

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
INSTITUTO DE INFORMÁTICA  
CURSO DE CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO

JEFFERSON RODRIGO STOFFEL

**Um estudo sobre Marcas D'água Digitais Robustas**

Monografia apresentada como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Ciência da Computação.

Orientador: Prof. Dr. Raul Fernando Weber *in memoriam*

Co-orientador: Prof. Dr. João Cesar Netto

Porto Alegre  
2019

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Reitor: Prof. Rui Vicente Oppermann

Vice-Reitora: Prof<sup>a</sup> Jane Fraga Tutikian

Pró-Reitor de Graduação: Prof. Vladimir Pinheiro do Nascimento

Diretora do Instituto de Informática: Prof<sup>a</sup> Carla Maria Dal Sasso Freitas

Coordenador do Curso de Ciência da Computação: Prof. Sérgio Luis Cechin

Bibliotecária-Chefe do Instituto de Informática: Beatriz Regina Bastos Haro

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus familiares e amigos. Ao professor Raul Weber por me ajudar a iniciar este trabalho. E ao professor João Netto por se disponibilizar a continuá-lo.

## RESUMO

Nesta monografia são apresentados os principais conceitos sobre marcas d'água digitais juntamente das abordagens para tornar esse tipo de marca d'água robusta. Por robusta, entende-se marcas d'água que sobrevivam a operações comuns em processamento de sinais. Os tópicos gerais discorrem sobre as aplicações para as marcas d'água digitais, suas propriedades e sobre aquele que é provavelmente o tipo mais comum de detecção utilizada em sistemas de marca d'água, a detecção baseada em correlação. No capítulo que trata exclusivamente sobre robustez, são apresentadas técnicas para tornar as marcas d'água robustas, bem como são descritas algumas distorções e como tratá-las.

O trabalho conta ainda com a implementação de um protótipo que insere uma marca d'água robusta em imagens, ou seja, após operações comuns de processamento de sinais serem aplicadas à imagem, a marca d'água ainda deve ser detectável.

Por fim, esse estudo conta ainda com um breve capítulo sobre a transformada de Fourier, utilizada na implementação do protótipo.

**Palavras-chave:** Sistemas de Marcas D'Água Digitais. Incorporação e Detecção de Marcas D'Água. Robustez. Proteção de Copyright. Autenticação de Conteúdo. Transformada Discreta de Fourier.

## **A study on Robust Digital Watermarks**

### **ABSTRACT**

In this term paper, it will be presented the main concepts about digital watermarks along with approaches which turn this type of watermark more robust. As for robust, it is understood watermarks which survive common operations in sign processing. The general subjects discuss about the applications to digital watermarks, their properties and the one, which probably the most common type of detection used on watermark systems, the correlation based detection. In the chapter, which deals exclusively with robustness, it will be present techniques which turn watermark more robust, and in addition to it, how some distortions are described and how to treat them.

The paper also tells how the implementation of a prototype, which inserts a robust watermark in images, in other words, after common operations of sign processing being applied to image, the watermark should still be detected.

Lastly, this study will also tell in a brief chapter about Fourier transform, which was used in the implementation of the prototype.

**Keywords:** Digital Watermarking Systems. Watermark Embedding and Detection. Robustness. Copyright Protection. Content Authentication. Discrete Fourier Transform.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Representação de um sistema de Marcas d'Água Digital genérico .....	11
Figura 2.2 – Diagrama do controle de reprodução .....	13
Figura 2.3 – Limiar de detecção entre as curvas de frequência dos valores de saída do detector .....	16
Figura 2.4 – Região de detecção correspondente à correlação linear.....	19
Figura 2.5 – Região de detecção correspondente à correlação normalizada.....	21
Figura 3.1 – Plano complexo, também conhecido como de Plano de Argand-Gauss ou Diagrama de Argand.....	24
Figura 3.2 – Lena.....	25
Figura 3.3 – Espectro de Fourier da imagem Lena.....	25
Figura 4.1 – Representação de um algoritmo de compressão com perdas genérico .....	34
Figura 5.1 – Exemplo da Marca D'Água .....	40
Figura 5.2 – Etapas da Incorporação da Marca D'Água .....	42
Figura 5.3 – Diagrama de obtenção das imagens testadas .....	44
Figura 5.4 – Imagem Original .....	50
Figura 5.5 – Imagem Marcada.....	50
Figura 5.6 – Histograma da Figura 5.4 (Imagem Original).....	51
Figura 5.7 – Histograma da Figura 5.5 (Imagem Marcada) .....	51
Figura 5.8 – Imagem Marcada.....	52
Figura 5.9 – Imagem Marcada convertida para JPEG.....	52
Figura 5.10 – Histograma da Figura 5.8 (Imagem Marcada) .....	53
Figura 5.11 – Histograma da Figura 5.9 (Imagem Marcada convertida para JPEG) .....	53
Figura 5.12 – Histograma da Figura 5.9 (Imagem Marcada convertida para JPEG) .....	54
Figura 5.13 – Histograma da imagem distorcida pelo Stirmark e convertida para JPEG .....	54

## LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1 - Resumo dos cenários para as imagens marcadas com a Marca D'Água "A" .....	45
Tabela 5.2 - Probabilidade de falsos negativos .....	45
Tabela 5.3 - Probabilidade de detecção incorreta.....	46
Tabela 5.4 - Probabilidade de detecção incorreta.....	47
Tabela 5.5 - Probabilidade de detecção incorreta.....	47
Tabela 5.6 - Resumo dos cenários para as imagens marcadas com a Marca D'Água "B" .....	48
Tabela 5.7 - Probabilidade de falsos negativos .....	48
Tabela 5.8 - Probabilidade de detecção incorreta.....	48
Tabela 5.9 - Probabilidade de detecção incorreta.....	49
Tabela 5.10 - Probabilidade de detecção incorreta.....	49

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AM	Amplitude Modulation
CSS	Content Scrambling System
DC	Direct Current
DCT	Discrete Cosine Transform
DFT	Discrete Fourier Transform
DNR	Document-to-Noise Ratio
DVD	Digital Versatile Disc
DWR	Document-to-Watermark Ratio
FDP	Função Densidade de Probabilidade
FM	Frequency Modulation
OpenCV	Open Source Computer Vision Library
SNR	Signal-to-Noise Ratio
TV	Televisão
WNR	Watermark-to-Noise Ratio

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>9</b>
1.1 Estrutura do texto.....	10
<b>2 PRINCÍPIOS BÁSICOS</b> .....	<b>11</b>
2.1 Aplicações para as Marcas D'Água Digitais .....	12
2.2 Propriedades dos Sistemas de Marcas D'Água Digitais .....	14
2.3 Detecção de Marcas D'Água por Correlação.....	18
2.3.1 Correlação Linear .....	18
2.3.2 Correlação Normalizada .....	20
2.3.3 Coeficiente de Correlação .....	22
<b>3 TRANSFORMADA DE FOURIER</b> .....	<b>23</b>
<b>4 MARCAS D'ÁGUA ROBUSTAS</b> .....	<b>27</b>
4.1 Abordagens Gerais .....	27
4.1.1 Incorporação Redundante .....	27
4.1.2 Codificação de Espectro Espalhado .....	28
4.1.3 Incorporação em Coeficientes Perceptualmente Significativos .....	28
4.1.4 Incorporando em Coeficientes de Robustez Conhecida .....	29
4.1.5 Inverter Distorções no Detector.....	30
4.1.6 Antecipando Distorções na Incorporação.....	31
4.2 Robustez a Distorções Valométricas.....	31
4.2.1 Ruído Aditivo .....	31
4.2.2 Mudanças de Amplitude.....	32
4.2.3 Filtragem Linear .....	32
4.2.4 Compressão com Perdas .....	33
4.3 Robustez a Distorções Temporais e Geométricas.....	34
4.3.1 Distorções Temporais e Geométricas .....	35
4.3.2 Pesquisa Exaustiva .....	35
4.3.3 Registro e Sincronização .....	36
4.3.4 Autocorrelação.....	37
4.3.5 Marca D'Água Invariantes .....	37
4.3.6 Sincronização Implícita .....	38
<b>5 IMPLEMENTAÇÃO, TESTES E RESULTADOS</b> .....	<b>39</b>
5.1 Implementação.....	39
5.2 Testes e Resultados .....	43
5.3 Resultados Visuais .....	49
<b>6 CONCLUSÃO</b> .....	<b>55</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>57</b>



## 1 INTRODUÇÃO

Com o advento da informática se criou um novo paradigma. Conteúdos que antes só estavam disponíveis através de cópias físicas, agora podem ser compartilhados através da Internet a baixos custos e sem perda de qualidade. Tendo em mente esse cenário, como garantir que direitos autorais sejam respeitados?

Uma possível solução consiste na utilização de marcas d'água digitais. O processo de inserir uma marca d'água digital, assim como a esteganografia, consiste em esconder informação digital em conteúdos multimídia (músicas, imagens, filmes, e etc.). A diferença fundamental entre as duas, é que na esteganografia, o conteúdo multimídia serve apenas como um meio para camuflar e transportar a mensagem, e o que realmente importa é a informação oculta. Por outro lado, as marcas d'água digitais possuem relação com o conteúdo no qual são inseridas. Quem determina as propriedades necessárias a um sistema de marcas d'água digitais é a aplicação para a qual a marca d'água será utilizada, sendo essas aplicações as mais variadas.

Antes de serem utilizadas em mídias digitais, as marcas d'água já eram utilizadas em mídias físicas. O papel que contém uma marca d'água mais antigo do qual se tem conhecimento foi fabricado na cidade de Fabriano na Itália no ano de 1292. Nessa época, logo que saíam das fábricas, os papéis possuíam superfícies grosseiras, impróprias para a escrita. Esses passavam então pela mão de artesãos, que os alisavam com pedras tornando-os aptos à escrita. Após serem adquiridos por mercadores, acabavam se misturando em seus armazéns, de maneira que era difícil saber sua procedência e qualidade. Com a introdução das marcas d'água foi possível identificar a marca, o tipo, a qualidade e a resistência do papel. Da Itália, essa nova tecnologia logo se espalhou pela Europa (KATZENBEISSER; PETITCOLAS, 1999). Essas marcas d'água eram criadas por padrões feitos em arame introduzidos nos moldes do papel. Nesse local, o papel ficava ligeiramente mais fino e transparente (COX; MILLER; BLOOM; FRIDRICH; KALKER, 2007).

Por volta do século XVIII, as marcas d'água passaram a ser utilizadas como dispositivos de segurança em cédulas de dinheiro e outros documentos. O termo “marca d'água” também parece ter surgido ao fim daquele século. Esse termo provavelmente se deve à aparência das marcas que lembra o efeito da água sobre o papel (COX; MILLER; BLOOM; FRIDRICH; KALKER, 2007).

Atualmente, a marca d'água presente nas cédulas de dinheiro não é mais produzida por padrões em arame, mas por esculturas em alto-relevo (*shallow relief*) prensadas aos moldes do papel (COX; MILLER; BLOOM; FRIDRICH; KALKER, 2007).

O primeiro exemplo de uma marca d'água digital se deu em 1954, quando Emil Hembrooke da Muzak Corporation apresentou uma patente para marcar músicas. O sistema utilizava código Morse na frequência de 1 kHz para marcar um código de identificação e foi utilizado pela Muzak até 1984. Um fato interessante sobre esse sistema é que ele foi mal compreendido pelo público em geral, gerando rumores de que a Muzak transmitiria mensagens subliminares de anunciantes (COX; MILLER; BLOOM; FRIDRICH; KALKER, 2007). Em 1988, Komatsu e Tominaga utilizam o termo “marca d'água digital” pela primeira vez (COX; MILLER; BLOOM; FRIDRICH; KALKER, 2007).

Este trabalho consiste em um estudo em abrangência sobre marcas d'água digitais e na implementação de um protótipo que insere uma marca d'água em imagens. Essa marca d'água deve apresentar persistência contra algumas operações comuns de processamento de sinais. Para se fazer essa verificação, a marca d'água será aplicada a imagens com diferentes parâmetros a fim de testar sua resistência contra a aplicação do Stirmark (um *benchmark* de robustez que faz a reamostragem das imagens) e a compressão JPEG.

## **1.1 Estrutura do texto**

O Capítulo 2 apresenta os princípios básicos das marcas d'água digitais. O Capítulo 3 discorre brevemente sobre a transformada de Fourier, importante para implementação do protótipo. O Capítulo 4 introduz e discute as principais técnicas utilizadas nas marcas d'água digitais robustas. O Capítulo 5 explica a implementação e apresenta os resultados obtidos. Por fim, o Capítulo 6 apresenta a conclusão e discute possíveis trabalhos futuros.

## 2 PRINCÍPIOS BÁSICOS

Embora o uso mais intuitivo para as marcas d'água digitais seja em imagens, músicas e vídeos, as mesmas podem ser aplicadas a textos (BRASSIL; LOW; MAXEMCHUK; O'GORMAN, 1994), (BRASSIL; LOW; MAXEMCHUK; O'GORMAN, 1995) e (LOW; MAXEMCHUK, 1998), modelos tridimensionais (BENEDENS, 1999), (OHBOCHI; MASUDA; AONO, 1998) e (YEO; YEUNG, 1999), parâmetros de animação (*animation parameters*) (HARTUNG; EISERT; GIROD, 1998), códigos executáveis (STERN; HACHEZ; KOEUNE; QUISQUATER, 1999), circuitos integrados (KAHNG; MANTIK; MARKOV; POTKONJAK; TUCKER; WANG; WOLFE, 1998) e (LACH; MANGIONE-SMITH; POTKONJAK, 1998), e etc. Uma cópia específica de um desses conteúdos será denominada obra (*work*). Uma obra inalterada será denominada obra de cobertura (*cover work*), pois a mesma cobrirá a marca d'água. O limiar de detecção (*threshold*) corresponde ao valor que o detector utilizará como base para dizer se a obra recebida contém a marca d'água ou não.

Todos os sistemas de marcas d'água digitais são compostos de dois blocos básicos genéricos – um incorporador (*embedder*) e um detector. O incorporador recebe como entrada a obra de cobertura e a marca d'água gerando a obra marcada. O detector pode receber como entrada tanto obras marcadas como não marcadas. Se a obra avaliada pelo detector for considerada como marcada, esse revela a presença da marca d'água bem como sua mensagem (se houver). Na Figura 2.1, vemos a representação gráfica desse sistema.

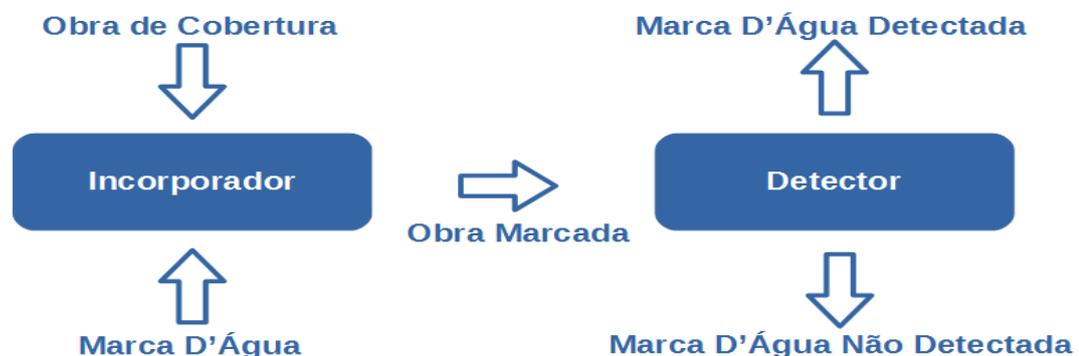


Figura 2.1 – Representação de um sistema de Marcas d'Água Digital genérico

A seção 2.1 deste capítulo cita aplicações que podem fazer uso de marcas d'água digitais. A seção 2.2 aponta as propriedades que devem ser consideradas ao se projetar um sistema de marcas d'água digitais. Por fim, a seção 2.3 apresenta formas de detecção baseadas em correlação.

