. Ao inserir marcas d'água em propagandas comerciais, um sistema automatizado de monitoramento pode verificar se as propagandas são transmitidas como no contrato [21]. Um computador pode monitorar as transmissões e comparar os sinais recebidos com aqueles de um banco de dados de interesse. Quando um casamento é encontrado, a música, filme, ou comercial sendo transmitido pode ser identificado, e conseqüentemente catalogado o número e horário da transmissão.

2.1.5 Autenticação de Conteúdo

Com o aumento da tecnologia dos softwares, cada vez fica mais simples e acessível o processo de alteração ou modificação de um conteúdo digital. A Figura 2.2² mostra duas imagens modificadas com um simples programa de processamento de imagens. Em certos casos como provas de crimes ou disputas judiciais, uma modificação desse tipo pode se tornar um problema bastante grave. Marcas d'água frágeis [22] podem ser usadas para checar a autenticidade do conteúdo. Uma marca d'água espalhada pelo sinal indica se esse foi alterado, assim como pode indicar *onde* ocorreu a alteração.

O algoritmo proposto nesta tese, por exemplo, visa prover autenticação de conteúdo através da inserção de informação sensível de partes do texto sobre todo o documento, como discutido no Capítulo 5.

² Imagens extraídas do site www.fluir.com.br



(a) Imagem original.

(b) Imagem alterada.

Figura 2.2: Exemplo de como uma imagem digital pode ser manipulada.

2.1.6 Indexação de Dados

Outra aplicação interessante é a indexação de dados digitais em geral. Indexação de correio de vídeo, onde comentários podem ser inseridos no conteúdo do vídeo, indexação de filmes e notícias onde marcas d'água podem ser inseridas para localizar um dado sinal procurado por um sistema de busca [23]. Bibliotecas digitais, banco de imagens e mensagens de voz também podem ser catalogadas usando essa técnica. A inserção da data e do nome do paciente em imagens médicas (de maneira imperceptível, é claro, para não corromper os dados originais) pode ser uma medida de segurança bastante útil.

2.2 Propriedades

As propriedades e características desejadas em um sistema de marca d'água digital estão diretamente relacionadas com a sua aplicação. Dessa maneira, não existe um conjunto de requisitos que devem ser encontrados em todas as técnicas. Por exemplo, idealmente, no caso de proteção de direitos autorais, a informação a respeito do autor ou proprietário do conteúdo deve permanecer neste qualquer que seja o processamento pelo qual ele passe. Porém, quando a aplicação desejada é a au-

tenticação de dados, e qualquer alteração no sinal original deve ser identificada, a marca d'água deve ser destruída à menor variação ou processamento do sinal. Ou seja, nesse caso a marca d'água não deve apresentar robustez alguma. Assim, serão discutidas a seguir as principais propriedades desejadas nas aplicações mais comuns mencionadas na seção anterior.

2.2.1 Fidelidade

Também referida na literatura como transparência perceptual (inverso de impacto perceptual) ou imperceptibilidade, a fidelidade de um sistema de marca d'água refere-se à similaridade entre as versões original e marcada de um sinal. Cabe citar aqui a diferença entre qualidade e fidelidade. Um sinal com alta fidelidade não necessariamente tem alta qualidade. Qualidade está relacionada ao o apelo visual ou auditivo de um sinal, isto é, se uma imagem ou som parecem bons ou agradáveis. Sinais em que a presença excessiva de ruído “fere” o sistema visual humano, HVS (*Human Vision System*) [24] [25], ou o sistema auditivo humano, o HAS (*Human Auditory System*) [26], são ditos de baixa qualidade. Por exemplo, tipicamente, o vídeo de uma câmera de segurança está no padrão de imagem de intensidade em tons de cinza (*grayscale*), em baixa resolução, e comprimido, sendo geralmente considerado de baixa qualidade. Se esse sinal for modificado através de um sistema de marca d'água, ele continuará tendo baixa qualidade, mas se o sinal marcado for bastante similar ao original, será considerado um vídeo com alta fidelidade.

O processo de inserção de uma marca d'água é realmente fiel ou imperceptível se seres humanos não conseguem distinguir um sinal original de um sinal marcado, mesmo em posse de ambos para comparações [27]. No entanto, quando a comparação pode ser feita, a mínima modificação no sinal original pode ser percebida dependendo da região ou momento analisado. Como o usuário de dados marcados normalmente não tem acesso aos dados originais, a comparação não pode ser realizada, sendo suficiente, dependendo da aplicação, que a marca d'água seja imperceptível desde que não colocada a teste.

Neste trabalho, por exemplo, que trata de documentos impressos, a versão digital (pré-impressão) do documento marcado não precisa ser necessariamente indistinguível da versão original. Apenas a versões impressas é que devem ser perceptualmente idênticas.

2.2.2 Capacidade

A capacidade de um sistema de marca d'água refere-se ao número máximo de bits que este adiciona a um sinal ou a uma unidade de tempo deste. No caso de

áudio, a capacidade normalmente refere-se ao número de bits inseridos por segundo. Para vídeo, a capacidade pode referir-se ao número de bits adicionados em um único quadro ou no tempo de um segundo. Diferentes aplicações normalmente necessitam de capacidades diferentes. No caso de um padrão internacional de catalogação de imagens, por exemplo, a quantidade de informação razoável a ser inserida poderia ser equivalente àquela usada para o ISBN (*International Standard Book Numbering*), com aproximadamente 10 dígitos decimais. Visando um banco de imagens interno, como o de uma grande empresa ou hospital, esse número poderia ser menor. Já quando a aplicação é controle de cópias (Seção 2.1.3), apenas 1 bit pode ser suficiente, isto é, é permitida (0) ou não (1) a reprodução.

2.2.3 Robustez

Robustez refere-se à resistência da marca d'água a diferentes operações comuns de processamento de sinais. Alguns exemplos dessas operações, referidas como ataques, são compressão com perdas (JPEG, JPEG2000, MP3, MPEG, etc), filtragens, impressão e reaquisição com *scanner*, distorções geométricas, reamostragens, conversão digital/analógica (D/A) e analógica/digital (A/D), entre outras. Apesar de na maioria das aplicações a robustez ser uma característica desejada, a regra não é geral. Uma marca d'água que tem como função provar a autenticidade de um determinado sinal não necessita ser robusta a técnica alguma de processamento, pelo contrário, já que uma falha na detecção da marca d'água indica que o sinal foi modificado e não é mais autêntico. Os ataques podem ser algumas vezes intencionais, feitos especificamente para eliminar ou estragar a marca d'água. No caso de ataques não intencionais, normalmente se pode fazer uma predição razoável dos tipos mais prováveis de ataques aos quais o conteúdo será submetido após a inserção da marca d'água. Além disso, a robustez de uma marca d'água precisa ir somente até o determinado ponto em que um processo que retire a marca d'água não danifique exageradamente o sinal. A partir desse ponto, o conteúdo perde o seu valor e não há mais razão para estar marcado.

2.2.4 Segurança

Diferente da robustez, que relaciona a marca d'água à sua capacidade de resistir a ataques em geral, a segurança refere-se à habilidade do sistema para resistir a ataques maliciosos, ou intencionais. Como foi mencionado, um ataque intencional tem como finalidade frustrar o objetivo da presença da marca d'água. Exemplos de aplicações nas quais poderia haver interesse de alguém em aplicar um ataque intencional seriam aplicações de *fingerprinting* e comprovação de propriedade.

A remoção da marca d'água pode ocorrer de duas maneiras: através da eliminação ou através do mascaramento da marca d'água. A eliminação visa danificar a marca d'água (tornando-a indetectável) fazendo com que o sinal marcado fique perceptualmente indistinguível do original, não parecendo conter marca d'água alguma. Já o mascaramento procura fazer com que a marca d'água seja indetectável, ainda que esteja presente no sinal. Um exemplo seria uma leve rotação em uma imagem. A informação adicionada ainda estaria contida na imagem, porém para uma detecção bem sucedida dever-se-ia descobrir o tipo de ataque feito e compensá-lo.

Observe que a marca d'água deve sobreviver a modificações até o ponto em que o sinal original é perceptualmente aceitável, pois a partir desse ponto o sinal perde o seu valor.

2.2.5 Detecção Cega e Não-Cega

Existem algumas aplicações em que o sinal original pode ser utilizado no momento da detecção. Por exemplo, na proteção de direitos autorais, o algoritmo de extração da marca d'água pode usar o sinal não-marcado para encontrar a marca d'água, sendo esse tipo de detecção chamada de detecção não-cega ou informada (*nonoblivious* ou *informed*) [28]. Salvo em algumas situações específicas [6], o fato de possuir o sinal original normalmente aumenta substancialmente o desempenho do detector, já que o original pode ser subtraído do marcado para resultar na própria marca d'água. No entanto, na maioria das aplicações, como proteção contra cópias e indexação, por exemplo, os algoritmos para extração não têm acesso à imagem original não-marcada. Esse tipo de detecção é referida como cega ou pública (*public, blind* ou *oblivious*). Isso torna a detecção mais difícil em muitas situações, principalmente quando o sinal marcado é submetido a diferentes ataques.

2.3 Conclusões

Neste capítulo foram descritas diversas aplicações que podem ser implementadas com o uso de marcas d'água. Foram também apresentadas as principais propriedades de sistemas de marca d'água, mostrando que as propriedades desejadas normalmente dependem da aplicação, e que existe dependência entre elas.

O próximo capítulo apresenta sistemas clássicos de marca d'água, discutindo algumas das técnicas mais comuns. Espera-se que o entendimento desses algoritmos sirva como fundamentação para compreensão do conteúdo diferenciado do Capítulo 3.

Capítulo 3

TÉCNICAS EXISTENTES

Este capítulo apresenta uma revisão de técnicas clássicas para marcas d'água digitais. Essas técnicas são base para diversos trabalhos discutidos na literatura. Este capítulo é dividido em duas partes. A primeira parte, formada pela Seção 3.1, discute métodos tradicionais tais quais espalhamento espectral (*spread spectrum* - SS), modulação por índice de quantização (*quantization index modulation* - QIM), e modificações nos bits menos significativos. Essas técnicas podem ser aplicadas para quaisquer tipos de mídia. Apesar do algoritmo proposto no Capítulo 5 não ser baseado em nenhuma desses métodos, estes são incluídos neste capítulo para permitir ao leitor um melhor entendimento do método TLM proposto nesta tese.

A segunda parte do capítulo, formada pelas Seções 3.2 e 3.3, discute os efeitos causados pela impressão e o “escaneamento,” focando em algoritmos desenvolvidos especificamente para sobreviver a esse processo. Esses métodos são conhecidos como *hardcopy watermarking* na literatura inglesa.

3.1 Métodos Clássicos

3.1.1 Método Básico por Correlação

Sendo uma das mais técnicas de marca d'água mais comuns, a técnica de espalhamento espectral adiciona um padrão de ruído conhecido ao sinal original. Seja \mathbf{c}_h um sinal original de dimensão N (uma imagem com N pixels, por exemplo), e seja \mathbf{s}_w a versão marcada desse sinal, também de dimensão N . O processo de inserção da marca d'água é dado por:

$$\mathbf{s}_w = \mathbf{c}_h + G_w \mathbf{w}_r \quad (3.1)$$

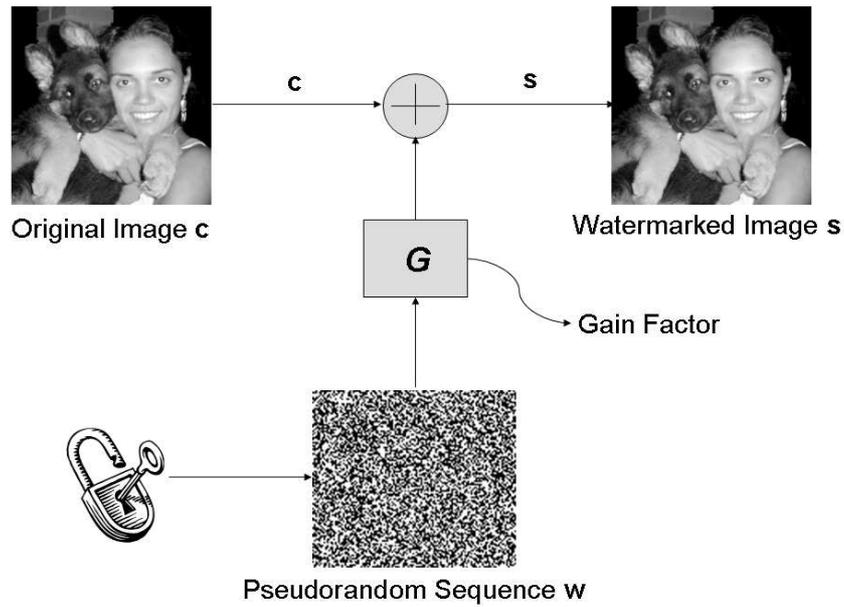


Figura 3.1: Diagrama ilustrando a inserção no domínio espacial.

em que \mathbf{w}_r é uma seqüência pseudo-aleatória (*pseudo-random sequence* - PRS) com elementos w_{r_i} geralmente normalmente distribuídos ou distribuídos de acordo com $w_{r_i} \in \{\pm 1\}, i = 1 \dots N$. A semente ou chave κ_w usada para gerar a seqüência \mathbf{w}_r deve ser conhecida pelo transmissor e pelo receptor. Um fator de ganho G_w é usado para modular \mathbf{w}_r , controlando a robustez e a fidelidade da marca d'água. Quanto maior o ganho G_w , maior a robustez, porém menor a fidelidade.

Um diagrama ilustrando um sistema de marca d'água usando a equação (3.1) é mostrado na Figura 3.1.

Considerando um ataque aditivo genérico, a equação (3.1) pode ser modificada para:

$$\mathbf{y}_n = \mathbf{s}_w + \mathbf{n}_c \quad (3.2)$$

Nesta equação, \mathbf{n}_c representa qualquer tipo de ruído aditivo de canal entre a inserção e a detecção. Pode ser ruído branco Gaussiano aditivo (*additive white Gaussian noise* - AWGN), distorções devido a compressão, ajustes no brilho, contraste ou volume, dentre outros ataques maliciosos ou não maliciosos discutidos nas Seções 2.2.3 e 2.2.4.

Para detectar a marca d'água em uma imagem possivelmente marcada \mathbf{s}_w' (ou \mathbf{y}_n' se ataques são considerados), a correlação entre \mathbf{s}_w' e \mathbf{w}_r é computada, sendo que \mathbf{w}_r é gerada com a mesma semente κ_w do processo de inserção. Seqüências geradas com sementes diferentes normalmente apresentam uma baixa correlação entre si. Assim, no processo de detecção, o resultado da correlação tende a ser alto para uma

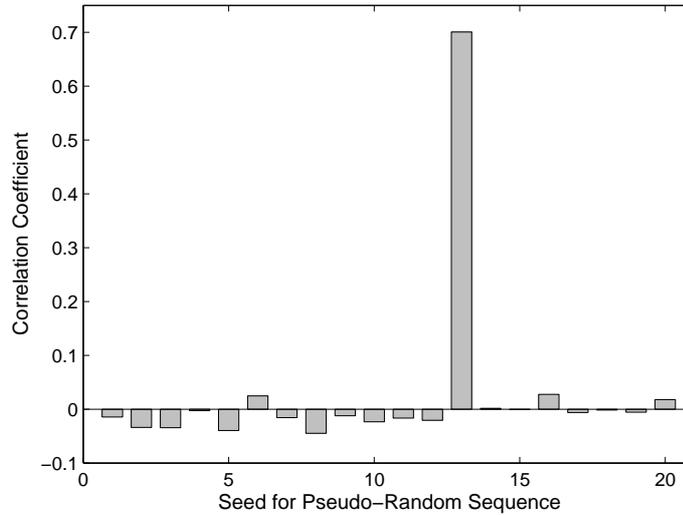


Figura 3.2: Valor da correlação para sementes diferentes. A posição 13 corresponde à correlação feita com a semente correta.

PRS gerada com a semente correta e tende a ser baixo em imagens não marcadas ou imagens marcadas com uma seqüência gerada com uma semente diferente. Isso é ilustrado na Figura 3.2, que mostra o resultado da correlação entre uma imagem marcada com uma PRS gerada com a semente 13, e 20 diferentes PRS geradas com sementes variando entre 1 e 20. O alto pico correspondente à semente 13 indica a presença daquela PRS com alta probabilidade.

Sejam a correlação linear $\text{Cor}(\cdot, \cdot)$ e a estatística de detecção d_c definidas como:

$$d_c \triangleq \text{Cor}(\mathbf{y}'_{\mathbf{n}}, \mathbf{w}_{\mathbf{r}}) \triangleq \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y'_{n_i} w_{r_i} \quad (3.3)$$

em que i representa o índice do elemento no vetor.

Para decidir se uma marca d'água está ou não presente, é comum definir um limiar λ . Se a correlação d_c excede um dado limiar λ , o detector assume que $\mathbf{y}_{\mathbf{n}}'$ contém a marca d'água $\mathbf{w}_{\mathbf{r}}$ se:

$$\begin{aligned} d_c > \lambda &\rightarrow \mathbf{w}_{\mathbf{r}} \quad \text{detectado} \\ d_c < \lambda &\rightarrow \mathbf{w}_{\mathbf{r}} \quad \text{não detectado} \end{aligned} \quad (3.4)$$

Usando o método básico descrito acima, apenas 1 bit é inserido, representado pela presença ou ausência da marca d'água. Alternativas para inserir mais de 1 bit são multiplexação por divisão de espaço ou tempo [1], como ilustrado na Figura 3.3, codificação direta de mensagem [1], em que uma PRS diferente é associada com cada

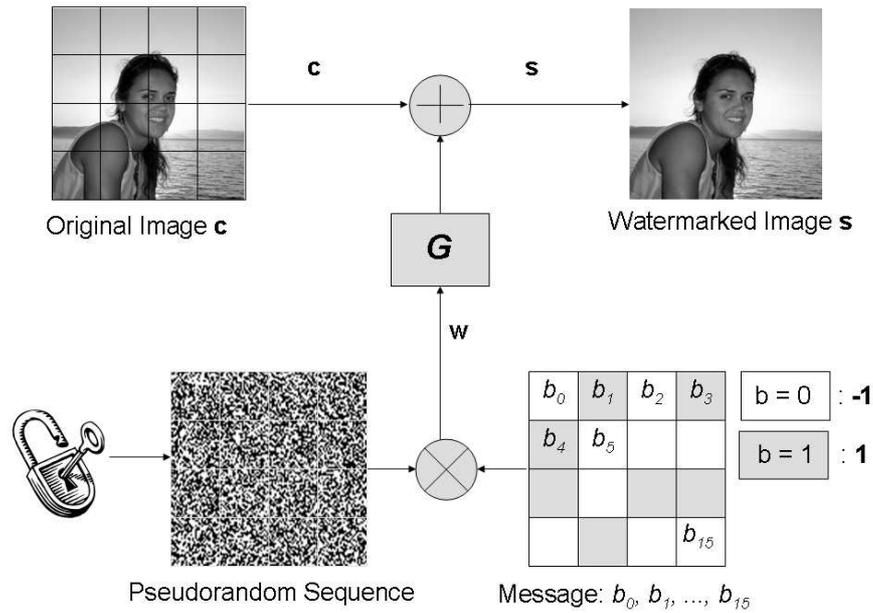


Figura 3.3: Diagrama ilustrando multiplexação por divisão de espaço.

mensagem, e multiplexação por divisão de código (*code division multiple access - CDMA*), baseados em espalhamento espectral. Na seqüência atenção especial é dada para SS-CDMA devido ao seu grande impacto na literatura e relativa eficiência.

3.1.2 Marcas D'Água via SS-CDMA

Considere que é necessário inserir em \mathbf{c}_h não apenas um único bit, mas uma mensagem multi-bit de comprimento L_0 representada por \mathbf{b} , $\mathbf{b} = [b_1, b_2, \dots, b_{L_0}]$, $b_l \in \{-1, +1\}$.

Usando CDMA tradicional [1], um vetor de marca d'água \mathbf{w}_m de comprimento N é gerado para carregar a mensagem combinando L_0 marcas de referência extraídas de um conjunto \mathcal{W} . Assuma que cada marca de referência \mathbf{w}_{r_l} é uma seqüência de comprimento N normalmente distribuída.

$$\mathcal{W} = \{\mathbf{w}_{r_1}, \mathbf{w}_{r_2}, \dots, \mathbf{w}_{r_{L_0}}\} \quad , \quad w_{r_l} \sim \mathcal{N}(0, \sigma_{w_r}^2) \quad (3.5)$$

A mensagem \mathbf{b} é espalhada em uma seqüência N -dimensional \mathbf{w}_m da seguinte forma:

$$\mathbf{w}_m = \frac{1}{\sqrt{L_0}} \sum_{l=1}^{L_0} b_l \mathbf{w}_{r_l} \quad (3.6)$$

O somatório é multiplicado por $1/\sqrt{L_0}$ para assegurar que $\sigma_{w_m}^2 = \sigma_{w_r}^2$. O vetor marcado \mathbf{s}_w é obtido através da inserção aditiva: $\mathbf{s}_w = \mathbf{c}_h + \mathbf{w}_m$.

A estatística de decisão d_{c_l} é usada para estimar o valor do l -ésimo bit, sendo definida como:

$$d_{c_l} \triangleq \text{Cor}(\mathbf{s}_w, \mathbf{w}_{rl}) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N s_{w_i} w_{rl_i} \quad (3.7)$$

em que l representa o índice da marca de referência e i representa o índice do elemento no vetor.

3.1.3 Marca D'Água via QIM

Modulação por índice de quantização (QIM), assim como SS, é uma das técnicas de marca d'água mais discutidas na literatura. Inicialmente proposta por Chen e Wornell [29, 30], QIM é um método de detecção cega no qual o sinal original \mathbf{c}_h é quantizado de acordo com a informação a ser inserida.

É possível descrever de forma única um quantizador através de um conjunto \mathcal{Q} de pontos de reconstrução em um espaço N -dimensional. Da mesma forma, é possível definir uma regra para atribuir um sinal de entrada de comprimento N a um dos pontos definidos em \mathcal{Q} . A idéia fundamental de um sistema QIM é descrita a seguir:

1. Inicialmente, um conjunto de diferentes quantizadores $\{\mathcal{Q}_1, \mathcal{Q}_2, \dots, \mathcal{Q}_{N_M}\}$ é definido. O conjunto de índices, $\mathcal{M} = \{1, 2, \dots, N_M\}$, representa as N_M possíveis mensagens que podem ser inseridas.
2. Para inserir uma mensagem \mathbf{b} , o sinal original \mathbf{c}_h é quantizado com o quantizador $\mathcal{Q}_{b_{dec}}$ para obter o sinal marcado \mathbf{s}_w , em que b_{dec} é a representação decimal da mensagem binária \mathbf{b} . O ruído de quantização introduzido corresponde à distorção devida à inserção da mensagem.
3. No processo de detecção, o sinal recebido \mathbf{y}_n é quantizado com todos os quantizadores $\{\mathcal{Q}_1, \mathcal{Q}_2, \dots, \mathcal{Q}_{N_M}\}$, e o decodificador encontra o índice do quantizador que contém o ponto de reconstrução mais próximo ao sinal recebido. O índice corresponde à mensagem de marca d'água $\hat{\mathbf{b}}$ estimada.

A Figura 3.4 ilustra o processo de inserção usando QIM. Neste exemplo, 1 bit é inserido de forma que $\mathcal{M} = \{1, 2\}$. Portanto, dois quantizadores são necessários, e o seus conjuntos de pontos de reconstrução correspondentes em um espaço N -dimensional são representados na Figura 3.4 com \circ 's e \triangle 's. Para $b = 1$, por exemplo, o sinal original é quantizado com o quantizador \circ , sendo que \mathbf{s}_w é escolhido como o \circ mais próximo de \mathbf{c}_h . Quando $b = 0$, \mathbf{c}_h é quantizado com o quantizador \triangle .

Em contraste com SS, que considera a imagem original como uma fonte de ruído interferindo com a detecção da marca d'água, QIM insere uma mensagem que é

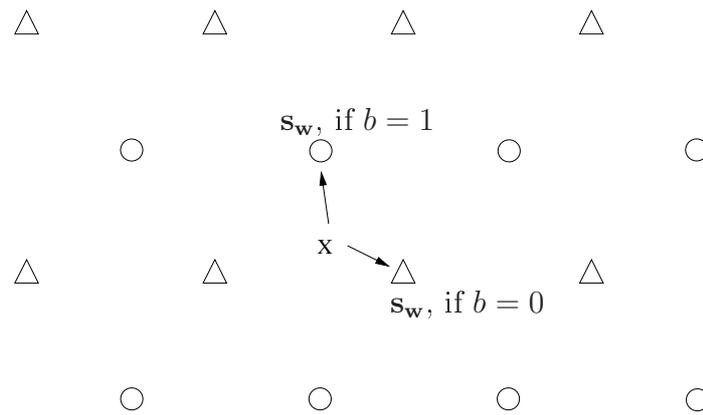


Figura 3.4: Ilustração simples do QIM. Os pontos identificados por \circ 's e \triangle 's correspondem a dois quantizadores diferentes. Se $b = 1$, o sinal original \mathbf{c}_h é quantizado para o \circ mais próximo. Se $b = 0$, O sinal original é quantizado para o \triangle mais próximo.

adaptada à imagem original, oferecendo uma alta capacidade quando a distorção introduzida pelos ataques é pequena. Discussões mais detalhadas a respeito de QIM pode ser encontrada em [5, 6, 1].

3.1.4 Bits Menos Significativos

O método mais simples e de mais alta capacidade para inserir uma marca d'água em um sinal se dá através de modificações nos bits menos significativos (*least significant bits* -LSB). Nesse caso, os LSB são modificados de acordo com a mensagem desejada. No entanto, essa técnica apresenta muito pouca robustez e não é normalmente usada em aplicações como proteção de direitos autorais, já que um baixo nível de ruído pode destruir completamente a mensagem inserida.

Por outro lado, método baseados em LSB são bastante efetivos para autenticação de conteúdo através de inspeção visual, onde os bits menos significativos são substituídos por um logo binário, como ilustrado na Figura 3.5, por exemplo. Qualquer modificação na imagem marcada altera o logo, fazendo com que seja possível determinar onde a imagem foi alterada. Na sua forma mais simples, esse método não é muito seguro porque os bits menos significativos podem ser mantidos inalterados e os outros planos de bits podem ser modificados. Por isso, versões mais avançadas foram propostas, como por exemplo os trabalhos descritos em [31, 32].

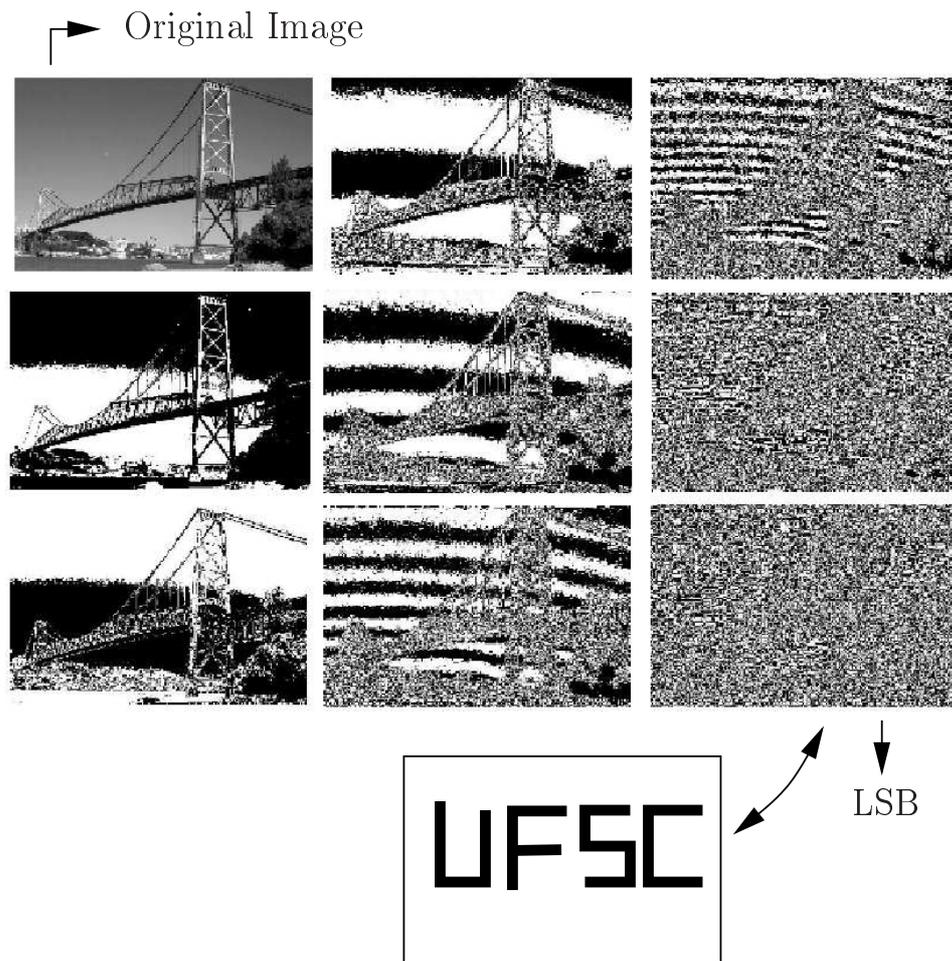


Figura 3.5: Imagem decomposta em planos de bits.

3.2 Efeitos da Impressão e do “Escaneamento”

Esta seção descreve os efeitos do processo de impressão e “escaneamento”. Posteriormente, na Seção 3.3, algoritmos de marca d’água que sobrevivem a esse processo são discutidos. Adicionalmente, um modelo de canal analítico do processo PS é apresentado no Capítulo 4.

Quando um documento é impresso e “escaneado,” o documento “escaneado” pode parecer similar ao original, mas é distorcido no processo. Dependendo da distorção, uma marca d’água inserida pode se perder durante o processo. De fato, é possível abordar o problema sob uma perspectiva de comunicações e tratar o canal PS como um canal de comunicação, com uma dada resposta em freqüência, atrasos, funções de espalhamento e adição de ruído. Na realidade, quando um documento é impresso, a imagem original, e conseqüentemente a marca d’água inserida, são transmitidos através de um canal contínuo (o papel) e sofrem diversas distorções tais quais filtragem passa-baixas, rotações, escalamentos, translações, variações de contraste e luminância, além de diversos tipos de ruído. Considerando que marcas d’água têm

uma restrição de energia devido à propriedade de transparência perceptual, essas distorções não podem ser desprezadas. Portanto, é fundamental a obtenção de um modelo teórico apropriado, tal qual o modelo apresentado no Capítulo 4. Com esse modelo, o problema pode ser caracterizado, servindo como base para o desenvolvimento de esquemas eficientes. A seguir, algumas das características inerentes ao processo de impressão e “escaneamento” são discutidas.

3.2.1 Características dos Dispositivos

“Escaneamento”

O processo de amostragem de um “escaner” é afetado principalmente pelos seguintes elementos:

- O processo de amostragem de alguns “escaners” apresenta uma pequena diferença entre a direção vertical e a direção horizontal. A amostragem na direção horizontal é normalmente feita com dispositivos ópticos apenas. Ao contrário, a amostragem na direção vertical é feita através de amostragem óptica e subamostragem digital, normalmente causando uma amostragem não uniforme.
- Sabe-se a partir do teorema da amostragem [33] que a frequência de amostragem deve ser ao menos duas vezes maior que a maior frequência presente no sinal a ser amostrado. Em um “escaner,” o sistema óptico combinando lentes e espelho foca o campo de visão sobre o CCD (*charge coupled device*) para aquisição. O sistema óptico é construído de forma a causar uma frequência de corte que filtra as frequências superiores àquela correspondente à maior frequência de amostragem disponível no dispositivo.
- O mecanismo que se move ao longo da direção vertical contém o sistema óptico e o bloco de CCD’s, e produz amostras na resolução desejada. Esse mecanismo não pausa o seu movimento quando as células de CCD estão em processo de aquisição e sendo carregadas. Por esse motivo, a imagem “escaneada” sofre borramento e filtragem passa-baixas.

As Figuras 3.6(a) e 3.6(b) mostram um diagrama de blocos do processo de amostragem nas direções vertical e horizontal, respectivamente.

Impressão

Existem diversas tecnologias de impressão de imagens. Exemplos incluem [34] impressão a jato de tinta, impressão a laser, sublimação de corante, transferência termal de cera, dentre outras. Talvez as mais populares dentre essas técnicas sejam

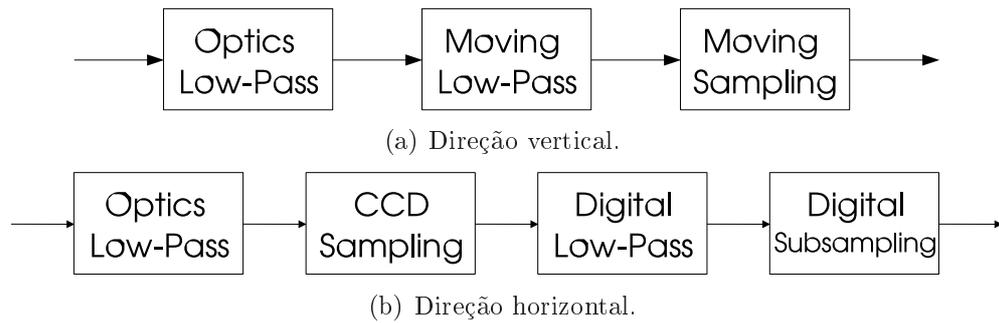


Figura 3.6: Resumo do processo de “escaneamento”.

a impressão a laser e jato de tinta. Essas oferecem impressão de alta qualidade e alto desempenho a preços acessíveis. Por esse motivo, este trabalho foca nesses tipos de impressão, que usam tecnologias de “meio-tom,” ou *halftoning*.

Halftoning refere-se ao processo no qual uma imagem com diversos tons de cinza é transformada em uma imagem preta e branca, devido à uma limitação da tela de exibição ou dispositivo de impressão. Essa imagem, quando criada com um algoritmo de *halftone* bem projetado, tem a aparência de uma imagem em tons de cinza quando vista de uma distância apropriada, devido à característica de filtragem passa-baixas do sistema visual humano (*Human Vision System - HVS*) [35]. Imagens coloridas também são impressas em *halftone* [36], porém este capítulo foca em imagens em tons de cinza apenas, visto que o fundamento da teoria pode ser estendido ao caso colorido.

Existem três classes de algoritmos de *halftone* bastante comuns: (i) técnicas de otimização; (ii) *ordered dithering*; e (iii) difusão de erro. De forma geral, técnicas de otimização apresentam resultados perceptuais bastante satisfatórios, porém apresentam uma alta complexidade computacional quando comparadas a outros métodos. Por essa razão, apesar de populares, técnicas de otimização não são tão frequentemente utilizadas quanto *ordered dithering* ou difusão de erro. Técnicas do tipo *ordered dithering* são comumente aplicadas a impressoras laser, enquanto que técnicas de difusão de erro é normalmente utilizada em impressoras jato de tinta.

Uma imagem *halftone* tem um espectro largo, e a sua energia é concentrada em harmônicas da frequência do *halftone* [37]. Réplicas diferentes no espectro do *halftone* “escaneado” sobrepõem-se, e os componentes de frequência podem formar picos quando somados, causando um padrão periódico visível. Este padrão é conhecido na literatura como Padrão de Moiré [38]. Sugere-se que o leitor reporte-se a [34] e [39] para um tutorial e referências adicionais em algoritmos de *halftoning*.

3.2.2 O Processo de Halftoning

O algoritmo proposto no capítulo 5 trata imagens binárias que serão impressas como imagens em tons de cinza. Nesse contexto, um entendimento claro do algoritmo de *halftone* usado no processo de impressão é fundamental, de forma que as características reais do sinal marcado sejam conhecidas.

Como discutido na seção anterior, os dois tipos mais comuns de algoritmos de *halftone* são: erro difusão e *ordered dithering* [40, 41, 42]. A descrição a seguir é focada em *ordered dithering* que, com algumas variações (dependendo do dispositivo) é comumente aplicado em impressoras laser modernas.

Seja s uma imagem digital de tamanho $M' \times N'$ com $L + 1$ níveis entre $[0, 1]$ (em que **0** representa **branco** e **1** representa **preto**). Uma imagem *halftone* (binária) b é gerada a partir de s , usando o algoritmo *ordered dithering*. A essência desse método está no tamanho e nos coeficientes da matriz de quantização (matriz de *halftone*) D_H de tamanho $J \times J$, sendo que cada coeficiente representa um limiar para a binarização. Cada coeficiente em D_H recebe um valor no espaço $\{0, 1/L, 2/L, \dots, 1\}$. A imagem binária de saída b é dada por uma operação de limiarização entre os pixels em s e os coeficientes em D_H . Nos casos em que a resolução da imagem é igual à resolução de impressão, a limiarização é feita elemento-a-elemento, ou seja, um ponto (pixel) na imagem corresponde a um ponto (preto ou branco) na versão *halftoned*. Se a resolução da imagem for menor que a resolução de impressão, cada pixel na imagem original será representada por *vários* pontos pretos e brancos.

Um diagrama de blocos dessa operação, com coeficientes da matriz de *halftone* dados pela tradicional matriz de Bayer em [43], é mostrado na Figura 3.7.

Em geral, o tamanho da matriz de *halftone* é muito menor que o tamanho da imagem, ou seja, $J \ll M'$ e $J \ll N'$. Portanto, $D_H(m, n)$ é periodicamente replicado de forma que $\tilde{D}_H(m, n) = D_H(m \bmod J, n \bmod J)$, em que \bmod é a operação módulo, e toda a imagem é coberta. A relação de entrada e saída do algoritmo pode descrita matematicamente como:

$$b(m, n) = Q_{H\tilde{D}_H(m,n)}(s(m, n)) \quad (3.8)$$

$$= \begin{cases} 0 & \text{se } s(m, n) < D_H(m \bmod J, n \bmod J) \\ 1 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (3.9)$$

A saída '0' representa um pixel branco (ponto não impresso), e '1' representa um pixel preto (ponto impresso). Os valores dos coeficientes em D_H são aproximadamente uniformemente distribuídos [42] e têm um efeito direto na qualidade da imagem de *halftone* b . Padrões de matrizes de *halftone* comumente usados são do

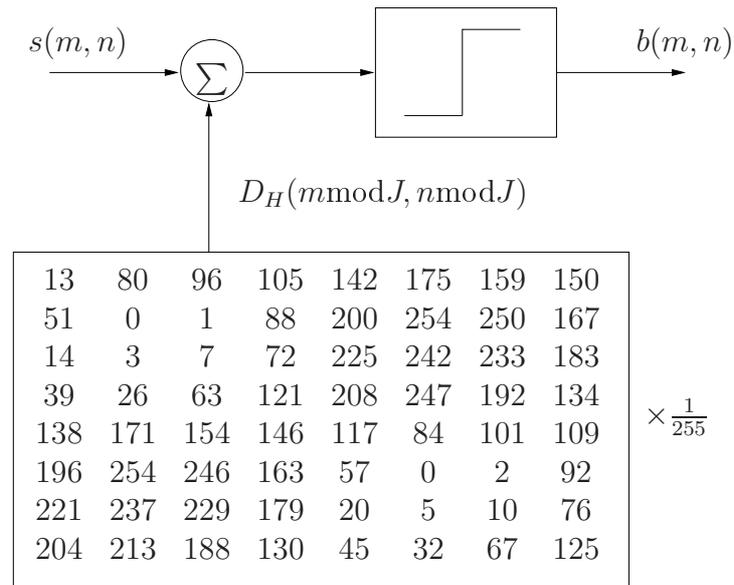


Figura 3.7: Diagrama ilustrando a operação de binarização pixel-a-pixel usada em *ordered dithering*.

tipo *clustered-dot*, os quais concatenam pontos pretos e brancos, e do tipo *dispersed-dot*, que podem ser formados a partir de uma matriz com baixa correlação entre os coeficientes [42, 41]. Algoritmos *ordered dithering* com as suas diferentes configurações de matrizes são bastante populares em impressoras de baixo custo. Esse tipo de algoritmo será novamente discutido na Seção 4.1.

O conteúdo desta seção representa uma descrição breve e qualitativa do processo PS. No Capítulo 4 uma discussão mais completa é apresentada, em que um modelo analítico para os efeitos causados pela impressão e “escaneamento” é proposto.

3.3 Marcas d’Água Hardcopy

Um número moderado de artigos discutindo marcas d’água digitais aptas a sobreviver o processo PS pode ser encontrado na literatura, e cada um deles foca em diferentes tipos de conteúdo, tais quais imagens em tons de cinza, imagens binárias, e texto. Esta seção apresenta um revisão de alguns dos mais importantes desses métodos, também conhecidos como métodos *hardcopy*, discutindo as suas vantagens e desvantagens. Inicialmente, um resumo das técnicas aplicadas a imagens é apresentado, seguido das técnicas usadas especificamente para documentos de texto.

3.3.1 Marca d’Água para Imagens

Diferentes estratégias para marcar imagens e sobreviver ao processo PS têm sido propostas, e muitas delas fazem uso de transformadas lineares, buscando ro-

bustez à distorções geométricas do canal. Dado que nesse tipo de aplicação existe a necessidade de alinhamento da imagem “escaneada,” a representação através da Transformada Discreta de Fourier (DFT) tem propriedades de invariância desejáveis [44] e é menos sensível a pequenos desalinhamentos. Por isso, essa representação é a mais comumente encontrada em marcas d’água *hardcopy*.

Muitos métodos utilizam clássicas marcas d’água aditivas baseadas em correlação. Em [45], por exemplo, os autores usam um padrão cíclico 2-D para aumentar a detectabilidade da marca d’água e superar as distorções de *cropping*. Além disso, eles adicionam um *template* no domínio transformado para prover resistência contra as distorções geométricas. Como pode ser frequentemente encontrado na literatura [1, 18], tanto a marca d’água quanto o *template* são modulados por uma máscara baseada no HVS, para reduzir o impacto perceptual.

Em [46], os autores não usam detecção por correlação, mas baseiam o seu esquema de codificação em mudar o valor absoluto de determinados pares de coeficientes da DFT. Dado um par de coeficientes, um bit zero/um é inserido por meio de um aumento no primeiro/segundo e uma diminuição do segundo/primeiro coeficiente. A detecção é feita através de decodificação por máxima verossimilhança. Esse esquema é proposto baseado em resultados experimentais dos efeitos do processo PS nos coeficientes da DCT de uma imagem.

No trabalho apresentado em [47], os autores usam a transformada Hadamard [34] para inserir informação. Uma peculiaridade sobre esse esquema é que ele é proposto especificamente para autenticação de carteiras de identificação, estabelecendo uma relação entre a fotografia e a informação pessoal do portador escrita na carteira. Esse tipo de aplicação é motivada pelo fato que aproximadamente dois terços das fraudes em passaportes ocorrem pela substituição da fotografia [47]. Esse sistema de marca d’água é baseado na polaridade dos coeficientes da transformada Hadamard, e os autores ilustram que eles podem inserir de forma invisível 9 caracteres em fotografias de tamanho 180×130 pixels e conseguir uma detecção bem sucedida de 96% nas imagens testadas. Apesar de não ter uma baixa taxa de detecção, pesquisa adicional ainda seria necessária para uma implementação prática desse sistema, visto que uma detecção tipo falso negativa ou positiva podem trazer sérias conseqüências.

Com uma das mais completas discussões teóricas a respeito de distorções geométricas causadas por PS encontradas na literatura, os autores em [48] buscam contornar essas distorções usando a transformada Fourier-Mellin.

Muitas técnicas de marca d’água usam a amplitude da DFT devido à sua invariância a rotação e translação [8, 49]. Visto que uma translação cíclica no domínio espacial causa o mesmo na amplitude da DFT, a marca d’água inserida nesse domínio é imune a translações. Uma proposta apresentada em [50, 48] que cria marcas d’água

robustas não apenas a rotação e translação, mas também a ataques de mudança de escala, usa a transformada Fourier-Mellin, com mapeamento log-polar (LPM).

Dentro dos sistemas de marca d'água *hardcopy*, métodos que exploram diretamente o algoritmo de *halftone* também já foram propostos. Em [51], por exemplo, os autores lidam com *halftone* do tipo *direct binary search* (DSB) [35] para propor um algoritmo de *halftone* conjuntamente com um algoritmo de marca d'água, aplicável a imagens em tons de cinza. O algoritmo minimiza o erro entre a imagem marcada e a imagem original através de uma função custo conjunta baseada no sistema visual humano (HVS) e na detecção da marca d'água. Apesar dos autores apresentarem uma análise do esquema de otimização, as distorções geométricas causadas pelo canal não são discutidas.

3.3.2 Marcas D'Água para Texto

Dentre outros tipos de mídia, documentos de texto apresentam propriedades bastante características: natureza binária, padronização distinta de blocos / linhas / palavras e uma separação clara entre fundo e não-fundo. Por isso, algoritmos específicos para texto foram desenvolvidos para lidar com essas questões.

