



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ELETRÔNICA E SISTEMAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

FELIPE ALBERTO BARBOSA SIMÃO FERREIRA

**TÉCNICAS DE MARCA D'ÁGUA NO DOMÍNIO DA TRANSFORMADA PARA  
IMAGENS PLENÓPTICAS**

Recife

2020

FELIPE ALBERTO BARBOSA SIMÃO FERREIRA

**TÉCNICAS DE MARCA D'ÁGUA NO DOMÍNIO DA TRANSFORMADA PARA  
IMAGENS PLENÓPTICAS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco como parte dos requisitos parciais para obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

**Área de Concentração:** Comunicações.

**Orientador:** Prof. Dr. Juliano Bandeira Lima.

Recife

2020

Catálogo na fonte  
Bibliotecária Margareth Malta, CRB-4 / 1198

F383t      Ferreira, Felipe Alberto Barbosa Simão.  
Técnicas de marca d'água no domínio da transformada para imagens  
plenópticas / Felipe Alberto Barbosa Simão Ferreira. - 2020.  
154 folhas, il., gráfs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Juliano Bandeira Lima.  
Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2020.  
Inclui Referências e Apêndices.

1. Engenharia Elétrica. 2. Imagens plenópticas. 3. Marca d'água  
digital. 4. Transformada de Fourier sobre grafos. 5. Transformada  
discreta do cosseno 4D. I. Lima, Juliano Bandeira (Orientador). II. Título.

UFPE

621.3 CDD (22. ed.)

BCTG/2021-23

FELIPE ALBERTO BARBOSA SIMÃO FERREIRA

**TÉCNICAS DE MARCA D'ÁGUA NO DOMÍNIO DA TRANSFORMADA  
PARA IMAGENS PLENÓPTICAS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco, como parte dos requisitos parciais para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Aprovada em: 21/12/2020.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Juliano Bandeira Lima (Orientador e Examinador Interno)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Prof. Dr. Ricardo Menezes Campello de Souza (Examinador Interno)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Prof. Dr. Carlos Alexandre Barros de Mello (Examinador Externo)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Prof. Dr. Sílvio de Barros Melo (Examinador Externo)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Prof. Dr. Fernando José Ribeiro Sales (Examinador Externo)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Prof. Dr. João Marcelo Xavier Natário Teixeira (Examinador Externo)  
Universidade Federal de Pernambuco

*Dedico esse trabalho à minha família.*

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais, Sr. Francisco Alberto Simão Ferreira e Sra. Sineide Barboza Simão Ferreira, por todo apoio que me deram e por sempre acreditarem em mim.

Ao meu orientador, Professor Juliano Bandeira, pela oportunidade da realização deste trabalho, por todo o suporte e orientação, e pelo exemplo de professor, orientador e pesquisador, no qual busco me espelhar para meu futuro acadêmico.

À minha esposa, Emilly Pereira Alves, que esteve presente durante todo meu mestrado e doutorado, e me deu apoio em decisões importantes dentro e fora da academia, além de sempre torcer por mim e sempre me incentivar a dar o meu melhor.

Aos amigos anteriores e aos que ganhei no doutorado, que sempre estiveram presentes e dispostos a ajudar: Rodrigo Monteiro, Rodrigo Melo, Keila Santos, Pedro Henrique, Luiz Felipe, Ravi Barreto, Carlos Eduardo, Guilherme Boaviagem e tantos outros.

A todos os professores que participaram da minha formação dentro e fora do programa de pós-graduação.

À FACEPE (Fundação de Amparo a Ciência e Tecnologia), órgão financiador deste trabalho.

## RESUMO

A necessidade de lidar com a função plenóptica, que é um modelo para representação de informação luminosa, tem impulsionado o surgimento de novas tecnologias para captação e exibição de imagens e vídeos. Essa forma de representação permite a criação de conteúdos mais imersivos e fidedignos de uma cena real, quando comparada às formas convencionais. Dentre os tipos de imagens plenópticas, encontram-se as nuvens de pontos 3D e as imagens de *light field*, que são adquiridas a partir de processos e mecanismos particulares, e possuem diversas aplicações interessantes em diferentes contextos. Vários trabalhos vêm sendo publicados no âmbito de codificação, compressão e renderização desses objetos, porém, mecanismos dedicados à sua proteção têm sido pouco explorados. Dentre as técnicas voltadas à proteção de direitos autorais e à identificação de modificações em mídias digitais, como imagem, áudio e vídeo, encontra-se a marca d'água digital. No entanto, as técnicas existentes atualmente não podem ser aplicadas ou precisam ser adaptadas às características inerentes das imagens plenópticas. Este trabalho apresenta duas técnicas de marca d'água no domínio da transformada para nuvens de pontos 3D e imagens de *light field*. Uma das técnicas é um algoritmo de marca d'água não-cego, cujo principal cenário de aplicação está relacionado à proteção de direitos autorais de nuvens de pontos. O método proposto utiliza ferramentas de processamento de sinais sobre grafos (GSP, do inglês *graph signal processing*), empregando, em particular, a transformada de Fourier sobre grafos (GFT, do inglês *graph Fourier transform*). A segunda técnica proposta utiliza a propriedade de compactação de energia da transformada discreta do cosseno 4-dimensional (4D-DCT, do inglês *4-dimensional discrete cosine transform*) para aplicação de uma marca d'água cega em imagens de *light field*. Nesse contexto, também são propostas estratégias para ordenar os coeficientes de um bloco 4D com o objetivo de obter uma maior concentração de energia nos coeficientes espectrais de ordens mais baixas. Mais especificamente, são apresentadas seis alternativas de algoritmos para realizar a referida ordenação. Resultados de simulação das técnicas propostas com relação à imperceptibilidade quando da inserção da marca e à robustez contra ataques são apresentados e discutidos. Os métodos de marca d'água para nuvens de pontos 3D e imagens de *light field* promoveram baixa degradação dos modelos testados, nos quais foi possível inserir marcas com até 16.384 *bits* e 4.194.304 *bits*, respectivamente, e obter valores de PSNR que variaram de 28 dB a 80 dB, aproximadamente. Os métodos também se mostraram robustos a diversos ataques e apresentaram superioridade quando comparados a outros já publicados na literatura. Especificamente, quanto ao método para imagens de *light field*, os algoritmos propostos para ordenação dos coeficientes da 4D-DCT foram eficazes e apresentaram um número de inversões médio próximo ou menor que o obtido pelo zig-zag padrão do JPEG.

Palavras-chave: Imagens plenópticas. Marca d'água digital. Transformada de Fourier sobre grafos. Transformada discreta do cosseno 4D.