## **2.1 Aplicações para as Marcas D'Água Digitais**

Nesta seção são apresentadas sete aplicações para as quais o uso de marcas d'água digitais são uma alternativa viável.

### **Proteção de Copyright**

Esta talvez seja a aplicação para qual o uso de marcas d'água digitais mais se destaca. Ao inserir informações sobre a fonte, o proprietário do *copyright* pode se prevenir de futuras reclamações de propriedade.

### **Monitoramento de Transmissões**

Um exemplo prático desta solução é de uma empresa que deseja saber se os comerciais pelos quais pagou estão sendo transmitidos na quantidade correta pela emissora de TV ou rádio. Assim, um computador que analisa a transmissão pode realizar a contagem através do reconhecimento da marca d'água.

### **Acompanhamento de Transações**

Também conhecido como *Fingerprinting* esse uso para as marcas d'água consiste em esconder informações que identifiquem de forma unívoca o receptor de um conteúdo digital. Dessa maneira, é possível identificar a fonte de um possível vazamento.

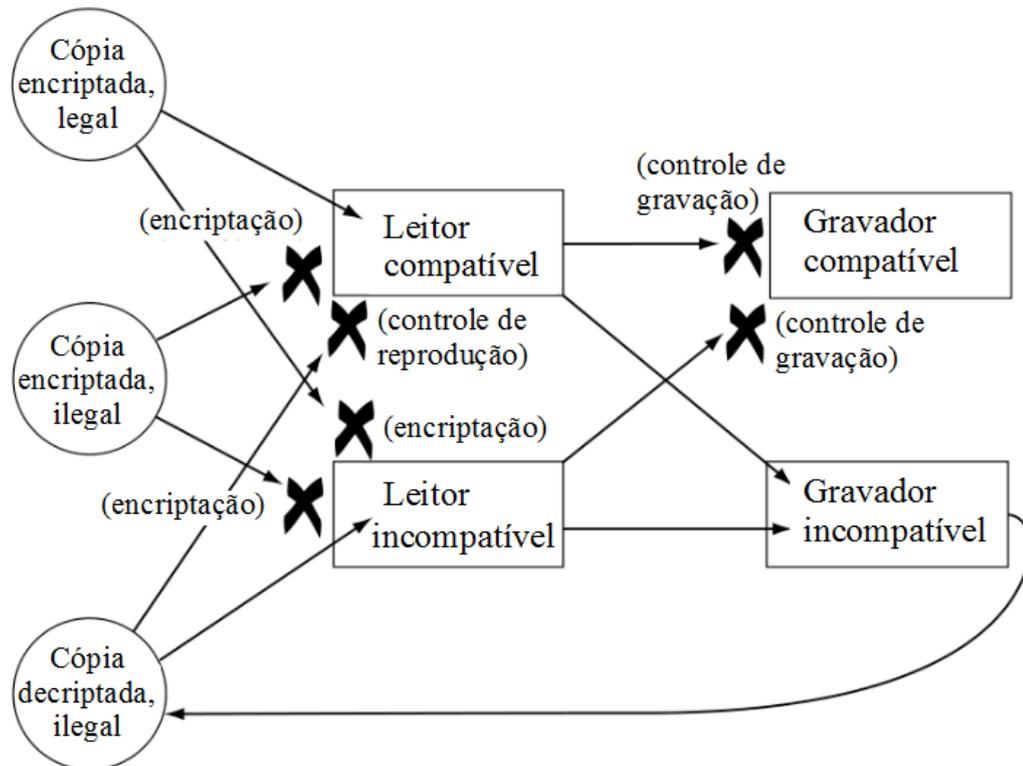
### **Autenticação de Conteúdo**

Alterações digitais em fotografias podem representar um sério problema se aplicadas sobre evidências de uma investigação criminal. O objetivo da autenticação é detectar modificações sobre os dados. Isso pode ser alcançado através das chamadas "marcas d'água frágeis" (*fragile watermarks*), que são marcas d'água que se degradam quando submetidas a certas formas de edição.

## Controle de Cópias

Em um sistema com controle de cópias, como o próprio título sugere, é possível indicar os status da cópia dos dados através do uso de marcas d'água. Pensou-se em usar essa tecnologia nos DVDs (COX; MILLER; BLOOM; FRIDRICH; KALKER, 2007). Filmes originais seriam encriptados com CSS (*Content Scrambling System*). Os fabricantes que desejassem produzir tocadores e gravadores de DVD que reconhecessem discos encriptados com CSS deveriam requerer sua patente que incluía um detector de marcas d'água. Esses sistemas seriam chamados compatíveis (*compliant*). Porém, seria perfeitamente legal produzir sistemas que nem reconhecessem a marca d'água e nem fizessem a decifração CSS. Esses sistemas seriam chamados incompatíveis (*noncompliant*). Quando um gravador incompatível fizesse uma cópia ilegal de disco original, essa cópia conteria uma marca d'água que a impediria de ser executada em um tocador compatível. Esse esquema é chamado de controle de reprodução (*playback control*). A Figura 2.2 ilustra a relação entre sistemas compatíveis e incompatíveis. Nesse diagrama, o “X” indica que o percurso é prevenido de alguma forma.

Figura 2.2 – Diagrama do controle de reprodução



Fonte: COX, MILLER, BLOOM, FRIDRICH, KAIKER (2007, p. 30)

### Controle de Dispositivos

Diferentemente do controle de cópias que tem por meta restringir o uso dado aos dispositivos, aqui o objetivo é ampliar suas capacidades. Um exemplo é a aplicação proposta por Ray Dolby em 1981 (DOLBY, 1981). Naquela época, algumas rádios FM estavam usando uma técnica redutora de ruído chamada Dolby FM. Para tirar proveito de tal técnica era necessário um decodificador que deveria ser ligado ou desligado manualmente pelos usuários. Ray Dolby propôs que tal decodificador poderia ser ligado automaticamente através da transmissão de um tom inaudível, uma marca d'água simples, junto ao conteúdo.

### Aprimoramento de Sistemas Legados

Muitas empresas trabalham com sistemas grandes e antigos. Quando novas funcionalidades são necessárias, as mesmas podem ser adicionadas por meio de uma atualização. No entanto, essa atualização pode ser inicialmente incompatível com o sistema

existente. Uma das maneiras pelas quais podemos tornar o novo sistema compatível com as versões anteriores é através do uso de marcas d'água digitais.

## 2.2 Propriedades dos Sistemas de Marcas D'Água Digitais

Conforme já mencionado na introdução, as propriedades de um sistema de marcas d'água dependem dos requerimentos da aplicação. Nesta seção são apresentadas essas propriedades. É importante perceber que algumas dessas propriedades podem ser conflitantes, cabendo ao *designer* da marca d'água tomar decisões sobre possíveis compromissos (*tradeoffs*). Dentre as propriedades apresentadas, as três primeiras – **eficiência de incorporação, fidelidade e carga útil de dados** – estão normalmente associadas ao processo de incorporação. As três propriedades seguintes – **detecção cega ou informada, falsos positivos e falsos negativos e robustez** – estão tipicamente relacionados com o processo de detecção. As duas últimas propriedades descritas são: **segurança e cifras e chaves de marca d'água**. Tanto a robustez quanto o uso de chaves secretas estão relacionadas à segurança, pois são propriedades inerentes à mesma.

### **Eficiência de Incorporação**

A eficiência de incorporação consiste na probabilidade de detecção imediatamente após a incorporação da marca d'água, ou seja, após ser marcada, a obra ainda não passou por nenhum processo que pudesse degradar a marca d'água. Embora seja desejável que esse valor seja o mais próximo possível a 100%, altos índices de eficiência podem pesar significativamente sobre outras propriedades.

### **Fidelidade ou Imperceptibilidade**

A fidelidade pode ser definida como a semelhança perceptual entre a obra original e a obra marcada quando as mesmas são apresentadas ao consumidor. Por exemplo, as distorções causadas pelo processo de incorporação a uma música poderiam, no primeiro momento, parecer inaceitáveis. Porém, quando essa música é transmitida por uma rádio AM, cuja qualidade é relativamente baixa, tais distorções podem se tornar imperceptíveis devido às degradações do canal.

### **Carga Útil de Dados**

A carga útil de dados se refere ao número de bits que uma marca d'água codifica dentro de uma unidade tempo ou dentro de uma obra. Se, por exemplo, uma aplicação de controle de cópias insere 6 bits a cada 5 minutos de um filme, a taxa de dados será de aproximadamente 0,02 bits de carga útil para cada segundo do filme. Já no caso de uma imagem, a carga útil será o número de bits codificados na mesma. Embora seja possível produzir marcas d'água digitais que contenham vários bits ou símbolos de informação, esse tópico foge ao escopo deste trabalho.

### **Detecção Cega ou Informada**

Denomina-se detector informado aquele que além da obra marcada requer acesso à obra original, ou alguma informação derivada da obra original, na hora de realizar a detecção. Essa característica pode aumentar bastante o desempenho da detecção. Já os detectores que não necessitam nenhuma informação relacionada à obra original são chamados de detectores cegos. Na literatura de marcas d'água também é possível encontrar as denominações de detectores privados e públicos para detectores informados e cegos, respectivamente.

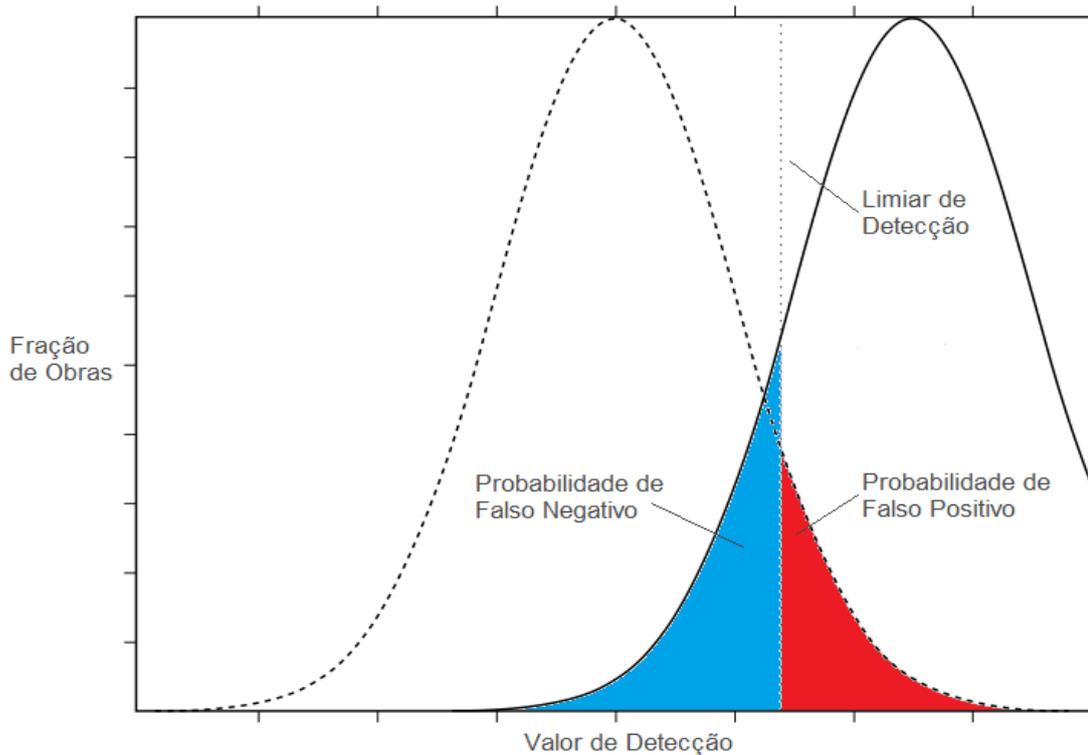
### **Falsos Positivos e Falsos Negativos**

Um erro de falso positivo ocorre quando um detector de marcas d'água indica a presença de uma marca d'água em uma obra não marcada. Já a taxa de falsos positivos se refere ao número de falsos positivos que se espera em um dado número de execuções do detector. Uma probabilidade de  $10^{-3}$  indica que é esperado, em média, um falso positivo para cada 1000 tentativas de detecção.

Inverso a um erro de falso positivo, um erro de falso negativo corresponde a não detecção da marca d'água em uma obra marcada. Ao se analisar a Figura 2.3 é facilmente compreensível o porquê de tais erros ocorrerem. A curva à direita representa a frequência dos valores de saída do detector quando a marca d'água está presente, enquanto que a curva à esquerda representa essa frequência quando não há marca d'água. Entre essas duas curvas é encontrado o limiar (*threshold*) de detecção. Quando uma obra é submetida ao detector, se seu valor de detecção for mais alto do que o valor de limiar, a mesma será considerada como portadora da marca d'água. Inversamente, se seu valor de detecção for mais baixo que o valor de limiar, o detector declarará que a obra não está marcada.

Outra dedução que pode ser feita a partir dessa figura é que ao se alterar o valor do limiar (deslocando-o para direita ou esquerda) para que mais ou menos obras sejam

consideradas marcadas, haverá uma troca (*tradeoff*) entre erros de falso positivo e erros de falso negativo.



Fonte: COX; MILLER; BLOOM; FRIDRICH; KALKER (2007, p. 218, p. 226).

Figura 2.3 – Limiar de detecção entre as curvas de frequência dos valores de saída do detector

### Robustez

Embora alguns autores definam robustez como a capacidade de sobreviver a todas as formas de distorção, sendo essas hostis ou não, neste trabalho não será adota tal definição. Serão tratadas por marcas d'água robustas aquelas que sobrevivem a operações comuns em processamento de sinais. No caso de imagens, pode-se citar como exemplo dessas operações as distorções geométricas (escala, rotação e rotação), a compressão com perdas, o corte de bordas, etc.

Já as marcas d'água que devem permanecer válidas a ataques hostis de um adversário, serão denominadas marcas d'água seguras. Nota-se que, além dos ataques hostis, as marcas d'água seguras devem sobreviver também as mesmas operações que as marcas d'água robustas e, portanto, a robustez é uma propriedade necessária para uma marca d'água segura.

Conforme já mencionado, na aplicação de autenticação de conteúdo deseja-se marcas d'água que degradem facilmente, de modo que para estas marcas d'água frágeis a robustez é uma propriedade indesejável.

Na literatura de marcas d'água é comum haverem dois usos distintos para *Signal-to-Noise Ratio* (SNR). Em discussões de eficácia e robustez, “sinal” (*Signal*) se refere à marca de água e “ruído” (*Noise*) se refere à obra de cobertura e/ou a quaisquer distorções subsequentes. Para esse caso existe a terminologia *Watermark-to-Noise Ratio* (WNR). Já, nas discussões de fidelidade, “sinal” se refere à obra de cobertura e “ruído” se refere à marca d'água. Este caso também pode ser referido como *Document-to-Watermark Ratio* (DWR) ou *Document-to-Noise Ratio* (DNR). Como normalmente fica claro a partir do contexto a qual destes significados o SNR se destina, seu uso não costuma ser problemático.

## **Segurança**

Tendo as marcas d'água seguras sido definidas na seção anterior, resta definir os ataques hostis. Um ataque hostil é qualquer processo aplicado com o intuito de frustrar a finalidade da marca d'água. Uma pessoa que realiza ataques hostis será referida como “adversário”. Os tipos de ataques podem ser classificados em três categorias:

- Remoção desautorizada
- Incorporação desautorizada
- detecção desautorizada

## **Cifras e Chaves de Marca D'Água**

A primeira vista, parece natural estender os conceitos de chaves criptográficas estudadas em criptografia para serem aplicados a marcas d'água seguras. Uma mensagem seria encriptada no processo de incorporação com uma chave e só poderia ser decriptada no processo de detecção com essa mesma chave. No entanto, infelizmente esses conceitos não são diretamente aplicáveis à marcas d'água, de maneira que um adversário precisa apenas encontrar uma chave que seja próxima para decriptar o conteúdo (COX; DOERR; FURON, 2006). Se, por outro lado, a mensagem for cifrada com uma segunda chave antes de ser incorporada, mesmo que o adversário realize o ataque de utilizar uma chave próxima descrito acima, o conteúdo obtido ainda estará protegido por essa segunda chave. Para diferenciar os dois tipos de chaves, a chave de incorporação e detecção pode ser chamada de chave de marca

d'água, enquanto que a chave que protege o conteúdo da mensagem pode ser chamada cifra (ou chave criptográfica).

