**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS**
**Centro de Desenvolvimento Tecnológico**
**Programa de Pós-Graduação em Computação**

Dissertação

# Transformada Wavelet Haar Discreta Aproximada para o Sistema de Marca D'Água com Eficiência Energética

**Thiago Treichel Rutz**

Pelotas, 2025

**Thiago Treichel Rutz**

# Transformada Wavelet Haar Discreta Aproximada para o Sistema de Marca D'Água com Eficiência Energética

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Computação do Centro de Desenvolvimento Tecnológico da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciência da Computação.

Orientador: Prof. Dr. Rafael Iankowski Soares
Coorientador: Prof. Dr. Eduardo Antonio César da Costa
Colaborador: Me. Morgana Macedo Azevedo da Rosa

Pelotas, 2025

Universidade Federal de Pelotas / Sistema de Bibliotecas
Catalogação da Publicação

R971t Rutz, Thiago Treichel

Transformada Wavelet Haar discreta aproximada para o sistema de marca d'água com eficiência energética [recurso eletrônico] / Thiago Treichel Rutz ; Rafael Iankowski Soares, orientador ; Eduardo Antonio César da Costa, coorientador. — Pelotas, 2024.
92 f.

Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Computação, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, 2024.

1. Marca d'água. 2. Imagem. 3. Haar. 4. Transformada Wavelet. 5. Aproximada. I. Soares, Rafael Iankowski, orient. II. Costa, Eduardo Antonio César da, coorient. III. Título.

CDD 005

Elaborada por Simone Godinho Maisonave CRB: 10/1733

**Thiago Treichel Rutz**

**Transformada Wavelet Haar Discreta Aproximada para o Sistema de Marca D'Água com Eficiência Energética**

Dissertação aprovada, como requisito parcial, para obtenção do grau de Mestre em Ciência da Computação, Programa de Pós-Graduação em Computação, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas.

**Data da Defesa:** 09 de setembro de 2024

**Banca Examinadora:**

Prof. Dr. Rafael Iankowski Soares (orientador)
Doutor em Computação pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Prof. Dr. Leomar da Rosa Junior
Doutor em Microeletrônica pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Prof. Dr. Sérgio José Melo de Almeida
Doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina.

Dedico esta dissertação à minha esposa, Taíse Rutz, pelo apoio e pela compreensão por todas as horas em que não estive presente durante todo o mestrado... Dedico a minha mãe e ao meu irmão pela solidariedade e pelo apoio para que eu concluísse mais uma importante etapa da minha vida... Dedico ao meu pai (*in memoriam*) pela educação e pelos valores ensinados enquanto esteve presente, os quais foram fundamentais para minha formação... Dedico a todos que acreditam na força transformadora da educação, que nos impulsiona a sonhar e nos capacita para realizar os nossos sonhos.

# AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador, Professor Rafael Soares, pela orientação, pelo incentivo, pelo compartilhamento de conhecimento e pela disponibilização de apoio sempre que necessário...

À minha colega, Professora Morgana Rosa, pela amizade, pelo suporte, pelo compartilhamento de conhecimento, pelo incentivo e pela grandiosa ajuda na realização deste trabalho...

Ao meu coorientador, Professor Eduardo Costa, pelo incentivo, pela ajuda e pelas sugestões de correção no texto...

Aos meus amigos pelo companheirismo e aos meus colegas de pesquisa que ajudaram de alguma forma durante esse período...

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Computação da UFPel, pelos ensinamentos nas disciplinas do mestrado, em especial às disciplinas de Metodologia de Pesquisa e Desenvolvimento em Computação e a de Processamento Digital de Imagens...

Aos meus colegas do trabalho pelo incentivo, apoio e compreensão por todo esse período em que necessitei me ausentar, assim como pela amizade...

E a toda a minha família pelo apoio e pela compreensão.

*Não é o mais forte que sobrevive, nem o mais inteligente, mas o que melhor se adapta às mudanças.*
— CHARLES DARWIN

*Todas vez que você se encontrar do lado da maioria, é hora de parar e refletir.*
— MARK TWAIN

# RESUMO

RUTZ, Thiago Treichel. **Transformada Wavelet Haar Discreta Aproximada para o Sistema de Marca D'Água com Eficiência Energética**. Orientador: Rafael Iankowski Soares. 2025. 92 f. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) – Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2025.

Esta dissertação propõe a implementação de sistemas de marcas d'água digitais como uma estratégia eficaz para garantir a autenticidade e a integridade de imagens, especialmente no contexto do crescente uso das plataformas de mídia social. Com a popularização dessas plataformas, o uso indevido de imagens pessoais e a disseminação de notícias falsas tornaram-se problemas cada vez mais frequentes. Criminosos têm explorado as limitações do sistema visual humano (HVS) para adulterar sutilmente imagens digitais, comprometendo sua veracidade. Nesse cenário, a marca d'água digital surge como uma solução promissora, permitindo a inserção de informações nas imagens de maneira invisível ao HVS, como a identificação do proprietário, utilizando técnicas sofisticadas baseadas em transformadas. Este trabalho se concentra na investigação da família de Transformadas Wavelet, com um foco específico nas variantes Haar, Daubechies, Coiflet, Symlet, Biortogonal e Biortogonal Reversa para a inserção e extração de marcas d'água. A pesquisa envolveu uma análise detalhada de como essas diferentes transformadas se comportam diante de uma variedade de ataques comuns descritos na literatura, como ruído gaussiano, compressão JPEG, filtro mediano e ruído sal e pimenta. As análises indicaram que as transformadas Haar, Biortogonal e Biortogonal Reversa se destacam pela sua robustez e eficácia na inserção e na extração de marcas d'água, tornando-se as mais adequadas para o desenvolvimento de sistemas de proteção de imagens. Com base nesses achados, foi desenvolvido um sistema inovador de marca d'água em hardware, utilizando a Transformada Wavelet Haar em combinação com técnicas de computação aproximada. O foco principal deste desenvolvimento foi atender às necessidades de aplicações que demandam baixo consumo de energia, sem comprometer a integridade e a segurança das marcas d'água. A implementação do sistema resultou em uma otimização significativa do hardware, com a redução de dez circuitos aritméticos, o que proporcionou uma diminuição da área em 1,33 vezes e uma redução no consumo de energia em 2,88 vezes em comparação às soluções existentes no estado da arte.

Palavras-chave: Marca d'água. Imagem. Haar. Transformada Wavelet. Aproximada.

# ABSTRACT

RUTZ, Thiago Treichel. **Exploration of Wavelet Transforms for Image Watermarking Systems**. Advisor: Rafael Iankowski Soares. 2025. 92 f. Dissertation (Masters in Computer Science) – Technology Development Center, Federal University of Pelotas, Pelotas, 2025.

This dissertation proposes the implementation of digital watermarking systems as an effective strategy to ensure the authenticity and integrity of images, especially in the context of the growing use of social media platforms. With the popularization of these platforms, the misuse of personal images and the spread of fake news have become increasingly frequent problems. Criminals have exploited the limitations of the Human Visual System (HVS) to subtly alter digital images, compromising their veracity. In this scenario, digital watermarking emerges as a promising solution, allowing the insertion of information into images in a way that is invisible to the HVS, such as owner identification, using sophisticated transform-based techniques. This work focuses on the investigation of the Wavelet Transform family, with a specific focus on the Haar, Daubechies, Coiflet, Symlet, Biorthogonal, and Reverse Biorthogonal variants for the insertion and extraction of watermarks. The research involved a detailed analysis of how these different transforms perform under a variety of common attacks described in the literature, such as Gaussian noise, JPEG compression, median filtering, and salt-and-pepper noise. The analyses indicated that the Haar, Biorthogonal, and Reverse Biorthogonal transforms stand out for their robustness and effectiveness in watermark insertion and extraction, making them the most suitable for developing image protection systems. Based on these findings, an innovative hardware watermarking system was developed using the Haar Wavelet Transform in combination with approximate computing techniques. The primary focus of this development was to meet the needs of applications demanding low energy consumption without compromising the integrity and security of the watermarks. The system's implementation resulted in significant hardware optimization, with the reduction of ten arithmetic circuits, leading to a decrease in area by 1.33 times and a reduction in energy consumption by 2.88 times compared to state-of-the-art solutions.

Keywords: watermarking. image. Haar. Wavelet transform. Approximate.

# LISTA DE FIGURAS


Figura 1 Transformações de imagens (JAYARAMAN; ESAKKIRAJAN; VEERAKUMAR, 2009) . . . . . 26
Figura 2 Transformada Wavelet (POZZEBON, 2009) . . . . . 27
Figura 3 Função Wavelet Haar (MISITI et al., 1996) . . . . . 28
Figura 4 Banco de filtros para decomposição - Wavelet 2-D (GONZALEZ; WOODS, 2009) . . . . . 29
Figura 5 Decomposição resultante - Wavelet 2-D. Adaptado (GONZALEZ; WOODS, 2009) . . . . . 29
Figura 6 Recomposição - Wavelet 2-D (GONZALEZ; WOODS, 2009) . . . . 30
Figura 7 Níveis da transformada Wavelet Daubechie (MAJUMDAR, 2013) . . 32
Figura 8 Wavelet Coiflet (MAJUMDAR, 2013) . . . . . 32
Figura 9 Metodologia para a síntese lógica (ROSA, 2023) . . . . . 40

Figura 10 Artigos Selecionados nas Bases de Dados . . . . . 50
Figura 11 Artigos Aceitos Para Estudos no Escopo do Trabalho . . . . . 51
Figura 12 Processo de Inserção da Marca D'Água (APARNA; AYYAPPAN, 2014) 52
Figura 13 Processo de Extração da Marca D'Água (APARNA; AYYAPPAN, 2014) 52
Figura 14 Imagem Hospedeira e Marca D'água (APARNA; AYYAPPAN, 2014) 53
Figura 15 Inserção da Marca D'água (SINGHAL; SINGH; TENGURIA, 2011) . 54
Figura 16 Extração da Marca D'água (SINGHAL; SINGH; TENGURIA, 2011) . 54

Figura 17 Inserção e Extração de Marca D'Água . . . . . 57
Figura 18 Processos de Inserção e Extração da Marca D'Água . . . . . 58
Figura 19 Ataque de Ruído Gaussiano Aditivo . . . . . 59
Figura 20 Resultados entre Imagens com e sem Marca D'Água para diferentes níveis de ruído. Parâmetros: (A) 0.01 a 0.09 e (B) 10 a 90. . . . . 60
Figura 21 Resultados entre Imagens com e sem Marca D'Água para diferentes níveis de ruído. Parâmetros: (C) [1 $\times$ 1] a [9 $\times$ 9] e (D) 0.01 a 0.09. 61
Figura 22 Resultados entre Marcas D'Água Inseridas e Extraídas para diferentes níveis de ruído. Parâmetros: (A) 0.01 a 0.09 e (B) 10 a 90. . . . 62
Figura 23 Resultados entre Marcas D'Água Inseridas e Extraídas para diferentes níveis de ruído. Parâmetros: (C) [1 $\times$ 1] a [9 $\times$ 9] e (D) 0.01 a 0.09. . . . . 63

Figura 24 Arquitetura exata para o sistema de marca d'água. . . . . 67
Figura 25 Arquiteturas para o sistema aproximado da marca d'água: (a) AxDHWT (onde o tracejado na figura mostra um AxDHWT otimizado na etapa de extração), (b) AxIDHWT. . . . . 67

Figura 26 Fluxograma de processo do AxDHWT : (a) Inserção e (b) Extração. 68
Figura 27 (a) NC, (b) SSIM, e (c) BER, média entre $106$ imagens diferentes, tanto para a imagem com marca d'água quanto para a para a marca d'água extraída obtida usando AxDHWT sob vários ataques, (d) NC, (e) SSIM, and (f) BER . . . . . 73
Figura 28 Desempenho da invisibilidade de imagens com marca d'água e de marcas d'água extraídas correspondentes com vários ataques e seus NCs correspondentes. . . . . 73

# LISTA DE TABELAS


Tabela 1 String de Busca de Palavras Chave . . . . . 48
Tabela 2 Questões de Qualidade . . . . . 49
Tabela 3 Artigos Selecionados para Estudos e Comparações de Resultados 51
Tabela 4 NC (dB) (APARNA; AYYAPPAN, 2014) . . . . . 53
Tabela 5 Trabalhos relacionados a AxDHWT e sistemas aproximados de marca d'água em imagens. . . . . 66
Tabela 6 Resultados de NC entre a marca d'água original e a marca d'água extraída para diferentes ataques. . . . . 74
Tabela 7 Resultados baseados em ASIC obtidos com o sistema de marca d'água AxDHWT e comparações com a literatura. . . . . 75

# LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|---|---|
| AxC | Computação Aproximada |
| ASIC | Circuito Integrado de Aplicação Específica |
| AxDHWT | Transformada Wavelet Haar Discreta Aproximada |
| AxIDHWT | Transformada Wavelet Haar Discreta Inversa Aproximada |
| BER | Taxa de Erro de Bits |
| CMOS | Metal-Óxido-Semicondutor Complementar |
| DCT | Transformada de Cosseno Discreto |
| DDoS | Distributed Denial of Service |
| DWT | Transformada de Wavelet Discreta |
| FIR | Resposta ao Impulso Finita |
| HAS | Sistema Auditivo Humano |
| HVS | Sistema Visual Humano |
| ICs | Circuitos Integrados |
| IoT | Internet das Coisas |
| JPEG | Joint Photographic Experts Group |
| KLT | Transformada de Karhunen-Loève |
| LEF | Formato de Troca de Biblioteca |
| LPD | Baixa Dissipação de Energia |
| LSB | Bit Menos Significativo |
| MLS | Mapeamento Sistemático da Literatura |
| MSE | Erro Quadrático Médio |
| NC | Correlação Normalizada |
| NMOS | Semicondutor de Óxido-Metal do Tipo N |
| PLE | Estimativa de Layout Físico |
| PMOS | Semicondutor de Óxido-Metal do Tipo P |
| RTL | Nível de Transferência de Registro |

| | |
|---|---|
| SDF | Formato de Atraso Padrão |
| SLT | Decomposição de Valor Singular |
| SSIM | Índice de Similaridade Estrutural |
| ST | Padrão Comercial |
| VCD | Despejo de Alteração de Valor |
| VLSI | Integração em Larga Escala |

# SUMÁRIO


**1 INTRODUÇÃO** . . . . . 17
1.0.1 Objetivos . . . . . 19
1.0.2 Objetivos Específicos . . . . . 20
**1.1 Contribuições** . . . . . 20
**1.2 Organização do Texto** . . . . . 20

**2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA** . . . . . 22
**2.1 Imagens digitais** . . . . . 22
**2.2 Marca D'Água** . . . . . 23
**2.3 Transformadas em Imagens** . . . . . 25
2.3.1 Transformada Wavelet Haar . . . . . 26
2.3.2 Transformada Wavelet Daubechie . . . . . 31
2.3.3 Transformada Wavelet Coiflet . . . . . 32
2.3.4 Transformada Wavelet Symlet . . . . . 33
2.3.5 Transformada Wavelet Biortogonal . . . . . 33
2.3.6 Transformada Wavelet Biortogonal Reversa . . . . . 34
**2.4 Ataques** . . . . . 34
2.4.1 Ruído Gaussiano Aditivo . . . . . 34
2.4.2 Compressão JPEG . . . . . 35
2.4.3 Filtro Mediano . . . . . 35
2.4.4 Ruído Sal e Pimenta . . . . . 35
**2.5 Métricas de Avaliação de Desempenho** . . . . . 36
2.5.1 Índice de Similaridade Estrutural . . . . . 36
2.5.2 Erro Quadrático Médio . . . . . 37
2.5.3 Correlação Normalizada . . . . . 37
**2.6 Computação Aproximada - AxC** . . . . . 37
**2.7 Metodologia para análise de dissipação de potência em circuitos CMOS** 38
2.7.1 Metodologia para a Avaliação de Síntese Lógica . . . . . 40
**2.8 Resumo do Capítulo** . . . . . 41

**3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA** . . . . . 42
**3.1 Análise da literatura** . . . . . 42
**3.2 Mapeamento Sistemático da Literatura** . . . . . 47
3.2.1 Transformadas matemáticas para manipulação de marcas d'águas em imagens digitais . . . . . 47
3.2.2 Procedimentos para mapeamento sistemático da literatura . . . . . 47
3.2.3 Planejamento . . . . . 48

3.2.4 Execução do MSL . . . . . 50
3.2.5 Discussões . . . . . 51
3.2.6 Considerações Finais . . . . . 54
**3.3 Resumo do Capítulo** . . . . . 54

**4 ANÁLISE DAS TRANSFORMADAS WAVELET** . . . . . 56
**4.1 Inserção e Extração das Marcas D'Água** . . . . . 56
4.1.1 Resultados e Discussão . . . . . 58
**4.2 Resumo do Capítulo** . . . . . 62

**5 TRANSFORMADA WAVELET HAAR APROXIMADA** . . . . . 64
**5.1 Trabalhos Relacionados** . . . . . 65
**5.2 Transformada Wavelet Haar Discreta Aproximada (AxDHWT) Aplicada ao Sistema de Marca D'água** . . . . . 66
5.2.1 Descrição do Sistema de Marca d'Água . . . . . 67
**5.3 Resultados da Análise de Precisão do Sistema de Marca D'Água** . . . 71
5.3.1 Comparação com a Literatura . . . . . 73
**5.4 Avaliação dos Resultados de Síntese para o Sistema de Marca d'Água Baseado em AxDHWT** . . . . . 74
**5.5 Resumo do Capítulo** . . . . . 75

**6 CONCLUSÃO** . . . . . 77
6.0.1 Trabalhos Futuros . . . . . 77

**REFERÊNCIAS** . . . . . 79

# 1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, garantir a autenticidade das imagens digitais tornou-se uma preocupação importante, pois o uso de softwares de edição permite a manipulação de imagens digitais, mesmo sem conhecimento profissional (CHAITRA; REDDY, 2019). Dessa forma, os invasores podem adulterar sutilmente imagens digitais, explorando indevidamente a percepção do sistema visual humano (HVS - *Human Visual System*). Além disso, o grande crescimento do uso de plataformas de mídia social, facilita o compartilhamento de informações entre os usuários. Concomitantemente, tem sido explorada a disseminação de notícias falsas e uso indevido de imagem pessoal (MALANOWSKA et al., 2024). Em resposta a essa necessidade, diversas técnicas de marca d'água foram desenvolvidas, cada uma adequada a diferentes aplicações. No entanto, ainda é um desafio criar um sistema de marca d'água que consiga ser ao mesmo tempo robusto e seguro (BEGUM; UDDIN, 2020).

Diante da rápida evolução dos ataques cibernéticos, onde estes se tornam cada vez mais sofisticados, os cibercriminosos estão usando novas técnicas para explorar vulnerabilidades de segurança e roubar dados confidenciais. Além disso, os cibercriminosos também estão usando técnicas avançadas para acessar sistemas computacionais e redes de computadores, visando explorar vulnerabilidades a fim de obter informações confidenciais como, por exemplo, arquivos de imagens. Alguns desses ataques cibernéticos comuns incluem *phishing, malware, ransomware, DDoS, spoofing* de identidade e engenharia social (MICROSOFT, 2020). Para proteger os sistemas contra esses tipos de ameaças, é importante implementar medidas de segurança adequadas, como *firewalls*, antivírus, autenticação de dois fatores e monitoramento contínuo. Além disso, para a proteção de direitos autorais de imagens e de vídeos, as soluções promissoras no mundo multimídia são a utilização de marca d'água digital e a esteganografia (KUMAR et al., 2023).

A marca d'água digital é uma técnica de segurança que adiciona dados às imagens, vídeos, áudios ou documentos a fim de proteger os direitos autorais, verificar a autenticidade e identificar distribuições não autorizadas (KUMAR et al., 2023). A esteganografia é outra técnica de segurança que usa técnicas de ocultação para es-

conder informações confidenciais em arquivos de mídia. Estas soluções de segurança podem ajudar a proteger os direitos autorais de imagens e de vídeos contra uso não autorizado(KUMAR et al., 2023). Nesse sentido, a distorção "controlada" é introduzida na imagem original para produzir a imagem com a marca d'água. Todo o processo usado para inserir a marca d'água forma o sistema de marca d'água. Neste momento, existe também a possibilidade de se adicionar uma chave de segurança, mantida secretamente. Já a subtração ilegal da marca d'água da imagem marcada é geralmente referida como "ataque". Um bom processo de marca d'água, mesmo que disponível publicamente, evitaria um ataque bem-sucedido sem distorcer a imagem original (DAFAS; STATHAKI, 2003).

A marca d'água também pode ser abordada em *frames* de vídeo, já que é altamente suscetível a cópias não autorizadas. Entretanto, o fluxo de vídeo consiste em um sinal tridimensional, com duas dimensões no espaço e uma no tempo. Dessa forma, surgem vários problemas não presentes na marca d'água de imagem. Por exemplo, os quadros adjacentes não apenas têm alta correlação, mas também uma grande quantidade de redundância espacial e temporal. O algoritmo de marca d'água deve considerar tais características em termos de capacidade, robustez e imperceptibilidade. Além do mais, existe a possibilidade de inclusão de marca d'água em sinais de áudio. Porém, aumenta-se a dificuldade de alcançar a imperceptibilidade, pois o sistema auditivo humano (HAS - *Human Auditory System*) é muito mais sensível do que o HVS. Portanto, nesse caso, deve-se levar em consideração também a qualidade perceptiva (MALANOWSKA et al., 2024).

A maioria dos algoritmos de marca d'água publicados na literatura, depende de alguma forma de transformação como, por exemplo, a Transformada de Cosseno Discreto (DCT - *Discrete Cosine Transform*), a Transformada de Wavelet Discreta (DWT - *Discrete Wavelet Transform*), a Transformada de Karhunen-Loève (KLT - *Karhunen-Loève Transform*) (OHBUCHI; MUKAIYAMA; TAKAHASHI, 2002). Isso ocorre porque as técnicas no domínio transformado oferecem várias vantagens. Por exemplo, ao modificar a banda de frequência espacial, a qual a visão humana possui restrições, uma marca d'água embutida em uma imagem pode se tornar invisível. Ou, ao se direcionar as características de forma mais geral, modificar essas características em vez de detalhes finos, faz com que a marca d'água seja menos suscetível a certos tipos de ataques como a filtragem passa-baixa ou na adição de ruído aleatório. Ao fazer isso, as marcas d'água se tornam mais difíceis de se remover, pois as características de forma mais geral são frequentemente essenciais para a imagem (OHBUCHI; MUKAIYAMA; TAKAHASHI, 2002).

Dada a natureza das marcas d'água digitais, nas quais dados ocultos são transferidos junto com a mídia principal, essas técnicas não exigem memória ou espaço adicional para armazenar os bits da marca d'água. Isso torna elas particularmente

adequadas para aplicações na Internet das Coisas (IoT - *Internet of Things*), onde o projeto com recursos computacionais limitados é essencial para viabilizar uma implementação. Assim, um campo promissor para futuras pesquisas em marcas d'água digitais é a aplicação dessas técnicas em dispositivos IoT, visando proteger a privacidade, controlar o vazamento de informações e prevenir a adulteração de dados, especialmente em ambientes domésticos inteligentes (MALANOWSKA et al., 2024).

Em sistemas IoT muitos dispositivos sem fio são utilizados para interações, compartilhamento de informações e acesso a recursos. Como resultado, a eficiência energética é fundamental nessas plataformas IoT, a fim de torná-las mais resilientes e duradouras (THIAGARAJAN; SAMUNDISWARY, 2022). Além disso, novas aplicações conhecidas como reconhecimento, mineração e síntese (RMS), estão sendo amplamente implementadas em dispositivos móveis e estruturas de Internet das Coisas. Isso torna essencial o aprimoramento das arquiteturas dos dispositivos da próxima geração para garantir a execução eficiente dessas aplicações (TRAIOLA et al., 2020).

Para isso, nos últimos anos, a computação aproximada (AxC - *Approximate Computing*) emergiu como um tópico de pesquisa importante para aprimorar a velocidade e a eficiência energética em sistemas embarcados e em sistemas de alto desempenho. Pois, ao flexibilizar a necessidade das operações totalmente precisas ou completamente determinísticas, a AxC possibilita uma melhoria relevante na eficiência energética. Já existem diversas técnicas de AxC que expandem essa questão, oferecendo um conjunto adicional de parâmetros para equilibrar as compensações entre a precisão (*self-healing*) e o desempenho (*prunnig*) (BOSIO; DEVEAUTOUR; O'CONNOR, 2022). Um circuito aproximado ocupa menos área, consome menos energia e/ou funciona mais rápido que um convencional, porém pode gerar resultados não exatos. Esse paradigma da AxC é aplicável em domínios onde a precisão total dos cálculos não é necessária, como em processamento de imagens, sinais e vídeos (NAYAK et al., 2022).

### 1.0.1 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo principal investigar e desenvolver métodos eficientes para a inserção e para a extração de marcas d'água em imagens digitais, utilizando transformadas da família das transformadas Wavelet, assim como:

- Apresentação do estado da arte sobre as Transformadas Wavelet, processamento de imagens e técnicas de marcas d'água;
- Apresentação de conceitos e metodologias empregadas nos trabalhos desenvolvidos sobre o assunto;
- Avaliação da robustez e a eficácia das transformadas Wavelet em ambiente Matlab, considerando diferentes cenários de ataques;

- Apresentação de uma versão aproximada da transformada Haar discreta;
- Avaliação do melhor equilíbrio entre o consumo energético e a robustez do processo de marca d'água com base na transformada Haar discreta aproximada.

### 1.0.2 Objetivos Específicos

Além disso, os objetivos específicos deste trabalho incluem:

- Domínio e aplicação do uso de transformadas Wavelet em Matlab, avaliando sua robustez e eficácia na inserção de marcas d'água;
- Exploração das técnicas de computação aproximada para desenvolver uma versão otimizada da transformada Haar;
- Análise de viabilidade da transformada proposta, considerando o *trade-off* entre consumo energético, robustez e eficácia no processo de marca d'água;
- Contribuição para o estado da arte com a aplicação de uma transformada Wavelet para marcas d'água com maior eficiência energética e segurança da informação.

## 1.1 Contribuições

Este trabalho explorou e avaliou os modos de inserção e de extração das marcas d'água em imagens digitais utilizando seis transformadas da família das Wavelets: *Haar, Daubechies, Coiflet, Symlet, Biortogonal e Biortogonal Reversa*. Os métodos foram analisados e os resultados gerados demostraram a eficácia sob quatro ataques de degradação da imagem, ruído gaussiano aditivo, compressão JPEG, filtro mediano e ruído sal e pimenta. As métricas de qualidade, incluindo Índice de Similaridade Estrutural (SSIM), Erro Quadrático Médio (MSE) e Correlação Normalizada (NC), confirmaram a precisão, a robustez e o desempenho na extração das marcas d'água. Com base nisso, desenvolveu-se também um sistema de marca d'água, utilizando a transformada Wavelet Haar discreta aproximada (AxDHWT), com foco em aplicações de baixo consumo de energia. Essa abordagem permitiu otimizar o hardware, reduzindo significativamente o número de circuitos aritméticos e a área, porém sem perder a resiliência a ataques comuns às imagens.

## 1.2 Organização do Texto

Este texto está organizado da seguinte forma: o Capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica sobre as imagens digitais, marcas d'água, transformadas, ataques,

métricas de avaliação, computação aproximada, metodologia para análise de dissipação de potência, metodologia para a avaliação de síntese lógica. O Capítulo 3 introduz uma revisão bibliográfica com uma análise abrangente da literatura e um mapeamento sistemático na busca sobre a utilização de várias transformadas no processo da marca d'água. O Capítulo 4 apresenta a análise da implementação das marcas d'água em imagens com o uso de transformadas utilizando o Matlab. O Capítulo 5 apresenta uma transformada Wavelet Haar aproximada. E por fim, no Capítulo 6, a conclusão do trabalho.