## ABSTRACT

The need to deal with the plenoptic function, which is a model for representing luminous information, has driven the emergence of new technologies for capturing and displaying images and videos. This form of representation allows the creation of more immersive and reliable content of a real scene when compared to conventional ones. Among the types of plenoptic images, there are 3D point clouds and light field images, which are acquired employing particular processes and mechanisms, and have several interesting applications in different contexts. Several works have been published in the scope of coding, compression, and rendering of these objects, however, mechanisms dedicated to their protection have been little explored. Among the techniques aimed at protecting copyright and identifying changes in digital media, such as image, audio, and video, there is the digital watermarking. However, existing techniques cannot be applied or need to be adapted to the inherent characteristics of plenoptic images. This work introduces two watermarking techniques in the transform domain for 3D point clouds and light field images. One of the techniques is a non-blind watermarking algorithm, whose main application scenario is related to the copyright protection of point clouds. The proposed method uses graph signal processing (GSP) tools, employing, in particular, the graph Fourier transform (GFT). The second proposed technique uses the energy-compacting property of the 4-dimensional discrete cosine transform (4D-DCT) to apply a blind watermark to light field images. In this context, strategies are also proposed to order the coefficients of a 4D block to obtain a higher energy compaction in the lower order spectral coefficients. More specifically, six alternative algorithms are presented to perform this ordering. Simulation results of the proposed techniques concerning the imperceptibility when inserting the watermark and their robustness against attacks are presented and discussed. The watermarking methods for 3D point clouds and light field images led to a low degradation of the tested models, where it was possible to insert watermarks of up to 16384 bits and 4194304 bits, respectively, and obtain PSNR values that varied between 28 dB and 80 dB, approximately. The methods proved to be robust to several attacks and showed superiority when compared to other algorithms published in the literature published in the literature. Specifically, as to the method for light field images, the proposed algorithms for ordering the 4D-DCT coefficients were effective and presented an average number of inversions close to or less than that obtained by the standard JPEG zig-zag.