## 2.3 Detecção de Marcas D'Água por Correlação

Esta seção apresenta de forma sucinta medidas de detecção baseadas em correlação. Uma correlação mede o grau de associação entre duas variáveis, onde os valores podem variar no intervalo de -1,00 até +1,00. Valores iguais aos dos extremos indicam que existe uma correlação perfeita entre as variáveis (correlação perfeita negativa para -1,00, e correlação perfeita positiva para +1,00), enquanto que uma correlação igual a "0" indica que não existe um relacionamento entre as duas variáveis.

Os sistemas de marca d'água que utilizam detecção baseada em correlação são, provavelmente, os mais abundantes na literatura. Em alguns casos, esse uso não fica evidente já que são usados algoritmos matematicamente equivalentes a uma ou outra forma de correlação. Há ainda os casos onde a correlação corresponde por apenas uma pequena parte do algoritmo de detecção, de modo que a mesma não é enfatizada na descrição do algoritmo. No entanto, nesses casos, qualquer análise de desempenho do detector deve envolver uma análise dos efeitos da correlação.

### 2.3.1 Correlação Linear

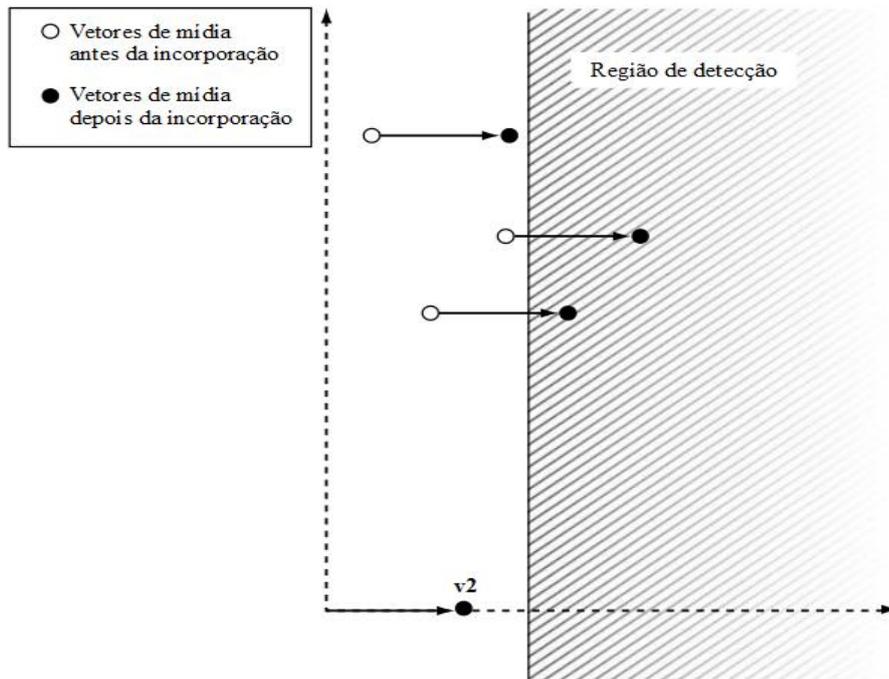
A correlação linear entre dois vetores,  $\mathbf{v1}$  e  $\mathbf{v2}$ , é o produto médio de seus elementos:

$$z_{cl}(\mathbf{v1}, \mathbf{v2}) = \frac{1}{N} \sum_T \mathbf{v1}[i] \mathbf{v2}[i]$$

Através do cálculo de  $z_{cl}$  é possível testar a presença de um sinal de referência  $\mathbf{v2}$  em um sinal recebido  $\mathbf{v1}$ . Se o  $z_{cl}$  calculado for maior que o limiar de detecção  $T_{cl}$  então  $\mathbf{v2}$  é considerado presente em  $\mathbf{v1}$ . Esta prática é chamada filtragem correspondente (*matched filtering*) e é conhecida por ser um método ótimo de detecção de sinais na presença de ruído branco gaussiano aditivo (isso é, dada qualquer probabilidade de obter um falso positivo, a filtragem correspondente minimiza a probabilidade de obter um falso negativo).

### Interpretação Geométrica

Na Figura 2.4, a área hachurada à direita compreende a região de detecção resultante da filtragem correspondente (*matched filtering*). Esse hiperplano é delimitado pelo limiar de detecção  $T_{cl}$ , e sua distância da origem corresponde ao valor desse limiar. Observa-se ainda o sinal de referência  $v_2$  perpendicular ao hiperplano.



Fonte: COX; MILLER; BLOOM; FRIDRICH; KALKER (2007, p. 86).

Figura 2.4 – Região de detecção correspondente à correlação linear

A robustez dessa região pode ser explicada pelo fato de que os vetores tirados de uma distribuição Gaussiana tendem a ser quase ortogonais à marca de referência  $v_2$ . Desse modo, quando o sinal  $v_1$  é corrompido por ruído branco gaussiano aditivo, o vetor resultante tende a ser paralelo a borda da região de detecção e por isso o  $Z_{cl}$  calculado raramente alcança o hiperplano.

### 2.3.2 Correlação Normalizada

Infelizmente, a correlação linear apresenta alguns problemas. Como a mesma é altamente dependente das magnitudes dos vetores, o sistema não será robusto contra processos simples como a mudança de brilho em imagens ou a redução do volume em músicas. Outro problema surge quando o sinal de referência é obtido a partir de uma distribuição gaussiana branca, o que torna difícil prever a probabilidade de falsos positivos no detector.

Uma possível solução para esses problemas é através da utilização da correlação normalizada, que consiste na normalização dos vetores (isso é, dividir o vetor por sua magnitude para se obter um vetor unitário de mesma direção e sentido) antes de se calcular o produto interno entre eles:

$$\begin{aligned}\bar{\mathbf{v}}_1 &= \frac{\mathbf{v}_1}{|\mathbf{v}_1|} \\ \bar{\mathbf{v}}_2 &= \frac{\mathbf{v}_2}{|\mathbf{v}_2|} \\ z_{cn}(\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2) &= \sum_T \bar{\mathbf{v}}_1[i] \bar{\mathbf{v}}_2[i]\end{aligned}$$

A desvantagem da correlação normalizada em relação a correlação linear é que a estatística de detecção não é ideal para o ruído aditivo sem que sejam feitos alguns ajustes.

### Interpretação Geométrica

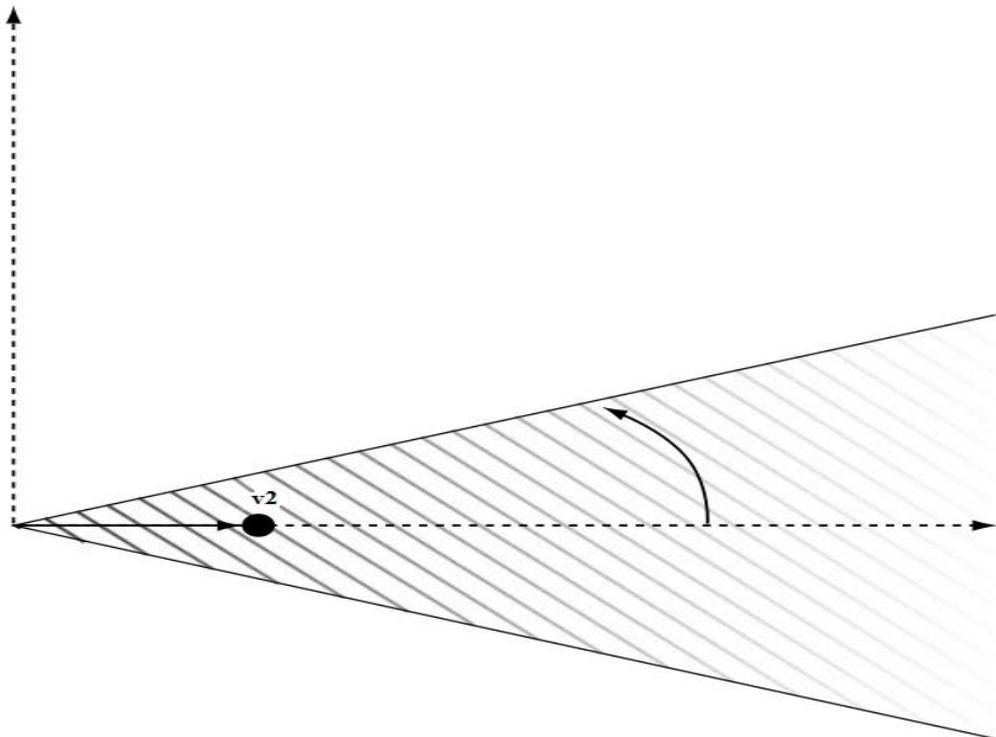
Enquanto a correlação linear leva a uma região de detecção hiperplanar, a correlação normalizada leva a uma região de detecção cônica. Como o produto interno de dois vetores é igual ao produto de seus comprimentos euclidianos e o cosseno do ângulo entre eles ( $\mathbf{v}_1 \cdot \mathbf{v}_2 = |\mathbf{v}_1| |\mathbf{v}_2| \cos(\theta)$ ), a correlação normalizada entre o sinal recebido  $\mathbf{v}_1$  e o sinal de referência  $\mathbf{v}_2$  será o cosseno do ângulo  $\theta$  entre eles:

$$\frac{\mathbf{v}_1 \cdot \mathbf{v}_2}{|\mathbf{v}_1| |\mathbf{v}_2|} = \cos(\theta)$$

Aplicar um limite a esse valor é equivalente a aplicar um limite ao ângulo entre os vetores:

$$\begin{aligned}\frac{\mathbf{v}_1 \cdot \mathbf{v}_2}{|\mathbf{v}_1| |\mathbf{v}_2|} &> \tau_{cn} \\ \tau_{\theta} &= \arccos(\tau_{cn}) \\ \theta &< \tau_{\theta}\end{aligned}$$

Desse modo, a região de detecção para o vetor de referência  $\mathbf{v}_2$  é um cone N-dimensional (*N-cone*) centrado em  $\mathbf{v}_2$  e com um ângulo de  $T_\theta$  do centro às geratrizes. Essa região de detecção é representada na Figura 2.5. Ao se observar a figura, uma constatação intuitiva é de que limites de detecção mais baixos produzirão cones mais largos, enquanto que limites mais altos produzirão cones mais agudos.



Fonte: COX; MILLER; BLOOM; FRIDRICH; KALKER (2007, p. 99).

Figura 2.5 – Região de detecção correspondente à correlação normalizada

### 2.3.3 Coeficiente de Correlação

O coeficiente de correlação é obtido pela subtração da média dos dois vetores antes de se calcular a correlação normalizada entre eles:

$$\mathbf{v}_1 = \mathbf{v}_1 - \bar{\mathbf{v}}_1$$

$$\mathbf{v}_2 = \mathbf{v}_2 - \bar{\mathbf{v}}_2$$

$$z_{cc}(\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2) = z_{cn}(\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2)$$

Isso fornece robustez contra mudanças na componente DC de uma obra, o que por sua vez proporciona robustez à adição de uma intensidade constante a todos os *pixels* de uma

imagem (um sistema que usa o coeficiente de correlação é robusto a mudanças no brilho e no contraste da imagem).

O coeficiente DC é um dos componentes obtidos ao se descrever uma função periódica no domínio da frequência. Ele corresponde ao valor médio da onda transportada do domínio espacial para o domínio das frequências por meio de alguma transformada, como a transformada de Fourier ou a transformada do cosseno, por exemplo (CONCI, 2017) e (MARQUES FILHO; VIEIRA NETO, 1999). Como alguns algoritmos de compressão com perdas fazem uso de transformadas, o uso da detecção pelo coeficiente de correlação pode apresentar bons resultados após compressões.

### **Interpretação Geométrica**

A subtração das médias dos vetores corresponde a uma projeção em um espaço de menor dimensão. Feito isso, é realizada uma correlação normalizada neste espaço. Em outras palavras, o coeficiente de correlação entre os dois vetores em um espaço  $N$  é apenas a correlação normalizada entre esses dois vetores após a projeção em um espaço  $(N-1)$ .

### 3 TRANSFORMADA DE FOURIER

Em muitos sistemas de marcas d'água digitais é necessário trabalhar em outros domínios além do domínio espacial. Este capítulo discorre brevemente sobre a transformada de Fourier, que pode ser utilizada para levar um sinal do domínio espacial para o domínio frequência. O princípio por trás dessa técnica é o de que qualquer tipo de função pode ser descrita com base em ondas sinusoidais.

Seja  $f(x)$  uma função contínua da variável real  $x$ . A transformada de Fourier  $F(u)$  é definida pela equação:

$$F(u) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \exp[-j2\pi ux] dx \quad \text{onde } j = \sqrt{-1}.$$

A partir de  $F(u)$ ,  $f(x)$  pode ser obtida através do cálculo da transformada inversa de Fourier:

$$f(x) = \int_{-\infty}^{\infty} F(u) \exp[j2\pi ux] du$$

Essas equações são chamadas de 'par de Fourier' e para existirem ambas devem ser integráveis e  $f(x)$  deve ser contínua.

A transformada de Fourier de uma função real  $f(x)$  é uma função complexa:

$$F(u) = R(u) + jI(u) \quad \text{onde } j = \sqrt{-1}.$$

Nessa equação,  $R(u)$  e  $I(u)$  são, respectivamente, os componentes reais e imaginários de  $F(u)$ . Assim como outras funções complexas,  $F(u)$  também pode ser escrita na forma exponencial:

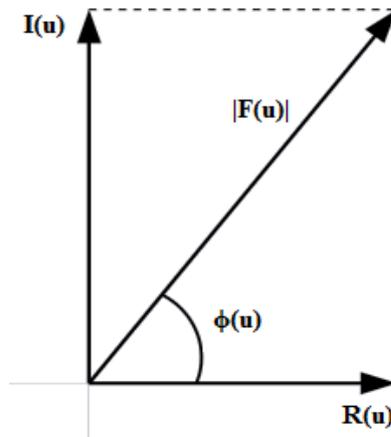
$$F(u) = |F(u)| e^{j\phi(u)} = |F(u)| \exp[j\phi(u)]$$

Denomina-se 'espectro de Fourier' de  $f(x)$  a componente de magnitude  $|F(u)|$ , e  $\phi(u)$  corresponde ao seu ângulo de fase. Essas componentes podem ser calculadas pelas fórmulas abaixo, e observando a Figura 3.1, sua origem é facilmente dedutível por relações trigonométricas.

$$|F(u)| = \sqrt{R^2(u) + I^2(u)}$$

$$\phi(u) = \arctan \left[ \frac{I(u)}{R(u)} \right]$$

Figura 3.1 – Plano complexo, também conhecido como de Plano de Argand-Gauss ou Diagrama de Argand



Fonte: Autor.

### Transformada de Fourier para sinais bidimensionais contínuos

O conceito da transformada de Fourier pode ser estendido para funções de duas variáveis. Semelhante às condições de existência do par de Fourier para uma variável, o par de Fourier para duas variáveis existirá se tanto  $f(x,y)$  e  $F(u,v)$  forem integráveis e se  $f(x,y)$  for contínua. Assim, o par de Fourier é expresso pelas equações:

$$F(u,v) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x,y) \exp[-j2\pi(ux+vy)] dx dy$$

e

$$f(x,y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} F(u,v) \exp[j2\pi(ux+vy)] du dv$$

e conseqüentemente,  $F(u,v)$  será uma função complexa com espectro  $|F(u,v)|$  e ângulo de fase  $\phi(u,v)$  dados pelas respectivas equações:

$$|F(u,v)| = \sqrt{R^2(u,v) + I^2(u,v)}$$

$$\phi(u,v) = \arctan \left[ \frac{I(u,v)}{R(u,v)} \right]$$

### Transformada de Fourier para sinais bidimensionais discretos

Dada a função  $f(x,y)$  bidimensional contínua, discretizada em  $M$  amostras ao longo de  $x$  e  $N$  amostras ao longo de  $y$ . Sua transformada discreta de Fourier será:

$$F(u, v) = \frac{1}{MN} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) \exp \left[ -j2\pi \left( \frac{ux}{M} + \frac{vy}{N} \right) \right]$$

para  $u = 0, 1, 2, \dots, M-1$ ;  $v = 0, 1, 2, \dots, N-1$ .