# 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo aborda os principais conceitos para o desenvolvimento e a avaliação de um sistema de marca d'água em imagens digitais. Inicialmente, são apresentados os fundamentos sobre imagens digitais e a importância das marcas d'água para a proteção e autenticação dessas imagens. Em seguida, são revisadas as seis transformadas aplicadas às imagens neste trabalho: transformada Wavelet Haar, transformada Wavelet Haar discreta, transformada Wavelet Daubechie, transformada Wavelet Coiflet, transformada Wavelet Symlet, transformada Wavelet Biortogonal e transformada Wavelet Biortogonal Reversa. O capítulo também explora os diferentes tipos de ataques aos quais as imagens serão submetidas, bem como as métricas de avaliação de desempenho utilizadas para medir a robustez e a qualidade das marcas d'água. Além disso, apresenta-se uma breve revisão sobre a computação aproximada (AxC), destacando suas vantagens em termos de eficiência energética. Por fim, são discutidos os aspectos tecnológicos relacionados a tecnologia CMOS e a metodologia para estimativa de potência, fundamentais para o desenvolvimento de sistemas de baixo consumo energético.

## 2.1 Imagens digitais

O processamento de imagens cresceu rapidamente desde a década de 1960 até o presente. As técnicas de processamento das imagens digitais agora são usadas em uma ampla gama de aplicações tais como em sondas espaciais, na indústria e na medicina. Nesta última aplicação, por exemplo, pode-se aumentar o contraste ou codificar os níveis de intensidade em cores para facilitar a interpretação de exames realizados por raios X.

A conversão de uma imagem analógica em uma imagem digital envolve duas operações importantes, a amostragem e a quantização. Para definir uma imagem digital, pode-se utilizar uma função bidimensional, $f(x, y)$, onde x e y são coordenadas cartesianas para uma superfície plana, e a amplitude de $f$ é a intensidade naquele ponto em qualquer par de coordenadas (x, y). Quando x, y e os valores de amplitude de $f$ são

todos finitos, assumindo quantidades discretas, tem-se uma imagem digital. Como uma imagem digital é composta por um número finito de elementos, cada um com uma localização e valor específicos, esses elementos são referidos como elementos de imagem, ou *pixels*, onde *pixel* é o termo mais amplamente utilizado para denotar os elementos de uma imagem digital (GONZALEZ; FAISAL, 2019).

Conforme (JAYARAMAN; ESAKKIRAJAN; VEERAKUMAR, 2009), há algumas vantagens da utilização de imagens digitais, tais como:

- O processamento das imagens é mais rápido e econômico.
- As imagens digitais podem ser armazenadas e transmitidas de forma eficiente.
- Ao fotografar uma imagem digital, pode-se ver imediatamente se a imagem é boa ou não.
- Copiar uma imagem digital é fácil. A qualidade da imagem digital não será degradada mesmo que seja copiada várias vezes.
- Sempre que a imagem estiver em formato digital, a reprodução da imagem é mais rápida e mais barata.
- A tecnologia digital oferece muito espaço para a manipulação versátil de imagens.

Há também algumas desvantagens ou limitações na utilização de imagens digitais, tais como:

- O uso indevido de direitos autorais tornou-se mais fácil porque as imagens podem ser facilmente copiadas da *Internet*.
- Um arquivo digital não pode ser ampliado além de um determinado tamanho sem comprometer a qualidade.
- A memória necessária para armazenar e processar imagens digitais de boa qualidade é muito alto.
- Para implementação em tempo real de algoritmos de processamento de imagem digital, o processador tem que ser muito rápido porque o volume de dados é elevado.

## 2.2 Marca D'Água

A marca d'água digital e a criptografia estão intimamente relacionadas, mas a marca d'água é diferente da criptografia. No sistema de marca d'água, as informações de uma imagem utilizada como marca d'água são incorporadas a uma imagem

hospedeira ou original. Assim, a imagem com a marca d'água é transmitida ou armazenada e depois decodificada para ser verificada pelo receptor. O objetivo da marca d'água não é restringir o acesso à imagem original, mas garantir que os dados embutidos sejam recuperáveis. Já a criptografia tenta ocultar a imagem para que ela possa ser compreendida apenas entre as partes comunicantes que compartilhem uma chave secreta para cifragem e decifragem. Outra técnica é a esteganografia de imagem, cujo objetivo é ocultar dados secretos dentro de uma imagem de maneira que fique invisível ao olho humano. Isso é realizado utilizando bits redundantes da imagem para armazenar as informações secretas sem alterar sua aparência visual (S et al., 2023).

A implementação de uma marca d'água em uma imagem digital pode acarretar na perda permanente da imagem hospedeira. Sendo assim, para evitar esses danos, a implementação deve ser reversível, podendo os dados originais serem restaurados. A marca d'água digital é projetada para oferecer uma camada adicional de proteção adicional, além da criptografia e do embaralhamento de dados, visando garantir a proteção do conteúdo. (JAYARAMAN; ESAKKIRAJAN; VEERAKUMAR, 2009). A marca d'água digital encontra sua aplicação nas áreas de proteção de direitos autorais, validação, adulteração, anotações ocultas e comunicações.

As técnicas de marca d'água em imagens, podem ser classificadas como:

**Marca D'Água Visível** - é uma imagem translúcida sobreposta à imagem original. Visível a um observador após uma inspeção.

**Marca D'Água Frágil Invisível** - é incorporada à imagem original de forma que qualquer manipulação ou modificação da imagem altere ou destrua a marca d'água.

**Marca D'Água Robusta Invisível** - é incorporada à imagem original de tal forma que uma alteração feita no valor do pixel não é perceptível e pode ser recuperada apenas com um mecanismo de decodificação apropriado.

Um critério importante é a robustez, que indica a capacidade da marca d'água de resistir a ataques maliciosos. As marcas d'água robustas podem ser recuperadas após o processamento de sinal ou após um ataque malicioso. Já as marcas d'água frágeis não podem ser recuperadas após o processamento ou ao ataque (RATHORE et al., 2017). Foram desenvolvidas também as semi-frágeis para a verificação de conteúdo, onde é permitido aplicar pequenas transformações como, por exemplo, a compressão (MALANOWSKA et al., 2024).

Existem também as seguintes formas de domínio de trabalho, espacial e em frequência:

**Marca D'Água no Domínio Espacial** - é a técnica que utiliza o bit menos significativo (LSB - *Least Significant Bit*) da imagem de origem para incorporar a marca

d'água. É a técnica mais comum, menos complexa, devido a simples substituição do bit menos significativo de cada pixel na imagem de hospedeira com a informação da marca d'água, porém não é robusta contra ataques.

**Marca D'Água no Domínio em Frequência** - a marca d'água é feita no domínio de transformação. As mais populares são a transformada discreta do cosseno (DCT) e a transformada Wavelet discreta (DWT). As marcas d'água neste domínio são mais robustas, já que a imagem embarcada está espalhada por toda a imagem.

Em suma, os requisitos fundamentais de uma marca d'água são: imperceptibilidade, robustez, capacidade e segurança. Onde, segundo Malanowska et al. (2024), os três primeiros formam uma espécie de triângulo. Assim, com o aumento da capacidade e da robustez, a imperceptibilidade poderá ser reduzida.

Tipicamente, um sistema de marca d'água possui três diferentes etapas: a inserção, a transmissão e a extração. Na primeira etapa, algum algoritmo insere a marca d'água na imagem hospedeira para produzir uma imagem marcada. Na segunda etapa, ocorre a transmissão da imagem marcada ou ocorre o seu armazenamento. Na última etapa, ocorre a extração da marca d'água por usuários legítimos (MALANOWSKA et al., 2024). Caso ocorram modificações indesejadas decorrentes de ruído nos canais de transmissão ou alterações intencionais por pessoas mal-intencionadas na imagem, quaisquer alterações durante a transmissão são chamadas de ataques (MALANOWSKA et al., 2024).

Esses ataques são classificados em quatro categorias: ataques de remoção, geométricos, criptográficos e de protocolo. Por exemplo, em ataques de remoção de sinais ou de processamento, o objetivo principal é eliminar o sinal de marca d'água sem comprometer os mecanismos de segurança do esquema proposto. Dessa forma, não há esforço para decifrar a técnica de incorporação ou a chave criptográfica. Entretanto, o resultado é a danificação ou a completa remoção do conteúdo da marca d'água (COX et al., 2007).

## 2.3 Transformadas em Imagens

As transformadas são ferramentas matemáticas que possibilitam transformar informações do domínio do tempo para o domínio da frequência e vice-versa. Isso permite realizar a análise ou uma tarefa de forma mais facilmente. As transformadas aplicadas em imagens são úteis para cálculos rápidos de convolução e de correlação. Com elas, pode-se alterar a representação de um sinal projetando-o em um conjunto de funções básicas, sem alterar o conteúdo da informação presente no sinal. A maioria das transformadas em imagem, como a transformada de Karhunen-Loève, a transfor-

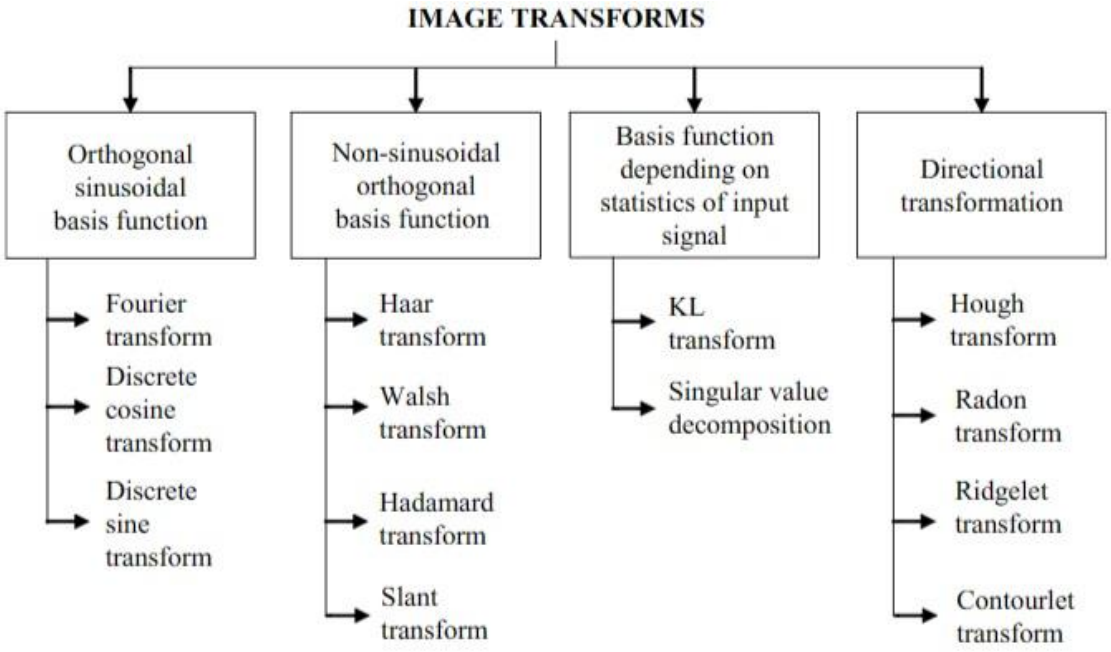


Figura 1 – Transformações de imagens (JAYARAMAN; ESAKKIRAJAN; VEERAKUMAR, 2009)

mada de Fourier, a transformada discreta de cosseno, fornece informações sobre o conteúdo de frequência da imagem. A Figura 1 apresenta a classificação de algumas transformadas utilizadas nas transformações em imagens.

Com a transformação, pode-se isolar componentes críticos do padrão de imagem para que sejam diretamente acessíveis para análise, ou ainda, colocar os dados de imagem em uma forma mais compacta para que possam ser armazenados e transmitidos de forma eficiente. As transformadas desempenham um papel significativo em vários aplicativos de processamento de imagem, como análise, aprimoramento, filtragem e compactação de imagem (JAYARAMAN; ESAKKIRAJAN; VEERAKUMAR, 2009).

As técnicas baseadas em domínios de transformação geralmente oferecem uma maior robustez e imperceptibilidade quando os dados da imagem hospedeira com a marca d'água são submetidos a manipulações geométricas e de processamento de sinais (MALANOWSKA et al., 2024). As manipulações geométricas, com as transformações, geram a modificação da relação espacial entre os *pixels* de uma imagem, na forma espacial de coordenadas e/ou na interpolação de intensidade que atribui níveis de intensidade aos *pixels* transformados espacialmente (GONZALEZ; WOODS, 2009).

### 2.3.1 Transformada Wavelet Haar

A Transformada Wavelet Haar é uma técnica de análise de sinais que oferece uma representação eficaz de dados em uma função bidimensional tempo versus frequên-

cia, permitindo uma resolução variável, Figura 2. Essa transformada se destaca por sua capacidade de analisar sinais com componentes de baixa e alta frequência de maneira precisa e eficiente. A escolha da Wavelet base, também chamada de mãe, em uma transformada Wavelet é crucial e depende das características específicas da aplicação em questão. A transformada Haar é reconhecida por sua simplicidade matemática e baixo custo computacional, pelo fato de que requer menos recursos de processamento, tempo e energia computacional, em comparação com outras transformadas, tornando-a uma escolha apropriada para várias aplicações.

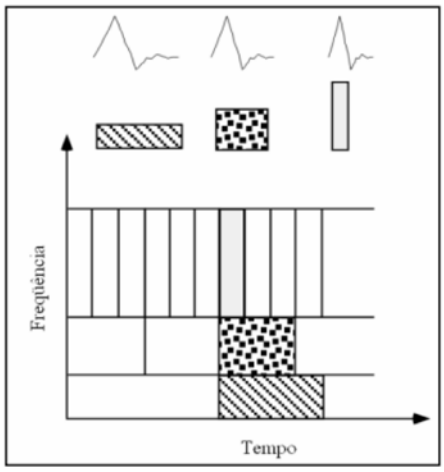


Figura 2 – Transformada Wavelet (POZZEBON, 2009)

#### *2.3.1.1 Transformada Wavelet Haar Discreta*

A transformada Wavelet Haar, como parte da classe transformada Wavelet discreta (DWT), é a mais simples matematicamente e antiga das funções da família Wavelet (DAUBECHIES, 1992). Ela é caracterizada por sua forma degrau unitário, representada por uma função ortonormal, cujo domínio de suporte é limitado ao intervalo [-1, 1]. Matematicamente, a função Wavelet Haar é definida de acordo com (1).

$$\psi(t) = \begin{cases} 1 \quad to \quad 0 \leq t < \frac{1}{2} \\ -1 \quad to \quad \frac{1}{2} \leq t < 1 \\ 0, \quad \text{caso contrário} \end{cases} \tag{1}$$

A transformada Wavelet Haar, por ser descontínua, assemelha-se a uma função degrau, como ilustrado na Figura 3 (MISITI et al., 1996).

O cálculo da transformada Wavelet Haar envolve a construção de filtros passa-baixa e passa-alta, cujos coeficientes são determinados pela escolha da Wavelet mãe. Os coeficientes de aproximação e de detalhes na primeira escala são calculados pelas

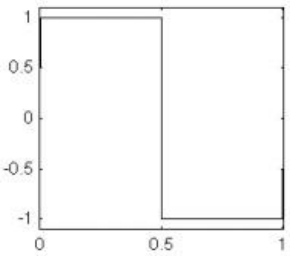


Figura 3 – Função Wavelet Haar (MISITI et al., 1996)

Equações 2 e 3, respectivamente:

$$A_1 = \frac{1}{\sqrt{2}}(X_{(2n-1)}) + \frac{1}{\sqrt{2}}(X_{(2n)}) \tag{2}$$

$$D_1 = \frac{1}{\sqrt{2}}(X_{(2n-1)}) - \frac{1}{\sqrt{2}}(X_{(2n)}) \tag{3}$$

A matriz ortogonal $H_N$, conhecida como matriz Haar, representa a transformada Wavelet Haar em forma matricial. Para um nível de decomposição, a matriz Haar é representada por (4).

$$H_{2(m=2)} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \tag{4}$$

A aplicação da transformada Wavelet discreta (DWT) bidimensional em uma imagem segue um processo semelhante ao utilizado em um sinal unidimensional. Como a representação discreta de uma imagem é uma matriz, a DWT bidimensional pode ser aplicada nas linhas ou colunas dessa matriz. Existem duas formas comuns nas quais as Wavelets podem ser empregadas para transformar os valores dos *pixels* dentro de uma imagem. Cada uma dessas transformações é uma generalização bidimensional da DWT unidimensional Stollnitz; Derose; Salesin (1996).

Na análise em frequência, decompondo a imagem em linha e colunas, como representado nas Figuras 4 e 5, a imagem é decomposta em coeficientes de aproximação e de detalhes, nas direções horizontal, vertical e diagonal. O primeiro nível resulta em uma sub-banda de baixa frequência LL e duas sub-bandas de média frequência HL e LH, e uma de alta frequência HH. No segundo nível, os coeficientes de detalhes horizontais estão em $HL_2$, os verticais em $LH_2$, os de detalhes diagonais estão em $HH_2$ e a sub-banda $LL_2$. Esta última é uma aproximação da imagem em nível de baixa frequência.

Diante da convolução de suas linhas com *h$\phi$(- n)* e *h$\psi$(- n)* e da subamostragem de suas colunas, obtêm-se duas subimagens, cujas resoluções horizontais são reduzidas por um fator de 2. O componente passa-alta ou de detalhes caracteriza as

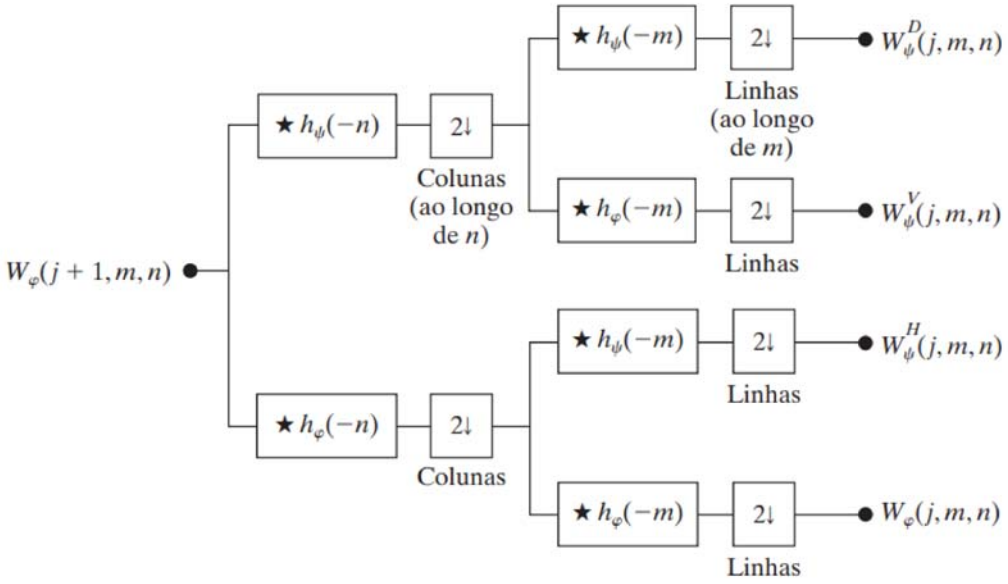


Figura 4 – Banco de filtros para decomposição - Wavelet 2-D (GONZALEZ; WOODS, 2009)

informações de alta frequência da imagem com orientação vertical. Já o componente passa-baixa, de aproximação, contém as informações de baixa frequência, verticais. As duas subimagens são, então, filtradas e subamostradas ao longo das colunas para gerar quatro subimagens de saída de um quarto do tamanho — $W_\psi{}^D$, $W_\psi{}^V$, $W_\psi{}^H$ e $W_\phi$, equivalentes a LH, HL, HH, LL, respectivamente (GONZALEZ; WOODS, 2009).

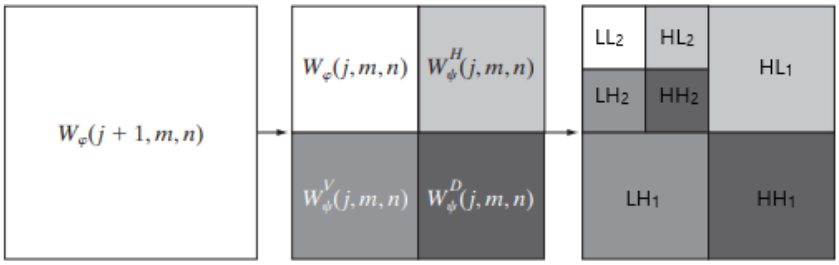


Figura 5 – Decomposição resultante - Wavelet 2-D. Adaptado (GONZALEZ; WOODS, 2009)

A reconstrução da imagem é ilustrada na Figura 6, onde, em cada iteração, as quatro subimagens de aproximação e de detalhes são submetidas à superamostragem e à convolução com dois filtros unidimensionais, onde um opera nas colunas e outro nas linhas. A soma dos resultados produz a reconstrução da imagem original.

A transformada Wavelet discreta (DWT) de uma função ou imagem $f(x, y)$ é dada pela Equação 5, onde (k, l) representa a posição da Wavelet e $S$ é a escala. Para uma imagem 2D, as linhas e colunas são tratadas como sinais 1D.

$$W^S(k,l) = \frac{1}{S}\sum_i\sum_j f(i,j)\psi\left(\frac{m-k}{s}\right)\psi\left(\frac{n-l}{s}\right) \tag{5}$$

Devido à propriedade de separabilidade, cada processamento da DWT é feita separadamente nas linhas e nas colunas. No primeiro passo, ou seja, na decomposição

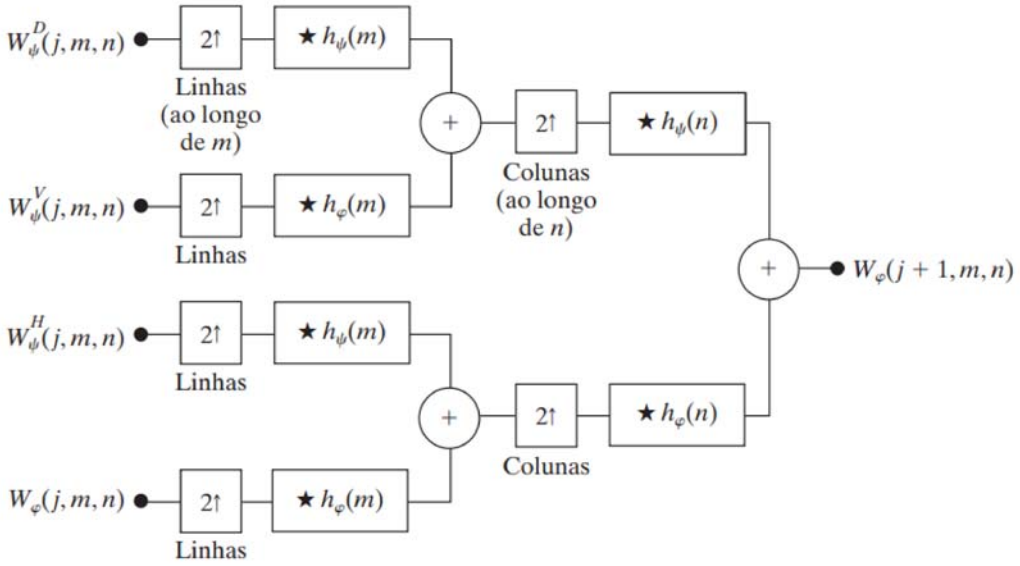


Figura 6 – Recomposição - Wavelet 2-D (GONZALEZ; WOODS, 2009)

de nível 1, cada linha da imagem é escalada (média ponderada) e submetida à transformada Wavelet (diferença ponderada). Em seguida, aplica-se a transformada de escala ($L$) e Wavelet ($H$) a cada coluna das duas metades de imagem do passo anterior. O algoritmo DWT utiliza um par de filtros passa-alta ($H_H$) e passa-baixa ($H_L$). Por outro lado, a DWT inversa (IDWT - *Inverse Discrete Wavelet Transform*) utiliza um par de filtros de reconstrução passa-alta ($H_H^{-1}$) e passa-baixa ($H_L^{-1}$). No entanto, apenas Wavelets ortogonais permitem a reconstrução perfeita do sinal pela IDWT. Entre as famílias de transformada Wavelet, a transformada Haar destaca-se por sua simplicidade matemática e baixo esforço computacional necessário para computá-la (SEIDEL et al., 2021a). Uma das principais características dessa transformada é a facilidade de detecção de informações no domínio do tempo. As transformadas Wavelet são construídas por meio de translações, escalonamentos diádicos de um produto de Wavelets univariados e funções de escala conhecidas como Wavelets 2D separáveis.

A ortogonalidade é uma característica essencial das transformações discretas (PAIM et al., 2017). Isso é especialmente verdadeiro para a transformada Haar, cuja matriz $\mathbf{M}$ é mostrada em (6). Uma matriz aproximada $\mathbf{M}$ é ortogonal se sua transposta for a matriz inversa. Assim, identifica-se que a multiplicação de uma matriz ortogonal direta por sua transposta resulta na matriz identidade, $\mathbf{M} \cdot \mathbf{M}^\top = \mathbf{I}$. Este é o caso da matriz inversa Haar, cuja matriz inversa é apresentada em (7).

$$H_{2^{M=2}} = \frac{1}{4}\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} \quad (6) \qquad H^{-1}_{2^{M=2}} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 2 & 0 \\ 1 & 1 & -2 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 2 \\ 1 & -1 & 0 & -2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

### 2.3.2 Transformada Wavelet Daubechie

A transformada Wavelet Daubechies (DWT - *Daubechie Wavelet Transform*) é também uma das mais conhecidas da família das Wavelets ortonormais utilizadas em transformações discretas de Wavelets. Essa transformada foi apresentada por Daubechies em 1988, como sendo compacta e semelhante à Transformada Haar.

A função de escala da Wavelet Daubechies é definida como um filtro passa-baixa do sinal. Ela representa o nível mais alto de aproximação desse sinal e é usado para decompor em níveis mais finos de detalhes (TRABELSI; NOURI; AMMARI, 2023). A função de dimensionamento é denotada por $\phi$*(x)* e é dada pela Equação 2, onde *h[n]* são os coeficientes da Daubechies e $\phi$*(2x-n)* é uma versão deslocada e dimensionada da função de escala.

$$\phi(x) = \sum_n h[n]\phi(2x - n) \quad (2)$$

Com o filtro passa-alta, tem-se a função de dilatação representada por $\psi$ e apresenta os níveis de detalhes do sinal. A dilatação é apresentada pela Equação 3, onde *g[n]* são os coeficientes de Daubechies para a função Wavelet.

$$\psi(x) = \sum_n g[n]\phi(2x - n) \quad (3)$$

Dessa forma, utilizando a transformada Daubechies discreta em uma imagem, é possível a extração de quatro sub-bandas da imagem original. Da mesma forma que, tanto a função de escala quanto a função de dilatação são utilizadas na transformada Wavelet, a Daubechies mostra ser uma ferramenta matemática utilizada para analisar sinais e imagens em diferentes níveis de resolução.

A Figura 7 apresenta os níveis da transformada Wavelet Daubechie. Para todas as simulações, foram utilizadas as de ordem 2, tanto para a decomposição quanto para a reconstrução, `db2`. Assim como, para as demais transformadas, utilizou-se o mesmo nível.