**Keywords:** Plenoptic images. Digital watermarking. Graph Fourier transform. 4D discrete cosine transform.

## LISTA DE FIGURAS

|           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |    |
|-----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1  | – Modelos de câmera baseados em informação direcional. . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 24 |
| Figura 2  | – Exemplo de um <i>array</i> de câmeras utilizado para capturar imagens de <i>light field</i> e uma imagem capturada por este tipo de sistema . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 25 |
| Figura 3  | – Esquema de captação da informação de luz em uma câmera <i>lenslet</i> . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 26 |
| Figura 4  | – Imagem bruta obtida por uma câmera <i>lenslet</i> e uma porção da mesma imagem expandida. . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 26 |
| Figura 5  | – Visualização de todas as vistas de uma imagem de <i>light field</i> capturada por um dispositivo com microlentes ( <i>lenslet</i> ), em que cada vista é referenciada por um sistema de coordenadas $(s, t)$ , e a vista central expandida, em que cada <i>pixel</i> é referenciado por um sistema de coordenadas $(u, v)$ . . . . .                                                                                                                                                                          | 27 |
| Figura 6  | – Modelos de nuvens de pontos 3D. . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 27 |
| Figura 7  | – Sensor LIDAR e nuvem de pontos construída por um veículo autônomo utilizando um desses sensores. . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 28 |
| Figura 8  | – Exemplos de sinais sobre (a) um grafo em anel direcionado, (b) um grafo em grade regular não direcionado e (c) um grafo representando as cidades do Nordeste brasileiro, sobre o qual foi definido um sinal de medições de temperatura a partir de 1º de Fevereiro de 2012, recuperadas do Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP), disponível em: <a href="http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep">http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep</a> . . . . . | 40 |
| Figura 9  | – (a) Modelos de nuvem de pontos 3D e (b) um grafo inferido a partir da proximidade (5 vizinhos mais próximos) dos pontos deste modelo. . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 41 |
| Figura 10 | – Análise do espectro de frequência para (a) uma nuvem de pontos colorida artificialmente. Em (b) é apresentado o espectro no domínio da frequência em função dos autovalores. . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 42 |
| Figura 11 | – Modelos de nuvem de pontos coloridos com sinal reconstruído a partir de versões degradadas dos coeficientes da GFT. (a) SNR do sinal degradado = 30 dB; (a) SNR do sinal degradado = 20 dB; (a) SNR do sinal degradado = 10 dB . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                      | 43 |
| Figura 12 | – Fluxograma da etapa de inserção. . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 46 |
| Figura 13 | – Tempo, em segundos, para decomposição da matriz Laplaciana de um grafo em relação à quantidade de vértices. . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 48 |
| Figura 14 | – Fluxograma da etapa de extração. . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 51 |
| Figura 15 | – Modelos de nuvem de pontos 3D utilizados nas simulações: (a) <i>Bunny</i> (35.947 pontos), (b) <i>Guy</i> (66.860 pontos), (c) <i>Vase</i> (147.420 pontos) e (d) <i>Lion statue</i> (536.240 pontos). . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 54 |
| Figura 16 | – Imagem binária utilizada como marca d'água. . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 55 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 17 – Versões originais – (a) <i>Bunny</i> , (c) <i>Guy</i> , (e) <i>Vase</i> e (g) <i>Lion Statue</i> – e marcadas – (b) <i>Bunny</i> , (d) <i>Guy</i> , (f) <i>Vase</i> e (h) <i>Lion Statue</i> – de cada modelo de nuvem de pontos utilizado neste trabalho. . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 57 |
| Figura 18 – Versões marcadas do modelo 3D <i>Guy</i> com diferentes valores de $\beta$ – (a) $\beta = 0,1$ ; (b) $\beta = 0,2$ ; (c) $\beta = 0,5$ ; (d) $\beta = 1$ . Os valores foram escolhidos de forma que os modelos marcados se tornem visualmente degradados. Os resultados de PSNR e RMSE são (a) PSNR: 21,39 dB; RSME: 21,72; (b) PSNR: 15,94 dB; RSME: 40,67; (c) PSNR: 9,98 dB; RSME: 80,81 e (d) PSNR: 7,56 dB; RSME: 106,69. . . . .                                                                                                                                                                             | 59 |
| Figura 19 – Ataques de transformações afins no modelo de nuvem de pontos <i>Vase</i> e suas respectivas marcas d'água extraídas. As marcas das figuras (d), (e) e (f) foram extraídas, respectivamente, dos modelos atacados em (a), (b) e (c). Para as três marcas extraídas, o valor de PSNR tende a infinito e o valor de BER é 0 (zero). Os ataques realizados foram (a) rotação, (b) escalonamento e (c) cisalhamento. . . . .                                                                                                                                                                                            | 60 |
| Figura 20 – Imagens de marcas d'água extraídas (tamanho $32 \times 32$ ) e respectivos valores de PSNR (dB). As marcas d'água apresentadas foram extraídas do modelo de nuvem de pontos <i>Bunny</i> atacado com ruídos de diferentes amplitudes. Os valores de percentual de ruído utilizado no ataque e respectivo resultado de PSNR foram (a) ruído: 0%, PSNR: tende a infinito; (b) ruído: 2%, PSNR: 30,10 dB; (c) ruído: 5%, PSNR: 19,31 dB; (d) ruído: 10%, PSNR: 18,34 dB; (e) ruído: 20%, PSNR: 13,57 dB; (f) ruído: 30%, PSNR: 8,96 dB; (g) ruído: 40%, PSNR: 7,32 dB; (h) ruído: 50%, PSNR: 6,62 dB. . . . .         | 62 |
| Figura 21 – Imagens de marcas d'água extraídas (tamanho $64 \times 64$ ) e respectivos valores de PSNR (dB). As marcas d'água apresentadas foram extraídas do modelo de nuvem de pontos <i>Guy</i> atacado com ruídos de diferentes amplitudes. Os valores de percentual de ruído utilizado no ataque e respectivo resultado de PSNR foram (a) ruído: 0%, PSNR: tende a infinito; (b) ruído: 2%, PSNR: 30,10 dB; (c) ruído: 5%, PSNR: 18,64 dB; (d) ruído: 10%, PSNR: 17,80 dB; (e) ruído: 20%, PSNR: 11,45 dB; (f) ruído: 30%, PSNR: 8,33 dB; (g) ruído: 40%, PSNR: 6,75 dB; (h) ruído: 50%, PSNR: 5,81 dB. . . . .           | 63 |
| Figura 22 – Imagens de marcas d'água extraídas (tamanho $128 \times 128$ ) e respectivos valores de PSNR (dB). As marcas d'água apresentadas foram extraídas do modelo de nuvem de pontos <i>Lion Statue</i> atacado com ruídos de diferentes amplitudes. Os valores de percentual de ruído utilizado no ataque e respectivo resultado de PSNR foram (a) ruído: 0%, PSNR: tende a infinito; (b) ruído: 2%, PSNR: 32,14 dB; (c) ruído: 5%, PSNR: 19,81 dB; (d) ruído: 10%, PSNR: 19,33 dB; (e) ruído: 20%, PSNR: 14,11 dB; (f) ruído: 30%, PSNR: 9,20 dB; (g) ruído: 40%, PSNR: 7,03 dB; (h) ruído: 50%, PSNR: 5,93 dB. . . . . | 64 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 23 – Modelo <i>Guy</i> após ataques de recorte com diferentes valores percentuais de pontos removidos e a respectiva imagem de marca d'água de tamanho $64 \times 64$ extraída após o ataque. As marcas d'água apresentadas nas figuras (b), (d), (f), (h) e (j) foram extraídas dos modelos apresentados nas figuras (a), (c), (e), (g) e (i), respectivamente. Os valores de PSNR das marcas extraídas são: (b) tende a infinito, (d) tende a infinito, (f) 12,12 dB, (h) 7,83 dB e (j) 5,90 dB. Os valores de percentual de recorte foram: (a) 5%, (c) 15%, (e) 30%, (g) 40% e (i) 50%. . . . .                                                                                                      | 67 |
| Figura 24 – Ilustração da (a) nuvem de pontos, <i>Vase</i> , sob ataque de adição de ruído (50% de amplitude) e (b) marca d'água extraída (PSNR: tende a infinito, BER: 0).                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 68 |
| Figura 25 – Valores de PSNR de modelos marcados com marcas d'água de diferentes tamanhos. Nos modelos <i>Bunny</i> , <i>Guy</i> , <i>Vase</i> e <i>Lion Statue</i> , foram inseridas marcas d'água de tamanho 1.024 a 2.154 <i>bits</i> (de 10 em 10), 4.096 a 5.008 <i>bits</i> (de 8 em 8), 4.096 a 11.056 <i>bits</i> (de 60 em 60) e 16.384 a 32.044 (de 135 em 135), respectivamente; os limites inferiores das barras indicam os respectivos PSNRs obtidos após a inserção da respectiva maior marca d'água e os limites superiores indicam os resultados obtidos após a inserção da respectiva menor marca d'água. São exibidas gráficos de PSNR para (a) $\beta = 0,01$ e (b) $\beta = 0,02$ .         | 69 |
| Figura 26 – Valores de RMSE de modelos marcados com marcas d'água de diferentes tamanhos. Nos modelos <i>Bunny</i> , <i>Guy</i> , <i>Vase</i> e <i>Lion Statue</i> , foram inseridas marcas d'água de tamanho 1.024 a 2.154 <i>bits</i> (de 10 em 10), 4.096 a 5.008 <i>bits</i> (de 8 em 8), 4.096 a 11.056 <i>bits</i> (de 60 em 60) e 16.384 a 32.044 (de 135 em 135), respectivamente; os limites inferiores das barras indicam os respectivos RMSEs obtidos após a inserção da respectiva menor marca d'água e os limites superiores indicam os resultados obtidos após a inserção da respectiva maior marca d'água. São exibidos gráficos de RMSE para (a) $\beta = 0,01$ e (b) $\beta = 0,02$ . . . . . | 70 |
| Figura 27 – Exemplo da estrutura de coordenadas de uma imagem de <i>light field</i> de dimensões $(s, t, u, v) = (3, 3, 3, 3)$ . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 72 |
| Figura 28 – Canal Y de uma imagem de <i>light field</i> de dimensão $15 \times 15 \times 434 \times 625$ visualizada como um <i>array</i> de imagens bidimensionais. . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 75 |
| Figura 29 – Canal Y de uma imagem de <i>light field</i> visualizada em <i>microarrays</i> . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 75 |
| Figura 30 – Canal Y da imagem de <i>light field</i> reduzida para dimensão $8 \times 8 \times 432 \times 624$ .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 76 |
| Figura 31 – Espectro da 4D-DCT (visualizado de forma bidimensional) de uma imagem de <i>light field</i> (canal Y) calculado com blocos de tamanho $8 \times 8 \times 8 \times 8$ e o <i>frame</i> na posição $s = 0$ e $t = 0$ ampliado. . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 77 |
| Figura 32 – (a) Espectro da 4D-DCT com apenas 1% dos coeficientes retidos e (b) imagem de <i>light field</i> reconstruída a partir desses coeficientes. . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 78 |
| Figura 33 – Imagem <i>Desktop</i> do conjunto de imagens de “teste”. . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 84 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 34 – Mapa de calor da distribuição de energia dos coeficientes da 4D-DCT da imagem <i>Desktop</i> . . . . .                                                                                                                                                                                                        | 84 |
| Figura 35 – Sequência da distribuição de energia dos coeficientes da 4D-DCT da imagem de <i>light field Desktop</i> (a) sem ordenação, (b) ordenada pelas médias e (c) ordenada com o algoritmo <i>quicksort</i> . A sequência é apresentada em escala logarítmica para uma melhor visualização. . . . .                  | 85 |
| Figura 36 – Área sob a curva (ASC) e curva da energia acumulada percentual em função da ordem de varredura da energia ordenada dos coeficientes da 4D-DCT da imagem <i>Desktop</i> . . . . .                                                                                                                              | 86 |
| Figura 37 – Sequência de imagens de blocos de tamanho $8 \times 8 \times 8 \times 8$ em que a posição dos $n$ primeiros coeficientes (de acordo com a ordenação pelas médias) é destacada de branco. São apresentadas imagens com os primeiros (a) 100, (b) 1.024, (c) 2.048 e (d) 3.500 coeficientes destacados. . . . . | 87 |
| Figura 38 – Energia total de coluna na dimensão $s$ e linha na dimensão $t$ . As colunas estão numeradas de 1 a 8 da esquerda para a direita e as linhas de cima para baixo. . . . .                                                                                                                                      | 88 |
| Figura 39 – Distribuição de energia dos coeficientes da 4D-DCT de cada coluna do eixo $s$ do <i>light field Desktop</i> . . . . .                                                                                                                                                                                         | 88 |
| Figura 40 – Zig-zag bidimensional do padrão JPEG aplicado em uma coluna de dimensão $(t, u, v) = (3, 3, 3)$ . . . . .                                                                                                                                                                                                     | 90 |
| Figura 41 – Zig-zag bidimensional expandido em uma coluna de dimensão $(t, u, v) = (4, 4, 4)$ . . . . .                                                                                                                                                                                                                   | 91 |
| Figura 42 – Ilustrações da varredura 3D Diagonal Principal + Diagonais em um bloco $(t, u, v) = (3, 3, 3)$ . Em (a) é ilustrada a primeira etapa e em (b), (c) e (d) são ilustrados passos da segunda etapa. As posições destacadas em cinza são referentes aos elementos já percorridos no passo anterior. . . . .       | 92 |
| Figura 43 – Ilustrações da varredura 3D Diagonal Principal + Horizontais em um bloco $(t, u, v) = (3, 3, 3)$ . Em (a) é ilustrada a primeira etapa e em (b) é ilustrada a segunda etapa. As posições destacadas em cinza são referentes aos elementos já percorridos na etapa anterior. . . . .                           | 93 |
| Figura 44 – Energia acumulada percentual considerando a energia dos coeficientes da 4D-DCT da imagem de <i>light field Desktop</i> após varredura de seus elementos. DPD é referente a Diagonal Principal + Diagonais e DPH é referente a Diagonal Principal + Horizontais. . . . .                                       | 95 |
| Figura 45 – Zoom da curva de energia acumulada percentual após varredura dos 1000 primeiros elementos da energia dos coeficientes da 4D-DCT da imagem <i>Desktop</i> . DPD é referente a Diagonal Principal + Diagonais. . . . .                                                                                          | 96 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 46 – <i>Boxplot</i> da área sob a curva da energia acumulada percentual para as 30 imagens de “teste”. O traço laranja indica a mediana e o triângulo verde indica a média da área sob a curva para cada método de varredura. Os métodos de varredura são abreviados como Q ( <i>Quicksort</i> ), L (Ordenação Lexicográfica), M (Ordenação pelas Médias), 2D (Zig-Zag 2D), 2D E (Zig-Zag 2D Expandido), 3D (Varredura 3D), 3D D (Varredura 3D Diagonal), 3D DPD (Varredura 3D Diagonal Principal + Diagonais), 3D DPH (Varredura 3D Diagonal Principal + Horizontais), 4D (Varredura 4D Diagonal), 2D DD (Varredura 2D Dupla Diagonal). . . . .                          | 97  |
| Figura 47 – <i>Zoom</i> do cruzamento entre as curvas de energia acumulada percentual dos métodos de Varredura 3D Diagonal e Varredura 4D Diagonal. . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 98  |
| Figura 48 – Vista central de imagens de <i>light fields</i> utilizados como teste neste trabalho: (a) <i>Black Fence (buldings)</i> , (b) <i>Danger de Mort (grids)</i> , (c) <i>Color Chart 1 (ISO and color charts)</i> , (d) <i>Houses and Lake (landscapes)</i> , (e) <i>Books (light)</i> , (f) <i>Vespa (mirrors and transparency)</i> , (g) <i>Flowers (nature)</i> , (h) <i>Friends 1 (people)</i> , (i) <i>Ankylosaurus and Diplodocus 1 (studio)</i> e (j) <i>Bikes (urban)</i> . . .                                                                                                                                                                                  | 99  |
| Figura 49 – Imagens utilizadas como marca d’água nos testes: (a) <i>Male</i> binarizada e (b) bloco binário $8 \times 8$ pseudo-aleatório. . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 100 |
| Figura 50 – Ilustração de curva com os valores de $SSIM_{\text{médio}}$ para o <i>light field Bikes</i> com diferentes tamanhos de marca d’água – (a) $2048 \times 2048$ , (b) $1024 \times 1024$ , (c) $512 \times 512$ e (d) $8 \times 8$ – e diferentes faixas de frequência usadas para inserção da marca. . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 103 |
| Figura 51 – Ilustração de curva com os valores de $PSNR_{\text{médio}}$ para o <i>light field Bikes</i> com diferentes tamanhos de marca d’água – (a) $2048 \times 2048$ , (b) $1024 \times 1024$ , (c) $512 \times 512$ e (d) $8 \times 8$ – e diferentes faixas de frequência usadas para inserção da marca. . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 104 |
| Figura 52 – Mapa de cores com informação de NC ( <i>normalized correlation</i> ) para marcas de diferentes tamanhos – (a) $2048 \times 2048$ , (b) $1024 \times 1024$ , (c) $512 \times 512$ e (d) $8 \times 8$ – extraídas do <i>light field Black Fence</i> após compressão com diferentes percentuais de coeficientes retidos. Os valores de NC são indicados na barra lateral de acordo com a intensidade da cor. . . . .                                                                                                                                                                                                                                                    | 105 |
| Figura 53 – Marcas d’água extraídas por percentual de coeficientes retidos. Todas estas marcas foram inseridas na última faixa de coeficientes (frequências altas). Foram extraídas marcas de tamanho $2048 \times 2048$ – (a), (b), (c), (d) e (e) –, $1024 \times 1024$ – (f), (g), (h), (i) e (j) –, $512 \times 512$ – (k), (l), (m), (n) e (o) – e $8 \times 8$ – (p), (q), (r), (s) e (t). Os percentuais de coeficientes retidos foram: 30%, 20%, 10%, 5% e 1% para as marcas de tamanho $2048 \times 2048$ ; 10%, 7%, 5%, 3% e 1% para as marcas de tamanho $1024 \times 1024$ e $512 \times 512$ ; 5%, 4%, 3%, 2% e 1% para as marcas de tamanho $8 \times 8$ . . . . . | 106 |