E terá como transformada inversa:

$$f(x, y) = \sum_{u=0}^{M-1} \sum_{v=0}^{N-1} F(u, v) \exp \left[ j2\pi \left( \frac{ux}{M} + \frac{vy}{N} \right) \right]$$

A Figura 3.2 apresenta a imagem conhecida como Lena em tons de cinza e a Figura 3.3 apresenta o seu espectro de Fourier.

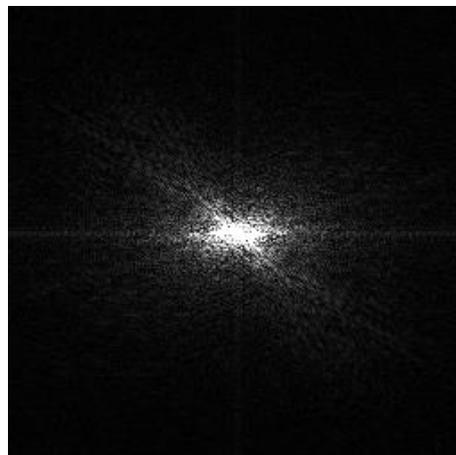
Figura 3.2 – Lena



F

Fonte: Playboy magazine (Nov. 1972).

Figura 3.3 –  
Espectro de Fourier da  
imagem Lena



Fo

Fonte: Autor.

O ponto central do espectro corresponde ao já mencionado termo DC (valor médio da onda) e ao seu redor estão concentrados os componentes de baixa frequência. Conforme a distância para o centro aumenta, aumenta também a frequência dos componentes.

Ao se aplicar a transformada inversa sobre o espectro, obtêm-se uma reconstrução idêntica à imagem original (CONCI, 2017) e (MARQUES FILHO; VIEIRA NETO, 1999).

### **Teorema da Convolução**

Uma das propriedades mais importantes da transformada de Fourier diz respeito ao teorema da convolução. Dada a convolução (denotada pelo símbolo  $*$ ) do sinal  $f(x)$  com o operador linear  $g(x)$ . Então:

$$f(x) * g(x) \Leftrightarrow F(u) G(u)$$

e

$$f(x) g(x) \Leftrightarrow F(u) * G(u) .$$

Ou seja, uma convolução no domínio espacial é equivalente a uma multiplicação no domínio frequência. E uma multiplicação no domínio espacial equivale a uma convolução no domínio frequência (MARQUES FILHO; VIEIRA NETO, 1999).

O teorema da convolução pode ser estendido para funções bidimensionais, sendo muito útil na filtragem de imagens, com destaque para os filtros passa-baixas, passa-altas e passa-faixa (MARQUES FILHO; VIEIRA NETO, 1999).

## 4 MARCAS D'ÁGUA ROBUSTAS

Conforme já mencionado, alguns autores definem robustez como a capacidade das marcas d'água de permanecerem válidas a todas as formas de distorção. No entanto, neste trabalho serão consideradas robustas as marcas d'água concebidas para sobreviver a processos não maliciosos aos quais as obras podem ser submetidas.

A robustez a determinados processos pode exigir um alto preço a ser pago em custo computacional, fidelidade, carga útil de dados, etc. Portanto, ao se projetar uma marca d'água robusta, pode ser sábio identificar os processos mais prováveis que serão aplicados às obras marcadas, tornando a marca d'água robusta contra esses processos e ignorando aqueles menos prováveis.

A seção 4.1 deste capítulo apresenta abordagens gerais para tornar as marcas d'água robustas. A seção 4.2, descreve algumas distorções valométricas (*valumetric*) (isso é, distorções que alteram os valores de amostras individuais em uma obra, como *pixels* em uma imagem, por exemplo). A seção 4.3 discute as distorções temporais e geométricas (como atraso, translação, rotação e dimensionamento) e formas de tratá-las.

### 4.1 Abordagens Gerais

Existem várias estratégias gerais para fazer as marcas d'água serem detectáveis após sua obra de cobertura ser distorcida. Algumas delas visam tornar as marcas d'água robustas contra todas as possíveis distorções (desde que preservem o valor da obra de cobertura, obviamente), enquanto que outras são estratégias para lidar com tipos específicos de distorções. Porém, na prática, um sistema de marca d'água empregará múltiplas estratégias para lidar com vários tipos de distorção.

Uma nota sobre a terminologia: a descrição e análise de uma marca d'água podem ser realizados em um certo domínio. No entanto, isso não significa necessariamente que incorporação e a detecção serão implementados nesse mesmo domínio, podendo ser implementados em algum outro.

#### 4.1.1 Incorporação Redundante

Quando uma obra é distorcida, os coeficientes (*pixels* de uma imagem, por exemplo) de sua representação podem ser afetados de maneira diferente. Uma estratégia que pode ser

utilizada para a marca d'água sobreviver a uma ampla variedade de distorções é a de incorporar redundantemente essa marca d'água em vários coeficientes, de modo que alguns permaneçam detectáveis após as adulterações.

Pode-se dizer que a incorporação redundante ocorre em algum domínio se a marca d'água puder ser detectada em vários subconjuntos dos coeficientes. O exemplo mais óbvio disso é notado em marcas d'água repetidas em forma de mosaicos.

A ideia de incorporação redundante pode ainda ser estendida para múltiplas codificações da marca d'água, onde cada codificação é projetada para sobreviver a distorções distintas. Essa abordagem é utilizada em (LU; MARK LIAO; HUANG; SZE, 1999).

#### **4.1.2 Codificação de Espectro Espalhado**

Ao se aplicar a incorporação redundante ao domínio da frequência surge um novo paradigma conhecido como codificação do espectro espalhado. Nesse sistema, as mensagens são codificadas como uma série de símbolos que são transmitidos em uma sequência temporal. Costuma-se codificar cada símbolo como sequências pseudoaleatórias de 0s e 1s. Ao serem espalhados por uma ampla faixa de frequências, esses símbolos ainda serão detectáveis se apenas uma parcela das frequências do sinal for distorcida.

As comunicações de espectro espalhado proveem duas características importantes às marcas d'água:

- Como a energia do sinal inserida em uma frequência única é muito pequena, o risco de artefatos perceptíveis é reduzido.
- Robustez a muitas distorções de sinal comuns, já que a marca d'água está dispersa por um grande número de frequências.

#### **4.1.3 Incorporação em Coeficientes Perceptualmente Significativos**

Embora nas subseções anteriores tenham sido mencionadas estratégias que visam incorporar a marca d'água sobre vários coeficientes distintos, nem todos coeficientes podem ser propícios. Alguns coeficientes são tão suscetíveis a alterações que é muito provável que sejam danificados durante algum processamento. Um exemplo disso são as altas frequências na representação de Fourier de uma imagem que são afetadas pela maioria das formas de processamento de imagem.

Uma proposta geral é que coeficientes que são perceptualmente significativos tendem a serem confiáveis, enquanto os que são perceptualmente insignificantes tendem a serem não confiáveis (COX; KILIAN; LEIGHTON; SHAMOON, 1997). Essa proposta é de certa forma intuitiva, já que as tecnologias de compressão, transmissão e exibição são normalmente projetadas para preservar características perceptualmente significativas.

Por outro lado, se algum procedimento danificar os coeficientes perceptualmente significativos de uma obra, talvez não exista a necessidade de sobrevivência para a marca d'água. Se a obra de cobertura for distorcida a ponto de se tornar irreconhecível, seu valor é perdido e a informação incorporada deixa de fazer sentido. Conforme já mencionado, uma marca d'água carrega informações relacionadas à obra de cobertura.

Um problema que surge da abordagem de incorporar a marca d'água nos coeficientes perceptualmente significativos é que ela contrasta com a intenção de se criar marcas d'água imperceptíveis. Uma possível solução é utilizar a codificação de espectro espalhado em um grande número de coeficientes perceptualmente significativos (COX; KILIAN; LEIGHTON; SHAMOON, 1997). Como a quantidade de energia em cada frequência é muito pequena, espera-se que a mudança em cada coeficiente tenda a ser imperceptível. Uma solução alternativa é a de incorporar em coeficientes médios de significância perceptiva, evitando assim, coeficientes muito perceptíveis e coeficientes pouco confiáveis ao mesmo tempo. Muitas técnicas de marca d'água para imagens utilizam essa estratégia (HSU; WU, 1999), (PEREIRA; PUN, 2000) e (PEREIRA; RUANAIDH; DEGUILLAUME; CSURKA; PUN, 1999).

#### **4.1.4 Incorporando em Coeficientes de Robustez Conhecida**

A subseção anterior trata sobre a incorporação em coeficientes perceptualmente significativos. A intenção desse tipo de incorporação é a de criar marcas d'água resistentes contra todos os processos possíveis. Porém, nem todas aplicações são concebidas para sobreviver a todos os processos possíveis, mas sim a um subconjunto específico de processos. Nesse caso, pode-se lidar com esses processos de forma mais direta.

No primeiro passo, é necessário descrever a marca d'água em um domínio robusto àquele subconjunto de processos. Incorporar a marca d'água nas magnitudes de Fourier da imagem pode ser uma boa escolha se a preocupação com mudanças espaciais for maior do que com filtragens lineares, por exemplo.

O segundo passo consiste em identificar os coeficientes que melhor sobrevivem às distorções esperadas. Enquanto que para algumas distorções isso pode ser feito de forma analítica, para outras pode ser necessário inúmeros testes com uma ampla variedade de conteúdo para se chegar a um modelo estatisticamente confiável. Os testes se resumem a comparar coeficientes correspondentes após a incorporação e imediatamente antes da detecção, determinando assim, como o canal afeta cada coeficiente.

O segundo passo pode ser substituído por uma técnica que se adapta melhor a obras individuais. Antes de incorporar uma marca d'água à obra, são aplicadas várias distorções simuladas para se medir a robustez de cada coeficiente no domínio escolhido. Os coeficientes considerados mais robustos serão utilizados para incorporar a marca d'água. Desse modo, cada obra pode possuir uma lista de coeficientes diferentes e a essa lista deve ser fornecida para o detector informado junto com a obra marcada (LIANG; RODRIGUEZ, 2000).

#### **4.1.5 Inverter Distorções no Detector**

Todas as abordagens da seção 4.1 analisadas até o momento buscam criar marcas d'água que continuam as mais fiéis possíveis após o processamento normal. Uma abordagem essencialmente diferente consiste em inverter um procedimento durante a detecção. Se, durante o processo de detecção, o detector puder constatar que uma distorção conhecida foi aplicada à obra marcada, então o mesmo pode tentar aplicar a distorção inversa para obter uma aproximação da versão não afetada.

Alternativamente, pode ser preferível que o detector aplique a distorção descoberta à marca d'água de referência em vez de aplicar a distorção inversa à obra marcada. As razões para isso são que o processo inverso pode ter elevado custo computacional para ser calculado, ser impreciso ou instável. Desse modo, o reconhecimento é feito através da comparação da obra distorcida com a marca d'água de referência distorcida pelo detector.

A parte difícil da abordagem proposta nesta subseção é precisar qual é a distorção que deve ser invertida. No pior caso, pode ser necessário inverter e testar a obra para um grande número de processos, isso é, realizar uma busca exaustiva. No entanto, para alguns tipos de processamento é possível identificar um pequeno número de prováveis distorções. Nesse caso, o detector precisa inverter e testar a obra somente para esse conjunto de distorções candidatas, reduzindo o custo da busca e a probabilidade de falsos positivos.

Por terem acesso à obra original (ou alguma informação derivada da mesma), detectores informados conseguem identificar a distorção mais facilmente que detectores

cegos. A abordagem de inverter distorções no detector é mais comumente utilizada para distorções geométricas e temporais, que serão apresentadas na Seção 4.3.

#### **4.1.6 Antecipando Distorções na Incorporação**

A abordagem de antecipar as distorções na incorporação é indicada quando a marca d'água precisa sobreviver a um pequeno grupo de distorções muito bem definidas. A ideia é incorporar múltiplas marcas d'águas — uma marca d'água para quando a obra não sofre nenhuma distorção e uma marca d'água diferente para cada uma das distorções do grupo bem definido. Durante a incorporação, cada marca d'água recebe a distorção inversa da distorção para qual aquela marca d'água deve permanecer válida. Desse modo, uma das marcas d'água será detectada se a obra for distorcida.

Apesar de, na maioria das vezes, as aplicações não permitirem a identificação de um conjunto pequeno e preciso de distorções às quais a marca d'água deve permanecer válida, essa abordagem apresenta várias vantagens. Desde que as distorções identificadas sejam aproximadamente reversíveis, é possível aplicar a técnica a qualquer sistema de marcas d'água. Além disso, os detectores podem ser simplificados e permanecem operacionais caso uma nova distorção seja adicionada ao conjunto bem definido.

## **4.2 Robustez a Distorções Valométricas**

As distorções valométricas (*valumetric*) são distorções que alteram os valores de amostras individuais em uma obra. Nesta seção serão analisados os efeitos dos quatro principais tipos de distorções valométricas sobre a detecção de marcas d'água: ruído aditivo, mudanças de amplitude, filtragem linear e compressão com perdas. Grande parte dessas distorções podem ser combatidas com a aplicação de técnicas já discutidas.

### **4.2.1 Ruído Aditivo**

O ruído aditivo consiste em algum sinal aleatório adicionado à obra por algum processo. Além da maioria das análises de algoritmos de marca d'água assumirem que a obra será transmitida por canais de ruído aditivo, os algoritmos mais robustos são projetados

especificamente para sobreviver a esse tipo de distorção. Isso se deve ao fato de que o ruído aditivo é independente da obra e, portanto, fácil de abordar de forma analítica.

A correlação linear é um método ótimo de detecção de sinais na presença de ruído branco gaussiano aditivo, de modo que é razoável esperar que sistemas que a empregam na detecção sejam pouco suscetíveis a tal ruído. O mesmo não é válido para a correlação normalizada, que não é ideal para o ruído aditivo.

#### 4.2.2 Mudanças de Amplitude

Embora seja tentador tratar somente ruídos aditivos (devido à facilidade de sua análise), grande parte das distorções não são bem modeladas pelos mesmos. Enquanto os ruídos aditivos correspondem apenas ao acréscimo de algum sinal aleatório, é comum que a mudança realizada sobre a obra esteja relacionada com a obra em si. Um exemplo simples é o de mudança de amplitude. Nas músicas, a mudança de amplitude representa uma mudança no volume, enquanto que nas imagens e vídeos, uma mudança de brilho e contraste.

Para que uma marca d'água seja totalmente robusta a mudanças de amplitude, a região de detecção deve, a partir da origem, incluir todos os pontos ao longo do raio do espaço de mídia. A correlação linear não é adequada para tal já que muda linearmente com amplitude. Já a correlação normalizada é especificamente planejada para ser independente da amplitude.

#### 4.2.3 Filtragem Linear

Muitas operações sobre imagens, como desfoque e nitidez (*blurring* e *sharpening*), e áudio, como os ajustes de base e agudos (*base* e *treble*), são implementadas através de filtros lineares. A filtragem linear altera as Obras de maneira determinista, através da convolução da obra com um filtro. Uma maneira alternativa de realizar essa convolução é através de uma multiplicação no domínio de Fourier (teorema da convolução).

No domínio temporal, ou espacial, um filtro simétrico em relação ao seu centro terá todos os coeficientes em sua representação de Fourier composto por valores reais. Assim, filtrar uma obra com um filtro simétrico equivale a escalar cada elemento de sua representação de Fourier por um valor real. O efeito prático disso é que um filtro simétrico ou atenua ou amplifica cada uma das frequências da obra.