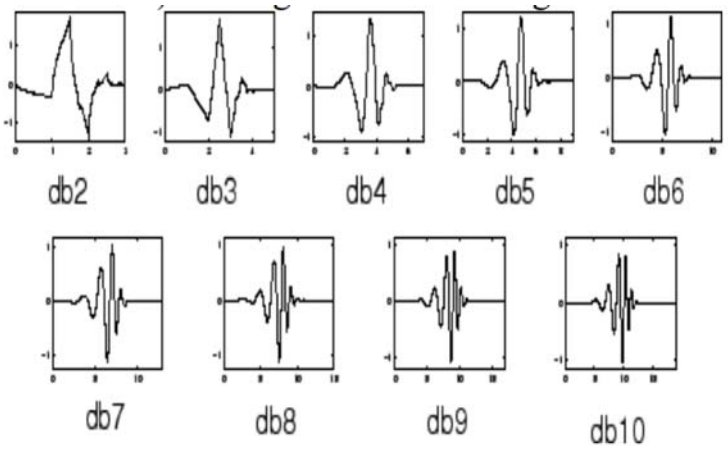


Figura 7 – Níveis da transformada Wavelet Daubechie (MAJUMDAR, 2013)

### 2.3.3 Transformada Wavelet Coiflet

A transformada Wavelet Coiflet, assemelha-se à transformada Wavelet Discreta. Esta transformada representa funções que se diferenciam da função Wavelet $\Psi(t)$ (Equação 1), por apresentar variação, não somente de momentos, mas também na função escala $\phi(t)$ e ortogonalidade. Dessa forma, destaca-se na exibição de características interpoladas, oferecendo boa aproximação às funções polinomiais (PEREIRA et al., 2008). A Equação 10 define a transformada Wavelet Coiflet.

$$M_{\hat{\Psi}}(0, l] = 0 \tag{8}$$

$$M_{\phi}(t, 1] = \delta[l] \tag{9}$$

Para *l = 0, 1, 2..., L-1* e $t_0$ amostras arbitrárias iguais a 0, tornando os momentos nulos para os filtros da Coiflet, então:

$$\sum_{m}(2m)^t h[2m] = \sum_{m}(2m+1)^t h[2m+1] = \frac{1}{2}\delta[m] \tag{10}$$

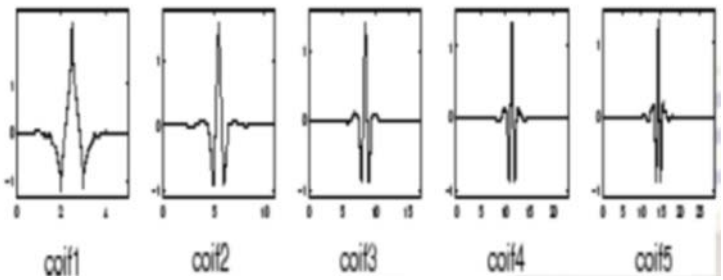


Figura 8 – Wavelet Coiflet (MAJUMDAR, 2013)

Para a função `coifwave(w)`, disponível no Matlab, onde $w$ = 'coifn' e os valores possíveis de $n$ são 1, 2, 3, 4, 5. (MATHWORKS, 2024). Dessa forma, a família Wavelet

Coiflet é: `coif1`, `coif2`, `coif3`, `coif4` e `coif5`, tal como ilustrado na Figura 8. Mantendo o critério, a Wavelet utilizada no estudo foi a de ordem 2, ou seja, `coif2`.

### 2.3.4 Transformada Wavelet Symlet

Existe também os filtros de decomposição que fazem parte de uma família bem conhecida de transformadas Wavelet, chamada de Symlets, uma abreviação de "*Symmetrical Wavelet*", ou seja, transformada Wavelet simétrica. Essa família de transformadas Wavelet é a versão alterada da transformada Wavelets Daubechies, ou seja, com o aumento da simetria (RASHID; AMIN; LONE, 2020). Apesar de não serem perfeitamente simétricas, elas foram criadas para ter uma menor assimetria e um maior número de momentos que se aproximam de zero em relação às outras transformadas Wavelet, com um suporte compacto (GONZALEZ; WOODS, 2009). Em outras palavras, as Symlets são diferentes de zero apenas em um intervalo limitado de tempo ou de espaço.

As Symlets possuem um suporte compacto de tamanho `2N-1`. Symlets são transformadas Wavelet ortogonais com regularidade arbitrária. Assim, é possível escolher e ajustar a regularidade da Symlet, ou seja, o grau de suavidade. E apresenta momentos de desaparecimento 'p', onde `N=2p` (JYOTSNA; RAJPAL; VISHWAKARMA, 2016). Isso significa que, a integral da Symlet multiplicada por qualquer polinômio de grau até `p-1` é zero, filtrando as baixas frequências referentes a tal polinômio. Nessa dissertação, como nas demais transformadas, utiliza-se o segundo nível, ou seja, `sym2`.

### 2.3.5 Transformada Wavelet Biortogonal

Da mesma forma que as transformadas Wavelet ortogonais, as biortogonais também podem ser utilizadas para decompor ou recuperar sinais complexos, onde suas bases biortogonais estão relacionadas com aproximações em multirresolução. Ela possui duas funções de escala, mais flexibilidade que a ortogonal devido à possibilidade de se projetar funções de análise e de síntese separadamente. Estas transformadas representam uma ampla classe de funções e operadores sem redundância (RASHID; AMIN; LONE, 2020).

Além disso, esta Wavelet também possui fase linear na função de transferência, uma característica da família de Wavelets biortogonais, sendo essencial para a criação de imagens e de sinais (VERMA et al., 2022).

A Wavelet biortogonal é escrita por definição como: "biorN", onde $N$ pode ser: 1.1, 1.3, 1.5, 2.2... Essas combinações específicas referem-se a filtros de análise e de síntese. Os números antes e depois do ponto indicam a ordem dos filtros usados. Essa dissertação utilizou a Wavelet biortogonal de ordem 2, tanto para a decomposição quanto para a reconstrução, `bior 2.2`.

### 2.3.6 Transformada Wavelet Biortogonal Reversa

A transformada Wavelet Biortogonal Reversa é um caso especial da transformada Wavelet Biortogonal, onde os filtros de decomposição e os de reconstrução são trocados. Isso significa que, os filtros de decomposição se tornam os filtros de reconstrução e vice-versa. Esses filtros são simétricos e com resposta ao impulso finito (FIR), filtros *low-pass e high-pass*, que permitem a linearidade de fase e minimizam erros de percepção (ARVINTI; COSTACHE, 2018). Da mesma forma, foi utilizada a transformada de ordem 2, tanto para a decomposição quanto para a reconstrução, `rbior 2.2`.

## 2.4 Ataques

As imagens podem sofrer ataques mal-intencionados que podem comprometer a segurança das marcas d'água embutidas. Além da interferência de ruído natural que ocorre durante a transmissão ou recepção dessas imagens, muitas vezes devido a problemas no canal de comunicação utilizado para a transmissão (AL-SHAYEA et al., 2020).

Entretanto, as imagens também podem ser alvo de ataques intencionais. Pode-se realizar ataques para a avaliação da robustez da implementação da técnica de marca d'água. Dentre esses, foram realizados os seguintes tipos de ataques sobre as imagens: adição de ruído gaussiano, compressão JPEG, aplicação de filtro mediano e, inserção do ruído sal e pimenta. Esses ataques permitem verificar como diferentes tipos de distorções afetam a integridade e a detectabilidade da marca d'água, proporcionando uma compreensão mais profunda da eficácia da técnica implementada.

### 2.4.1 Ruído Gaussiano Aditivo

A distribuição de probabilidade do ruído gaussiano, modelada pela Equação 11, é frequentemente utilizada para simular os efeitos dessas perturbações no processo de inserção e extração de marcas d'água em imagens digitais. A resistência da marca d'água ao ruído gaussiano é fundamental, pois ele representa uma perturbação comum nas imagens, que pode degradar a qualidade da marca d'água. O ruído gaussiano é igualmente distribuído pelo sinal, o que significa que cada *pixel* na imagem com ruído é a soma do valor real do *pixel* e do ruído gaussiano (AL-SHAYEA et al., 2020).

Dada a função de densidade de uma variável $x$ aleatória Gaussiana, onde $x$ representa a intensidade, $\mu$ é o valor médio de $x$ e o $\sigma$ é o desvio padrão.

$$p(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \tag{11}$$

### 2.4.2 Compressão JPEG

O JPEG (*Joint Photographic Experts Group*) foi o primeiro padrão internacional de compressão de imagens, podendo fornecer uma boa capacidade de compressão e, ao mesmo tempo, ter uma boa qualidade de reconstrução no campo de processamento de imagens e de vídeos. Porém, é um esquema de compactação com perdas, o que significa que, uma vez compactada, a imagem original não pode ser totalmente restaurada. A utilização da compressão JPEG permite o ajuste entre o tamanho de armazenamento e a qualidade das imagens. Para isso, é utilizada a compactação baseada na transformada discreta do cosseno (DCT). Essa operação também utiliza um modelo perceptivo baseado no sistema visual humano, descartando informações de alta frequência, as transições nítidas na intensidade e na tonalidade de cores (HE, 2014).

A marca d'água também precisa ser robusta contra diferentes níveis de compressão. Como praticamente todas as imagens distribuídas atualmente pela Internet são comprimidas de alguma forma, é aconselhável, geralmente, realizar a incorporação da marca d'água no mesmo domínio onde ocorre a compressão, garantindo assim que a marca d'água permaneça intacta e detectável após os processos de compressão (JAIN et al., 2015).

### 2.4.3 Filtro Mediano

O filtro mediano é uma implementação de um filtro não-linear para a remoção de ruídos, onde os *pixels* ruidosos são substituídos pelo valor médio de seus vizinhos. O tamanho da janela de filtragem determina a quantidade desses *pixels* vizinhos. Dessa forma, o valor mediano é descrito como o valor médio em uma sequência classificada com $P1, P2, P3, ..., Pk$ dos *pixels* vizinhos (GEORGE et al., 2018). A representação do Mediano é dada em (12), onde $P_1, P_2, P_3, \ldots, P_k$ é a sequência de *pixels* vizinhos. Todos os *pixels* na imagem devem ser organizados em ordem crescente ou decrescente antes da aplicação do filtro. Após realizar a ordenação, a sequência de *pixels* da imagem resultante será $P_{i1} \leq P_{i2} \leq P_{i3} \leq \cdots \leq P_{ik}$ (GEORGE et al., 2018).

$$\text{Mediano}(P) = \begin{cases} P_{\frac{k+1}{2}}, & \text{se } k \text{ for ímpar} \\ \frac{1}{2}\left[P_{\frac{k}{2}} + P_{\frac{k}{2}+1}\right], & \text{se } 'k \text{ for par} \end{cases} \tag{12}$$

### 2.4.4 Ruído Sal e Pimenta

O ruído sal e pimenta é um tipo de ruído de impulso, caracterizado por picos de intensidade. Esse ruído ocorre frequentemente devido a erros na transmissão de dados, resultando em mudanças abruptas no sinal da imagem. Tais distorções aparecem na imagem como pontos brancos e pretos, correspondentes aos valores máximos e

mínimos de intensidade (AL-SHAYEA et al., 2020).

Nesse tipo de ruído, as imagens obteriam *pixels* escuros na região clara e *pixels* claros na região escura, causados por erros na conversão de analógico para digital. A região clara representa o valor de sal e o valor de pimenta é a região mais escura (CHAND; FARIK; SHARMA, 2022). A função densidade de probabilidade do ruído é dada por (13).

$$p(x) = \begin{cases} \frac{\eta}{2} & \text{para } x = \text{sal (branco)} \\ \frac{\eta}{2} & \text{para } x = \text{pimenta (preto)} \\ 1 - \eta & \text{para o pixel manter seu valor original} \end{cases} \tag{13}$$

## 2.5 Métricas de Avaliação de Desempenho

Existem algumas métricas que podem ser utilizadas para a avaliar a implementação da marca d'água em termos de imperceptibilidade após os ataques. Normalmente, as métricas mais utilizadas são as que avaliam a distorção causada, como: o erro quadrático médio (MSE - *Mean Squared Error*), índice de similaridade estrutural (SSIM - *Structural Similarity Index*) e a correlação normalizada (NC - *Normalized Correlation*). Outras medidas de distorção são o índice de qualidade, correlação, distância euclidiana, distância de Manhattan, dentre outras, Alaa (2021).

### 2.5.1 Índice de Similaridade Estrutural

A medição do índice de similaridade estrutural é utilizada para medir a qualidade de imagem, assim como para indicar a semelhança entre duas imagens. O SSIM considera a degradação da imagem como uma mudança percebida de informação estrutural, luminância e contraste Mathworks (2024a). O SSIM é representado pela Equação 14.

$$SSIM(x, y) = \frac{(2\mu_x\mu_y + C_1)(2\sigma_{xy} + C_2)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + C_1)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2)} \tag{14}$$

As variáveis na Equação 14 são definidas da seguinte forma:
- $x$ e $y$ são as imagens a serem comparadas;
- $\mu_x$ e $\mu_y$ são as médias dos *pixels* de $x$ e $y$, respectivamente;
- $\sigma_x$ e $\sigma_y$ são os desvios padrões de $x$ e $y$, respectivamente;
- $\sigma_{xy}$ é a covariância entre $x$ e $y$;
- $C_1$ e $C_2$ são constantes que evitam a divisão por zero;

Os valores de $C_1$ e $C_2$ são geralmente definidos como $C_1 = (0.01 + K)^2$ e $C_2 = (0.03 + L)^2$, onde $K$ e $L$ são constantes que controlam a sensibilidade da métrica às

mudanças na luminância e no contraste, respectivamente. Os valores padrão de $K$ e $L$ são $K = L = 0.02$.

O valor do SSIM varia entre 0 e 1. Um SSIM igual a 1 indica que as imagens são idênticas, enquanto que, um SSIM igual 0, indica que as imagens são completamente diferentes.

### 2.5.2 Erro Quadrático Médio

O cálculo do erro quadrático médio (MSE) indica a similaridade entre dois sinais, ou seja, é uma medida de fidelidade que descreve quantitativamente o grau de similaridade/fidelidade ou o nível de erro/distorção entre eles Zhou; Bovik (2009). O MSE é representado pela Equação 15. Quanto menor o valor, maior é a similaridade. Assim, pode-se encontrar a diferença quadrática média entre a imagem de referência em uma imagem de análise Mathworks (2024b).

$$MSE(u,v) = \frac{1}{(m.x)} \sum_{x=0}^{m-1} \sum_{x=0}^{n-1} [f(x,y) - F(x,y)]^2 \tag{15}$$

### 2.5.3 Correlação Normalizada

Outra métrica que pode ser utilizada para verificar a semelhança entre imagens é a correlação normalizada (NC). O valor de NC varia entre 0 e 1. Essa métrica indica que, quanto maior é o seu valor, maior é a semelhança entre as imagens. Quando o valor máximo atingido pela correlação é 1, indica a semelhança perfeita das imagens.

Essa técnica calcula a correspondência realizando uma correlação 2D discreta da matriz de imagem do modelo, em todos os locais possíveis na matriz da imagem de origem (FOUDA; RAGAB, 2013).

A Equação 16 representa a NC, sendo-se possível avaliar a robustez da inserção da marca d'água contra ataques (JIMSON; HEMACHANDRAN, 2018). Na equação, $M$ e $N$ são as dimensões das imagens e $W$ e $W^*$ são a marca d'água original e a extraída, respectivamente. Segundo (GAFSI et al., 2022), é aceitável o valor de NC $\geq 0.7$ na relação entre a marca d'água original e a extraída.

$$NC = \frac{\sum_{i=1}^{M} \sum_{j=1}^{N} W(i,j) W^*(i,j)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{M} \sum_{j=1}^{N} W^2(i,j)} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^{M} \sum_{j=1}^{N} W^{*2}(i,j)}} \tag{16}$$

## 2.6 Computação Aproximada - AxC

A computação aproximada (AxC) tira proveito do fato que, em determinadas aplicações tolerantes a erros, a imprecisão pode ser aceitável, desde que ofereça um equilíbrio satisfatório entre a qualidade dos resultados e a eficiência computacional. (STRNADEL, 2022).

A AxC está presente em vários campos, incluindo aritmética computacional (representação de ponto flutuante), unidades aritméticas (somadores e multiplicadores), processamento digital de sinal (projeto de filtro), algoritmos (algoritmos de aproximação), redes (entrega de pacotes de melhor esforço) e em aprendizado de máquina (ML - *Machine Learning*) (HENKEL et al., 2022). Busca alcançar a maior eficiência de energia, menor área e/ou melhores desempenhos ao custo de um sistema com uma precisão de saída degradada, mas ainda aceitável (BOSIO et al., 2023).

A computação aproximada também pode introduzir vulnerabilidades de segurança, principalmente devido ao fato de que os erros intrínsecos, inseguros e imprevisíveis durante a execução aproximada são difíceis de distinguir de modificações maliciosas nos dados de entrada, no processo de execução e nos resultados. Se os sistemas AxC apresentarem vulnerabilidades de segurança, as aplicações que utilizam essas técnicas poderão ser inevitavelmente afetadas, tornando-as suscetíveis a ataques que podem explorar essas falhas para comprometer a integridade e a confiabilidade dos dados processados (ROSA, 2023). Vários estudos, alguns recentes, examinam as vulnerabilidades potenciais de segurança que podem afetar a integridade de sistemas aproximados, como nos trabalhos em (MISHRA et al., 2024), (DA ROSA et al., 2023), (LIU et al., 2020a), (YELLU; YU, 2020) e (KUNDI et al., 2020).

Além disso, as estratégias de segurança baseadas em circuitos aproximados não apenas fornecem o mesmo nível de segurança, mas também economizam recursos de hardware, comparadas às soluções de segurança tradicionais baseadas em circuitos exatos (ROSA, 2023).

Portanto, a computação aproximada representa uma mudança de paradigma em relação aos projetos tradicionais de sistemas, onde a precisão era priorizada acima de tudo. Assim, ao reconhecer que nem todas as aplicações requerem resultados exatos, a AxC abre novas possibilidades para criar sistemas mais eficientes, ou seja, mais sustentáveis tanto em hardware quanto a nível de software. Dessa forma, com o auxílio da aproximação, técnica de *pruning*, foi desenvolvido uma versão otimizada da transformada Wavelet Haar.

## 2.7 Metodologia para análise de dissipação de potência em circuitos CMOS

Nos últimos anos, a indústria de microeletrônicos e pesquisadores têm se preocupado em desenvolver soluções em hardware buscando o equilíbrio entre baixo consumo energético e alta capacidade de processamento de modo a produzir dispositivos de tamanho reduzido e a baixo custo. Esses desafios são todos motivados pelas demandas exponencialmente crescentes de dispositivos portáteis tais como *smartphones*, *laptops*, calculadoras inteligentes, relógio inteligente entre outros dispositivos de

eletrônica de consumo (MISHRA et al., 2020). Os projetistas de circuitos integrados não focam apenas em criar processadores mais poderosos, mas também em torná-los mais eficientes em termos de energia e menos sensíveis à temperatura. As tendências modernas incluem projetos *multicore* para aumentar o desempenho dos processadores, devido a dificuldade no aumento da frequência, sem aumentos significativos nos últimos anos (KOCANDA; KOS, 2015).

Diante do aumento da densidade de transistores em um chip e com o avanço da tecnologia CMOS (*Complementary Metal-Oxide-Semiconductor*), o consumo de energia ainda é uma das principais preocupações em projetos de circuitos digitais (KOCANDA; KOS, 2015). Assim como nos projetos de circuitos de integração em grande escala (VLSI - *Very Large Scale Integration*), o aumento dos dispositivos portáteis requer atenção na redução de dissipação de potência, visto que, a dissipação de potência em excesso nesses aparelhos portáteis pode inviabilizar o projeto ou diminuir a sua vida útil (ROSA, 2023).

Para mitigar o consumo de energia, várias técnicas podem ser implementadas em diferentes estágios de processo em um projeto, desde o nível arquitetural até a nível de sistema. Em circuitos CMOS convencionais, compostos por transistores PMOS (*P-channel Metal-Oxide-Semiconductor*) e NMOS (*N-channel Metal-Oxide-Semiconductor*) atuando como redes *pull-up* e *pull-down*, respectivamente, a energia é consumida durante a comutação. Metade dessa energia é dissipada na rede PMOS, enquanto a outra metade é descarregada e dissipada através da rede NMOS (OLANITE; MUSA, 2024).

A dissipação de potência em circuitos integrados é composta principalmente pela dissipação de potência estática, dissipação de potência de curto-circuito e a dissipação de potência dinâmica. Dessas, a potência dinâmica é especialmente dominante (embora nas tecnologias atuais a potência estática venha atingindo patamares elevados de dissipação). A potência dinâmica ocorre devido à comutação de sinais do nível lógico baixo para o nível lógico alto e vice-versa nos circuitos. Com a miniaturização dos circuitos integrados (ICs - *Integrated Circuits*) e o aumento da frequência das operações intensifica o impacto da dissipação da potência dinâmica (que é diretamente proporcional à frequência de operação) (PINDOO et al., 2015).

A Equação 17 representa a dissipação total de energia em circuitos CMOS. A equação expressa a soma da dissipação de potência dinâmica, que ocorre devido à carga e descarga de capacitâncias, a dissipação de potência de curto-circuito (*SC*), que ocorre devido à transição lenta de uma entrada de 0 para $V_{dd}$ ou de $V_{dd}$ para 0 volts, e a dissipação de potência estática, que ocorre devido a correntes de fuga (*leakage*).

$$P_{total} = \alpha C V_{\mathrm{dd}}^2 f_{\mathrm{clk}} + I_{SC} V_{\mathrm{dd}} + I_{lkg} V_{\mathrm{dd}} \tag{17}$$

### 2.7.1 Metodologia para a Avaliação de Síntese Lógica

A metodologia para a estimativa de potência utilizada nessa dissertação, leva em conta o processo de síntese utilizando a ferramenta da Cadence Genus™ no modo PLE (*Physical Layout Estimation*), que é executada para gerar o *netlist*, ou seja, a descrição do circuito em nível de portas lógicas e os arquivos de restrições de atraso SDF (*Standard Delay Format*) (Figura 9). A ferramenta Genus™ recebe o projeto descrito na linguagem VHDL (*Very High Speed Integrated Circuits Hardware Description Language*), as bibliotecas de células-padrão comercial *Standard* (ST) 65nm com tensão de alimentação de 1,25V, o arquivo de restrições de atraso (SDF), os arquivos Macro e Tech LEF (*Library Excahnge Format*), e o arquivo tabela de capacitâncias. Os valores de entrada são usados e armazenados em arquivos de texto. Após o processo de síntese pela ferramenta Genus, realiza-se o processo de verificação, com o objetivo de validar o correto funcionamento do circuito implementado. Para isso, é necessário gerar um *testbench*, uma descrição VHDL responsável por produzir os sinais de entrada no projeto a ser verificado, projeto sobre teste (do inglês, Design under Test - DUT) para que a ferramenta de simulação (*Cadence Xcelium*) produza os sinais de saída, ou seja, atividade de comutação do circuito DUT em um formato VCD (*Value Change Dump*) para que possam ser analisados e verificados.

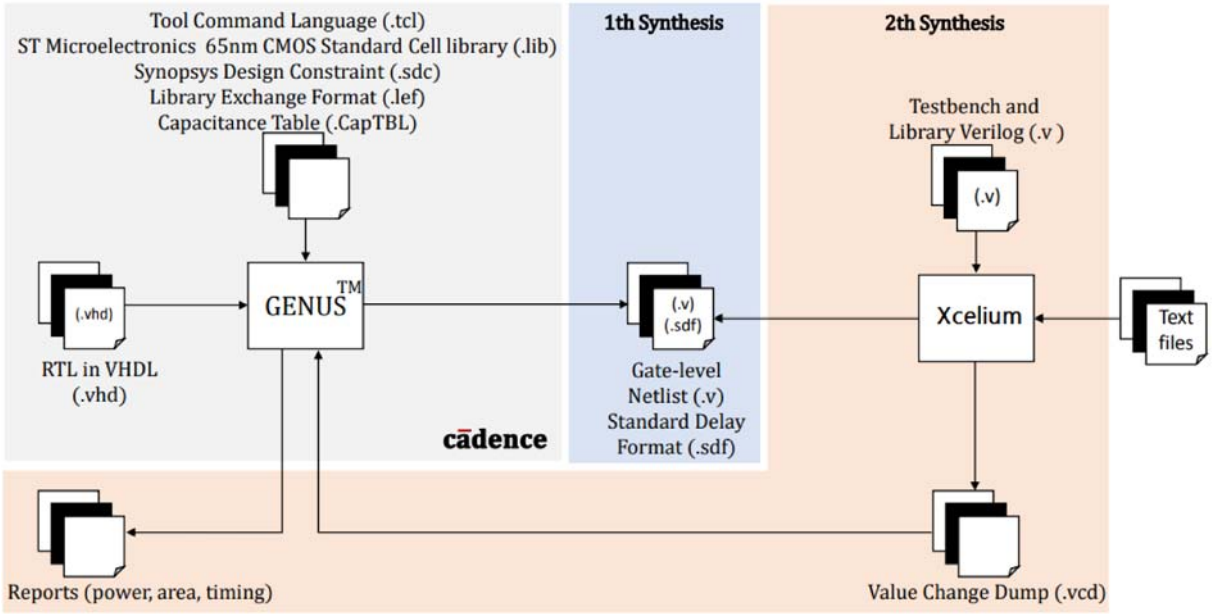

Figura 9 – Metodologia para a síntese lógica (ROSA, 2023)

Em um segundo momento, o arquivo VCD e o projeto DUT são sintetizados novamente pela ferramenta Genus para que possa gerar os relatórios de área, potência e atraso. Os valores para entrada usados pela ferramenta de simulação Xcelium são armazenados em arquivos de texto. Esses valores são fornecidos para a ferramenta de simulação que executa o *testbench* com os arquivos de projeto das arquiteturas. Nessa dissertação, usa-se como valores de entrada 106 imagens (Barbara,

boat, Lena, mandril, cameraman, and salt and pepper (GROUP, acessado em novembro de 2022) e mais 100 imagens de teste do banco de dados (KAGGLE, acessado em novembro 2022)), para aquisição de síntese lógica realística (com sinais de entradas de aplicações reais). Para as simulações de todas os *netlists*, usa-se o Cadence Xcelium, considerando o arquivo SDF para atrasos precisos na propagação do sinal e *glitches*. A simulação gera o arquivo *Toggle Count Format* (TCF), carregado nas ferramentas de síntese para extração de potência realista. A metodologia para estimativa de potência usa a ferramenta de síntese Genus no modo PLE para gerar as *netlists* no nível da portas lógicas e o formato SDF. Para produzir os resultados da dissipação de potência, usam-se as *netlists* pós-síntese usando vetores como estímulos de entrada pseudo-aleatórios ou reais dependendo da aplicação.

## 2.8 Resumo do Capítulo

Esta capítulo apresentou a fundamentação teórica da dissertação. Foram mostradas características e conceitos das imagens digitais, bem como os tipos de marcas d'água. Foram abordados aspectos das transformadas em imagens, caracterizando-se as transformadas da família Wavelet. Foram apresentados os tipos de atques usados nessa dissertação, bem como as métricas para a avaliação da qualidade dos resultados obtidos. Conceitos de computação aproximada e metodologia para análise de dissipação de potência em circuitos CMOS também foram apresentados nesse capítulo. O próximo capítulo apresenta a revisão bibliográfica da dissertação, fazendo uma análise de trabalhos da literatura, bem como o método de seleção dos trabalhos relacionados ao tópico de estudo proposto.

# 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta a revisão bibliográfica realizada neste trabalho em duas partes. Inicialmente, apresenta-se uma análise da literatura e a seguir, adicionalmente, um mapeamento sistemático sobre as transformadas utilizadas para manipulação com as marcas d'água nas imagens.

Na primeira parte, apresentam-se trabalhos que abordam os desafios relacionados às violações de direitos autorais, as técnicas empregadas para a proteção contra essas violações, as abordagens na utilização de marcas d'água, o uso de transformadas para a implementação de marcas d'água em imagens, estudos sobre a visibilidade e a robustez dessas implementações, e algumas técnicas para a implementação em hardware utilizando computação aproximada. Na segunda parte, realiza-se um mapeamento sistemático com o intuito de identificar e avaliar os trabalhos desenvolvidos que utilizam as transformadas para a implementação de marcas d'água em imagens, destacando quais seriam os mais adequados para a implementação ou aqueles que apresentam comparações mais abrangentes entre várias transformadas.

## 3.1 Análise da literatura

O crescente uso da Internet facilita cada vez mais a disseminação de informações, porém, também oferece desafios significativos relacionados à violação de direitos autorais. Esses desafios incluem questões como cópia não autorizada, discutida em (COX et al., 1997), distribuição ilícita, conforme destacado em (NIKOLAIDIS; PITAS, 1998; SONG; SONG; BAO, 2012), e modificações indevidas de obras digitalizadas, como evidenciado em (LI; KIM; LEE, 2015; SU et al., 2014).

Com o intuito de aprimorar a eficácia na utilização das informações disponíveis na rede, a proteção dos direitos autorais está assumindo uma importância cada vez maior (COX et al., 1997). Entre as técnicas de proteção amplamente adotadas, o método de marca d'água tem sido aplicado em diversos campos da multimídia de proteção de direitos autorais (COX et al., 1997; NIKOLAIDIS; PITAS, 1998; SONG; SONG; BAO, 2012; LI; KIM; LEE, 2015; SU et al., 2014).