- Figura 54 – Mapa de cores com informação de (a) NC (*normalized correlation*) de marcas extraídas de tamanho  $2048 \times 2048$  e (b)  $SSIM_{\text{médio}}$  (*structural similarity*) de imagens marcadas para diferentes faixas de coeficientes e valores de força de inserção. As marcas foram extraídas do *light field Black Fence* após compressão com diferentes percentuais de coeficientes retidos. Os valores de NC e  $SSIM_{\text{médio}}$  são indicados na barra lateral de acordo com a intensidade da cor. . . . . 108
- Figura 55 – Mapa de cores com informação de (a) NC (*normalized correlation*) de marcas extraídas de tamanho  $1024 \times 1024$  e (b)  $SSIM_{\text{médio}}$  (*structural similarity*) de imagens marcadas para diferentes faixas de coeficientes e valores de força de inserção. As marcas foram extraídas do *light field Black Fence* após compressão com diferentes percentuais de coeficientes retidos. Os valores de NC e  $SSIM_{\text{médio}}$  são indicados na barra lateral de acordo com a intensidade da cor. . . . . 108
- Figura 56 – Mapa de cores com informação de (a) NC (*normalized correlation*) de marcas extraídas de tamanho  $512 \times 512$  e (b)  $SSIM_{\text{médio}}$  (*structural similarity*) de imagens marcadas para diferentes faixas de coeficientes e valores de força de inserção. As marcas foram extraídas do *light field Black Fence* após compressão com diferentes percentuais de coeficientes retidos. Os valores de NC e  $SSIM_{\text{médio}}$  são indicados na barra lateral de acordo com a intensidade da cor. . . . . 109
- Figura 57 – Mapa de cores com informação de (a) NC (*normalized correlation*) de marcas extraídas de tamanho  $8 \times 8$  e (b)  $SSIM_{\text{médio}}$  (*structural similarity*) de imagens marcadas para diferentes faixas de coeficientes e valores de força de inserção. As marcas foram extraídas do *light field Black Fence* após compressão com diferentes percentuais de coeficientes retidos. Os valores de NC e  $SSIM_{\text{médio}}$  são indicados na barra lateral de acordo com a intensidade da cor. . . . . 109