Infelizmente, as técnicas apresentadas na Seção 3.3.1 anterior que fazem uso de transformadas lineares têm uma importante desvantagem quando aplicadas a documentos de texto. Em geral, qualquer modificação no domínio transformado é espalhada por toda a imagem, incluindo o fundo branco de um documento de texto. Portanto, padrões ruidosos se tornam visíveis em uma região de intensidade constante como papel branco, violando o requisito de transparência perceptual do sistema.

Indo de acordo com a discussão apresentada em [52] e [14], uma extensa busca bibliográfica feita pelo autor desta tese revelou que um pequeno número de trabalhos foi publicado na área de marcas d'água para texto, em comparação a imagens, áudio e vídeo.

Um importante artigo sobre marcas d'água para texto foi publicado por Brassil et al. em [53]. Neste trabalho, os autores descrevem e comparam diversos mecanismos para marcar e decodificar documentos, de forma robusta ao canal PS. Um dos métodos é chamado de *line-shift coding*, em que uma linha é movida para cima ou para baixo de acordo com o bit a ser inserido. O centróides das linhas podem ser usados como referências para detecção cega (sem a imagem original). No entanto, é necessário que os centróides estejam uniformemente espaçados, um condição não necessariamente presente em qualquer documento. Um exemplo de *line-shift coding* é mostrado na Figura 3.8

Outro método proposto em [53], chamado de *word-shift coding*, insere informação

How many roads must a man walk down before you
can call him a man? Yes, and how many seas must a
white dove sail, before she sleeps in the sand?

How many roads must a man walk down before you
can call him a man? Yes, and how many seas must a
white dove sail, before she sleeps in the sand?

Figura 3.8: Ilustração de *line-shift coding*. A linha central no parágrafo superior é ligeiramente movida para cima. No parágrafo inferior, o deslocamento é visível por meio da superposição da imagem original e da imagem marcada.

por meio de um ligeiro reposicionamento de palavras para a direita ou para a esquerda, como ilustrado na Figura 3.9. Outra implementação, chamada de *feature coding*, move para cima ou para baixo certas características do texto, como caracteres individuais, como ilustrado na Figura 3.10. Esses métodos são capazes de inserir mais informação em comparação a *line-shift coding*, mas o documento original deve estar necessariamente disponível para detecção não-cega.

Make sure that the fortune that you seek is the fortune that you need

Make **sure** that the **fortune** that you **seek** is the fortune that **you** need

Figura 3.9: Exemplo de *word-shift coding*. Na frase superior, as palavras *sure*, *fortune*, *seek* e *you*, foram levemente deslocadas. Na frase inferior, o deslocamento é visível devido a superposição com a imagem original.

Acredito ser o mais valente, nessa luta do rochedo com o mar.

Acredito ser o mais valente, nessa luta do rochedo com o mar.

Figura 3.10: Exemplo de *character-shift coding*.

Um algoritmo *word-shifting* alternativo foi proposto por Huang et al. em [54], onde os espaços entre-palavras foram modificados de modo que os comprimentos desses espaços formem uma senóide. Algumas das vantagens dessa implementação são: a senóide varia gradualmente, sendo que variações locais não são facilmente

percebidas; a mensagem a ser inserida pode ser codificada na fase, amplitude ou frequência da senóide; a sua simetria periódica facilita a detecção. Além disso, o algoritmo pode ser facilmente ajustado para detecção cega ou não-cega.

Outros exemplos de algoritmos *word-shifting* também podem ser encontrados na literatura, mas eles são essencialmente variações da idéia fundamental. Infelizmente, algoritmos *word* e *line-shifting* assumem um espaçamento comportado no documento. Equações, títulos e logotipos de tamanhos variáveis complicam o processo de detecção devido ao espaçamento não uniforme.

Usando uma proposta diferente, propõe-se que o texto seja marcado através de modificações nos pixels dos caracteres [55, 56], como mudar um pixel de preto para branco e vice-versa. No trabalho feito por Wu e Liu [55], por exemplo, uma imagem é particionada em blocos e um número fixo de bits é inserido em cada bloco por meio da modificação de alguns pixels específicos daquele bloco. Um dado pixel é alterado dependendo de um “*flipping score*,” que avalia o impacto perceptual de uma mudança naquele pixel. Esse impacto é determinado dinamicamente pela observação da suavidade e da conectividade. A suavidade é medida pelas transições horizontais, verticais e diagonais em uma janela local, e a conectividade é medida pelo número de *clusters* pretos e brancos. Uma ilustração de dois pixels que claramente teriam diferentes *flipping scores* é dada na Figura 3.11, onde uma mudança no pixel central na Figura 3.11(b) causa um impacto perceptual maior que na Figura 3.11(a). Porém, para sobreviver ao canal PS, os autores sugerem o uso de marcas visíveis para compensar pelas distorções de sincronismo. Essa classe de métodos tem potencialmente alta capacidade de inserção, mas visto que o método se baseia em pequenos pontos, as operações de impressão e “escaneamento” devem ser feitas com resoluções bastante altas para reduzir o número de erros na binarização da imagem “escaneada”.

Dentro de uma classe distinta de algoritmos, o sistema oferecido em [57] insere informação em documentos através da troca de palavras por seus sinônimos, sem que o sentido da frase seja alterado. A marca d’água é inserida por meio de um rephraseamento mínimo, baseado na escolha dos sinônimos, ordem das palavras e posição de espaços adicionais para justificar o parágrafo. Uma vantagem dessa técnica é que ela é robusta a inúmeras cópias. No entanto, ela é dependente da língua, não sendo diretamente aplicável para qualquer idioma.

Os métodos discutidos acima são implementações práticas de algoritmos de marca d’água para texto. Com relação a aspectos relacionados a teoria da informação tais quais capacidade de canal e codificação (tanto em formato impresso quanto digital), o leitor é referido para [58, 14, 59, 15, 60].

Em contraste com algumas das limitações dos métodos detalhados acima (detecção

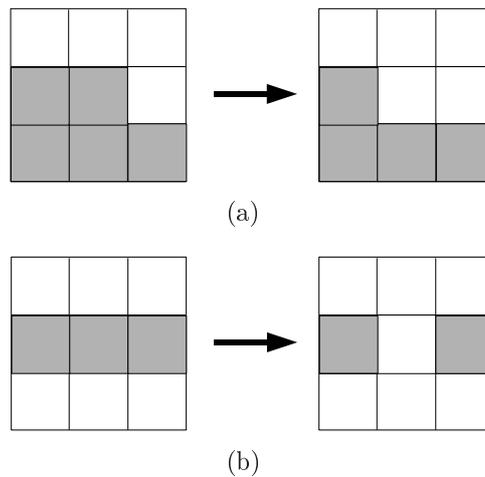


Figura 3.11: Ilustração de dois pixels centrais em uma vizinhança 3×3 que teriam diferentes *flipping scores*.

não-cega, necessidade de espaçamento uniforme entre linhas, erros de segmentação, etc), TLM pode ser projetado para ser robusto a esses problemas, como será discutido no Capítulo 5.

3.4 Conclusões

Este capítulo revisou alguns dos mais importantes métodos de marca d'água apresentados na literatura. Adicionalmente, após uma breve descrição dos efeitos causados pelo processo PS, foram discutidos métodos tradicionais de marcas d'água *hardcopy* específicos para imagens naturais e texto. O próximo capítulo apresenta em detalhes um modelo de canal PS, que serve como base para a análise do algoritmo TLM proposto nesta tese.

Capítulo 4

CANAL DE IMPRESSÃO E “ESCANEAMENTO” PROPOSTO

O objetivo dos capítulos anteriores era familiarizar o leitor com conceitos e algoritmos essenciais no estudo de marcas d'água, autenticação e *data hiding*. Neste capítulo são apresentadas novas contribuições para o campo de marcas d'água *hard-copy* propondo, na Seção 4.1, um modelo analítico para o processo de impressão e “escaneamento,” referido neste trabalho como processo PS, do inglês *print and scan*.

Diversos modelos para a operação PS podem ser encontrados na literatura. No entanto, dentro da pesquisa feita, nenhum desses modelos combina todos os aspectos que são relevantes para este trabalho. Portanto, é aqui proposto um modelo PS aprimorado que inclui diversas características que influenciam o desempenho do processo de detecção do sistema proposto no Capítulo 5. Além disso, esse modelo permite o tratamento matemático nas análises de erro. O processo físico é descrito em detalhes buscando justificar os modelos de ruído assumidos. O estudo e modelamento desse canal ruidoso é essencial para o projeto do sistema proposto. É importante notar que esse modelo é válido não apenas para o sistema TLM, mas também para códigos de barra 2-D [37, 61, 62], discutidos no Capítulo 7.

4.1 Modelo de Canal de Impressão e “Escaneamento” Proposto

Esta seção modela o processo PS como um canal de comunicações ruidoso, sendo dividida em duas partes: distorções nos valores de pixel e distorções geométricas.

4.1.1 Distorções nos Valores de Pixel

Um modelo para as alterações sofridas na luminância dos pixels de uma imagem impressa e “escaneada” é apresentado nesta seção. Apenas imagens em tons de cinza são consideradas, e uma descrição extensa e referências sobre variações na cor podem ser encontradas em [63].

Modelos analíticos do canal PS podem ser encontrados na literatura [37, 62, 64], e eles assumem que o processo pode ser generalizadamente modelado por uma filtragem passa-baixas, adição de ruído Gaussiano, e ganhos não-lineares, tais quais mudança de brilho e alteração do fator gama [33].

No modelo proposto em [37], por exemplo, o valor da luminância de um pixel com coordenadas (m, n) submetido ao canal PS é descrito por

$$y(m, n) = g[s(m, n) * h(m, n)] + f[g(s(m, n))] \eta_1(m, n) + \eta_2(m, n) \quad (4.1)$$

em que s e y são respectivamente a imagem original marcada e a imagem “escaneada,” e η_1, η_2 são assumidos como ruídos Gaussianos brancos de média-zero e mutuamente independentes. O operador $*$ representa convolução, h é um filtro passa-baixas, e $g(\cdot)$ e $f(\cdot)$ são efeitos não-lineares que representam as características de ganho dos dispositivos. Esse modelo é satisfatório em muitas aplicações, como por exemplo códigos de barra 2-D multi-nível, discutidos em [37, 61, 62].

4.1.2 Modificações Propostas

Nesta seção o modelo em (4.1) é modificado para melhor descrever alguns dos efeitos físicos inerentes ao processo PS. Especificamente, investigando os efeitos causados pelo ruído proveniente do algoritmo de meio-tom, ou *halftoning*, fica evidente que existe uma dependência entre a luminância na entrada e os momentos estatísticos na saída do algoritmo. Essa característica é explorada no Capítulo 6, onde métricas de detecção para o sistema proposto de marcas d’água para texto são discutidas. Portanto, é proposto um modelo analítico modificado que considera o ruído de *halftone*, seguido de modificações da função $g(\cdot)$.

Neste trabalho, descrevemos o modelo de impressão como

$$y_{pr}(u, v) = g_{pr}[b(u, v)] * h_p(u, v) + \eta_1(u, v) \quad (4.2)$$

em que y_{pr} é a imagem contínua formada da imagem discreta s . O sistema de coordenadas (u, v) é usado para representar os sinais digitais no domínio analógico, isto é, $b(m, n) \rightarrow D/A \rightarrow b(u, v)$, onde $b(m, n) = Q[s(m, n)]$ é a versão *halftoned*

(antes da impressão) de $s(m, n)$, e D/A representa a conversão digital-analógica. O termo h_p representa um “efeito passa-baixas” devido ao espalhamento do *toner* ou da tinta da impressora, e η_1 representa efeitos microscópicos de imperfeição na tinta e no papel.

O processo de “escaneamento” é formado pela aquisição óptica analógica seguida de amostragem e quantização para discretizar a imagem. Observe que $\text{sen}(x)/x$ e efeitos de *aliasing* devidos às operações D/A e A/D são desconsiderados. A imagem a ser “escaneada” é iluminada e a intensidade refletida é convertida em um sinal elétrico e capturada por um sensor CCD (*charge coupled device*).

O processo analógico de aquisição na operação de “escaneamento” é descrito como:

$$\begin{aligned} y(u, v) &= g_s \{ y_{pr}(u, v) * h_s(u, v) \} + \eta_3(u, v) \\ &= g_s \left\{ \left\{ g_{pr}[b(u, v)] * h_p(u, v) + \eta_1(u, v) \right\} * h_s(u, v) \right\} + \eta_3(u, v), \end{aligned} \quad (4.3)$$

em que y é o sinal impresso e “escaneado” e h_s é um filtro passa-baixas modelando a suavização devido à óptica e às interações de elementos CCD adjacentes [37]. η_3 é um termo que representa o ruído de iluminação e de partículas microscópicas na superfície do “escaner”.

Os sistemas lineares h_p e h_s em (4.3) modelam as funções de espalhamento da impressora e do “escaner,” respectivamente. Experimentos indicam que, dependendo dos dispositivos de impressão e “escaneamento” usados, o efeito passa-baixas devido ao “escaneamento” é mais forte do que aquele devido à impressão. Em outros casos, no entanto, o efeito passa-baixas devido à impressão é predominante, especialmente para impressoras jato de tinta e papel muito macio. Considerando que ambos os cenários são possíveis, uma abordagem conservadora é utilizada e um filtro h mais seletivo é assumido, o qual combina h_s e h_p para ajudar a garantir que o efeito passa-baixas não seja sub-estimado. Além disso, essa suposição reduz o número de termos no modelo do canal, simplificando a notação das análises.

Desta forma, considera-se que $h_s * h_p \approx h_s = h$, e (4.3) pode ser escrita como

$$y(u, v) = g_s \left\{ \left\{ g_{pr}[b(u, v)] + \eta_1(u, v) \right\} * h(u, v) \right\} + \eta_3(u, v) \quad (4.4)$$

Devido ao fato que a operação de “escaneamento” envolve amostragem e quantização, a imagem “escaneada” final é representada no domínio digital, ou seja, $y(u, v) \rightarrow \text{A/D} \rightarrow y(m', n')$, em que A/D representa conversão analógica-digital. Para expressar a relação entrada-saída do sistema PS, o sistema de coordenadas digital (m', n') é aproximado para o sistema de coordenadas original (m, n) , apesar de

que o sistema de coordenadas (m', n') normalmente não corresponde exatamente às coordenadas originais (m, n) . Essa diferença não altera significativamente a relação entrada-saída do sistema PS se a mesma resolução é usada tanto para impressão quanto para “escaneamento”. Quando esse não é o caso, é possível incluir um termo de escala no modelo, como discutido na Seção 4.1.3.

A imagem digital “escaneada” é expressa como

$$y(m, n) = g_s \left\{ \left\{ g_{pr}[b(m, n)] + \eta_1(m, n) \right\} * h(m, n) \right\} + \eta_3(m, n), \quad (4.5)$$

em que η_3 agora combina as distorções analógicas representadas por η_3 em (4.3), o ruído eletrônico do CCD e o ruído de quantização devido à operação A/D.

Os termos em (4.5) são mais detalhadamente discutidos a seguir.

Ganhos $g_{pr}(\cdot)$ e $g_s(\cdot)$

Na prática, quando partículas do toner ou tinta preta são aplicadas sobre o papel, estas não apresentam um reflectância nula, causando um ganho na luminância da imagem impressa [40]. Essa distorção é modelada como:

$$g_{pr}(m, n) = b(m, n)\alpha(m, n), \quad (4.6)$$

em que α é um ganho que depende do dispositivo sendo usado. O parâmetro $\alpha(m, n)$ é modelado como constante em uma pequena região (uma área correspondente a um quinto da página, por exemplo), porém ele varia suavemente ao longo de um página devido à distribuição não constante do toner.

A resposta dos “escaners” depende do dispositivo, e normalmente apresentam um ganho não linear representado por

$$g_s(m, n) = [x(m, n)]^\gamma. \quad (4.7)$$

em que $x(m, n) = \{g_{pr}[b(m, n)] + \eta_1(m, n)\} * h(m, n)$.

Observe que alguns autores descrevem o ganho PS $g(m, n)$ como $g(m, n) = \beta(m, n)[x(m, n)]^\gamma$ [64, 37]. Ao contrário desses modelos, o ganho de impressão g_{pr} e o ganho de “escaneamento” g_s são descritos separadamente nesta seção. Apesar do termo $\beta(m, n)$ não estar incluído em (4.7), esse efeito é substituído pelo ganho α em $g_{pr} = \alpha(m, n)b(m, n)$ no modelo proposto.

Na realidade, existem muitas outras fontes de ruído que são simplificadas e concisas no modelo da equação (4.5). A potência do ruído é ligeiramente maior na direção de movimento da iluminação do “escanner,” sendo que η não é perfeitamente simétrico em ambas as direções. Uma tensão significativa pode ocorrer no “escaner”

a cada pulso do *clock*, causando interferência no sinal analógico do “escaner”. Flutuações na intensidade da luz também alteram a aquisição, assim como elementos físicos tais quais pontos na impressora, tipo de papel usado, poeira e arranhões no “escaner” [37].



Figura 4.1: GUI dos “escaners” Genius HR6X Slim e HP 2300C.

4.1.3 Distorções Geométricas

O procedimento mais comum no processo de “escaneamento” de um documento é descrito a seguir. Inicialmente, o usuário coloca a imagem ou texto a ser “escaneado” no “escaner” de mesa. Uma amostra da imagem em baixa resolução é mostrada. O usuário escolhe manualmente, com o auxílio de uma interface gráfica (GUI), uma região a ser “escaneada” em alta resolução. As Figuras 4.1(a) e 4.1(b) ilustram as interfaces gráficas de um “escaner” Genius HR6X Slim e de um “escaner” HP 2300C, respectivamente. Nesse processo a imagem discreta final sofre três tipos de distorções: rotação, escalamento e cortes.

1. **Rotação:** quando uma foto é colocada sobre o “escaner,” uma pequena diferença de alinhamento normalmente ocorre, causando uma distorção por rotação. Foi observado em [64, 65] e nos experimentos feitos neste trabalho que essa rotação é normalmente menor que 3° . Portanto, o processo de rotação é descrito pela seguinte equação:

$$y(m, n) = c(m \cos \phi - n \sin \phi, m \sin \phi + n \cos \phi), \quad |\phi| \leq 3^\circ \quad (4.8)$$

Apesar de não ser muito significante perceptualmente, essa rotação pode ser uma importante fonte de interferência no processo de detecção de um sistema de marca d’água *hardcopy*.

2. **Escalamento:** outro tipo de distorção é frequentemente causado pelas diferentes resoluções usadas pela impressora e pelo “escaner,” resultando em uma imagem maior ou menor que a original. Portanto, uma mudança de escala ocorre dependendo das resoluções escolhidas. Essa distorção pode ser representada por um fator de escala λ_s nas coordenadas espaciais da relação entrada-saída do processo PS [65], tal que

$$y(m, n) = s(\lambda_s m, \lambda_s n), \quad (4.9)$$

em que y é uma imagem impressa e “escaneada” e s é a imagem original. No entanto, para simplificar a notação, λ_s é assumido igual a 1 e é omitido do modelo PS proposto na Seção 4.1.2.

3. **Cropping:** finalmente, antes do “escaneamento” em alta resolução, a imagem “escaneada” é manualmente cortada ou preenchida com zeros (devido ao fundo preto), sendo generalizadamente referida como um distorção de *cropping*.

Uma análise matemática substancial da rotação, escalamento e cropping causados pelo processo PS pode ser encontrada em [48].

Como observado nos experimentos feitos, TLM é naturalmente robusto a uma pequena quantidade de rotação, assim como robusto a escalamento. Além disso, *cropping* não é um problema desde que nenhum caractere ou símbolo (necessários para a detecção) sejam eliminados durante o processo manual de seleção da região a ser “escaneada”. Caso seja assumido que *cropping* pode ocorrer, o uso de códigos corretores de erro deve ser aplicado para reduzir erros causados por esse tipo de distorção. Distorções tipo *cropping* não são discutidas nesse trabalho, e uma discussão sobre códigos corretores de erro aplicáveis a essa situação pode ser encontrada em [66].

4.2 Efeitos Causados pelo Halftone

O algoritmo de *halftone* quantiza a entrada para ‘imprime um ponto’ e ‘não imprime um ponto’, de acordo com os coeficientes na matriz de *halftone*. Essa quantização causa um efeito previsível na variância, *skewness*, e curtose de uma região de *halftone*, de acordo com a luminância de entrada. Essa característica, usada no Capítulo 6 para melhorar o desempenho da detecção em TLM, é demonstrada analiticamente a seguir.

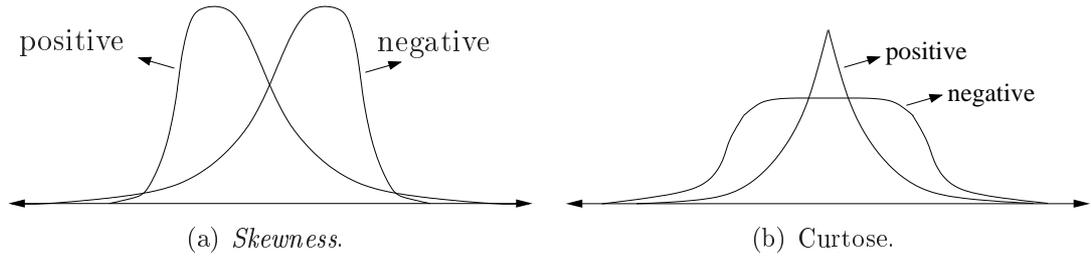


Figura 4.2: Ilustração do efeito de uma curtose e uma *skewness* positivas e negativas.

4.2.1 Variância Amostral

A variância de um bloco de *halftone* b_0 de tamanho $J \times J$ é dada por:

$$\sigma_{b_0}^2 = \frac{1}{J^2} \sum_{m=1}^J \sum_{n=1}^J [b_0(m, n) - \bar{b}_0]^2 \quad (4.10)$$

$$= \frac{1}{J^2} \sum_{m=1}^J \sum_{n=1}^J b_0^2(m, n) - 2b_0(m, n)\bar{b}_0 + \bar{b}_0^2, \quad (4.11)$$

em que $b_0(m, n) \in \{0, 1\}$, $\bar{b}_0 = (1/J^2) \sum_{m=1}^J \sum_{n=1}^J b_0(m, n)$ e J^2 é o número de coeficientes na matriz D_H . Dado que $b_0(m, n) \in \{0, 1\}$, $b_0^2(m, n) = b_0(m, n)$, e (4.11) pode ser escrita como

$$\begin{aligned} \sigma_{b_0}^2 &= \bar{b}_0 - 2\bar{b}_0\bar{b}_0 + \bar{b}_0^2 \\ &= \bar{b}_0 - \bar{b}_0^2. \end{aligned} \quad (4.12)$$

Análises similares são feitas para a *skewness* e para a curtose, como mostrado a seguir.

4.2.2 Skewness Amostral

A *skewness* mede o grau de assimetria de uma distribuição em torno da sua média [67]. Ela é zero quando a distribuição é simétrica, positiva se a forma da distribuição é mais espalhada para a direita e negativa se a forma da distribuição é mais espalhada para a esquerda, como ilustrado na Figura 4.2(a).

A *skewness* de um bloco de *halftone* b_0 de tamanho $J \times J$ é dada por:

$$\gamma_{1b_0} = \frac{\frac{1}{J^2} \sum_{m=1}^J \sum_{n=1}^J [b_0(m, n) - \bar{b}_0]^3}{\sigma_{b_0}^3} = \frac{\bar{b}_0 - 3\bar{b}_0^2 + 2\bar{b}_0^3}{(\bar{b}_0 - \bar{b}_0^2)^{3/2}} \quad (4.13)$$

4.2.3 Curtose Amostral

A curtose é uma medida do grau de achatamento de uma distribuição em torno da sua média, com relação a uma distribuição normal [67]. Uma distribuição com curtose positiva tem um pico agudo e laterais mais suaves, enquanto que uma curtose negativa indica que a distribuição possui um pico mais arredondado com laterais mais largas, como ilustrado na Figura 4.2(b).

A curtose de um bloco de *halftone* b_0 de tamanho $J \times J$ é dada por:

$$\begin{aligned} \gamma_{2b_0} &= \frac{\frac{1}{J^2} \sum_{m=1}^J \sum_{n=1}^J [b_0(m, n) - \bar{b}_0]^4}{\sigma_{b_0}^4} - 3 \\ &= \frac{\bar{b}_0 - 4\bar{b}_0^2 + 6\bar{b}_0^3 - 3\bar{b}_0^4}{(\bar{b}_0 - \bar{b}_0^2)^2} - 3 \end{aligned} \quad (4.14)$$

Para derivar $\sigma_{b_0}^2$, γ_{1b_0} e γ_{2b_0} em função da luminância de entrada $s(m, n)$, $b_0(m, n)$ deve ser gerado a partir de uma região cinza de valor constante, isto é, $s(m, n) = s_0$, $m, n = 1, \dots, J$, em que s_0 é uma constante. Assim, a análise a seguir é válida para o caso de imagem constante. Assumindo que a matriz de *halftone* é aproximadamente uniformemente distribuída, como ilustrado na Figura 4.3, a probabilidade p de que $b(m, n) = 1$, que é $\Pr[s_0 > D_H(m, n)]$, é dada por

$$\begin{aligned} p &= \Pr[s_0 > D_H(m, n)] = \frac{1}{J^2} \sum_{b(m,n)=1} b(m, n) \\ &= \frac{1}{J^2} \sum_{m=1}^J \sum_{n=1}^J b(m, n) = \bar{b} \approx s_0 \end{aligned} \quad (4.15)$$

como ilustrado na Figura 4.3. Substituindo esse resultado em (4.12), (4.13) e (4.14) gera

$$\sigma_{b_0}^2(s_0) = s_0 - s_0^2 \quad (4.16)$$

$$\gamma_{1b_0}(s_0) = \frac{s_0 - 3s_0^2 + 2s_0^3}{(s_0 - s_0^2)^{3/2}} \quad (4.17)$$

$$\gamma_{2b_0}(s_0) = \frac{s_0 - 4s_0^2 + 6s_0^3 - 3s_0^4}{(s_0 - s_0^2)^2} - 3 \quad (4.18)$$

em que $\sigma_b^2(s_0)$, $\gamma_{1b}(s_0)$ e $\gamma_{2b}(s_0)$ representam respectivamente a variância, a *skewness*, e a curtose de um bloco de *halftone* que representa uma região de luminância constante s_0 .

A função de quantização do *halftone* Q_H que gera b é binária e sem perda de generalidade, é possível decompor b em um termo constante \bar{b} adicionado de um termo de ruído η_2 :

$$b(m, n) = \bar{b} + \eta_2(m, n), \quad (4.19)$$

O ruído η_2 tem a sua variância dada por $\sigma_{\eta_2}^2 = \sigma_b^2(s_0)$, e é distribuído de acordo com $\eta_2 \in \{-s_0, 1 - s_0\}$, como ilustrado na Figura 4.5.

Usando o modelo em (4.19) e o fato que $\bar{b} \approx s_0 = s(m, n)$ dentro de uma região de luminância constante, (4.5) pode ser modificada de forma a expressar a relação entrada-saída do processo PS como

$$y(m, n) = g_s \left\{ \left\{ g_{pr} \{ s(m, n) + \eta_2(m, n) \} + \right. \right. \\ \left. \left. + \eta_1(m, n) \right\} * h(m, n) \right\} + \eta_3(m, n), \quad (4.20)$$

assumindo que $s(m, n)$ é constante em uma pequena região correspondente ao tamanho de um bloco de *halftone*.

A suposição que a matriz de *halftone* é uniformemente distribuída indica que a relação (número de pixels pretos)/(número total de pixels) aumenta linearmente de acordo com o valor de entrada do algoritmo de *halftone*. Quando isso é assumido, o resultado da análise da variância do *halftone* é válido para diferentes matrizes de *halftone* (*clustered-dot* [39], *dispersed-dot* [39], etc). Observe, porém, que outras características tal como distribuição espectral variam de acordo com a matriz de *halftone* utilizada [39].

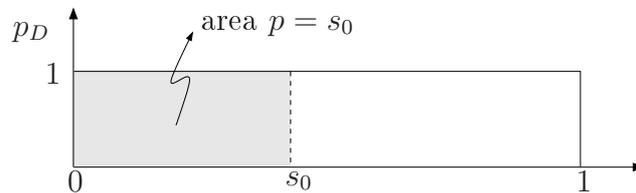
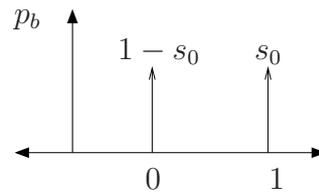
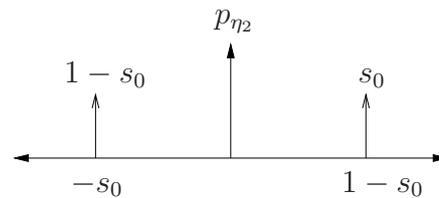


Figura 4.3: Distribuição uniforme p_D assumida para os coeficientes da matriz de *halftone*.

4.2.4 Comentários sobre σ_b^2 , γ_{1b} e γ_{2b}

O sinal de *halftone* b_0 é binário e distribuído de acordo com $b_0(m, n) \in \{0, 1\}$, com probabilidades $1 - s_0$ e s_0 , respectivamente, como ilustrado por p_b na Figura 4.4. Visto que a variância, a *skewness* e a curtose de b_0 dependem de s_0 , esses

Figura 4.4: Distribuição of b .Figura 4.5: Distribuição do ruído η_2 .

momentos podem ser usados como métricas de detecção em TLM ou códigos de barra multi-nível.

O uso da variância é justificado porque a maior variância devido ao *halftone* ocorre no meio da faixa dos possíveis valores de entrada ($s_0 = 0.5$), quando as áreas pretas e brancas são aproximadamente iguais, com a maior dispersão. Essa característica é observada em [42], onde as características perceptuais do *halftone* são investigadas.

Com relação à *skewness*, esta é igual a zero quando $s_0 = 0.5$ e a distribuição de b_0 é simétrica, representada por dois picos de iguais probabilidades. Esses dois picos simétricos também “achatam” a distribuição de y em (4.5), minimizando a curtose. Quando $s_0 < 0.5$, b é composto de mais pontos brancos do que pretos, inclinando a distribuição y para a esquerda e causando uma *skewness* positiva. O oposto ocorre quando $s_0 > 0.5$, o que causa uma *skewness* negativa. Da mesma forma, a distribuição de y se torna mais pontuda quando s_0 se aproxima dos extremos da escala de luminância, aumentando consequentemente a curtose.

Um exemplo ilustrando o efeito de uma mudança na variância do *halftone* que depende da luminância de entrada é mostrado na Figura 4.6, onde duas curvas são apresentadas. A curva preta (‘Theoretical’) representa a variância teórica determinada em (4.12). A curva cinza (‘Bayer’) representa a variância de um bloco de *halftone* (antes do processo PS, porém após a ação do *halftone*) gerado usando a matriz de *halftone* de Bayer [43]. A Figura 4.7 ilustra a imagem de saída do algoritmo de *halftone* (antes da impressão) usando a matriz de Bayer para valores de entrada $0, 15/L, 30/L, \dots, 1$.

Experimentos similares relacionados à *skewness* e à curtose são mostrados nas Figuras 4.8 e 4.9, respectivamente. Essas figuras ilustram que as análises da Seção 4.2 concordam com os resultados obtidos a partir de uma matriz de *halftone* usada

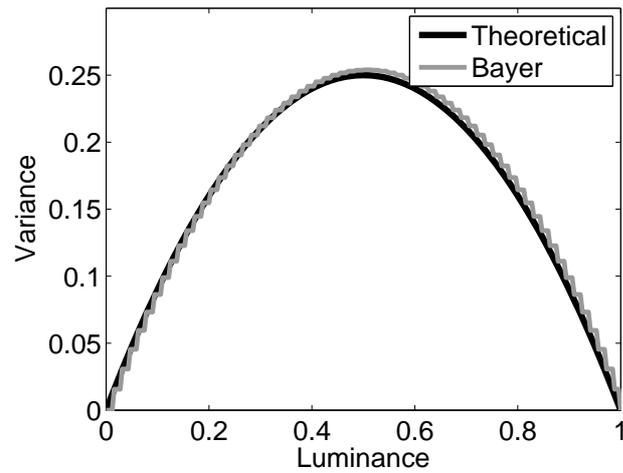


Figura 4.6: Efeito da variância dependente da luminância de entrada.

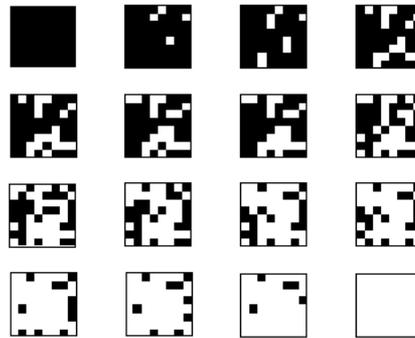


Figura 4.7: Ilustração de blocos de *halftone*.

na prática.

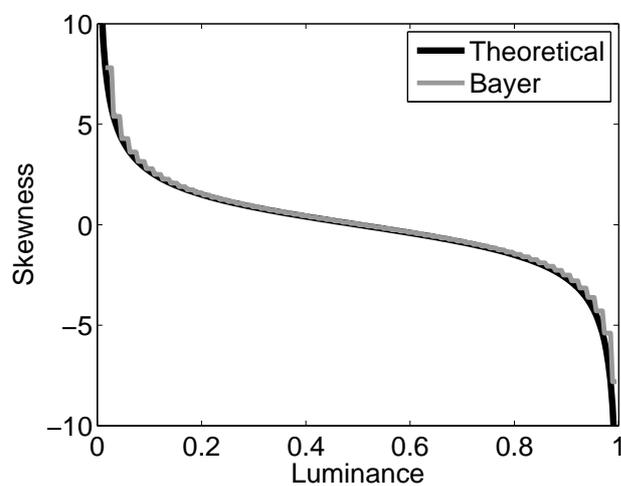


Figura 4.8: Efeito da *skewness* dependente da luminância de entrada.

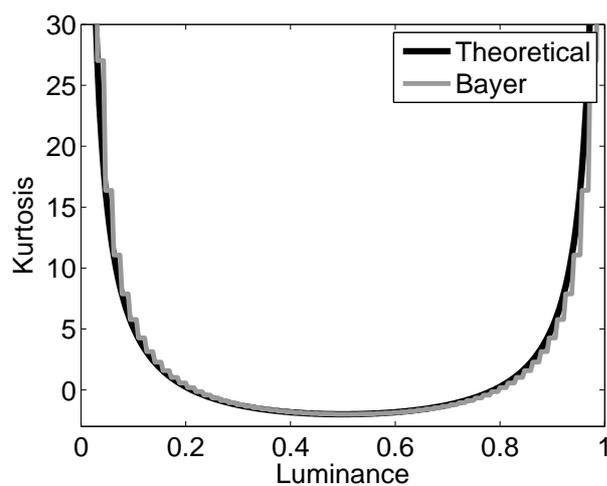


Figura 4.9: Efeito da *kurtosis* dependente da luminância de entrada.

4.3 Conclusões

Este capítulo propôs e analisou um modelo de canal analítico para o processo PS. Esse modelo tem como objetivo servir de base para o projeto e avaliação do sistema proposto no Capítulo 5. Em contraste com outros modelos previamente discutidos na literatura, o modelo proposto inclui um termo que representa o sinal de *halftone*. Especificamente, a partir de uma explanação a respeito do ruído causado pelo processo de *halftone*, foi mostrado que momentos estatísticos tais quais a variância, a *skewness* e a curtose variam de acordo com a luminância média da região. Isso é explorado no Capítulo 6, onde é mostrado que essa dependência entre a luminância de entrada e os momentos estatísticos também ocorre após o processo PS. Isso permite o uso de métricas de detecção mais eficientes no método TLM, apresentados no próximo capítulo.

Capítulo 5

MÉTODO PROPOSTO - TLM

O capítulo anterior apresentou contribuições no campo de marcas d'água tipo *hardcopy* através do aprimoramento de um modelo de canal analítico para o processo PS. Neste capítulo um novo método para autenticação de documentos impressos é apresentado.

5.1 Solução Proposta

Como discutido no Capítulo 1, a autenticação de documentos é um assunto de grande interesse prático que tem sido recentemente abordado com técnicas de marca d'água. Neste capítulo, é proposta uma solução para a autenticação de documentos compostos por qualquer tipo de conteúdo, desde que esse conteúdo possa ser representado por texto, símbolos e figuras e desenhos binários [68]. Em outras palavras, o método pode ser aplicado para documentos sem tons de cinza ou elementos coloridos, como é o caso de inúmeras situações tais quais documentos de escritório, petições, declarações, artigos científicos e mesmo páginas de um livro. Alguns exemplos desses tipos de documentos são mostrados na Figura 5.1.

É sabido que grande parte dos documentos na classe dos exemplos mencionados é composta por texto preto sobre fundo branco, sendo referidos como documentos bi-nível ou binários. Na solução proposta, a inserção da marca d'água é feita através da inserção de tons de cinza ao texto regular, respeitando, é claro, o critério de fidelidade. Assim, um padrão em tons de cinza, podendo também ser chamado de marca d'água, é inserido nas regiões pretas da imagem de texto. Essa técnica é chamada modulação de luminância de texto (TLM), apesar de que não apenas caracteres podem ser alterados. O estudo desta abordagem foi, no seu estágio inicial, motivado por alguns aspectos que pareceram intuitivamente interessantes:

- Devido à natureza de alto contraste dos documentos, modificações moderadas

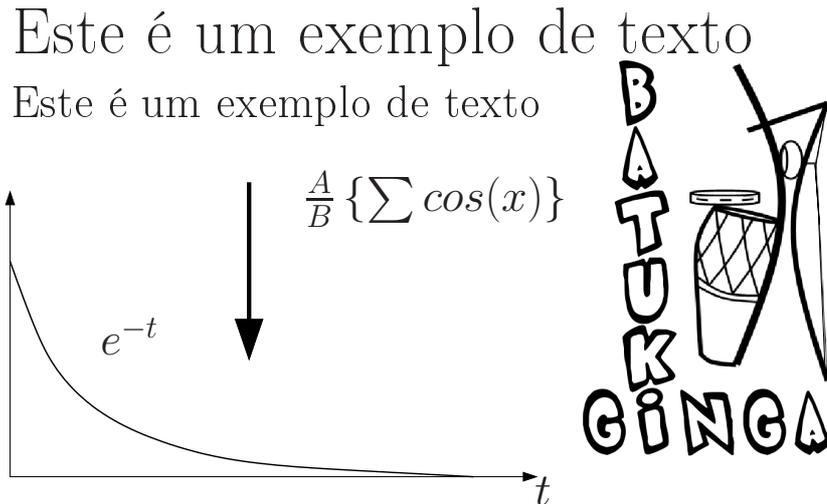


Figura 5.1: Exemplos de documentos discutidos neste trabalho.

na luminância dos pixels de um caractere ou símbolo são geralmente difíceis de serem percebidas.

- De forma geral, uma região de texto apresenta alta frequência e textura, onde modificações não são facilmente percebidas.
- Diversos experimentos com ganhos variados para a marca d'água inseridas foram feitos, e surpreendentemente, observou-se que ganhos de até 50 níveis de luminância (numa escala de 0-225) passam despercebidos em um documento de teste.
- A partir da idéia básica do TLM, qualquer tipo de alteração de luminância é feita no pixel “preto” de um documento. A conveniência, nesse caso, é que se conhece exatamente as estatísticas do sinal original, ou seja, totalmente preto. Isso pode facilitar o processo de detecção.
- A maior parte dos documentos de escritório são compostos por texto em preto e fundo em branco, permitindo um razoável espaço para a aplicação de TLM.
- Uma regra que se aplica não apenas para o presente, mas para qualquer tipo de esquema de marca d'água *hardcopy*, é que a versão digital (pré-impressão) da imagem marcada não requer um alto nível de qualidade visual. Apenas a versão impressa da imagem com marca d'água é que deveria ser visualmente similar à versão impressa da imagem original.

Experimentos iniciais ilustraram que os pontos acima são geralmente observados na prática, motivando uma investigação adicional.

5.1.1 Inserção Genérica

Usando TLM, a informação é inserida em um documento através da alteração da sua luminância. Essa alteração se dá de acordo com uma função de inserção para inserir a marca d'água w em c , em que c é a imagem binária de tamanho $M' \times N'$ representando um documento de texto. Considerando uma escala $c \in \{0, 1\}$ e $w \in [0, 1]$, em que 0 representa branco e 1 representa preto, a função geral de inserção é dada por:

$$s(m, n) = w(m, n)c(m, n) \quad (5.1)$$

em que s é a versão marcada (com tons de cinza) de c , antes do processo de PS.

É importante notar que em (5.1) o fundo branco é mantido inalterado e que as regiões pretas são moduladas por $w(m, n)$. $w(m, n) = 1$ representa alteração nula e $w(m, n) = 0$ representa a alteração máxima. A função de modulação $w(\cdot)$ é controlada de forma a causar um baixo impacto visual, respeitando uma distorção média quadrática máxima dada por $E\{[c(m, n) - s(m, n)]^2\} \leq \epsilon_{max}^2$.

É importante notar que o processo de inserção descrito por (5.1) não se apóia em uma função específica $w(m, n)$. Diferentes esquemas de transmissão de dados podem ser aplicados e a detecção pode ser feita pela avaliação dos níveis de amplitude, das características espectrais, dentre outras.

5.1.2 Limite Superior para Capacidade

Em contraste com sistemas de marca d'água tradicionais, em que os valores de luminância da imagem original não são conhecidos, neste caso sinal o original tem um valor constante preto para a sua luminância. A seguir, um limite superior para a máxima taxa teórica atingível no processo de impressão e “escaneamento” é derivada, independentemente da função de inserção usada para a transmissão dos dados. Essa análise é baseada no trabalho apresentado em [62]. Assume-se que no processo de *halftoning* o algoritmo *ordered dithering* é utilizado (comum em impressões a laser). Para o limite superior, o uso de uma impressora e um “escaner” ideal é assumido, tal que erros devido a borramentos ou problemas de sincronização não estejam presentes.

Sejam r_p e r_s as resoluções da impressora e do “escaner” em pontos por polegada (*dots per inch* - dpi) e em pixels por polegada (*pixels per inch* - ppi), respectivamente. Considere que uma faixa $\{0, 1, \dots, \Lambda\}$ é usada, a qual representa simplesmente o conjunto de possíveis valores de luminância, usualmente representados por $\{0, 1, \dots, 255\}$. Seja J o comprimento em pontos do lado da matriz quadrada de *halftone*, também chamada de célula de *halftone*. Na Figura 3.7, por exemplo, $J = 8$.

Com os pontos assumidos acima, a impressora imprime $(r_p/J)^2$ células de *halftone* por polegada quadrada. Adicionalmente, de acordo com [62], cada célula de *halftone*

representa um número máximo de $l = J^2 + 1$ níveis de cinza diferentes, considerando todas as entradas possíveis na faixa $\{0, 1, \dots, \Lambda\}$. A Figura 5.2 ilustra isso para $J = 2$, em que $2^2 + 1 = 5$ níveis distintos são representados. No entanto, limitando a energia do sinal para ϵ_{max} devido ao requerimento de transparência perceptual, a faixa dinâmica é reduzida para $\{0, 1, \dots, \epsilon_{max}\}$, e l é reduzida para

$$l = (\epsilon_{max}/\Lambda)J^2 + 1, \quad (5.2)$$

considerando uma matriz genérica de *halftone* com espaçamento uniforme entre os coeficientes. Assumindo que toda célula de *halftone* é usada como um símbolo 2-D, é possível alocar até

$$\begin{aligned} C &= (r_p/J)^2 \cdot \log_2 l \\ &= (r_p/J)^2 \cdot \log_2 \left(\frac{\epsilon_{max}}{\Lambda} J^2 + 1 \right) \end{aligned} \quad (5.3)$$

bits de informação por polegada quadrada. Uma plotagem da equação (5.3) é mostrada na Figura 5.3. Para valores positivos de J , o limite superior é estritamente decrescente, e o seu máximo é obtido quando $J = 1$. Nesta situação, é teoricamente necessário um “escaner” com resolução $r_s \geq r_p/J$ para uma detecção livre de interferência. Em geral, $J > 1$, o que implica que $(\epsilon_{max}/\Lambda)J^2 + 1$ níveis de cinza são possíveis. Além disso, a resolução mínima do “escaner” a ser usada é $r_s \geq r_p/J$, e o número ótimo de níveis de cinza (de forma que a taxa alcançável seja maximizada) a ser empregado nesse cenário ideal é $(\epsilon_{max}/\Lambda)(r_p/r_s)^2 + 1$, dado pela resolução da impressora e do “escaner”.