Existe a possibilidade de utilização de marca d'água digital baseada em bit menos significativo (LSB) para a verificação de fatos e investigação de notícias falsas, (ALAA, 2021), onde explora-se esse método mais simples de implementar, porém ele não é robusto contra ataques de esteganálise. O trabalho em (MEGÍAS et al., 2021) aborda a disseminação de desinformação em mídia social e explora as técnicas de ocultação de informações, em particular, marca d'água digital, combinada com abordagens de aprendizado de máquina, propondo a implementação de ferramentas de marca d'água e de detecção. O trabalho proposto em Neekhara et al. (2022) desenvolve uma técnica de marca d'água semifrágil, baseada em aprendizado profundo que permite a autenticação através de uma mensagem secreta invisível incorporada nos *pixels* da imagem visando combater as *Deepfakes*.

No artigo em (TAJ; SARKAR, 2023), explora-se a marca d'água para autenticação biométrica de usuários utilizando as características únicas da íris. Isso gera possíveis aplicações em controle de acesso, transações seguras e gerenciamento de direitos digitais. Já em (SWATHI; KUMARI, 2017), propõe-se a combinação da marca d'água biométrica e da criptografia visual para fortalecer a segurança de sistemas de autenticação baseados em íris, utilizando uma marca d'água com a descrição das características da pessoa proprietária.

A utilização das transformadas em imagens tem sido muito difundida em diversas aplicações no processamento de imagens, tais como compressão, redução de ruído e, especialmente, em inserção de marcas d'água. No trabalho em (POTDAR; HAN; CHANG, 2005), explora a transformada Wavelet de Haar, pela sua simplicidade e eficiência computacional. O trabalho explora a sua aplicação em imagens digitais para proteção de direitos autorais em sistemas de marca d'água. Os autores em (SONG et al., 2018) analisaram através do processamento limiar dos coeficientes da Wavelet para a redução de ruído. Assim como em (SONIA; SUMATHI, 2022), que analisa a redução de ruídos em imagens cerebrais após a ressonância magnética. No campo da compressão de imagens, o trabalho em (KRISHNASWAMY; NIRMALADEVI, 2020) analisa a compressão eficiente de imagens médicas, assim como em (JRAD; OUESLATI; LACHIRI, 2019). A transformada Daubechie, conhecida por suas propriedades de compactação de energia, foi empregada em trabalhos como o de (SUBHEDAR; MANKAR, 2014), onde o artigo revisa as técnicas de esteganografia e de marca d'água, destacando o uso de transformadas Wavelet para melhorar a robustez contra ataques.

A marca d'água é uma técnica comum de ocultação de dados, visando garantir a proteção das informações confidenciais. É possível incorporar essas informações em imagens, vídeos e áudios, modificando os dados para que fiquem imperceptíveis. Contudo, a invisibilidade e a robustez são duas métricas fundamentais para avaliar a eficácia das técnicas de marca d'água Cox et al. (1997). Com base nessas duas

métricas, as técnicas de marca d'água podem ser amplamente classificadas em três grupos, ou seja, marca d'água robusta, frágil e semi-frágil Cox et al. (1997).

A marca d'água robusta desempenha um papel crucial na proteção dos dados da imagem, pois não compromete significativamente a qualidade visual da imagem e pode resistir a diversos ataques, pois não reduz significativamente a qualidade visual da imagem com marca d'água (NIKOLAIDIS; PITAS, 1998). Por isso, é amplamente utilizada para proteção de direitos autorais e verificação de propriedade. Já a marca d'água frágil é utilizada exclusivamente para garantir a integridade da imagem (NIKOLAIDIS; PITAS, 1998). Embora seja capaz de detectar qualquer modificação não autorizada, qualquer alteração na imagem com marca d'água compromete a integridade da marca. Por fim, a marca d'água semi-frágil combina as vantagens da marca d'água frágil e da marca d'água robusta, com o objetivo de detectar manipulações não autorizadas, mantendo a robustez em manipulações autorizadas (NIKOLAIDIS; PITAS, 1998).

No que diz respeito ao método de marca d'água robusta, a informação da marca d'água é frequentemente incorporada diretamente no domínio espacial, ou seja, os dados da marca d'água são inseridos na imagem hospedeira modificando os *pixels* espacialmente. Embora essa operação seja fácil de implementar, pois não há necessidade de transformações complexas para o domínio em frequência, não é suficientemente robusta contra os ataques geométricos e de processamento de imagens, pois já com ajustes de brilho ou de contraste podem comprometer a integridade da marca d'água (NIKOLAIDIS; PITAS, 1998).

Por outro lado, o processo de inserção também pode ser realizado no domínio da transformada, como, por exemplo, na transformada discreta do cosseno (DCT) (ERNAWAN; KABIR, 2018; SINGH et al., 2018; SINGH, 2017), na transformada discreta de Fourier (DFT) (TSUI; ZHANG; ANDROUTSOS, 2008), na transformada Wavelet discreta (DWT) (WANG; DOHERTY; VAN DYCK, 2002; ROSA et al., 2022), e na decomposição de valor singular (SVD) (THAKUR; SINGH; GHRERA, 2021). Além disso, relata-se que, os métodos de marca d'água baseados em DWT têm as vantagens de multi-resolução, boa compressão e qualidade visual (WANG; DOHERTY; VAN DYCK, 2002; ROSA et al., 2022), portanto, podem ser usados para marca d'água de imagem. Pesquisas demonstram que a visão humana é mais sensível aos coeficientes de baixa e média frequência (COX et al., 1997).

Para garantir a robustez dos algoritmos de inserção, a análise no domínio da frequência é utilizada para descobrir as possíveis localizações dos coeficientes para a inserção da marca d'água (AGARWAL; SINGH; SINGH, 2019). Para um bom desempenho dos métodos no domínio transformado, pode ser alcançado principalmente quando as marcas d'água estão inseridas nas faixas de baixa frequência (COX et al., 1997).

O trabalho em (CANCELLARO et al., 2011) apresenta uma marca d'água comutativa e um esquema de criptografia para imagens digitais. A propriedade comutativa do método proposto permite a criptografia de uma imagem com marca d'água sem interferir no sinal embutido ou marcar uma imagem criptografada, garantindo assim a descriptografia ideal. Um domínio de transformação Haar executa ambas as operações. A utilização da Wavelet Haar para criptografar imagens e a transformada inversa Haar para descriptografar as imagens são apresentadas em (PARTHASARATHY; SRINIVASAN, 2015).

Uma ideia de marca d'água é proposta e implementada em (RAHMAN, 2013). No método de marca d'água proposto, a imagem original é reorganizada usando a sequência em ziguezague e a DWT é aplicada na imagem reorganizada. Em seguida, DCT e SVD são aplicadas em todas as bandas altas LH, HL e HH. A marca d'água é então incorporada modificando os valores singulares dessas bandas. O trabalho proposto em (SINGH; DAVE; MOHAN, 2016) utilizou uma técnica híbrida composta por três transformadas DWT, DCT e SVD. Foram usadas imagens e caracteres de texto como marca d'água e inseridos em imagens hospedeiras da área médica. O trabalho em (FAZLI; MOEINI, 2016) também desenvolveu um sistema de marcas d'água híbrido à base das transformadas DWT, DCT e SVD. Já o trabalho em (BAGHERI BABA AHMADI et al., 2021) explorou um método de marca d'água baseado em DWT, SVD, *Human Visual System* (HVS) e *Particle Swarm Optimization* (PSO).

O trabalho apresentado em (HAJJAJI et al., 2019) propõe uma implementação em hardware de um sistema de marca d'água baseado na transformada Haar DWT. Com o objetivo de desenvolver um sistema de marca d'água que garanta alto desempenho em termos de eficiência de hardware, com alta imperceptibilidade (PSNR - *Peak Signal-to-Noise Ratio*) e robustez (Normalized Cross-Correlation, NC). Em (JANA et al., 2021), propõe-se uma arquitetura VLSI para 2D DWT e IDWT para reduzir os recursos de hardware. As arquiteturas propostas foram comparadas com arquiteturas existentes relacionadas, com resultados satisfatórios.

Os pesquisadores em (SEENIVASAGAM; VELUMANI, 2013) apresentaram uma técnica de marca d'água robusta e imperceptível. Usaram o código *Quick Response* (QR) como marca d'água, que foi codificado por meio da transformação de Arnold antes da etapa de inserção. A técnica explorou a transformada de contorno (CLT) no domínio SVD sem qualquer incorporação. Nesta técnica, a imagem hospedeira não foi atacada porque a marca d'água foi utilizada para implementar a informação oculta no sinal hospedeiro. Para verificar a imperceptibilidade da imagem com marca d'água, utilizou-se a métrica de similaridade estrutural (SSIM). As métricas *Bit Error Ratio* (BER) e Correlação Normalizada (NC) foram utilizadas para verificar a robustez da técnica proposta.

O estudo em (THABIT; KHOO, 2017) apresenta uma técnica que aborda as ques-

tões de robustez da autenticação do esquema de marca d'água contra ataques legítimos e ilegítimos. A técnica explorou a Decomposição de Valor Singular (SVD - *Singular Value Decomposition*) para inserir a marca d'água na imagem hospedeira. Na extremidade receptora, a transformada Wavelet discreta (DWT) foi empregada para extrair as informações ocultas. Os resultados das simulações demonstraram que o esquema proposto é capaz de resistir a ataques legítimos, tais como compressão JPEG, adição de ruído gaussiano e ruído sal e pimenta.

Além disso, a literatura tem explorado a computação aproximada concomitantemente no processamento das marcas d'água. A computação aproximada surgiu como um novo paradigma para aumentar a economia de energia das arquiteturas, aproveitando a resiliência a falhas inerente de muitas aplicações (VENKATARAMANI et al., 2015; PASHAEIFAR et al., 2019; HAN; ORSHANSKY, 2013). Ela apresenta a exatidão (ou seja, qualidade ou acurácia) como uma nova dimensão explícita para negociação na otimização de projeto (HAN; ORSHANSKY, 2013; MITTAL, 2016; STANLEY-MARBELL et al., 2020), que pode reduzir significativamente a área do circuito VLSI e seu consumo de energia.

O trabalho proposto em (PAIM et al., 2019), apresenta vários aplicativos resilientes a erros e computacionalmente intensivos, exigindo muitas unidades somadoras no caminho de dados de seus aceleradores de hardware, tendo-se um apelo forte para o uso de circuitos somadores aproximados.

O uso de somadores aproximados está no escopo dos sistemas baseados em ocultação de marcas d'água. Nesses sistemas, as unidades somadoras são blocos de construção intrínsecos aos sistemas de ocultação de marca d'água responsáveis por boa parte do consumo energético do projeto, principalmente nas transformadas (SILVEIRA et al., 2017). Outros trabalhos também propuseram arquiteturas para somadores aproximados, tais como (MAHDIANI et al., 2010; ZHU et al., 2010; GUPTA, 2013; LEE et al., 2021; TSAI et al., 2021; NING ZHU; GOH; YEO, 2009; VERMA; BRISK; IENNE, 2008; SOARES et al., 2019).

Essa análise da literatura, com o uso da computação aproximada, evidenciou a crescente preocupação com a proteção dos direitos autorais em um ambiente digital cada vez mais propício a violações, como cópias não autorizadas e as manipulações indevidas. Diversos estudos exploraram a eficácia das técnicas de marca d'água, especialmente baseadas em transformadas Wavelet, como uma solução robusta para a inserção de informações de forma imperceptível nas imagens. A aplicação de métodos combinados, como transformadas e aprendizado de máquina, mostra-se promissora a ataques mais sofisticados como os *Deepfakes*. Além disso, a computação aproximada surge como uma alternativa eficiente para reduzir o consumo energético em processos de marca d'água, sem comprometer a integridade das informações. Esses avanços tecnológicos evidenciam a importância da contínua pesquisa nessa área para

enfrentar esses desafios na proteção de dados em um cenário de rápida evolução.

## 3.2 Mapeamento Sistemático da Literatura

O mapeamento sistemático da literatura, ou revisão de escopo (*scoping review*), é utilizado quando não é necessário responder com profundidade questões específicas, como na revisão sistemática, mas sim uma visão geral mais ampla de determinada área (DERMEVAL; COELHO; BITTENCOURT, 2020).

### 3.2.1 Transformadas matemáticas para manipulação de marcas d'águas em imagens digitais

Visando também mapear trabalhos desenvolvidos na área de transformadas matemáticas para manipulação de marcas d'águas em imagens digitais, foi desenvolvido um projeto na disciplina "Metodologia para Pesquisa e Desenvolvimento em Computação", com o objetivo de realizar um mapeamento sistemático da literatura, buscado identificar quais as melhores técnicas matemáticas para implementação de marcas d'água em imagens digitais. A pesquisa, com a colaboração dos colegas Henrique Seidel e Rafael Cardoso, examinou artigos que trouxessem comparações entre as diferentes transformadas matemáticas e que avaliassem, preferencialmente, a questão da eficiência energética nas suas implementações em hardware.

Para isso, foi conduzida uma pesquisa através dos repositórios da *IEEE Xplore* [1] e da *ACM Digital Library* [2]. Com a utilização da plataforma *Parsifal* [3] foram elaborados critérios de seleção e avaliação dos artigos relevantes à área de pesquisa. Desta forma, a partir da sistematização de um protocolo, foi possível elencar trabalhos que obtiveram maior destaque, que foram os seguintes artigos: *"Comparison of digital watermarking techniques"* e *"Comparison of different wavelets for watermarking of colored images"*.

### 3.2.2 Procedimentos para mapeamento sistemático da literatura

O objetivo desta seção é apresentar os procedimentos utilizados para a realização deste mapeamento sistemático da literatura (MSL). Neste mapeamento são detalhados aspectos que vão desde a fase de planejamento, como definição de questões de pesquisa, critérios de inclusão e exclusão, até a fase de seleção dos artigos. Como ferramenta de apoio para execução do protocolo utilizou-se o software online *Parsifal*.

[1] http://ieeexplore.ieee.org/
[2] http://dl.acm.org/
[3] https://parsif.al/

### 3.2.3 Planejamento

O objetivo da pesquisa buscou explorar artigos que possuam comparações ou análises que indiquem as melhores transformadas matemáticas para a implementação de marcas d'água em imagens digitais e que geram como consequência a eficiência energética em uma implementação de hardware. Desta forma as questões que orientam e motivam este estudo são:

- Que técnicas ou transformada matemáticas avaliam o desempenho na inserção de marcas d'água em imagens digitais?
- Quais métricas são empregadas para avaliar a eficiência de cada técnica?
- Os artigos propõem implementações em hardware para as técnicas descritas?
- Os trabalhos apresentam resultados relacionados ao consumo energético?
- Há comparações dos resultados obtidos com o estado da arte?

Ao responder a essas questões, espera-se reunir evidências para auxiliar na escolha da técnica matemática mais robusta na inserção de marcas d'água em imagens digitais.

A partir da definição das questões de pesquisa, foram escolhidas as palavras chave, empregadas para realizar consultas nas bases de dados cientificas. Esta pesquisa é estruturada de modo a atingir o maior número de artigos relevantes possíveis (ALMEIDA et al., 2015). Por isso, este processo acontece de forma interativa, com vários momentos de experimentação. Então, com base no objetivo estabelecido, nas questões de pesquisa já definidas, além de alguns testes primários realizados em algumas bases de dados, obteve-se uma combinação *booleana* de palavras-chave conforme apresentado na Tabela 1:

Tabela 1 – String de Busca de Palavras Chave

| **String de Busca** |
|---|
| (transform) AND (watermark) AND (image) AND (energy OR area savings) AND (comparison) |

Depois da definição da string de busca, foi necessário selecionar quais bases de dados a serem utilizadas para identificar artigos relevantes. Nesta MSL foram escolhidas *IEEE Xplore* e *ACM Digital*. A primeira concentra os trabalhos mais relevantes na área de Microeletrônica e a segunda, durante as avaliações preliminares, encontrou uma quantidade significativa de trabalhos sobre o tema. Importante ressaltar que, por tratar-se de um estudo preliminar, outras bases de dados poderão ser adicionadas a essa pesquisa em uma futura atualização.

Em seguida foram escolhidos os critérios de inclusão e exclusão. Estes critérios serviram para realizar a seleção dos estudos nas bases de dados pesquisadas. Assim, para que os artigos fossem incluídos neste MSL satisfizeram aos seguintes critérios:

1. Comparações entre transformadas matemáticas para inserção de marcas d'água em imagens digitais.
2. Utilização de transformadas matemáticas para inserção de marcas d'água em imagens digitais.
3. Data de publicação a partir de 2000.

Para a exclusão dos artigos no processo de seleção, adotaram-se os critérios:

1. Utilização de transformadas matemáticas para inserção de marcas d'água em vídeo.
2. Outra forma de aplicação em imagens digitais.
3. Não relacionados ao tema.
4. Artigos idênticos.
5. Teses, relatórios, dissertações e capítulos de livros.

Finalmente, o último passo da etapa de planejamento foi a elaboração das questões de qualidade. Após a seleção dos artigos, as respostas a essas perguntas foram utilizadas para estruturar um *ranking* com os melhores artigos relacionados ao tema da pesquisa. Importante ressaltar que, para execução desta etapa, foi necessário ler os artigos classificados na integra. A Tabela 2 apresenta estas questões, com o valor correspondente de cada uma das possíveis respostas.

Tabela 2 – Questões de Qualidade

| **Questões de Qualidade** | |
|---|---|
| Identifica o melhor método para a inserção da marca d'água? (1) | Sim (1,0); Parcialmente (0,5); Não (0,0) |
| Há resultados comparativos entre pelo menos duas transformadas matemáticas utilizadas na inserção de marcas d'água? (2) | Sim (1,0); Parcialmente (0,5); Não (0,0) |
| O estudo apresenta implementações de hardware das transformadas matemáticas? (3) | Sim (1,0); Parcialmente (0,5); Não (0,0) |
| Há uma preocupação com o consumo energético ?(4) | Sim (1,0); Parcialmente (0,5); Não (0,0) |

### 3.2.4 Execução do MSL

Esta seção apresenta os resultados obtidos neste MSL desenvolvido durante o período do mestrado.

Pode-se dividir a seleção dos artigos em três etapas. Na primeira, através da *string* de busca, foram selecionados todos os artigos que continham os termos de busca definidos na fase de planejamento. Importante destacar que, neste estágio, não há necessidade de qualquer análise ou leitura dos artigos selecionados. Através dos motores de busca das duas bases de dados previamente escolhidas para este estudo, foram encontrados um total de 99 artigos que estavam de acordo com os termos de busca definidos. A Figura 10 apresenta o resultado percentual do total de artigos encontrados para cada base de dados.

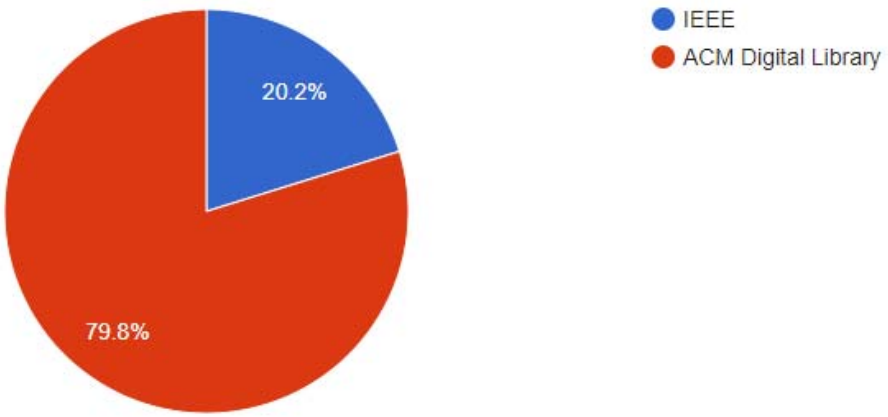


Figura 10 – Artigos Selecionados nas Bases de Dados

Os artigos escolhidos foram importados para a ferramenta *Parsifal* para, posteriormente, ser realizada a leitura dos resumos de cada um deles. Assim, através dos critérios de inclusão e de exclusão, foi possível determinar quais dos trabalhos eram relevantes para esta pesquisa. Importante destacar que alguns resumos não forneciam informações suficientes para determinar uma inclusão/exclusão dos artigos. Nestes casos foi necessário realizar uma leitura superficial dos trabalhos para classificação. Então ao final desta etapa de classificação, restaram 11 trabalhos selecionados. A Figura 11 apresenta este resultado levando em consideração as duas bases de dados utilizadas. Percebe-se que mesmo com uma quantidade muito maior de artigos, a ACM Digital teve somente um trabalho selecionado.

Após a aplicação dos critérios de inclusão/exclusão, foi executada a leitura na íntegra dos 11 artigos aceitos. Ao final desta análise, que levou em consideração as questões de qualidade pré definidas, foi possível elaborar um *ranking* que classificou

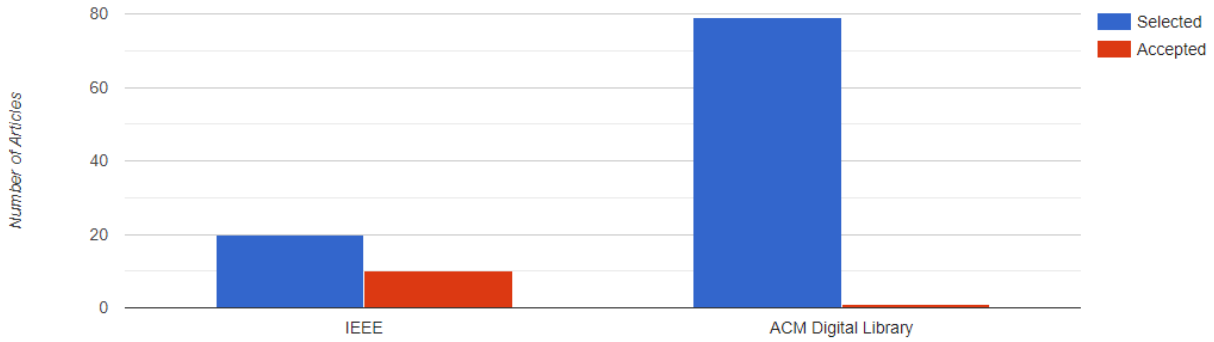


Figura 11 – Artigos Aceitos Para Estudos no Escopo do Trabalho

os trabalhos mais relevantes para este MSL. A Tabela 3 mostra esta pontuação bem como o *score* obtido para cada uma das questões de qualidade.

Tabela 3 – Artigos Selecionados para Estudos e Comparações de Resultados

| **Artigos** | **Score** | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | (1) | (2) | (3) | (4) | **Total** |
| (APARNA; AYYAPPAN, 2014) | 1,0 | 1,0 | 0,0 | 0,0 | **2,0** |
| (SINGHAL; SINGH; TENGURIA, 2011) | 1,0 | 0,5 | 0,0 | 0,0 | **1,5** |
| (NOUIOUA; SEDDIKI; GHAZ, 2022) | 0,5 | 0,5 | 0,0 | 0,0 | **1,0** |
| (ZHU; LIU, 2009) | 0,5 | 0,5 | 0,0 | 0,0 | **1,0** |
| (TASKOVSKI; BOGDANOVA; BOGDANOV, 2001) | 0,5 | 0,5 | 0,0 | 0,0 | **1,0** |
| (TSAI; LIN; LIU, 2008) | 0,5 | 0,5 | 0,0 | 0,0 | **1,0** |
| (DEHGHANI; HAJIZADEH; HELFROUSH, 2010) | 0,5 | 0,5 | 0,0 | 0,0 | **1,0** |
| (BARNI; BARTOLINI; PIVA, 2001) | 0,5 | 0,5 | 0,0 | 0,0 | **1,0** |
| (DUAN; HO; ZHAO, 2008) | 0,5 | 0,5 | 0,0 | 0,0 | **1,0** |
| (CHOTIKAWANID; AMORNRAKSA, 2019) | 0,5 | 0,5 | 0,0 | 0,0 | **1,0** |
| (NAWRIN; SAHA, 2019) | 0,5 | 0,5 | 0,0 | 0,0 | **1,0** |

### 3.2.5 Discussões

Diante dos critérios propostos no mapeamento, foram selecionados os dois artigos *"Comparison of Digital Watermarking Techniques"* (APARNA; AYYAPPAN, 2014) e *"Comparison Of Diferent Wavelets For Watermarking Of Colored Images"* (SINGHAL; SINGH; TENGURIA, 2011). Os demais artigos não foram considerados relevantes para explanação devido a não conterem a realização de estudos mais abrangentes sobre a utilização de múltiplas transformadas na inserção da marca d'água em imagens.

O trabalho em Aparna; Ayyappan (2014) realiza uma análise comparativa entre diferentes técnicas de marca d'água. As técnicas usam a transformada Wavelet discreta (DWT) e a transformada discreta do cosseno (DCT), além de uma combinação

das duas transformadas. Para a inserção da marca d'água é utilizada a Decomposição de Valor Singular (SVD). Nas figuras 12 e 13, apresentam os processos de inserção e de extração propostos por Aparna; Ayyappan (2014).

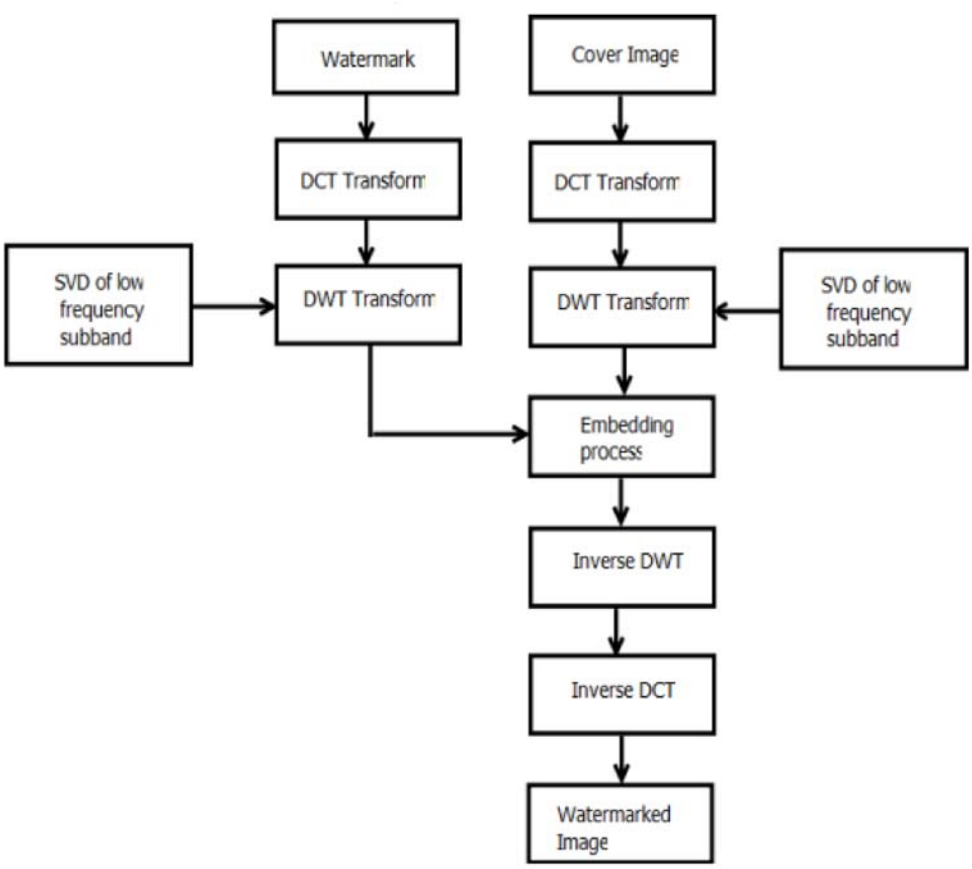


Figura 12 – Processo de Inserção da Marca D'Água (APARNA; AYYAPPAN, 2014)

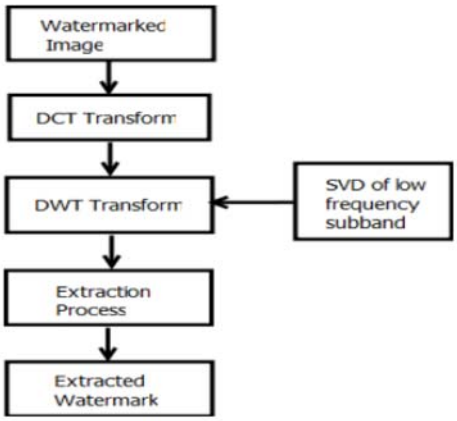


Figura 13 – Processo de Extração da Marca D'Água (APARNA; AYYAPPAN, 2014)

Por fim, aplicam-se diferentes ataques na imagem com marca d'água para analisar a robustez do processo, como o de rotação, de escala, de cisalhamento e o ruído. Assim, são gerados os resultados apresentados na Tabela 4. Com a utilização das imagens da Figura 14.