A aplicação de um filtro assimétrico, por outro lado, afetará não somente as amplitudes, mas também as fases das frequências na representação de Fourier da obra, já que

tanto a mudança de amplitude como a mudança de fase dependem da frequência. Como resultado, enquanto as fases de algumas frequências podem ser significativamente alteradas, outras não são afetadas.

Para tornar as marcas d'água seguras contra filtros conhecidos, deve-se incorporar a maior parte da energia do padrão de referência nas frequências onde esses filtros terão pouco ou nenhum efeito. Em geral, alterações nas frequências onde o padrão de referência tem alta energia afetará mais a taxa de detecções.

Uma alternativa a estratégia descrita no parágrafo anterior é a de incorporar a marca d'água nas fases das frequências na representação de Fourier da obra (KALKER; JANSSEN, 1999) e (RUANAIDH; DOWLING; BOLAND, 1996). Esse método oferece robustez à convolução com filtros simétricos já que os mesmos afetam apenas as magnitudes dos coeficientes da representação de Fourier da obra.

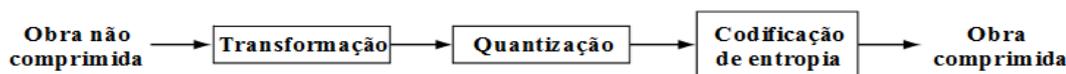
#### **4.2.4 Compressão com Perdas**

A compressão com perdas resulta em cópias não idênticas à obra original. Essa perda de informação pode ser aceitável já que as representações digitais costumam ter redundância de informações, e a perda dessa informação redundante pode passar despercebida pelos sentidos humanos.

Existe um conflito fundamental entre a compressão com perdas e as marcas d'água. Supondo um algoritmo de compressão com perdas ideal que remova toda a redundância, se uma marca d'água deve sobreviver a essa compressão, então uma obra comprimida não marcada e uma obra comprimida marcada serão diferentes. Isso implica em obras perceptualmente diferentes. Desse modo, não deveria ser possível ter uma marca d'água que sobrevivesse a compressão com perdas sem afetar a fidelidade da obra. Na prática, no entanto, é perfeitamente possível uma marca d'água sobreviver a compressão com perdas mantendo uma alta fidelidade já que os algoritmos de compressão com perdas estão longe de ser ideais.

Os algoritmos de compressão com perda mais comuns seguem os três passos apresentados na Figura 4.1:

- 1°) aplicação de uma transformação linear que preserva a energia (Ex. transformada DCT);
- 2°) cada um dos termos resultantes é quantizado independentemente;
- 3°) aplicação de uma codificação de entropia para representar a obra com menos bits (Ex. codificação de Huffman).



Fonte: COX; MILLER; BLOOM; FRIDRICH; KALKER (2007, p. 320).

Figura 4.1 – Representação de um algoritmo de compressão com perdas genérico

Dentre esses três passos, a quantização é o único que apresenta perdas, de modo que a sobrevivência das marcas d'água depende da sobrevivência a esse passo.

Para um fator de quantização relativamente pequeno, a quantização se aproxima da adição de ruído independente. Através do teorema de amostragem de Nyquist, Widrow (WIDROW, 1961) mostra que o valor máximo para esse fator de quantização pode ser encontrado. Dada a Função Densidade de Probabilidade (FDP) de uma variável aleatória, essa FDP pode ser reconstruída a partir da FDP quantizada se a “frequência de quantização”,  $\phi = 2\pi/q$ , for pelo menos duas vezes maior do que a maior frequência presente na transformada de Fourier da FDP. Se esta condição for satisfeita, então o ruído de quantização resultante é independente da variável aleatória. No entanto, a condição de Widrow frequentemente não é satisfeita pelo fato de que em sistemas de marcas d'água normalmente se tem pouco controle ou sobre o fator de quantização, ou sobre a FDP do conteúdo não marcado.

Eggers e Girod (EGGERS; GIROD, 2001) argumentam que o efeito da quantização sobre a detecção de marcas d'água é determinado pela correlação esperada entre o ruído de quantização e o padrão de referência da marca d'água.

### 4.3 Robustez a Distorções Temporais e Geométricas

Esta seção trata de distorções temporais e geométricas. As distorções temporais, que afetam os sinais de áudio e vídeo, incluem o atraso e a escala temporal. Já as distorções geométricas, que afetam os dados de imagem e vídeo, incluem rotação, translação, escala, cisalhamento (inclinação), transformação perspectiva e mudanças nas proporções (*aspect ratio*). As abordagens propostas para tratar essas distorções costumam se encaixar em uma das seguintes cinco principais classes: busca exaustiva, sincronização ou registro, autocorrelação, marca d'água invariante e sincronização implícita. As distorções temporais e

geométricas podem ser globais, afetando todas as amostras de forma semelhante ou podem variar localmente.

### 4.3.1 Distorções Temporais e Geométricas

Tanto em áudio quanto em vídeo, a escala temporal pode ocorrer quando o detector tiver que reconhecer a marca d'água a partir de um ponto arbitrário no tempo de duração da obra. Além disso, a escala temporal pode ocorrer em áudio como resultado de mudanças simples na sua velocidade de execução, enquanto que em vídeo, a mesma pode ocorrer em conversões entre as taxas de quadros.

Dada uma escala temporal de  $s$  e um atraso de  $\delta$ , uma obra afetada pelos mesmos pode ser expressa por:

$$c_n[t] = c[st + \delta]$$

As distorções geométricas em vídeo podem ocorrer quando o vídeo sofre alterações de formato, tanto em tamanho de tela quanto no aumento da amostragem para alta definição. Em imagens, as distorções geométricas estão associadas a manipulações pelo usuário, tanto intencionais como não intencionais. Dentre as manipulações que podem gerar distorções geométricas não intencionais se pode citar a impressão, a fotocópia e o escaneamento.

As distorções geométricas podem ser expressas por transformações afins:

$$\begin{bmatrix} x_n \\ y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_t \\ y_t \end{bmatrix}$$

Na fórmula acima, a posição resultante das distorções geométricas é dada por  $(x_n, y_n)$ . A posição inicial é dada por  $(x_0, y_0)$ . As translações são realizadas pelo vetor  $(x_t, y_t)$ , enquanto que a matriz 2x2 define todas as outras transformações lineares.

Diferentes padrões de marca d'água têm diferentes níveis de robustez natural a distorções temporais e geométricas.

### 4.3.2 Pesquisa Exaustiva

A busca exaustiva é a estratégia mais simples para detectar uma marca d'água após uma distorção temporal ou geométrica. Para realizá-la é necessário definir as prováveis distorções e o intervalo em que os parâmetros das distorções podem variar, além de uma resolução de pesquisa para cada uma. Feito isso, todas as combinações de valores dos

parâmetros são examinadas. A pesquisa pode ser realizada ao se aplicar o detector de marcas d'água uma vez para cada padrão de referência após a inversão de cada distorção hipotética.

Ao se considerar a busca exaustiva, surgem duas importantes questões. A primeira diz respeito ao custo computacional, já que a quantidade de trabalho computacional cresce exponencialmente com o aumento do espaço de busca.

A segunda questão importante é o aumento da probabilidade de falsos positivos. Cada obra não marcada será distorcida e testada inúmeras vezes no detector. Se o detector considerar a marca d'água presente em pelo menos um desses testes, então será produzido um falso positivo.

### 4.3.3 Registro e Sincronização

Na subseção anterior foram descritas duas dificuldades ao se utilizar a busca exaustiva: o custo computacional e o aumento na probabilidade de falsos positivos. Se a obra analisada (uma obra que pode conter uma ou mais marcas d'água) puder ser alinhada com o padrão de referência antes da aplicação do detector, essas dificuldades serão contornadas. Na literatura sobre processamento de imagens, esse recurso é designado registro (*registration*), enquanto que na de áudio é conhecido como sincronização (*synchronization*). No caso de detectores informados em que a obra original está disponível durante o processo de detecção, técnicas de reconhecimento de padrões podem ser utilizadas para nivelar a obra original com a obra analisada. Já para o caso de detectores cegos, uma abordagem possível é a utilização de um padrão de sincronização adicional, além da marca d'água.

O padrão de sincronização pode ser especificamente projetado para ser facilmente identificado quando submetido a distorções temporais e geométricas (RHOADS, 1998). Nesse caso, a detecção da marca d'água propriamente dita ocorrerá em uma segunda fase. Na primeira fase o padrão de sincronização é encontrado e a distorção temporal ou geométrica é determinada através da comparação do padrão extraído com o padrão de registro incorporado no detector. Após a distorção inversa ser aplicada, o processo de detecção da marca d'água pode ser realizado. É importante ressaltar que nesse sistema, uma detecção positiva correta requer que tanto a marca de sincronização quanto a marca d'água sejam incorporados e detectados com êxito.

Infelizmente, a utilização de padrões de sincronização apresenta seus próprios contratempos. Ao usar esses padrões para fornecer robustez às distorções geométricas e temporais, um custo que será pago, sacrificando um pouco da fidelidade ou da robustez geral

do sistema. Outra questão importante que surge diz respeito à segurança. É comum que um mesmo padrão de sincronização seja utilizado em várias obras distintas, o que facilita ao detector descobrir a distorção aplicada a obra. No entanto, um adversário que obtenha um conjunto de obras marcadas pode descobrir o padrão de sincronização e por conseguinte removê-lo, limitando assim a capacidade do sistema de sobreviver a distorções temporais e geométricas. Desse modo, é pertinente que o padrão de sincronização seja tão seguro quanto a própria marca d'água.

#### **4.3.4 Autocorrelação**

Na seção anterior foram descritos os padrões de sincronização e como eles ajudam o detector a alinhar a obra com o padrão de referência para a identificação da marca d'água. Uma ideia que surge naturalmente é a de união do padrão de sincronização com a marca d'água em um único padrão a ser incorporado. Em alguns casos isso é possível, porém requer que a marca d'água contenha algumas propriedades que permitam a sincronização (RHOADS, 1998). A propriedade utilizada na abordagem da autocorrelação é uma periodicidade.

A autocorrelação pode identificar e inverter qualquer escala aplicada à obra (HONSINGER, 2000), (HONSINGER; DALY, 1998) e (KUTTER, 1998) através de um padrão de sincronização periódico. Essa periodicidade pode ser identificada através de um trem de picos periódicos no padrão adicionado. Uma detecção correta e positiva requer que tanto a identificação da distorção quanto a detecção da marca d'água após a inversão dessa distorção sejam bem-sucedidas.

Embora as técnicas de autocorrelação apresentem um bom potencial, dependendo da aplicação, ambos os processos podem precisar ser robustos e/ou seguros.

#### **4.3.5 Marca D'Água Invariantes**

Esta seção trata sobre marcas d'água invariantes a distorções temporais ou geométricas, uma abordagem diferente de “detectar e inverter” que haviam sido propostas nas seções anteriores. A estratégia dessa abordagem se baseia no uso de vetores de características invariantes como parte do processo de extração de sinal.

A magnitude de Fourier é uma boa opção para inserção de marcas d'água em áudio, já que é invariante a deslocamentos ou atrasos (BRACEWELL, 1986). Para duas dimensões, pode-se usar a transformada de Fourier-Mellin para criar vetores de características que são

invariantes à rotação, dimensionamento e translação (HSU; ARSENAULT; APRIL, 1982), (LIN; BRANDT, 1993), (SHENG; ARSENAULT, 1986), (SHENG; DUVERNOY, 1986) e (WU; STARK, 1985). A ideia por trás do uso dessa transformada consiste em representar a imagem de Fourier em coordenadas polares e depois aplicar uma transformação logarítmica ao eixo radial.

#### **4.3.6 Sincronização Implícita**

Semelhante às técnicas de sincronização ou registro e autocorrelação, a sincronização implícita alinha a obra com o padrão de referência antes da detecção. A diferença é que em vez de utilizar algum padrão para realizar esse ajuste, a sincronização implícita utiliza características reais da própria obra para realizar esta sincronização. A ideia por trás dessa abordagem é de incorporar a marca d'água em algum momento ou geometria com alguma característica específica da obra original.

Uma possível fonte de dificuldade para a sincronização implícita é que para uma detecção bem-sucedida, a mesma requer que algum ponto com a característica específica onde a marca d'água foi incorporada seja reconhecível pelo detector. Algumas distorções podem afetar os locais de características específicas, o que por sua vez pode levar a marca d'água a não ser detectada.

## 5 IMPLEMENTAÇÃO, TESTES E RESULTADOS

Este capítulo apresenta a implementação do protótipo bem como os resultados alcançados. A seção 5.1 descreve as ideias utilizadas na implementação. A seção 5.2 descreve as configurações utilizadas para a realização dos testes e exibe as informações obtidas. E, por fim, a seção 5.3 faz uma análise visual das imagens resultantes e apresenta conjecturas baseadas nos histogramas das imagens.

### 5.1 Implementação

A implementação do protótipo foi baseada no artigo “**Self-similar ring shaped watermark embedding in 2-D DFT domain**” (SOLACHIDIS; PITAS, 2000). A ideia consiste em incorporar uma marca d’água em formato de anel na componente de magnitude de uma imagem. Esse formato de anel permite explorar umas das propostas de robustez vista na seção 4.1.3, a de incorporar a marca d’água nos coeficientes de frequência média, já que no centro do espectro estarão os componentes de baixa frequência e a medida que a distância para o centro aumenta, aumenta também a frequência dos componentes. Os coeficientes de frequência média tendem a ser menos visíveis que os coeficientes de baixa frequência e menos sensíveis que os componentes de alta frequência.

Para a construção do anel é gerado um retângulo composto dos valores +1 e -1. Esses valores são obtidos de forma randômica a partir de uma distribuição normal. O anel é composto por subanéis e setores. Cada setor de um subanel terá uma cópia do retângulo, e cada subanel terá o dobro da largura do subanel interno. A Figura 5.1 apresenta um exemplo dessa marca d’água. Para fins de ilustração, o retângulo de valores +1 e -1 foi substituído pela imagem Lena colorida.

Para se configurar uma marca d’água, é necessário fornecer o seu número de setores, os seus raios interno e externo e a espessura do seu subanel mais interno. Os raios interno e externo e a espessura do subanel mais interno são descritos como porcentagens do raio do maior círculo que pode ser inscrito no retângulo da imagem, ou seja, são descritos como porcentagens da metade do lado menor desse retângulo.

Figura 5.1 –  
Exemplo da  
Marca  
D'Água



Fonte: Autor.

A implementação é formada por três partes: o gerador de marcas d'água, o incorporador e o detector. O gerador possui uma interface gráfica, enquanto que o incorporador e o detector são aplicações de linha de comando. Para se marcar uma imagem (ou se fazer a detecção da marca d'água) a marca d'água deve possuir as mesmas dimensões que a imagem a ser marcada (ou detectada. No caso da detecção serão duas marcas d'águas: uma que será considerada como se fosse inerente ao detector, e a outra será a marca d'água fornecida para a detecção). Além disso, a marca d'água deve ser posta no mesmo diretório de onde as aplicações de linha de comando serão evocadas (normalmente esse diretório será o mesmo das imagens alvo da marcação ou detecção).

A implementação foi realizada na linguagem de programação C++, utilizando o sistema operacional Windows e a biblioteca *Open Source Computer Vision Library*

(OpenCV). A biblioteca OpenCV é uma biblioteca de visão computacional e oferece abstrações para lidar com imagens de uma maneira mais direta. Por exemplo, ao invés do programador ter que se preocupar com o detalhes do formato de uma imagem que deseja abrir, a biblioteca cuida desses detalhes e aloca a imagem em uma matriz genérica para poder ser usada dentro do programa. Além disso, a biblioteca oferece outras funções úteis que foram aproveitadas na implementação do protótipo, como a transformada discreta de Fourier (utilizada no incorporador e no detector) e sua inversa (utilizada no incorporador), uma função que gera pontos para se desenhar uma elipse (utilizada para gerar os pontos de referência de cada setor de um subanel na construção da marca d'água) e uma função calcula a soma ponderada de duas matrizes (utilizada no incorporador para somar o a magnitude de Fourier do canal azul da imagem com a marca d'água multiplicada pelo fator de força de incorporação  $\beta$ ).