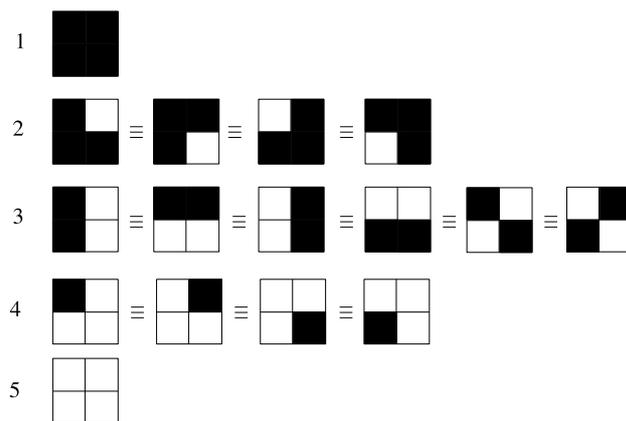


Figura 5.2: Ilustração de $a^2 + 1$ níveis distintos no processo de *halftoning*, para $a = 2$.

Exemplo:

Suponha que a faixa dinâmica disponível seja $\{0, 1, \dots, 4\}$ e que $r_p = 10$ e $J = 2$,

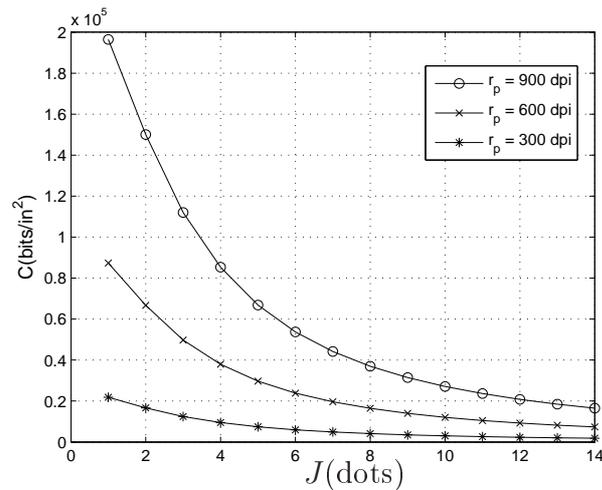


Figura 5.3: Limite superior na taxa de transmissão atingível.

como ilustrado na Figura 5.4. Nesta figura, $(r_p/J)^2 = 25$ células de *halftone* por polegada quadrada. Supondo que a matriz de *halftone* D_H contém os coeficientes mostrados na Figura 5.5, cada célula de *halftone* pode assumir $J^2 + 1 = 5$ valores distintos. Se um limite ϵ_{max} para a faixa dinâmica não é considerado, e se cada célula de *halftone* é assumida como um símbolo 2-D, $(r_p/J)^2 \cdot \log_2(J^2 + 1) = 25 \cdot \log_2 5$ bits por polegada quadrada podem ser transmitidos. No entanto, impondo um limite $\epsilon_{max} = 1$ (linhas pontuadas na Figura 5.5) na energia do sinal devido ao requerimento de transparência perceptual, a taxa de transmissão alcançável é reduzida para

$$\begin{aligned}
 C &= (r_p/J)^2 \cdot \log_2 \left(\frac{\epsilon_{max}}{\Lambda} J^2 + 1 \right) \\
 &= (10/2)^2 \cdot \log_2 \left(\frac{1}{4} 2^2 + 1 \right) \\
 &= 25,
 \end{aligned} \tag{5.4}$$

em que C é expresso em bits por polegada quadrada.

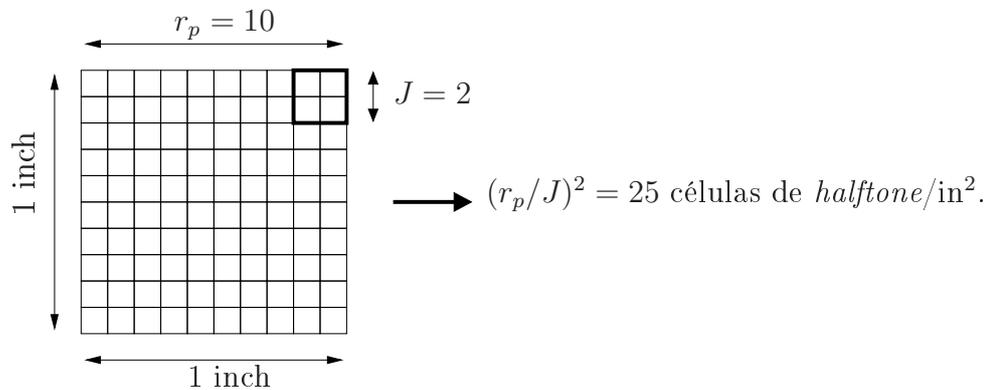


Figura 5.4

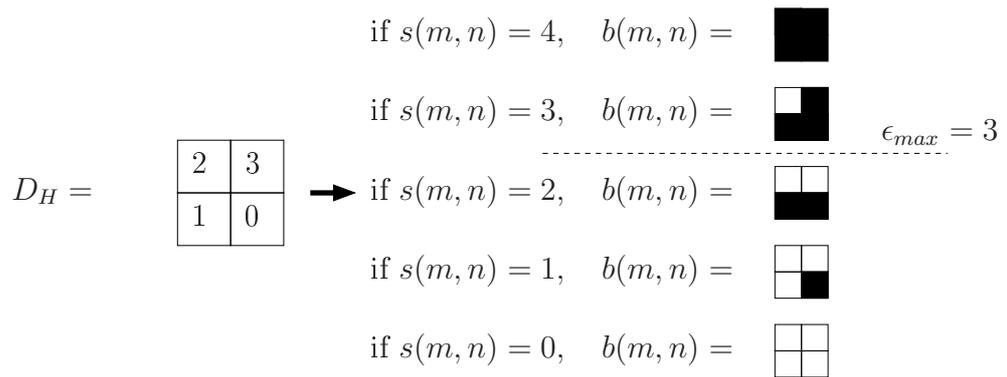


Figura 5.5

Na prática, as distorções causadas pelo canal PS incluem filtragem passa-baixas, quantização, adição de ruído e distorções geométricas, reduzindo consideravelmente a capacidade de inserção. Considerando estas distorções, uma implementação prática e robusta de TLM é considerada na próxima seção.

5.1.3 Implementação Prática

No método proposto, cada elemento (caractere ou símbolo) no documento digital original é rotulado como c_i , com $i = 1, 2, \dots, K$, em que K é o número total de elementos. Os elementos são rotulados da esquerda para a direita, e de cima para baixo. Um exemplo de rotulação de elementos é dado na Figura 5.6, em que $K = 16$. Para inserir a marca d'água, um simples ganho de luminância é adicionado aos elementos de texto individuais (caractere, símbolo, linhas, etc).

A informação é inserida por uma alteração individual na luminância de c_i através da função de inserção, de forma que todos os pixels em cada elemento têm a suas luminâncias alteradas do preto para qualquer valor no alfabeto discreto $\Omega = \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_S\}$ de cardinalidade S , sendo que cada símbolo representa $\log_2 S$ bits. Considerando um sistema espacial de coordenadas para cada elemento, c_i é modulado por um ganho w_i , $w_i \in \Omega$. Trabalhando com a luminância do elemento c_i na faixa $\{0, 1\}$ e $w_i \in [0, 1]$, a função genérica de inserção é dada por:

$$s_i(m, n) = w_i c_i(m, n), \quad (5.5)$$

em que s_i é o elemento modificado. A taxa de inserção de TLM com esta implementação específica é expressa em $\log_2 S$ bits/elemento. O processo é ilustrado na Figura 5.6 para $S = 2$ com um ganho muito alto. Em contraste com o que é ilustrado nessa figura, o ganho de luminância é geralmente escolhido de forma a causar um baixo impacto perceptual, tal que $E\{[c(m, n) - s(m, n)]^2\} \leq \epsilon_{max}^2$.

O documento impresso contém uma seqüência de bits imperceptível, possível-



Figura 5.6: Modulação na luminância com um ganho muito alto.

mente encriptada e com codificação de canal. O decodificador “escaneia” o documento usando resolução r_s e os caracteres são segmentados do fundo. Mais uma vez, cada caractere é etiquetado como c_1, c_2, \dots, c_K , em que K é o número de caracteres no texto. Quando o papel é colocado no “escaner” de modo apropriado, uma pequena rotação introduzida pelo processo de “escaneamento” não compromete o processo de rotulamento dos caracteres. As estatísticas de detecção descritas no capítulo seguinte são empregadas para decodificar o símbolo inserido em cada elemento c_i .

Ao contrário dos códigos de barras 2-D [62] ou da equação (5.3), os quais têm a capacidade de inserção expressa em bits/in², a capacidade do sistema com esta implementação específica depende do tamanho dos elementos e é expressa em bits/caractere.

5.1.4 Limiarização

O estágio inicial de *qualquer* algoritmo de marca d’água em texto é o processo de segmentação, em que os caracteres do documento impresso e “escaneado” são separados do fundo pelo uso de uma função de limiarização. Caso não seja projetada de forma adequada, a limiarização pode ser uma importante fonte de erro, especialmente para o algoritmos tipo *pixel flipping* apresentados na Seção 3.3.2. No caso do TLM, em que a mensagem inserida é transmitida caractere a caractere, uma segmentação defeituosa pode também resultar em uma mensagem mal decodificada. A qualidade da segmentação é afetada pelo espaçamento, tamanho e estilo da fonte do caractere. É uma tarefa mais simples separar do fundo os caracteres em **SIGNAL PROCESSING** do que em *SIGNAL PROCESSING*, após ambos terem sido impressos e “escaneados”. No entanto, quando se trabalha com documentos de escritório, por exemplo, análises experimentais indicam que a segmentação não é a principal causa de erro do algoritmo TLM, visto que esse não se baseia em modificações de pequenas regiões ou pontos individuais para decodificar a mensagem.

Diversos algoritmos de segmentação de texto foram propostos na literatura. A elaboração de técnicas de segmentação específicas para TLM é um assunto para

estudo futuro. Neste trabalho, uma simples limiarização global para a segmentação é utilizada, de acordo com a seguinte função:

$$s(m, n) = \begin{cases} 0 & \text{se } s(m, n) < T \\ s(m, n) & \text{se } s(m, n) \geq T \end{cases} \quad (5.6)$$

O limiar T é selecionado manualmente e um valor adequado foi determinado por meio de uma análise experimental. O método de Otsu [69] também foi testado, o qual escolhe um limiar global que minimiza a variância intra-classe dos pixels pretos e brancos. No entanto, esse método foi desenvolvido para imagens em tons de cinza, e no caso de texto, ele traz resultados similares àqueles provenientes de uma limiarização através de um limiar selecionado manualmente. A seguir, o processo de seleção do limiar e dos efeitos de uma segmentação defeituosa são ilustrados.

Considere o texto ‘Level 0’, na fonte tipo Times, originalmente em tamanho 11. O texto foi impresso em 300 dpi e “escaneado” em 300 ppi, resultando na imagem apresentada na Figura 5.7. Através da variação no threshold T na imagem (T pertence à faixa 0-255), as imagens segmentadas apresentadas na Figura 5.8 são obtidas. Deve-se notar que a imagem negativa é apresentada para visualização no papel.



Figura 5.7: Exemplo de texto “escaneado” em 300 ppi.

Observando-se as imagens na Figura 5.8, é possível notar que um T pequeno separa um único caracter em mais de um elemento, especialmente em regiões formadas por linhas finas. Por outro lado, um alto limiar unifica caracteres distintos e cria elementos defeituosos. Um valor de limiar adequado é $T = 130$, o qual é o valor usado para limiarização nos experimentos do Capítulo 9.

5.2 Conclusões

Este capítulo propôs e discutiu o TLM, o método de marca d’água para documentos impressos no qual esta tese é baseada. Assuntos como capacidade de inserção e limiar foram abordados. O próximo capítulo foca em métricas de detecção eficientes para TLM, considerando as distorções no canal PS.

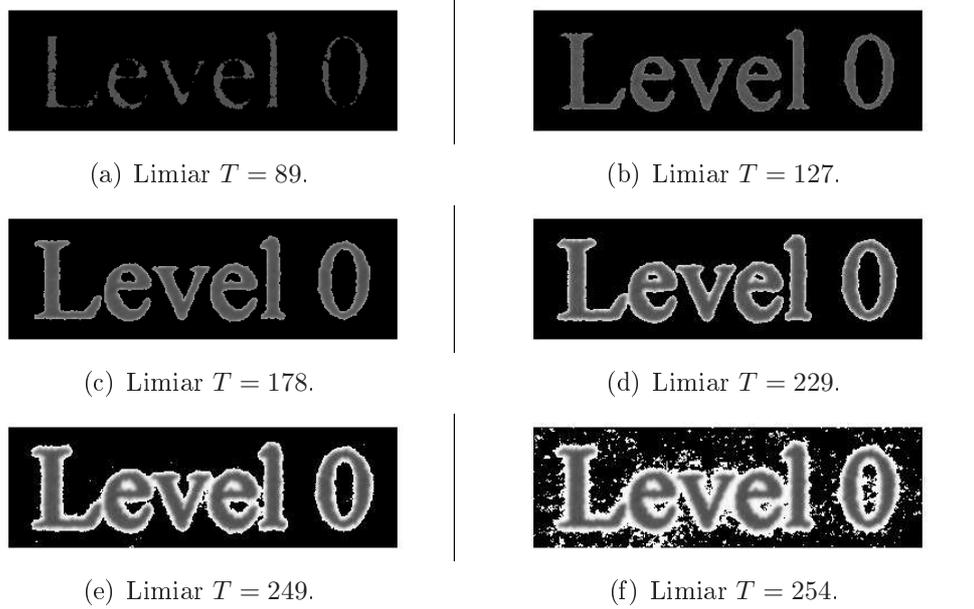


Figura 5.8: Efeito visual da variação do limiar de segmentação do texto.

Capítulo 6

MÉTRICAS PARA DETECÇÃO

Neste capítulo discutem-se diversas métricas de detecção que podem ser usadas para determinar o símbolo contido em um elemento c_i . Intuitivamente, a técnica de detecção mais simples é a avaliação da luminância média do caractere, por ser a luminância a característica alterada. Contudo, quando no processo de impressão são usados algoritmos de *halftone*, a detecção pode ser estendida através da observação de que os momentos estatísticos de segunda, terceira e quarta ordens para o símbolo também se modificam conforme o nível de luminância. Além disso, é mostrado que uma análise espectral das características do caractere recebido também se constitui em uma técnica de detecção eficiente.

Também é apresentada uma análise exaustiva das relações entre a luminância modulada e os momentos estatísticos de ordens superiores de uma região impressa e “escaneada”. Essa análise sustenta a aplicabilidade e justifica a utilização da métrica proposta. Para o primeiro e segundo momentos também foi realizada uma análise de probabilidade de erro.

A seguir, considera-se a combinação das técnicas de detecção em uma única métrica, em lugar de usá-las separadamente. As métricas respectivas são combinadas de acordo com o classificador de Bayes, que fornece a mínima probabilidade de erro médio. Esse procedimento não afeta o processo original de inserção e melhora de forma significativa o desempenho da detecção, tal como indicado pelas análises e experimentos efetuados. Usando essa estratégia torna-se possível refinar o desempenho da detecção pela inclusão de outras métricas que não foram aqui examinadas.

Antes de apresentar as métricas de detecção, julgou-se conveniente acrescentar nesta seção do trabalho alguns comentários acerca de distorções e de premissas estatísticas assumidas para o canal PS.

6.1 Suposições Estatísticas para as Distorções

Considere um mapeamento das coordenadas de posição (m, n) para um notação unidimensional dada por (n) , que indica a posição em uma representação lexicográfica dos pixels do caractere. Por exemplo, o caractere $s(m, n)$ será representado por $s(n)$. A partir dos resultados alcançados no Capítulo 4, a relação de entrada/saída do processo PS para o i -ésimo caractere no documento é descrita por

$$y_i(n) = g_s \left\{ \left\{ g_{pr}[s_i(n) + \eta_2(n)] + \eta_1(n) \right\} * h(n) \right\} + \eta_3(n). \quad (6.1)$$

Considere as seguintes observações a respeito do modelo PS em (6.1):

(i) As funções $g_{pr}(\cdot)$ e $g_s(\cdot)$ na equação acima representam os ganhos de impressão e “escaneamento,” respectivamente. Estes são dados por $g_{pr}(n) = \alpha(n)s(n)$, $g_s[x(n)] = x^\gamma(n)$, como já discutido na Seção 4.1.2. Quando se opera apenas em um pequeno intervalo da amplitude de pixel $[0,1]$, o parâmetro γ é próximo a 1, e $g_s(\cdot)$ pode ser simplificado para um modelo linear [37]. Esse é o caso em TLM, que usualmente opera somente na faixa de luminância $[(255 - 40)/L, 1]$ ($L = 255$), devido ao requisito de transparência perceptual da aplicação. Portanto, assume-se $\gamma = 1$ nas análises realizadas nesta seção. Observe que apesar desta simplificação retirar os ganhos não lineares do “escaner” do modelo, todos os outros efeitos desse dispositivos (ruídos, efeito passa-baixas, etc) são mantidos.

(ii) Relembrando, o termo $\alpha(n)$ em $g_{pr}(\cdot)$ representa um ganho (ver (4.6)) que varia ligeiramente ao longo de uma página inteira em razão da distribuição não uniforme do toner de impressão. Devido à sua baixa taxa de alteração, $\alpha(n)$ é modelado como constante em um dado elemento c_i , resultando em $\alpha(n) = \alpha_i$, que atua como um ganho variável de caractere para caractere. Em decorrência, α_i é assumido constante em n , mas variando em cada realização i , satisfazendo $\alpha \sim \mathcal{N}(\mu_\alpha^2, \sigma_\alpha^2)$.

(iii) Adicionalmente, o elemento i é modificado por um ganho de inclusão de marca d’água w_i , que é constante para o elemento inteiro, tal como descrito em (5.5), o que resulta em $s_i(n) = w_i$. Logo, o termo $g_{pr}[s_i(n) + \eta_2(n)]$ em (6.3) é escrito como $\alpha[w_i + \eta_2(n)]$.

(iv) Dada a natureza do ruído (discutido na Seção 4.1) e com base em observações experimentais, os termos η_1 e η_3 podem ser geralmente modelados como ruídos gaussianos independentes de média zero [37, 61, 62]. Com relação ao ruído η_2 , embora seja de média zero e possa ser considerado aproximadamente não correlacionado, este não é normalmente distribuído (ver Figura 4.5). No entanto, considerando o somatório das diversas distorções do canal, observa-se experimentalmente que a saída d_{M_i} do detector (definida em (6.2)) pode ser modelada como uma variável aleatória

normalmente distribuída [70] tendo por base o Teorema do Limite Central [71], com $d_M \sim \mathcal{N}(\mu_d, \sigma_d^2)$, em que d_M , μ_d e σ_d^2 dependem de w . Esta hipótese é ilustrada no Capítulo 9 por meio de experimentos.

6.2 Métricas de Detecção Estatísticas

6.2.1 Detecção pela Média Amostral

A métrica de detecção mais simples para determinar o símbolo contido em um elemento c_i é a luminância média do elemento, dada por (6.2). Sabe-se da teoria de detecção [71] que essa estatística de detecção é o detector Neyman-Pearson (NP) (o qual maximiza a probabilidade de detecção para um dada probabilidade de falso-alarme) quando detecta uma mudança no nível médio, o que vem a ser o embasamento da aplicação.

Mapeando-se as coordenadas (m, n) em uma notação unidimensional, a métrica de detecção d_{Mi} para o elemento i é dada por:

$$d_{Mi} = \frac{1}{N_i} \sum_{n=1}^{N_i} y_i(n), \quad (6.2)$$

em que N_i é o número de pixels no elemento i e $y_i(n)$ é a versão impressa e “escaneada” de $s_i(n)$, conforme o modelo PS descrito em (6.1). Com base no valor de d_{Mi} , é necessário decidir sobre a qual valor do alfabeto Ω corresponde o elemento i . Observe que se o alfabeto tem mais de dois elementos, aplica-se o risco de Bayes, e não o critério de NP [71]. Em razão do ruído do canal PS, a estatística de detecção é uma variável aleatória expressa por

$$d_{Mi} = \frac{1}{N_i} \sum_{n=1}^{N_i} g_s \left\{ \left\{ g_{pr} [s_i(n) + \eta_2(n)] + \eta_1(n) \right\} * h(n) \right\} + \eta_3(n). \quad (6.3)$$

Observe que para encontrar a probabilidade de erro na detecção, o valor esperado e a variância da distribuição de d_{Mi} devem ser determinados. Em nome da simplicidade, usa-se uma notação compacta na qual foi excluído de d_{Mi} o índice i e suas derivações. Assim sendo, o resultado apresentado nas equações abaixo indica a média para todos os i 's, e não apenas para um dado i .

O valor esperado de d_{Mi} em (6.3) é

$$\mu_{d_M} = E\{d_M\} = E \left\{ \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left\{ \alpha w + \alpha \eta_2(n) \eta_1(n) \right\} * h(n) + \eta_3(n) \right\}. \quad (6.4)$$

Relembrando que $\eta_1(n)$, $\eta_2(n)$ e $\eta_3(n)$ são variáveis aleatórias mutuamente independentes de média zero, e que $cte * h(n) = cte$ dado que $\sum_n h(n) = 1$ e que cte é uma constante, tem-se que o valor esperado de d_{M_i} em (6.3) é $\mu_{d_M} = E\{d_M\} = \mu_\alpha w$, em que μ_α é o valor esperado do ganho α .

A variância $\sigma_{d_M}^2$ da detecção é dada por:

$$\begin{aligned} \sigma_{d_M}^2 &= E\{(d_M - \mu_{d_M})^2\} \\ &= E\left\{\left(\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \{\alpha w + \alpha \eta_2(n) + \eta_1(n)\} * h(n) + \eta_3(n) - \mu_\alpha w\right)^2\right\}. \end{aligned} \quad (6.5)$$

Da hipótese de características estacionárias, de independência mútua e da média zero assumidas para $\eta_1(n)$, $\eta_2(n)$ e $\eta_3(n)$, os produtos cruzados $E\{\eta_k(n)\eta_l(n)\}$, $k \neq l$ são desconsiderados, e (6.5) resulta em:

$$\begin{aligned} \sigma_{d_M}^2 &= \frac{1}{N^2} \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^N E\{\alpha^2 [\eta_2(n) * h(n)] [\eta_2(m) * h(m)]\} \\ &\quad + \frac{1}{N^2} \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^N E\{[\eta_1(n) * h(n)] [\eta_1(m) * h(m)]\} \\ &\quad + \frac{1}{N^2} \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^N E\{\eta_3(n)\eta_3(m)\} + E\{[w(\alpha - \mu_\alpha)]^2\}. \end{aligned} \quad (6.6)$$

Seja $z_1(n) = \eta_1(n) * h(n)$ e $z_2(n) = \eta_2(n) * h(n)$, logo:

$$\begin{aligned} \sigma_{d_M}^2 &= \frac{1}{N^2} \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^N E\{\alpha^2 z_2(n) z_2(m)\} + \frac{1}{N^2} \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^N E\{z_1(n) z_1(m)\} + \frac{\sigma_{\eta_3}^2}{N} + w^2 \sigma_\alpha^2 \\ &= \frac{1}{N^2} \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^N R_{z_2}(m, n) (\sigma_\alpha^2 + \mu_\alpha^2) + \frac{1}{N^2} \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^N R_{z_1}(m, n) + \frac{\sigma_{\eta_3}^2}{N} + w^2 \sigma_\alpha^2 \end{aligned} \quad (6.7)$$

em que $R_{z_1}(m, n)$ e $R_{z_2}(m, n)$ são as funções de autocorrelação na saída do filtro passa-baixas, para os sinais de entrada η_1 e η_2 , respectivamente. Seja $R_{z_1}(m, n) = r_h(m, n) * r_{\eta_1}(m, n)$, pela observação das propriedades de saída de um sistema linear com entrada randômica [67], em que as variáveis r_{η_1} e r_h representam, respectivamente, as funções de autocorrelação de η_1 e da resposta de impulso de h . Logo,

$$\begin{aligned} \sigma_{d_M}^2 &= \frac{\sigma_\alpha^2 + \mu_\alpha^2}{N^2} \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^N r_h(m, n) * r_{\eta_2}(m, n) \\ &\quad + \frac{1}{N^2} \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^N r_h(m, n) * r_{\eta_1}(m, n) + \frac{\sigma_{\eta_3}^2}{N} + w^2 \sigma_\alpha^2. \end{aligned} \quad (6.8)$$

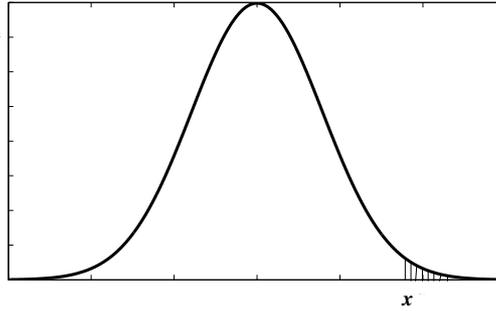


Figura 6.1: A área sombreada (x a $+\infty$) representa a probabilidade de erro dada por $\text{erfc}(x)$.

Como η_1 e η_2 são modelados como ruídos não correlacionados, $r_{\eta_1}(m, n)$ e $r_{\eta_2}(m, n)$ são representadas por um impulso na origem com amplitude $\sigma_{\eta_1}^2$ e $\sigma_{\eta_2}^2$, nesta ordem. Desde que $\sum_n h(n) = 1$, $\sum_{m,n} r_h(m, n) = 1$, e (6.8) torna-se

$$\sigma_{d_M}^2 = \frac{(\sigma_\alpha^2 + \mu_\alpha^2)\sigma_{\eta_2}^2 + \sigma_{\eta_1}^2 + \sigma_{\eta_3}^2}{N} + w^2\sigma_\alpha^2, \quad (6.9)$$

em que $\sigma_{\eta_2}^2 = (w - w^2)$, como apresentado em (4.18).

Considerando o caso $S = 2$ (ou 1 bit), por exemplo, a probabilidade condicional de erro p_{01} dado que o bit 1 foi transmitido é descrita por $p_{01} = \Pr(d_M > \lambda_M | \text{bit} = 1)$, onde λ_M é um limiar de decisão. Seja $\text{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^\infty e^{-t^2} dt$ a função de erro complementar, que representa a área sombreada sob a curva normal ilustrada na Figura 6.1. Assim, $p_{01} = \frac{1}{2} \text{erfc}\left(\frac{\lambda_M - \mu_{d_{M/1}}}{\sqrt{2\sigma_{d_{M/1}}^2}}\right)$, em que $\mu_{d_{M/1}}$ e $\sigma_{d_{M/1}}^2$ são respectivamente a média e a variância de d_M para o bit 1, como ilustrado na Figura 6.2. De modo equivalente, se o bit 0 é transmitido, a probabilidade condicional de erro é dada por $p_{10} = \frac{1}{2} \text{erfc}\left(\frac{\mu_{d_{M/0}} - \lambda_M}{\sqrt{2\sigma_{d_{M/0}}^2}}\right)$, em que $\mu_{d_{M/0}}$ e $\sigma_{d_{M/0}}^2$ são respectivamente a média e a variância d_M para o bit 0, também ilustrado na Figura 6.2. Finalmente, a probabilidade média de erro é expressa por

$$P_{e_{d_M}} = P_0 p_{10} + P_1 p_{01} \quad (6.10)$$

em que P_0 e P_1 são as probabilidades de ocorrência de bits 0 e 1, respectivamente.

6.2.2 Detecção pela Variância Amostral

Na seção anterior, a luminância média de cada elemento c_i foi usada como a métrica de detecção. Contudo, tirando-se proveito das características físicas do

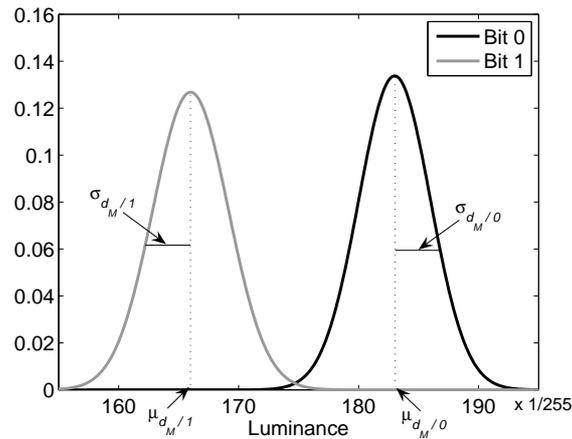


Figura 6.2: Típica distribuição da detecção baseada na luminância média.

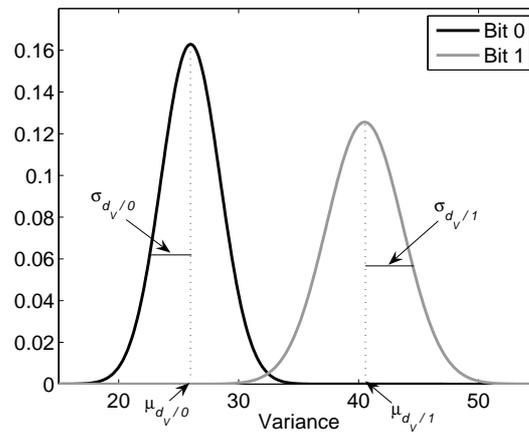


Figura 6.3: Típica distribuição da detecção baseada na variância.

canal PS, outras estatísticas do sinal recebido também podem ser empregadas no processo de detecção.

A Seção 3.2.2 descreve brevemente o algoritmo de *halftone* tipo *ordered dithering*. Quando texto binário comum é impresso (i.e. texto preto sobre fundo branco), *halftone* não é empregado, e todos os caracteres são impressos totalmente em preto. Porém, quando uma luminância em nível de cinza é acrescentada ao texto, os caracteres impressos são compostos por pontos pretos e brancos, o que aumenta a variância do caractere. A variância da saída isenta de ruído, tomada como função da luminância de entrada de um caractere com *halftone*, está ilustrada na Figura 4.6. Nesta Seção, as propriedades do *halftone* são usadas, tomando-se a variância do caractere c_i como uma métrica de detecção.

Está demonstrado em [71] que o detector NP para identificação de uma mudança brusca na variância do ruído Gaussiano é simplesmente a variância da amostra extraída da região observada. Mapeando-se as coordenadas (m, n) para uma notação

unidimensional, considera-se a variância da amostra como uma nova métrica de detecção d_{V_i} para o elemento i , dada por:

$$d_{V_i} = \frac{1}{N_i} \sum_{n=1}^{N_i} [y_i(n) - \bar{y}_i]^2 \quad (6.11)$$

em que N_i é o número de pixels no elemento i e $y_i(n)$ é a versão impressa e “escaneada” de $s_i(n)$, de acordo com o modelo PS descrito em (6.1). Para encontrar a probabilidade de erro de bit quando a variância é usada como a métrica de detecção, é necessário estimar a forma e os parâmetros da função de densidade de probabilidade da variável aleatória d_V . Sabe-se de [71] que a soma de N variáveis aleatórias v_i normalmente distribuídas conforme $z = \sum_{i=1}^N v_i^2$ segue uma distribuição de probabilidade Chi-quadrado com N graus de liberdade. Analogamente, a métrica de detecção d_V em (6.11) também segue uma distribuição de probabilidade Chi-quadrado assumindo-se que y_i é aproximadamente normalmente distribuída. Nesta aplicação, contudo, N corresponde ao número de pixels no caractere “escaneado,” e é usualmente grande ($N \gg 100$), e d_V pode ser assumida como normalmente distribuída, pois a distribuição Chi-quadrado torna-se Gaussiana quando N passa a ser grande [71]. A seguir são apresentados o valor esperado e a variância de d_V .

No Apêndice A é mostrado que o valor esperado e a variância da métrica de detecção d_V em (6.11) são dados por

$$\mu_{d_V} = [(\mu_\alpha^2 + \sigma_\alpha^2)\sigma_{\eta_2}^2 + \sigma_{\eta_1}^2]r_h(0) + \sigma_{\eta_3}^2 \quad (6.12)$$

e

$$\begin{aligned} \sigma_{d_y}^2 = & \sigma_{\eta_2}^4 r_h^2(0) \left(2\sigma_\alpha^4 + 4\sigma_\alpha^2 \mu_\alpha^2 + \frac{2A}{N} \right) + \frac{2\sigma_{\eta_1}^4 r_h^2(0)}{N} + \frac{2\sigma_{\eta_3}^4}{N} \\ & + \frac{4}{N} \left(B\sigma_{\eta_2}^2 \sigma_{\eta_1}^2 r_h^2(0) + B\sigma_{\eta_2}^2 \sigma_{\eta_3}^2 r_h(0) + \sigma_{\eta_1}^2 \sigma_{\eta_3}^2 r_h(0) \right) \end{aligned} \quad (6.13)$$

respectivamente, em que $A = 3\sigma_\alpha^4 + 6\sigma_\alpha^2 \mu_\alpha^2 + \mu_\alpha^4$ e $B = \sigma_\alpha^2 + \mu_\alpha^2$. Na prática, quando o “escaneamento” é feito com alta resolução, N é muito grande e α e o ruído de *halftone* η_2 são as fontes predominantes de ruído. Neste caso, (6.13) pode ser aproximada para

$$\sigma_{d_y}^2 = \sigma_{\eta_2}^4 r_h^2(0) (2\sigma_\alpha^4 + 4\sigma_\alpha^2 \mu_\alpha^2) \quad (6.14)$$

Usando d_V , a probabilidade condicional do erro p_{01} é dada por $p_{01} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{\mu_{d_V/1} - \lambda_V}{\sqrt{2\sigma_{d_V/1}^2}} \right)$ em que $\mu_{d_V/1}$ e $\sigma_{d_V/1}^2$ são o valor esperado e a variância, respectivamente, de d_V quando o bit 1 é transmitido, como ilustrado na Figura 6.3.

Similarmente, $p_{10} = \frac{1}{2}\text{erfc}\left(\frac{\lambda_V - \mu_{d_V/0}}{\sqrt{2\sigma_{d_V/0}^2}}\right)$. A probabilidade média do erro é expressa por

$$P_{e_{d_V}} = P_0 p_{10} + P_1 p_{01} \quad (6.15)$$

Os experimentos constantes do Capítulo 9 apresentam os resultados do emprego de d_V como uma métrica de detecção.

6.3 Detecção Usando Momentos Estatísticos de Ordem Elevada

Tal como a variância, momentos estatísticos de ordens elevadas podem também ser usados para detectar diferentes símbolos. Uma aproximação do efeito do canal PS assumido sobre esses momentos é descrito na seqüência. Observe que é assumido que estes momentos também tendem para variáveis Gaussianas, assim como assumido na seção anterior.

6.3.1 Skewness Amostral

O valor esperado da *skewness* de um símbolo y “escaneado” é dado por

$$\begin{aligned} \mu_{\gamma_{1y}} &= E\left\{\frac{1}{\sigma_y^3 N} \sum_{n=1}^N [\alpha w + \alpha \eta_2(n) * h(n) + \eta_1(n) * h(n) + \eta_3(n) - \bar{y}]^3\right\} \\ &= \frac{1}{\sigma_y^3 N} \sum_{n=1}^N E\{[\alpha \eta_2(n) * h(n) + \eta_1(n) * h(n) + \eta_3(n)]^3\} \end{aligned} \quad (6.16)$$

Recordando que η_1 , η_2 and η_3 são variáveis aleatórias mutuamente independentes de média zero, e que os momentos de ordem ímpar dessas variáveis quando identicamente distribuídas também são zero, (6.16) passa a ser

$$\mu_{\gamma_{1y}} = \frac{1}{\sigma_y^3} E\{\alpha^3\} E\{[\eta_2(n) * h(n)]^3\} \quad (6.17)$$

No Apêndice B encontra-se a derivação do termo $E\{[\eta_2(n) * h(n)]^3\}$ da equação acima, resultando

$$\mu_{\gamma_{1y}} = \frac{1}{(\sigma_y^2)^{3/2}} (3\sigma_\alpha^2 \mu_\alpha + \mu_\alpha^3) [(1-w)(-w)^3 + (1-w)^3 w] h_3 \quad (6.18)$$

em que σ_y^2 é descrito por (6.12) e h_3 é dado por:

$$h_3 = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \sum_{l=-\infty}^{\infty} \sum_{r=-\infty}^{\infty} h(k)h(l)h(r) \quad (6.19)$$

6.3.2 Curtose Amostral

O valor esperado da curtose de um símbolo “escaneado” é expresso por

$$\begin{aligned} \mu_{\gamma_{2y}} &= E \left\{ \frac{1}{\sigma_y^4 N} \sum_{n=1}^N [\alpha w + \alpha \eta_2(n) * h(n) + \eta_1(n) * h(n) + \eta_3(n) - \bar{y}]^4 \right\} \\ &= \frac{1}{\sigma_y^4 N} \sum_{n=1}^N E \{ [\alpha \eta_2(n) * h(n) + \eta_1(n) * h(n) + \eta_3(n)]^4 \} \\ &= \frac{1}{\sigma_y^4 N} \sum_{n=1}^N E \{ \alpha^4 [\eta_2(n) * h(n)]^4 \} + 6E \{ \alpha^2 [\eta_2(n) * h(n)]^2 [\eta_1(n) * h(n)]^2 \} \\ &\quad + 2E \{ \alpha^2 [\eta_2(n) * h(n)]^2 \eta_3^2(n) \} + E \{ [\eta_1(n) * h(n)]^4 \} \\ &\quad + 6 \{ [\eta_1(n) * h(n)]^2 \eta_3^2(n) \} + E \{ \eta_3^4(n) \} \end{aligned} \quad (6.20)$$

No Apêndice C encontra-se a derivação do termo $E \{ [\eta_2(n) * h(n)]^4 \}$ da equação acima, conduzindo a

$$\begin{aligned} \mu_{\gamma_{2y}} &= \frac{1}{\sigma_y^4 N} \left((3\sigma_\alpha^4 + 6\sigma_\alpha^2 \mu_\alpha^2 + \mu_\alpha^4) [(1-w)(-w)^4 + (1-w)^4 w] h_4 + 6(\sigma_\alpha^2 + \mu_\alpha^2) \sigma_{\eta_1}^2 \sigma_{\eta_2}^2 r_h^2(0) \right. \\ &\quad \left. + 6(\sigma_\alpha^2 + \mu_\alpha^2) \sigma_{\eta_2}^2 \sigma_{\eta_3}^2 r_h(0) + 3\sigma_{\eta_1}^4 r_h^2(0) + 6\sigma_{\eta_1}^2 \sigma_{\eta_3}^2 r_h(0) + 3\sigma_{\eta_3}^4 \right) \end{aligned} \quad (6.21)$$

em que h_4 é dado por:

$$h_4 = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \sum_{l=-\infty}^{\infty} \sum_{r=-\infty}^{\infty} \sum_{s=-\infty}^{\infty} h(k)h(l)h(r)h(s) \quad (6.22)$$

6.4 Detecção Espectral

Como discutido na Seção 3.2.2, os coeficientes na matriz de *half-tone* D_H têm um efeito direto na qualidade da imagem com *half-tone*. Duas estruturas de matrizes que são visualmente agradáveis são aquelas baseadas nos modelos de *half-toning* com ruído verde e com ruído azul [72, 73].

As denominações de cores para diferentes tipos de ruídos provém de uma analogia aproximada entre o espectro de freqüências presentes no ruído e o espectro equivalente das freqüências de ondas luminosas [70]. Sob essa interpretação, por exemplo, se o padrão de ‘ruído azul’ fosse traduzido para ondas luminosas, a cor da luz correspondente seria ‘azul’.

Dessa forma, modelos de ruído verde geram uma saída formada predominantemente de componentes de média freqüência. Modelos de ruído azul produzem uma saída com presença majoritária de componentes de alta freqüência. Neste trabalho, esses dois tipos de modelos de *halftoning* são utilizados em marcas d’água de texto.

Usando TLM, caracteres de texto têm suas luminâncias modificadas para carregar informação. A versão impressa de caracteres modificados podem ser *halftoned* com diferentes matrizes D_H . caracteres de luminâncias equivalentes que são impressos usando diferentes D_H 's apresentam aproximadamente a mesma luminância média após a impressão, porém as características espectrais são significativamente diferentes. Um exemplo do emprego de distintas matrizes de *halftone* é mostrado na Figura 6.4. Esse esquema é referido como *text halftone modulation* (THM).

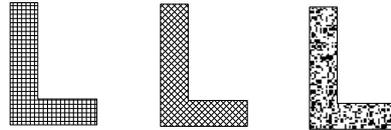


Figura 6.4: Ilustração exagerada de diferentes padrões de *halftone*.

Com o emprego dos fundamentos da teoria clássica de estimação espectral [74], uma possível métrica de detecção para classificar um caractere particular é implementada utilizando-se propriedades das sub-bandas espectrais. Para tal, a densidade espectral de potência (PSD) de um caractere e “escaneado” y de tamanho N é dividida em L sub-bandas de amplitude W , em que $W = N/L$. A potência média de cada uma dessas sub-bandas representa uma dentre L propriedades.

Seja a potência média da l -ésima sub-banda dada por

$$d_l = \frac{1}{W} \sum_{\omega=W(l-1)}^{lW-1} |Y(\omega)|^2 \quad (6.23)$$

em que $|Y_i(\omega)|^2 = Y_i(\omega)Y_i^*(\omega)$ representa o quadrado da PSD de $y(n)$, o operador

* denota o complexo conjugado e $Y(\omega)$ é

$$\begin{aligned} Y(\omega) &= \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=0}^{N-1} y(n) e^{-j2\pi n\omega/N} \\ &= \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=0}^{N-1} \left\{ \alpha[w + \eta_2(n)] + \eta_1(n) \right\} * h_{ps}(n) + \eta_3(n) \Big\} e^{-j2\pi n\omega/N} \end{aligned} \quad (6.24)$$

Para determinar a qual classe o vetor recebido y pertence, a potência média de cada sub-banda l é utilizada como propriedade de classificação. Portanto, o vetor de classificação é dado por

$$\mathbf{d} = [d_1 \quad d_2 \quad \dots \quad d_L]^\top \quad (6.25)$$

O valor esperado μ_{d_l} de uma propriedade d_l é escrito

$$\begin{aligned} \mu_{d_l} &= E\{d_l\} \\ &= E\left\{ \frac{1}{W} \sum_{\omega=W(l-1)}^{lW-1} |Y(\omega)|^2 \right\} \\ &= E\left\{ \frac{1}{W} \sum_{\omega=W(l-1)}^{lW-1} \frac{1}{(N^2)} \sum_{n=0}^{N-1} \left\{ \alpha w * h_{ps}(n) + \alpha \eta_2(n) * h_{ps}(n) \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \eta_1(n) * h_{ps}(n) + \eta_3(n) \right\} e^{-j2\pi n\omega/N} \sum_{m=0}^{N-1} \left\{ \alpha w * h_{ps}(n) \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \alpha \eta_2(n) * h_{ps}(n) + \eta_1(n) * h_{ps}(n) + \eta_3(n) \right\} e^{j2\pi n\omega/N} \right\} \end{aligned} \quad (6.26)$$

Considerando as características estatísticas (média zero, independência mútua) assumidas para os termos de ruído em (6.26), os termos cruzados ficam cancelados e o valor esperado em (6.26) passa a ser

$$\begin{aligned} \mu_{d_l} &= \frac{1}{W} \sum_{\omega=W(l-1)}^{lW-1} \alpha^2 w^2 H_{ps}(\omega) H_{ps}^*(\omega) \delta(\omega) / N \\ &\quad + \alpha^2 H_{ps}(\omega) H_{ps}^*(\omega) \sigma_{\eta_2}^2 + H_{ps}(\omega) H_{ps}^*(\omega) \sigma_{\eta_1}^2 + \sigma_{\eta_3}^2 \end{aligned} \quad (6.27)$$

em que $\delta(\cdot)$ é a função impulso unitário. Esta derivação está apresentada no Apêndice D. Similarmente, a análise estatística que consta do Apêndice D mostra que quando N é grande, a variância $\sigma_{d_l}^2 = E\{d_l^2\} - \mu_{d_l}^2$ de uma propriedade d_l pode

ser aproximada para:

$$\sigma_{d_l}^2 = \frac{1}{W^2} \sum_{\omega=W(l-1)}^{lW-1} \sum_{v=W(l-1)}^{lW-1} 3\sigma_{\eta_2}^4 (3\sigma_\alpha^4 + 6\sigma_\alpha^2 \mu_\alpha^2 + \mu_\alpha^4) \quad (6.28)$$

$$|H_{ps}(\omega)|^2 |H_{ps}(v)|^2 + 3\sigma_{\eta_1}^4 (\sigma_\alpha^2 + \mu_\alpha^2) |H_{ps}(\omega)|^2 |H_{ps}(v)|^2 + 3\sigma_{\eta_3}^4 - \mu_{d_l}^2$$

Assumindo que d_l seja normalmente distribuída, a partir de μ_{d_l} e de $\sigma_{d_l}^2$ as taxas teóricas de detecção são determinadas, as quais são apresentadas no capítulo de experimentos para comparação a resultados experimentais.