Tabela 4 – NC (dB) (APARNA; AYYAPPAN, 2014)

| Attacks | DCT | DWT | DCT+DWT |
|---|---|---|---|
| Rotation | 0.9606 | 0.9617 | 0.9458 |
| Scaling | 0.8582 | 0.8915 | 0.9809 |
| Shearing | 0.2759 | 0.9196 | 0.5203 |
| Noise | -0.4437 | -0.4232 | 0.2523 |

Figura 14 – Imagem Hospedeira e Marca D'água (APARNA; AYYAPPAN, 2014)

Segundo (APARNA; AYYAPPAN, 2014), os resultados experimentais mostraram que o método DWT+DCT é mais robusto para a utilização de marca d'água, pois pode suportar diferentes ataques em comparação às individuais. Segundo o autor, isso foi analisado calculando e comparando os valores PSNR e NC da marca d'água extraída sendo mais robusto contra ataques de cisalhamento, embora seja mais afetado pelo ataque de ruído, conforme a Tabela 4.

O segundo artigo, *"Comparison Of Diferent Wavelets For Watermarking Of Colored Images"* apresentou um estudo comparativo de várias técnicas de Wavelet para marcas d'água, como: Daubechies, Symlets, Coiflets, Meyer, Biortogonal e Biortogonal Reversa. O trabalho apresenta resultados em termos de qualidade de imagem com marca d'água, qualidade da marca d'água extraída e sua compactação em JPEG 2000. Foi proposto um algoritmo baseado na transformada Wavelet discreta para a imagem e a transformada do cosseno discreta para a marca d'água. O estudo fornece a escolha da Wavelet ideal para marca d'água de imagem após a comparação entre diferentes famílias de Wavelets, usando PSNR, NC e Q (Índice Universal de Qualidade de Imagem). Com os processos de inserção e de extração propostos por Singhal; Singh; Tenguria (2011), conforme as Figuras 15 e 16, respectivamente. As Wavelets Biortonogais apresentaram melhor qualidade de imagem de marca d'água e a Meyer fornece o número máximo de inserções com qualidade baixa de marca d'água

extraída.

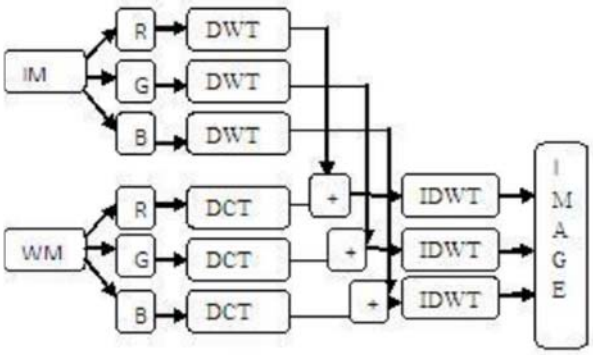


Figura 15 – Inserção da Marca D'água (SINGHAL; SINGH; TENGURIA, 2011)

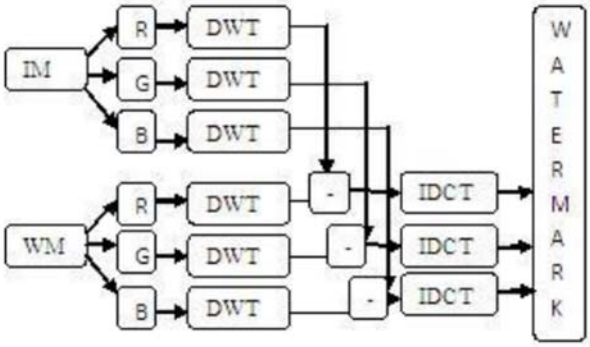


Figura 16 – Extração da Marca D'água (SINGHAL; SINGH; TENGURIA, 2011)

### 3.2.6 Considerações Finais

Neste trabalho, foi realizado um mapeamento sistemático da literatura com o objetivo de identificar as melhores técnicas matemáticas para implementação de marcas d'água em imagens digitais. Foram examinados 99 artigos, dos quais 11 foram qualificados. Destes, 2 foram considerados relevantes e sendo resumidamente suas contribuições apresentadas. Entretanto, somente o *"Comparison of Digital Watermarking Techniques"* se aproximou do objetivo da pesquisa, que mostrou mais comparações entre transformadas ou técnicas de aplicações com marcas d'água. Dessa forma, através desta pesquisa foi possível identificar a ausência de artigos que apresentassem uma indicação da melhor transformada dentre as mais utilizadas atualmente. Esta conclusão indicou uma possibilidade promissora de exploração nessa área. Além disso, não foram obtidos artigos que avaliassem simultaneamente a questão da eficiência energética nas suas implementações em hardware.

## 3.3 Resumo do Capítulo

Este capítulo apresentou a revisão bibliográfica, trazendo os trabalhos mais relevantes da literatura no tema de uso de transformadas para a implementação de marcas

d'água em imagens. Foram apresentados trabalhos que utilizam diferentes transformadas em marcas d'água robustas, frágeis e semi-frágeis. Também, foram apresentados trabalhos que propõem a implementação de transformadas em hardware para o sistema de marca d'água. Trabalhos que exploram a computação aproximada em seus projetos também foram apresentados. Após, apresentou-se um mapeamento sistemático da literatura, mostrando-se os procedimentos para a seleção dos artigos mais adequados para estudos, norteados por questões de pesquisa direcionadas ao tópico de pesquisa de transformadas para sistemas de marcas d'água. O capítulo a seguir apresenta a análise das transformadas Wavelet no sistema de marca d'água, com ênfase nos processos de inserção e extração das marcas d'água e discussão de resultados.

# 4 ANÁLISE DAS TRANSFORMADAS WAVELET

Com base na revisão sistemática da literatura, torna-se possível afirmar que não há um estudo que indique qual a melhor das Transformadas Wavelet, ou a mais adequada, para o sistema de inserção e de extração de marcas d'água, o que motiva o desenvolvimento deste trabalho de dissertação.

A família de transformadas Wavelet oferece algumas opções, dentre elas, são escolhidas para análise as transformadas *Haar, Daubechies, Coiflet, Symlet, Biortogonal e Biortogonal Reversa*. Estas transformadas são inicialmente simuladas no software Matlab para avaliar o desempenho no processo de inserção e extração de marcas d'água. Também, após ataques de ruído gaussiano aditivo, compressão JPEG, filtro mediano e sal pimenta, foram realizadas as análises das medidas quantitativas das diferenças entre as imagens resultantes, com o uso de métricas apropriadas como, ou seja, SSIM, MSE e NC. Dessa forma, obtêm-se assim, resultados entre as imagens originais e marcadas, como também entre a marca d'água e a marca d'água extraída.

Este capítulo apresenta o desenvolvimento de um sistema de marca d'água digital de imagens com base nas transformadas Wavelet citadas. Adicionalmente, a arquitetura de hardware dedicada ao sistema de marca d'água tem a sua transformada otimizada com o uso da computação aproximada, principalmente aplicada nas operações aritméticas de multiplicação e de soma. Objetivou-se a inserção e a extração da marca d'água com a menor quantidade de erros e de forma invisível sobre as imagens, atentando-se sobre a maior complexidade das transformadas empregadas no processamento das imagens. Os resultados foram obtidos através da simulação e da co-simulação com os programas Simulink/Matlab e QuestaSim/Siemens, além do Quartus-II/Intel, visando-se assim, apresentar a viabilidade de implementação da marca d'água sobre imagens com menores erros e consumo energético satisfatório.

## 4.1 Inserção e Extração das Marcas D'Água

O trabalho foi conduzido com o auxílio de funções implementadas no software Matlab. Inicialmente, realizaram-se testes de inserção e de extração da marca d'água

em uma imagem padrão, a *"Lenna"*, com resolução de 256x256 *pixels*, junto com uma marca d'água contendo a letra 'T' sobre um fundo branco, com dimensões de 128x128 *pixels*. As imagens utilizadas estão ilustradas na Figura 17, assim como a imagem marcada (com marca d'água) e a marca d'água extraída. Após a obtenção de resultados satisfatórios de NC $\geq 0.7$ e invisibilidade da marca d'água, avançou-se para a exploração de 100 imagens hospedeiras de 256x256 *pixels* e 100 marcas d'águas de 128x128 *pixels* para avaliar o desempenho e a robustez do processo de marca d'água.

Figura 17 – Inserção e Extração de Marca D'Água

Basicamente, a transformada Wavelet bidimensional decompõe a imagem em linhas e em colunas, resultando em uma sub-banda de baixa frequência (LL) e duas sub-bandas de média frequência (HL e LH) e uma sub-banda de alta frequência (HH), que representam respectivamente os coeficientes de aproximação e os coeficientes de detalhes horizontais, verticais e diagonais. A escolha da inserção da marca d'água foi na saída de coeficientes de detalhes horizontais, LH.

Utilizando uma imagem hospedeira, por exemplo, a imagem da *Lenna*, aplica-se a transformada *Wavelet* bidimensional de segundo nível. Dessa forma, como ilustrado no fluxograma da Figura 18, são gerados todos coeficientes de detalhes e de aproximação. Escolhida a sub-banda de média frequência, adiciona-se a marca d'água.

Nesse momento, existe a possibilidade de adicionar uma chave de segurança. Para todas as simulações foi utilizada uma simples chave de segurança de valor constante

e inteira. Ela tem a função de proteger a integridade e a autenticidade das informações inseridas na imagem, garantindo que apenas pessoas autorizadas possam acessá-la ou detectá-la corretamente.

No próximo passo, realiza-se a transformada inversa para obter a imagem com a marca d'água.

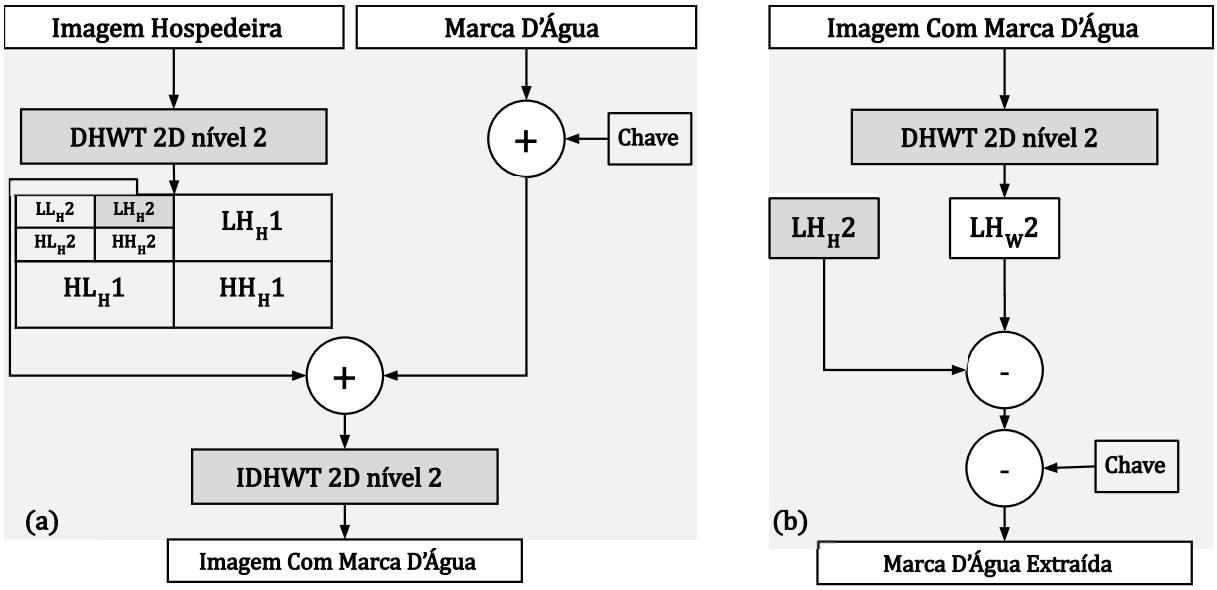


Figura 18 – Processos de Inserção e Extração da Marca D'Água

Para extrair a marca d'água, aplica-se novamente a transformada Wavelet bidimensional de segundo nível. Subtrai-se o coeficiente específico, $LH_W$, da sub-banda da transformação anterior $LH_H$. Dessa forma, obtém-se a extração da marca d'água. Para preservar a qualidade das imagens extraídas, aplicou-se uma atenuação na marca d'água antes da inserção, com um nível de atenuação definido em 0,5.

A fim de avaliar a qualidade da extração, comparou-se a marca d'água extraída com a marca d'água original. Essa comparação levou em consideração as métricas de qualidade SSIM, MSE e NC. Essas métricas foram empregadas para analisar a precisão do processo de extração após a execução de ataques, a fim de verificar a capacidade do sistema de manter a marca d'água sob essas condições. Por exemplo, na Figura 19, houve uma ataque de ruído gaussiano à imagem com a marca d'água. Diante disso, ainda não é possível identificar com clareza a marca d'água inserida. Consequentemente, a extração da marca d'água está contaminada pelo ruído após o ataque.

### 4.1.1 Resultados e Discussão

Os resultados obtidos estão diretamente associados ao objetivo do estudo, ou seja, na identificação da melhor transformada da família da transformada Wavelets bidimensionais ortogonais e discretas, ou seja, Haar, Daubechies, Coiflet, Symlet, Biortogonal

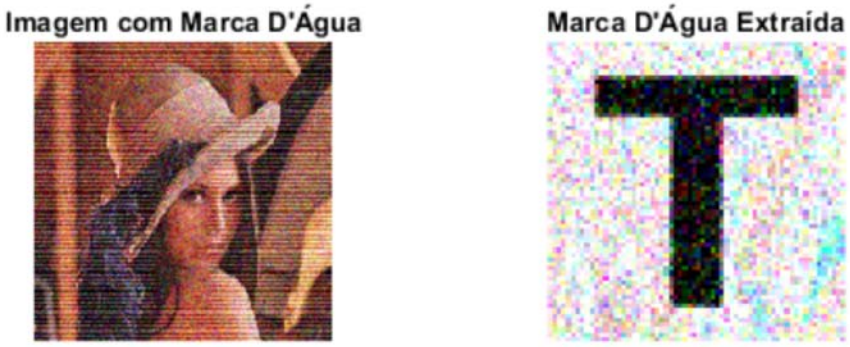


Figura 19 – Ataque de Ruído Gaussiano Aditivo

e Biortogonal Reversa. No experimento são simuladas as 100 imagens hospedeiras concatenadas na vertical, tornado-se uma imagem de 256x25600, para cada uma das transformadas, bem como as inserções e as extrações da marca d'água concatenada verticalmente de 100 imagens. Também, há a realização de ataques de ruído gaussiano aditivo, compressão JPEG, filtro mediano e sal e pimenta.

As Figuras 20 e 21 apresentam os resultados das simulações para cada uma das transformadas sob os ataques mencionados, além das métricas de qualidade. Cabe ressaltar que todas as transformadas foram decompostas até o segundo nível. Em relação aos parâmetros, foram definidas intensidades de ruído para cada ataque na faixa de: 0.01 a 0.09 para o ruído gaussiano aditivo; 10 a 90 para compressão JPEG; [1 $\times$ 1] a [9 $\times$ 9] do tamanho da máscara para filtro mediano; e de 0.01 a 0.09 de densidade de ruído sal e pimenta. Estes intervalos são também os mais utilizados na literatura para os respectivos ataques.

Nos ataques de compressão JPEG (Figura 20 (B)), filtro mediano (Figura 21 (C)) e sal e pimenta (Figura 21 (D)), as transformadas Haar, Daubechie, Coiflet e Symlet têm valor de NC superior ao valor aceitável. No entanto, a Transformada Wavelet Haar se destaca pela resiliência ao ataque gaussiano aditivo (Figura 20 (A)), onde as transformadas Daubechie, Coiflet and Symlet não são adequadas para o sistema de marca d'água, pois tem valor de NC inferiores a 0.7, diante dos parâmetros que variam de 0.02 a 0.09. Assim como, conforme o esperado, diante do aumento da intensidade dos ruídos, maior é a degradação das imagens e pior são os resultados obtidos.

Para exemplificar, a Figura 22 (A) apresenta simulações do ataque ruído gaussiano aditivo, utilizando a Transformada Haar, com a comparação entre a marca d'água original e a marca d'água extraída. As simulações apresentaram os seguintes resultados, com parâmetro em 0.01: SSIM de 0.1135; MSE de 5371.3337; e o NC de 0.8006. Já em relação ao parâmetro em 0.09: SSIM de 0.1136; MSE de 4908.6665; e o NC de 0.8116. O valor de NC aceitável é o valor $\geq 0.7$,na relação entre a marca d'água original e a extraída, de acordo com a literatura (GAFSI et al., 2022).

Na Figura 21 (C), no ataque de filtro mediano, as diferenças mais acentuadas ob-

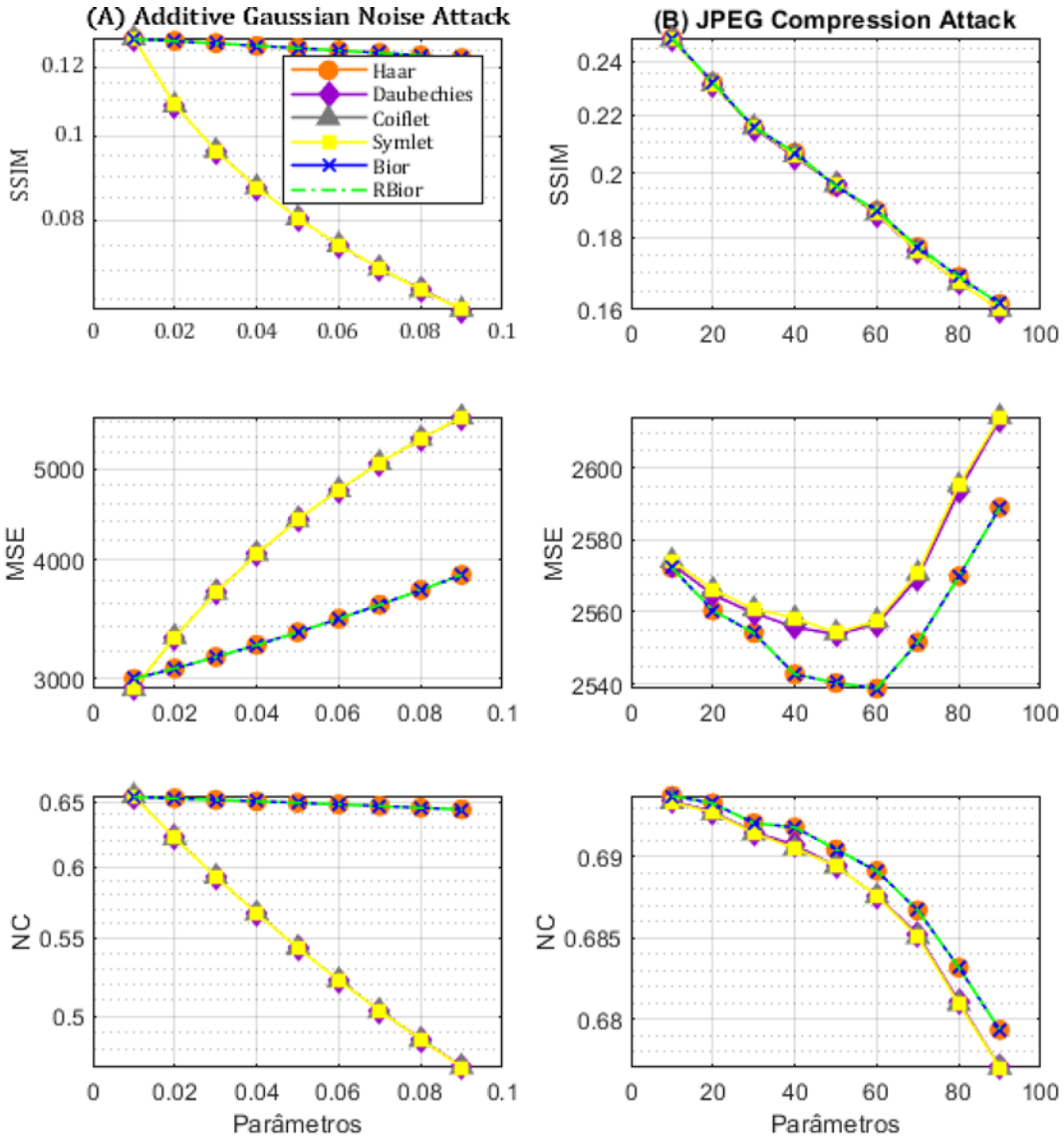


Figura 20 – Resultados entre Imagens com e sem Marca D'Água para diferentes níveis de ruído. Parâmetros: (A) 0.01 a 0.09 e (B) 10 a 90.

servadas entre intensidades pares e ímpares do filtro após o ataque estão relacionadas ao modo como o filtro mediano processa a imagem. Os tamanhos ímpares geralmente resultam em uma preservação mais estável dos detalhes das imagens, enquanto os tamanhos pares podem gerar distorções adicionais devido à necessidade da média entre dois valores de *pixels* centrais. Da mesma forma, acontece na Figura 23 (C).

Dessa forma, neste trabalho foram explorados com sucesso os modos de inserção e de extração das marcas d'água em imagens, utilizando as seis transformadas da família da transformada Wavelet. As Figuras 20 e 21 apresentam resultados entre as imagens com e sem marca d'água, e as Figuras 22 e 23, referentes aos resultados entre marcas d'água inseridas e extraídas. Os resultados mostram a eficácia dos métodos sob os ataques de degradação de imagem, como: ruído gaussiano,

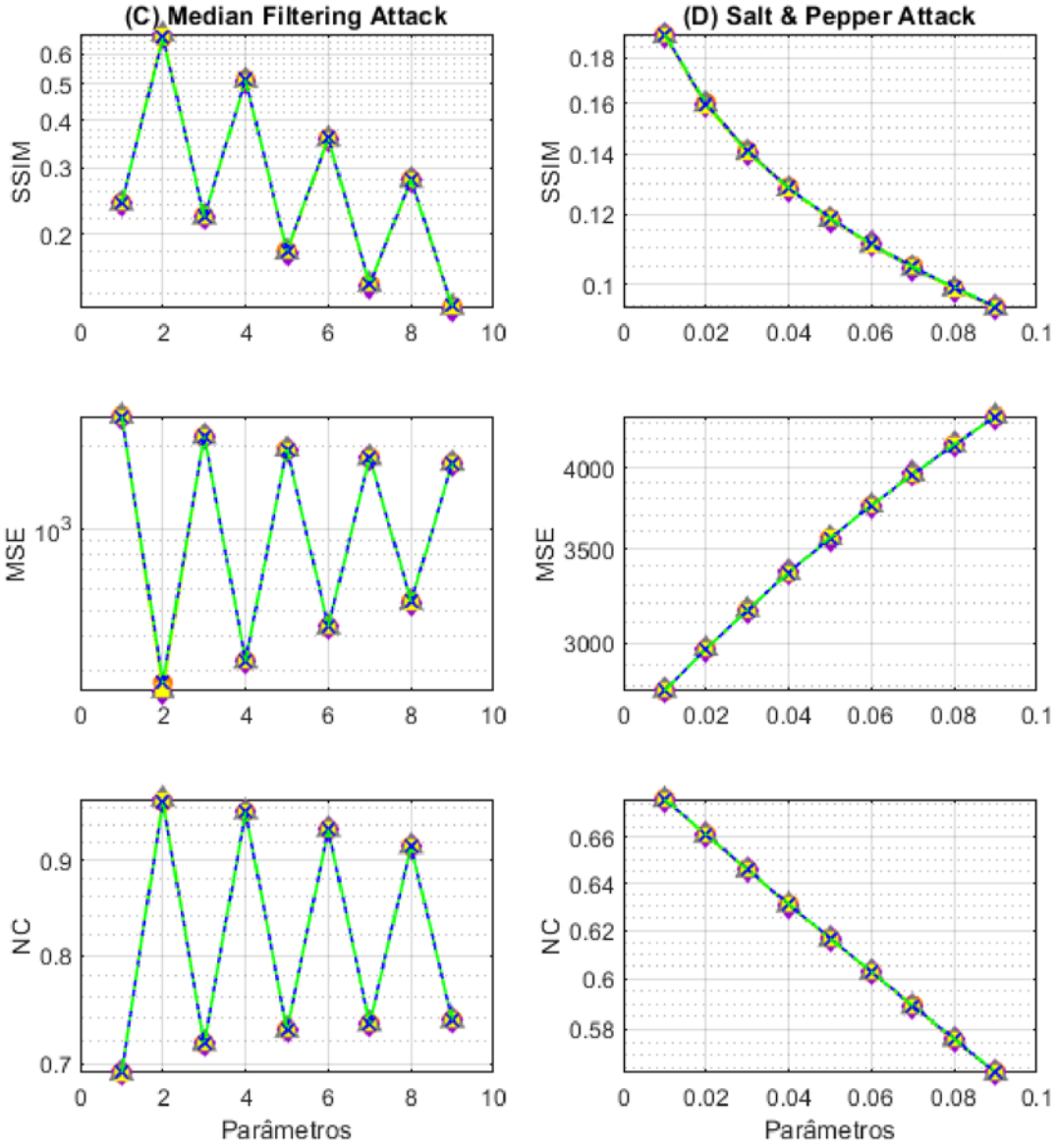


Figura 21 – Resultados entre Imagens com e sem Marca D'Água para diferentes níveis de ruído. Parâmetros: (C) [1 × 1] a [9 × 9] e (D) 0.01 a 0.09.

compressão JPEG, filtro mediano e sal e pimenta. Do mesmo modo, as métricas de qualidade, SSIM, MSE e NC, em diferentes condições, confirmam a precisão, a robustez e o desempenho na extração de marca d'água, indicando as transformadas Wavelet Haar, biortogonal e biortogonal Reversa como as melhores nessas situações. Os resultados mostram que a transformada Haar se destaca por decompor as imagens em sub-bandas de frequência em sinais discretos. Ela permite a análise desses sinais através de uma função bidimensional, tempo versus frequência, com resolução variável. Além do mais, a transformada Haar é reconhecida pela sua simplicidade matemática e pelo baixo esforço computacional necessário para o seu cálculo (ROSA et al., 2021), tornando-se atrativa para a implementação em hardware. Já as transformadas biortogonais envolvem cálculos mais complexos devido ao uso de filtros com coeficientes mais elaborados. Esses filtros requerem operações aritméticas mais com-

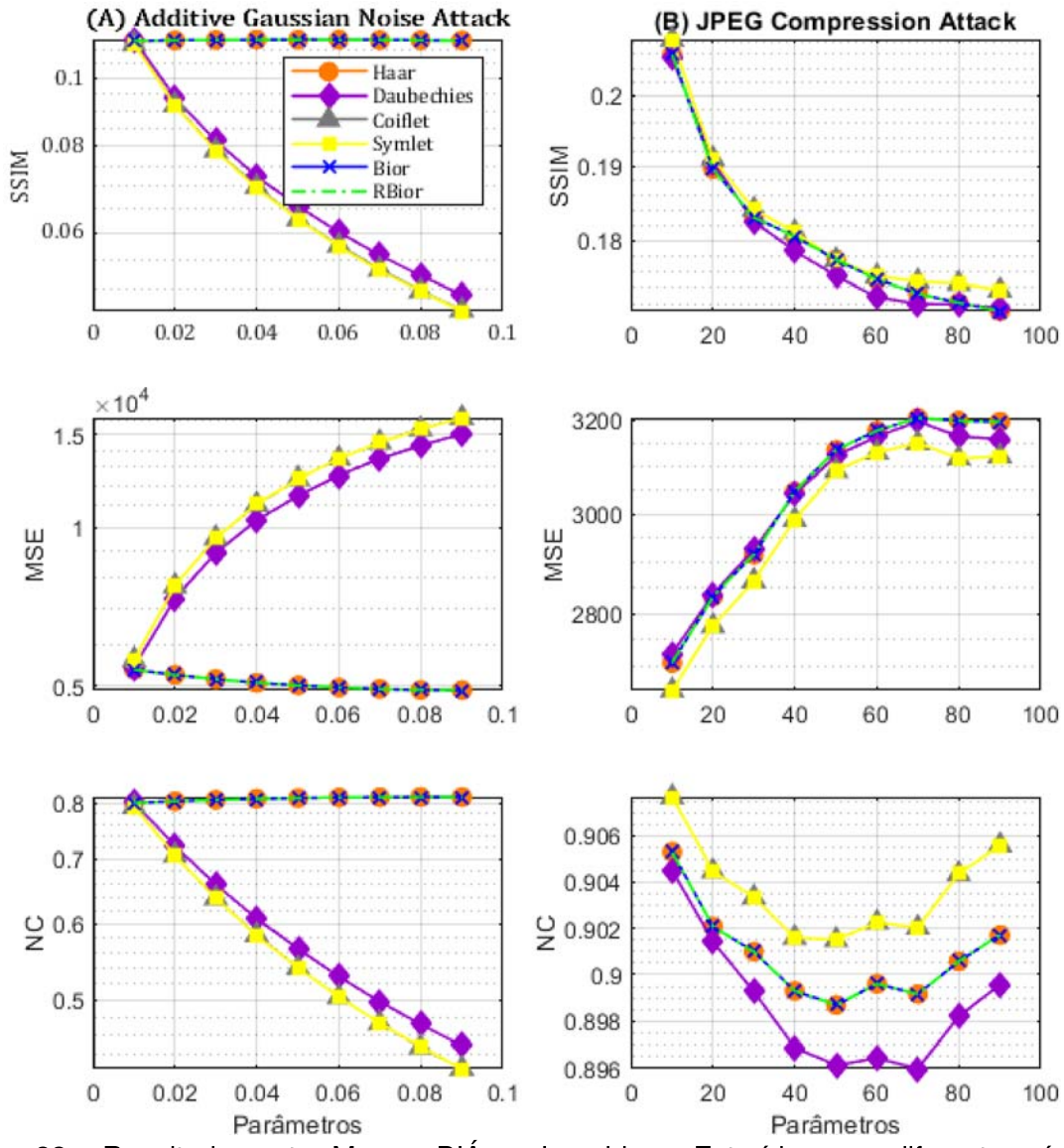


Figura 22 – Resultados entre Marcas D'Água Inseridas e Extraídas para diferentes níveis de ruído. Parâmetros: (A) 0.01 a 0.09 e (B) 10 a 90.

plexas, como multiplicações e adições em maior número. Assim sendo, mais recursos de hardware, o que pode aumentar a área ocupada no chip e o consumo de energia.