## LISTA DE TABELAS

|           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |     |
|-----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela 1  | – Resumo das técnicas de marca d’água para nuvens de pontos 3D publicadas na literatura. . . . .                                                                                                                                                                                                                                                           | 33  |
| Tabela 2  | – Configuração dos parâmetros utilizados nas simulações para cada modelo de nuvem de pontos. O símbolo “×” em algumas das células da tabela indica que a simulação foi realizada com a respectiva configuração e nuvem de pontos, enquanto o símbolo “—” indica que não foi realizada. O acrônimo “WM” é para “ <i>watermark</i> ” (marca d’água). . . . . | 55  |
| Tabela 3  | – Resultados de imperceptibilidade em termos de PSNR (dB) e RMSE. . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 58  |
| Tabela 4  | – Resultados de simulação de BER para avaliação de robustez a ataques de adição de ruído considerando a extração de uma marca d’água de 1.024 <i>bits</i> . . . . .                                                                                                                                                                                        | 60  |
| Tabela 5  | – Resultados de simulação de BER para avaliação de robustez a ataques de adição de ruído considerando a extração de uma marca d’água de 4.096 <i>bits</i> . . . . .                                                                                                                                                                                        | 61  |
| Tabela 6  | – Resultados de simulação de BER para avaliação de robustez a ataques de adição de ruído considerando a extração de uma marca d’água de 16.384 <i>bits</i> . . . . .                                                                                                                                                                                       | 61  |
| Tabela 7  | – Resultados de BER para avaliação de robustez a ataques de recorte considerando uma marca d’água de 1.024 <i>bits</i> . . . . .                                                                                                                                                                                                                           | 64  |
| Tabela 8  | – Resultados de BER para avaliação de robustez a ataques de recorte considerando uma marca d’água de 4.096 <i>bits</i> . . . . .                                                                                                                                                                                                                           | 65  |
| Tabela 9  | – Resultados de BER para avaliação de robustez a ataques de recorte considerando uma marca d’água de 16.384 <i>bits</i> . . . . .                                                                                                                                                                                                                          | 66  |
| Tabela 10 | – Valores de $PSNR_{\text{médio}}$ e $SSIM_{\text{médio}}$ para imagens de <i>light field</i> reconstruídas após retenção de apenas um percentual do total de coeficientes de maior magnitude da 4D-DCT. . . . .                                                                                                                                           | 76  |
| Tabela 11 | – Número de Inversões por Combinação (NIC) para 30 imagens de <i>light field</i> . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                 | 98  |
| Tabela 12 | – Valores máximo, mínimo e médio de $SSIM_{\text{médio}}$ obtidos ao ordenar os coeficientes com o método da Ordenação pelas Médias (OPM) e com a Varredura 3D Diagonal (V3DD). . . . .                                                                                                                                                                    | 102 |
| Tabela 13 | – Valores máximo, mínimo e médio de $PSNR_{\text{médio}}$ obtidos ao ordenar os coeficientes com o método da Ordenação pelas Médias (OPM) e com a Varredura 3D Diagonal (V3DD). . . . .                                                                                                                                                                    | 103 |
| Tabela 14 | – Forças de inserção utilizadas nas simulações com marcas de tamanho $8 \times 8$ e respectivo impacto na qualidade da imagem em termos de PSNR (dB). . . . .                                                                                                                                                                                              | 110 |
| Tabela 15 | – Forças de inserção utilizadas nas simulações com marcas de tamanho $512 \times 512$ e respectivo impacto na qualidade da imagem em termos de PSNR (dB). . . . .                                                                                                                                                                                          | 110 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela 16 – Média, para as 30 imagens de <i>light field</i> utilizadas como teste, dos resultados de BER de marcas d'água de tamanho $8 \times 8$ extraídas após ataques sob diferentes condições e com variações da força de inserção. OPM é referente ao método de Ordenação pelas Médias e V3DD ao método de Varredura 3D Diagonal; os métodos foram aplicados sem e com replicação (10×). Os melhores resultados estão destacados em negrito e os segundo melhores estão sublinhados. . . . .     | 111 |
| Tabela 17 – Média, para as 30 imagens de <i>light field</i> utilizadas como teste, dos resultados de BER de marcas d'água de tamanho $512 \times 512$ extraídas após ataques sob diferentes condições e com variações da força de inserção. OPM é referente ao método de Ordenação pelas Médias e V3DD ao método de Varredura 3D Diagonal; os métodos foram aplicados sem e com replicação (10×). Os melhores resultados estão destacados em negrito e os segundo melhores estão sublinhados. . . . . | 112 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|         |                                                                                                                  |
|---------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 2D      | Bidimensional                                                                                                    |
| 2D-DCT  | Transformada Discreta do Cosseno Bidimensional<br><i>Bidimensional Discrete Cosine Transform</i>                 |
| 2D-IDCT | Transformada Inversa Discreta do Cosseno Bidimensional<br><i>Bidimensional Inverse Discrete Cosine Transform</i> |
| 3D      | Tridimensional                                                                                                   |
| 4D      | 4-Dimensional                                                                                                    |
| 4D-DCT  | Transformada Discreta do Cosseno 4-Dimensional<br><i>4-Dimensional Discrete Cosine Transform</i>                 |
| 4D-IDCT | Transformada Inversa Discreta do Cosseno 4-Dimensional<br><i>4-Dimensional Inverse Discrete Cosine Transform</i> |
| AMPL    | Laboratório de Processamento Multimídia Avançado<br><i>Advanced Multimedia Processing Lab</i>                    |
| AWGN    | Ruído Gaussiano Branco Aditivo<br><i>Additive White Gaussian Noise</i>                                           |
| BDMEP   | Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa                                                             |
| BER     | Taxa de Erro de <i>Bit</i><br><i>Bit Error Rate</i>                                                              |
| bpp     | <i>Bits</i> por pixel                                                                                            |
| CODEC   | Codificador/Decodificador                                                                                        |
| DCT     | Transformada Discreta do Cosseno<br><i>Discrete Cosine Transform</i>                                             |
| dB      | Decibel                                                                                                          |
| FVT     | <i>Free-View Television</i>                                                                                      |
| GFT     | Transformada de Fourier sobre Grafos<br><i>Graph Fourier Transform</i>                                           |
| GSP     | Processamento de Sinais sobre Grafos<br><i>Graph Signal Processing</i>                                           |