6.5 Combinando Diferentes Métricas

Esta seção propõe e discute melhorias através do uso no sistema de métricas de detecção adicionais, combinando os resultados dessas métricas para a obtenção de um novo critério de decisão. Esta abordagem recai no problema de classificação sob múltiplos critérios, onde cada elemento c_i deve ser classificado como pertencente a uma dentre S classes pela determinação de uma estimativa $\hat{\omega}$, $\hat{\omega} \in \Omega$.

Considere, por exemplo, duas das métricas já discutidas até aqui: a média d_M e a variância d_V . Não há uma relação determinística entre o nível de luminância (DC) e o nível da variância em um caractere impresso e “escaneado”. Assim, uma estratégia melhor do que usar separadamente a luminância média ou a variância amostral do elemento c_i como métricas de detecção, é promover a sua combinação em uma única nova estatística de decisão. Diversas técnicas [75, 33] podem ser usadas para agregar diferentes métricas, e este trabalho adota o Classificador de Bayes [33], um método clássico que produz o erro médio mínimo para padrões com distribuições Gaussianas.

Neste caso, em contraste com as equações (6.2) e (6.11), onde a decisão depende de um único valor, a decisão passa a ser baseada a partir do vetor

$$\mathbf{d}_i = \begin{bmatrix} d_{M_i} \\ d_{V_i} \end{bmatrix} \quad (6.29)$$

Conforme os resultados obtidos na Seção 6.2.1, a PDF da métrica de detecção d_M é descrita por:

$$p(d_M) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{d_M}^2}} \exp \left[-\frac{1}{2\sigma_{d_M}^2} (d_M - \mu_{d_M})^2 \right] \quad (6.30)$$

As PDF's condicionais de d_M dado que o bit 0 e o bit 1 tenham sido transmitidos

são expressas por

$$p(d_M/b = 0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{d_M/0}^2}} \exp\left[-\frac{1}{2\sigma_{d_M/0}^2}(d_M - \mu_{d_M/0})^2\right] \quad (6.31)$$

e

$$p(d_M/b = 1) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{d_M/1}^2}} \exp\left[-\frac{1}{2\sigma_{d_M/1}^2}(d_M - \mu_{d_M/1})^2\right] \quad (6.32)$$

respectivamente. Um gráfico com as funções de densidade de probabilidade condicional descritas pelas equações acima é mostrado na Figura 6.2. Os parâmetros usados para gerar esse gráfico constam do Capítulo 9. O desvio maior notado na curva mais à esquerda (bit 1), deve-se ao termo de ruído dependente do sinal, η_2 .

De modo equivalente, a partir dos resultados da Seção 6.2.2, onde a métrica de detecção empregada foi a variância (em (6.11)), a Figura 6.3 exprime as funções de densidade de probabilidade correspondentes. Os parâmetros usados para gerar esse gráfico foram idênticos àqueles da Figura 6.2, e similarmente àquela figura, o desvio maior notado na curva mais à direita (bit 1), provém do termo de ruído dependente do sinal, η_2 .

6.6 Conclusões

Neste Capítulo foram propostas e analisadas diversas métricas de detecção que podem ser utilizadas em TLM. No próximo Capítulo são apresentadas outras aplicações para TLM.

Capítulo 7

OUTRAS APLICAÇÕES

Este capítulo descreve outras aplicações usando a idéia fundamental de transmitir informação em papel através da modulação da luminância dos caracteres.

7.1 Códigos de Barra 2-D Multi-Nível

O estudo de códigos de barras multi-níveis 2-D [37, 62, 76] tem recebido crescente atenção nos últimos anos. Ao invés de representar informação apenas com símbolos pretos e brancos, os códigos de barra multi-níveis usam níveis de cinza para melhorar a taxa de símbolo, como ilustrado na Figura 7.1. Conseqüentemente, uma versão de maior capacidade dos códigos de barra 1-D é alcançada. Exemplos dessa utilização incluem representação de informação encriptada ou como um canal de verificação auxiliar. Diversas implementações do códigos de barras 2-D têm sido apresentadas na literatura e uma discussão a respeito de mais aplicações e aspectos relacionados a codificação/decodificação de códigos de barras 2-D pode ser encontrada em [37, 62, 76].

A detecção dos símbolos pode ser feita pela avaliação do segundo, terceiro e quarto momentos estatísticos do símbolo transmitido, além do nível médio de luminância. Similarmente ao TLM, a detecção da taxa de erro é reduzida pela união dos diferentes momentos em uma única métrica, de acordo com o classificador de Bayes. No Capítulo 9, experimentos ilustram a aplicabilidade da métrica de detecção proposta para o código de barras multi-níveis 2-D.

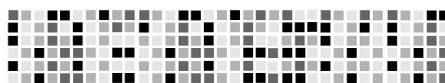


Figura 7.1: Ilustração do códigos de barra 2-D.

7.2 Protocolo Prático para Autenticação de Documentos

Esta seção propõe um inovativo sistema de autenticação de documentos, que pode ser aplicado para documentos eletrônicos e impressos. Além disso, o sistema proposto pode ser usado em conjunção com os métodos de autenticação tradicionais mencionados no Capítulo 1. O sistema é baseado em TLM e por isso pode ser ajustado para causar um impacto perceptual muito baixo. Diferente de uma assinatura digital, a qual protege o código binário dos documentos, o sistema proposto aqui protege o conteúdo visual. Em contraste com os esquemas de marca d'água digital que transmitem uma mensagem escondida, o sistema proposto classifica o documento como autêntico e não-autêntico. Uma implementação similar do sistema foi proposta em paralelo em [15]. Neste capítulo, no entanto, uma análise para a taxa de erro é apresentada, considerando os efeitos do canal PS.

Uma vantagem do sistema é que este não requer uma base de dados para guardar informação para ser comparada. Por esta razão, o sistema proposto é chamado de auto-autenticação de texto, ou *text self authentication* (TSA). Além disso, dispositivos de *hardware* especiais não são necessários, a não ser um “escaner” comum quando documentos impressos são considerados. Observe que TSA não se apóia em uma função específica para modificar cada caractere. Esta pode ser feita com baixo impacto perceptual usando técnicas de marca d'água de texto discutidas neste trabalho ou, visivelmente para aumentar a robustez do sistema.

Dois cenários de aplicação são considerados. No primeiro cenário, TSA é descrito num ambiente livre de ruído e a taxa de falso alarme (i.e., a probabilidade de assinar um documento autêntico como não-autêntico) é zero. No segundo cenário, é assumido que erros podem ocorrer na detecção do caractere modificado, principalmente devido ao ruído no processo de impressão e “escaneamento”. Nesse caso, um detector baseado em correlação é proposto e uma análise é feita para determinar a probabilidade de erro na detecção. Aplicações incluem passaportes, carteiras de motorista, carteiras de identificação e notas legais.

A estrutura do sistema de autenticação proposto encripta a representação binária do texto no documento original com uma chave que depende dessa representação. O vetor resultante é usado para criar um outro vetor de dimensão igual ao número de caracteres no documento. Isto é usado como uma regra para modular cada caractere individualmente, via TLM.

Existem na literatura abordagens relacionadas para a autenticação de imagens na qual a marca d'água digital é gerada com uma chave que é função de alguma característica f na imagem original, como discutido em [77, 78, 79], por exemplo.

Para evitar que f seja modificada pela inserção da marca d'água, frustrando assim o processo de detecção da marca, apenas características específicas da imagem precisam ser usadas. É possível, por exemplo, extrair propriedades dos componentes de baixa frequência e inserir a marca d'água apenas nos componentes de alta frequência, como discutido em [1].

Em contraste, no sistema de autenticação aqui proposto, as luminâncias dos caracteres modificados não alteram as propriedades usadas para gerar a chave, que são os próprios 'significados' dos caracteres. O sistema é descrito a seguir:

7.2.1 Codificação

- Seja o vetor $\mathbf{c} = [c_1, c_2, \dots, c_K]$ de tamanho K a representação de uma *string* de texto com K caracteres. Para a palavra 'azul', por exemplo, $K = 4$ e $c_1 = a, c_2 = z, c_3 = u, c_4 = l$.
- Seja o vetor $\mathbf{s} = [s_1, s_2, \dots, s_K]$ a representação das luminâncias dos caracteres $[c_1, c_2, \dots, c_K]$, respectivamente.
- Seja assumido que $c_i \in \Phi$ ($\Phi = \{a, b, c, \dots, X, Y, Z\}$, por exemplo), em que Φ tem cardinalidade $|\Phi|$. Assim, restringe-se a operação do sistema à caracteres que possam ser 'reconhecidos' via OCR.
- Seja c_{bi} a representação binária de c_i . Esta representação é utilizada para que o texto possa ser permutado, como será descrito na seqüência.
- Seja \mathbf{c}_b a representação binária de \mathbf{c} , em que \mathbf{c}_b tem tamanho $|\mathbf{c}_b| = K \log_2 |\Phi|$.
- Seja $\kappa = f(\mathbf{c}_b)$ uma função de \mathbf{c}_b . κ é usado como uma chave para gerar uma seqüência pseudo-aleatória (PRS) \mathbf{k} , tal que as PRS's são idealmente ortogonais para diferentes chaves κ . Esta é a chave que relaciona o próprio texto com a modulação nele inserida.
- Seja $\mathbf{c}'_b = \mathbf{c}_b \oplus \mathbf{k}$, em que \oplus representa a operação lógica "ou exclusivo" (XOR). Esta operação encripta a representação binária do texto de acordo com \mathbf{k} .
- Seja \mathcal{M} uma função que mapeia \mathbf{c}'_b , com $|\mathbf{c}'_b|$ bits, para outro vetor \mathbf{w} , com K bits. Este mapeamento serve apenas para reduzir o número de elementos em \mathbf{c}'_b para o número de caracteres no texto.

Visando oferecer segurança, \mathbf{w} é encriptado com uma chave privada de um sistema criptográfico público [70]. Sistemas criptográficos públicos usam duas chaves diferentes, uma para encriptação, κ_e , e outra para decifração, κ_d . A chave privada

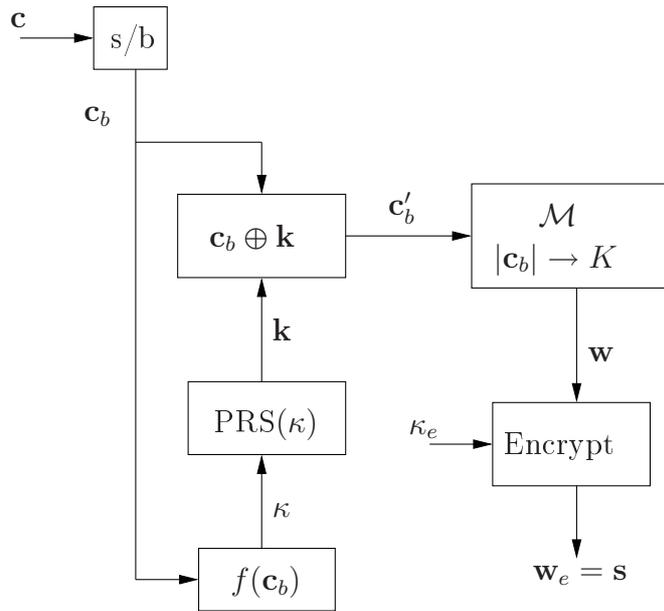


Figura 7.2: Diagrama do bloco de encriptação. O bloco ‘s/b’ representa conversão *string* de texto para representação binária. O bloco ‘ \mathcal{M} ’ representa um mapeamento de c'_b a partir de $|c_b|$ bits para K bits. O símbolo \oplus representa a operação XOR.

κ_e é disponível apenas para usuários autorizados a fazer o processo de autenticação. Por outro lado, qualquer pessoa pode ter acesso à chave pública κ_d para *apenas conferir* se o documento é autêntico, sem a permissão para gerar um novo documento autenticado.

Seja w_e a versão encriptada de w baseada na chave κ_e , através de um esquema de encriptação com chave pública tal como a RSA [70], por exemplo. Para autenticar os documentos de texto, o vetor s (o qual representa as luminâncias dos caracteres em um documento) é modificado de modo que $s = w_e$. Portanto, o documento é autenticado pelo ajuste da luminância de cada caractere c_i para s_i , via TLM.

7.2.2 Decodificação

No processo de verificação, reconhecimento automático de caracteres (*optical character recognition* - OCR) é aplicado ao documento nos casos impressos. Em adição, a luminância média de cada caractere é determinada, como ilustrado na Figura 7.3. Portanto, quando testando a autenticidade do documento, o usuário tem acesso a um \hat{c} recebido e a um \hat{s} recebido, em que \hat{c} e \hat{s} representam os vetores c e s recebidos, respectivamente.

Usando a chave pública κ_d , é possível decriptar $\hat{s} = \hat{w}_e$ para \hat{w} . Usando κ , é possível misturar \hat{c}_b (a representação binária de \hat{c}) de forma que \hat{c}'_b é obtido. Aplicando a mesma regra de mapeamento \mathcal{M} do processo de encriptação para \hat{c}'_b , um novo vetor \hat{w}' é obtido.

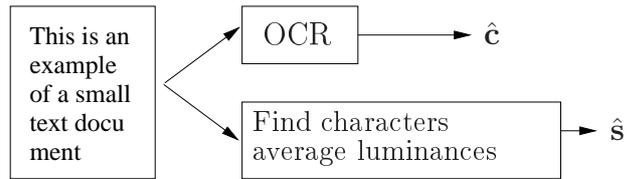


Figura 7.3: Extraíndo \hat{c} e \hat{w} do documento recebido.

Se $\hat{w}' = \hat{w}$ o documento é assumido autêntico. Caso contrário, é assumido que um ou mais caracteres foram alterados. O diagrama bloco do processo de teste da autenticação é dado na Figura 7.4.

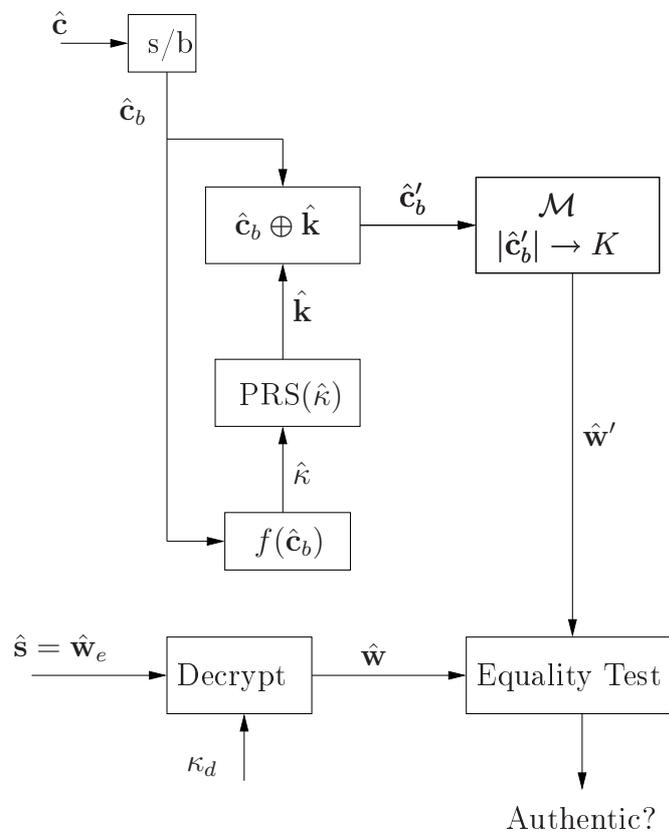


Figura 7.4: Diagrama de blocos da decodificação. O bloco ‘s/b’ representa a conversão string para binário. O bloco ‘ \mathcal{M} ’ representa o mapeamento de \hat{c}'_b com $|\hat{c}_b|$ bits para K bits. O símbolo \oplus representa a operação XOR.

Sabe-se que duas seqüências pseudo-aleatórias geradas a partir de sementes diferentes tendem à ortogonalidade quando o número de elementos nas seqüências tendem à infinito [80]. Assim, considerando um número grande K de caracteres em um documento, se um agressor muda um ou mais caracteres no documento tal que $\hat{c} \neq \mathbf{c}$, \hat{w} e \hat{w}' são duas seqüências completamente diferentes (quasi-ortogonais) com altíssima probabilidade, falhando o teste de autenticação.

Apesar de na descrição acima OCR ter sido incluído no processo de detecção assumindo que o documento foi impresso e “escaneado,” o protocolo de autenticação

proposto pode também ser aplicado para documentos digitais.

7.2.3 Ambiente com Ruído

O estágio final de TSA ilustrado na 7.4 faz um teste de igualdade para decidir se um documento é autêntico. No entanto, em ambientes ruidosos tal qual o canal PS, essa abordagem pode causar uma alta taxa de falso-alarme, ou seja, documentos podem ser erroneamente declarados não-autênticos.

Como discutido no Capítulo 6, testes indicam que o resultado da luminância média d_M (ou outras métricas apresentadas naquele capítulo) em TLM é aproximadamente normalmente distribuída. Assim, assume-se que $\hat{\mathbf{w}} = \mathbf{w} + \mathbf{n}$, em que \mathbf{n} é ruído aditivo Gaussiano branco (AWGN).

Portanto, ao invés do uso de um teste de igualdade, usa-se um detector baseado em correlação para checar a similaridade entre o $\hat{\mathbf{w}}$ esperado e o $\hat{\mathbf{w}}'$ recebido. Nesse caso, o documento é assumido como autêntico se o resultado da correlação linear T_a entre $\hat{\mathbf{w}}$ e $\hat{\mathbf{w}}'$ for maior que um dado limiar λ_a . A correlação linear é empregada visto que essa é a métrica ótima quando o canal pode ser modelado como AWGN [5].

Assim, no teste de correlação proposto o documento é assumido autêntico se

$$T_a = \text{Cor}(\hat{\mathbf{w}}, \hat{\mathbf{w}}') = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K \hat{w}_i \hat{w}'_i > \lambda_a \quad (7.1)$$

em que T_a é uma variável aleatória normalmente distribuída e \hat{w}_i e \hat{w}'_i , $i = 1, \dots, K$ são os elementos em $\hat{\mathbf{w}}$ e $\hat{\mathbf{w}}'$, respectivamente. Quando o documento é autêntico, o vetor $\hat{\mathbf{w}}'$ é dado por $\hat{\mathbf{w}}' = \hat{\mathbf{w}} + \mathbf{n}$. Quando o documento é modificado, espera-se que

$$\hat{\mathbf{w}} \perp \hat{\mathbf{w}}' \therefore E \left\{ \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K \hat{w}_i \hat{w}'_i \right\} = 0 \quad (7.2)$$

em que o operador \perp representa ortogonalidade estatística. Assumindo que \mathbf{n} e $\hat{\mathbf{w}}$ são distribuídos de acordo com $\mathbf{n} \sim \mathcal{N}(0, \sigma_n^2)$ e $\hat{\mathbf{w}} \sim \mathcal{N}(\mu_w, \sigma_w^2)$, o valor esperado em (7.1) é dado por

$$\begin{aligned} \mu_{T_a} &= E \left\{ \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K \hat{w}_i (\hat{w}_i + n_i) \right\} \\ &= \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K E\{\hat{w}_i^2\} + E\{\hat{w}_i n_i\} \\ &= \mu_w^2 + \sigma_w^2 \end{aligned} \quad (7.3)$$

A variância de (7.1) é dada por

$$\begin{aligned}
\sigma_{T_a}^2 &= E \left\{ \left(\frac{1}{K} \sum_{i=1}^K \hat{w}_i (\hat{w}_i + n_i) \right)^2 \right\} - \mu_{T_a}^2 \\
&= \frac{1}{K^2} \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^K E \{ (\hat{w}_i^2 + \hat{w}_i n_i) (\hat{w}_j^2 + \hat{w}_j n_j) \} - \mu_{T_a}^2 \\
&= \frac{1}{K^2} \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^K E \{ \hat{w}_i^2 \hat{w}_j^2 + \hat{w}_i^2 \hat{w}_j n_j + \hat{w}_i n_i \hat{w}_j^2 + \hat{w}_i n_i \hat{w}_j n_j \} - \mu_{T_a}^2 \\
&= \mu_w^4 + 2\mu_w^2 \sigma_w^2 + \sigma_w^4 + \frac{1}{K} (\mu_w^2 + \sigma_w^2) \sigma_n^2 - \mu_{T_a}^2 \\
&= \frac{(\mu_w^2 + \sigma_w^2) \sigma_n^2}{K}
\end{aligned} \tag{7.4}$$

A probabilidade de erro condicional p_0 dado que o documento é modificado é $p_0 = \Pr(T_a > \lambda_a | \text{tampered})$, em que λ_a é o limiar de decisão. Usando a função erro complementar erfc , $p_0 = \frac{1}{2} \text{erfc} \left(\frac{\lambda_a - \mu_{T_a/0}}{\sqrt{2\sigma_{T_a/0}^2}} \right)$, em que $\mu_{T_a/0}$ e $\sigma_{T_a/0}^2$ são respectivamente a média e a variância de T_a para documentos modificados. De forma equivalente, se o documento é autêntico, a probabilidade de erro condicional é dada por $p_1 = \frac{1}{2} \text{erfc} \left(\frac{\mu_{T_a/1} - \lambda}{\sqrt{2\sigma_{T_a/1}^2}} \right)$, em que $\mu_{T_a/1}$ e $\sigma_{T_a/1}^2$ são respectivamente a média e a variância de T_a para documentos autênticos. Finalmente, a probabilidade de erro média é expressa por

$$P_{eTSA} = P_0 p_0 + P_1 p_1 \tag{7.5}$$

em que P_1 e P_0 são as probabilidades de ocorrência de documentos autênticos e de documentos modificados, respectivamente.

No Capítulo 9 experimentos ilustram o método TSA e validam a análise de erro apresentada.

7.3 Codificação baseada em Posição

Esta seção introduz um esquema de codificação alternativo para TLM, o qual causa uma distorção reduzida no texto enquanto mantém a taxa de transmissão. O esquema é também aplicável para outros métodos baseados na modificação de caracteres individuais, como os discutidos no Capítulo 3.

7.3.1 Modulação Seqüencial

Uma característica que é comum a TLM e a todas as técnicas de marca d'água *hardcopy* descritas na Seção 3.3, é que a modificação dos caracteres (ou outras estruturas) são feitas em seqüência, de acordo com o bit a ser inserido. Observe que em TLM cada bit é codificado dentro dos caracteres de acordo com a ordem de aparição de cada caractere no documento. Por esta razão, este esquema é referido nesta seção como uma modulação seqüencial (SM), em oposição à codificação por posição (*position based coding* - PBC), proposta a seguir.

7.3.2 Codificação Posicional

Usando o método de codificação proposto, a informação é relacionada à posição do caractere modulado no documento. Um método relacionado, focado em imagens digitais, foi proposto em [81] e generalizado em [82], onde os autores inseriram informação na imagem através da adição de blocos pseudo-aleatórios em diferentes posições, de acordo com a informação.

Usando a codificação posicional, a informação a ser inserida é relacionada à posição de um dado número de caracteres modulados no documento. Considere um documento com K caracteres. Uma mensagem \mathbf{b} é inserida em um documento através da modulação Q de diferentes caracteres no texto, sendo que $Q < K$. Portanto, o conjunto de índices i que contém os caracteres modulados representa a informação inserida. Por exemplo, usando uma regra de codificação apropriada, uma seqüência de bits $\mathbf{b} = [11010]$ pode ser inserida em um texto:

POSITIONAL ENCODING

pela modulação de 2 caracteres ($Q = 2$) tal que o texto com marca d'água torna-se

POSITIONAL ENCODING

Um seqüência de bits diferente $\mathbf{b} = [01110]$ poderia ser representada por

POSITIONAL ENCODING

por exemplo. Uma regra de codificação eficiente mapeando “informação de entrada” \leftrightarrow “posições de saída” é descrita em [82]. Note que essa regra de codificação não usa um *codebook* pré-definido, o que necessitaria de altíssima complexidade computacional. Em vez disso, uma relação matemática entre entrada e saída é utilizada.

7.3.3 Distorção de PBC Versus SM

Na análise desta seção, assume-se que $S = 2$, representando o número de níveis de modulação. Seja R_P a capacidade de inserção em um documento usando PBC, representando o número de bits que podem ser inseridos. R_P depende de K e de Q , sendo dado por:

$$R_P = \log_2 \binom{K}{Q} \quad (7.6)$$

em que

$$\binom{K}{Q} = \frac{K!}{Q!(K-Q)!} \quad (7.7)$$

é o coeficiente binomial em análise combinatória [83]. A capacidade apresentada em (7.6) é ilustrada em função de K e Q na Figura 7.5, em que Q é interpretado como quantidade de distorção, ou seja, o grau de modificação entre um documento marcado e um original.

Em contraste, a capacidade de inserção usando SM é dada simplesmente em função de K , sendo representada

$$R_S = K \quad (7.8)$$

Buscando comparar as capacidades de inserção de PBC e de SM, (7.6) e (7.8) devem ser expressas em função dos mesmos parâmetros para o mesmo nível de distorção.

Seja Q o número de caracteres modificados. Seja a quantidade de distorção em um caractere representada por ϑ . Nesta seção, seja a distorção média causada pela inserção da mensagem em um documento representada por ε , dada por

$$\varepsilon = \frac{Q\vartheta}{K} \quad (7.9)$$

Por simplicidade, considere $\vartheta = 1$ pelo resto desta seção.

Apesar do fato da mensagem a ser inserida ser definida pelo usuário, considere \mathbf{b} (a mensagem a ser inserida) como sendo uma realização de um processo aleatório. Em PBC, Q é determinístico, independente da seqüência de bits \mathbf{b} . Em contraste, usando SM, a distorção depende da mensagem inserida. Por exemplo, a distorção causada por $\mathbf{b} = [111101]$ é mais forte do que a causada por $\mathbf{b} = [000010]$.

Assuma que o bit 0 e o bit 1 em \mathbf{b} ocorrem com probabilidades iguais, tal que

$$p_0 = p_1 = 0.5 \quad (7.10)$$

em que p_0 e p_1 são as probabilidades de ocorrência dos bits 0 e 1, respectivamente. Usando SM, p_0 e p_1 são traduzidos diretamente às probabilidades de ocorrência de caracteres modulados e não-modulados. Em um documento composto de K

caracteres, o número esperado de caracteres modulados (ou os caracteres ‘bit 1’) usando SM é

$$E\{Q\} = Kp_1 = 0.5K \therefore K = 2E\{Q\} \quad (7.11)$$

Visto que em PBC Q é determinístico, $E\{Q\} = Q$. Usando esse resultado, a substituição de (7.11) em (7.8) resulta em

$$R_S = 2Q \quad (7.12)$$

A Figura 7.6 mostra as capacidades de ambos os métodos, ilustrando um melhor desempenho do PBC, para $K = 200$. Essa figura mostra que se 20 em 200 caracteres no documento são modulados ($\varepsilon = 20/200 = 0.1$), por exemplo, PBC insere 90 bits enquanto que SM codifica apenas 40 bits.

Uma superfície correspondente à razão R_P/R_S é dada na Figura 7.7. Uma representação bi-dimensional dessa razão é mostrada na Figura 7.8, para $K = 200$.

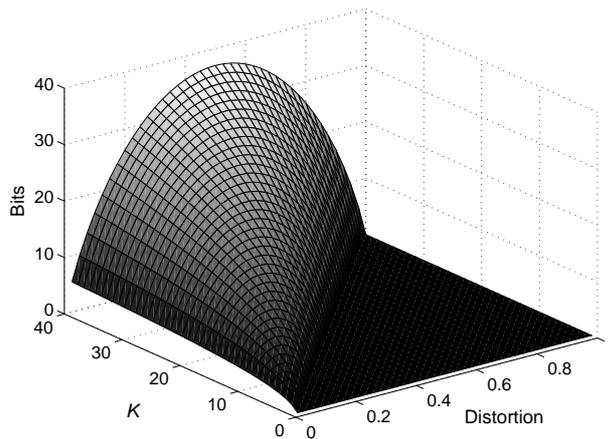


Figura 7.5: Capacidade do PBC em função de K e da distorção D .

7.3.4 Detecção

Considerando unicamente o domínio digital, em aplicações onde o documento não sofre modificações significativas, a taxa de erro de detecção é praticamente zero.

No entanto, como discutido nas seções anteriores, em aplicações de *hardcopy* o canal PS pode ser visto como um canal de comunicação ruidoso, causando diversas distorções à imagem, tais quais filtragem passa-baixas, ganhos não-lineares e ruídos aditivos.

Como discutido no Capítulo 6, a métrica de detecção mais simples para determinar a modulação inserida é a luminância média do caractere, dada em (7.13). Por

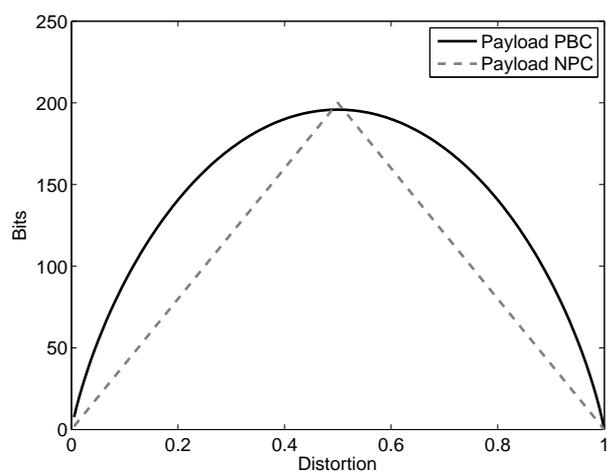


Figura 7.6: Capacidade em função da distorção D , para $K = 200$.

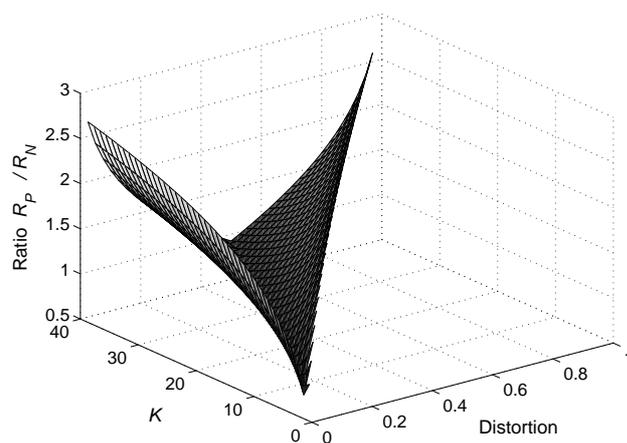


Figura 7.7: Razão R_P/R_S , em função da distorção D .

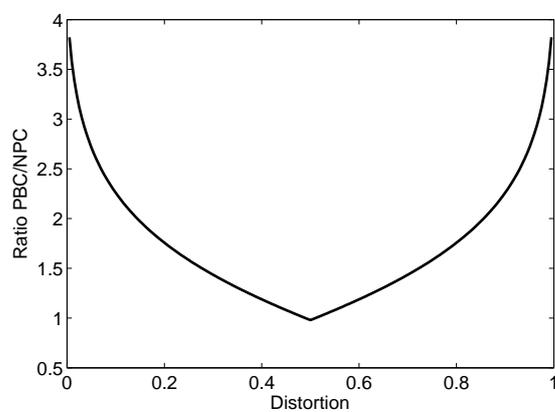


Figura 7.8: Razão R_P/R_S , em função da distorção D , para $K = 100$.

essa razão, essa métrica é usada nos exemplos desta seção.

Através do mapeamento das coordenadas (m, n) em (5.5) para uma notação unidimensional, a métrica de detecção d_{Mi} para o i -ésimo caractere é dada por:

$$d_{Mi} = \frac{1}{N_i} \sum_{n=1}^{N_i} y_i(n), \quad (7.13)$$

em que N_i é o número de pixels no caractere i e $y_i(n)$ é a versão impressa e “escaneada” de $s_i(n)$.

No caso $S = 2$, por exemplo, se a luminância média fica acima de um limiar λ_M (possivelmente determinada através de treinamento estatístico, para um dado canal PS), y_i é assumido como modulado (bit 1). Caso contrário, é assumido como não-modulado (bit 0).

Como discutido no Capítulo 6, em uma aplicação *hardcopy*, considerando-se a soma das diversas distorções no canal PS, observa-se experimentalmente que a saída do detector pode ser modelada como uma variável aleatória normalmente distribuída, como sustentado pelo teorema do limite central. Essa suposição é ilustrada na Figura 9.23, onde as distribuições das luminâncias médias dos caracteres impressos e “escaneados” (modulados e não-modulados) são apresentadas.

Com essas suposições, seja $d_{M/0}$ uma variável aleatória representando o resultado da detecção estatística para caracteres **não-modulados**, sendo distribuída de acordo com $d_{M/0} \sim \mathcal{N}(\mu_{d_{M/0}}, \sigma_{d_{M/0}}^2)$. Similarmente, seja $d_{M/1}$ a estatística de detecção correspondente a caracteres **modulados**, sendo que $d_{M/1} \sim \mathcal{N}(\mu_{d_{M/1}}, \sigma_{d_{M/1}}^2)$.

Devido ao canal ruidoso, uma desvantagem do PBC é que se o processo de detecção assume erroneamente um caractere y_i como modificado, a mensagem inserida é totalmente perdida. Em contraste, SM tem a vantagem de que os bits podem ser recuperados através de códigos de correção de erro, ao custo de uma redução na capacidade de inserção.

Para reduzir este problema em PBC, um esquema de detecção alternativo que não se baseia no limiar λ_M é empregado. Em lugar de se avaliar se a luminância média de y_i é maior ou menor que λ_M , os Q caracteres com as mais altas luminâncias médias são determinados. Isto causa uma redução significativa na taxa de erro, como mostrado a seguir.

Em PBC, apenas Q entre K caracteres são modulados. O detector seleciona como caracteres modulados apenas as Q localizações que oferecem os Q maiores valores de detecção. Portanto, para determinar a probabilidade de erro, a probabilidade de erroneamente assumir a presença de um caractere modulado em uma dada posição deve ser determinada.

A probabilidade p_e de que um caractere **não-modulado** apresente um valor de

detecção mais alto do que o de um caractere modulado deve ser determinada. No Apêndice F é mostrado que essa probabilidade é:

$$p_e = \Pr(d_{M/0} > d_{M/1}) \quad (7.14)$$

$$= \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{(\mu_{d_{M/0}} - \mu_{d_{M/1}}) \sigma_{d_{M/1}}}{(\sigma_{d_{M/0}}^2 + \sigma_{d_{M/1}}^2) \sqrt{2} \cos(\arctan \frac{\sigma_{d_{M/0}}}{\sigma_{d_{M/1}}})} \right) \quad (7.15)$$

Para o caso em que $\sigma_{d_{M/0}} = \sigma_{d_{M/1}}$, (7.15) é reduzida para

$$p_e = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{(\mu_{d_{M/0}} - \mu_{d_{M/1}}) \sigma_{d_{M/1}}}{2 \sigma_{d_{M/0}}} \right) \quad (7.16)$$

A equação (7.15) descreve a probabilidade de se detectar erroneamente um *único* caractere como modulado. A probabilidade de erro total deve levar em conta K detecções. Note que detectar erroneamente um único caractere resulta na perda total da mensagem. Com isso, considerando todos os caracteres no documento, a probabilidade de se encontrar a mensagem errada usando PBC é:

$$p_{PBC} = 1 - (1 - p_e)^{Q(K-Q)} \quad (7.17)$$

A derivação deste resultado é apresentada no Apêndice E.

Uma estimativa para os parâmetros $\mu_{d_{M/1}}$, $\mu_{d_{M/0}}$, $\sigma_{d_{M/1}}^2$, e $\sigma_{d_{M/0}}^2$ é dada no Capítulo 9.

Quando o ruído no canal é forte, o uso de uma modulação perceptualmente transparente causa uma taxa de erro muito alta. Para superar isso, o ganho da modulação pode ser elevado para um nível visível. No entanto, usando SM, testes empíricos indicam que isso causa um padrão perturbante na leitura do texto. Por outro lado, usando PBC, apenas Q caracteres são modificados. Apesar de a modulação ser visível, ela é localizada e não afeta de forma tão significativa a leitura do texto.

7.4 Segmentação de Documentos em Imagens Ruidosas

A análise de textura como uma característica de imagens encontra aplicação em diversas áreas de processamento de imagens. Na literatura, a textura é tradicionalmente usada em classificação de imagens, segmentação e síntese. Essa abordagem é útil quando objetos em uma imagem não podem ser caracterizados por propriedades estatísticas mais simples, como a luminância média, por exemplo, e

técnicas tradicionais de limiarização não funcionam adequadamente. Exemplos de aplicações práticas incluem análise de imagens aéreas/satélite, processamento de imagens médicas para a detecção de anormalidades e detecção de bordas.

Esta seção aborda o uso da textura nos caracteres dos documentos de texto. Neste caso, ao contrário dos exemplos dados acima, a textura é inserida intencionalmente na imagem. Como discutido exaustivamente ao longo deste trabalho, considerando o caso de documentos impressos, uma textura inevitável é criada quando algoritmos de halftone são usados. Portanto, baseando-se em resultados experimentais, pode-se argumentar que a impressão de texto em tons de cinza pode ser útil em um estágio de pós-segmentação de documentos. Isso se deve às características estatísticas de texto impresso com *halftone*, o qual tem variância, *skewness* e curtose características. O principal estágio de segmentação pode ser feito com qualquer algoritmo tradicional para esse fim [69, 84], e os elementos resultantes são analisados de acordo com as características estatísticas esperadas para o texto. Se esses elementos são potencialmente não-texto, eles são eliminados, refinando o resultado do processo. A técnica proposta é chamada de segmentação via estatística de ordem elevada (HOSS) neste trabalho.

Com base neste problema, esta seção propõe um pós-processamento após a segmentação principal, melhorando o resultado final. O objetivo desse pós-processamento é eliminar o ruído (elementos não-texto) para melhorar a qualidade do documento binário. Uma técnica comum para esse propósito é utilizar informação tipo *run-length* [85]. Esta seção propõe que os documentos sejam impressos em cinza escuro como descrito no método TLM, respeitando o requisito de transparência perceptual. O passo principal de segmentação não é afetado.

Suponha que, antes da impressão, um caractere seja modulado com um nível de luminância igual a 0.95, que é normalmente percebido com preto para o olho humano. Seja esse caractere modulado representado por c . Seja c' uma versão de c impressa em preto, isto é, com luminância igual a 1. Após o processo PS, as luminâncias médias de c e c' são bastante similares. No entanto, como indicado nas Figuras 9.4 e 9.5 no Capítulo 9, a *skewness* e a curtose c e c' são significativamente diferentes.

A segmentação de c e c' do fundo da imagem usando os algoritmos propostos em [69, 84] trazem resultados similares. Porém, os elementos segmentados podem ser adicionalmente analisados com relação às suas características estatísticas. Esta abordagem é similar àquela de algoritmos de segmentação tradicionais que usam estatísticas locais da imagem [86]. Aqui, se os elementos segmentados não apresentem a *skewness* e a curtose esperadas, eles são eliminados, possivelmente refinando a imagem segmentada. Neste trabalho os elementos segmentados são classificados

como estrutura de texto ou não-texto de acordo com o classificador de Bayes. Este sistema reduz erros de segmentação devido a marcas de dobras, borrões e sujeira que não apresentam as estatísticas esperadas para o texto. Os experimentos no Capítulo 9 ilustram a aplicabilidade do método.

7.5 Conclusões

Este capítulo apresentou diferentes aplicações e implementações para TLM. Destaca-se um protocolo para a autenticação de documentos e eficiente segmentação de documentos texto. Além disso, foi sugerido que as métricas de detecção apresentadas no Capítulo 6 também podem ser aplicadas a códigos de barra 2-D, melhorando de forma significativa o desempenho desses sistemas.

O próximo capítulo explora o uso da cor em documento de texto, estendendo o conceito de “modulação na luminância do texto” para “modulação na cor do texto,” discutindo as suas vantagens e possíveis implementações.

Capítulo 8

O USO DA COR

Este capítulo estende o conceito de TLM usando a cor de um caractere como uma característica modificável. A idéia de modulação de cor em texto (*text color modulation* - TCM) como um método de autenticação de texto é discutida em [60] e [14]. Este capítulo apresenta uma métrica de detecção e uma análise determinando a taxa de detecção do erro em TCM, considerando o modelo de canal PS assumido. Além disso, um modelo de impacto perceptual é empregado para avaliar a diferença perceptual entre um caractere modificado e um não-modificado. Combinando esse modelo perceptual e os resultados da análise de detecção do erro, é possível determinar os valores ótimos para a modulação da cor. Baseado no conceito de TCM, este capítulo traz as seguintes contribuições:

(i) A motivação e os benefícios de TCM sobre outros métodos de modulação de texto são explicados.

(ii) Considerando o modelo do canal de PS, uma métrica de detecção para TCM é proposta, a qual combina informação de diferentes canais de cores. Para essa métrica, uma análise para estimar a taxa de erro teórica é apresentada. O limite de Bhattacharyya [87] é usado para determinar a probabilidade de erro quando a informação dos canais azul e vermelho são combinadas.

(iii) Usando o modelo perceptual de cores CIE L^*a^*b [88], uma função de diferença perceptual é usada para determinar o impacto perceptual da modulação em cada canal de cor, considerando tanto a modulação em apenas um canal quanto combinando os canais.

(iv) Usando os resultados da análise de erro e do impacto perceptual, um nível ótimo para a modulação é alcançado, considerando um compromisso entre a taxa de erro e o impacto perceptual.

(v) Em processos de impressão colorida, cada canal de cor é impresso com um dado ângulo de orientação para minimizar a interferência entre os canais de cores [36]. Isso é explorado neste trabalho, visto que a detecção do ângulo dominante em

cada caractere também é usada para ajudar a identificar o tipo de modulação de cor empregada, reduzindo a taxa de erro na detecção.

8.1 Motivação para o Uso da Cor

Um óbvio requisito adicional de TCM em comparação a TLM e THM, é que um aparelho de impressão colorido é necessário. No entanto, diversas aplicações requerem o uso de impressora colorida, como documentos de banco, notas legais, cartões de identificação, dentre outras, abrindo diversas oportunidades para o uso de TCM.

Diversas vantagens ligadas ao desempenho do sistema também motivam o uso de TCM. Em comparação à TLM, por exemplo, TCM apresenta uma taxa de erro de detecção mais baixa, para um dado impacto perceptual. Isso ocorre porque informações de diferentes canais de cores podem ser combinadas, reduzindo a taxa de erro. Além disso, apesar da resposta em frequência do sistema de visão humano (HVS) ter características passa-baixas tanto para a luminância quanto para a crominância, a sensibilidade espacial do olho humano para variações de crominância cai mais rápido em função do aumento da frequência espacial do que a resposta à variações espaciais na luminância [36]. Isso significa que o canal de crominância tem uma largura de banda mais estreita do que o canal de luminância. Isto é relevante porque impressoras usam *halftoning* [36], e portanto mais erro na crominância do que na luminância é aceitável. Objetivando desenvolver um algoritmo de *halftoning* de baixo erro perceptual, a possibilidade de aumentar a suavidade percebida através da troca de diferença no canal de luminância por diferença no canal de crominância foi apontada pela primeira vez em [89].

No Capítulo 6 extensões de TLM que exploram características do *halftoning* para melhorar a detecção foram propostas, tais quais THM e detecção via estatísticas de ordem elevada. Visto que impressoras coloridas também usam *halftoning*, esses métodos podem ser também estendidos para o caso de cores, oferecendo redução adicional da taxa de erro. Também é importante notar que outros métodos de autenticação de documentos tais como modulação de espaçamento de linha e posição do caractere [53, 54] também podem ser usados em paralelo com TCM.

8.2 Comentários sobre Impressão Colorida

O padrão de cores digital mais comum combina três canais de cores - vermelho, verde e azul (RGB) - para representar cores [33]. No entanto, devido ao fato de que a impressão é usualmente feita em superfície branca, é necessário que se inverta

cada uma destas separações. Quando uma imagem negativa do componente vermelho é produzida, a imagem resultante representa o componente ciano daquela imagem. Da mesma forma, negativos dos componentes verde e azul produzem separações magenta e amarelas, respectivamente.

Quando ciano, magenta e amarelo (*cyan, magenta and yellow* - CMY) são combinados no processo de impressão, o resultado deveria ser uma reprodução perceptualmente aceitável da imagem original. No entanto, na prática, devido às limitações dos pigmentos de tinta, as cores mais escuras usualmente apresentam um aparência borrada. Para reduzir esse efeito, uma separação preta também é criada, o que melhora a sombra e o contraste da imagem. Inúmeras técnicas existem para derivar esta separação preta a partir da imagem original, como por exemplo a substituição do componente cinza e adição de cores inferiores [90]. Esta técnica de impressão é referida ciano, magenta, amarelo e preto (CMYK), em que K é a abreviação para chave (*key*), que nesse caso é preto.

Apesar de CMYK ser usado no processo de impressão, depois que a imagem é “escaneada,” a conversão de volta para RGB é possível, idealmente recriando a representação RGB original, antes da impressão.