## 4.2 Resumo do Capítulo

O capítulo apresentou uma análise das transformadas Wavelet no processo de inserção e extração das marcas d'água. Foram apresentados resultados com diferentes ataques, usando as transformadas da família Wavelet. Os resultados foram analisados de acordo com as métricas SSIM, MSE e NC. Os resultados indicaram as transformadas Haar, Biortogonal e Biortogonal Reversa como as mais eficientes na extração da marca d'água. Em particular, a transformada Haar se destaca pela sua simplicidade matemática e baixo esforço computacional, o que motivam a sua escolha para a im-

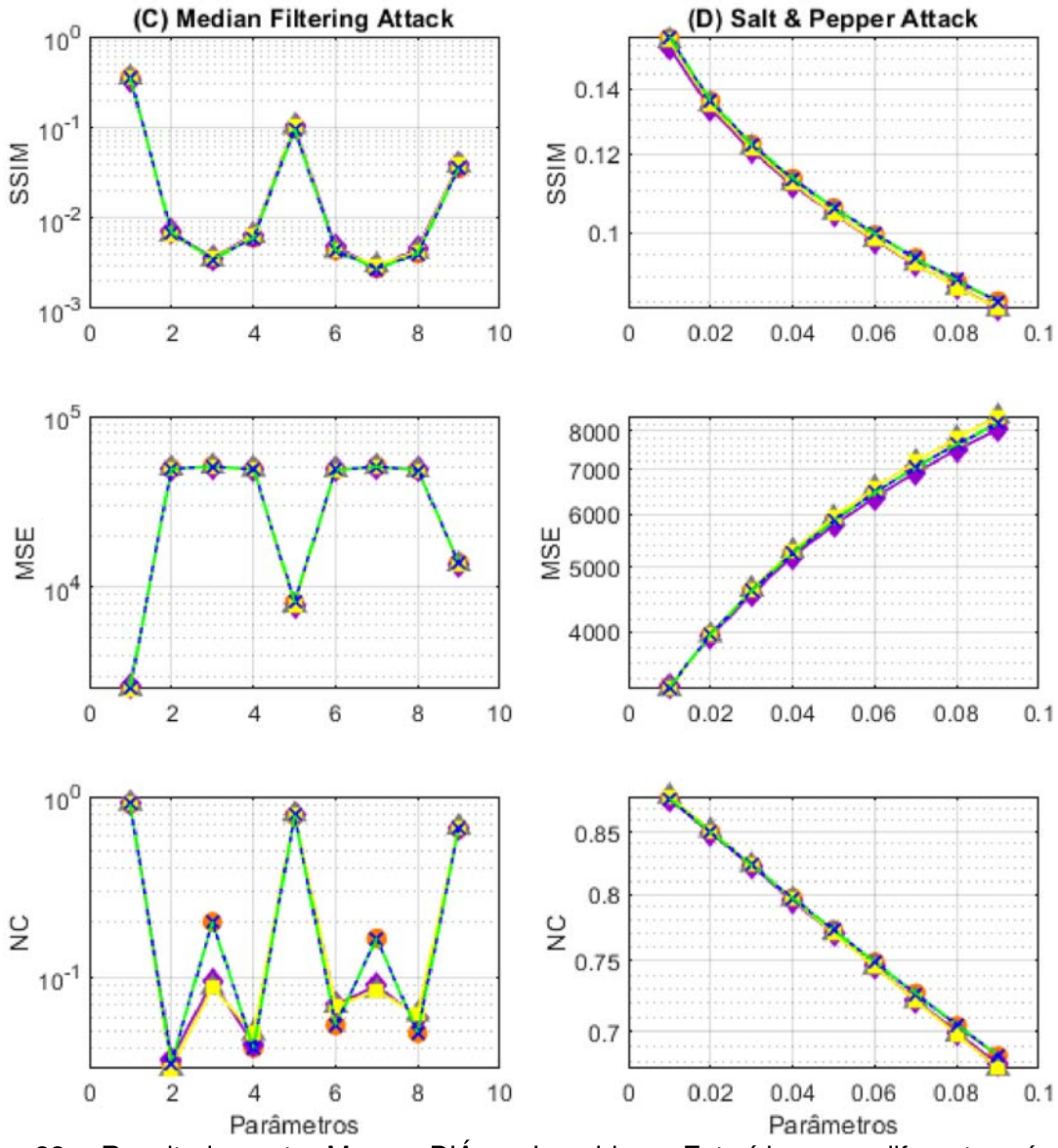


Figura 23 – Resultados entre Marcas D'Água Inseridas e Extraídas para diferentes níveis de ruído. Parâmetros: (C) [1 $\times$ 1] a [9 $\times$ 9] e (D) 0.01 a 0.09.

plementação em hardware. O próximo capítulo apresenta aspectos de implementação da transformada Haar, com estratégias de computação aproximada. Apresentam-se resultados de análise de precisão do sistema de marca d'água com essa transformada aproximada, bem como resultados de síntese e comparações com a literatura.

# 5 TRANSFORMADA WAVELET HAAR APROXIMADA

Este capítulo apresenta um sistema de marca d'água de baixa energia que emprega a transformada Wavelet Haar discreta aproximada (AxDHWT - *Approximate Discrete Haar Wavelet Transform*) para inserir imagens de marca d'água em imagens hospedeiras. A contribuição envolve o desenvolvimento de um sistema de marca d'água AxDHWT eficiente em termos de energia, projetado em hardware VLSI (*Very high speed integrated circuit Hardware Description Language*). O sistema de marca d'água AxDHWT baseado em ASIC mostra um avanço significativo, apresentando dez circuitos aritméticos a menos em comparação com o estado de arte. Principalmente, a arquitetura proposta baseada em AxDHWT, apresenta reduções de $1.33\times$ na área e $2.88\times$ no consumo de energia em comparação com as melhores arquiteturas.

A marca d'água é uma técnica amplamente utilizada que envolve ocultar um dado dentro de outro para proteger informações sensíveis. Esse método integra informações sensíveis em imagens, vídeos e arquivos de áudio, modificando os dados de forma a torná-los invisíveis. A informação da marca d'água é frequentemente embutida diretamente no domínio da transformada, conforme proposto em vários trabalhos que utilizam transformações como transformada do cosseno discreta (DCT), transformada de Fourier discreta (DFT), transformada Wavelet discreta (DWT) (ROSA et al., 2022) e decomposição em valores singulares (SVD). A análise no domínio da frequência é crucial para determinar as posições ótimas para inserir a marca d'água, garantindo a robustez dos algoritmos de inserção. Estudos revelam que a visão humana é mais sensível a detalhes de baixa e média frequência, tornando o domínio transformado favorável para a inserção de marca d'água, especialmente nas bandas de baixa frequência (COX et al., 1997). Métodos baseados em DWT são benéficos para marca d'água em imagens devido às suas vantagens de multi-resolução, boa compressão e qualidade visual (ROSA et al., 2022).

Em um sistema de marca d'água, as marcas d'água invisíveis permanecem ocultas e imperceptíveis ao olho humano, servindo principalmente para autenticar e proteger os direitos autorais de conteúdo digital. A imagem com marca d'água e a marca d'água extraída visam uma correlação cruzada normalizada (NC) de $\geq 0.7$ (GAFSI et al.,

2022). Esse limiar permite otimizações do sistema de marca d'água, possibilitando que a abordagem de computação aproximada (AxC) melhore a eficiência energética. A computação aproximada vem ganhando atenção como uma solução potencial para as crescentes demandas de energia para processamento de dados (IRTIJA et al., 2022) e desafios de segurança de hardware (LIU et al., 2020b). A contínua miniaturização dos semicondutores exige projetos tolerantes a falhas e resistentes a variações para garantir a confiabilidade operacional ao longo da vida útil e compensar as variações nos processos de fabricação em nano escala. Técnicas tradicionais de tolerância a falhas baseadas em redundâncias de hardware, tempo e/ou informação podem adicionar um *overhead* significativo no consumo de energia, criando um conflito entre confiabilidade e eficiência energética. Conforme declarado em (HAN, 2016), a perspectiva de que o ruído ou erro é uma parte integral de um sistema permanece válida, e aplicações de segurança de hardware intensivas em computação podem se beneficiar de técnicas de mitigação como AxC, conforme demonstrado em um sistema de marca d'água.

Assim sendo, este trabalho propõe um novo sistema de marca d'água aproximado com dez circuitos aritméticos a menos que o estado da arte apresentado em Rosa et al. (2022).

**As contribuições inovadoras deste trabalho são as seguintes:**

**(i)** Proposta de uma transformada de Haar Discreta Aproximada (AxDHWT) eficiente em termos de energia para um sistema de marca d'água;

**(ii)** Teste do modelo AxDHWT proposto em vários cenários de ataque.

## 5.1 Trabalhos Relacionados

Soluções de marca d'água geralmente envolvem a verificação da presença de uma marca d'água específica nos dados recebidos (GAFSI et al., 2022; ROSA et al., 2022). Técnicas para criar marcas d'água invisíveis podem ser categorizadas como frágeis, semi-frágeis e robustas (ANAND; SINGH, 2021). Marcas d'água frágeis afetam minimamente a qualidade visual de uma imagem hospedeira, mas são suscetíveis a ataques e adequadas para verificação de integridade. Marcas d'água robustas resistem a ataques e são tipicamente empregadas para proteção de direitos autorais e ocultação de dados. Marcas d'água semi-frágeis podem proteger contra filtragem e ruído leve, mas são vulneráveis a ações maliciosas como recorte e rotação (YAN; HUANG; YU, 2022). Outra abordagem é a decodificação da marca d'água embutida como uma mensagem oculta e desconhecida (YAN; HUANG; YU, 2022). Transformadas Wavelet discretas (DWTs) são métodos robustos para a extração de marcas d'água reversíveis e frágeis (ANAND; SINGH, 2020). A DWT garante alta segurança e preserva a integridade da imagem, reduzindo a vulnerabilidade a ataques de marca d'água.

Esta metodologia garante a integridade da marca d'água em (ANAND; SINGH, 2020), enquanto oculta dados privados para melhorar a segurança na transmissão de imagens. Diversas arquiteturas de hardware DWT oferecem segurança contra ataques de marca d'água (GAFSI et al., 2022; ROSA et al., 2022). Outros trabalhos propõem transformadas Wavelet aproximadas para fins de baixo consumo de energia, como em (SEIDEL et al., 2021b; DA ROSA et al., 2022). Esse trabalho de dissertação explora a transformada Wavelet Haar aproximada para um sistema de marca d'água eficiente em termos de energia.

A Tabela 5 resume o esquema de marca d'água do estado da arte e realiza o delineamento qualitativo das contribuições do trabalho proposto em comparação com outros trabalhos da literatura.

Tabela 5 – Trabalhos relacionados a AxDHWT e sistemas aproximados de marca d'água em imagens.

| Trabalhos Relacionados | A | B | C | D | E |
|---|---|---|---|---|---|
| **(ANAND; SINGH, 2021, 2020)** | × | × | ✓ | ✓ | × |
| **(YAN; HUANG; YU, 2022)** | × | × | ✓ | × | × |
| **(RAVEENDRAN et al., 2020; NOMANI et al., 2020)** | FPGA | ✓ | × | ✓ | ✓ |
| **(SEIDEL et al., 2021b; DA ROSA et al., 2022; PAIM et al., 2019; SCHIAVON et al., 2016)** | ASIC | ✓ | × | ✓ | ✓ |
| **(ROSA et al., 2022; GAFSI et al., 2022)** | ASIC | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| **Our approximate AxDHWT** | ASIC | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |

**(A)** Dispositivo alvo dos resultados, **(B)** Metodologia para análise realista de potência,
**(C)** Resultados de erro para o sistema de marca d'água, **(D)** Uso de DWT, **(E)** DHWT aproximada.

## 5.2 Transformada Wavelet Haar Discreta Aproximada (AxDHWT) Aplicada ao Sistema de Marca D'água

A crescente demanda por recursos computacionais na era digital trouxe uma preocupação crítica, o consumo excessivo de energia. Nesse contexto, a interseção entre eficiência energética e segurança digital torna-se imperativa. Os processos tradicionais de marca d'água frequentemente envolvem computações intensivas em recursos, sobrecarregando hardware com alto consumo de energia. À medida que o cenário digital se expande, a necessidade de práticas sustentáveis torna-se primordial. A computação aproximada, que permite sacrificar a precisão em troca de ganhos em eficiência computacional, surge como uma solução estratégica. Ao adotar a computação aproximada em sistemas de marca d'água, abre-se a porta para uma abordagem mais consciente em termos de energia, onde certas computações podem ser aproximadas ou simplificadas sem perda significativa na eficácia da marca d'água. Este estudo visa introduzir uma aproximação para o núcleo da matriz 2D da DHWT, resultando em um projeto de hardware com a redução de dois somadores e dois subtratores. O conceito central envolve a aplicação de técnicas de aproximação a sistemas de marca d'água utilizando DHWT (AxDHWT) e DHWT inversa (AxIDHWT), otimizando quatro unidades aritméticas para cada DHWT empregada. A matriz Haar aproximada é apresentada

em (18), e a matriz inversa aproximada de Haar é detalhada em (19), com os termos no nível 2 omitidos. Para comparação, a Figura 24 apresenta a arquitetura exata e nas Figuras 25(a) e (b) ilustram os resultados da aproximação no circuito tanto da AxDHWT quanto da AxIDHWT, respectivamente.

$$AxH_2 = \frac{1}{2}\begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} \quad (18) \qquad AxH_2^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} \quad (19)$$

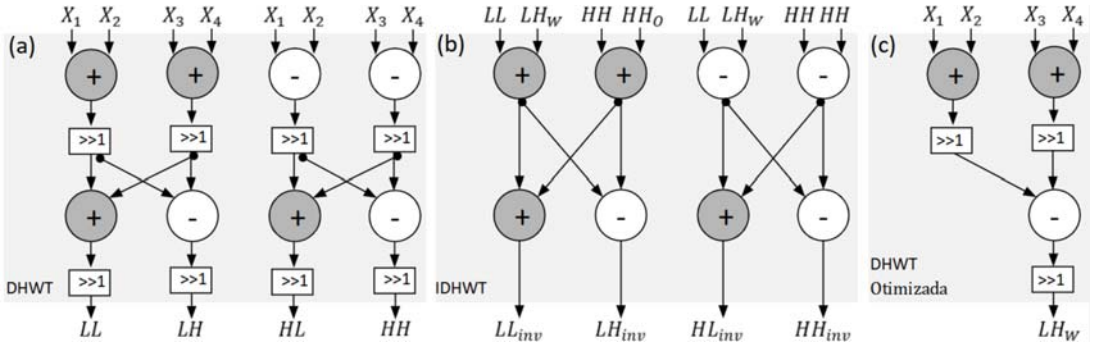


Figura 24 – Arquitetura exata para o sistema de marca d'água.

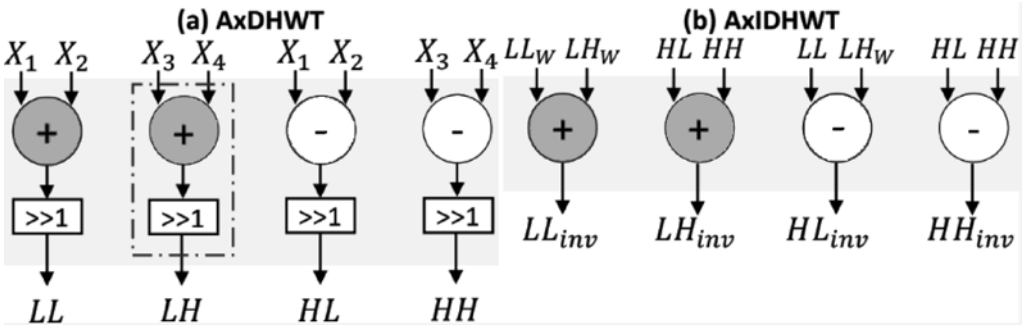


Figura 25 – Arquiteturas para o sistema aproximado da marca d'água: (a) AxDHWT (onde o tracejado na figura mostra um AxDHWT otimizado na etapa de extração), (b) AxIDHWT.

### 5.2.1 Descrição do Sistema de Marca d'Água

Um sistema de marca d'água é geralmente desenvolvido para inserir marcas d'água em conteúdos digitais, predominantemente imagens. Os principais objetivos deste sistema são garantir a proteção de direitos autorais, validar a autenticidade do conteúdo e manter a integridade dos dados. O sistema de marca d'água implementado utiliza a AxDHWT em configurações direta e inversa para a inserção e a extração de marcas d'água dentro das imagens hospedeiras. Para elucidar a metodologia do processo, as etapas de inserção e extração foram organizadas em etapas como apresentado a seguir.

(i) *Etapa de Inserção* (Figura 26-a): A imagem hospedeira original (uma imagem em tons de cinza com dimensões M$\times$N) passa por uma decomposição inicial até o nível 1 usando a AxDHWT 2D. Isso resulta em quatro detalhes, cada um compreendendo $\frac{1}{4}$ da imagem hospedeira (Figura 26-a). Estes incluem a aproximação (banda $LL_H1$, abrigando baixas frequências) e os detalhes horizontal ($LH_H1$), vertical ($HL_H1$) e diagonal ($HH_H1$). A marca d'água é estrategicamente inserida no coeficiente $LH_H1$, que engloba as frequências médias. Os coeficientes de detalhes médios são então utilizados para reconstruir a imagem com marca d'água aplicando a transformada inversa Wavelet de Haar.

(ii) *Etapa de Extração* (Figura 26-b): A imagem com marca d'água passa por uma decomposição usando uma otimização na AxDHWT. Durante esta etapa, a marca d'água inserida é extraída dos detalhes transformados comparando-os com os detalhes médios originais antes do processo de marca d'água.

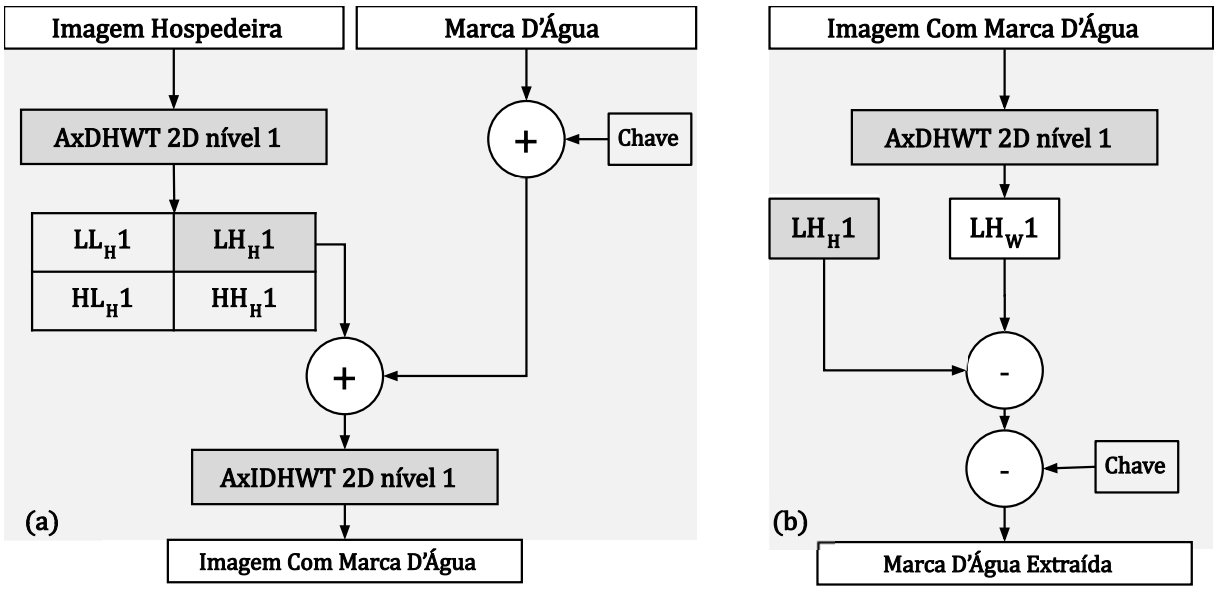


Figura 26 – Fluxograma de processo do AxDHWT : (a) Inserção e (b) Extração.

O sistema de marca d'água proposto foi descrito em VHDL e validado em síntese lógica. No desenvolvimento de soluções em hardware e em um modelo probabilístico, decorre das consideráveis restrições de tempo associadas à realização da co-simulação para diversas imagens e ataques em hardware para extração de erros. Por outro lado, o modelo fornece resultados de erro em um período de $1.50$ segundos (sistema de marca d'água com a proposta AxDHWT) para $106$ imagens submetidas a $5$ diferentes tipos de ataque para nove trilhas de intensidade de ataque.

Implementar um sistema de marca d'água em hardware é uma abordagem estratégica para facilitar as otimizações, tendo-se o uso do método AxC para eficiência energética e redução no tempo de processamento para simulações extensivas envolvendo diversas imagens e ataques.

O sistema de marca d'água aproximado proposto calcula o coeficiente transformado da Haar para um kernel $2 \times 2$ (entradas $X_1, X_2, X_3$ e $X_4$) de uma imagem. A decomposição é obtida em dois passos no pré-processamento para o sinal digital 2D. O processamento é aplicado primeiro ao longo das linhas e, em seguida, às colunas. Assim, o sistema recebe e processa os resultados do subsistema de pré-processamento para produzir quatro resultados, os detalhes $LL$, $LH$, $HL$ e $HH$ da Wavelet Haar. Então, o segundo passo calcula uma estimativa dos quatro *pixels* de entrada ($X_1, X_2, X_3$ e $X_4$).

A inserção aplica a AxDHWT à imagem original (Figura 26-a), e a marca d'água é inserida nos detalhes $LH$, que contêm as frequências médias. A etapa de extração usa a AxDHWT novamente (Figura 26-a, a parte tracejada em vermelho da figura), que requer apenas um subtrator, sete a menos em relação a solução proposta em (GAFSI et al., 2022), e dois a menos em relação a solução em (ROSA et al., 2022).

Os blocos de deslocamento ($>> 1$) na Figura 26-a, representam deslocamentos para a direita representando o coeficiente da transformada Haar ($\frac{1}{2}$), apresentado na matriz em (18). O pseudocódigo para o projeto baseado em ASIC e um modelo probabilístico em MATLAB para inserir e extrair marcas d'água são explicados detalhadamente a seguir.

**Etapa de Inserção** - Algoritmo 1:

1. Ler a imagem hospedeira em tons de cinza $H$ e a marca d'água $W$ (linha 1);
2. Decompor a imagem hospedeira em kernel $2 \times 2$ gerando quatro vetores $X_1$, $X_2$, $X_3$ e $X_4$ (linhas 4-12), do tamanho ($\frac{M}{2} \cdot \frac{N}{2}$), onde esse tamanho corresponde ao pré-processamento gerado por convolução com o kernel 2x2. A imagem da marca d'água também é decomposta em um vetor $W$ do tamanho ($\frac{M}{2} \cdot \frac{N}{2}$);
3. Realizar o processo AxDHWT na imagem hospedeira (linha 14);
4. Selecionar uma chave a ser usada como senha e adicionar a marca d'água no coeficiente de detalhe $LH$ (linha 15);
5. Realizar o AxIDHWT a partir dos detalhes produzidos pelo AxDHWT para reconstruir as imagens com marca d'água e a reconstrução da imagem 2D com marca d'água (linhas 18-26).

**Etapa de Extração** - Algoritmo 2:

1. Ler a imagem com marca d'água do tamanho $M$x$N$ (linha 1) e a *chave*;
2. Decompor a imagem com marca d'água em kernel $2 \times 2$ gerando quatro vetores $X_1$, $X_2$, $X_3$ e $X_4$ (linhas 3-9);

3. Executar o AxDHWT na imagem com marca d'água (linha 11);
4. Escolher o detalhe de frequência $LH_W2$ (linha 15);
5. Extrair os dados da marca d'água conforme a Equação $E(i) = LH_H2 - (LH_W2 - CHAVE)$ (linha 12);
6. O vetor E(i) contém a extração da marca d'água, e o E(i) é reconstruído para uma imagem do tamanho $\frac{M}{2}$x$\frac{N}{2}$ (linha 14).

**Algoritmo 1:** Pseudocódigo para etapa de inserção de marca d'água no sistema AxDHWT

1 **Entrada:** $H(M,N)$, $W(X,Y)$, *chave*
2 **Saída:** *imagemComMarcadagua*(M, N)
3 Decompor $W(X,Y)$ em um vetor $w = (w(:))$ ;
4 **for** $i = 1$ *to* $(M/2)$ **do**
5  **for** $j = 1$ *to* $(N/2)$ **do**
6  $X_1(k) = H((2i-1),(2j-1))$ ;
7  $X_2(k) = H((2i-1),(2j))$ ;
8  $X_3(k) = H((2i),(2j-1))$ ;
9  $X_4(k) = H((2i),(2j))$ ;
10  $k = k + 1$ ;
11 **for** $i = 1$ *to* $[(M/2) \cdot (N/2)]$ **do**
12  AxDHWT ($X_1(i)$, $X_2(i)$, $X_3(i)$, $X_4(i)$, $LL_H1(i)$, $LH_H1(i)$, $HL_H1(i)$, $HH_H1(i)$) ;
13  $LH_W(i) = LH_H1(i) + W(i) + Chave$ ;
14  AxIDHWT ($LL_H1(i)$, $LH_W(i)$, $HL_H1(i)$, $HH_H1(i)$, $S_{LL}(i)$, $S_{LH}(i)$, $S_{HL}(i)$, $S_{HH}(i)$) ;
15 **for** $i = 1$ *to* $(M/2)$ **do**
16  ▷ Reconstrução da imagem 2D ;
17  **for** $j = 1$ *to* $(N/2)$ **do**
18  *imagemComMarcadagua*$((2i-1),(2j-1)) = S_{LL}(k)$ ;
19  *imagemComMarcadagua*$((2i-1),(2j)) = S_{LH}(k)$ ;
20  *imagemComMarcadagua*$((2i),(2j-1)) = S_{HL}(k)$ ;
21  *imagemComMarcadagua*$((2i),(2j)) = S_{HH}(k)$ ;
22  $k = k + 1$ ;

**Algoritmo 2:** Pseudocódigo para etapa de extração de marca d'água no sistema AxDHWT

**Entrada:** *imagemComMarcadagua*(M, N), *Chave*
**Saída:** $E(M/2, N/2)$
**for** $i = 1$ **to** $(M/2)$ **do**
    **for** $j = 1$ **to** $(N/2)$ **do**
        $X_3(k) =$ *imagemComMarcadagua*$((2i-1),(2j-1))$ ;
        $X_4(k) =$ *imagemComMarcadagua*$((2i-1),(2j))$ ;
        $k = k + 1$ ;
**for** $i = 1$ **to** $(M/2) \cdot (N/2)$ **do**
    $\frac{1}{2}(X_3(i)$ - $X_4(i))$ ▷ Otimização no AxDHWT ;
    $E(i) = LH_H2(i) - LH_W2(i) -$ *chave* ;
$MarcadaguaExt = reshape(E, [M/2, N/2])$;

## 5.3 Resultados da Análise de Precisão do Sistema de Marca D'Água

Os resultados de precisão comparam a imagem original e a imagem com a marca d'água, assim como a marca d'água original e a marca d'água extraída por um modelo descrito em MATLAB. Foi criado um sistema de marca d'água baseado em AxDHWT que emprega a teoria das probabilidades para modelar os resultados de precisão-qualidade. Essa abordagem minimiza o tempo necessário para explorar o espaço de projeto de hardware. O modelo descrito, utilizando a linguagem MATLAB, auxilia com muitos resultados que atualmente são adquiridos em um árduo processo de co-simulação (que utiliza MATLAB-ModelSim).