A ideia inicial para a construção da marca d'água era a de se gerar os setores com a função que gera pontos para se desenhar uma elipse (passando dois raios do mesmo tamanho, são gerados pontos para um círculo. Como a função aceita como parâmetro também o ângulo inicial e o ângulo final, é possível gerar arcos) e então se “colar” o retângulo composto dos valores +1 e -1 como se fossem uma textura para um objeto 3D. No entanto, o OpenCV não oferece nenhuma função que faça isso, de modo que foi necessária uma adaptação do algoritmo de Bresenham para desenhar a marca d'água *pixel a pixel*. O algoritmo de Bresenham original foi concebido para determinar quais *pixels* de um dispositivo matricial (como um monitor) devem ser pintados quando se desenha uma linha com inclinação qualquer. Desse modo, o retângulo de valores +1 e -1 é percorrido, seu valor é lido, e a marca d'água é desenhada utilizando os pontos dos arcos como coordenada.

A implementação do incorporador e do detector seguem a descrição do artigo, e podem ser conferidas abaixo.

### **Incorporação**

Seja  $f(x,y)$  a imagem original e  $F(u,v)$  sua transformada discreta de Fourier. Dessa transformada, obtêm-se sua magnitude  $M(u, v) = |F(u,v)|$  e sua fase  $P(u, v)$ . Seja também  $W(u,v)$  a marca d'água no domínio das frequências, e  $W(x,y)$  a marca d'água no domínio espacial. Desse modo, a incorporação da marca d'água ao espectro de Fourier é feita através da adição:

$$M'(u,v) = M(u,v) + \beta W(u,v) ,$$

onde  $\beta$  é o fator de força com que a marca d'água é incorporada. Após isso, a transformada que contém a marca d'água é obtida por:

$$F'(u,v) = M'(u,v)e^{P(u,v)},$$

e a imagem marcada pode ser obtida através do cálculo da transformada inversa:

$$f'(x,y) = IDFT(F'(u,v)).$$

Para garantir que a transformada inversa é real, a marca d'água deve satisfazer a seguinte simetria no domínio das frequências (RUANAIDH; DOWLING; BOLAND, 1996):

$$W_{k,l} = W_{N-k, N-l}, \forall k, l \in [1, N]$$

Existe uma maneira alternativa equivalente ao processo de incorporação realizado acima que consiste em utilizar a componente de fase da imagem para trazer a marca d'água para o domínio espacial. Assim:

$$W(x,y) = IDFT(W(u,v), P(u,v)).$$

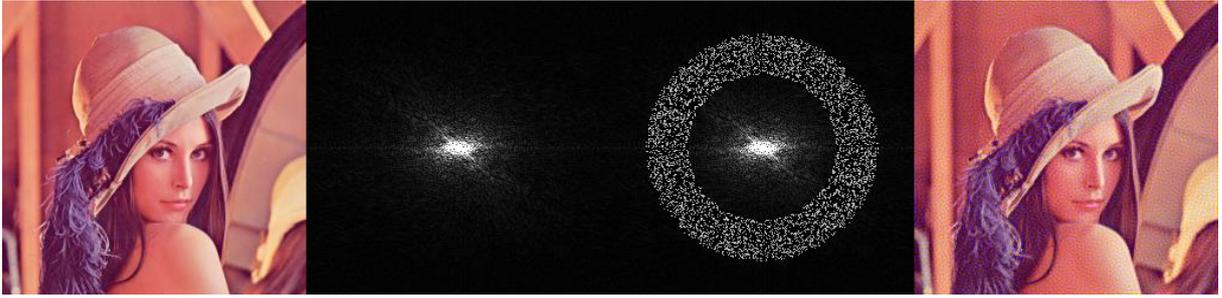
Nesse caso, a incorporação também se dará através da adição, só que dessa vez, no domínio espacial:

$$f'(x,y) = f(x,y) + \beta W(x,y).$$

Devido ao fato do olho humano apresentar uma menor resposta ao canal azul do que aos canais verde e vermelho, muitos sistemas de marcas d'água põe grande parte do sinal da marca d'água nesse canal (HARTUNG; KUTTER, 1999), (KUTTER; BHATTACHARJEE; EBRAHIMI, 1999) e (SAYROL; VIDAL; CABANILLAS; SANTAMARIA, 1999). Neste trabalho, decidiu-se pôr a marca d'água integralmente no canal azul.

A Figura 5.2 exibe quatro imagens. A primeira (mais à esquerda) é a imagem Lena original. A segunda é o espectro de Fourier de seu canal azul. A terceira corresponde ao espectro de Fourier de seu canal azul acrescido da marca d'água. A última (mais à direita) apresenta a imagem marcada.

Figura 5.2 – Etapas da Incorporação da Marca D'Água



Fonte: Autor.

## Detecção

A detecção é realizada pela comparação do correlator normalizado  $c'$  com o limiar de detecção. Esse correlator é obtido pela fórmula  $c' = c/\mu_c$ .

Seja  $M'(u,v)$  a magnitude da Transformada Discreta de Fourier da imagem a ser testada. Seja também  $W(u,v)$  a marca d'água inerente ao detector e  $W'(u,v)$  a marca d'água fornecida. Então  $c$  corresponde a seguinte correlação:

$$c = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (W(u,v)M'(u,v) + \beta W(u,v)W'(u,v))$$

Assumindo que  $W(u,v)$  e  $M'(u,v)$ , são variáveis aleatórias independentes e identicamente distribuídas e  $W$  tem valor médio zero, o valor médio de  $c$  é:

$$\mu_c = \left\{ \begin{array}{l} \pi(R_2^2 - R_1^2)\beta \\ 0 \\ 0 \end{array} \right\} \left\{ \begin{array}{l} \text{Se } W = W' \\ \text{Se } W \neq W' \\ \text{Se a Marca D'Água não estiver presente} \end{array} \right\}$$

onde  $R_1$  corresponde ao raio interno,  $R_2$  ao raio externo e  $\beta$  é o fator de força de incorporação. Assim, o valor médio do correlator normalizado  $c'$  deve ser 1 para imagens com a marca d'água correta e 0 para imagens que contenham outra marca d'água ou que não estejam marcadas.

Se a marca d'água inerente  $W(u,v)$  for igual a marca d'água fornecida  $W'(u,v)$ , então a fórmula acima pode ser reescrita como:

$$c = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (W(u,v)M'(u,v) + \beta W^2(u,v))$$

O termo  $\beta W(u,v)W'(u,v)$  (ou  $\beta W^2(u,v)$ , no caso de marcas d'água iguais) acaba dominando o processo de detecção, como será visto nos testes a seguir.

## 5.2 Testes e Resultados

Para realizar os testes foi utilizado o *benchmark* de robustez de marcas d'água em imagens **StirMark** (PETITCOLAS; ANDERSON; KUHN, 1998), juntamente com 18 imagens *true color* (24 bits por pixel, também chamado de "full color") 768x512 (KODAK; FRANZEN, 1999). Essas imagens estão todas no formato PNG. Durante o processo incorporação da marca d'água, as imagens são convertidas para o formato “.ppm”, um formato sem compressão. Essa conversão é necessária para se utilizar o StirMark.

O StirMark simula um processo de reamostragem. Ele introduz o mesmo tipo de erros esperados ao se imprimir uma imagem em uma impressora de alta qualidade e, após isso, redigitalizar-se essa mesma imagem com um *scanner* de alta qualidade. Se aplicado apenas uma vez, a imagem apresenta uma perda de qualidade praticamente imperceptível. No entanto, se aplicado de maneira iterada, a degradação da imagem torna-se muito evidente.

Foram geradas duas configurações de marcas d'água, e cada configuração foi incorporada tanto com o fator de força de incorporação  $\beta$  igual a 0,7, como com o fator de força de incorporação  $\beta$  igual a 1,0. A primeira configuração, que será designada como “A”, apresenta 8 setores, raio interno de 50% (0,5) e 2 subanéis: 10% (0,10), e 20% (0,20). A segunda configuração, que será designada como “B”, apresenta 6 setores, raio interno de 0,45 e 3 subanéis: (0,05), (0,10) e (0,20).

Os testes consistiram em marcar as imagens ora com a marca d'água “A”, ora com a “B”, e testar a porcentagem de falsos negativos e a porcentagem de detecções incorretas obtidos quando a marca d'água inerente ao detector e a marca d'água fornecida são trocadas. As imagens marcadas foram submetidas ao detector logo após a incorporação da marca d'água, e após a distorção padrão do StirMark ser aplicada a imagem marcada. Em seguida, as imagens marcadas (tanto as não distorcidas pelo StirMark, quanto as distorcidas) foram convertidas para o formato JPEG. Esse formato realiza compressão com perdas. Nessa compressão foi utilizado o valor padrão da biblioteca OpenCV (para JPEG, a qualidade pode variar de 0 a 100. Quanto maior o valor, melhor é a qualidade da imagem. O valor padrão é 95). Essas imagens JPEG foram então submetidas ao detector. O diagrama na Figura 5.3 ilustra como foram obtidas as imagens testadas.

Figura 5.3 – Diagrama de obtenção das imagens testadas



Fonte: Autor.

A Tabela 5.2 é uma das tabelas obtidas. Todas as tabelas com os resultados dos testes possuem esse formato. A primeira coluna informa os limiares de detecção (Threshold) utilizados para realizar a detecção. As demais colunas, possuem em sua primeira linha o processo pelo qual a imagem passou, e em sua segunda linha os fatores de força de incorporação  $\beta$  0,7 e 1,0. As demais células são preenchidas com as porcentagens encontradas durante os testes com o detector.

Os quatro primeiros cenários tratarão das imagens marcadas com a marca d'água "A". A Tabela 5.1 apresenta um resumo desses cenários.

Tabela 5.1 – Resumo dos cenários para as imagens marcadas com a Marca D'Água "A"

Cenário	Marca D'água Inerente ao detector	Imagens marcadas com	Marca D'Água fornecida ao detector
1	A	A	A
2	B	A	A
3	A	A	B
4	B	A	B

Fonte: Autor.

**Cenário 1:** No primeiro cenário, tem-se o caso mais óbvio, onde a marca d'água inerente ao detector é "A" e a marca d'água fornecida ao detector também é "A". Nesse contexto, o interesse é a porcentagem de falsos negativos (não detecção da marca d'água em obras marcadas) obtidos. A Tabela 5.2 apresenta os dados adquiridos nesse cenário.

Tabela 5.2 – Probabilidade de falsos negativos

Threshold	<i>Marcada</i>		<i>Marcada + Distorção Stirmark</i>		<i>Marcada + Compressão JPEG</i>		<i>Marcada + Distorção Stirmark + Compressão JPEG</i>	
	$\beta = 0,7$	$\beta = 1,0$	$\beta = 0,7$	$\beta = 1,0$	$\beta = 0,7$	$\beta = 1,0$	$\beta = 0,7$	$\beta = 1,0$
0,1	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
0,15	100%	100%	100%	100%	100%	94,44%	88,89%	0,00%
0,2	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%

Fonte: Autor.

Observando a tabela, nota-se que quando o limiar de detecção é de 0,1, todas as imagens passam no teste e tem suas marcas d'água reconhecidas. Já, quando o limiar de detecção sobe para 0,2, nenhuma marca d'água é detectada. Quando o limiar é de 0,15, algo curioso acontece. Enquanto que o conjunto de imagens que não passou pelo processo de compressão JPEG nenhuma de suas marcas d'água é detectada, as que passaram pela compressão apresentam um aumento em sua robustez. Na próxima seção, ao se analisar os histogramas das imagens, é levantada uma hipótese que talvez explique esse aumento na robustez. Outro fato curioso, e contraintuitivo, observado é que as imagens que foram distorcidas pelo Stirmark e passaram pela compressão JPEG são as que apresentaram a maior robustez. A hipótese levantada através da análise dos histogramas na próxima seção também tenta explicar esse fenômeno.

Nos próximos três cenários, ficará claro aquilo que foi mencionado no fim da seção anterior, de que o termo  $\beta W(u,v)W'(u,v)$  da fórmula de detecção acaba imperando durante esse processo, relegando o termo  $W(u,v)M'(u,v)$  a um papel coadjuvante. Isso significa que quando as marcas d'água inerente ao detector e a fornecida ao detector forem diferentes, a probabilidade de uma detecção incorreta ocorrer é quase nula. Isso de fato se comprova ao se analisar os dados dos dois próximos cenários. No entanto, embora essa seja uma característica desejável, faz com que a marca d'água incorporada na imagem perca importância no processo.

**Cenário 2:** Neste cenário, a marca d'água inerente ao detector é a “B”, enquanto a marca d'água fornecida é a “A” e as imagens estão marcadas com a marca d'água “A”. As informações obtidas podem ser vistas na Tabela 5.3. Como antecipado no parágrafo acima, nenhuma detecção incorreta ocorreu.

Tabela 5.3 – Probabilidade de detecção incorreta

Threshold d	<i>Marcada</i>		<i>Marcada + Distorção Stirmark</i>		<i>Marcada + Compressão JPEG</i>		<i>Marcada + Distorção Stirmark + Compressão JPEG</i>	
	$\beta = 0,7$	$\beta = 1,0$	$\beta = 0,7$	$\beta = 1,0$	$\beta = 0,7$	$\beta = 1,0$	$\beta = 0,7$	$\beta = 1,0$
0,1	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
0,15	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
0,2	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

Fonte: Autor.

**Cenário 3:** A marca d'água inerente ao detector é "A", as imagens estão marcadas com "A", e a marca d'água fornecida ao detector é "B". Como no cenário 2, nenhuma detecção incorreta ocorreu. A Tabela 5.4 exibe esses resultados.

Tabela 5.4 – Probabilidade de detecção incorreta

Threshold d	<i>Marcada</i>		<i>Marcada + Distorção Stirmark</i>		<i>Marcada + Compressão JPEG</i>		<i>Marcada + Distorção Stirmark + Compressão JPEG</i>	
	$\beta = 0,7$	$\beta = 1,0$	$\beta = 0,7$	$\beta = 1,0$	$\beta = 0,7$	$\beta = 1,0$	$\beta = 0,7$	$\beta = 1,0$
0,1	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
0,15	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
0,2	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

Fonte: Autor.

**Cenário 4:** Neste último cenário temos a marca d'água inerente ao detector ("B") igual a marca d'água fornecida ao detector ("B"), porém as imagens estão marcadas com uma marca d'água diferente ("A"). Esse caso ilustra bem a dominância que o termo  $\beta W(u,v)W'(u,v)$  tem sobre a detecção e evidencia o problema deste sistema: se as marcas forem iguais, é muito provável que haja detecção, mesmo se a marca d'água não estiver presente na imagem testada, gerando detecções incorretas e falsos positivos (detecção da marca d'água em obras não marcadas). Na Tabela 5.5 são apresentados os resultados dessa detecção. Para o limiar de detecção 0,1 todas as imagens são detectadas, erroneamente.



Fonte: Autor.

**Cenário 2:** A marca d'água inerente ao detector é a "A", enquanto a marca d'água fornecida é a "B" e as imagens estão marcadas com a marca d'água "B". As informações obtidas podem ser vistas na Tabela 5.8. Como o esperado, nenhuma marca d'água é detectada.

Tabela 5.8 – Probabilidade de detecção incorreta

Threshold d	<i>Marcada</i>		<i>Marcada + Distorção Stirmark</i>		<i>Marcada + Compressão JPEG</i>		<i>Marcada + Distorção Stirmark + Compressão JPEG</i>	
	$\beta = 0,7$	$\beta = 1,0$	$\beta = 0,7$	$\beta = 1,0$	$\beta = 0,7$	$\beta = 1,0$	$\beta = 0,7$	$\beta = 1,0$
0,1	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
0,15	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
0,2	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

Fonte: Autor.

**Cenário 3:** A marca d'água inerente ao detector é "B", as imagens estão marcadas com "B", e a marca d'água fornecida ao detector é "A". Nenhuma detecção incorreta ocorreu. A Tabela 5.9 exibe esses resultados.