No caso da impressão colorida, o algoritmo de *halftoning* é aplicado para cada canal de cor separadamente, e o resultado é impresso no papel. Padrões indesejáveis como padrões de Moiré [38] podem surgir devido à interferência entre duas ou mais matrizes de *halftone* que representam cada um dos colorantes. Para reduzir esse feito, as matrizes de *halftone* são rotacionadas de forma a estarem com o maior ângulo de rotação possível entre elas. Uma solução típica é posicionar a matriz Y em 0° , M em 15° , K em 45° e C em 75° [36]. A Figura 8.1 mostra um padrão teste para *halftone*, extraído do jornal The Londoner'. Essa figura ilustra o ângulo de impressão usado na matriz de *halftoning* para os colorantes C, M, Y e K. Essa característica presente em muitos processos de impressão colorida é explorada nesta seção como uma métrica auxiliar para ajudar a melhorar a detecção em TCM, como discutido na seção 8.5.

8.2.1 Modelo Analítico para o Canal PS Colorido

Nesta seção, um modelo de canal PS colorido é discutido. O modelo descreve as distorções ocorridas em cada canal de cor e é simplesmente uma extensão do modelo descrito no Capítulo 4.

Para um dado canal de cor C , $C \in \{R, G, B\}$ (em que R , G e B correspondem aos canais vermelho, verde e azul, respectivamente) a imagem digital “escaneada” y é representada por

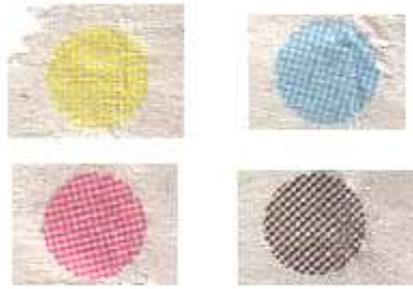


Figura 8.1: Exemplo de um padrão de teste para *halftoning*, ilustrando os colorantes C, M, Y e K.

$$y_C(m, n) = g_{s_C} \left\{ \left\{ g_{pr_C}[b_C(m, n)] + \eta_{1_C}(m, n) \right\} * h_{ps}(m, n) \right\} + \eta_{3_C}(m, n), \quad (8.1)$$

em que cada termo corresponde aos seus equivalentes descritos em (4.5).

Deve-se notar que o modelo em (8.1) descreve a relação de entrada-saída do canal PS colorido. Apesar do processo de impressão usar os colorantes C, M e Y adicionados ao colorante K para proporcionar um contraste e profundidade da cor apropriados, os sinais de entrada e saída do processo podem ser descritos em termos dos seus componentes RGB, conforme apresentado em (8.1).

8.3 O Processo de Detecção

Nesta secção uma métrica de detecção é proposta e uma análise da taxa de erro é apresentada. Suposições estatísticas e de distorções para a análise são discutidas na Seção 6.1. Buscando simplificação, o sistema de coordenadas (m, n) é mapeado para uma notação unidimensional, e o índice i é eliminado de c_i e suas variações. Assumindo que as mesmas suposições estatísticas e distorções discutidas na Seção 6.1 são válidas para o caso das cores, o modelo do canal PS se torna

$$y_C(n) = \left\{ \alpha_C[b_{0_C} + \eta_{2_C}(n)] + \eta_{1_C}(n) \right\} * h_{ps}(n) + \eta_{3_C}(n), \quad (8.2)$$

que é o modelo assumido para a análise da taxa de erro. É importante observar que aqui é assumido o caso em que os diferentes canais de cores são impressos sem que haja interferência entre eles.

8.3.1 Métrica de Detecção

Experimentos com o sistema de visão humana ilustram que variações no canal verde são percebidas mais facilmente do que variações nos canais vermelho e azul [91, 18]. Esta idéia é sustentada por experimentos apresentados neste trabalho. Por esta razão, um esquema de modulação que altera apenas os canais azul e vermelho é usado. O canal verde é usado como referência. Isso aumenta a robustez do método dado que variações de luminância e ganhos de “escaneamento” afetam todos os canais. Apesar de todos os canais não serem afetados da mesma forma, o uso de uma métrica baseada na diferença é mais robusto do que o uso de um simples limiar para o valor médio de um único canal. As Figuras 8.2 e 8.3 mostram os histogramas dos caracteres modulados apenas nos canais azul e vermelho, respectivamente. Assim, um caractere não modulado é totalmente preto e um caractere modulado tem seus componentes vermelho e azul modificados.

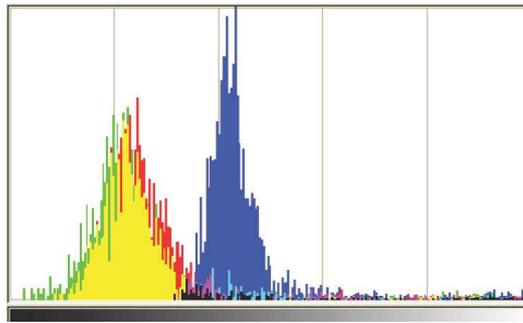


Figura 8.2: Exemplo de um histograma de três canais para um caractere modulado apenas no canal azul. O eixo horizontal representa a intensidade da cor (entre preto e branco).

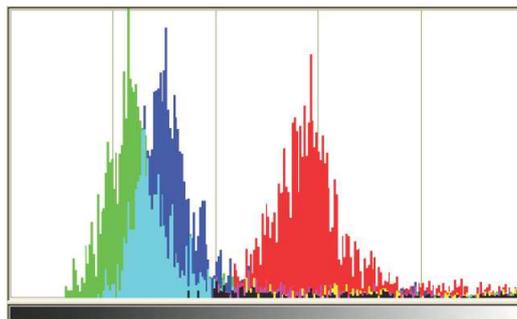


Figura 8.3: Exemplo de um histograma de três canais para um caractere modulado apenas no canal vermelho. O eixo horizontal representa a intensidade da cor (entre preto e branco).

Baseado nas características na impressão e “escaneamento” dos caracteres observados, a métrica de detecção proposta é dada por

$$\mathbf{d}_2 = [d_b \quad d_r]^\top \quad (8.3)$$

em que \top representa a operação de transposição e

$$d_b = d_B - d_G \quad (8.4)$$

em que

$$\begin{aligned} d_B &= \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N y_B(n) \\ &= \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \{ \alpha_B [w_B + \eta_{2B}(n)] + \eta_{1B}(n) \} * h_{ps}(n) + \eta_{3B}(n), \end{aligned} \quad (8.5)$$

representa o valor médio no canal azul depois da impressão e w_B representa o nível de modulação no canal azul antes da impressão, tal como $\bar{b}_B = w_B$. Similarmente, d_G representa o valor médio no canal verde.

O valor esperado da métrica de detecção d_b é dado por

$$\begin{aligned} \mu_{d_b} &= E\{d_b\} \\ &= E\{d_B - d_G\} \\ &= \mu_{\alpha_B} w_B - \mu_{\alpha_G} w_G \end{aligned} \quad (8.6)$$

A variância de d_b é dada por:

$$\begin{aligned} \sigma_{d_b}^2 &= E\{(d_b - \mu_{d_b})^2\} \\ &= E\left\{ \left(\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \{ \alpha_B [w_B + \eta_{2B}(n)] + \eta_{1B}(n) \} * h_{ps}(n) \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \eta_{3B}(n) - \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \{ \alpha_G [w_G + \eta_{2G}(n)] + \eta_{1G}(n) \} \right. \right. \\ &\quad \left. \left. * h_{ps}(n) - \eta_{3G}(n) - \mu_{\alpha_B} w_B + \mu_{\alpha_G} w_G \right)^2 \right\} \end{aligned} \quad (8.7)$$

Da suposição de independência mútua e de média zero para $\eta_1(n)$, $\eta_2(n)$ e $\eta_3(n)$, os produtos cruzados $E\{\eta_k(n)\eta_l(n)\}$, $k \neq l$ são desconsiderados, e a equação acima resulta em:

$$\begin{aligned}
\sigma_{d_b}^2 &= \frac{1}{N^2} \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^N E\{\alpha_B^2 [\eta_{2B}(n) * h(n)] [\eta_{2B}(m) * h(m)]\} \\
&+ \frac{1}{N^2} \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^N E\{[\eta_{1B}(n) * h(n)] [\eta_{1B}(m) * h(m)]\} \\
&+ \frac{1}{N^2} \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^N E\{\eta_{3B}(n) \eta_{3B}(m)\} \\
&+ \frac{1}{N^2} \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^N E\{\alpha_G^2 [\eta_{2G}(n) * h(n)] [\eta_{2G}(m) * h(m)]\} \\
&+ \frac{1}{N^2} \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^N E\{[\eta_{1G}(n) * h(n)] [\eta_{1G}(m) * h(m)]\} \\
&+ \frac{1}{N^2} \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^N E\{\eta_{3G}(n) \eta_{3G}(m)\} \\
&+ E\{[w_B(\alpha_B - \mu_{\alpha_B})]^2\} + E\{[w_G(\alpha_G - \mu_{\alpha_G})]^2\}.
\end{aligned} \tag{8.8}$$

Dado $z_{1B}(n) = \eta_{1B}(n) * h(n)$ e $z_{2B}(n) = \eta_{2B}(n) * h(n)$, então:

$$\begin{aligned}
\sigma_{d_b}^2 &= \frac{1}{N^2} \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^N E\{\alpha_B^2 z_{2B}(n) z_{2B}(m)\} + \frac{1}{N^2} \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^N E\{z_{1B}(n) z_{1B}(m)\} + \frac{\sigma_{\eta_{3B}}^2}{N} \\
&+ \frac{1}{N^2} \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^N E\{\alpha_G^2 z_{2G}(n) z_{2G}(m)\} + \frac{1}{N^2} \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^N E\{z_{1G}(n) z_{1G}(m)\} + \frac{\sigma_{\eta_{3G}}^2}{N} \\
&+ w_B^2 \sigma_{\alpha_B}^2 + w_G^2 \sigma_{\alpha_G}^2 \\
&= \frac{1}{N^2} \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^N R_{z_{2G}}(m, n) (\sigma_{\alpha_B}^2 + \mu_{\alpha_B}^2) + \frac{1}{N^2} \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^N R_{z_{1B}}(m, n) + \frac{\sigma_{\eta_{3B}}^2}{N} \\
&+ \frac{1}{N^2} \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^N R_{z_{2G}}(m, n) (\sigma_{\alpha_G}^2 + \mu_{\alpha_G}^2) + \frac{1}{N^2} \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^N R_{z_{1G}}(m, n) + \frac{\sigma_{\eta_{3G}}^2}{N} \\
&+ w_B^2 \sigma_{\alpha_B}^2 + w_G^2 \sigma_{\alpha_G}^2
\end{aligned} \tag{8.9}$$

em que $R_{z_{1B}}(m, n)$ e $R_{z_{2B}}(m, n)$ são a função de autocorrelação na saída do filtro passa-baixas, para os sinais de entrada η_{1B} e η_{2B} , respectivamente. Seja $R_{z_{1B}}(m, n) = r_h(m, n) * r_{\eta_{1B}}(m, n)$, observando-se as propriedades da saída de um sistema linear com entrada aleatória. As variáveis $r_{\eta_{1B}}$ e r_h representam as funções de autocorrelação de η_{1B} e da resposta ao impulso do filtro h , respectivamente.

Portanto,

$$\begin{aligned}
\sigma_{d_b}^2 &= \frac{\sigma_{\alpha_B}^2 + \mu_{\alpha_B}^2}{N^2} \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^N r_h(m, n) * r_{\eta_{2B}}(m, n) \\
&+ \frac{1}{N^2} \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^N r_h(m, n) * r_{\eta_{1B}}(m, n) + \frac{\sigma_{\eta_{3B}}^2}{N} \\
&+ \frac{\sigma_{\alpha_G}^2 + \mu_{\alpha_G}^2}{N^2} \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^N r_h(m, n) * r_{\eta_{2G}}(m, n) \\
&+ \frac{1}{N^2} \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^N r_h(m, n) * r_{\eta_{1G}}(m, n) + \frac{\sigma_{\eta_{3G}}^2}{N} + \\
&+ w_B^2 \sigma_{\alpha_B}^2 + w_G^2 \sigma_{\alpha_G}^2
\end{aligned} \tag{8.10}$$

Dado que η_{1B} e η_{2B} são modelados como ruído não correlacionado, $r_{\eta_{1B}}(m, n)$ e $r_{\eta_{2B}}(m, n)$ são representados por um impulso na origem com amplitude $\sigma_{\eta_{1B}}^2$ e $\sigma_{\eta_{2B}}^2$, respectivamente. Visto que $\sum_n h(n) = 1$, $\sum_{m,n} r_h(m, n) = 1$, (8.10) torna-se:

$$\begin{aligned}
\sigma_{d_b}^2 &= \frac{(\sigma_{\alpha_B}^2 + \mu_{\alpha_B}^2)\sigma_{\eta_{2B}}^2 + \sigma_{\eta_{1B}}^2 + \sigma_{\eta_{3B}}^2}{N} + \frac{(\sigma_{\alpha_G}^2 + \mu_{\alpha_G}^2)\sigma_{\eta_{2G}}^2 + \sigma_{\eta_{1G}}^2 + \sigma_{\eta_{3G}}^2}{N} \\
&+ w_B^2 \sigma_{\alpha_B}^2 + w_G^2 \sigma_{\alpha_G}^2,
\end{aligned} \tag{8.11}$$

em que $\sigma_{\eta_{2B}}^2 = (w_B - w_B^2)$.

Inicialmente, assuma que a detecção é feita usando apenas o canal azul, por exemplo. Considerando o caso $S = 2$ (ou 1 bit), por exemplo, a probabilidade de erro condicional p_{01} dado que o bit 1 é transmitido é descrita por $p_{01} = \Pr(d_b > \lambda_b | \text{bit} = 1)$, em que λ_b é um limiar de decisão. Usando a função erro complementar erfc, $p_{01} = \frac{1}{2} \text{erfc}\left(\frac{\lambda_b - \mu_{d_b/1}}{\sqrt{2\sigma_{d_b/1}^2}}\right)$, em que $\mu_{d_b/1}$ e $\sigma_{d_b/1}^2$ são, respectivamente, a média e variância de d_b , correspondentes ao bit 1. De maneira equivalente, se o bit 0 é transmitido, a probabilidade do erro condicional é dada por $p_{10} = \frac{1}{2} \text{erfc}\left(\frac{\mu_{d_b/0} - \lambda_b}{\sqrt{2\sigma_{d_b/0}^2}}\right)$, em que $\mu_{d_b/0}$ e $\sigma_{d_b/0}^2$ são, respectivamente, a média e variância de d_b para o bit 0. Finalmente, a probabilidade de erro médio é expressa por:

$$P_{e_{d_b}} = P_0 p_{10} + P_1 p_{01} \tag{8.12}$$

em que P_0 e P_1 são as probabilidades de ocorrência dos bits 0 e 1, respectivamente. Uma abordagem similar é válida para o canal vermelho.

8.3.2 Limite de Bhattacharyya na Taxa de Erro

Para reduzir a taxa de erro, as métricas d_b e d_r do canal azul e vermelho descritas em (8.3) são combinadas em uma única métrica. Para esta tarefa, a regra de decisão de Bayes é novamente empregada neste capítulo. Dado que as métricas são assumidas como normalmente distribuídas, a regra de decisão de Bayes garante a menor taxa média de erro [87].

A determinação da taxa de erro quando as métricas são usadas separadamente é relativamente direta, (como dado em (8.12)). A taxa de erro para o caso Gaussiano quando as métricas são combinadas com o classificador de Bayes não é facilmente computável, especialmente em grandes dimensões. No entanto, no caso de duas classes apenas ($S = 2$), um limite superior na taxa de erro é dado pelo limite de Bhattacharyya para variáveis Gaussianas [87]. Um limite mais restrito é dado pelo limite de Chernoff [87]. No entanto, o limite de Bhattacharyya é usado neste trabalho para evitar a determinação de β , (requirido por Chernoff), como discutido em [87].

Portanto, a probabilidade de erro de classificação é:

$$P_{ed} = \sqrt{P_0 P_1} e^{-k} \quad (8.13)$$

em que k é dado por

$$k = \frac{1}{8} (\mu_{d/1} - \mu_{d/0})^T \left(\frac{\Sigma_{/0} + \Sigma_{/1}}{2} \right)^{-1} (\mu_{d/1} - \mu_{d/0}) + \frac{1}{2} \ln \frac{|\frac{\Sigma_{/0} + \Sigma_{/1}}{2}|}{\sqrt{|\Sigma_{/0}| |\Sigma_{/1}|}} \quad (8.14)$$

em que $\Sigma_{/0}$ e $\Sigma_{/1}$ representam as matrizes de covariância correspondentes ao bit 0 e ao bit 1, respectivamente.

Deve-se notar que k depende dos resultados de (8.6) e (8.11). Aplicando-se (8.14) em (8.13), o gráfico apresentado na Figura 8.4 é gerado. A figura ilustra o limite superior na taxa de erro dada em (8.13) em função dos níveis de modulação nos canais vermelho e azul, dados por w_R e w_B , respectivamente. Os parâmetros de ruído para gerar este gráfico são mostrados na seção de experimentos.

Observe que a modulação de ambos os canais de cor gera uma taxa de erro mais baixa do que a modulação em apenas um canal de cor, com o custo do aumento do impacto perceptual. O impacto perceptual causado pela modulação da cor é discutido na seção seguinte.

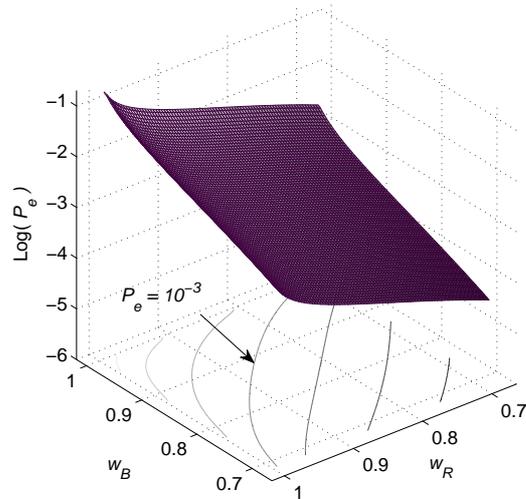


Figura 8.4: Limite superior de Bhattacharyya na probabilidade de erro usando o classificador de Bayes, em função da modulação nos canais vermelho e azul.

8.4 Medida Perceptual da Modulação da Cor

Diversas métricas que tentam avaliar a visibilidade das variações de cor em alvos de teste uniformes têm sido propostas na literatura [92, 93]. A métrica CIELAB [94] é um padrão que descreve uma transformação adequada das medidas físicas da imagem em diferenças perceptuais. Essa métrica tem sido aplicada na indústria por muitos anos e tem sido uma ferramenta aceitável para medir diferença perceptual entre cores [94].

Apesar de que outras métricas de diferença de cor podem ser usadas, usando-se a métrica de diferença de cor CIELAB é possível estimar o impacto perceptual do nível de modulação, pois a cor da imagem original é preta (caracteres pretos). A métrica de distorção perceptual D é dada por:

$$D = \sqrt{(L_0 - L)^2 + (a_0 - a)^2 + (b_0 - b)^2} \quad (8.15)$$

em que L_0 , a_0 e b_0 representam os parâmetros da cor original no espaço de cores $L^*a^*b^*$.

O gráfico na Figura 8.5 mostra a diferença perceptual D entre preto e a cor gerada pela modulação dos canais azul e vermelho. Nessa figura, o canal verde não é modulado,

A probabilidade de erro de detecção e do impacto perceptual em função da modulação nos canais vermelho e azul foram derivados nas Seções 8.3 e 8.4, respectivamente. Com essa informação, é possível determinar o compromisso entre essas duas propriedades conflituosas, e usar valores de modulação ótimos para uma

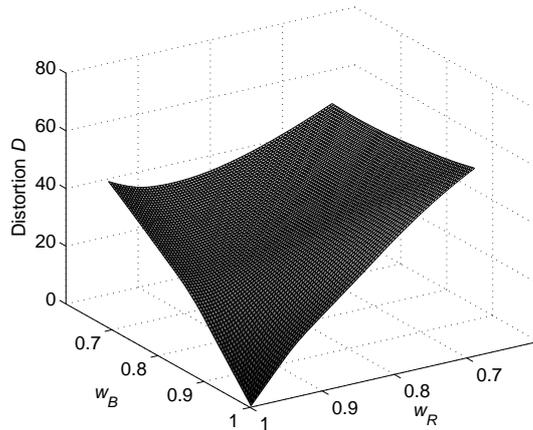


Figura 8.5: Impacto perceptual baseado no espaço de cor CIELAB causado pela modulação da cor do caractere, em função da modulação nos canais vermelho e azul.

dada taxa de erro ou um dado impacto perceptual. Considerando-se a modulação menos perceptível correspondente a uma dada taxa de erro, por exemplo, a seguinte otimização é feita:

$$\operatorname{argmin}_{w_B, w_R \in [0,1] | P_{e_d} = P'} D(w_B, w_R) \quad (8.16)$$

a qual retorna os valores w_B e w_R para os quais a distorção D é mínima, para uma probabilidade de erro $P_{e_d} = P'$. Esse processo de otimização não pode ser feito analiticamente. Ao invés, os valores de modulação que correspondem a P' são testados em relação à distorção dada em (8.15), onde o valor mínimo é escolhido como ótimo.

A Figura 8.6 ilustra a curva de distorção em função da modulação w_B e w_R , correspondente a um limite superior na probabilidade de erro igual a $P_{e_d} = 0.0001$, baseado no gráfico mostrado na Figura 8.4. Observe que, uma vez que os parâmetros de distorção do canal PS usado são obtidos, as taxas de erro são obtidas via (8.14) e os níveis de modulação que causam a distorção mínima (de acordo com (8.15)) podem ser empregados.

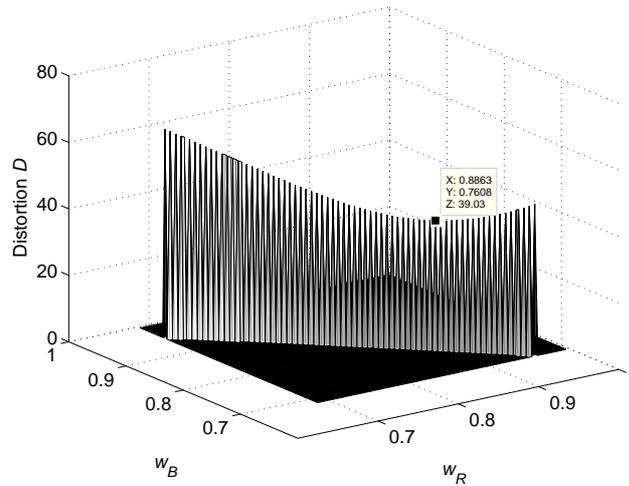


Figura 8.6: Ilustração da distorção em função de w_B and w_R , considerando uma probabilidade de erro $P_e = 0.0001$.

8.5 Métrica Auxiliar para Melhor Desempenho na Detecção

Como discutido na Seção 8.2, buscando reduzir o efeito Moiré, as matrizes de *halftone* para cada canal são rotacionadas para estarem afastadas em ângulo o máximo possível. Essa rotação é de 0° para a tela Y, 15° para a tela M, 45° para a tela K, e 75° para a tela C. Portanto, quando um caractere sofre modulação de cor, uma “modulação na orientação” também ocorre como consequência. Esta seção propõe usar essa característica como uma métrica auxiliar para ajudar a melhorar a detecção em TCM.

Diversos métodos para a detecção de orientação de textura têm sido propostos na literatura [95, 96], tais quais métodos baseados em transformadas de Fourier [97], filtros de Gabor [98] e filtros de Tamura [99]. Nesta aplicação, no entanto, o ângulo de cada canal do *halftone* é conhecido, e o uso de um filtro de detecção de bordas direcional “casado em ângulo” é uma solução simples e eficiente. A energia média da versão filtrada do caractere é uma métrica de detecção eficiente para determinar o ângulo predominante, dessa forma indicando se o caractere é ou não modulado por cor. A energia máxima é atingida quando o ângulo de filtragem é ajustado para 90° em relação ao ângulo do *halftone* predominante (que depende da cor) do caractere modulado. A métrica de detecção baseada na orientação é dada por:

$$d_a = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N y_f(n) \quad (8.17)$$

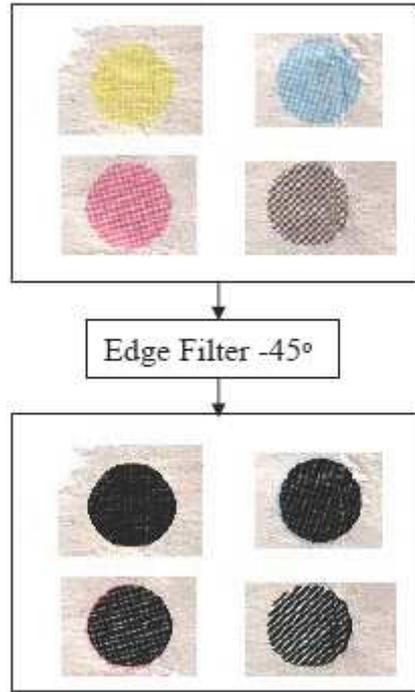


Figura 8.7: Padrões de *halftone* filtrados filtro detector de bordas direcional de -45° .

em que $y_f = y * f_{\text{dir}}$ e f_{dir} é a um filtro detector de bordas direcional [33].

Como exemplo, o qual é visível para ilustrar o processo, a Figura 8.7 ilustra a versão filtrada da Figura 8.1 filtrada com o filtro detector de bordas f_{dir} ajustado para um ângulo de -45° . Apesar de não ser tão robusta quanto as métricas descritas na Seção 8.3, esta abordagem tem poder de classificação e reduz a taxa de erro, quando combinada a outras métricas, de forma que

$$\mathbf{d}_3 = [d_b \quad d_r \quad d_a]^\top \quad (8.18)$$

em que as métricas são combinadas de acordo com o classificador de Bayes. Apesar de que neste caso de três classes o limite de Bhattacharyya discutido na Seção 8.3.2 não pode ser aplicado, os experimentos no Capítulo 9 ilustram que do uso da métrica descrita em (8.18) funciona como uma métrica de detecção eficiente.

8.6 Conclusões

Este capítulo estendeu o conceito de TLM fazendo uso da cor como uma propriedade modificável. O próximo capítulo apresenta experimentos e resultados ilustrando o desempenho e as taxas de erro de TLM, usando as diferentes métricas de detecção.

Capítulo 9

EXPERIMENTOS

Este capítulo apresenta resultados ilustrando o desempenho do sistema de marca d'água *hardcopy* proposto neste trabalho. O principal objetivo é ilustrar através de simulações de Monte Carlo a aplicabilidade do TLM como um método capaz de reduzir fraudes ou simplesmente carregar informação adicional escondida em documentos impressos. Além disso, este capítulo objetiva validar o modelo de canal PS proposto e análise teórica das taxas de erro. Os desempenhos das diversas métricas de detecção propostas no Capítulo 6 são comparadas. A detecção de símbolos inseridos em um caractere é feita pela avaliação das características estatísticas do caractere (média, variância, *skewness* e *curtose*), assim como as características espectrais. As taxas de erro são apresentadas para o caso em que as métricas são usadas separadamente e também para o caso em que elas são combinadas de acordo com o classificador de Bayes.

Estendendo a abordagem de TLM para o caso das cores, resultados ilustrando o desempenho do TCM também são apresentados, comparando-os com os resultados teóricos derivados no Capítulo 8.

Experimentos sobre detecção melhorada no código de barras multiníveis 2-D também são mostrados, juntamente com as aplicações/implementações alternativas para o TLM como *text self authentication* (TSA), *position based coding* (PCB), propostos no Capítulo 7.

Com relação às comparações com métodos similares, o autor não pôde encontrar na literatura uma abordagem similar para comparação direta. Além disso, outros métodos tais quais *line-shift coding* e *word-shift coding*, por exemplo, podem ser usados em paralelo com TLM.

9.1 Parâmetros de Ruído e Distorção

Durante os experimentos, notou-se que o ruído e os parâmetros de distorção do canal PS variam dependendo dos dispositivos de impressão e “escaneamento” usados. Os experimentos foram conduzidos com impressoras HP IJ-855C, HP IJ-870Cxi, HP LJ-1100, e HP LJ-1320, e “escaners” Genius HR6X, HP 2300C, HP SJ-5P e Canon LiDE 20. Usando estes dispositivos, os valores típicos para os parâmetros em (4.20) são

- $\sigma_{\eta_1} = 0.018$
- $\sigma_{\eta_3} = 0.01$
- $\mu_\alpha = 0.8$
- $\sigma_\alpha = 0.3$

Os parâmetros μ_α e σ_α foram obtidos através da impressão de diversos blocos pretos de tamanho 300×300 . A diferença média entre a média amostral do bloco original (igual a 1) e a média amostral dos blocos impressos e “escaneados” foi usada para determinar μ_α . Similarmente, a variância destas médias amostrais foram usadas para determinar σ_α .

Os resultados experimentais são apresentados para diversas combinações de impressoras e “escaners,” de acordo com a legenda na Tabela 9.1.

Tabela 9.1: Impressoras e “escaners” usados nos experimentos.

Combinação	Legenda
HP IJ-855C - Genius HR6X	C1
HP IJ-855C - HP 2300C	C2
HP IJ-855C - HP SJ-5P	C3
HP IJ-855C - Canon LiDE 20	C4
HP IJ-870Cxi - Genius HR6X	C5
HP IJ-870Cxi - HP 2300C	C6
HP IJ-870Cxi - HP SJ-5P	C7
HP IJ-870Cxi - Canon LiDE 20	C8
HP LJ-1100 - Genius HR6X	C9
HP LJ-1100 - HP 2300C	C10
HP LJ-1100 - HP SJ-5P	C11
HP LJ-1100 - Canon LiDE 20	C12
HP LJ-1320 - Genius HR6X	C13
HP LJ-1320 - HP 2300C	C14
HP LJ-1320 - HP SJ-5P	C15
HP LJ-1320 - Canon LiDE 20	C16

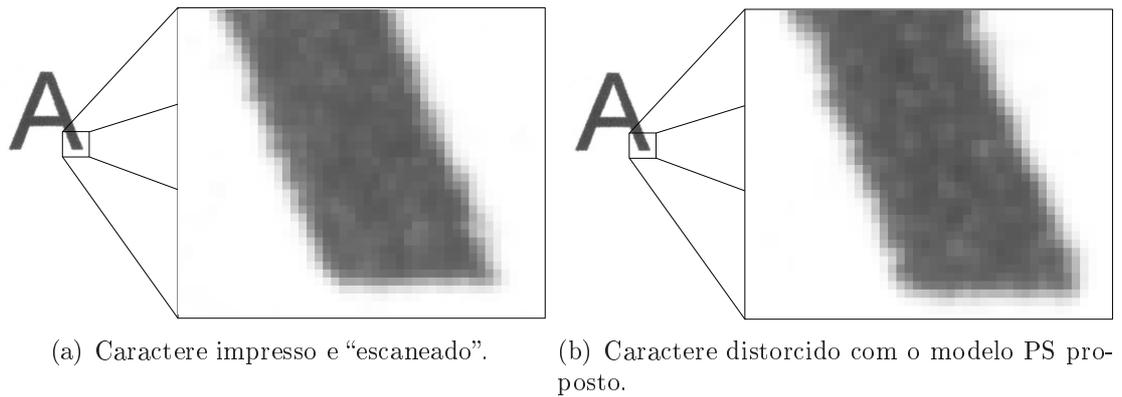


Figura 9.1: Comparação entre um caractere impresso e “escaneado” e um caractere distorcido com o modelo PS proposto.

Comparando a resposta em frequência de uma imagem digital original e a sua versão PS (considerando diversas repetições dos experimentos), a resposta $h(m, n)$ é representada de forma satisfatória por um filtro passa-baixas Butterworth descrito por

$$H(f_1, f_2) = \frac{1}{1 + [F(f_1, f_2)/F_0]^{2Q_O}} \quad (9.1)$$

em que Q_O é a ordem do filtro, F_0 é a frequência de corte, e $F(f_1, f_2)$ é a distância Euclideana do ponto f_1, f_2 à origem (centro) do espectro de frequência. Apesar de que diferentes filtros podem ser usados, para este modelo a ordem do filtro Q_O e a frequência de corte F_0 que trazem a melhor aproximação da resposta em frequência do processo são determinadas experimentalmente através do ajustamento de curva (*curve fitting*). Nesses testes, os parâmetros são dados por $Q_O = 1$ e $F_0 = 0.17$ para os dispositivos usados.

Usando os parâmetros de ruído, ganhos e filtro descritos acima, um caractere distorcido com o modelo PS proposto é perceptualmente similar a um caractere impresso ou “escaneado,” como ilustrado na Figura 9.1. Com relação ao parâmetro N , para um caractere ‘a’ de tamanho 12 “escaneado” em 600 dpi, por exemplo, $N \approx 1900$.

9.2 Experimento 1

Este experimento ilustra a validade do modelo de canal descrito na Seção 4.1. Também ilustra a validade dos valores esperados dos momentos estatísticos em função da luminância de entrada, determinados analiticamente nas Seções 6.2 e 6.3.

No experimento, 128 blocos quadrados com luminâncias variando entre $(0, 2/255, 4/255, \dots, 255/255)$ na escala $[0, 1]$ foram gerados, conforme mostrado na Figura

9.2. Esses blocos foram impressos com as impressoras listadas na Tabela 9.1. Os blocos foram subsequentemente “escaneados” e os momentos amostrais de cada bloco individual foram computados.

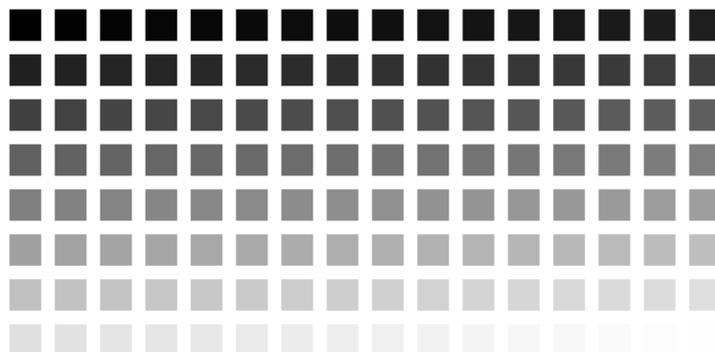


Figura 9.2: Blocos com luminâncias variando de 0 a 1.

O efeito de um nível de variância que depende da luminância de entrada é ilustrado na Figura 9.3, onde duas curvas são apresentadas. O curva preta (‘Theoretical’) representa a variância teórica determinada em (6.12). A curva cinza (‘Experimental’) representa a variância dos blocos impressos e “escaneados,” originalmente de tamanho 32×32 . Experimentos similares são apresentados para a *skewness* e a *curtose* determinadas em (6.18) e (6.21), como mostrado nas Figuras 9.4 e 9.5, respectivamente. A curva ‘Experimental’ nessas figuras corresponde aos resultados médios obtidos para as dezesseis combinações $C1 - C16$ dos dispositivos PS, apresentados na Tabela 9.1.

A Figura 9.6(b) mostra o histograma de um bloco PS gerado de uma área de luminância constante $s_0 = 0$. Similarmente, histogramas para $s_0 = 90$ e $s_0 = 180$ são apresentados nas Figuras 9.6(c) e 9.6(d), respectivamente, ilustrando uma mudança na forma da distribuição.

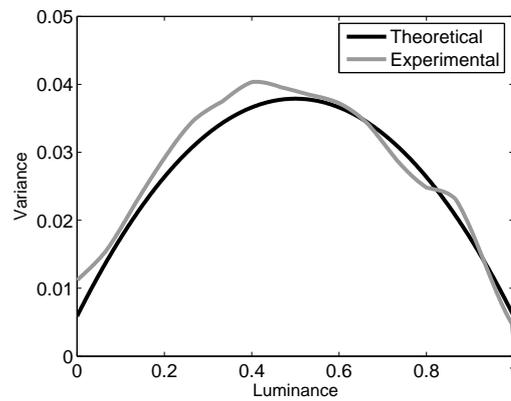


Figura 9.3: O efeito da variância dependente da luminância de entrada, depois do PS.

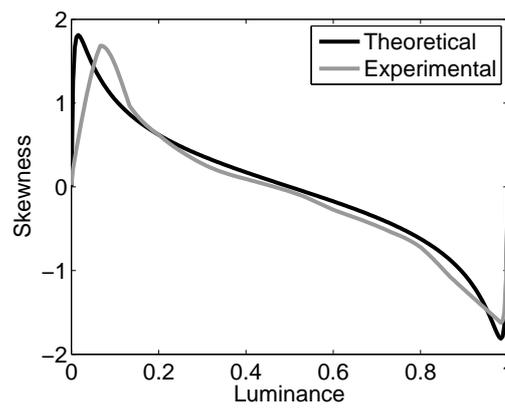


Figura 9.4: O efeito de *skewness* dependente da luminância de entrada, depois do PS.

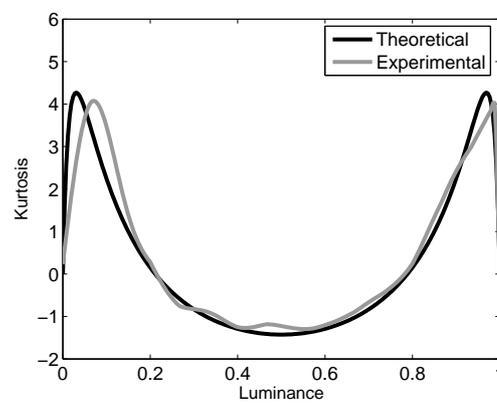


Figura 9.5: O efeito de curtose dependente da luminância de entrada, depois do PS.

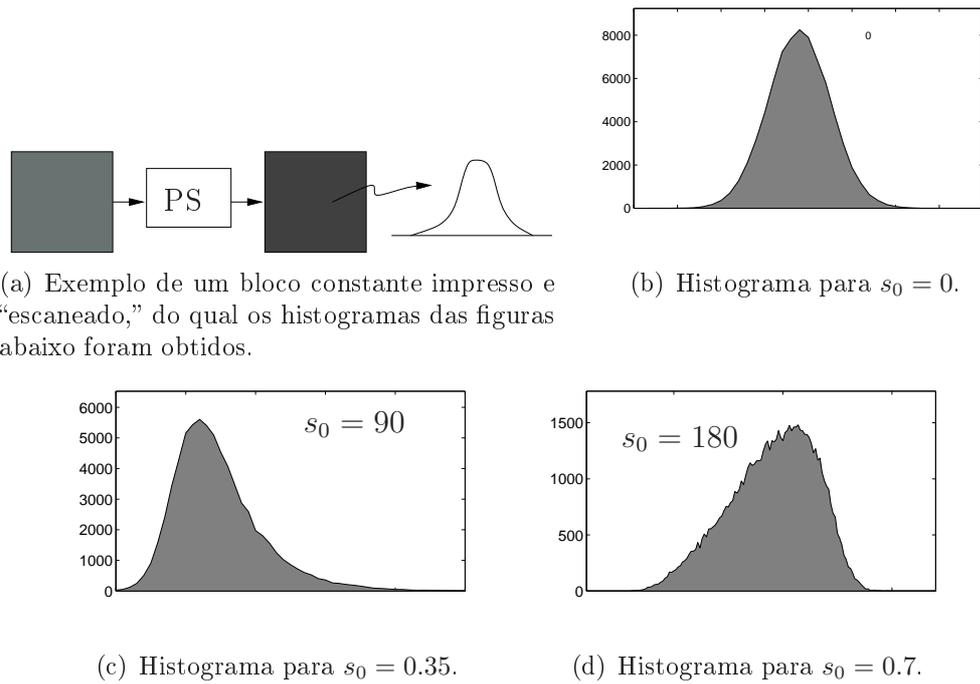


Figura 9.6: Histogramas com diferentes formatos ilustrando a mudança em *skewness* e em curtose de uma região PS, de acordo com a luminância de entrada s_0 .

9.3 Experimento 2 - TLM 1

Considere o caso de 1 bit/caractere ($S = 2$). Uma grande seqüência de caracteres $K = 30360$ (como em 'abcdef...') é impressa, com fonte tipo 'Arial', tamanho 12 pontos. Nos experimentos, pequenos elementos de texto tais quais vírgulas e pontos não levam marca d'água. Esses elementos são compostos por um menor número de pixels (ou seja, N pequeno), tornando-os mais suscetíveis a erros de segmentação e detecção.

A resolução de impressão é de $r_p = 600$ dpi. Antes da impressão, a seqüência de caracteres foi modulada com um ganho $w_i = 1$ para i ímpares, $i = 1, 3, \dots, K - 1$, e com um ganho $w_i = 0.84$ para i pares, $i = 2, 4, \dots, K$. Os elementos sem alteração de luminância ($w_i = 1$) carregam o bit 0, e os elementos modulados com $w_i = 0.84$ carregam o bit 1. A tarefa é classificar cada caractere impresso como tendo o bit 0 ou o bit 1 inserido no mesmo, de forma que a detecção é feita caractere a caractere.

De modo a resgatar a informação inserida, o documento é “escaneado” com resolução $r_s = 300$ ppi. O texto é segmentado do fundo usando uma limiarização simples, cuja amostra é ilustrada na Fig. 9.7. Erros de segmentação não são observados neste conjunto de testes, apesar de ser evidente que eles podem causar erros de sincronização na detecção. O uso de codificação de canal é uma opção eficiente para reduzir os erros de bit causados por uma segmentação errada. Uma discussão

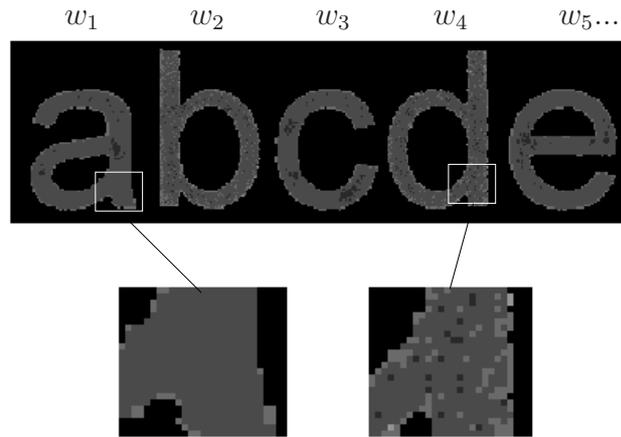


Figura 9.7: Exemplo de texto segmentado, representado em escala negativa para visualização. As áreas com zoom ilustram a maior variância dos caracteres modulados.

sobre códigos corretores de erro adequados para esse problema é apresentada em [66].

Para determinar o valor do bit inserido em cada elemento do documento “escaneado,” diversas abordagens distintas podem ser usadas:

- Detecção por luminância média.
- Detecção por variância.
- Detecção por *skewness*.
- Detecção por curtose.
- Diferentes combinações das métricas usando o Classificador de Bayes.

A seguir os resultados do uso das métricas de detecção listadas acima são mostrados.

1. **Detecção pela luminância média (d_M):** Usando a luminância média em (6.2) como métrica de detecção, o valor médio resultante para d_M para os caracteres “escaneados” é $\mu_{d_M/0} = 0.723$, quando $w_i = 1$. Este valor médio representa a média das médias amostrais de cada caractere. Quando $w_i = 0.84$, o valor médio resultante observado para d_M é $\mu_{d_M/1} = 0.651$. A distorção é expressa como $\epsilon = \mu_{d_M/0} - \mu_{d_M/1}$ e para conseguir transparência perceptual em papel impresso, experimentos indicaram que $\epsilon \lesssim 0.08$ é necessário. Para determinar este limiar, em experimentos com humanos percebeu-se que $\epsilon = 0.08$ é, em média, um limite perceptual abaixo do qual é difícil perceber a diferença entre um caractere modulado e não-modulado.

A Figura 9.8 ilustra as distribuições obtidas para métrica de detecção d_M usando $w_i = 1$ (caractere preto) e $w_i = 0.84$ ($\epsilon = 0.723 - 0.651 = 0.072$).