Utilizam-se as seguintes métricas bem conhecidas para avaliar a precisão da inserção e extração da marca d'água quando corrompida por ataques: Taxa de Erro de Bits (BER), Correlação Cruzada Normalizada (NC) e Similaridade Estrutural (SSIM). A Figura 27 mostra o desempenho do sistema de extração de marca d'água contra diferentes ataques que corrompem a imagem com marca d'água, como ruído gaussiano aditivo, compressão JPEG, filtro mediano, ruído sal e pimenta e ruído speckle.

Foram extraídos resultados de precisão da imagem com marca d'água e da marca d'água extraída para um conjunto de $106$ imagens hospedeiras de 256x256 *pixels*. As $106$ imagens hospedeiras usadas para os resultados de qualidade são as seguintes: Barbara, Boat, Lena, Mandril, Cameraman e Pepper (do banco de dados Group (accessed on july 2024)), além de mais $100$ imagens hospedeiras de teste do banco de dados Kaggle (accessed on july 2024).

O sistema proposto foi testado contra os parâmetros de intensidade dos ataques, muito utilizada na literatura, com uma variância de $0.01$ a $0.09$ para ruído gaussiano aditivo e ruído speckle, um fator de qualidade (QF) de $10$ a $90$ para compressão JPEG,

uma trilha de máscara de tamanho [$1 \times 1$] a [$9 \times 9$] para filtragem mediana, e uma densidade de $0.01$ a $0.09$ para sal e pimenta. As Figuras 27-a-b-c mostram resultados de precisão com o AxDHWT proposto para a imagem com marca d'água e as Figuras 27-d-e-f mostram a marca d'água extraída para as $106$ imagens hospedeiras.

De acordo com (GAFSI et al., 2022), a marca d'água extraída é aceitável se NC$\geq 0.7$ (a linha está destacada em preto nas Figuras 27-a e -d, que é entre a marca d'água original e a marca d'água extraída). Diante dos resultados, o sistema de marca d'água aproximado proposto se apresentou resiliente a erros para todos os tipos de ataques e em todas as trilhas de intensidade de ataques nas imagens com marca d'água. Como apresentado na Figura 27-a, para todos os ataques, o NC$\geq 0.8684$, na Figura 27-b o BER$< 0.1314$ (BER$= 0$ tem 0% de erro) e na Figura 27-c o SSIM$> 0.8679$ (ou seja, 86.79% de precisão). No entanto, a mesma resiliência a erros comprovada nas imagens com marca d'água para todos os ataques não se apresenta no processo de extração da marca d'água, como visto nas Figuras 27-d-e-f.

O sistema de marca d'água aproximado tem bons resultados em ruído speckle com um NC$\geq 0.7727$ (Figura 27-d), BER$< 0.2273$ (Figura 27-e), e SSIM$> 0.7737$ (Figura 27-f), em compressão JPEG e sal e pimenta o NC$\geq 0.9727$, BER$< 0.02732$, e SSIM$> 0.9807$. No filtro mediano com uma trilha de intensidade de ataque com máscara de tamanho [$1 \times 1$], o sistema de marca d'água aproximado tem um NC$= 0.9998$ para as outras trilhas o NC$< 0.7$.

A Figura 28 mostra resultados de NC para exemplos de desempenho visual da marca d'água extraída e da imagem com marca d'água usando o AxDHWT. Testa-se o sistema proposto contra uma de intensidade de ataque aleatória com uma variância de $0.01$ para ruído gaussiano aditivo, uma de máscara de tamanho [$1 \times 1$] para filtro mediano, uma densidade de $0.09$ para sal e pimenta, uma variância de $0.08$ para ruído speckle, e um QF de $10$ a $90$ para compressão JPEG. Para a Lena, como imagem hospedeira e uma marca d'água robusta, o AxDHWT obteve o NC$\geq 0.8825$, e a respectiva marca d'água obteve o NC$\geq 0.9900$, de intensidade para os ataques analisados, Figura 28.

A imagem com marca d'água qualitativa é aceitável se a marca d'água for invisível ao sistema visual humano e obtiver o NC$\geq 0.7$. De acordo com a Figura 27, o método proposto garante o desempenho de invisibilidade, uma vez que todos os NCs são superiores a $0.8825$ para imagens com marca d'água que sofreram esses ataques de exemplo. Para o ataque de filtragem mediana, o valor de NC da marca d'água extraída atinge $1$, ou seja, $100\%$ de precisão. Isso mostra que o método de marca d'água proposto possui uma qualidade de invisibilidade. Portanto, a solução proposta atende aos requisitos de invisibilidade de marca d'água tanto na análise subjetiva quanto na objetiva.

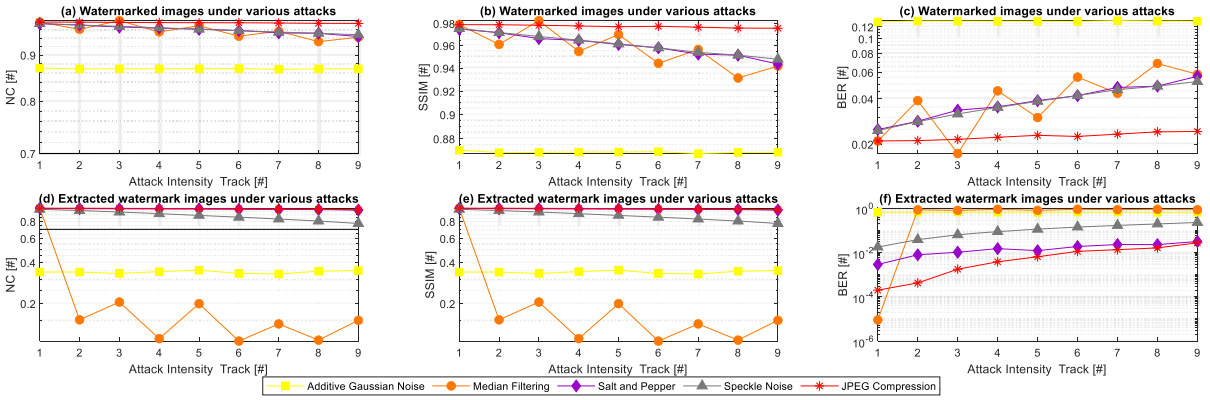


Figura 27 – (a) NC, (b) SSIM, e (c) BER, média entre $106$ imagens diferentes, tanto para a imagem com marca d'água quanto para a para a marca d'água extraída obtida usando AxDHWT sob vários ataques, (d) NC, (e) SSIM, and (f) BER

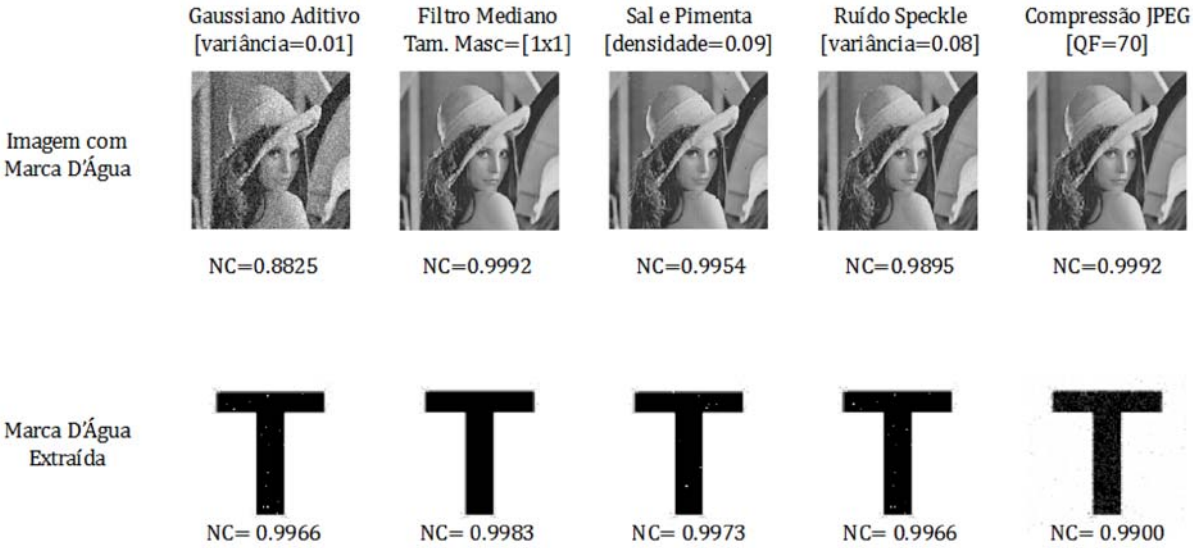


Figura 28 – Desempenho da invisibilidade de imagens com marca d'água e de marcas d'água extraídas correspondentes com vários ataques e seus NCs correspondentes.

### 5.3.1 Comparação com a Literatura

A Tabela 6 compara os resultados entre a literatura (GAFSI et al., 2022; ROSA et al., 2022) e o AxDHWT para análise de extração de marca d'água. Realiza-se uma avaliação abrangente contra três tipos distintos de ataques: sal e pimenta, ruído gaussiano aditivo e compressão JPEG. Para cada ataque, analisam-se dois diferentes níveis de intensidade de ataque.

Apesar do sistema proposto representar uma aproximação, alcança resultados superiores para níveis específicos de intensidade de ataque, como sal e pimenta com uma densidade de 0,01 e compressão JPEG com valores de QP de 40 e 50. Principalmente, o sistema proposto supera a literatura em (GAFSI et al., 2022), particularmente para os cenários de ataque mencionados. Vale ressaltar que, com ruído gaussiano aditivo para uma variância de 0,09, o AxDHWT apresenta desempenho melhorado em comparação com a literatura em (GAFSI et al., 2022).

Esses resultados ressaltam a robustez e a eficácia do sistema de marca d'água proposto, enfatizando sua vantagem competitiva em diversos cenários de ataque. Os resultados posicionam essa abordagem como um avanço significativo na marca d'água aproximada, mostrando seu potencial para melhorar a segurança e a resiliência do conteúdo digital em aplicações práticas.

Tabela 6 – Resultados de NC entre a marca d'água original e a marca d'água extraída para diferentes ataques.

| Arquitetura | Host Imagem | S&P densidade [#] 0.01 | S&P densidade [#] 0.05 | A. G. variância [#] 0.05 | A. G. variância [#] 0.09 | JPEG QP [#] 40 | JPEG QP [#] 50 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| (GAFSI et al., 2022) | Lena | 0.7496 | 0.6745 | 0.4816 | 0.2719 | 0.8956 | 0.8762 |
| | Cameraman | 0.7259 | 0.6601 | 0.4733 | 0.2645 | 0.8822 | 0.8591 |
| | Pepper | 0.7345 | 0.6710 | 0.4776 | 0.2711 | 0.8943 | 0.8699 |
| (ROSA et al., 2022) | Lena | 0.9901 | 0.9886 | 0.9882 | 0.9900 | 0.9833 | 0.9850 |
| | Cameraman | 0.9881 | 0.9872 | 0.9899 | 0.9911 | 0.9893 | 0.9902 |
| | Pepper | 0.9854 | 0.9866 | 0.9912 | 0.9914 | 0.9946 | 0.9922 |
| AxDHWT | Lena | 0.9971 | 0.9879 | 0.3515 | 0.3491 | 0.9962 | 0.9936 |
| | Cameraman | 0.9850 | 0.9730 | 0.2901 | 0.2896 | 0.9858 | 0.9830 |
| | Pepper | 0.9956 | 0.9836 | 0.3424 | 0.3421 | 0.9981 | 0.9975 |

As células destacadas em verde representam os melhores resultados. S&P - Salt and Pepper, A. G. - Additive Gaussian noise, and JPEG- JPEG Compression.

## 5.4 Avaliação dos Resultados de Síntese para o Sistema de Marca d'Água Baseado em AxDHWT

Esta seção apresenta resultados de síntese para o sistema de marca d'água AxDHWT e comparações com a literatura. A proposta arquitetural é codificada em linguagem de descrição de hardware VHDL e sintetizada utilizando a ferramenta de síntese Cadence Genus$^{TM}$, com uma frequência de relógio alvo em 200 MHz, devido às comparações com a literatura. Os circuitos são mapeados para a biblioteca de células padrão comercial de baixo consumo de potência de $65$nm a $1.25$V. A metodologia adotada conduz a múltiplas simulações usando dados de $106$ imagens para garantir uma estimativa realista da dissipação de potência do hardware. A Tabela 7 mostra os resultados de arquiteturas VLSI da literatura e do AxDHWT proposto para o sistema de marca d'água de imagem.

Utilizando uma ferramenta de síntese comercial, a abordagem em (PEXARAS; KARYBALI; KALLIGEROS, 2019) mapeou o hardware de marca d'água para uma biblioteca de células padrão industrial de 90nm (ASIC). A solução proposta nessa dissertação de sistema de marca d'água, implementa as soluções AxDHWT e AxIDWT com dois somadores e dois subtratores a menos em comparação ao estado da arte em (ROSA et al., 2022), resultando em uma redução total de 10 circuitos aritméticos no

sistema de marca d'água. O trabalho em (GAFSI et al., 2022) apresenta uma solução baseada em ASIC utilizando o DHWT 2D. Apesar de sua área reduzida, a solução em (GAFSI et al., 2022) poderia ser potencialmente mais otimizada, pois apresenta maior complexidade (um número significativamente maior de somadores e subtratores) em comparação com (ROSA et al., 2022). Na mesma tecnologia de 65nm e operação de frequência (200MHz), a solução proposta nessa dissertação mostra economias substanciais de $1.78\times$ e $8.13\times$ em área e energia, respectivamente, em comparação com (GAFSI et al., 2022).

Em comparação com (ROSA et al., 2022), o sistema de marca d'água AxDHWT exibe economias de área de $1.33\times$ e economias de energia de $2.88\times$. No entanto, em (ROSA et al., 2022), a precisão dos resultados de extração de marca d'água resulta em valores de NC mais altos, suportando todas as faixas de ataque. O sistema de marca d'água AxDHWT suporta todas as faixas de ataque na imagem marcada, mas não exibe a mesma resiliência a erros em ataques de filtro mediano e ruído gaussiano aditivo. Por outro lado, o sistema de marca d'água AxDHWT atinge economias de energia de $2.88\times$ em comparação com (ROSA et al., 2022) e suporta vários tipos de ataque. O hardware proposto em (GAFSI et al., 2022) não possui resiliência a erros para todos os quatro casos de ataque apresentado, como sal e pimenta (com densidade=$0.05$) e ruído gaussiano aditivo (variância=$0.01$, $0.05$, e $0.09$). Além do mais, o sistema de marca d'água AxDHWT suporta várias faixas de ataque e utiliza apenas 13 unidades aritméticas.

Tabela 7 – Resultados baseados em ASIC obtidos com o sistema de marca d'água AxDHWT e comparações com a literatura.

| Trabalhos Relacionados | Processo [nm] e Tensão | Domínio de Processamento | Marca D'Água | Área [$mm^2$] | Freq. [MHz] | Potência [$mW$] |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **(PEXARAS; KARYBALI; KALLIGEROS, 2019)** | 90nm @1.00V | Espacial | Invisível, Robusto | 2.890 | 166.7 | 4.230000 |
| **(GAFSI et al., 2022)** | 65nm @1.25V | DHWT | Invisível, Robusto | 2.324 | 200 | 0.008614 |
| **(ROSA et al., 2022)** | 65nm @1.25V | DHWT | Invisível, Robusto | 1.729 | 200 | 0.003050 |
| **Our AxDHWT** | 65nm @1.25V | AxDHWT | Invisível, Robusto | 1.303 | 200 | 0.001060 |

As células destacadas em verde e vermelho representam os melhores e piores resultados, respectivamente.

## 5.5 Resumo do Capítulo

O capítulo apresentou um novo sistema de marca d'água, baseado na transformada Wavelet Haar discreta aproximada (AxDHWT), para aplicações de baixa dissipação de potência. A abordagem proposta utiliza técnicas de computação aproximada para otimizar o projeto de hardware do sistema de marca d'água, reduzindo significativamente o número de circuitos aritméticos em comparação com as soluções estado da arte. A arquitetura proposta baseada em AxDHWT demonstrou uma maior eficiência, apresentando dez circuitos aritméticos a menos que o sistema de marca d'água

do estado da arte. Através de testes abrangentes em vários cenários de ataque, o sistema exibiu resiliência contra operações comuns de ataques de imagens, como: ruído gaussiano aditivo, compressão JPEG, filtro mediano, ruído sal e pimenta e o ruído speckle. As métricas de precisão e qualidade, incluindo Correlação Cruzada Normalizada (NC), Taxa de Erro de Bits (BER) e Similaridade Estrutural (SSIM), destacam a robustez do sistema de marca d'água. Além disso, os resultados de síntese indicam que a arquitetura baseada em AxDHWT alcança economias substanciais de área e de energia. O próximo capítulo apresenta as principais conclusões dessa dissertação e apresenta ideias para trabalhos futuros.

# 6 CONCLUSÃO

Neste trabalho foram explorados os modos de inserção e de extração das marcas d'água em imagens, utilizando seis transformadas da família das Wavelets. Os resultados demonstraram a eficácia dos métodos sob ataques de degradação de imagem, como ruído gaussiano aditivo, compressão JPEG, filtro mediano e ruído *salt and pepper*. As métricas de qualidade, incluindo Índice de Similaridade Estrutural, Erro Quadrático Médio e Correlação Normalizada, confirmaram a precisão, a robustez e o desempenho na extração de marca d'água, indicando as transformadas Wavelet Haar, Biortogonal e Biortogonal Reversa como as melhores opções nessas situações.

Diante disso, também foi desenvolvido um novo sistema de marca d'água baseado na Transformada Wavelet de Haar Discreta Aproximada (AxDHWT), voltado para aplicações de baixo consumo de energia. Utilizando técnicas de computação aproximada, visando a otimização do hardware, reduzindo significativamente o número de circuitos aritméticos, em dez, na comparação com as soluções mais avançadas. A arquitetura baseada em AxDHWT demonstrou eficiência superior, mesmo com esses dez circuitos aritméticos a menos em relação aos sistemas de marca d'água estado da arte na literatura, além da resiliência contra operações comuns de ataque à imagem. As métricas de precisão e de qualidade, incluindo Correlação Cruzada Normalizada, Taxa de Erro de Bits e Similaridade Estrutural, confirmaram a robustez do sistema, atendendo aos critérios de NC superiores a 0,7. Além disso, os resultados de síntese mostram economias substanciais de área e de energia, na ordem de $1.33\times$ e de $2.88\times$, respectivamente.

### 6.0.1 Trabalhos Futuros

Como sugestões para trabalhos futuros, é possível incluir um número maior de transformadas da família das Wavelets na análise do sistema de marcas d'água, como as transformadas de Morlet, Meyer, Fejer-Korovkin e Gabor. Além disso, ampliar exploração das marcas d'água, com a utilização de outras, como também as de maior tamanho. Recomenda-se a exploração de estratégias de aproximação das demais transformadas Wavelets. Além da proposição de otimizações adicionais da transfor-

mada Haar proposta neste trabalho, como a utilização de somadores aproximados. Isso permitirá uma comparação ainda mais abrangente visando melhorar a eficiência e a robustez do sistema de marcas d'água.

# REFERÊNCIAS


AGARWAL, N.; SINGH, A. K.; SINGH, P. K. Survey of robust and imperceptible watermarking. **Multimedia Tools and Applications**, [S.l.], v.78, n.7, p.8603–8633, 2019.

AL-SHAYEA, T. K.; MAVROMOUSTAKIS, C. X.; BATALLA, J. M.; MASTORAKIS, G.; MUKHERJEE, M.; PALLIS, E. A Novel Gaussian in Denoising Medical Images with Different Wavelets for Internet of Things Devices. In: GLOBECOM 2020 - 2020 IEEE GLOBAL COMMUNICATIONS CONFERENCE, 2020. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2020. p.1–6.

ALAA, N. Watermarking Images for Fact–Checking and Fake News Inquiry. , [S.l.], 2021.

ALMEIDA, R.; CAMPOS, F.; DAVID, J.; STROELE, V. Sistemas de recomendaçao de recursos educacionais para grupos de redes sociais: um mapeamento sistemático. In: BRAZILIAN SYMPOSIUM ON COMPUTERS IN EDUCATION (SIMPÓSIO BRASILEIRO DE INFORMÁTICA NA EDUCAÇAO-SBIE), 2015. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2015. v.26, n.1, p.1022.

ANAND, A.; SINGH, A. K. Joint Watermarking-Encryption-ECC for Patient Record Security in Wavelet Domain. **IEEE MultiMedia**, [S.l.], v.27, n.3, p.66–75, 2020.

ANAND, A.; SINGH, A. K. Watermarking techniques for medical data authentication: a survey. **Multimedia Tools and Applications**, [S.l.], v.80, n.20, p.30165–30197, 2021.

APARNA, J.; AYYAPPAN, S. Comparison of digital watermarking techniques. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTATION OF POWER, ENERGY, INFORMATION AND COMMUNICATION (ICCPEIC), 2014., 2014. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2014. p.87–92.

ARVINTI, B.; COSTACHE, M. Adaptive Thresholding Algorithm for Noisy Electrocardiograms using Reverse Biorthogonal Mother Wavelets. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ELECTRONICS AND TELECOMMUNICATIONS (ISETC), 2018., 2018. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2018. p.1–4.

BAGHERI BABA AHMADI, S.; ZHANG, G.; WEI, S.; BOUKELA, L. An intelligent and blind image watermarking scheme based on hybrid SVD transforms using human visual system characteristics. **The Visual Computer**, [S.l.], v.37, n.2, p.385–409, 2021.

BARNI, M.; BARTOLINI, F.; PIVA, A. Improved wavelet-based watermarking through pixel-wise masking. **IEEE transactions on image processing**, [S.l.], v.10, n.5, p.783–791, 2001.

BEGUM, M.; UDDIN, M. S. Digital Image Watermarking Techniques: A Review. **Inf.**, [S.l.], v.11, p.110, 2020.

BOSIO, A.; DEVEAUTOUR, B.; O'CONNOR, I. Exploiting Approximate Computing for Efficient and Reliable Convolutional Neural Networks. In: IEEE COMPUTER SOCIETY ANNUAL SYMPOSIUM ON VLSI (ISVLSI), 2022., 2022. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2022. p.326–326.

BOSIO, A.; GERMINIANI, S.; PRAVADELLI, G.; TRAIOLA, M. Exploiting assertions mining and fault analysis to guide RTL-level approximation. In: DESIGN, AUTOMATION TEST IN EUROPE CONFERENCE EXHIBITION (DATE), 2023., 2023. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2023. p.1–2.

CANCELLARO, M.; BATTISTI, F.; CARLI, M.; BOATO, G.; De Natale, F.; NERI, A. A commutative digital image watermarking and encryption method in the tree structured Haar transform domain. **Signal Processing: Image Communication**, [S.l.], v.26, n.1, p.1–12, 2011.

CHAITRA, B.; REDDY, P. B. A Study on Digital Image Forgery Techniques and its Detection. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONTEMPORARY COMPUTING AND INFORMATICS (IC3I), 2019., 2019. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2019. p.127–130.

CHAND, R. R.; FARIK, M.; SHARMA, N. A. Digital Image Processing Using Noise Removal Technique: A Non-Linear Approach. In: IEEE ASIA-PACIFIC CONFERENCE ON COMPUTER SCIENCE AND DATA ENGINEERING (CSDE), 2022., 2022. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2022. p.1–5.

CHOTIKAWANID, P.; AMORNRAKSA, T. Robust and Invisible Image Watermarking for Presentation Slides in E-Learning. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON BIG DATA AND EDUCATION, 2019., 2019. **Proceedings...** [S.l.: s.n.], 2019. p.31–36.

COX, I. J.; KILIAN, J.; LEIGHTON, F. T.; SHAMOON, T. Secure spread spectrum watermarking for multimedia. **IEEE transactions on image processing**, [S.l.], v.6, n.12, p.1673–1687, 1997.

COX, I.; MILLER, M.; BLOOM, J.; FRIDRICH, J.; KALKER, T. **Digital watermarking and steganography**. [S.l.]: Morgan kaufmann, 2007.

DA ROSA, M. M. A.; DA COSTA, E. A. C.; SOARES, R. I.; BAMPI, S. Exploring Security Threats by Hardware-Faults in Approximate Arithmetic Computing. In: IEEE INTER-REGIONAL NEWCAS CONFERENCE (NEWCAS), 2023., 2023. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2023. p.1–5.

DA ROSA, M. M. A.; PAIM, G.; SEIDEL, H. B.; ALMEIDA, S.; DA COSTA, E. A. C.; BAMPI, S. A Multiplier-Less Level-3 Haar Wavelet Transform Approximation Requiring Five Additions Only. In: IEEE 15TH DALLAS CIRCUIT AND SYSTEM CONFERENCE (DCAS), 2022., 2022. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2022. p.1–6.

DAFAS, P.; STATHAKI, T. Digital image watermarking using block-based Karhunen-Loeve transform. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON IMAGE AND SIGNAL PROCESSING AND ANALYSIS, 2003. ISPA 2003. PROCEEDINGS OF THE, 3., 2003. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2003. v.2, p.1072–1075 Vol.2.

DAUBECHIES, I. **Ten lectures on wavelets**. Philadelphia: SIAM, 1992.

DEHGHANI, M. J.; HAJIZADEH, M.; HELFROUSH, M. S. Blind watermarking scheme based on remainder of distance vector of wavelet coefficients. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SIGNAL PROCESSING SYSTEMS, 2010., 2010. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2010. v.3, p.V3–4.

DERMEVAL, D.; COELHO, J. A. d. M.; BITTENCOURT, I. I. Mapeamento sistemático e revisão sistemática da literatura em informática na educação. **JAQUES, Patrícia Augustin; SIQUEIRA; Sean; BITTENCOURT, Ig; PIMENTEL, Mariano.(Org.) Metodologia de Pesquisa Científica em Informática na Educação: Abordagem Quantitativa. Porto Alegre: SBC**, [S.l.], 2020.

DUAN, G.; HO, A. T.; ZHAO, X. A Novel non-redundant contourlet transform for robust image watermarking against non-geometrical and geometrical attacks. , [S.l.], 2008.

ERNAWAN, F.; KABIR, M. N. A robust image watermarking technique with an optimal DCT-psychovisual threshold. **IEEE Access**, [S.l.], v.6, p.20464–20480, 2018.

FAZLI, S.; MOEINI, M. A robust image watermarking method based on DWT, DCT, and SVD using a new technique for correction of main geometric attacks. **Optik**, [S.l.], v.127, n.2, p.964–972, 2016.

FOUDA, Y.; RAGAB, K. An efficient implementation of normalized cross-correlation image matching based on pyramid. In: INTERNATIONAL JOINT CONFERENCE ON

AWARENESS SCIENCE AND TECHNOLOGY UBI-MEDIA COMPUTING (ICAST 2013 UMEDIA 2013), 2013., 2013. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2013. p.98–103.