|       |                                                                                        |
|-------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| HDR   | Alcance Dinâmico Amplo<br><i>High Dynamic Range</i>                                    |
| HVS   | Sistema Visual Humano<br><i>Human Visual System</i>                                    |
| IBR   | Renderização Baseada em Imagens<br><i>Image Based Rendering</i>                        |
| IGFT  | Transformada Inversa de Fourier sobre Grafos<br><i>Inverse Graph Fourier Transform</i> |
| IoT   | Internet das Coisas<br><i>Internet of Things</i>                                       |
| JPEG  | <i>Joint Photographic Experts Group</i>                                                |
| LiDAR | <i>Light Detection And Ranging</i>                                                     |
| MVV   | Vídeo de Múltiplas Vistas<br><i>Multi-View Video</i>                                   |
| NC    | Correlação Normalizada<br><i>Normalized Correlation</i>                                |
| PSNR  | Relação Sinal-Ruído de Pico<br><i>Peak Signal-to-Noise Ratio</i>                       |
| QIM   | <i>Quantization Index Modulation</i>                                                   |
| RGB   | Componentes Vermelho-Verde-Azul<br><i>Red-Green-Blue Components</i>                    |
| RMSE  | Raiz do Erro Médio Quadrático<br>Erro Root-Mean-Square Error                           |
| SNR   | Relação Sinal-Ruído<br><i>Signal-to-Noise Ratio</i>                                    |
| SSIM  | Similaridade Estrutural<br><i>Structural Similarity</i>                                |
| UHD   | Definição Ultra Alta<br><i>Ultra High Definition</i>                                   |
| WM    | Marca D'Água<br><i>Watermark</i>                                                       |

YCbCr

Componentes de Luminância e Croma

*Luminance and Chrominance Components*

## LISTA DE SÍMBOLOS

|               |                                                                                              |
|---------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|
| $\mathcal{G}$ | Grafo                                                                                        |
| $A$           | Matriz de adjacência de um grafo $\mathcal{G}$                                               |
| $\mathcal{V}$ | Vértices de um grafo $\mathcal{G}$                                                           |
| $S$           | Sinal amostrado sobre um grafo $\mathcal{G}$                                                 |
| $\mathcal{L}$ | Matriz Laplaciana de um grafo $\mathcal{G}$ não direcionado                                  |
| $D$           | Matriz de graus de um grafo $\mathcal{G}$                                                    |
| $U$           | Matriz contendo em suas colunas os autovetores da matriz Laplaciana                          |
| $T$           | Matriz diagonal preenchida com os autovalores da matriz Laplaciana                           |
| $P$           | Conjunto de pontos de uma nuvem 3D                                                           |
| $\kappa$      | Chave secreta utilizada em um processo de inserção / extração de marca d'água                |
| $M$           | Número de <i>clusters</i> utilizados no processo de marca d'água para nuvens de pontos 3D    |
| $C_i$         | $i$ -ésimo <i>cluster</i>                                                                    |
| $Q$           | Número máximo de pontos que um <i>cluster</i> pode conter                                    |
| $M'$          | Número de <i>subclusters</i> utilizados no processo de marca d'água para nuvens de pontos 3D |
| $c_{ij}$      | $j$ -ésimo <i>subcluster</i> do $i$ -ésimo <i>cluster</i>                                    |
| $Q'$          | Número máximo de pontos que um <i>subcluster</i> pode conter                                 |
| $W$           | Marca d'água                                                                                 |
| $c$           | Taxa de replicação da marca d'água                                                           |
| $W'$          | Marca d'água replicada                                                                       |
| $\tilde{W}$   | Marca d'água replicada e mapeada em 1 e -1                                                   |
| $\alpha$      | Amplitude de modulação da técnica de marca d'água para nuvens de pontos 3D                   |
| $\beta$       | Parâmetro de força da técnica de marca d'água para nuvens de pontos 3D                       |

|                      |                                                                                               |
|----------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|
| $\phi$               | Alcance máximo dos canais de cor R, G e B                                                     |
| $\phi_x$             | Alcance máximo dos valores da coordenada $x$ dos pontos de uma nuvem 3D                       |
| $\phi_y$             | Alcance máximo dos valores da coordenada $y$ dos pontos de uma nuvem 3D                       |
| $\phi_z$             | Alcance máximo dos valores da coordenada $z$ dos pontos de uma nuvem 3D                       |
| $\phi_{max}$         | Valor máximo entre os valores de alcance máximo das coordenadas $x, y$ e $z$                  |
| $\phi_{min}$         | Valor mínimo entre os valores de alcance máximo das coordenadas $x, y$ e $z$                  |
| <b>L</b>             | Imagem de <i>light field</i>                                                                  |
| $S, T, U$ e $V$      | Coordenadas de uma imagem de <i>light field</i> <b>L</b>                                      |
| $\Gamma_n$           | Matriz da DCT unidimensional de comprimento $n$                                               |
| $\tilde{\mathbf{L}}$ | Coefficientes da 4D-DCT de uma imagem de <i>light field</i> <b>L</b>                          |
| <b>B</b>             | Blocos de tamanho $s \times t \times u \times v$ de uma imagem de <i>light field</i> <b>L</b> |
| $\tilde{\mathbf{B}}$ | Coefficientes da 4D-DCT de um bloco <b>B</b>                                                  |
| $b$                  | Bit de uma marca d'água <b>W</b>                                                              |
| $\Delta$             | Parâmetro de força da técnica de marca d'água para imagens de <i>light field</i>              |
| $\hat{\mathbf{B}}$   | Bloco médio de um conjunto de imagens de <i>light field</i> ]                                 |