Tabela 5.9 – Probabilidade de detecção incorreta

Threshold d	<i>Marcada</i>		<i>Marcada + Distorção Stirmark</i>		<i>Marcada + Compressão JPEG</i>		<i>Marcada + Distorção Stirmark + Compressão JPEG</i>	
	$\beta = 0,7$	$\beta = 1,0$	$\beta = 0,7$	$\beta = 1,0$	$\beta = 0,7$	$\beta = 1,0$	$\beta = 0,7$	$\beta = 1,0$
0,1	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
0,15	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
0,2	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

Fonte: Autor.

**Cenário 4:** A marca d'água inerente ao detector é "A", as imagens estão marcadas com "B", e a marca d'água fornecida ao detector é "A". Na Tabela 5.10 são exibidos os resultados desta detecção. Esse é o caso onde a dominância que o termo  $\beta W(u,v)W^*(u,v)$  tem sobre a detecção é demonstrada.

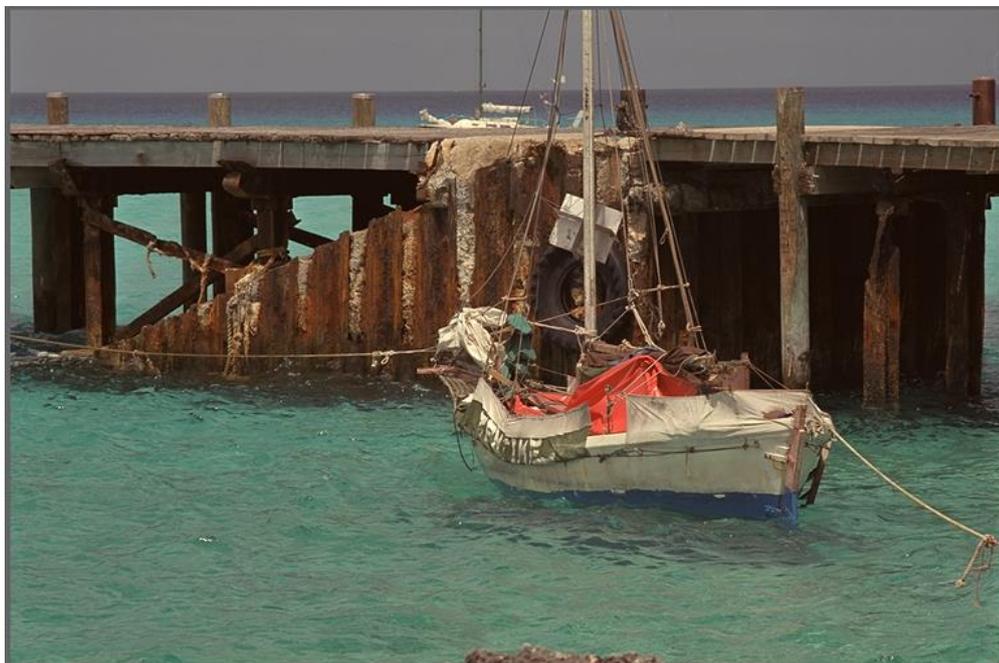
Tabela 5.10 – Probabilidade de detecção incorreta

Threshold	Marcada		Marcada + Distorção Stirmark		Marcada + Compressão JPEG		Marcada + Distorção Stirmark + Compressão JPEG	
	$\beta = 0,7$	$\beta = 1,0$	$\beta = 0,7$	$\beta = 1,0$	$\beta = 0,7$	$\beta = 1,0$	$\beta = 0,7$	$\beta = 1,0$
0,1	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
0,15	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	11,11%	100%	16,67%	100%
0,2	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

Fonte: Autor.

### 5.3 Resultados Visuais

Ao se analisar os dados da seção anterior, pode-se concluir que o método implementado realmente apresenta alguma robustez às distorções provocadas pelo Stirmark bem como a compressão da conversão JPEG. No entanto, como antecipado pelas propriedades no Capítulo 2, um custo é pago em termos de fidelidade. Ao se comparar uma imagem original com uma imagem marcada, nota-se a presença de pequenos artefatos azuis, o que por sua vez provoca uma sensação de amarelamento da imagem. A Figura 5.4 apresenta uma imagem original e a Figura 5.5 exibe uma imagem marcada que demonstram os efeitos descritos acima.



F  
 Figura  
 5.4 –  
 Imagem  
 Original

(KODAK; FRANZEN, 1999)

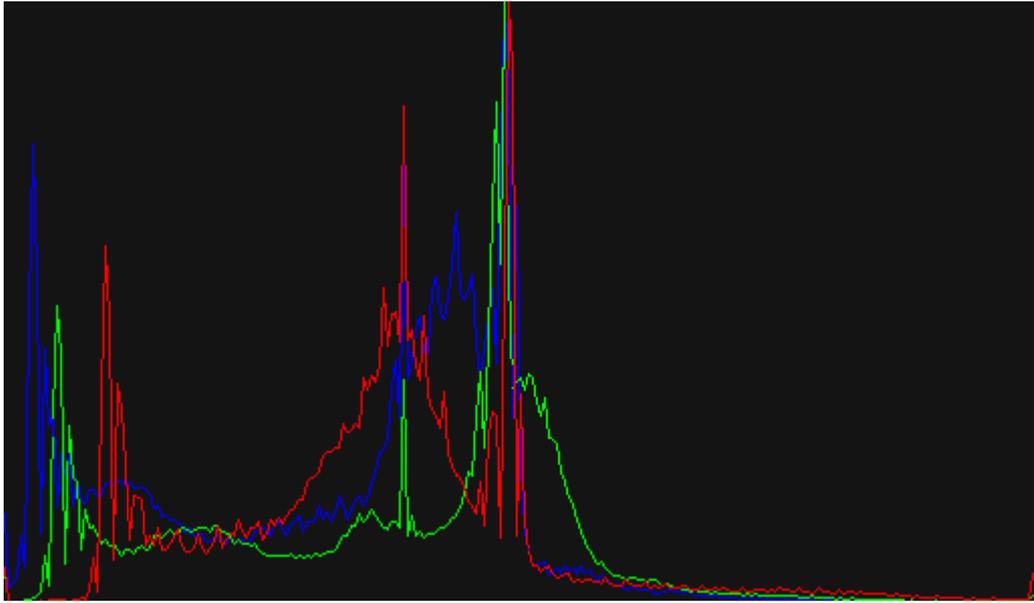
F  
 igura  
 5.5 –  
 Image  
 m  
 Marca  
 da



onte: Autor.

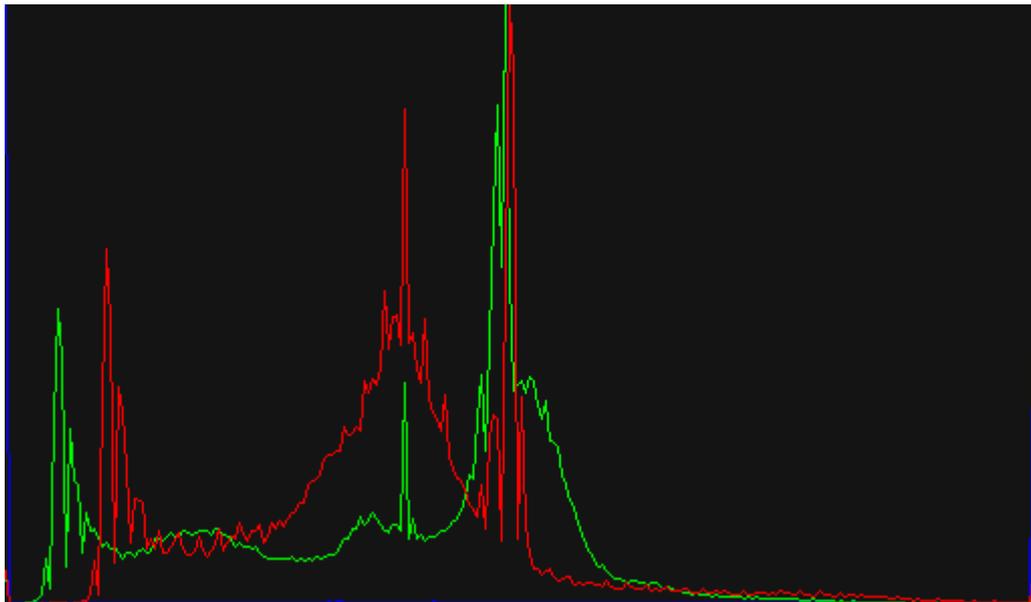
A Figura 5.6 apresenta o histograma da Figura 5.4 enquanto a Figura 5.7 exibe o histograma da Figura 5.5. Um histograma contabiliza o percentual de *pixels* da imagem que apresentam um determinado valor. Nos histogramas abaixo, a frequência dos *pixels* cresce da esquerda para a direita, sendo 0 o valor mais à esquerda e 255 o valor mais à direita. Quanto mais um determinado valor for contado, maior será sua altura no histograma. A cor de cada linha representa a cor de seu respectivo canal. Desse modo, a linha azul representa a contagem dos valores dos *pixels* no canal azul, a linha vermelha, a contagem no canal vermelho e a linha verde, a contagem no canal verde.

Figura 5.6 – Histograma da Figura 5.4 (Imagem Original)



Fonte: Autor.

F



Fonte: Autor.

gura  
5.7 –  
listog  
ama  
da  
igura  
5.5  
Imag  
em  
marca  
da)

Observando a diferença dos dois histogramas nota-se o efeito da marca d'água sobre o canal azul. Formam-se dois grandes picos, um em cada extremo do espectro, e os demais *pixels* têm sua contagem reduzida a valores próximos a 0.

Um efeito interessante observado, é que após a compressão JPEG, a aparência da imagem marcada melhora um pouco. Para fins de comparação, a Figura 5.5 será rerepresentada como Figura 5.8. A Figura 5.9 corresponde a sua versão convertida para JPEG.



Fonte: Autor.

Figura 5.9 – Imagem Marcada convertida para JPEG

F  
igura  
5.8 –  
imagem  
Marcad  
a

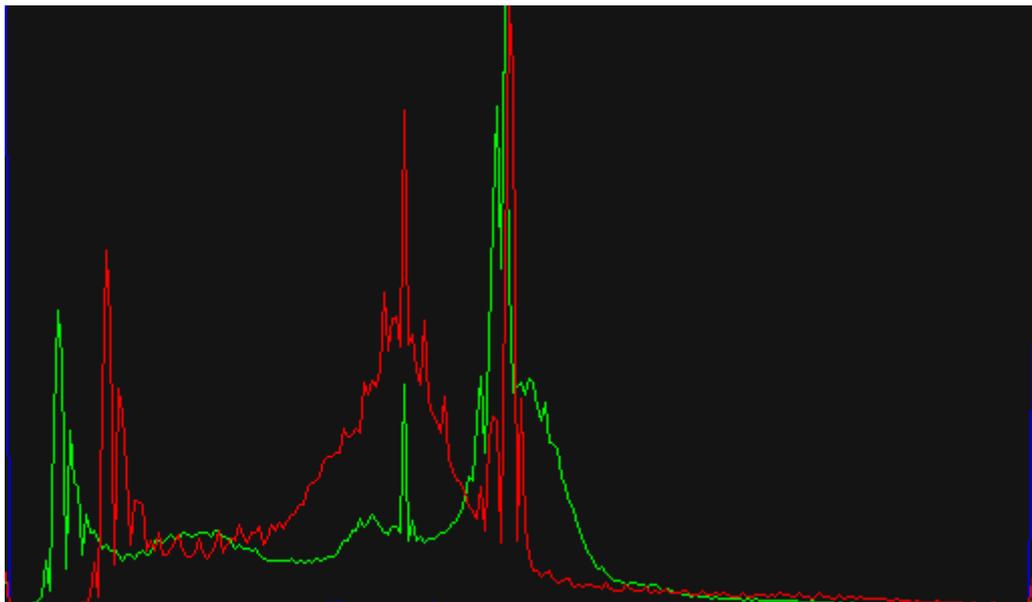


Fonte: Autor.

A

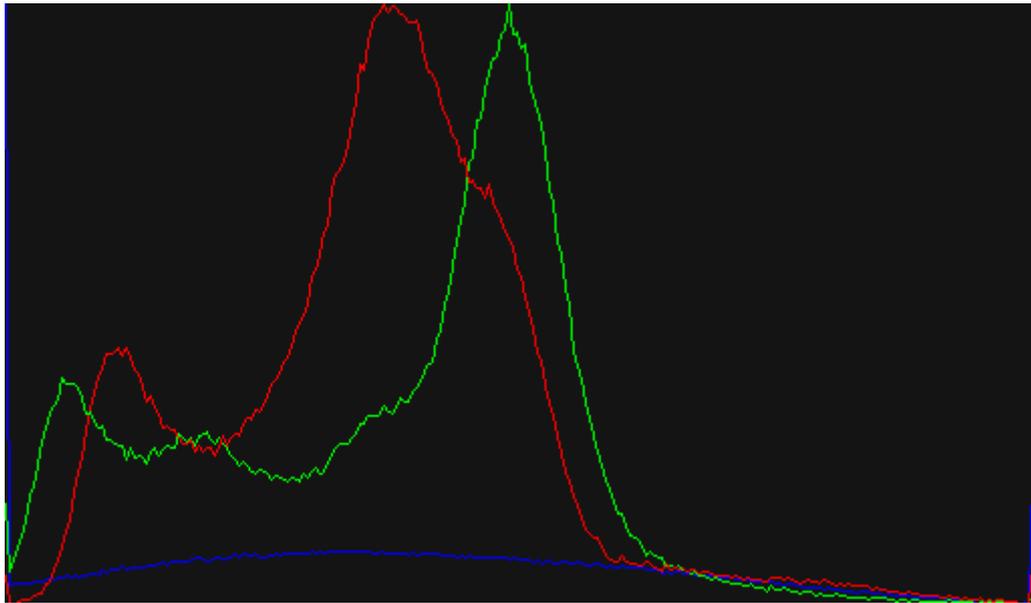
Figura 5.10 reexibe o histograma da Imagem Marcada, enquanto a Figura 5.11 mostra o histograma da imagem JPEG. Nota-se que o processo de conversão acaba por alterar a contagem de alguns *pixels*, aumenta-as em sua maioria, ao suavizar as curvas relativas aos canais. Esse efeito sob o canal azul pode explicar o aumento da robustez constatado nos testes na seção anterior.

Figura 5.10 – Histograma da Figura 5.8 (Imagem Marcada)



Fonte: Autor.