GAFSI, M.; ABBASSI, N.; AMDOUNI, R.; HAJJAJI, M. A.; MTIBAA, A. Hardware implementation of the Haar 2D discrete wavelet transform with an application to image watermarking. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCED SYSTEMS AND EMERGENT TECHNOLOGIES (IC$_A SET), 2022., 2022.$**Anais...**$[S.l. : s.n.], 2022.p.324 - -329.$

GEORGE, G.; OOMMEN, R. M.; SHELLY, S.; PHILIPOSE, S. S.; VARGHESE, A. M. A Survey on Various Median Filtering Techniques For Removal of Impulse Noise From Digital Image. In: CONFERENCE ON EMERGING DEVICES AND SMART SYSTEMS (ICEDSS), 2018., 2018. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2018. p.235–238.

GONZALEZ, R.; FAISAL, Z. **Digital Image Processing Second Edition**. [S.l.: s.n.], 2019.

GONZALEZ, R.; WOODS, R. **Processamento Digital De Imagens**. [S.l.]: ADDISON WESLEY BRA, 2009. 334p.

GROUP, C. V. **Test Images**. Disponível em: <https://ccia.ugr.es/cvg/index2.php>.

GROUP, C. V. **Test Images**. Disponível em: <https://ccia.ugr.es/cvg/index2.php>.

GUPTA, V. Low-power digital signal processing using approximate adders. **IEEE transactions on computer-aided design of integrated circuits and systems**, [S.l.], v.32, n.1, p.124–137, 2013.

HAJJAJI, M. A.; GAFSI, M.; BEN ABDELALI, A.; MTIBAA, A. FPGA implementation of digital images watermarking system based on discrete Haar wavelet transform. **Security and Communication Networks**, [S.l.], 2019.

HAN, J. Introduction to approximate computing. In: IEEE 34TH VLSI TEST SYMPOSIUM (VTS), 2016., 2016, Los Alamitos, CA, USA. **Anais...** IEEE Computer Society, 2016. p.1–1.

HAN, J.; ORSHANSKY, M. Approximate computing: An emerging paradigm for energy-efficient design. In: IEEE EUROPEAN TEST SYMPOSIUM (ETS), 18., 2013. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2013. p.1–6.

HE, X. Subjective Evaluation of Image Color Damage Based on JPEG Compression. In: FOURTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMMUNICATION SYSTEMS AND NETWORK TECHNOLOGIES, 2014., 2014. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2014. p.838–842.

HENKEL, J.; LI, H.; RAGHUNATHAN, A.; TAHOORI, M. B.; VENKATARAMANI, S.; YANG, X.; ZERVAKIS, G. Approximate Computing and the Efficient Machine Learning Expedition. In: IEEE/ACM INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTER AIDED DESIGN (ICCAD), 2022., 2022. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2022. p.1–9.

IRTIJA, N.; ANAGNOSTOPOULOS, I.; ZERVAKIS, G.; TSIROPOULOU, E. E.; AMROUCH, H.; HENKEL, J. Energy Efficient Edge Computing Enabled by Satisfaction Games and Approximate Computing. **IEEE Transactions on Green Communications and Networking**, [S.l.], v.6, n.1, p.281–294, 2022.

JAIN, R.; KUMAR, M.; JAIN, A. K.; JAIN, M. Digital Image Watermarking using Hybrid DWT-FFT technique with different attacks. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMMUNICATIONS AND SIGNAL PROCESSING (ICCSP), 2015., 2015. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2015. p.0672–0675.

JANA, J.; TRIPATHI, S.; CHOWDHURY, R. S.; BHATTACHARYA, A.; BHAUMIK, J. An Area Efficient VLSI Architecture for 1-D and 2-D Discrete Wavelet Transform (DWT) and Inverse Discrete Wavelet Transform (IDWT). In: DEVICES FOR INTEGRATED CIRCUIT (DEVIC), 2021., 2021. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2021. p.378–382.

JAYARAMAN, S.; ESAKKIRAJAN, S.; VEERAKUMAR, T. **Digital Image Processing**. [S.l.]: Tata McGraw Hill Education, 2009.

JIMSON, N.; HEMACHANDRAN, K. DFT Based Coefficient Exchange Digital Image Watermarking. In: SECOND INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTELLIGENT COMPUTING AND CONTROL SYSTEMS (ICICCS), 2018., 2018. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2018. p.567–571.

JRAD, M. S.; OUESLATI, A. E.; LACHIRI, Z. Compression's Methods based on Frequency and Time Frequency Transforms applied on DNA's images. In: INTERNATIONAL MULTI-CONFERENCE ON SYSTEMS, SIGNALS  DEVICES (SSD), 2019., 2019. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2019. p.12–17.

JYOTSNA; RAJPAL, N.; VISHWAKARMA, V. P. Face recognition using Symlet, PCA and cosine angle distance measure. In: NINTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONTEMPORARY COMPUTING (IC3), 2016., 2016. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2016. p.1–7.

KAGGLE. **256 x 256 iWildCam 2021 - Starter Notebook**. Disponível em: <https://www.kaggle.com/competitions/iwildcam2021-fgvc8>.

KAGGLE. **256 x 256 iWildCam 2021 - Starter Notebook**. Disponível em: <https://www.kaggle.com/competitions/iwildcam2021-fgvc8>.

KOCANDA, P.; KOS, A. Static and dynamic energy losses vs. temperature in different CMOS technologies. In: INTERNATIONAL CONFERENCE MIXED DESIGN OF INTEGRATED CIRCUITS SYSTEMS (MIXDES), 2015., 2015. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2015. p.446–449.

KRISHNASWAMY, R.; NIRMALADEVI, S. EFFICIENT MEDICAL IMAGE COMPRESSION BASED ON INTEGER WAVELET TRANSFORM. In: SIXTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON BIO SIGNALS, IMAGES, AND INSTRUMENTATION (ICBSII), 2020., 2020. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2020. p.1–5.

KUMAR, U.; KARN, S.; NILESH; SHIVAHARE, B. D. Image Watermarking Techniques and Applications. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INNOVATIVE SUSTAINABLE COMPUTATIONAL TECHNOLOGIES (CISCT), 2023., 2023. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2023. p.1–4.

KUNDI, D. E. S.; BIAN, S.; KHALID, A.; WANG, C.; O'NEILL, M.; LIU, W. AxMM: Area and Power Efficient Approximate Modular Multiplier for R-LWE Cryptosystem. In: IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON CIRCUITS AND SYSTEMS (ISCAS), 2020., 2020. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2020. p.1–5.

LEE, J.; SEO, H.; SEOK, H.; KIM, Y. A Novel Approximate Adder Design Using Error Reduced Carry Prediction and Constant Truncation. **IEEE Access**, [S.l.], v.9, p.119939–119953, 2021.

LI, X.; KIM, S.-T.; LEE, I.-K. Robustness enhancement for image hiding algorithm in cellular automata domain. **Optics Communications**, [S.l.], v.356, p.186–194, 2015.

LIU, W.; GU, C.; O'NEILL, M.; QU, G.; MONTUSCHI, P.; LOMBARDI, F. Security in Approximate Computing and Approximate Computing for Security: Challenges and Opportunities. **Proceedings of the IEEE**, [S.l.], v.108, n.12, p.2214–2231, 2020.

LIU, W.; GU, C.; O'NEILL, M.; QU, G.; MONTUSCHI, P.; LOMBARDI, F. Security in Approximate Computing and Approximate Computing for Security: Challenges and Opportunities. **Proceedings of the IEEE**, [S.l.], v.108, n.12, p.2214–2231, 2020.

MAHDIANI, H.; AHMADI, A.; FAKHRAIE, S.; LUCAS, C. Bio-Inspired Imprecise Computational Blocks for Efficient VLSI Implementation of Soft-Computing Applications. **IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers**, [S.l.], v.57, n.4, p.850–862, April 2010.

MAJUMDAR, S. Comparative Analysis of Coiflet and Daubechies Wavelets Using Global Threshold for Image De-Noising. **International Journal of Advances in Engineering and Technology**, [S.l.], v.6, p.2247–2252, 11 2013.

MALANOWSKA, A.; MAZURCZYK, W.; ARAGHI, T. K.; MEGíAS, D.; KURIBAYASHI, M. Digital Watermarking—A Meta-Survey and Techniques for Fake News Detection. **IEEE Access**, [S.l.], v.12, p.36311–36345, 2024.

MathWorks. **Coiflet Wavelet**. acessado: 18-08-2024, `https://la.mathworks.com/help/wavelet/ref/coifwavf.html`.

MATHWORKS. **Índice de Similaridade Estrutural (SSIM) para Medir a Qualidade de uma Imagem - MATLAB ssim - MathWorks América Latina**. Acesso em: 03 de junho de 2024. Disponível em: <https://www.mathworks.com/help/images/ssim.html>.

MATHWORKS. **IMMSE - Erro quadrático médio**. Acesso em: 03 de junho de 2024. Disponível em: <https://la.mathworks.com/help/images/ref/immse.html>.

MEGÍAS, D.; KURIBAYASHI, M.; ROSALES, A.; MAZURCZYK, W. DISSIMILAR: Towards fake news detection using information hiding, signal processing and machine learning. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON AVAILABILITY, RELIABILITY AND SECURITY, 16., 2021. **Proceedings...** [S.l.: s.n.], 2021. p.1–9.

MICROSOFT. **Relatório da Microsoft revela que ameaças cibernéticas estão se tornando mais sofisticadas**. Disponível em: <https://news.microsoft.com/pt-br/features/relatorio-da-microsoft-revela-que-ameacas-ciberneticas-estao-se-tornando-mais-sofisticadas/>. Acesso em: setembro, 2020.

MISHRA, K. K.; DUBEY, A. K.; VARSHNEY, V.; PANDEY, K. P. An Energy Efficient 16T Hybrid-CMOS Full Adder using Novel Full Swing XNOR Logic. In: IEEE STUDENTS CONFERENCE ON ENGINEERING SYSTEMS (SCES), 2020., 2020. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2020. p.1–6.

MISHRA, V.; MITTAL, S.; MISHRA, N.; SINGHAL, R. Security Implications of Approximation: A Study of Trojan Attacks on Approximate Adders and Multipliers. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON VLSI DESIGN AND 2024 23RD INTERNATIONAL CONFERENCE ON EMBEDDED SYSTEMS (VLSID), 2024., 2024. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2024. p.511–516.

MISITI, M.; MISITI, Y.; OPPENHEIM, G.; POGGI, J.-M. Wavelet toolbox. **The MathWorks Inc., Natick, MA**, [S.l.], v.15, p.21, 1996.

MITTAL, S. A survey of techniques for approximate computing. **ACM Computing Surveys (CSUR)**, [S.l.], v.48, n.4, p.1–33, 2016.

NAWRIN, S. S. K.; SAHA, C. Differential Embedding and Chirikov Map based Image Watermarking in Transformed Domain. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON

COMPUTER, COMMUNICATION, CHEMICAL, MATERIALS AND ELECTRONIC ENGINEERING (IC4ME2), 2019., 2019. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2019. p.1–4.

NAYAK, K.; UPADHYAYA, D.; REGAZZONI, F.; POLIAN, I. On the Limitations of Logic Locking the Approximate Circuits. In: ASIAN HARDWARE ORIENTED SECURITY AND TRUST SYMPOSIUM (ASIANHOST), 2022., 2022. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2022. p.1–6.

NEEKHARA, P.; HUSSAIN, S.; ZHANG, X.; HUANG, K.; MCAULEY, J.; KOUSHANFAR, F. FaceSigns: semi-fragile neural watermarks for media authentication and countering deepfakes. **arXiv preprint arXiv:2204.01960**, [S.l.], 2022.

NIKOLAIDIS, N.; PITAS, I. Robust image watermarking in the spatial domain. **Signal processing**, [S.l.], v.66, n.3, p.385–403, 1998.

Ning Zhu; Goh, W. L.; Yeo, K. S. An enhanced low-power high-speed Adder For Error-Tolerant application. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON INTEGRATED CIRCUITS, 2009., 2009. **Proceedings...** [S.l.: s.n.], 2009. p.69–72.

NOMANI, T.; MOHSIN, M.; PERVAIZ, Z.; SHAFIQUE, M. xUAVs: Towards Efficient Approximate Computing for UAVs—Low Power Approximate Adders With Single LUT Delay for FPGA-Based Aerial Imaging Optimization. **IEEE Access**, [S.l.], v.8, p.102982–102996, 2020.

NOUIOUA, N.; SEDDIKI, A.; GHAZ, A. Blind Digital Watermarking Method Based on Quadtree Decomposition and Complex Wavelet Transform for Medical Application. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICAL, COMPUTER AND ENERGY TECHNOLOGIES (ICECET), 2022., 2022. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2022. p.1–5.

OHBUCHI, R.; MUKAIYAMA, A.; TAKAHASHI, S. A Frequency-Domain Approach to Watermarking 3D Shapes. In: COMPUTER GRAPHICS FORUM, 2002. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2002. v.21.

OLANITE, A.; MUSA, S. M. Reducing Power Dissipation in Adiabatic ECRL Inverter Based on All-NMOS Transistors. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GREEN ENERGY, COMPUTING AND SUSTAINABLE TECHNOLOGY (GECOST), 2024., 2024. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2024. p.174–179.

PAIM, G.; ROCHA, L. M. G.; DA COSTA, E. A. C.; BAMPI, S. Maximizing the Power-Efficiency of the Approximate Pruned Modified Rounded DCT Exploiting Approximate Adder Compressors. In: IEEE INTERNATIONAL NEW CIRCUITS AND SYSTEMS CONFERENCE (NEWCAS), 2019., 2019. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2019. p.1–4.

PAIM, G.; ROCHA, L. M. G.; SANTANA, G. M.; SOARES, L. B.; COSTA, E. A. C. da; BAMPI, S. Power-, Area-, and Compression-Efficient Eight-Point Approximate 2-D Discrete Tchebichef Transform Hardware Design Combining Truncation Pruning and Efficient Transposition Buffers. **IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers**, [S.l.], v.66, n.2, p.680–693, 2019.

PAIM, G.; SOARES, L. B.; FERREIRA, R.; COSTA, E.; BAMPI, S. Pruning and approximation of coefficients for power-efficient 2-D Discrete Tchebichef Transform. In: NEWCAS, 2017. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2017. p.25–28.

PARTHASARATHY, M.; SRINIVASAN, B. Increased Security in Image Cryptography using Wavelet Transforms. **Indian Journal of Science and Technology**, [S.l.], v.8, 06 2015.

PASHAEIFAR, M.; KAMAL, M.; AFZALI-KUSHA, A.; PEDRAM, M. A Theoretical Framework for Quality Estimation and Optimization of DSP Applications Using Low-Power Approximate Adders. **IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers**, [S.l.], v.66, n.1, p.327–340, 2019.

PEREIRA, D.; NASCIMENTO, M. Zanchetta do; SCOTT, A. L.; KURASHIMA, C. Avaliação de Filtros Wavelets Aplicados no Pré-Processamento de Imagens Mamográficas. , [S.l.], 01 2008.

PEXARAS, K.; KARYBALI, I. G.; KALLIGEROS, E. Optimization and hardware implementation of image and video watermarking for Low-Cost applications. **IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers**, [S.l.], v.66, n.6, p.2088–2101, 2019.

PINDOO, I. A.; SINGH, T.; SINGH, A.; CHAUDHARY, A.; KUMAR, P. M. Power dissipation reduction using adiabatic logic techniques for CMOS inverter circuit. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTING, COMMUNICATION AND NETWORKING TECHNOLOGIES (ICCCNT), 2015., 2015. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2015. p.1–6.

POTDAR, V.; HAN, S.; CHANG, E. A survey of digital image watermarking techniques. In: INDIN '05. 2005 3RD IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRIAL INFORMATICS, 2005., 2005. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2005. p.709–716.

POZZEBON, G. G. **Transformada Wavelet e Redes Neurais Artificiais na Análise de Sinais Relacionados à Qualidade da Energia Elétrica**. 2009. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) — Universidade Federal de Santa Maria.

RAHMAN, M. M. A dwt, dct and svd based watermarking technique to protect the image piracy. **CoRR**, [S.l.], v.abs/1307.3294, 2013.

RASHID, O.; AMIN, A.; LONE, M. R. Performance Analysis of DWT Families. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTELLIGENT SUSTAINABLE SYSTEMS (ICISS), 2020., 2020. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2020. p.1457–1463.

RATHORE, S.; SHARMA, P. K.; LOIA, V.; JEONG, Y.-S.; PARK, J. H. Social network security: Issues, challenges, threats, and solutions. **Information Sciences**, [S.l.], v.421, p.43–69, 2017.

RAVEENDRAN, S.; EDAVOOR, P. J.; KUMAR, N. Y. B.; VASANTHA, M. H. An Approximate Low-Power Lifting Scheme Using Reversible Logic. **IEEE Access**, [S.l.], v.8, p.183367–183377, 2020.

ROSA, M. Exploring Approximate Arithmetic Computing in Hardware Security Applications. In: PH.D. THESIS PROPOSAL, 2023. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2023.

ROSA, M. M. da; SEIDEL, H. B.; PAIM, G.; COSTA, E. A. C. da; ALMEIDA, S.; BAMPI, S. An Energy-Efficient Haar Wavelet Transform Architecture for Respiratory Signal Processing. **IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs**, [S.l.], v.68, n.2, p.597–601, 2021.

ROSA, M.; PAIM, G.; SOARES, R.; COSTA, E.; BAMPI, S. Discrete Haar Wavelet Transform Hardware Design for Energy-Efficient Image Watermarking. **29th IEEE International Conference on Electronics Circuits and Systems (ICECS)**, [S.l.], 2022.

S, S. K.; HEGDE, S.; P, S.; P, V. R. Exploring the Effectiveness of Steganography Techniques: A Comparative Analysis. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SMART DATA INTELLIGENCE (ICSMDI), 2023., 2023. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2023. p.181–186.

SCHIAVON, T.; PAIM, G.; FONSECA, M.; COSTA, E.; ALMEIDA, S. Exploiting adder compressors for power-efficient 2-D approximate DCT realization. In: IEEE 7TH LATIN AMERICAN SYMPOSIUM ON CIRCUITS  SYSTEMS (LASCAS), 2016., 2016. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2016. p.383–386.

SEENIVASAGAM, V.; VELUMANI, R. A QR code based zero-watermarking scheme for authentication of medical images in teleradiology cloud. **Computational and mathematical methods in medicine**, [S.l.], v.2013, 2013.

SEIDEL, H. B.; ROSA, M. M. A. da; PAIM, G.; COSTA, E. A. C. da; ALMEIDA, S. J. M.; BAMPI, S. Approximate Pruned and Truncated Haar Discrete Wavelet Transform VLSI Hardware for Energy-Efficient ECG Signal Processing. **IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers**, [S.l.], v.68, n.5, p.1814–1826, 2021.

SEIDEL, H. B.; ROSA, M. M. A. da; PAIM, G.; COSTA, E. A. C. da; ALMEIDA, S. J. M.; BAMPI, S. Approximate Pruned and Truncated Haar Discrete Wavelet Transform

VLSI Hardware for Energy-Efficient ECG Signal Processing. **IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers**, [S.l.], v.68, n.5, p.1814–1826, 2021.

SILVEIRA, B.; PAIM, G.; ABREU, B.; GRELLERT, M.; DINIZ, C. M.; COSTA, E. A. C. da; BAMPI, S. Power-Efficient Sum of Absolute Differences Hardware Architecture Using Adder Compressors for Integer Motion Estimation Design. **IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers**, [S.l.], v.64, n.12, p.3126–3137, 2017.

SINGH, A. K. Improved hybrid algorithm for robust and imperceptible multiple watermarking using digital images. **Multimedia Tools and Applications**, [S.l.], v.76, n.6, p.8881–8900, 2017.

SINGH, A. K.; DAVE, M.; MOHAN, A. Hybrid technique for robust and imperceptible multiple watermarking using medical images. **Multimedia Tools and Applications**, [S.l.], v.75, n.14, p.8381–8401, 2016.

SINGH, A. K.; KUMAR, B.; SINGH, S. K.; GHRERA, S.; MOHAN, A. Multiple watermarking technique for securing online social network contents using back propagation neural network. **Future Generation Computer Systems**, [S.l.], v.86, p.926–939, 2018.

SINGHAL, A.; SINGH, R. P.; TENGURIA, M. Comparison of different wavelets for watermarking of colored images. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRONICS COMPUTER TECHNOLOGY, 2011., 2011. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2011. v.3, p.187–191.

SOARES, L. B.; ROSA, M. M. A. da; DINIZ, C. M.; COSTA, E. A. C. da; BAMPI, S. Design Methodology to Explore Hybrid Approximate Adders for Energy-Efficient Image and Video Processing Accelerators. **IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers**, [S.l.], v.66, n.6, p.2137–2150, 2019.

SONG, J. L.; CHEN, M. J.; JIANG, C.; HUANG, Y. X.; LIU, Q.; MENG, Y.; MO, W. Q.; DONG, K. F.; JIN, F. Research on Image Denoising Method Based on Wavelet Transform. In: CHINESE CONTROL CONFERENCE (CCC), 2018., 2018. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2018. p.7354–7358.

SONG, J.; SONG, J.; BAO, Y. A blind digital watermark method based on SVD and chaos. **Procedia Engineering**, [S.l.], v.29, p.285–289, 2012.

SONIA, M. S.; SUMATHI, S. A Comparative Analysis of Wavelet Transforms for Denoising MRI Brain Images. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWER, ENERGY, CONTROL AND TRANSMISSION SYSTEMS (ICPECTS), 2022., 2022. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2022. p.1–5.

STANLEY-MARBELL, P.; ALAGHI, A.; CARBIN, M.; DARULOVA, E.; DOLECEK, L.; GERSTLAUER, A.; GILLANI, G.; JEVDJIC, D.; MOREAU, T.; CACCIOTTI, M.; DAGLIS, A.; JERGER, N. E.; FALSAFI, B.; MISAILOVIC, S.; SAMPSON, A.; ZUFFEREY, D. Exploiting Errors for Efficiency: A Survey from Circuits to Applications. **ACM Computing Surveys**, New York, NY, USA, v.53, n.3, June 2020.

STOLLNITZ, E. J.; DEROSE, T. D.; SALESIN, D. H. **Wavelets for computer graphics**: theory and applications. San Francisco, CA, USA: Morgan Kaufmann Publishers Inc., 1996.

STRNADEL, J. Analyzing Dynamic Aspects of AxC Systems by Means of Statistical Model Checking. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON DESIGN AND DIAGNOSTICS OF ELECTRONIC CIRCUITS AND SYSTEMS (DDECS), 2022., 2022. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2022. p.88–93.

SU, Q.; NIU, Y.; ZOU, H.; ZHAO, Y.; YAO, T. A blind double color image watermarking algorithm based on QR decomposition. **Multimedia tools and applications**, [S.l.], v.72, n.1, p.987–1009, 2014.

SUBHEDAR, M. S.; MANKAR, V. H. Current status and key issues in image steganography: A survey. **Computer Science Review**, [S.l.], v.13-14, p.95–113, 2014.

SWATHI, B.; KUMARI, T. M. Iris biometric security using watermarking and visual cryptography. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWER, CONTROL, SIGNALS AND INSTRUMENTATION ENGINEERING (ICPCSI), 2017., 2017. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2017. p.1218–1220.

TAJ, T.; SARKAR, M. A Survey on Embedding Iris Biometric Watermarking for User Authentication. **Cloud Computing and Data Science**, [S.l.], v.4, n.2, p.203–211, Jul. 2023. Accessed: 2024-06-07.

TASKOVSKI, D.; BOGDANOVA, S.; BOGDANOV, M. A low resolution content based watermarking of images in wavelet domain. In: ISPA 2001. PROCEEDINGS OF THE 2ND INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON IMAGE AND SIGNAL PROCESSING AND ANALYSIS. IN CONJUNCTION WITH 23RD INTERNATIONAL CONFERENCE ON INFORMATION TECHNOLOGY INTERFACES (IEEE CAT., 2001. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2001. p.604–608.

THABIT, R.; KHOO, B. E. Medical image authentication using SLT and IWT schemes. **Multimedia Tools and Applications**, [S.l.], v.76, n.1, p.309–332, 2017.

THAKUR, S.; SINGH, A. K.; GHRERA, S. P. NSCT domain–based secure multiple-watermarking technique through lightweight encryption for medical images. **Concurrency and Computation: Practice and Experience**, [S.l.], v.33, n.2, p.e5108, 2021.

THIAGARAJAN, C.; SAMUNDISWARY, P. A Survey on Energy Efficient, Harvesting Optimization Approaches in IoT system. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTING, COMMUNICATION AND POWER TECHNOLOGY (IC3P), 2022., 2022. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2022. p.129–132.

TRABELSI, R.; NOURI, K.; AMMARI, I. Enhancing Traffic Sign Recognition Through Daubechies Discret Wavelet Transform and Convolutional Neural Networks. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCED SYSTEMS AND EMERGENT TECHNOLOGIES (IC$_ASET), 2023., 2023.$**Anais...**$[S.l. : \ s.n.], 2023.p.1 - -6.$

TRAIOLA, M.; VIRAZEL, A.; GIRARD, P.; BARBARESCHI, M.; BOSIO, A. A Survey of Testing Techniques for Approximate Integrated Circuits. **Proceedings of the IEEE**, [S.l.], v.108, n.12, p.2178–2194, 2020.

TSAI, K.-L.; CHANG, Y.-J.; WANG, C.-H.; CHIANG, C.-T. Accuracy-Configurable Radix-4 Adder With a Dynamic Output Modification Scheme. **IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers**, [S.l.], v.68, n.8, p.3328–3336, 2021.

TSAI, M.-J.; LIN, C.-T.; LIU, J. A wavelet-based watermarking scheme using double wavelet tree energy modulation. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON IMAGE PROCESSING, 2008., 2008. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2008. p.417–420.

TSUI, T. K.; ZHANG, X.-P.; ANDROUTSOS, D. Color image watermarking using multidimensional Fourier transforms. **IEEE Transactions on Information Forensics and security**, [S.l.], v.3, n.1, p.16–28, 2008.

VENKATARAMANI, S.; CHAKRADHAR, S. T.; ROY, K.; RAGHUNATHAN, A. Approximate computing and the quest for computing efficiency. In: ACM/EDAC/IEEE DESIGN AUTOMATION CONFERENCE (DAC), 2015., 2015. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2015. p.1–6.

VERMA, D.; PARGAIEN, S.; BHATT, U. M.; CHAUBE, S. Analysis of Hybrid Wavelet Transformed Images to Improve Image Pixel Quality. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON MACHINE LEARNING, BIG DATA, CLOUD AND PARALLEL COMPUTING (COM-IT-CON), 2022., 2022. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2022. v.1, p.184–190.

VERMA, K.; BRISK, P.; IENNE, P. Variable latency speculative addition: A new paradigm for arithmetic circuit design. In: DESIGN, AUTOMATION AND TEST IN EUROPE (DATE), 2008., 2008. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2008. p.1250–1255.

WANG, Y.; DOHERTY, J. F.; VAN DYCK, R. E. A wavelet-based watermarking algorithm for ownership verification of digital images. **IEEE transactions on image processing**, [S.l.], v.11, n.2, p.77–88, 2002.

YAN, F.; HUANG, H.; YU, X. A multi-watermarking scheme for verifying medical image integrity and authenticity in the Internet of Medical Things. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, [S.l.], p.1–1, 2022.

YELLU, P.; YU, Q. Can We Securely Use Approximate Computing? In: IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON CIRCUITS AND SYSTEMS (ISCAS), 2020., 2020. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2020. p.1–5.

ZHOU, W.; BOVIK, A. Mean squared error: Love it or leave it? A new look at Signal Fidelity Measures. **Signal Processing Magazine, IEEE**, [S.l.], v.26, p.98–117, 01 2009.

ZHU, N.; GOH, W. L.; ZHANG, W.; YEO, K. S.; KONG, Z. H. Design of Low-Power High-Speed Truncation-Error-Tolerant Adder and Its Application in Digital Signal Processing. **IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems**, [S.l.], v.18, n.8, p.1225–1229, 2010.

ZHU, S.-m.; LIU, J.-m. Adaptive image watermarking scheme in contourlet transform using singular value decomposition. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCED COMMUNICATION TECHNOLOGY, 2009., 2009. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2009. v.2, p.1216–1219.