## SUMÁRIO

|              |                                                                                                  |           |
|--------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b>     | <b>INTRODUÇÃO . . . . .</b>                                                                      | <b>23</b> |
| 1.1          | Imagens Plenópticas . . . . .                                                                    | 24        |
| <b>1.1.1</b> | <b>Novos Desafios . . . . .</b>                                                                  | <b>28</b> |
| 1.2          | Marca D'Água Digital . . . . .                                                                   | 29        |
| <b>1.2.1</b> | <b>Nuvens de Pontos 3D: Estado-da-Arte . . . . .</b>                                             | <b>31</b> |
| <b>1.2.2</b> | <b>Imagens de <i>Light Field</i>: Estado-da-Arte . . . . .</b>                                   | <b>33</b> |
| 1.3          | Objetivos . . . . .                                                                              | 35        |
| 1.4          | Organização do Trabalho . . . . .                                                                | 37        |
| <b>2</b>     | <b>NUVENS DE PONTOS NO DOMÍNIO DA TRANSFORMADA . . . . .</b>                                     | <b>39</b> |
| 2.1          | A Transformada de Fourier sobre Grafos . . . . .                                                 | 39        |
| <b>2.1.1</b> | <b>A GFT Aplicada a Nuvens de Pontos 3D . . . . .</b>                                            | <b>40</b> |
| <b>3</b>     | <b>TÉCNICA DE MARCA D'ÁGUA NO DOMÍNIO DA TRANSFORMADA<br/>PARA NUVENS DE PONTOS 3D . . . . .</b> | <b>44</b> |
| 3.1          | Proposta de Técnica de Marca D'Água para Nuvens de Pontos . . . . .                              | 44        |
| <b>3.1.1</b> | <b>Etapa de Inserção . . . . .</b>                                                               | <b>44</b> |
| 3.1.1.1      | Ordenação e Embaralhamento . . . . .                                                             | 45        |
| 3.1.1.2      | Clusterização . . . . .                                                                          | 46        |
| 3.1.1.3      | Modulação . . . . .                                                                              | 47        |
| <b>3.1.2</b> | <b>Etapa de Extração . . . . .</b>                                                               | <b>49</b> |
| 3.1.2.1      | Reconstrução da Nuvem de Pontos . . . . .                                                        | 50        |
| 3.1.2.2      | Validação de Ordenação . . . . .                                                                 | 50        |
| 3.1.2.3      | Demodulação . . . . .                                                                            | 50        |
| <b>4</b>     | <b>RESULTADOS . . . . .</b>                                                                      | <b>53</b> |
| 4.1          | Materiais e Métodos . . . . .                                                                    | 53        |
| 4.2          | Avaliação da Imperceptibilidade <i>versus</i> Robustez . . . . .                                 | 56        |
| <b>4.2.1</b> | <b>Imperceptibilidade . . . . .</b>                                                              | <b>56</b> |
| <b>4.2.2</b> | <b>Quanto à Avaliação de Robustez . . . . .</b>                                                  | <b>57</b> |
| 4.2.2.1      | Ataque de Adição de Ruído . . . . .                                                              | 58        |
| 4.2.2.2      | Ataque de Recorte . . . . .                                                                      | 62        |
| 4.2.2.3      | Alteração nas Coordenadas Espaciais . . . . .                                                    | 66        |
| <b>4.2.3</b> | <b>Capacidade de Inserção . . . . .</b>                                                          | <b>66</b> |
| 4.3          | Análise Comparativa . . . . .                                                                    | 68        |
| <b>5</b>     | <b>IMAGENS DE <i>LIGHT FIELD</i> NO DOMÍNIO DA TRANSFORMADA .</b>                                | <b>72</b> |
| 5.1          | A Transformada Discreta do Cosseno 4-Dimensional . . . . .                                       | 72        |
| <b>5.1.1</b> | <b>A 4D-DCT aplicada a Imagens de <i>Light Field</i> . . . . .</b>                               | <b>74</b> |

|              |                                                                                               |            |
|--------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>6</b>     | <b>TÉCNICAS DE MARCA D'ÁGUA NO DOMÍNIO DA TRANSFORMADA PARA IMAGENS DE <i>LIGHT FIELD</i></b> | <b>79</b>  |
| 6.1          | Proposta de Técnica de Marca D'Água para Imagens de <i>Light Field</i>                        | 79         |
| <b>6.1.1</b> | <b>Inserção</b>                                                                               | <b>79</b>  |
| <b>6.1.2</b> | <b>Extração</b>                                                                               | <b>80</b>  |
| <b>6.1.3</b> | <b>Variação do Método com Replicação de <i>Bits</i></b>                                       | <b>81</b>  |
| 6.2          | Proposta de Ordenação de Coeficientes no domínio da 4D-DCT                                    | 81         |
| <b>6.2.1</b> | <b>Estudo da Ordenação pelas Médias</b>                                                       | <b>85</b>  |
| <b>6.2.2</b> | <b>Alternativas de Ordenação por Colunas em <i>s</i></b>                                      | <b>87</b>  |
| 6.2.2.1      | Zig-Zag 2D                                                                                    | 89         |
| 6.2.2.2      | Zig-Zag 2D Expandido                                                                          | 89         |
| 6.2.2.3      | Varredura 3D                                                                                  | 90         |
| 6.2.2.4      | Varredura 3D Diagonal                                                                         | 90         |
| 6.2.2.5      | Varredura 3D Diagonal Principal + Diagonais                                                   | 92         |
| 6.2.2.6      | Varredura 3D Diagonal Principal + Horizontais                                                 | 92         |
| <b>6.2.3</b> | <b>Comparação entre as Alternativas de Ordenação</b>                                          | <b>93</b>  |
| <b>7</b>     | <b>RESULTADOS</b>                                                                             | <b>99</b>  |
| 7.1          | Materiais e Métodos                                                                           | 99         |
| 7.2          | Avaliação de Imperceptibilidade <i>versus</i> Robustez                                        | 101        |
| <b>7.2.1</b> | <b>Imperceptibilidade</b>                                                                     | <b>101</b> |
| <b>7.2.2</b> | <b>Robustez à Compressão</b>                                                                  | <b>103</b> |
| <b>7.2.3</b> | <b>Análise de Impacto da Força da Marca Inserida</b>                                          | <b>107</b> |
| 7.3          | Análise Comparativa e Outros Ataques                                                          | 107        |
| <b>8</b>     | <b>CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>                                                      | <b>113</b> |
| 8.1          | Trabalhos Futuros                                                                             | 115        |
| 8.2          | Artigos Relacionados à Tese                                                                   | 116        |
|              | <b>REFERÊNCIAS</b>                                                                            | <b>117</b> |
|              | <b>APÊNDICE A – RESULTADOS ADICIONAIS PARA IMAGENS DE <i>LIGHT FIELD</i></b>                  | <b>127</b> |
|              | <b>APÊNDICE B – ALGORITMOS DE ORDENAÇÃO ADICIONAIS PARA ESTRUTURAS 4D</b>                     | <b>152</b> |
|              | <b>APÊNDICE C – INFORMAÇÕES ADICIONAIS PARA IMAGENS DE <i>LIGHT FIELD</i></b>                 | <b>153</b> |

# 1 INTRODUÇÃO

O sistema visual humano (HVS, do inglês *human visual system*) nos permite perceber o mundo em que estamos imersos capturando a luz ao nosso redor. De forma similar, diversas tecnologias são capazes de criar e/ou recriar experiências visuais a partir da aquisição da informação luminosa obtida por sensores fotossensíveis e da exibição desta informação luminosa em *displays*. Sensores, *displays* e tecnologias para o processamento, transmissão e armazenamento de informação visual vêm se desenvolvendo com o passar dos anos, tornando possível melhorias contínuas para uma vasta gama de aplicações e serviços de diversas áreas, como indústria, entretenimento e educação. Para tornar essas experiências possíveis, a informação visual precisa ser adquirida e representada de alguma forma que permita recriar uma réplica aproximada da informação luminosa inicialmente capturada. É importante que durante esse processo sejam levadas em consideração as restrições relacionadas aos procedimentos de aquisição, transmissão, armazenamento e exibição, bem como do próprio HVS (PEREIRA; SILVA; LAFRUIT, 2018).