2. **Detecção pela variância (d_V):** Considere as mesmas seqüências de caracteres impressos e “escaneados,” agora empregando a variância do caractere em (6.11) como métrica de detecção. Quando $w_i = 1$, $i = 1, 3, \dots, K - 1$, o valor médio resultante observado para a métrica d_V é $\mu_{d_V/0} = 1.13 \times 10^{-2}$. Quando $w_i = 0.84$, $i = 2, 4, \dots, K$, o valor médio resultante para a métrica d_V é $\mu_{d_V/1} = 3.06 \times 10^{-2}$. A Fig. 9.9 ilustra as distribuições obtidas para a métrica de detecção d_V usando $w_i = 1$ e $w_i = 0.84$.
3. **Detecção pela skewness (γ_1):** Quando $w_i = 1$, $i = 1, 3, \dots, K - 1$, o valor médio resultante observado para a métrica γ_1 é 1.74. Quando $w_i = 0.84$, $i = 2, 4, \dots, K$, o valor médio resultante observado para a métrica γ_1 é 0.12. A distribuição resultante para a métrica de detecção γ_1 é ilustrada na Figura 9.10.
4. **Detecção pela curtose (γ_2):** Quando $w_i = 1$, $i = 1, 3, \dots, K - 1$, o valor médio resultante observado para a métrica γ_2 é 3.89. Quando $w_i = 0.84$, $i = 2, 4, \dots, K$, o valor médio resultante para a métrica γ_2 é 0.254. A Figura 9.11 ilustra as distribuições obtidas para a métrica de detecção γ_2 .
5. **Detecção combinando as métricas (\mathbf{d}):** Fig. 9.12 mostra os valores observados para as métricas d_M e d_V , ilustrando o limiar de decisão λ_M (linha pontilhada) usado quando apenas d_M é considerado como um parâmetro de decisão. Similarmente, a Figura 9.12 também mostra o limiar de decisão λ_V (linha sólida), baseado unicamente em d_V . Usando apenas λ_M ou λ_V , a ocorrência de erros de detecção é observada. Uma taxa de erro menor é alcançada quando as métricas d_M e d_V são combinadas em \mathbf{d} , como descrito em (6.29). Assumindo que a probabilidade *a priori* de ocorrência dos bits 0 e 1 é de 0.5 (equiprováveis), usando o classificador de Bayes discutido na Seção 6.5, a função de decisão f apresentada na Figura 9.13 é obtida, reduzindo a taxa de erro de detecção. Essa abordagem pode ser estendida para detecção usando os momentos estatísticos de ordem elevada. A Figura 9.14, por exemplo, ilustra uma superfície separando as duas classes em um espaço 3-D formado pela média, pela variância e pela *skewness*.

As taxas de erro observadas para os casos descritos acima são apresentadas na Tabela 9.2, considerando que as métricas de detecção não são combinadas. A Tabela 9.3 mostra as taxas de erro resultantes quando as métricas são combinadas. Note que

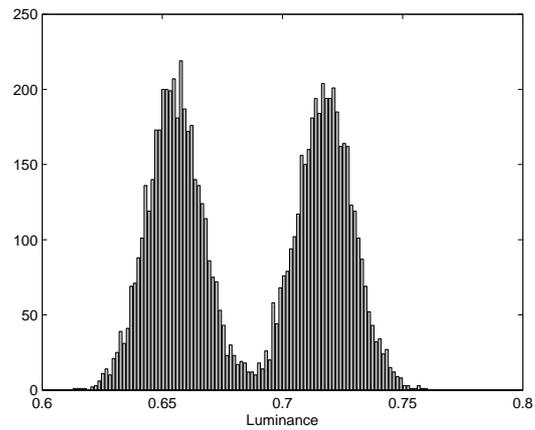


Figura 9.8: Usando apenas a média amostral como métrica de detecção.

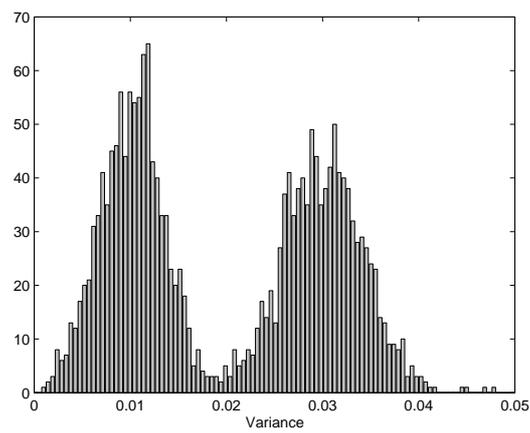


Figura 9.9: Usando apenas a variância amostral como métrica de detecção.

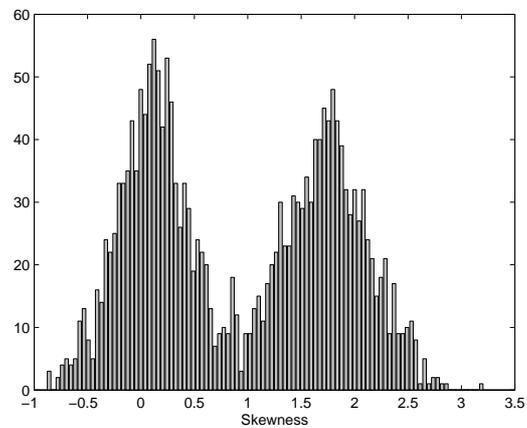


Figura 9.10: Usando apenas *skewness* amostral como métrica de detecção.

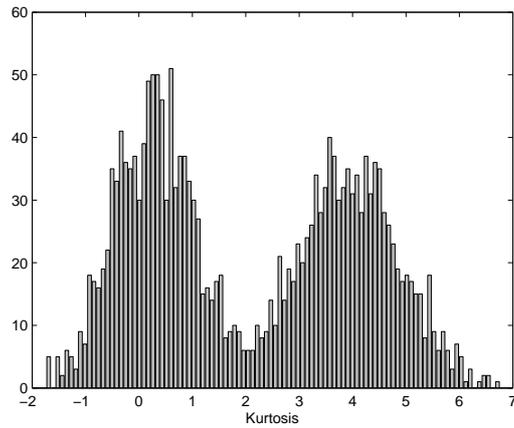


Figura 9.11: Usando apenas a curtose amostral como métrica de detecção.

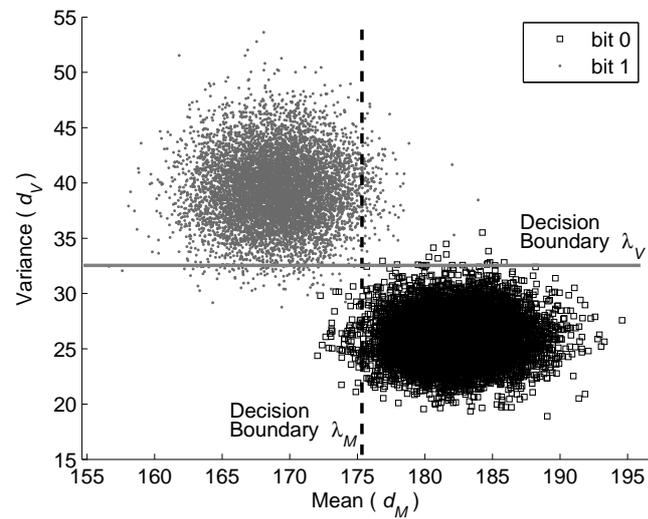


Figura 9.12: Limiares de decisão usando as métricas de detecção separadamente, representadas na escala 0-255.

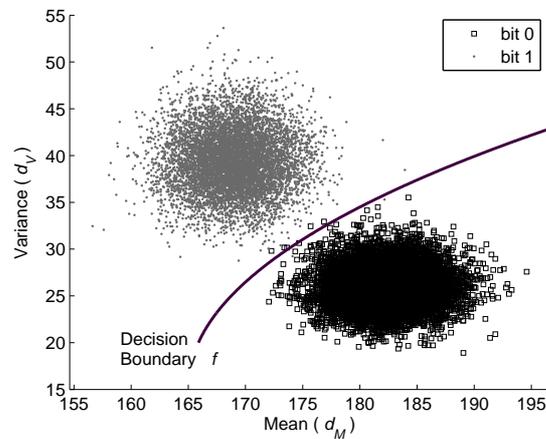


Figura 9.13: Limiares de decisão combinando duas métricas de detecção, representada na escala 0-255.

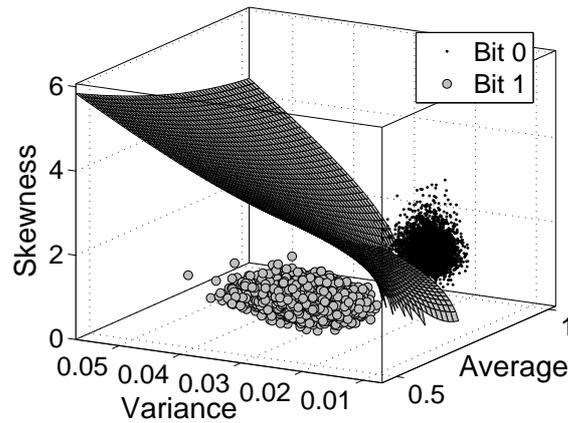


Figura 9.14: Espaço 3-D com superfície de decisão separando as duas classes, usando a média, a variância e *skewness* como métricas de detecção.

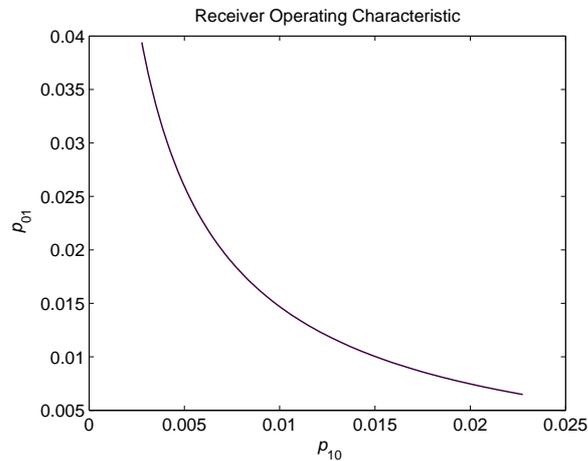


Figura 9.15: ROC correspondente à detecção pela média amostral.

a combinação das métricas resulta em uma taxa de erro reduzida, em comparação à detecção baseada unicamente em um métrica.

Usando os resultados teóricos para as probabilidades de erro p_{01} e p_{10} para a métrica média amostral, a Figura 9.15 apresenta a curva de ROC (*receiver operating characteristic*) [1] para essa métrica. De forma similar, a Figura 9.16 apresenta a curva de ROC correspondente à métrica variância amostral. Essas figuras ilustram o comportamento do sistema com relação ao desempenho da taxa de erro p_{01} em função da taxa de erro p_{10} . Isto é particularmente útil em aplicações onde um erro do tipo “assumir erroneamente que um caractere foi alterado” é mais prejudicial que “assumir erroneamente que um caractere não foi alterado” (ou vice-versa).

É importante notar que estas taxas podem ser reduzidas pelo aumento da distorção aceitável ϵ . Se ϵ excede um dado limiar perceptual, torna-se mais fácil para um observador perceber a alteração de luminância. No entanto, ao contrário de

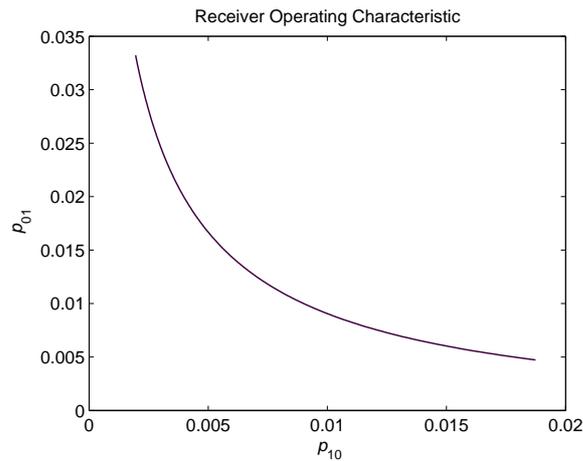


Figura 9.16: ROC correspondente à detecção pela variância amostral.

imagens naturais regulares (como fotos), em que o ‘significado’ da imagem depende do valor do pixel, nos documentos de texto o ‘significado’ reside no formato dos caracteres, para que as letras sejam reconhecidas. Assim, os caracteres poderiam ser de qualquer cor e desde que sejam legíveis, o conteúdo de informação do documento modificado será exatamente o mesmo do documento original com caracteres pretos. A importância do limite de distorção perceptual é que ele evita que o leitor seja incomodado durante o processo de leitura, buscando assegurar que a sua atenção não seja desviada pelo fato dos caracteres estarem modificados.

Tabela 9.2: Taxas de erro experimental testando 30360 caracteres. A legenda para os dispositivos é dada na Tabela 9.1.

Dispositivos	Taxa de Erro			
	d_M	d_V	γ_1	γ_2
C1	467	400	600	1003
C2	422	378	556	889
C3	444	400	667	867
C4	434	403	622	800
C5	411	375	667	911
C6	401	333	489	644
C7	412	330	556	822
C8	377	270	422	667
C9	300	444	443	644
C10	278	378	868	889
C11	276	289	775	867
C12	289	267	557	756
C13	244	333	489	600
C14	267	322	581	778
C15	222	378	420	933
C16	233	422	445	756
Média	1.13×10^{-2}	9.92×10^{-3}	1.88×10^{-2}	2.64×10^{-2}

Tabela 9.3: Taxa de erro experimental testando 30360 caracteres e combinando as métricas de detecção de acordo com o classificador de Bayes. A legenda para os dispositivos é dada na Tabela 9.1.

Dispositivos	Taxa de Erro			
	$d_M - d_V$	$d_M - \gamma_1$	$d_M - d_V - \gamma_1$	$d_M - d_V - \gamma_1 - \gamma_2$
C1	43	69	25	6
C2	38	65	24	7
C3	40	68	27	8
C4	41	74	26	5
C5	40	69	22	6
C6	35	70	21	4
C7	34	65	19	5
C8	32	62	22	6
C9	25	45	17	3
C10	26	43	15	2
C11	24	40	19	3
C12	25	43	16	2
C13	22	36	13	1
C14	19	40	11	2
C15	18	37	14	0
C16	20	35	12	1
Average	9.95×10^{-4}	1.77×10^{-3}	6.24×10^{-4}	1.38×10^{-4}

9.4 Experimento 3 - TLM 2

Neste experimento, o ‘Experimento 2 - TLM 1’ acima é estendido pela observação das taxas de erro para diferentes ganhos w , quando usando a média d_M e a variância d_V como métricas de detecção. Os ganhos testados foram $w = 0.98, 0.96, 0.92, 0.88$ e 0.84 . Neste experimento, um número menor de realizações é feito em relação ao ‘Experimento 1’, com $K = 1540$.

O gráfico na Figura 9.17 mostra a taxa de erro teórica (linha cheia) para a métrica d_M determinada em (6.10). Ela também mostra as taxas de erro experimentais (pontos cinza) em função do ganho w , quando a luminância média (d_M) é usada como métrica de detecção.

Similarmente, a Figura 9.18 apresenta os resultados do uso da variância (d_V) como métrica de detecção e a taxa de erro teórica determinada em (6.15).

Ambas as figuras indicam a similaridade entre os resultados teóricos e experimentais. Como esperado, pode-se notar que para os valores de w perto de 1, a taxa de erro é próxima de 50%.

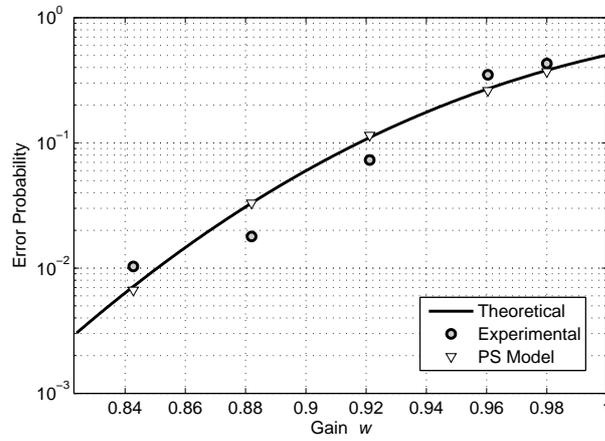


Figura 9.17: Probabilidade de erro para diferentes ganhos, usando d_M como métrica de detecção.

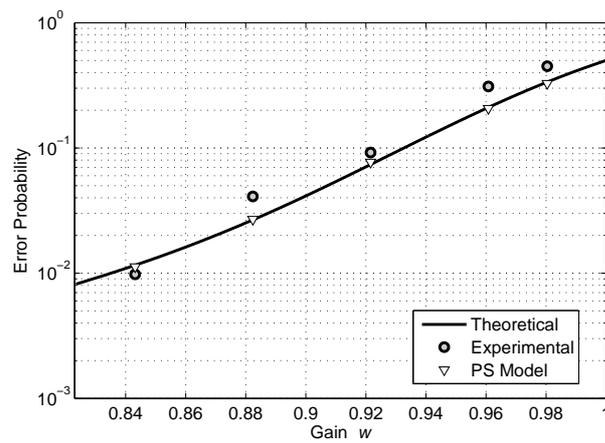


Figura 9.18: Probabilidade de erro para diferentes ganhos, usando d_V como métrica de detecção.

9.5 Experimento 4 - TLM 3

Neste experimento uma simulação de Monte Carlo é feita para observar as taxas de erro usando o modelo do canal PS proposto no Capítulo 4. O objetivo deste experimento é validar as análises das Seções 6.2.1 e 6.2.2 para o canal PS sintético, o qual emula o real processo PS. Assim, neste experimento, ao invés de se imprimir e “escanear” os símbolos modulados, eles são transmitidos através do modelo assumido (canal PS sintético). Similarmente ao ‘Experimento 3 - TLM 2,’ os testes foram feitos para $w_i = 0.98, 0.96, 0.92, 0.88$ e $0.84, i = 2, 4, \dots, K$. Neste experimento, $K = 200,000$.

Os triângulos (∇) nas Figuras 9.17 e 9.18 representam as taxas de erro obtidas usando a média e a variância como métrica de detecção, respectivamente. Ambas as figuras representam uma correspondência excelente entre as curvas teóricas (linha cheia) geradas a partir de (6.10) e (6.15) e a taxa de erro observada usando o canal sintético. Isto valida as análises das Seções 6.2.1 e 6.2.2 e ilustra que uma vez que os parâmetros de ruído dos dispositivos PS são obtidos, o desempenho do sistema pode ser estimado a partir de (6.10) e (6.15).

9.6 Experimento 5 - Detecção Espectral

Este conjunto de experimentos apresenta resultados usando a detecção espectral proposta na Seção 6.4.

9.6.1 Halftone Tipo Ruído Azul

Considere o caso de 1 bit/caractere ($S = 2$). Um grande seqüência de $K = 32520$ caracteres (como em ‘abcdef...’) é impressa, com fonte do tipo ‘Arial’, tamanho 13 pontos. Este tamanho foi utilizado para permitir uma melhor caracterização do padrão de textura causado pelo *halftoning*. Antes da impressão, a seqüência de caracteres foi modulada com um ganho de $w_i = 1$ (em alteração de luminância) para $i = 1, 3, \dots, K - 1$, e com um ganho de $w_i = 0.84$ para $i = 2, 4, \dots, K$, usando uma matriz de *halftone* D_H tipo ruído azul. Similarmente aos experimentos anteriores, usando esses valores, testes empíricos indicaram que é difícil para o olho humano distinguir entre um caractere modulado e um não-modulado.

Os elementos sem alteração de luminância ($w_i = 1$) têm características de ruído branco e carregam o bit 0, e os elementos modulados com $w_i = 0.84$ tem características de ruído azul e carregam o bit 1. Novamente, a tarefa é classificar cada caractere impresso como tendo o bit 0 ou o bit 1 inseridos.

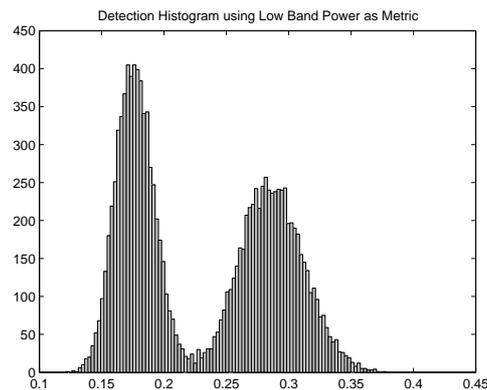


Figura 9.19: Histograma da banda baixa como métrica de detecção.

Para determinar o valor do bit inserido em cada elemento do documento “escaneado,” quatro abordagens distintas são testadas:

1. **Detecção usando apenas luminância média:** este é o método TLM simples, em que os caracteres impressos e “escaneados” tem as suas luminâncias médias avaliadas usando (6.2). O histograma de detecção é apresentado na Figura 9.23.
2. **Detecção usando uma sub-banda:** A distribuição da detecção espectral usando-se separadamente as energias da bandas alta e baixa como métricas de detecção são dadas nas Figuras 9.19 e 9.20, respectivamente.
3. **Detecção usando duas propriedades sub-banda:** A distribuição da detecção espectral combinando a energia das bandas alta e baixa com o classificador de Bayes é dada na Figura 9.21.
4. **Detecção usando três propriedades sub-banda:** A distribuição da detecção espectral combinando a energia das bandas alta, média e baixa com o classificador de Bayes é dada na Figura 9.22

A Tabela 9.4 apresenta as taxas de erro observadas nos quatro casos discutidos acima. Note a taxa de erro é reduzida quando mais métricas são incluídas no processo de detecção. Os resultados ilustram que a detecção usando apenas a luminância média como métrica de detecção (TLM), apresenta uma taxa de erro maior do que a detecção espectral.

9.6.2 Halftone Tipo Ruído Verde

Este experimento é similar ao Experimento 9.6.1, no entanto *halftone* tipo ruído verde é empregado no processo de impressão.

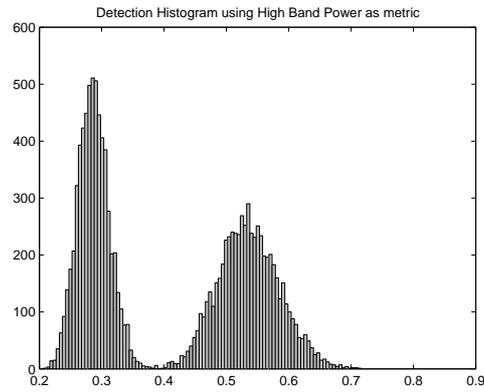


Figura 9.20: Histograma da banda alta como métrica de detecção.

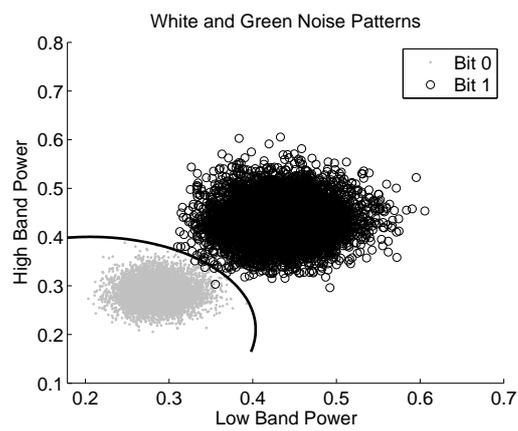


Figura 9.21: Ilustração das bandas baixa e alta para o ruído azul.

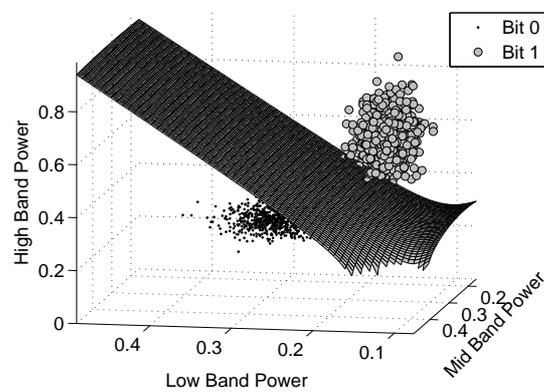


Figura 9.22: Gráfico 3-D ilustrando as bandas baixa, média e alta.

Tabela 9.4: Taxa de Erro Experimental para THM e TLM.

Freq. Band	Blue Noise	Green Noise
Low	9.66×10^{-3}	1.03×10^{-2}
High	4.66×10^{-3}	7.48×10^{-3}
Comb. Low-High	1.12×10^{-3}	2.14×10^{-3}
Comb. Low-Mid-High	7.80×10^{-4}	9.96×10^{-4}
Average Lum.(TLM)	1.05×10^{-2}	1.07×10^{-2}

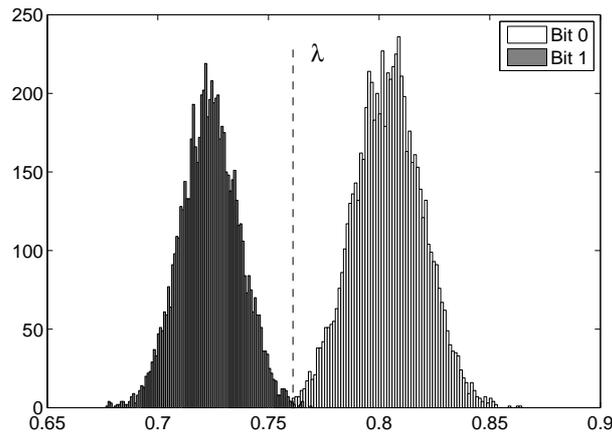


Figura 9.23: Distribuição de luminância média dos caracteres.

A Tabela 9.4 apresenta as taxas de erro observadas. Note que o ruído azul apresenta uma taxa de erro menor em comparação ao ruído verde. Isso ocorre porque quando o ruído azul (com forte alta frequência) e o ruído verde (com forte média frequência) são transmitidas através do canal PS, o ruído azul é mais facilmente distinguível do ruído branco, o que corresponde ao caso não-modulado.

9.6.3 Taxa de Erro para Detecção Espectral

Neste experimento uma simulação de Monte Carlo é feita para observar as taxas de erro usando o modelo de canal PS proposto na Seção 4.1. O objetivo deste experimento é validar as análises da Seção 6.4 para o canal PS sintético, o qual emula o processo PS real. Assim sendo, neste experimento, em vez de se imprimir e “escanear” os símbolos modulados, estes são transmitidos através do modelo de canal assumido. Testes são feitos com *halftoning* do tipo ruído azul e verde, para $w_i = 0.98, 0.96, 0.92, 0.88, \text{ e } 0.84, i = 2, 4, \dots, K$. Neste experimento, $K = 500000$.

As curvas na Figura 9.24 representam as taxas de erro teóricas geradas a partir dos resultados da Seção 6.4 para o *halftone* tipo ruído azul e verde, como indicado pela legenda. Os triângulos e os pontos pretos representam as taxas de erro experimentais observadas, apresentando uma excelente correspondência com as curvas

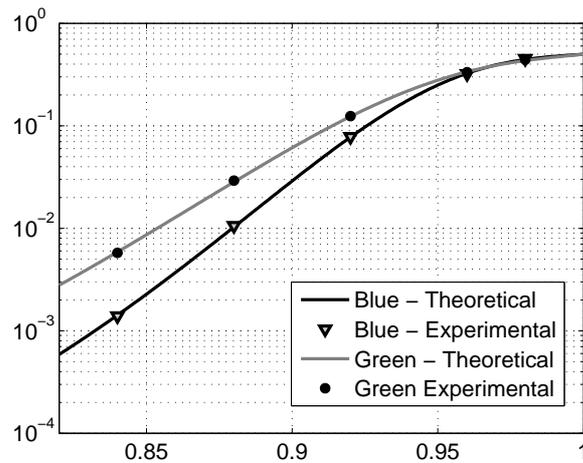


Figura 9.24: Probabilidade de erro para diferentes ganhos, usando *half-tone* tipo ruído azul e verde para modular os caracteres.

teóricas. Isso valida a análise da Seção 6.4 e ilustra que uma vez que os parâmetros de ruído dos dispositivos PS são obtidos, o desempenho do sistema pode ser estimado.

9.7 Experimento 6 - Códigos de Barra 2-D Multi-nível

Neste experimento, um código de barras multi-níveis 2-D (Seção 7.1) é impresso com a seqüência de 56,000 símbolos com quatro possíveis níveis de luminância (2 bits/símbolo) retirados do alfabeto $\{0.08, 0.34, 0.65, 0.95\}$. Valores ótimos para o alfabeto dependem dos dispositivos PS usados, como discutido em [37] e [62], onde os autores apresentam um estudo de codificação multi-nível para o canal PS assumido. O tamanho original (antes da impressão) de cada símbolo é de 8×8 , correspondendo ao tamanho de um bloco de *half-tone*. A Tabela 9.5 mostra as taxas de erro de bit obtidas quando a detecção é feita usando-se as métricas estatísticas sugeridas (média, variância *skewness*, curtose) separadamente. Essa tabela também apresenta os resultados da combinação das métricas com o classificador de Bayes, ilustrando uma taxa de erro menor. Dado que a variância e a curtose são simétricas em torno do centro dos valores de luminância, elas não podem ser usadas sozinhas como métrica de detecção.

Tabela 9.5: Taxas de Erro Experimental para código de barras 2-D.

Métrica	Número de Erros	Taxa de Erro
Average (μ)	667	1.19×10^{-2}
curtose (γ_2)	1860	3.32×10^{-2}
Comb. (μ, σ^2)	114	2.04×10^{-3}
Comb. (μ, γ_1)	259	4.63×10^{-3}
Comb. (μ, σ^2, γ_1)	50	8.93×10^{-4}
Comb. ($\mu, \sigma^2, \gamma_1, \gamma_2$)	22	3.93×10^{-4}

9.8 Experimento 7 - Protocolo de Autenticação

Esta seção ilustra a aplicação do protocolo de autenticação proposto na Seção 7.2.

9.8.1 Carteira de Identificação

Uma carteira de identificação é autenticada usando TLM, como mostrado na Figura 9.25. Note que a intensidade das mudanças é visível para ilustrar o processo. Uma versão modificada da carteira é gerada, onde o último dígito no campo ‘Valid Until’ é alterado. Para reduzir a probabilidade de erros de detecção da luminância e de OCR, apenas números e caracteres são considerados neste teste.

Para o documento não-alterado na Figura 9.25, usando-se uma tabela 8-bit ASCII para representar os caracteres [70], os seguintes parâmetros (discutidos na Seção 7.2) são obtidos:

- $K = 124$.
- $\mathbf{c} = \{\text{I,N,T,E,R,N}, \dots, 2,0,0,8\}$.
- $\mathbf{c}_b = [0100100101001110, \dots, 00111000]$.
- $\kappa = f(\mathbf{c}_b) = 1176020$.
- $\mathbf{k} = [0100110110101110, \dots, 00010101]$.
- $\mathbf{c}'_b = \mathbf{c}_b \oplus \mathbf{k} = [0000010011100000, \dots, 00101101]$.
- $\mathbf{w} = [11100, \dots, 0110]$.
- $\mathbf{w}_e = [01101, \dots, 0111]$.

\mathbf{w}_e é composto de K elementos, correspondendo ao número de caracteres no documento. O documento é autenticado pela alteração de luminância de cada caractere

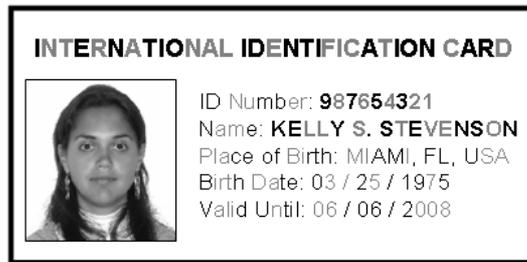


Figura 9.25: Auenticação de documentos usando o protocolo proposto na Seção 7.2. Note a luminância dos caracteres modificados.

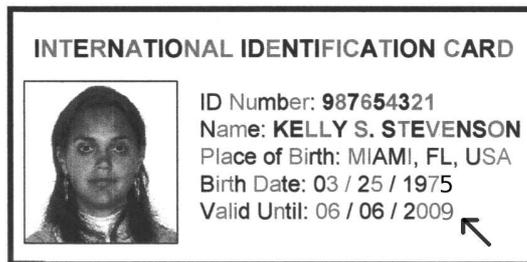


Figura 9.26: Documento de identificação “escaneado”. O último dígito da data de validade é modificado de 8 para 9, como indicado pela flecha.

c_i em \mathbf{c} para w_{ei} em \mathbf{w}_e . Note que a luminâncias dos caracteres na Figura 9.25 são modificadas de acordo com \mathbf{w}_e .

Depois da impressão, os parâmetros são novamente obtidos, baseados no documento impresso alterado na Figura 9.26. Dado que o último dígito do documento é diferente, $\hat{\mathbf{w}}$ e $\hat{\mathbf{w}}'$ são duas seqüências completamente diferentes, falhando no teste de igualdade mostrado na Figura 7.4.

9.8.2 Taxa de Erro

Neste experimento, uma imagem de texto g composta de 26 caracteres (como em ‘abcd...z’) é gerada. Com base em g , 800,000 imagens g_j têm a luminância de seus caracteres aleatoriamente modulada de acordo com \mathbf{w}_j , em que $w_{ij} \in \{0, L_0\}$ com igual probabilidade, $i = 1, \dots, 26$ e $j = 1, \dots, 800,000$. Para simular o efeito do canal PS, as imagens são transmitidas através do canal PS descrito no Capítulo 4. No entanto, ao invés de se usar os parâmetros do canal descritos na Seção 9.1, o parâmetro σ_α é ajustado para 0.5 para aumentar a taxa de erro e permitir uma ilustração apropriada.

Dado que o objetivo deste experimento é avaliar o detector de correlação proposto na Seção 7.2.3 (o qual poderia ser empregado com qualquer uma das métricas propostas), a detecção é feita apenas através da avaliação da luminância média.

O detector de correlação em (7.1) é aplicado para determinar quando um do-

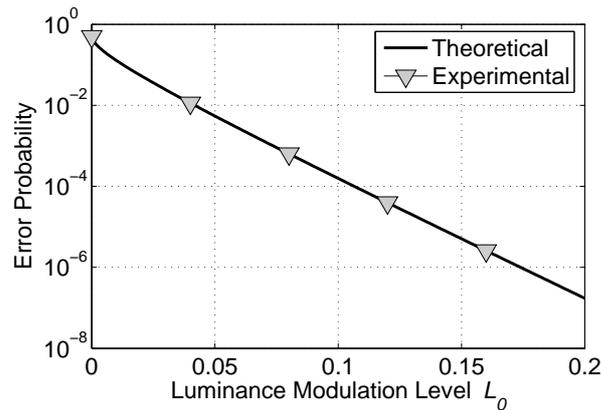


Figura 9.27: Taxas de Erro de Detecção usando o detector de correlação no protocolo de autenticação.

cumento é autêntico, baseado no limiar λ_a descrito na Seção 7.2.3. As taxas de erro são mostradas na Figura 9.27, de acordo com a modulação L_0 . A linha cheia representa a taxa de erro teórica determinada em (7.5). Os triângulos representam a taxa de erro observada na simulação, apresentando uma excelente correspondência com a curva teórica. Isso ilustra que uma vez que os parâmetros do sistema PS são determinados, o desempenho do protocolo de autenticação pode ser estimado.

Apesar de a Figura 9.27 validar (7.5), experimentos reais indicaram que valores típicos de ruído são menores que $\sigma_\alpha = 0.5$, usado neste experimento. Isso faz com que as taxas de erro sejam virtualmente zero, ilustrando a eficiência do método proposto.

9.9 Experimento 8 - PBC

Este conjunto de experimentos mostra testes usando TLM para avaliar o desempenho do PBC, proposto na Seção 7.3.

9.9.1 PBC

Neste experimento, 200 documentos compostos de K caracteres são impressos, com $K = 20, 50, 100$ e 200 . Os caracteres nos documentos são modulados tal que uma mensagem é inserida de acordo com o algoritmo PBC. Para este conjunto de amostras, apenas 2 entre K caracteres são modulados ($Q = 2$).

O processo de detecção determina os 2 caracteres modulados, decodificando as suas posições para a mensagem inserida, usando o algoritmo de decodificação proposto em [82].

Como discutido na Seção 7.3.4, uma desvantagem do PBC é que se o processo

Tabela 9.6: Taxas de erro experimentais.

K	Usando limiar λ	Usando o maior d
20	1.94×10^{-2}	0
50	4.70×10^{-2}	0
100	8.80×10^{-2}	0
200	0.177	0

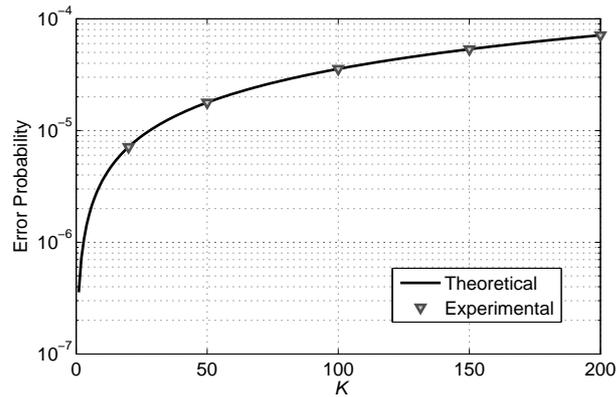


Figura 9.28: Taxa de erro teórica em PBC.

de detecção erroneamente assume um caractere y_i como modificado, a mensagem inserida é totalmente perdida. Usando um limiar λ para classificar caracteres modulados e não-modulados, uma significativa taxa de erro de mensagem é observada, apresentada na Tabela 9.6. No entanto, usando o procedimento de detecção descrito na Seção 7.3.4, em que apenas os Q caracteres com as luminâncias médias mais altas são determinadas ($Q = 2$, neste exemplo), erros de detecção não são observados. Note que os erros não são observados porque a taxa de erro teórica é muito baixa, e o número de tentativas não é grande o suficiente para ilustrar propriamente esta taxa, dado que impressão e “escaneamento” consomem muito tempo. Este experimento, no entanto, ilustra a aplicabilidade do método.

9.9.2 Taxa de Erro

Para validar as análises da Seção 7.3.4, um experimento similar àquele da Seção 9.9 é feito no domínio digital, usando o canal PS sintético para emular o processo PS. No entanto, impressão e “escaneamento” não são feitos, permitindo um maior número de testes. As taxas de erro observadas em função de K são apresentadas na Fig. 9.28, representadas pelos triângulos. Esta figura também apresenta as taxas de erro teóricas determinadas a partir de (7.17), ilustrando a concordância entre teoria e prática.

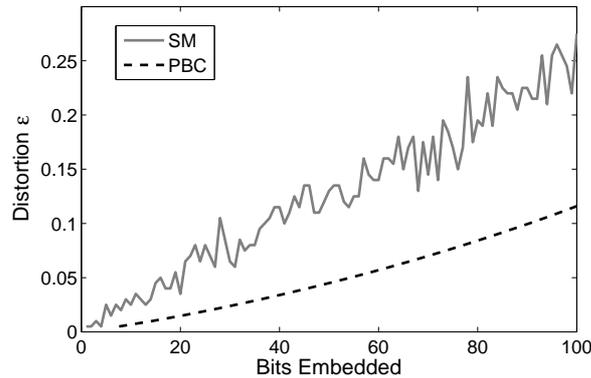


Figura 9.29: Comparação entre as distorções em PBC e em SM como uma função do número de bits inserido, para um documento composto de $K = 200$ caracteres.

9.9.3 PBC Vs. SM

Neste experimento, mensagens binárias aleatórias \mathbf{b} são geradas, com bits 0 e bits 1 equiprováveis. O tamanho das mensagens varia de 1 a 100 bits. As mensagens são inseridas em um documento composto de $K = 200$ caracteres, usando os métodos PBC e SM. A Figura 9.29 mostra as curvas representando as distorções quando as mensagens são codificadas usando PBC e SM. Esse gráfico ilustra que, para um documento de tamanho $K = 200$, PBC pode inserir o mesmo número de bits que SM, causando menor distorção.

Note que em PBC a distorção (número de caracteres modificados) é determinística para um número dado de bits inseridos, quando em SM a distorção é não-determinística, dependendo do valor do bit em \mathbf{b} .

9.10 Experimento 9: Usando TCM

9.10.1 Modulação do Canal Azul

Considere o caso 1 bit/caractere ($S = 2$). Uma grande seqüência de $K = 30360$ caracteres (como em 'abcdef...') é impressa, com fonte tipo 'Arial', tamanho 12 pontos.

Antes da impressão, o canal azul da seqüência de caracteres foi modulado com um ganho $w_{B_i} = 1$ (sem alteração da cor) para $i = 1, 3, \dots, K - 1$, e com um ganho de $w_{B_i} = 0.81$ para $i = 2, 4, \dots, K$. Usando esses valores, testes empíricos indicaram que é difícil para um observador distinguir entre um caractere modulado e um não-modulado. Neste caso, de acordo com a métrica de distorção perceptual descrita em (8.15), a distorção é dada por $D = 34.67$. De fato, os testes empíricos ilustraram que $D < 40$ são geralmente não perceptíveis ao olho humano.

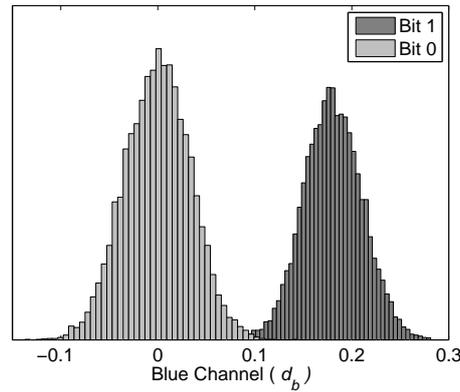


Figura 9.30: Histograma da métrica de detecção d_B , para o canal azul.

Os elementos sem alteração de cor ($w_{B_i} = 1$) carregam o bit 0, e os elementos modulados com $w_{B_i} = 0.81$ carregam o bit 1. A tarefa é classificar cada caractere impresso como tendo o bit 0 ou bit 1 inserido. Neste exemplo, a diferença $d_b = d_B - d_G$ é usada como métrica de detecção, como descrito em (8.4).

Os histogramas dos resultados da detecção são apresentados na Figura 9.30. As taxas de erro para este experimento são apresentadas na Tabela 9.7, na linha correspondente a d_b . Para comparação, essa tabela também apresenta as taxas de erro usando simples TLM, onde os três canais são modulados com o mesmo ganho, simulando uma modificação no nível cinza em um único canal. Com o mesmo equipamento e resoluções, os ganhos de modulação para TLM é de 0.81, o que causa $D = 39.59$, e também torna a modulação de difícil percepção. Note que a modulação de cor apresenta uma taxa de erro mais baixa em comparação a modulação de luminância simples.

9.10.2 Modulação no Canal Vermelho

Este experimento é similar ao anterior, no entanto o canal vermelho é modulado com um ganho $w_{R_i} = 0.85$ para $i = 2, 4, \dots, K$. Este valor de ganho foi modificado tal que a distorção D mantém-se a mesma que no caso do canal azul, ou seja, $D = 34.67$. Neste exemplo, a diferença $d_r = d_R - d_G$ é usada como métrica de detecção, como descrito em (8.4). O histograma dos resultados da detecção e as taxas de erro para este experimento são dados na Figura 9.31 e na Tabela 9.7, respectivamente. Note que quando a modulação não é feita (bit 0), diferenças entre as médias dos canais vermelho e verde não são esperadas, indo de acordo com os resultados experimentais.

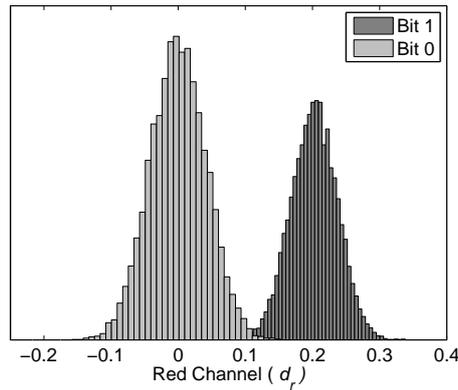


Figura 9.31: Histograma da métrica de detecção d_R , para o canal vermelho.

Tabela 9.7: Taxas de erro experimental para TCM e TLM.

Tipo de Detecção	Número de Erros	Taxa de Erro
TLM	139	4.6×10^{-3}
Modulação Azul (d_b)	35	1.2×10^{-3}
Modulação Vermelha (d_r)	53	1.7×10^{-3}
Modulação Vermelha-Azul (\mathbf{d}_2)	6	1.96×10^{-4}
Orientação (d_a)	1040	3.39×10^{-2}
Vermelho-Azul-Orientação (\mathbf{d}_3)	2	6.59×10^{-5}

9.10.3 Modulação Combinada

Neste experimento, os canais azul e vermelho são modulados nos caracteres c_i , $i = 2, 4, \dots, K$. O ganho de modulação é dado por $w_B = 0.76$ e $w_R = 0.88$, os quais causam uma distorção mínima para uma probabilidade de erro igual 0.0001, de acordo com o resultado apresentado na Figura 8.6. Neste caso, a distorção dos caracteres modulados é dada por $D = 39.03$.

Na detecção, a informação dos canais azul e vermelho é combinada de acordo com o classificador de Bayes, como descrito na Seção 8.3.2. A Figura 9.32 mostra um gráfico com a função de decisão obtida para esse conjunto de testes.

As taxas de erro experimentais combinando os dois canais com o classificador de Bayes são dadas na Tabela 9.7, na linha correspondente a \mathbf{d}_2 . Isso ilustra que a detecção usando dois canais de cores é mais eficiente do que uso de um único canal, ao custo de um leve aumento na distorção. No entanto, essa distorção é ainda dificilmente percebida por um observador humano.