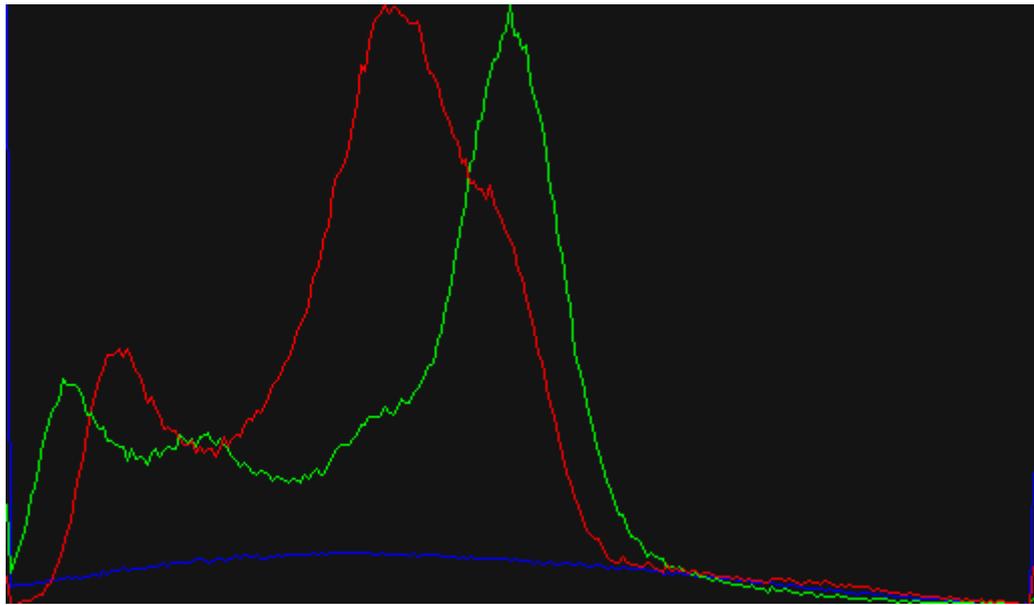
Figura 5.11 – Histograma da Figura 5.9 (Imagem Marcada convertida para JPEG)



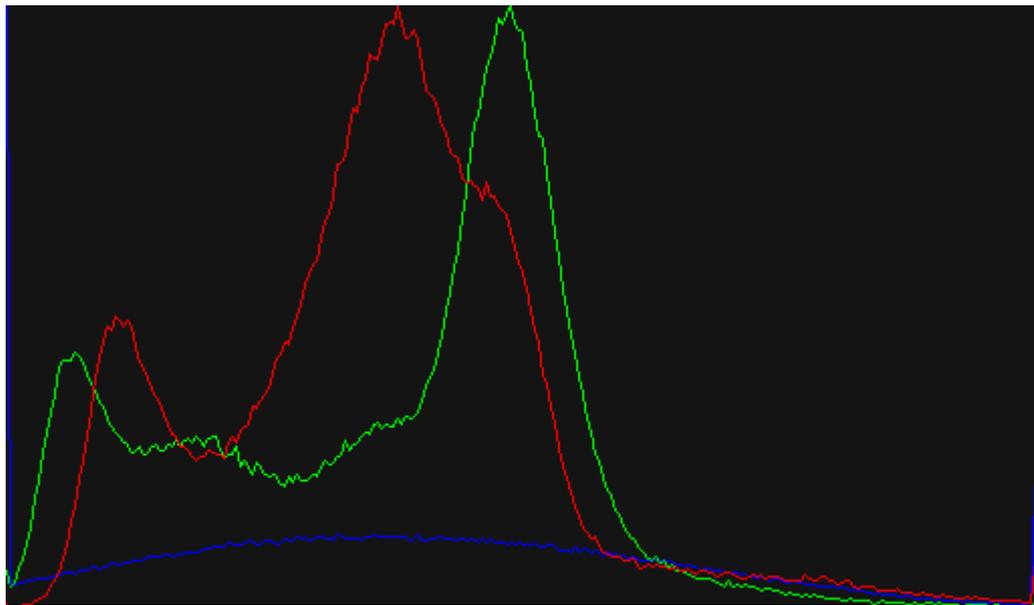
Fonte: Autor.

Conforme mencionado na seção anterior, as imagens que foram distorcidas pelo Stirmark e passaram pela compressão JPEG são as que apresentaram a maior robustez. A Figura 5.12 é o mesmo histograma que aparece na Figura 5.11. A Figura 5.13 é o histograma da imagem que foi distorcida pelo Stirmark e depois sofreu a compressão JPEG. Sua contagem de *pixels* azuis é ainda maior que a apresentada na Figura 5.12, o que poderia explicar essa maior robustez.

Figura 5.12 – Histograma da Figura 5.9 (Imagem Marcada convertida para JPEG)



Fonte: Autor.



Fonte: Autor.

F  
igura  
5.13 –  
histog  
rama  
da  
mage  
m  
listor  
cida  
pelo  
Stirma  
rk e  
:onve  
rtida  
para  
JPEG

## 6 CONCLUSÃO

Neste trabalho foram apresentados os conceitos básicos sobre marcas d'água digitais bem como um estudo extensivo sobre as técnicas para tornar robusto este tipo de marcas d'água. Para melhor elucidar os conceitos pesquisados, um protótipo que faz uso de uma das técnicas de robustez – incorporação da marca d'água nos coeficientes de frequência média – foi implementado. Para se verificar a robustez fornecida pelo sistema, a marca d'água foi aplicada a um conjunto de imagens com diferentes parâmetros a fim de testar sua resistência a aplicação do Stirmark (um *benchmark* de robustez que opera reamostrando as imagens) e a compressão JPEG. Esse sistema de marcas d'água é formado por três partes: o gerador de marcas d'água com interface gráfica, o incorporador e o detector, estes últimos, ambas aplicações de linha de comando. O conjunto de testes apresentados neste trabalho fez uso de duas marcas d'água distintas em oito cenários de interação entre as mesmas. Cada cenário fora composto de uma marca d'água inerente ao detector, uma marca d'água fornecida ao detector para realizar a detecção e, por último, o conjunto de imagens marcado com uma das marcas d'água. Essa incorporação da marca d'água foi realizada com dois fatores de força de incorporação  $\beta$  distintos: 0,7 e 1,0. A avaliação do sistema com estas configurações se deu pela porcentagem de detecções para três limiares de detecção diferentes: 0,1, 0,15 e 0,2. Constatou-se experimentalmente que, quando a marca d'água inerente ao detector e a marca d'água fornecida ao detector são diferentes, nenhuma detecção incorreta ocorre. Quando as três marcas d'águas são iguais, todas as detecções no limiar 0,1 ocorrem de maneira correta, o que comprova que o sistema realmente fornece alguma robustez. Para o limiar 0,2, nenhuma marca d'água pode ser identificada e para o limiar 0,15 constatou-se um efeito inesperado: somente imagens que sofreram compressão JPEG puderam ser identificadas. Na Seção 5.3, levantou-se uma hipótese que tenta explicar esse resultado.

Nos casos em que a marca d'água inerente ao detector e a marca d'água fornecida ao detector são iguais, porém, as imagens estão marcadas com uma marca d'água diferente, os resultados foram semelhantes aos casos em que as três marcas d'águas são iguais. Isso indica que a correlação entre a marca d'água inerente e a marca d'água fornecida assume um papel dominante na fórmula de detecção, relegando à correlação entre a marca d'água inerente e a magnitude de Fourier do canal azul da imagem (onde pode ou não haver uma marca d'água), um papel pequeno na hora da detecção. Essa situação específica pode levar a falsas detecções e falsos positivos (detecção da marca d'água em obras não marcadas). Em sistemas de marcas d'água seguras isso seria inadmissível (lembrando que a robustez é uma propriedade

necessária para uma marca d'água segura). No entanto, dependendo da aplicação para qual o presente sistema pudesse ser usado, talvez esse ponto não seja relevante.

O uso da compressão JPEG após a aplicação forneceu melhorias não intencionais tanto na aparência das imagens marcadas quanto no número das detecções, de modo que pode ser vantajoso fazer o uso de ambos combinados caso se tenha interesse em utilizar o protótipo.

Uma alternativa de implementação seria espalhar a marca d'água pelos três canais de cores a fim de torná-la menos perceptível, em vez de se usar apenas o canal azul. Embora o olho humano seja menos sensível ao canal azul, utilizar os três canais de cores poderia ajudar a diluir a marca d'água, pondo uma quantidade menor informação em cada canal.

## REFERÊNCIAS

- BRACEWELL, R. N. **The Fourier Transform and Its Applications**. McGraw-Hill, 1986.
- BENEDENS, O. Geometry-based watermarking of 3D models. **IEEE Computer Graphics and Applications**, v. 19, n. 1, p. 46–55, Janeiro/Fevereiro de 1999.
- BRASSIL, J.; LOW, S.; MAXEMCHUK, N.; O'GORMAN L. Electronic marking and identification techniques to discourage document copying. **IEEE Infocom'94**, Toronto, Ontario, v. 3, p. 1278–1287, Junho de 1994.
- BRASSIL, J.; LOW, S.; MAXEMCHUK, N.; O'GORMAN L. Electronic marking and identification techniques to discourage document copying. **IEEE Journal of Selected Areas in Communication**, v. 13, n. 8, p. 1495–1504, Outubro de 1995.
- CONCI, A. Transformada de Fourier. **Processamento de Imagens e Sinais Biológicos**, Rio de Janeiro, Março de 2017. Disponível em: < <http://www.ic.uff.br/~aconci/Fourier2017.pdf> >. Acesso em: Novembro de 2018.
- COX, I. J.; DOERR, G.; FURON, T. Watermarking is not cryptography. **International Workshop on Digital Watermarking**, Jeju island, Coréia do Sul, Novembro de 2006.
- COX, I. J.; KILIAN, J.; LEIGHTON, F. T.; SHAMOON T. Secure spread spectrum watermarking for multimedia. **IEEE Transactions on Image Processing**, v. 6, n. 12, p. 1673–1687, Dezembro de 1997.
- COX, I. J.; MILLER, M. L.; BLOOM, J. A.; FRIDRICH, J.; KALKER, T. **Digital Watermarking and Steganography**. 2nd ed. Virginia Polytechnic University: Morgan Kaufmann, 2007.
- DOLBY, R. **Apparatus and method for the identification of specially encoded FM stereophonic broadcasts**. 1981. United States Patent, 4,281,217.
- EGGERS, J. J.; GIROD, B. Quantization effects on digital watermarks. **Journal Signal Processing**, v. 81, n. 2, p. 239–263, Fevereiro de 2001.
- HARTUNG, F.; EISERT, P.; GIROD B. Digital watermarking of MPEG-4 facial animation parameters. **Computers & Graphics**, v. 22, n. 4, p. 425–435, Agosto de 1998.
- HARTUNG, F.; KUTTER, M. Multimedia watermarking techniques. **Proceedings of the IEEE**, v. 87, n. 7, p. 1079–1107, Julho de 1999.
- HONSINGER, C. Data embedding using phase dispersion. **IEE Seminar on Secure Images and Image Authentication**, Londres, Reino Unido, Abril de 2000.
- HONSINGER, C. W.; DALY, S. J. **Method for detecting rotation and magnification in images**. 1998. United States Patent, 5,835,639.
- HSU, Y. N.; ARSENAULT, H. H.; APRIL, G. Rotation-invariant digital pattern recognition using circular harmonic expansion. **Applied Optics**, v. 21, n. 22, p. 4012–4015, 1982.

HSU, C. T.; WU, J. L. Hidden digital watermarks in images. **IEEE Transactions on Image Processing**, v. 8, n. 1, p. 58–68, Janeiro de 1999.

KAHNG, A. B.; MANTIK, S.; MARKOV, I. L.; POTKONJAK, M.; TUCKER, P.; WANG, H.; WOLFE, G. Robust IP watermarking methodologies for physical design. **Proceedings 1998 Design and Automation Conference. 35th DAC**, São Francisco, Estados Unidos, p. 782–787, Junho de 1998.

KALKER, T.; JANSSEN, A. J. E. M. Analysis of watermark detection using SPOMF. **IEEE Proceedings 1999 International Conference on Image Processing**, Kobe, Japão, v. 1, Outubro de 1999.

KATZENBEISSER, S.; PETITCOLAS, F. A. P. **Information Hiding: Techniques for Steganography and Digital Watermarking**. Boston, Londres: Artech House, 1999. p. 97–99.

KODAK; FRANZEN, R. **Kodak Lossless True Color Image Suite**, Novembro de 1999. Disponível em: <<http://r0k.us/graphics/kodak/index.html>>. Acesso em: Junho de 2019.

KUTTER, M. Watermarking resisting to translation, rotation and scaling. **Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering - Multimedia Systems and Applications**, v. 3528, p. 423–431, 1998.

KUTTER, M.; BHATTACHARJEE, S. K.; EBRAHIMI, T. Towards second generation watermarking systems. **IEEE Proceedings 1999 International Conference on Image Processing**, Kobe, Japão, v. 1, p. 320–323, Outubro de 1999.

LACH, J.; MANGIONE-SMITH, W.; POTKONJAK, M. Fingerprinting digital circuits on programmable hardware. **Proceedings of the 2nd International Information Hiding Workshop**, Portland, Oregon, Estados Unidos, p. 16–31, Abril de 1998.

LIANG, T. S.; RODRIGUEZ, J. J. Robust watermarking using robust coefficients. **Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering - Security and Watermarking of Multimedia Contents II, Electronic Imaging**, San Jose, CA, Estados Unidos, v. 3971, p.326–335, Maio de 2000.

LIN, F.; BRANDT, R. D. Towards absolute invariants of images under translation, rotation, and dilation. **Pattern Recognition Letters**, v. 14, n.5, p. 369–379, Maio de 1993.

LOW, S.; MAXEMCHUK N. Performance comparison of two text marking methods. **IEEE Journal of Selected Areas in Communication**, v. 16, n. 4, p.561–572, Maio de 1998.

LU, C. S.; MARK LIAO, H. Y.; HUANG, S. K.; SZE, C.J. Cocktail watermarking on images. **Third International Workshop on Information Hiding**, Dresden, Alemanha, v. 1768 of Lecture Notes in Computer Science, p. 333–347, Setembro de 1999.

MARQUES FILHO, O.; VIEIRA NETO, H. **Processamento Digital de Imagens**, Rio de Janeiro: Brasport, 1999. p. 85–86, p. 99–118, p. 192–206.

OHBOCHI, R.; MASUDA, H.; AONO M. Watermarking three-dimensional polygonal models through geometric and topological modifications. **IEEE Journal of Selected Areas in Communication**, v. 16, n. 4, p. 551–560, Maio de 1998.

PEREIRA, S.; PUN, T. Robust template matching for affine resistant image watermarks. **IEEE Transactions on Image Processing**, v. 9, n. 6, p. 1123–1129, Junho de 2000.

PEREIRA, S.; RUANAIDH, J. J. K. O.; DEGUILLAUME, F.; CSURKA, G.; PUN, T. Template based recovery of Fourier-based watermarks using log-polar and log-log maps. **Proceedings IEEE International Conference on Multimedia Computing and Systems**, Florença, Itália, v. 1, p. 870–874, Junho de 1999.

PETITCOLAS, F. A. P.; ANDERSON, R. J.; KUHN, M. G. Attacks on copyright marking systems. **Workshop on Information Hiding**, Portland, OR, Estados Unidos, v. 1525 of Lecture Notes in Computer Science, p. 218–238, Abril de 1998.

Playboy magazine. Playboy Enterprises International, Inc., November 1972.

RHOADS, G. B. **Image steganography system featuring perceptually adaptive and globally scalable signal embedding**. 1998. United States Patent, 5,748,763.

RUANAIDH, J. J. K. O.; DOWLING, W. J.; BOLAND, F. M. Phase watermarking of digital images. **Proceedings of 3rd IEEE International Conference on Image Processing**, Lausanne, Suíça, v. 3, p. 239–242, Setembro de 1996.

SAYROL, E.; VIDAL, J.; CABANILLAS, S.; SANTAMARIA, S. Optimum watermark detection for color images. **IEEE Proceedings 1999 International Conference on Image Processing**, Kobe, Japão, v. 2, p. 231–235, 1999.

SOLACHIDIS, V.; PITAS, I. Self-similar ring shaped watermark embedding in 2-D DFT domain. **IEEE 10th European Signal Processing Conference**, Tampere, Finlândia, Setembro de 2000.

SHENG, Y.; ARSENAULT, H. H. Experiments on pattern recognition using invariant Fourier-Mellin descriptors. **Journal of the Optical Society of America A**, v. 3, n. 6, p. 771–776, 1986.

SHENG, Y.; DUVERNOY, J. Circular-Fourier-Radial-Mellin transform descriptors for pattern recognition. **Journal of the Optical Society of America A**, v. 3, n. 6, p. 885–888, 1986.

STERN, J. P.; HACHEZ, G.; KOEUNE, F.; QUISQUATER, J. J. Robust object watermarking: Application to code. **Third International Workshop on Information Hiding**, Dresden, Alemanha, v. 1768 of Lecture Notes in Computer Science, p. 368–378, Setembro de 1999.

WIDROW, B. Statistical analysis of amplitude-quantized sample-data systems. **Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, Part II: Applications and Industry**, v. 79, n. 6, p. 555–568, Janeiro de 1961.

YEO, B. L.; YEUNG, M. M. Watermarking 3D objects for verification. **IEEE Computer Graphics and Applications**, v. 19, n. 1, p. 36–45, Janeiro/Fevereiro de 1999.

WU, R.; STARK, H. Rotation-invariant pattern recognition using optimum feature extraction. **Applied Optics**, v. 24, n. 2, p. 179–184, Fevereiro de 1985.