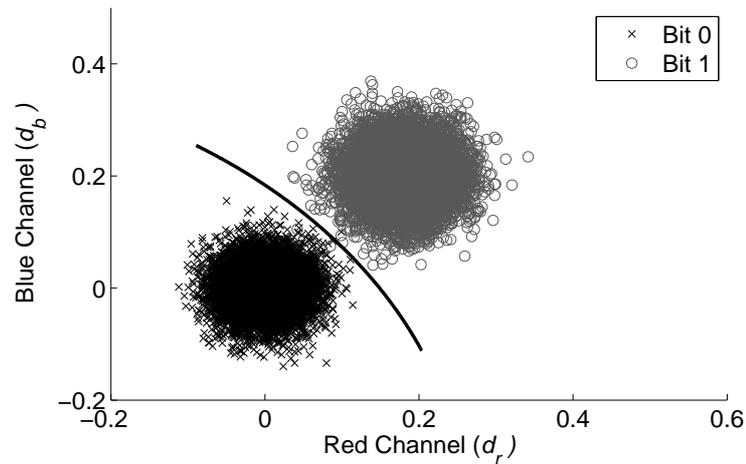


Figura 9.32: *Scatter plot* ilustrando a curva separando os pontos correspondentes ao bit 1 e ao bit 0.

9.10.4 Detecção Auxiliar por Ângulo

Este experimento apresenta o melhor desempenho quando se usa a abordagem descrita na Seção 8.5, em que a energia média d_a da saída do filtro direcional f_{dir} é usada como métrica de detecção. Os experimentos ilustram que quando d_a é usada sozinha, esta não apresenta uma taxa de erro tão baixa quanto as métricas d_b e d_r , como mostrado na Tabela 9.7. No entanto, d_a pode ser combinada a d_b e d_r usado nos Experimentos 1 e 2 através da abordagem Bayesiana, para a redução da taxa de erro. Resultados usando esta abordagem também são dados na Tabela 9.7, na linha correspondente a \mathbf{d}_3 .

A Figura 9.33 mostra um gráfico 3-D mostrando a superfície separando os caracteres modulados dos não-modulados. O filtro direcional usado neste exemplo foi orientado em 165° , o qual corresponde ao ângulo do *halftone* (para o canal azul) adicionado de 90° .

9.10.5 Ganho de Modulação Variável

Este experimento observa as taxas de erro para ganhos diferentes no caso da modulação nos canais vermelho-azul. Em vez de se testar apenas para $w_{B_i} = 0.76$ e $w_{R_i} = 0.88$, $i = 2, 4, \dots, K$, os ganhos testados são $w_{R_i} = w_{B_i} = 0.97$, $w_{R_i} = w_{B_i} = 0.9$, $w_{R_i} = w_{B_i} = 0.84$. O objetivo deste experimento é avaliar quão acurado é o limite superior na taxa de erro, comparado aos os resultados práticos.

A Figura 9.34 mostra um *plot* com o limite superior teórico (linha cheia) na probabilidade de erro descrita por (8.14) derivada na análise da Seção 8.3, em função do ganho $w_R = w_B$. Visto que $w_R = w_B$, um *plot* bi-dimensional é usado para

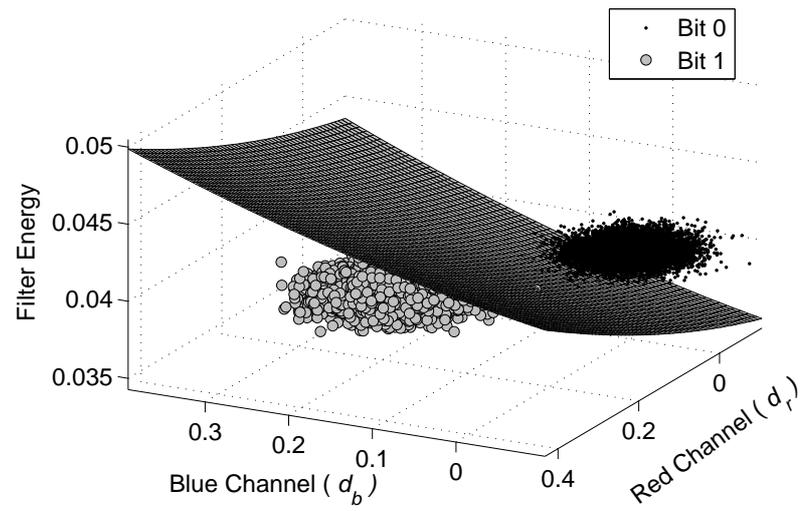


Figura 9.33: *Plot* ilustrando a superfície separando os valores de detecção para o bit 1 e bit 0, usando d_b , d_r e d_a como métrica de detecção.

ilustrar os erros, ao invés de um *plot* 3-D mostrado na Figura 8.4. A Figura 9.34 também mostra as taxas de erro experimentais (representadas por cruzes) em função da diferença entre a luminância do caractere original e o ganho $w_{B,R}$. Essa figura indica a similaridade entre os resultados teóricos e experimentais.

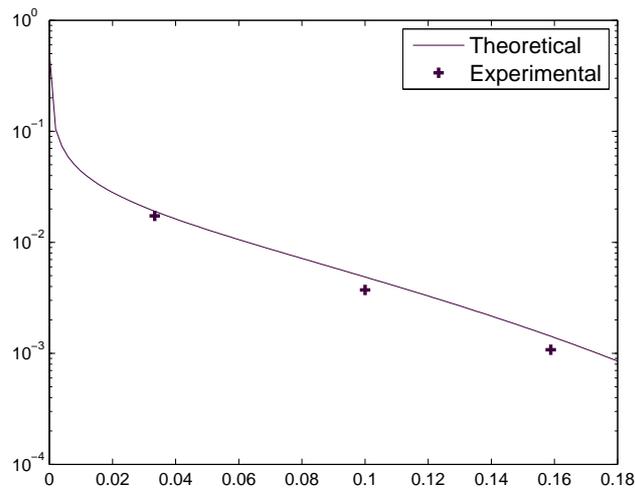


Figura 9.34: Probabilidade de erro para diferentes ganhos, usando $w_B = w_R = 0.97, 0.9, 0.84$. O eixo horizontal indica a diferença de luminância entre o caractere original e o modulado, para os canais vermelho e azul. A linha cheia representa a taxa de erro teórica derivada na Seção 8.3, e os pontos em cruz representam as taxas de erro experimental depois do PS.

9.11 Conclusões

Os resultados deste capítulo ilustraram que o sistema proposto pode eficientemente transmitir informação escondida em documentos de papel, com uma probabilidade de erro baixa o suficiente para aplicações práticas. É importante notar que códigos de correção de erros, os quais reduzem as taxas de erro, não foram empregados. Todos os resultados evidenciaram uma concordância entre as análises nos capítulos anteriores e a implementação prática. Uma conclusão importante dos experimentos é a utilidade da combinação de diferentes métricas de detecção, uma alternativa que apresenta uma taxa de erro mais baixa do que o uso de métricas de detecção separadamente.

Deve-se notar que as taxas de erro apresentadas foram obtidas com o uso de dispositivos de impressão e “escaneamento” não profissionais e papel de escritório comum. Com o uso de equipamentos profissionais, é razoável assumir que a taxa de erro seria perto de zero em documentos pequenos (tais quais cartões de identificação, passaportes, etc.) especialmente se uma transparência perceptual total não for requerida.

O próximo capítulo apresenta as conclusões finais e as contribuições gerais deste trabalho.

Capítulo 10

CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou um método simples porém inovativo para transmitir informação escondida em documentos de texto, sem que a aparência original do documento seja alterada. O método é chamado de modulação de luminância de texto (*text luminance modulation* - TLM) e suas aplicações são similares àsquelas de códigos de barras bidimensionais, com o benefício da invisibilidade. Adicionalmente, TLM pode servir como uma técnica de marca d'água para autenticação de texto em documentos impressos, representando informações de partes sensíveis do documento.

Em contraste com outros métodos de marca d'água de texto existentes e discutidos no Capítulo 3, o sistema de marca d'água para documentos impressos proposto é apropriado para quaisquer tipos de caracteres, símbolos e alinhamentos de texto, desde que o documento *original* seja representado na forma binária.

A solução proposta neste trabalho permite tons de cinza em textos originalmente pretos, por meio da adição de um padrão nas áreas pretas da imagem de texto. Resultados teóricos e experimentais indicaram que o sistema proposto pode ser suficientemente resistente ao canal de impressão e escaneamento para aplicações práticas, além de ser de simples implementação. Assume-se, no entanto, que os dispositivos utilizados (e também toner, papel, alinhamento da impressora, etc) estejam funcionando adequadamente. Apesar da essência deste trabalho ser baseada em TLM, a modulação de outras características do texto tais quais cor (*text color modulation* - TCM) e textura de *halftone* (*text halftone modulation* - THM) também foi estudada.

Buscando proporcionar ao leitor uma base dos fundamentos básicos de sistemas de marca d'água, este trabalho começou com uma breve revisão sobre as propriedades e aplicações de marcas d'água, voltadas ambas para o formato digital e impresso. As principais características e desafios encontrados em cada método foram discutidos, com a intenção de motivar o uso de TLM como um método eficiente para marcas d'água em texto. Essa revisão se faz importante para facilitar o apropriado

entendimento das contribuições apresentadas.

A respeito do estudo de TLM, diversos assuntos distintos foram abordados ao longo da pesquisa, dado que a solução proposta envolve diversas disciplinas tais como fundamentos de probabilidade e estatística, processamento de sinais e imagens, além de teoria de comunicações. Especificamente, significativo tempo de pesquisa foi dedicado ao escaneamento, *halftoning*, reconhecimento de padrões e métodos de classificação, estatísticas de ordens elevadas, codificação de informação, modelos de ruídos e aspectos fundamentais de teoria de detecção.

10.1 Resultados Principais

Pontos importantes de interesses teóricos e práticos baseados no TLM foram propostos e solucionados. As principais contribuições apresentadas neste trabalho são resumidas a seguir:

1. Diversos modelos para o processo de PS já foram apresentados na literatura. No entanto, os estudos desenvolvidos até então não apresentaram todos os aspectos que são relevantes para a análise do método TLM. Portanto, na Seção 4.1 um modelo analítico alternativo para o canal PS foi proposto, que inclui diversas características que influenciam o desempenho da detecção e permite um tratamento matemático nas análises. O processo físico é descrito em detalhes buscando justificar os modelos de ruído empregados. A determinação desses modelos de ruído resultou em uma tarefa essencial, que é válida não apenas para TLM, mas também para códigos de barra 2-D.
2. Para detectar a marca d'água inserida, métrica de detecção pela média da luminância dos pixels do caractere foi inicialmente proposta. No entanto, devido ao *halftoning* no processo de impressão, características como momentos estatísticos de ordens elevadas (variância, *skewness*, kurtosis) de uma área também são alterados em função da luminância de entrada. Essa característica é explorada nas Seções 6.2.2 e 6.3. Nessas seções, momentos de ordem elevada da região são usados como estatística de detecção, seguidas de análises estatísticas para avaliar a probabilidade de erro quando do uso dessas métricas.
3. Estendendo a idéia de modulação de luminância, este trabalho ainda analisa o uso de modulação de *halftone* no texto (THM). A aplicação do THM foi também discutida em [14, 100]. Usando THM, os caracteres de texto em um documento têm as suas luminâncias modificadas do preto padrão para o cinza, gerado com uma determinada matriz de *halftone*, de acordo com a mensagem a ser transmitida. Na seção 6.4, uma métrica espectral é proposta para detectar

a mensagem inserida. Baseada nessa métrica, uma análise da taxa de erro em THM é apresentada, considerando os efeitos do canal PS.

4. Como uma consequência natural de se ter múltiplas métricas, ao invés do emprego das métricas de detecção de maneira separada, na Seção 6.5 foi sugerida uma combinação das métricas, trazendo uma redução significativa nas taxas de erro. Para isso, o classificador de Bayes foi usado no estágio de detecção, através de uma filosofia de classificação de padrões. Apesar de que outras técnicas podem ser usadas para combinar diferentes métricas [75, 33], o classificador de Bayes [33] é adotado pois apresenta o mínimo erro médio.
5. Outra contribuição apresentada é relativa ao estudo de códigos de barras 2-D do tipo multi-nível. Apesar de diversas implementações de código de barras 2-D terem sido apresentadas na literatura [37, 62], códigos de barra multi-nível foram discutidos aqui uma vez que a detecção de símbolos pode ser melhorada usando as métricas de detecção apresentadas no Capítulo 6. Visto que códigos de barras 2-D multi-nível frequentemente imprimem os símbolos usando *half-toning*, a detecção de símbolo pode ser feita pela determinação dos segundo, terceiro e quarto momentos estatísticos do símbolo transmitido, além do valor médio de luminância. Similarmente ao TLM, a detecção da taxa de erro é reduzida pela combinação dos diferentes momentos em uma única métrica, de acordo com o classificador de Bayes.
6. Na seção 7.2, um protocolo de autenticação de documentos que pode ser aplicado a documentos eletrônicos e impressos é proposto e analisado. Usando a abordagem TLM, o sistema pode ser ajustado para ter um baixo impacto visual e, ao contrário de uma assinatura digital, que protege o código binário dos documentos, o protocolo proposto protege o conteúdo visual. Em contraste com os sistemas de marca d'água que transmitem uma mensagem escondida, o protocolo proposto classifica o documento como autêntico ou não-autêntico. O esquema proposto mistura a representação binária do texto original com uma chave que depende do conteúdo do texto. O vetor resultante da mistura é usado para criar um outro vetor de dimensão igual ao número de caracteres no documento. Esse vetor é usado como regra para modular cada caractere individualmente, possivelmente usando TLM.
7. No Capítulo 8, o conceito de TLM é estendido pelo uso da cor como uma característica modificável. Esse capítulo também apresenta uma métrica de detecção e uma análise determinando a detecção da taxa de erro em modulação de cor em texto (TCM), novamente considerando o modelo de canal PS assumido.

Adicionalmente, um modelo de impacto perceptual foi empregado para avaliar a diferença perceptual entre o caractere modificado e o não-modificado. Combinando esse modelo perceptual e os resultados da análise de erro na detecção, foi possível determinar os valores ótimos para a modulação da cor.

Em adição aos itens enumerados acima, os experimentos no Capítulo 9 validaram as análises e ilustraram a aplicabilidade do método. O principal objetivo era ilustrar, através das simulações de Monte Carlo, o desempenho do TLM como um método de marca d'água que permite reduzir fraudes ou simplesmente carregar informação adicional em documentos impressos. Adicionalmente, este trabalho objetivou a validação do modelo do canal de PS e da análise teórica a respeito das taxas de erro. O desempenho das diversas métricas de detecção propostas no Capítulo 6 foram comparadas, ilustrando que, para os dispositivos de impressão e escaneamento testados, as métricas espectrais e de cor são mais eficientes do que a simples modulação de luminância.

Buscou-se, na medida do possível, publicar os resultados desta tese em congressos e periódicos. As principais publicações cujo foco tem relação com o material apresentado neste trabalho podem ser encontradas em [101, 102, 103, 104, 105, 106, 107, 108, 109, 110].

10.2 Trabalho Futuro

Com respeito a trabalhos futuros, uma tarefa desafiante seria atingir uma taxa de erro de detecção aceitável independentemente dos aparatos de impressão e escaneamento usados. Entre as alternativas de detecção indicadas nos itens acima, é importante identificar aquelas que podem proporcionar invariância da maneira mais eficiente possível. Dessa forma, dependendo do ambiente de aplicação, pode-se trocar desempenho na detecção por robustez a diferentes dispositivos.

Outro ponto importante a respeito da aplicação prática do TLM é o efeito de possíveis degradações sofridas pelo papel. Características estatísticas e morfológicas de marcas de dobras, manchas e sujeira, por exemplo, devem ser identificadas para reduzir a probabilidade de erro devido a essas fontes de ruído.

Depois de definir uma função específica de inserção/detecção, técnicas de pré-processamento para a imagem recebida podem ser determinadas. Exemplos são pré-filtragem, equalização de histograma e outros, que podem ser aplicados antes da detecção.

Finalmente, é importante observar que o TLM pode ser implementado de forma independente ou combinado com muitos dos outros métodos de marca d'água de texto, tais quais aqueles discutidos no Capítulo 3. Neste sentido, esses métodos não deveriam ser vistos como competitivos, mas possivelmente como técnicas complementares, fazendo de marcas d'água digitais uma solução prática e eficiente para autenticação de documentos.

Apêndice A

Variância da Variância Amostral

Este apêndice deriva os resultados apresentados nas equações (6.12) e (6.13).

Seja

$$d_{V_i} = \frac{1}{N_i} \sum_{n=1}^{N_i} [y_i(n) - \bar{y}_i]^2 \quad (\text{A.1})$$

em que $y_i(n) = \alpha_i w + \alpha_i \eta_2(n) * h(n) + \eta_1(n) * h(n) + \eta_3(n)$ e $\bar{y}_i = \sum_{n=1}^{N_i} y_i(n)$ é a média amostral de y_i .

Os termos η_1 , η_2 e η_3 são vetores aleatórios decorrelacionados, mutuamente independentes, de média zero e tamanho N_i . O termo α_i é constante em n , porém varia para cada realização i , satisfazendo $\alpha \sim \mathcal{N}(\mu_\alpha, \sigma_\alpha^2)$. O objetivo é determinar a média μ_{d_V} e a variância $\sigma_{d_V}^2$ para um dado w correspondente a um símbolo transmitido (bit 1 ou bit 0, para $S = 2$). Na análise a seguir, o índice i é eliminado para uma notação mais compacta.

A.1 Média

$$\mu_{d_V} = E \left\{ \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N [\alpha w + \alpha \eta_2(n) * h(n) + \eta_1(n) * h(n) + \eta_3(n) - \bar{y}]^2 \right\} \quad (\text{A.2})$$

Assuma que $\eta_l(n)$, $l = 1, 2, 3$ seja ergódico na média, ou seja, $\overline{\eta_l(n)} = \mu_{\eta_l}$, e assumamos que $\mu_{\eta_l} = 0$. Além disso, assumamos que, dado $\sum_n h(n) = 1$, a média amostral $\overline{\eta_2(n) * h(n)} = \overline{\eta_2(n)}$, que é considerada igual a zero. Com essas considerações, (A.2)

pode ser escrita como

$$\begin{aligned} \mu_{d_V} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N E\{\alpha^2[\eta_2(n) * h(n)]^2\} + E\{[\eta_1(n) * h(n)]^2 \\ + [\eta_3(n)]^2\} \end{aligned} \quad (\text{A.3})$$

Seja $z_2(n) = \eta_2(n) * h(n)$. A variância de saída $E\{z_2^2(n)\}$ do sistema linear h com entrada aleatória η_2 é dada por $E\{z_2^2(n)\} = r_{z_2}(0) = r_h(l) * r_{\eta_2}(l)|_{l=0}$ [67], em que r_{z_2} , r_{η_2} , e r_h representam as funções de autocorrelação de z_2 , η_2 e da resposta ao impulso de h , respectivamente. Visto que η_2 é modelado como ruído decorrelacionado, r_{η_2} é representado por um impulso na origem com amplitude $\sigma_{\eta_2}^2$ e $r_{\eta_2}(0) = \sigma_{\eta_2}^2$. Uma análise similar é válida para $\eta_1(n) * h(n)$, fazendo com que

$$\mu_{d_V} = (\mu_{\alpha}^2 + \sigma_{\alpha}^2)\sigma_{\eta_2}^2 r_h(0) + \sigma_{\eta_1}^2 r_h(0) + \sigma_{\eta_3}^2 \quad (\text{A.4})$$

que é o resultado apresentado em (6.12).

A.2 Variância

$$\sigma_{d_V}^2 = E\{[d_V - E\{d_V\}]^2\} = E\{d_V^2\} - E\{d_V\}^2 \quad (\text{A.5})$$

A.3 Valor Médio Quadrático

$$E\{d_V^2\} = E\left\{\left(\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N [y(n) - \bar{y}]^2\right)^2\right\} \quad (\text{A.6})$$

Relembrando as considerações estatísticas assumidas para $\eta_1(n)$, $\eta_2(n)$ e $\eta_3(n)$, o valor esperado em (A.6) pode ser determinado por meio da aplicação da propriedade de fatoração dos momentos Gaussianos para variáveis Gaussianas reais, que diz que $E\{x^2(m)x^2(n)\} = E\{x^2(m)\}E\{x^2(n)\} + 2E\{x(m)x(n)\}^2$ [67]. Apesar de η_2 não ser Gaussiana, o resultado de $\eta_2(n) * h(n)$ é assumido aproximadamente gaussiano e a propriedade da fatoração pode ser aplicada. A equação (A.6) então se torna,

$$\begin{aligned}
E\{d_V^2\} &= (3\sigma_\alpha^4 + 6\sigma_\alpha^2\mu_\alpha^2 + \mu_\alpha^4)\sigma_{\eta_2}^4 r_h^2(0)\left(1 + \frac{2}{N}\right) \\
&\quad + (\mu_\alpha^2 + \sigma_\alpha^2)\left[2\sigma_{\eta_2}^2\sigma_{\eta_1}^2 r_h^2(0) + 2\sigma_{\eta_2}^2\sigma_{\eta_3}^2 r_h(0)\right] \\
&\quad + \frac{4}{N}\sigma_{\eta_2}^2\sigma_{\eta_1}^2 r_h^2(0) + \frac{4}{N}\sigma_{\eta_2}^2\sigma_{\eta_3}^2 r_h(0)] \\
&\quad + \sigma_{\eta_1}^4 r_h^2(0)\left(1 + \frac{2}{N}\right) + 2\sigma_{\eta_1}^2\sigma_{\eta_3}^2 r_h(0) \\
&\quad + \frac{4}{N}\sigma_{\eta_1}^2\sigma_{\eta_3}^2 r_h(0) + \sigma_{\eta_3}^4\left(1 + \frac{2}{N}\right)
\end{aligned} \tag{A.7}$$

Substituindo as equações (A.2) e (A.7) em (A.5) tem-se que

$$\begin{aligned}
\sigma_{d_V}^2 &= \sigma_{\eta_2}^4 r_h^2(0)\left(2\sigma_\alpha^4 + 4\sigma_\alpha^2\mu_\alpha^2 + \frac{2(3\sigma_\alpha^4 + 6\sigma_\alpha^2\mu_\alpha^2 + \mu_\alpha^4)}{N}\right) \\
&\quad + \frac{2\sigma_{\eta_1}^4 r_h^2(0)}{N} + \frac{2\sigma_{\eta_3}^4}{N} + \frac{4}{N}\left([\mu_\alpha^2 + \sigma_\alpha^2][\sigma_{\eta_2}^2\sigma_{\eta_1}^2 r_h^2(0) \right. \\
&\quad \left. + \sigma_{\eta_2}^2\sigma_{\eta_3}^2 r_h(0)] + \sigma_{\eta_1}^2\sigma_{\eta_3}^2 r_h(0)\right)
\end{aligned} \tag{A.8}$$

que é o resultado apresentado em (6.13). Como discutido no Capítulo 6, quando N é muito grande, o que ocorre na prática, α e η_2 são os termos de ruído predominantes, e (A.8) pode ser simplificado para

$$\sigma_{d_V}^2 = \sigma_{\eta_2}^4 r_h^2(0)(2\sigma_\alpha^4 + 4\sigma_\alpha^2\mu_\alpha^2) \tag{A.9}$$

Apêndice B

Momento de Terceira Ordem

Este apêndice deriva o resultado apresentado na equação (6.18).

$$\begin{aligned}\mu_y &= E\{[(\eta_2(n) * h(n))]^3\} \\ &= E\left\{\left(\sum_{k=-\infty}^{\infty} h(k)\eta_2(n-k)\right)^3\right\} \\ &= E\left\{\sum_{k=-\infty}^{\infty} \sum_{l=-\infty}^{\infty} \sum_{r=-\infty}^{\infty} h(k)h(l)h(r) \right. \\ &\quad \left. \eta_2(n-k)\eta_2(n-l)\eta_2(n-r)\right\}\end{aligned}\tag{B.1}$$

Seja

$$h_3 = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \sum_{l=-\infty}^{\infty} \sum_{r=-\infty}^{\infty} h(k)h(l)h(r)\tag{B.2}$$

Relembrando que η_2 é ruído descorrelacionado e $\eta_2 \in \{-s_0, 1-s_0\}$ com probabilidades $\{1-s_0, s_0\}$ leva a

$$E\{\eta_2(n-k)\eta_2(n-l)\eta_2(n-r)\} \neq 0 \Leftrightarrow k=l=r\tag{B.3}$$

e

$$\begin{aligned}E\{\eta_2^3\} &= \int_{-\infty}^{\infty} \eta_2^3 f_{\eta_2}(\eta_2) d\eta_2 \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \eta_2^3 [\delta(\eta_2 + s_0)(1-s_0) + \delta(\eta_2 - 1 + s_0)s_0] d\eta_2 \\ &= (-s_0)^3(1-s_0) + (1-s_0)^3 s_0\end{aligned}\tag{B.4}$$

Portanto, a equação (B.1) pode ser escrita como

$$\mu_y = h_3[(-s_0)^3(1 - s_0) + (1 - s_0)^3 s_0] \quad (\text{B.5})$$

em que h_3 é dado em (B.2).

Apêndice C

Momento de Quarta Ordem

Este apêndice deriva o resultado apresentado na equação (6.21).

$$\begin{aligned}\mu_y &= E\{[(\eta_2(n) * h(n))^4]\} = E\left\{\left(\sum_{k=-\infty}^{\infty} h(k)\eta_2(n-k)\right)^4\right\} \\ &= E\left\{\sum_{k=-\infty}^{\infty} \sum_{l=-\infty}^{\infty} \sum_{r=-\infty}^{\infty} \sum_{s=-\infty}^{\infty} h(k)h(l)h(r)h(s) \right. \\ &\quad \left. \eta_2(n-k)\eta_2(n-l)\eta_2(n-r)\eta_2(n-s)\right\}\end{aligned}\tag{C.1}$$

Seja

$$h_4 = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \sum_{l=-\infty}^{\infty} \sum_{r=-\infty}^{\infty} \sum_{s=-\infty}^{\infty} h(k)h(l)h(r)h(s).\tag{C.2}$$

Relembrando que η_2 é ruído decorrelacionado e $\eta_2 \in \{-s_0, 1-s_0\}$ com probabilidades $\{1-s_0, s_0\}$ obtêm-se

$$\begin{aligned}E\{\eta_2^4\} &= \int_{-\infty}^{\infty} \eta_2^4 f_{\eta_2}(\eta_2) d\eta_2 \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \eta_2^4 [\delta(\eta_2 + s_0)(1-s_0) + \delta(\eta_2 - 1 + s_0)s_0] d\eta_2 \\ &= (-s_0)^4(1-s_0) + (1-s_0)^4 s_0\end{aligned}\tag{C.3}$$

Portanto, (C.1) pode ser escrita como

$$\mu_y = h_4(-s_0)^4(1-s_0) + (1-s_0)^4 s_0\tag{C.4}$$

Apêndice D

Valor Esperado e Variância da Potência Média Amostral

Este apêndice deriva os resultados apresentados nas equações (6.27) e (6.28).

D.1 Valor Esperado

O valor esperado μ_d de uma medida d_l apresentada em (6.23) é dado por:

$$\begin{aligned}\mu_d &= E\{d_l\} \\ &= E\left\{\frac{1}{W} \sum_{w=W(l-1)}^{lW-1} |Y(w)|^2\right\} \\ &= E\left\{\frac{1}{W} \sum_{w=W(l-1)}^{lW-1} \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \alpha s_0 * h_{ps}(n) + \alpha \eta_2(n) * h_p s(n) + \eta_1(n) * h_p s(n) \right. \\ &\quad \left. + \eta_3(n) e^{-j2\pi n w/N} \sum_{m=0}^{N-1} \alpha s_0 * h_{ps}(n) + \alpha \eta_2(n) * h_p s(n) + \eta_1(n) * h_p s(n) \right. \\ &\quad \left. + \eta_3(n) e^{j2\pi n w/N}\right\}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= E \left\{ \frac{1}{WN} \sum_{w=W(l-1)}^{lW-1} \left(\alpha s_0 H_{ps}(w) \delta(w) + \alpha H_{ps}(w) \sum_{m=0}^{N-1} \eta_2(m) e^{-j2\pi mw/N} \right. \right. \\
&\quad \left. \left. + H_{ps}(w) \sum_{m=0}^{N-1} \eta_1(m) e^{-j2\pi mw/N} + \sum_{m=0}^{N-1} \eta_3(m) e^{-j2\pi mw/N} \right) \right. \\
&\quad \left(\alpha s_0 H_{ps}(w) \delta(w) + \alpha H_{ps}(w) \sum_{n=0}^{N-1} \eta_2(n) e^{-j2\pi nw/N} \right. \\
&\quad \left. \left. + H_{ps}(w) \sum_{n=0}^{N-1} \eta_1(n) e^{-j2\pi nw/N} + \sum_{n=0}^{N-1} \eta_3(n) e^{-j2\pi nw/N} \right) \right\}
\end{aligned} \tag{D.1}$$

Expandindo a equação acima pode-se escrever

$$\begin{aligned}
\mu_d = & \frac{1}{WN} \sum_{w=W(l-1)}^{lW-1} E \left\{ \alpha s_0 H_{ps}(w) \delta(w) \alpha s_0 H_{ps}^*(w) \delta(w) \right\} \\
& + E \left\{ \alpha s_0 H_{ps}(w) \delta(w) \alpha H_{ps}^*(w) \sum_{n=0}^{N-1} \eta_2(n) e^{j2\pi n w/N} \right\} \\
& + E \left\{ \alpha s_0 H_{ps}(w) \delta(w) H_{ps}^*(w) \sum_{n=0}^{N-1} \eta_1(n) e^{j2\pi n w/N} \right\} \\
& + E \left\{ \alpha s_0 H_{ps}(w) \delta(w) \sum_{n=0}^{N-1} \eta_3(n) e^{j2\pi n w/N} \right\} \\
& + E \left\{ \alpha H_{ps}(w) \sum_{m=0}^{N-1} \eta_2(m) e^{-j2\pi m w/N} \alpha s_0 H_{ps}^*(w) \delta(w) \right\} \\
& + E \left\{ \alpha H_{ps}(w) \sum_{m=0}^{N-1} \eta_2(m) e^{-j2\pi m w/N} \alpha H_{ps}^*(w) \sum_{n=0}^{N-1} \eta_2(n) e^{j2\pi n w/N} \right\} \\
& + E \left\{ \alpha H_{ps}(w) \sum_{m=0}^{N-1} \eta_2(m) e^{-j2\pi m w/N} H_{ps}^*(w) \sum_{n=0}^{N-1} \eta_1(n) e^{j2\pi n w/N} \right\} \\
& + E \left\{ \alpha H_{ps}(w) \sum_{m=0}^{N-1} \eta_2(m) e^{-j2\pi m w/N} \sum_{n=0}^{N-1} \eta_3(n) e^{j2\pi n w/N} \right\} \\
& + E \left\{ H_{ps}(w) \sum_{m=0}^{N-1} \eta_1(m) e^{-j2\pi m w/N} \alpha s_0 H_{ps}^*(w) \delta(w) \right\} \\
& + E \left\{ H_{ps}(w) \sum_{m=0}^{N-1} \eta_1(m) e^{-j2\pi m w/N} \alpha H_{ps}^*(w) \sum_{n=0}^{N-1} \eta_2(n) e^{j2\pi n w/N} \right\} \\
& + E \left\{ H_{ps}(w) \sum_{m=0}^{N-1} \eta_1(m) e^{-j2\pi m w/N} H_{ps}^*(w) \sum_{n=0}^{N-1} \eta_1(n) e^{j2\pi n w/N} \right\} \\
& + E \left\{ H_{ps}(w) \sum_{m=0}^{N-1} \eta_1(m) e^{-j2\pi m w/N} \sum_{n=0}^{N-1} \eta_3(n) e^{j2\pi n w/N} \right\} \\
& + E \left\{ \sum_{m=0}^{N-1} \eta_3(m) e^{-j2\pi m w/N} \alpha s_0 H_{ps}^*(w) \delta(w) \right\} \\
& + E \left\{ \sum_{m=0}^{N-1} \eta_3(m) e^{-j2\pi m w/N} \alpha H_{ps}^*(w) \sum_{n=0}^{N-1} \eta_2(n) e^{j2\pi n w/N} \right\} \\
& + E \left\{ \sum_{m=0}^{N-1} \eta_3(m) e^{-j2\pi m w/N} H_{ps}^*(w) \sum_{n=0}^{N-1} \eta_1(n) e^{j2\pi n w/N} \right\} \\
& + E \left\{ \sum_{m=0}^{N-1} \eta_3(m) e^{-j2\pi m w/N} \sum_{n=0}^{N-1} \eta_3(n) e^{j2\pi n w/N} \right\}
\end{aligned} \tag{D.2}$$

Considerando as características estatísticas (média zero, mutuamente independentes) assumida para os termos de ruído no canal PS, os termos com produtos cruzados são cancelados e o valor esperado em (D.2) torna-se

$$\begin{aligned}
\mu_d &= \frac{1}{WN} \sum_{w=W(l-1)}^{lW-1} E \left\{ \alpha s_0 H_{ps}(w) \delta(w) \alpha s_0 H_{ps}^*(w) \delta(w) \right\} \\
&+ E \left\{ \alpha H_{ps}(w) \sum_{m=0}^{N-1} \eta_2(m) e^{-j2\pi m w/N} \alpha H_{ps}^*(w) \sum_{n=0}^{N-1} \eta_2(n) e^{j2\pi n w/N} \right\} \\
&+ E \left\{ H_{ps}(w) \sum_{m=0}^{N-1} \eta_1(m) e^{-j2\pi m w/N} H_{ps}^*(w) \sum_{n=0}^{N-1} \eta_1(n) e^{j2\pi n w/N} \right\} \\
&+ E \left\{ \sum_{m=0}^{N-1} \eta_3(m) e^{-j2\pi m w/N} \sum_{n=0}^{N-1} \eta_3(n) e^{j2\pi n w/N} \right\} \\
\mu_d &= \frac{1}{WN} \sum_{w=W(l-1)}^{lW-1} \alpha s_0 H_{ps}(w) \delta(w) \alpha s_0 H_{ps}^*(w) \delta(w) \\
&+ \alpha^2 H_{ps}(w) H_{ps}^*(w) \sum_{m=0}^{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} E \{ \eta_2(m) \eta_2(n) \} e^{j2\pi(m-n)w/N} \\
&+ H_{ps}(w) H_{ps}^*(w) \sum_{m=0}^{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} E \{ \eta_1(m) \eta_1(n) \} e^{j2\pi(m-n)w/N} \\
&+ \sum_{m=0}^{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} E \{ \eta_3(m) \eta_3(n) \} e^{j2\pi(m-n)w/N} \\
\mu_d &= \frac{1}{W} \sum_{w=W(l-1)}^{lW-1} \frac{\alpha^2 s_0^2 H_{ps}(w) H_{ps}^*(w) \delta(w)}{N} + \alpha^2 H_{ps}(w) H_{ps}^*(w) \sigma_{\eta_2}^2 \\
&+ H_{ps}(w) H_{ps}^*(w) \sigma_{\eta_1}^2 + \sigma_{\eta_3}^2
\end{aligned} \tag{D.3}$$

que é o resultado apresentado em (6.27).

D.2 Variância

A variância σ_d^2 de uma medida d_l é dada por:

$$\begin{aligned}
\sigma_d^2 &= E\{d^2\} - \mu_d^2 \\
&= E \left\{ \left(\frac{1}{W} \sum_{w=W(l-1)}^{lW-1} |Y(w)|^2 \right)^2 \right\} - \mu_d^2 \\
&= E \left\{ \frac{1}{W} \sum_{w=W(l-1)}^{lW-1} |Y(w)|^2 \frac{1}{W} \sum_{v=W(l-1)}^{lW-1} |Y(v)|^2 \right\} - \mu_d^2
\end{aligned} \tag{D.4}$$

Novamente, relembando as características estatísticas (média zero, mutuamente independentes) assumida para os termos de ruído no canal PS, a equação acima pode ser escrita como

$$\begin{aligned}
\sigma_d^2 = & \frac{1}{W^2 N^2} \sum_{w=W(l-1)}^{lW-1} \sum_{v=W(l-1)}^{lW-1} E \left\{ \alpha s_0 H_{ps}(w) \delta(w) \alpha s_0 H_{ps}^*(w) \delta(w) \alpha s_0 H_{ps}(v) \right. \\
& \left. \delta(v) \alpha s_0 H_{ps}^*(v) \delta(v) \right\} \\
& + E \left\{ \alpha s_0 H_{ps}(w) \delta(w) \alpha s_0 H_{ps}^*(w) \delta(w) \alpha H_{ps}(v) \sum_{m=0}^{N-1} \eta_2(m) e^{-j2\pi mv/N} \alpha H_{ps}^*(v) \right. \\
& \left. \sum_{n=0}^{N-1} \eta_2(n) e^{j2\pi nv/N} \right\} \\
& + E \left\{ \alpha s_0 H_{ps}(w) \delta(w) \alpha s_0 H_{ps}^*(w) \delta(w) H_{ps}(v) \sum_{m=0}^{N-1} \eta_1(m) e^{-j2\pi mv/N} H_{ps}^*(v) \right. \\
& \left. \sum_{n=0}^{N-1} \eta_1(n) e^{j2\pi nv/N} \right\} \\
& + E \left\{ \alpha s_0 H_{ps}(w) \delta(w) \alpha s_0 H_{ps}^*(w) \delta(w) \sum_{m=0}^{N-1} \eta_3(m) e^{-j2\pi mv/N} \sum_{n=0}^{N-1} \eta_3(n) e^{j2\pi nv/N} \right\} \\
& + E \left\{ \alpha H_{ps}(w) \sum_{m=0}^{N-1} \eta_2(m) e^{-j2\pi mw/N} \alpha H_{ps}^*(w) \sum_{n=0}^{N-1} \eta_2(n) e^{j2\pi nw/N} \alpha s_0 H_{ps}(v) \right. \\
& \left. \delta(v) \alpha s_0 H_{ps}^*(v) \delta(v) \right\} \\
& + E \left\{ \alpha H_{ps}(w) \sum_{m=0}^{N-1} \eta_2(m) e^{-j2\pi mw/N} \alpha H_{ps}^*(w) \sum_{n=0}^{N-1} \eta_2(n) e^{j2\pi nw/N} \alpha H_{ps}(v) \right. \\
& \left. \sum_{m=0}^{N-1} \eta_2(m) e^{-j2\pi mv/N} \alpha H_{ps}^*(v) \sum_{n=0}^{N-1} \eta_2(n) e^{j2\pi nv/N} \right\} \\
& + E \left\{ \alpha H_{ps}(w) \sum_{m=0}^{N-1} \eta_2(m) e^{-j2\pi mw/N} \alpha H_{ps}^*(w) \sum_{n=0}^{N-1} \eta_2(n) e^{j2\pi nw/N} H_{ps}(v) \right. \\
& \left. \sum_{m=0}^{N-1} \eta_1(m) e^{-j2\pi mv/N} H_{ps}^*(v) \sum_{n=0}^{N-1} \eta_1(n) e^{j2\pi nv/N} \right\} \\
& + E \left\{ \alpha H_{ps}(w) \sum_{m=0}^{N-1} \eta_2(m) e^{-j2\pi mw/N} \alpha H_{ps}^*(w) \sum_{n=0}^{N-1} \eta_2(n) e^{j2\pi nw/N} \sum_{m=0}^{N-1} \eta_3(m) e^{-j2\pi mv/N} \right. \\
& \left. \sum_{n=0}^{N-1} \eta_3(n) e^{j2\pi nv/N} \right\}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + E \left\{ H_{ps}(w) \sum_{m=0}^{N-1} \eta_1(m) e^{-j2\pi mw/N} H_{ps}^*(w) \sum_{n=0}^{N-1} \eta_1(n) e^{j2\pi nw/N} \alpha s_0 H_{ps}(v) \right. \\
& \quad \left. \delta(v) \alpha s_0 H_{ps}^*(v) \delta(v) \right\} \\
& + E \left\{ H_{ps}(w) \sum_{m=0}^{N-1} \eta_1(m) e^{-j2\pi mw/N} H_{ps}^*(w) \sum_{n=0}^{N-1} \eta_1(n) e^{j2\pi nw/N} \alpha H_{ps}(v) \right. \\
& \quad \left. \sum_{m=0}^{N-1} \eta_2(m) e^{-j2\pi mv/N} \alpha H_{ps}^*(v) \sum_{n=0}^{N-1} \eta_2(n) e^{j2\pi nv/N} \right\} \\
& + E \left\{ H_{ps}(w) \sum_{m=0}^{N-1} \eta_1(m) e^{-j2\pi mw/N} H_{ps}^*(w) \sum_{n=0}^{N-1} \eta_1(n) e^{j2\pi nw/N} H_{ps}(v) \right. \\
& \quad \left. \sum_{m=0}^{N-1} \eta_1(m) e^{-j2\pi mv/N} H_{ps}^*(v) \sum_{n=0}^{N-1} \eta_1(n) e^{j2\pi nv/N} \right\} \\
& + E \left\{ H_{ps}(w) \sum_{m=0}^{N-1} \eta_1(m) e^{-j2\pi mw/N} H_{ps}^*(w) \sum_{n=0}^{N-1} \eta_1(n) e^{j2\pi nw/N} \right. \\
& \quad \left. \sum_{m=0}^{N-1} \eta_3(m) e^{-j2\pi mv/N} \sum_{n=0}^{N-1} \eta_3(n) e^{j2\pi nv/N} \right\} \\
& + E \left\{ \sum_{m=0}^{N-1} \eta_3(m) e^{-j2\pi mw/N} \sum_{n=0}^{N-1} \eta_3(n) e^{j2\pi nw/N} \alpha s_0 H_{ps}(v) \delta(v) \alpha s_0 H_{ps}^*(v) \delta(v) \right\} \\
& + E \left\{ \sum_{m=0}^{N-1} \eta_3(m) e^{-j2\pi mw/N} \sum_{n=0}^{N-1} \eta_3(n) e^{j2\pi nw/N} \alpha H_{ps}(v) \sum_{m=0}^{N-1} \eta_2(m) e^{-j2\pi mv/N} \alpha H_{ps}^*(v) \right. \\
& \quad \left. \sum_{n=0}^{N-1} \eta_2(n) e^{j2\pi nv/N} \right\} \\
& + E \left\{ \sum_{m=0}^{N-1} \eta_3(m) e^{-j2\pi mw/N} \sum_{n=0}^{N-1} \eta_3(n) e^{j2\pi nw/N} H_{ps}(v) \sum_{m=0}^{N-1} \eta_1(m) e^{-j2\pi mv/N} H_{ps}^*(v) \right. \\
& \quad \left. \sum_{n=0}^{N-1} \eta_1(n) e^{j2\pi nv/N} \right\} \\
& + E \left\{ \sum_{m=0}^{N-1} \eta_3(m) e^{-j2\pi mw/N} \sum_{n=0}^{N-1} \eta_3(n) e^{j2\pi nw/N} \sum_{m=0}^{N-1} \eta_3(m) e^{-j2\pi mv/N} \right. \\
& \quad \left. \sum_{n=0}^{N-1} \eta_3(n) e^{j2\pi nv/N} \right\} \\
& - \mu_d^2
\end{aligned} \tag{D.5}$$

$$\begin{aligned}
\sigma_d^2 = & \frac{1}{W^2 N^2} \sum_{w=W(l-1)}^{lW-1} \sum_{v=W(l-1)}^{lW-1} s_0^4 E \left\{ \alpha^4 \right\} H_{ps}^2(0) H_{ps}^{*2}(0) \\
& + s_0^2 E \left\{ \alpha^4 \right\} \sum_{m=0}^{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} E \left\{ \eta_2(m) \eta_2(n) \right\} e^{-j2\pi v(m-n)/N} |H_{ps}(0)|^2 |H_{ps}(v)|^2 \\
& + s_0^2 E \left\{ \alpha^2 \right\} \sum_{m=0}^{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} E \left\{ \eta_1(m) \eta_1(n) \right\} e^{-j2\pi v(m-n)/N} |H_{ps}(0)|^2 |H_{ps}(v)|^2 \\
& + s_0^2 E \left\{ \alpha^2 \right\} \sum_{m=0}^{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} E \left\{ \eta_3(m) \eta_3(n) \right\} e^{-j2\pi v(m-n)/N} |H_{ps}(0)|^2 \\
& + \sum_{m=0}^{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} E \left\{ \eta_2(m) \eta_2(n) \right\} e^{-j2\pi w(m-n)/N} s_0^2 E \left\{ \alpha^4 \right\} |H_{ps}(w)|^2 |H_{ps}(0)|^2 \\
& + \sum_{m=0}^{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{r=0}^{N-1} \sum_{s=0}^{N-1} E \left\{ \eta_2(m) \eta_2(n) \eta_2(r) \eta_2(s) \right\} e^{-j2\pi w(m-n)/N} e^{-j2\pi v(r-s)/N} \\
& \quad E \left\{ \alpha^4 \right\} |H_{ps}(w)|^2 |H_{ps}(v)|^2 \\
& + \sum_{m=0}^{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} E \left\{ \eta_2(m) \eta_2(n) \right\} e^{-j2\pi w(m-n)/N} \sum_{r=0}^{N-1} \sum_{s=0}^{N-1} E \left\{ \eta_1(r) \eta_1(s) \right\} e^{-j2\pi v(r-s)/N} \\
& \quad E \left\{ \alpha^2 \right\} |H_{ps}(w)|^2 |H_{ps}(v)|^2 \\
& + \sum_{m=0}^{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} E \left\{ \eta_2(m) \eta_2(n) \right\} e^{-j2\pi w(m-n)/N} \sum_{r=0}^{N-1} \sum_{s=0}^{N-1} E \left\{ \eta_3(r) \eta_3(s) \right\} e^{-j2\pi v(r-s)/N} \\
& \quad E \left\{ \alpha^2 \right\} |H_{ps}(w)|^2 \\
& + \sum_{m=0}^{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} E \left\{ \eta_1(m) \eta_1(n) \right\} e^{-j2\pi w(m-n)/N} s_0^2 E \left\{ \alpha^2 \right\} |H_{ps}(w)|^2 |H_{ps}(0)|^2 \\
& + \sum_{m=0}^{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} E \left\{ \eta_1(m) \eta_1(n) \right\} e^{-j2\pi w(m-n)/N} \sum_{r=0}^{N-1} \sum_{s=0}^{N-1} E \left\{ \eta_2(r) \eta_2(s) \right\} e^{-j2\pi v(r-s)/N} \\
& \quad E \left\{ \alpha^2 \right\} |H_{ps}(w)|^2 |H_{ps}(v)|^2 \\
& + \sum_{m=0}^{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{r=0}^{N-1} \sum_{s=0}^{N-1} E \left\{ \eta_1(m) \eta_1(n) \eta_1(r) \eta_1(s) \right\} e^{-j2\pi w(m-n)/N} e^{-j2\pi v(r-s)/N} \\
& \quad |H_{ps}(w)|^2 |H_{ps}(v)|^2
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \sum_{m=0}^{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} E \left\{ \eta_1(m) \eta_1(n) \right\} e^{-j2\pi w(m-n)/N} \sum_{r=0}^{N-1} \sum_{s=0}^{N-1} E \left\{ \eta_3(r) \eta_3(s) \right\} e^{-j2\pi v(r-s)/N} \\
& \quad |H_{ps}(w)|^2 \\
& + \sum_{m=0}^{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} E \left\{ \eta_3(m) \eta_3(n) \right\} e^{-j2\pi w(m-n)/N} s_0^2 E \left\{ \alpha^2 \right\} |H_{ps}(0)|^2 \\
& + \sum_{m=0}^{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} E \left\{ \eta_3(m) \eta_3(n) \right\} e^{-j2\pi w(m-n)/N} \sum_{r=0}^{N-1} \sum_{s=0}^{N-1} E \left\{ \eta_2(r) \eta_2(s) \right\} e^{-j2\pi v(r-s)/N} \\
& \quad E \left\{ \alpha^2 \right\} |H_{ps}(v)|^2 \\
& + \sum_{m=0}^{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} E \left\{ \eta_3(m) \eta_3(n) \right\} e^{-j2\pi w(m-n)/N} \sum_{r=0}^{N-1} \sum_{s=0}^{N-1} E \left\{ \eta_1(r) \eta_1(s) \right\} e^{-j2\pi v(r-s)/N} \\
& \quad |H_{ps}(v)|^2 \\
& + \sum_{m=0}^{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{r=0}^{N-1} \sum_{s=0}^{N-1} E \left\{ \eta_1(m) \eta_1(n) \eta_1(r) \eta_1(s) \right\} e^{-j2\pi w(m-n)/N} e^{-j2\pi v(r-s)/N} |H_{ps}(w)|^2 \\
& - \mu_d^2 \tag{D.6}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\sigma_d^2 &= \frac{1}{W^2 N^2} \sum_{w=W(l-1)}^{lW-1} \sum_{v=W(l-1)}^{lW-1} s_0^4 (3\sigma_\alpha^4 + 6\sigma_\alpha^2 \mu_\alpha^2 + \mu_\alpha^4) H_{ps}^2(0) H_{ps}^{*2}(0) \\
&+ s_0^2 (3\sigma_\alpha^4 + 6\sigma_\alpha^2 \mu_\alpha^2 + \mu_\alpha^4) \sum_{n=0}^{N-1} \sigma_{\eta_2}^2 |H_{ps}(0)|^2 |H_{ps}(v)|^2 \\
&+ s_0^2 (\sigma_\alpha^2 + \mu_\alpha^2) \sum_{n=0}^{N-1} \sigma_{\eta_1}^2 |H_{ps}(0)|^2 |H_{ps}(v)|^2 \\
&+ s_0^2 (\sigma_\alpha^2 + \mu_\alpha^2) \sum_{n=0}^{N-1} \sigma_{\eta_3}^2 \\
&+ \sum_{n=0}^{N-1} \sigma_{\eta_2}^2 s_0^2 (3\sigma_\alpha^4 + 6\sigma_\alpha^2 \mu_\alpha^2 + \mu_\alpha^4) |H_{ps}(w)|^2 |H_{ps}(0)|^2 \\
&+ \sum_{m=0}^{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{r=0}^{N-1} \sum_{s=0}^{N-1} E \left\{ \eta_2(m) \eta_2(n) \eta_2(r) \eta_2(s) \right\} e^{-j2\pi w(m-n)/N} e^{-j2\pi v(r-s)/N} \\
&\quad (3\sigma_\alpha^4 + 6\sigma_\alpha^2 \mu_\alpha^2 + \mu_\alpha^4) |H_{ps}(w)|^2 |H_{ps}(v)|^2 \\
&+ \sum_{m=0}^{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} \sigma_{\eta_2}^2 \sigma_{\eta_1}^2 (\sigma_\alpha^2 + \mu_\alpha^2) |H_{ps}(w)|^2 |H_{ps}(v)|^2 \\
&+ \sum_{m=0}^{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} \sigma_{\eta_2}^2 \sigma_{\eta_3}^2 (\sigma_\alpha^2 + \mu_\alpha^2) |H_{ps}(w)|^2 \\
&+ \sum_{n=0}^{N-1} \sigma_{\eta_1}^2 s_0^2 (\sigma_\alpha^2 + \mu_\alpha^2) |H_{ps}(w)|^2 |H_{ps}(0)|^2 \\
&+ \sum_{m=0}^{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} \sigma_{\eta_1}^2 \sigma_{\eta_2}^2 (\sigma_\alpha^2 + \mu_\alpha^2) |H_{ps}(w)|^2 |H_{ps}(v)|^2 \\
&+ \sum_{m=0}^{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{r=0}^{N-1} \sum_{s=0}^{N-1} E \left\{ \eta_1(m) \eta_1(n) \eta_1(r) \eta_1(s) \right\} e^{-j2\pi w(m-n)/N} e^{-j2\pi v(r-s)/N} \\
&\quad (\sigma_\alpha^2 + \mu_\alpha^2) |H_{ps}(w)|^2 |H_{ps}(v)|^2 \\
&+ \sum_{m=0}^{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} \sigma_{\eta_1}^2 \sigma_{\eta_3}^2 |H_{ps}(w)|^2
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \sum_{n=0}^{N-1} \sigma_{\eta_3}^2 s_0^2 (\sigma_\alpha^2 + \mu_\alpha^2) |H_{ps}(0)|^2 \\
& + \sum_{m=0}^{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} \sigma_{\eta_3}^2 \sigma_{\eta_2}^2 (\sigma_\alpha^2 + \mu_\alpha^2) |H_{ps}(v)|^2 \\
& + \sum_{m=0}^{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} \sigma_{\eta_3}^2 \sigma_{\eta_1}^2 |H_{ps}(v)|^2 \\
& + \sum_{m=0}^{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{r=0}^{N-1} \sum_{s=0}^{N-1} E \left\{ \eta_3(m) \eta_3(n) \eta_3(r) \eta_3(s) \right\} e^{-j2\pi w(m-n)/N} e^{-j2\pi v(r-s)/N} \\
& - \mu_d^2
\end{aligned} \tag{D.7}$$

Usando a propriedade de fatoração dos momentos Gaussianos para variáveis Gaussianas reais, que declara que $E\{x(m)x(n)x(r)x(s)\} = E\{x(m)x(n)\}E\{x(r)x(s)\} + E\{x(m)x(r)\}E\{x(n)x(s)\} + E\{x(m)x(s)\}E\{x(n)x(r)\}$ a equação acima pode ser expressa como

$$\begin{aligned}
\sigma_d^2 = & \frac{1}{W^2} \sum_{w=W(l-1)}^{lW-1} \sum_{v=W(l-1)}^{lW-1} \frac{s_0^4(3\sigma_\alpha^4 + 6\sigma_\alpha^2\mu_\alpha^2 + \mu_\alpha^4)H_{ps}^2(0)H_{ps}^{*2}(0)}{N^2} \\
& + \frac{s_0^2(3\sigma_\alpha^4 + 6\sigma_\alpha^2\mu_\alpha^2 + \mu_\alpha^4)\sigma_{\eta_2}^2 |H_{ps}(0)|^2 |H_{ps}(v)|^2}{N} \\
& + \frac{s_0^2(\sigma_\alpha^2 + \mu_\alpha^2)\sigma_{\eta_1}^2 |H_{ps}(0)|^2 |H_{ps}(v)|^2}{N} \\
& + \frac{s_0^2(\sigma_\alpha^2 + \mu_\alpha^2)\sigma_{\eta_3}^2}{N} \\
& + \frac{\sigma_{\eta_2}^2 s_0^2(3\sigma_\alpha^4 + 6\sigma_\alpha^2\mu_\alpha^2 + \mu_\alpha^4) |H_{ps}(w)|^2 |H_{ps}(0)|^2}{N} \\
& + 3\sigma_{\eta_2}^4 (3\sigma_\alpha^4 + 6\sigma_\alpha^2\mu_\alpha^2 + \mu_\alpha^4) |H_{ps}(w)|^2 |H_{ps}(v)|^2 \\
& + \frac{\sum_{n=0}^{N-1} \sigma_{\eta_2}^2 \sigma_{\eta_1}^2 (\sigma_\alpha^2 + \mu_\alpha^2) |H_{ps}(w)|^2 |H_{ps}(v)|^2}{N} \\
& + \frac{\sum_{n=0}^{N-1} \sigma_{\eta_2}^2 \sigma_{\eta_3}^2 (\sigma_\alpha^2 + \mu_\alpha^2) |H_{ps}(w)|^2}{N} \\
& + \frac{\sigma_{\eta_1}^2 s_0^2(\sigma_\alpha^2 + \mu_\alpha^2) |H_{ps}(w)|^2 |H_{ps}(0)|^2}{N} \\
& + \sigma_{\eta_1}^2 \sigma_{\eta_2}^2 (\sigma_\alpha^2 + \mu_\alpha^2) |H_{ps}(w)|^2 |H_{ps}(v)|^2 \\
& + 3\sigma_{\eta_1}^4 (\sigma_\alpha^2 + \mu_\alpha^2) |H_{ps}(w)|^2 |H_{ps}(v)|^2 \\
& + \sigma_{\eta_1}^2 \sigma_{\eta_3}^2 |H_{ps}(w)|^2 \\
& + \frac{\sigma_{\eta_3}^2 s_0^2(\sigma_\alpha^2 + \mu_\alpha^2) |H_{ps}(0)|^2}{N} \\
& + \sigma_{\eta_3}^2 \sigma_{\eta_2}^2 (\sigma_\alpha^2 + \mu_\alpha^2) |H_{ps}(v)|^2 \\
& + \sigma_{\eta_3}^2 \sigma_{\eta_1}^2 |H_{ps}(v)|^2 + 3\sigma_{\eta_3}^4 - \mu_d^2
\end{aligned} \tag{D.8}$$

Quando N é grande, (D.8) pode ser simplificada para

$$\begin{aligned}
\sigma_d^2 = & \frac{1}{W^2} \sum_{w=W(l-1)}^{lW-1} \sum_{v=W(l-1)}^{lW-1} 3\sigma_{\eta_2}^4 (3\sigma_\alpha^4 + 6\sigma_\alpha^2\mu_\alpha^2 + \mu_\alpha^4) |H_{ps}(w)|^2 |H_{ps}(v)|^2 \\
& + 3\sigma_{\eta_1}^4 (\sigma_\alpha^2 + \mu_\alpha^2) |H_{ps}(w)|^2 |H_{ps}(v)|^2 + 3\sigma_{\eta_3}^4 - \mu_d^2
\end{aligned} \tag{D.9}$$

que é o resultado apresentado em (6.28)

Apêndice E

Análise PBC-1

Este apêndice deriva o resultado apresentado em (7.17).

A equação (7.15) descreve a probabilidade de se detectar erroneamente um *único* caractere como sendo modulado. A probabilidade de erro total deve levar em conta K detecções. Observe que a detecção errada de um único caractere resulta na perda total da mensagem. Portanto, considerando-se todos os caracteres no documento, tem-se que:

$$\begin{array}{l} K \text{ bits} \begin{cases} \rightarrow Q \text{ caracteres modulados} & \rightarrow d_{M/1} \sim \mathcal{N}(\mu_{d_{M/1}}, \sigma_{d_{M/1}}^2) \\ \rightarrow K - Q \text{ caracteres não-modulados} & \rightarrow d_{M/0} \sim \mathcal{N}(\mu_{d_{M/0}}, \sigma_{d_{M/0}}^2) \end{cases} \end{array}$$

Seja p_{PBC} a probabilidade de se encontrar a mensagem errada usando PBC, tal que

$$\begin{aligned} p_{PBC} &= \Pr(\text{mensagem errada}) \\ &= 1 - \Pr(\text{mensagem correta}) \end{aligned} \tag{E.1}$$

Portanto,

$$\begin{aligned}
p_{PBC} &= 1 - \Pr(Q \text{ caracteres modulados} > K - Q \text{ caracteres não-modulados}) \\
&= 1 - \prod_{i=1}^Q \Pr(\text{caractere modulado } i > \text{ todos os caracteres não-modulados}) \\
&= 1 - \prod_{i=1}^Q \prod_{j=1}^{K-Q} \Pr(\text{caractere modulado } i > \text{ caractere não-modulado } j) \\
&= 1 - \prod_{i=1}^Q \prod_{j=1}^{K-Q} (1 - p_e) \\
&= 1 - (1 - p_e)^{Q(K-Q)}
\end{aligned}
\tag{E.2}$$

em que p_e representa a probabilidade que um caractere **não-modulado** apresente um valor de detecção maior que um caractere modulado, como descrito em (7.15).

Apêndice F

Análise PBC-2

Este apêndice deriva o resultado apresentado na equação (7.15), a qual expressa que

$$p_e = \Pr(d_{M/0} > d_{M/1}). \quad (\text{F.1})$$

Para simplicidade de notação, assuma que $x = d_{M/0}$ e $y = d_{M/1}$, tal que

$$p_e = \Pr(x > y) = \int_{-\infty}^{+\infty} P_y(y) \int_y^{+\infty} P_x(x) dx dy, \quad (\text{F.2})$$

em que

$$P_x(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_x^2}} \exp\left(-\frac{(x - \mu_x)^2}{2\sigma_x^2}\right) \quad (\text{F.3})$$

$$P_y(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_y^2}} \exp\left(-\frac{(y - \mu_y)^2}{2\sigma_y^2}\right). \quad (\text{F.4})$$

Seja

$$u = \frac{x - \mu_x}{\sigma_x} \quad \therefore \quad x = \mu_x + \sigma_x u \quad \therefore \quad dx = \sigma_x du \quad (\text{F.5})$$

e

$$v = \frac{y - \mu_y}{\sigma_y} \quad \therefore \quad y = \mu_y + \sigma_y v \quad \therefore \quad dy = \sigma_y dv. \quad (\text{F.6})$$

Observando-se o intervalo de integração correspondente à variável x em (F.2), tem-se que

$$y \leq x < +\infty \quad (\text{F.7})$$

Considerando as substituições nas equações (F.5) e (F.6) acima, (F.7) pode ser escrita como

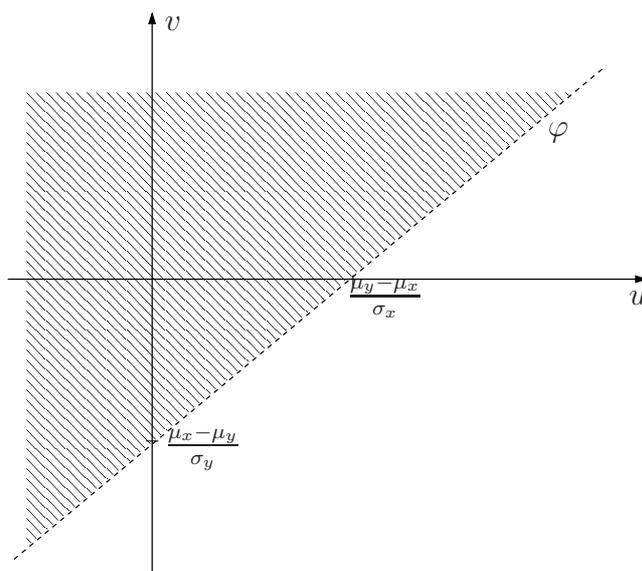


Figura F.1: Figura ilustrando a inequação em F.8.

$$\begin{aligned}
 y &\leq \mu_x + \sigma_x u < +\infty \\
 \frac{y - \mu_x}{\sigma_x} &\leq u < +\infty \\
 \frac{\mu_y - \mu_x + \sigma_y v}{\sigma_x} &\leq u < +\infty
 \end{aligned} \tag{F.8}$$

Portanto, (F.2) pode ser descrita como

$$p_e = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{v^2}{2}\right) \int_{\frac{\mu_y - \mu_x + \sigma_y v}{\sigma_x}}^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) dudv \tag{F.9}$$

A inequação em (F.8) pode ser ilustrada geometricamente na Figura F.1. Nessa figura, a linha pontilhada φ é representada pela seguinte relação

$$u = \frac{\mu_y - \mu_x}{\sigma_x} + \frac{\sigma_y}{\sigma_x} v \tag{F.10}$$

ou

$$v = \frac{\mu_x - \mu_y}{\sigma_y} + \frac{\sigma_x}{\sigma_y} u \tag{F.11}$$

Seja (u', v') um novo sistema de coordenadas representando uma versão rotacionada do sistema de coordenadas (u, v) ilustrado na Figura F.1, como mostrado na Figura F.2.

Observando-se que o ângulo de rotação é dado por α (ilustrado na Figura F.2), a relação entre as coordenadas (u, v) e (u', v') é dada por

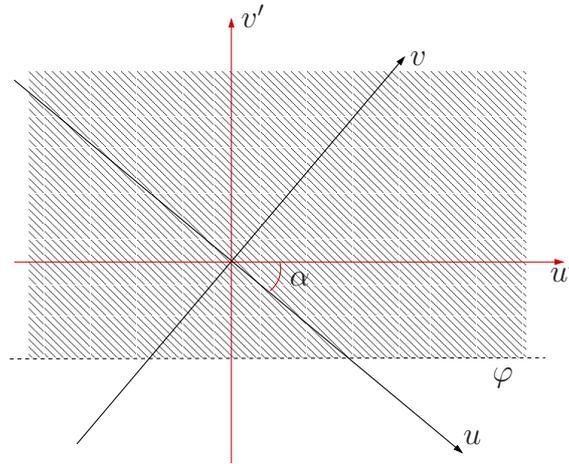


Figura F.2: Figura ilustrando o sistema de coordenadas (u', v') , baseado em uma versão rotacionada da Figura F.1.

$$u = u' \cos \alpha - v' \sin \alpha \quad (\text{F.12})$$

$$v = u' \sin \alpha + v' \cos \alpha \quad (\text{F.13})$$

que pode ser escrita como

$$\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix}}_{\mathbf{A}} \begin{bmatrix} u' \\ v' \end{bmatrix} \quad (\text{F.14})$$

Invertendo \mathbf{A}

$$\mathbf{A}^{-1} = \frac{1}{\cos^2 \alpha - (-\sin^2 \alpha)} \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha \\ -\sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \quad (\text{F.15})$$

a equação (F.14) pode ser expressa como

$$\begin{bmatrix} u' \\ v' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha \\ -\sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} \quad (\text{F.16})$$

Considerando-se a relação descrita na equação acima, (F.11) pode ser escrita como

$$\begin{aligned} u' \sin \alpha + v' \cos \alpha &= \frac{\sigma_x}{\sigma_y} u' \cos \alpha - v' \sin \alpha + \frac{\mu_x - \mu_y}{\sigma_y} \\ v' \left(\cos \alpha + \frac{\sigma_x}{\sigma_y} \sin \alpha \right) &= u' \underbrace{\left(\frac{\sigma_x}{\sigma_y} \cos \alpha - \sin \alpha \right)}_{*} + \frac{\mu_x - \mu_y}{\sigma_y} \end{aligned} \quad (\text{F.17})$$

$$* : \quad \frac{\sigma_x}{\sigma_y} \cos \alpha = \sin \alpha \quad (\text{F.18})$$

$$\tan \alpha = \frac{\sigma_x}{\sigma_y} \quad (\text{F.19})$$

$$\alpha = \arctan \frac{\sigma_x}{\sigma_y} \quad (\text{F.20})$$

Substituindo (F.19) em (F.17) tem-se que

$$v' \left(\cos \alpha + \frac{\sigma_x}{\sigma_y} \sin \alpha \right) = u' \underbrace{\left(\tan \alpha \cos \alpha - \sin \alpha \right)}_{=0} + \frac{\mu_x - \mu_y}{\sigma_y} \quad (\text{F.21})$$

e com a substituição de (F.18) em (F.21) tem-se que

$$v' \left(\cos \alpha + \frac{\sigma_x}{\sigma_y} \frac{\sigma_x}{\sigma_y} \cos \alpha \right) = \frac{\mu_x - \mu_y}{\sigma_y} \quad (\text{F.22})$$

$$v' = \frac{(\mu_x - \mu_y) \sigma_y}{(\sigma_x^2 + \sigma_y^2) \cos \alpha} \quad (\text{F.23})$$

$$v' = \frac{(\mu_x - \mu_y) \sigma_y}{(\sigma_x^2 + \sigma_y^2) \cos \left(\arctan \frac{\sigma_x}{\sigma_y} \right)} \quad (\text{F.24})$$

A seguir, a relação entre $dudv$ e $du'dv'$ é determinada por uso da matriz Jacobiana. A derivada de (F.14) é dada por

$$\begin{bmatrix} du \\ dv \end{bmatrix} = \mathbf{J} \begin{bmatrix} du' \\ dv' \end{bmatrix} \quad (\text{F.25})$$

$$= \begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial u'} & \frac{\partial u}{\partial v'} \\ \frac{\partial v}{\partial u'} & \frac{\partial v}{\partial v'} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} du' \\ dv' \end{bmatrix} \quad (\text{F.26})$$

$$= \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} du' \\ dv' \end{bmatrix} \quad (\text{F.27})$$

De forma equivalente

$$\begin{bmatrix} du' \\ dv' \end{bmatrix} = \mathbf{J}^{-1} \begin{bmatrix} du \\ dv \end{bmatrix} \quad (\text{F.28})$$

$$= \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} du \\ dv \end{bmatrix} \quad (\text{F.29})$$

visto que $\mathbf{J} = \mathbf{J}^{-1}$, $dudv = du'dv'$.

Considere também que

$$\begin{aligned} u^2 + v^2 &= u'^2 \cos^2 \alpha + v'^2 \sin^2 \alpha - 2u'v' \cos \alpha \sin \alpha \\ &\quad + u'^2 \sin^2 \alpha + v'^2 \cos^2 \alpha + 2u'v' \cos \alpha \sin \alpha \\ &= u'^2 + v'^2 \end{aligned} \quad (\text{F.30})$$

Portanto, (F.9) pode ser expressa como

$$p_e = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{u'^2}{2}\right) du' \int_{\frac{\mu_y - \mu_x + \sigma_y v}{\sigma_x}}^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{v'^2}{2}\right) dv' \quad (\text{F.31})$$

A partir dos resultados em (F.24), os novos limites de integração em (F.31) são dados por

$$\begin{aligned} u' &\in (-\infty, +\infty) \\ v' &\in \left(\underbrace{\frac{(\mu_x - \mu_y)\sigma_y}{(\sigma_x^2 + \sigma_y^2) \cos(\arctan \frac{\sigma_x}{\sigma_y})}}_{=v_{\text{low}}}, +\infty \right) \end{aligned} \quad (\text{F.32})$$

tal que

$$\begin{aligned} p_e &= \underbrace{\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{v'^2}{2}\right) dv'}_{=1} \int_{v_{\text{low}}}^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{v'^2}{2}\right) dv' \\ &= \int_{v_{\text{low}}}^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{v'^2}{2}\right) dv' \end{aligned} \quad (\text{F.33})$$

Seja

$$v'' = \frac{v'}{\sqrt{2}} \quad \therefore dv' = dv''\sqrt{2} \quad (\text{F.34})$$

Considerando-se as transformações acima, o intervalo de integração para a variável v'' é dado por

$$v'' \in \left(\frac{v_{\text{low}}}{\sqrt{2}}, +\infty \right) \quad (\text{F.35})$$

e (F.33) pode ser escrita como

$$p_e = \int_{\frac{v_{low}}{\sqrt{2}}}^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp(-v''^2) dv'' = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{v_{low}}{\sqrt{2}} \right) \quad (\text{F.36})$$

Assim,

$$p_e = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{(\mu_x - \mu_y) \sigma_y}{(\sigma_x^2 + \sigma_y^2) \sqrt{2} \cos(\arctan \frac{\sigma_x}{\sigma_y})} \right) \quad (\text{F.37})$$

e se $\sigma_x = \sigma_y \rightarrow \arctan 1 = \pi/4 \rightarrow \cos \pi/4 = 1/\sqrt{2}$,

$$p_e = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{(\mu_x - \mu_y) \sigma_y}{2\sigma_x} \right) \quad (\text{F.38})$$

As equações (F.37) e (F.38) correspondem aos resultados apresentados em (7.15) e (7.16).

Referências Bibliográficas

- [1] I. Cox, M. L. Miller, and J. A. Bloom, *Digital Watermarking*. Morgan Kaufmann, 2002.
- [2] Digimarc, “<http://www.digimarc.com>,” 2000.
- [3] Alpvision, “<http://www.alpvision.com>,” 2001.
- [4] SAMD, “<http://www.eel.ufsc.br/lpds>,” *SAMD - Data Authentication System using Watermarks, LPDS (Digital Signal Processing Research Lab) - EEL - Federal University of Santa Catarina, Brazil*, 2004.
- [5] M. Barni and F. Bartolini, *Watermarking Systems Engineering: Enabling Digital Assets Security and Other Applications*. Marcel Dekker, Inc., 2004.
- [6] J. Eggers and B. Girod, *Informed Watermarking*. Kluwer Academic Publishers, 2002.
- [7] I. J. Cox, J. Kilian, T. Leighton, and T. Shamoan, “Secure spread spectrum watermarking for multimedia,” in *NEC Research Institute Technical Report*, 1995.
- [8] J. J. K. O’Ruanaidh and T. Pun, “Rotation, scale and translation invariant digital image watermarking,” in *IEEE International Conference on Image Processing*, (Santa Barbara, CA, USA), October 1997.
- [9] P. V. K. Borges and J. Mayer, “Improving position based watermarking and its application in the wavelet domain,” *Revista Hifen*, vol. 27, no. 52, 2003.
- [10] X.-G. Xia, C. Boncelet, and G. Arce, “A multiresolution watermark for digital images,” in *IEEE International Conference on Image Processing*, (Santa Barbara, CA, USA), October 1997.
- [11] P. V. K. Borges and J. Mayer, “Position based watermarking in the dct domain,” in *Catarinense Symposium on Digital Image Processing*, (Florianopolis, SC, Brazil), October 2003.

- [12] J. R. Hernández, M. Amado, and F. Pérez-Gonzalez, "Dct-domain watermarking techniques for still images: Detector performance analysis and a new structure," *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 9, pp. 55–68, January 2000.
- [13] B. Tao and B. Dickinson, "Adaptive watermarking in the DCT domain," in *International Conf.on Accoustics, Speech, and Signal Processing, ICASSP '97*, April 1997.
- [14] R. Vllan, S. Voloshynovskiy, O. Koval, J. Vila, E. Topak, F. Deguillaume, Y. Rytsar, and T. Pun, "Text data-hiding for digital and printed documents: theoretical and practical considerations," in *Proceedings of SPIE-IST Electronic Imaging*, (San Jose, CA, USA), 2006.
- [15] R. Vllan, S. Voloshynovskiy, O. Koval, F. Deguillaume, Y. Rytsar, and T. Pun, "Tamper-proofing of electronic and printed text documents via robust hashing and data-hiding," in *Proceedings of SPIE-IST Electronic Imaging, Security, Steganography, and Watermarking of Multimedia Contents*, (San Jose, CA, USA), 2007.
- [16] C. Carr and P. E. O'Neill, "Adding inspec to your chemical search strategy: Lets get physical," *Database*, vol. 18, no. 2, pp. 99–102, 1995.
- [17] J. A. Bloom, I. J. Cox, T. Kalker, J.-P. Linnartz, M. L. Miller, and B. Traw, "Copy protection for dvd videos," *Proceedings of the IEEE*, vol. 87, no. 7, pp. 1267–1276, 1999.
- [18] G. Langelaar, I. Setyawan, and R. Legendijk, "Watermarking digital image and video data," *IEEE Signal Processing Magazine*, September 2000.
- [19] J. Ryan, "Method and apparatus for preventing the copying of a video program," September 1990. US Patent Application 4,907,093.
- [20] IBM's Tokyo Research Laboratory - TRL - www.trl.ibm.com.
- [21] R. J. Anderson and F. A. P. Petitcolas, "On the limits of steganography," *IEEE Journal of Selected Areas in Communications*, vol. 16, pp. 474–481, May 1998.
- [22] R. B. Wolfgang and E. J. Delp, "Fragile watermarking using the vw2d watermark," in *Electronic Imaging*, vol. 3657, pp. 25–27, The International Society for Optical Engineering, January 1999.

-
- [23] N. Boulgouris, I. Kompatsiaris, V. Mezaris, and M. Strintzis, “Content-based watermarking for indexing using robust segmentation,” in *Workshop on Image Analysis For Multimedia Interactive Services*, (Tampere, Finland), May 2001.
- [24] D. Marr, *Vision: A Computational Investigation into the Human Representation and Processing of Visual Information*. W. H. Freeman Co, 1983.
- [25] C. I. Podilchuk and W. Zeng, “Image adaptive watermarking using visual models,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 16, no. 4, 1998.
- [26] L. Boney, A. H. Tewfik, and K. N. Hamdy, “Digital watermarks for audio signals,” in *International Conference on Multimedia Computing and Systems*, pp. 473–480, 1996.
- [27] M. Swanson, B. Zhu, and A. Tewfik, “Multimedia data embedding and watermarking technologies,” *Proceedings of IEEE*, vol. 86, pp. 1064–1087, 1998.
- [28] M. Kutter and F. P. Peticolas, “A fair benchmark for image watermarking systems,” in *Proceedings of Electronic Imaging, Security and Watermarking of Multimedia Contents*, vol. 3657, (San Jose, CA, USA), January 1999.
- [29] B. Chen and G. W. Wornell, “An information-theoretic approach to the design of robust digital watermarking systems,” in *IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, vol. 4, 1999.
- [30] B. Chen and G. W. Wornell, “Quantization index modulation: a class of provably good methods for digital watermarking and information embedding,” *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 47, no. 4, 2001.
- [31] T. Aura, “Practical invisibility in digital communications,” in *Proc. Workshop Information Hiding (Lecture Notes in Computer Science)*, vol. 1174, May 1996.
- [32] J. Fridrich and M. Goljan, “Protection of digital images using self embedding,” in *Proceedings of NJIT Symposium on Content Security and Data Hiding in Digital Media*, May 1999.
- [33] R.C.Gonzalez and R.E.Woods, *Digital Image Processing*. Addison-Wesley, 1992.
- [34] A. Bovik, *Handbook of Digital Image & Video Processing*. Academic Press, 2000.

-
- [35] S. H. Kim and J. P. Allebach, "Impact of hvs models on model-based halftoning," *IEEE Transactions on Image Processing*, March 2002.
- [36] F. Baqai, J. Lee, A. Agar, and J. P. Allebach, "Digital color halftoning," *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 22, January 2005.
- [37] N. Degara-Quintela and F. Pérez-González, "Visible encryption: Using paper as a secure channel," in *Proceedings of SPIE: Security and Watermarking of Multimedia Contents V*, vol. 5020, (Santa Clara, CA, USA), 2003.
- [38] A. Glassner, "Inside moire patterns," *IEEE Computer Graphics and Applications*, vol. 17, no. 6, pp. 97–101, 1997.
- [39] R. A. Ulichney, *Digital Halftoning*. MIT Press, 1988.
- [40] M. Mese and P. Vaidyanathan, "Recent advances in digital halftoning and inverse halftoning methods," *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications*, vol. 49, June 2002.
- [41] R. Stevenson, "Inverse halftoning via map estimation," *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 6, pp. 574–583, April 1997.
- [42] R. A. Ulichney, "Dithering with blue noise," *Proceedings of the IEEE*, no. 1, 1988.
- [43] B. Bayer, "An optimum method for two-level rendition of continuous tone pictures," in *IEEE International Conference on Communications*, 1973.
- [44] E. Izquierdo, "Using invariant image features for synchronization in spread spectrum image watermarking," *EURASIP Journal on Applied Signal Processing*, vol. 2002, no. 4, pp. 410–417, 2002.
- [45] F. Lefèvre, D. Guéluy, D. Delannay, and B. Macq, "A print and scan optimized watermarking scheme," in *IEEE Proceedings of Workshop on Multimedia Signal Processing*, (France), 2001.
- [46] A. Levy and D. Shaked, "A transform domain hardcopy watermarking scheme," *HP Laboratories Technical Report*, no. 7, 2001.
- [47] A. T. S. Ho and F. Shu, "A print-and-scan resilient digital watermark for card authentication," in *Proceedings of the Joint Conference of the Fourth International Conference on Information, Communications and Signal Processing and the Fourth Pacific Rim Conference on Multimedia*, December 2003.

- [48] C.-Y. Lin and S.-F. Chang, "Distortion modeling and invariant extraction for digital image print-and-scan process," in *International Symposium on Multimedia Information Processing*, (Taipei, Taiwan), 1999.
- [49] B. S. Reddy and B. N. Chatterji, "An fft-based technique for translation, rotation, and scale invariant image registration," *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 5, pp. 1266–1271, August 1996.
- [50] J. J. K. . Ruanaidh and T. Pun, "Rotation, scale and translation invariant spread spectrum digital image watermarking," *Signal Processing*, vol. 66, pp. 303–317, May 1998.
- [51] D. Kacker and J. P. Allebach, "Joint halftoning and watermarking," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 51, April 2003.
- [52] Y.-W. Kim, K.-A. Moon, and I.-S. Oh, "A text watermarking algorithm based on word classification and inter-word space statistics," in *IEEE Proceedings of the Seventh International Conference on Document Analysis and Recognition*, 2003.
- [53] J. T. Brassil, S. Low, and N. F. Maxemchuk, "Copyright protection for the electronic distribution of text documents," *Proceedings of the IEEE*, vol. 87, pp. 1181–1196, July 1999.
- [54] D. Huang and H. Yan, "Interword distance changes represented by sine waves for watermarking text images," *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, vol. 11, pp. 1237–1245, December 2001.
- [55] M. Wu and B. Liu, "Data hiding in binary image for authentication and annotation," *IEEE Transactions on Multimedia*, vol. 6, August 2004.
- [56] T. Amano, "A feature calibration method for watermarking of document images," in *IEEE Proceedings of the Fifth International Conference on Document Analysis and Recognition*, September 1999.
- [57] Compris Intelligence, Germa. www.textmark.com.
- [58] S. Low and N. Maxemchuk, "Capacity of text marking channel," *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 7, December 2000.
- [59] F. Deguillaume, Y. Rytsar, S. Voloshynovskiy, and T. Pun, "Data-hiding based text document security and automatic processing," in *IEEE Int'l Conf. on Multimedia and Expo*, (Amsterdam, Netherlands), July 2005.

- [60] F. Deguillaume, S. Voloshynovskiy, and T. Pun, “Character and vector graphics watermark for structured electronic documents security,” September 2004. US Patent Application 10/949,318.
- [61] S. Voloshynovskiy, O. Koval, F. Deguillaume, and T. Pun, “Visual communications with side information via distributed printing channels: extended multimedia and security perspectives,” in *SPIE Photonics West, Electronic Imaging, Multimedia Processing and Applications*, (San Jose, CA, USA), January 2004.
- [62] R. VÍllan, S. Voloshynovskiy, O. Koval, and T. Pun, “Multilevel 2d bar codes: towards high capacity storage modules for multimedia security and management,” in *Proceedings of SPIE Photonics West*, (San Jose, CA, USA), January 2005.
- [63] G. Sharma and H. Trussel, “Digital color imaging,” *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 6, no. 7, 1997.
- [64] K. Solanki, U. Madhow, B. Manjunath, and S. Chandrasekaran, “Modeling the print-scan process for resilient data hiding,” in *Proceedings of SPIE, Electronic Imaging*, vol. 5681, 2005.
- [65] C.-Y. Ling, “Public watermarking surviving general scaling and cropping: an application for print-and-scan process,” in *Multimedia and Security Workshop at ACM Multimedia*, (Orlando, FL, USA), October 1999.
- [66] M. C. Davey and D. MacKay, “Reliable communication over channels with insertions, deletions, and substitutions,” *IEEE Trans. on Inf. Theory*, vol. 47, 2001.
- [67] D. G. Manolakis, V. K. Ingle, and S. M. Kogon, *Statistical and Adaptive Signal Processing*. McGraw-Hill, 2000.
- [68] H. Freeman, “Computer processing of line-drawing images,” *ACM Computing Surveys*, vol. 6, no. 1, pp. 57–97, 1974.
- [69] N. Otsu, “A threshold selection method from gray-level histograms,” *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 9, no. 1, 1979.
- [70] B. Sklar, *Digital Communications: Fundamentals and Applications*. Prentice Hall, 2nd ed., 2001.
- [71] S. M. Kay, *Fundamentals of Statistical Signal Processing: Detection Theory*, vol. 2. Prentice Hall, 4 ed., 1998.

- [72] D. L. Lau, R. Ulichney, and G. R. Arce, “Blue and green noise halftoning models,” *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 20, pp. 28–38, July 2003.
- [73] D. L. Lau, N. C. Gallagher, and G. R. Arce, “Green-noise digital halftoning,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 86, no. 12, pp. 2424 – 2444, 1998.
- [74] S. M. Kay, *Fundamentals of Statistical Signal Processing: Estimation Theory*, vol. 1. Prentice Hall, 1993.
- [75] Z. Wang and G. J. Klir, *Fuzzy Measure Theory*. Norwell, MA, USA: Kluwer Academic Publishers, 1993.
- [76] R. Villan, S. Voloshynovskiy, O. Koval, and T. Pun, “Multilevel 2-d bar codes: toward high-capacity storage modules for multimedia security and management,” *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, vol. 1, pp. 405–420, December 2006.
- [77] J. Cannons and P. Moulin, “Design and statistical analysis of a hash-aided image watermarking system,” *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 13, October 2004.
- [78] X. Li and X. Xue, “Fragile authentication watermark combined with image feature and public key cryptography,” in *International Conference on Signal Processing*, 2004.
- [79] P. W. Wong and N. Memon, “Secret and public key image watermarking schemes for image authentication and ownership verification,” *IEEE Transactions on Image Processing*, October 2001.
- [80] T. Cover and J. A. Thomas, *Elements of Information Theory*. Wiley - Interscience, 2nd ed., 2006.
- [81] R. Baitello, M. Barni, F. Bartolini, and V. Cappellini, “From watermark detection to watermark decoding: a ppm approach,” *Signal Processing*, vol. 81, pp. 1261–1271, June 2001.
- [82] P. V. K. Borges and J. Mayer, “Analysis of position based watermarking,” *Pattern Analysis and Applications*, vol. 9, no. 1, 2006.
- [83] J. Riordan, *Introduction to Combinatorial Analysis*. Dover Publications, 2002.
- [84] P. K. S. J.N. Kapur and A. K. C. Wong, “A new method for gray-level picture thresholding using the entropy of the histogram,” *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, vol. 29, no. 3, pp. 273 –285, 1985.

-
- [85] Y. Yang and H. Yan, “An adaptive logical method for binarization of degraded document images,” *Pattern Recognition*, vol. 33, pp. 787–807, May 2000.
- [86] C. S. Won and H. Derin, “Unsupervised segmentation of markov random field modeled textured images using selectionist relaxation,” *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 20, no. 3, 1998.
- [87] R. O. Duda, P. Hart, and D. G. Stork, *Pattern Classification*. John Wiley, 2nd ed., 2001.
- [88] International Commission on Illumination (CIE) in *Recommendations on uniform color spaces, color difference equations, psychometric color terms*, Publication CIE 15 (E.-1.3.1), Supplement No.2, Bureau Central de la CIE, Vienna, 1971.
- [89] J. Mulligan, “Digital halftoning methods for selectively partitioning error into achromatic and chromatic channels,” in *Proceedings of SPIE*, vol. 1249, 1990.
- [90] R. Bala, *Digital Color Imaging Handbook*, ch. Device Characterization. CRC Press, 2003.
- [91] P. Lennie, “Color vision: putting it together,” *Current Biology*, vol. 10, no. 16, 2000.
- [92] X. Zhang, J. E. Farrell, and B. A. Wandell, “Applications of a spatial extension to cielab,” in *Proceedings of SPIE*, 1997.
- [93] A. Mojsilovic, J. Hu, and R. Safranek, “Perceptually based color texture features and metrics for image retrieval,” in *IEEE International Conference on Image Processing*, vol. 3, October 1999.
- [94] X. Zhang and B. A. Wandell, “Color image fidelity metrics evaluated using image distortion maps,” *Signal Processing*, vol. 70, pp. 201–214, November 1998.
- [95] N. Prins and F. A. A. Kingdom, “Detection and discrimination of texture modulations defined by orientation, spatial frequency, and contrast,” *Journal of the Optical Society of America*, vol. 20, no. 3, pp. 401–410, 2003.
- [96] F. Liu and R. W. Picard, “Periodicity, directionality, and randomness: Wold features for image modeling and retrieval,” *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 18, no. 7, pp. 722–733, 1996.

-
- [97] A. Bovik, *Handbook of Digital Image and Video Processing*, ch. Basic tools for image Fourier analysis. Academic Press, 2000.
- [98] M. Haley and B. S. Manjunath, "Rotation-invariant texture classification using a complete space-frequency model," *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 8, pp. 255–269, February 1999.
- [99] H. Tamura, S. Mori, and T. Yamawaki, "Texture features corresponding to visual perception," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. SMC-8, no. 6, pp. 460–473, 1978.
- [100] K. Matsui and K. Tanaka, "Video-steganography: How to secretly embed a signature in a picture," in *IMA Intellectual Property Project*, vol. 1, 1994.
- [101] P. V. K. Borges, E. Izquierdo, and J. Mayer, "Efficient side information encoding for text hardcopy documents," in *IEEE International Conference on Advanced Video and Signal Based Surveillance*, (London, UK), September 2007.
- [102] P. V. K. Borges, E. Izquierdo, and J. Mayer, "Segmentation of document images using higher order statistics," in *IEEE International Workshop on Multimedia Signal Processing*, (Chania, Crete, Greece), October 2007.
- [103] P. V. K. Borges, E. Izquierdo, and J. Mayer, "Performance analysis of text halftone modulation," in *IEEE International Conference on Image Processing - ICIP*, (San Antonio, TX, USA), September 2007.
- [104] P. V. K. Borges and J. Mayer, "Document watermarking via character luminance modulation," in *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, ICASSP*, (Toulouse, France), May 2006.
- [105] P. V. K. Borges and J. Mayer, "Text luminance modulation for hardcopy watermarking," *Signal Processing*, vol. 87, no. 7, 2007.
- [106] P. V. K. Borges and J. Mayer, "Improving robustness in printed side communications using higher order statistics," in *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, ICASSP*, (Honolulu, Hawaii, USA), April 2007.
- [107] P. V. K. Borges, E. Izquierdo, and J. Mayer, "A practical protocol for digital and printed document authentication," in *EURASIP European Signal Processing Conference*, (Poznan, Poland), September 2007.

-
- [108] P. V. K. Borges, E. Izquierdo, and J. Mayer, “Robust and transparent color modulation for text data hiding,” *submitted to IEEE Transactions on Multimedia*, 2007.
- [109] P. V. K. Borges, E. Izquierdo, and J. Mayer, “Document image processing for paper side communications,” *submitted to IEEE Transactions on Multimedia*, 2007.
- [110] P. V. K. Borges, E. Izquierdo, and J. Mayer, “Efficient text color modulation for printed side communications,” in *submitted to IEEE International Conference on Image Processing - ICIP*, (San Diego, CA, USA), September 2008.