Nas últimas décadas, as tecnologias de câmeras e *displays* disponíveis no mercado foram primordiais para a definição dos modelos de aquisição, representação e exibição (PEREIRA; SILVA; LAFRUIT, 2018). O modelo até então adotado para representação da informação luminosa corresponde a janelas retangulares do mundo real, que no paradigma digital corresponde a conjuntos de amostras retangulares, conhecidas como imagens ou *frames* (quadros), para algumas componentes de comprimento de onda da informação luminosa capturada (PEREIRA; SILVA; LAFRUIT, 2018). Para melhorar a experiência do usuário, a resolução espacial dessas imagens ou *frames* vinha aumentando cada vez mais até alcançar uma resolução de definição ultra alta (UHD, do inglês *ultra high definition*), que corresponde a uma imagem de no mínimo  $3840 \times 2160$  *pixels*<sup>1</sup> e com profundidade de cor de 10 bpp (*bits per pixel*); a profundidade de cor convencional é de 8 bpp por canal. Outra alternativa para melhorar a experiência de usuário, utilizando o modelo atual, é aumentar a taxa de *frames* por segundo (no caso de vídeo) e/ou o alcance dinâmico (a razão entre o valor mais claro e o mais escuro de uma imagem), permitindo uma representação mais precisa, em termos de coloração, do objeto real. A última é conhecida como uma tecnologia de alcance dinâmico amplo (HDR, do inglês *high dynamic range*) e vem sendo utilizada em boa parte dos monitores e aparelhos televisores de ponta.

Apesar dos avanços nos métodos de aquisição e exibição dos modelos baseados em quadros bidimensionais, eles ainda possuem limitações quanto a fidelidade na replicação do mundo real (PEREIRA; SILVA; LAFRUIT, 2018). Um dos motivos é o fato de se exibir cenas do mundo real, inerentemente tridimensionais, com um *display* capaz de apresentar apenas formas em duas dimensões. Como consequência, experiências em 3D têm ganho popularidade nos últimos anos em diversos domínios de aplicação, necessitando de soluções apropriadas para aquisição, codificação, representação, exibição e segurança dos dados. Nesse sentido, alguns avanços foram obtidos em termos de sensores e *displays*, notavelmente pelas câmeras Lytro

<sup>1</sup> Um *pixel* corresponde a menor unidade de uma imagem ou *frame*.

Figura 1 – Modelos de câmera (a) Raytrix R29 e (b) Light L16, ambos baseados em informação direcional.



Fonte: (a) (RAYTRIX, 2019) e (b) (LIGHT, 2019)

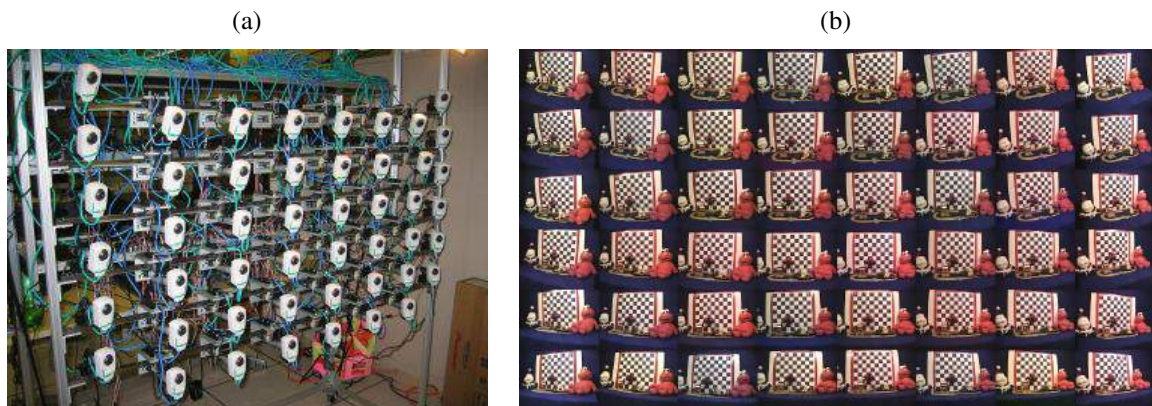
(empresa fechada em 2018), Raytrix (RAYTRIX, 2019) e Light (LIGHT, 2019), e *displays* das empresas Holografika (HOLOGRAFIKA, 2019) e Ostendo (OSTENDO, 2019). Esses novos dispositivos, em vez do modelo tradicional baseado em *frames*, utilizam uma forma de aquisição e/ou exibição baseada em informação direcional, permitindo experiências visuais mais imersivas com múltiplas vistas e perspectivas diferentes. A Figura 1 mostra alguns desses modelos de câmeras já disponíveis no mercado.

### 1.1 IMAGENS PLENÓPTICAS

Neste contexto, a chamada função plenóptica desempenha um papel fundamental para representar a intensidade de luz capturada de qualquer ponto de vista ou posição espacial 3D, direção angular, para cada comprimento de onda e ao longo do tempo (ADELSON; BERGEN et al., 1991; GORTLER et al., 1996). Esse modelo abre novas possibilidades de representação visual em direção a uma experiência mais completa e realista, além de englobar as formas mais simples de representação atuais (PEREIRA; SILVA; LAFRUIT, 2018). Em contrapartida, toda essa informação adicional que permite representações mais fidedignas de uma cena real vem com o custo da quantidade de dados extra, trazendo novos desafios de representação, por exemplo. Em situações práticas é necessário diminuir a dimensionalidade desses dados para que a informação esteja representada de forma conveniente para seu uso. Novas modalidades de imagens surgiram como representações simplificadas da luz com inspiração na função plenóptica, como por exemplo imagens de *light field* e nuvens de pontos (WU et al., 2017; PEREIRA; SILVA; LAFRUIT, 2018). Cada uma dessas representações é obtida por modelos de aquisição diferentes.

Imagens de *light field*, por exemplo, são tipicamente capturadas por um denso *array* de câmeras (vide Figura 2a) ou uma câmera que possui um único e mais compacto sensor, em conjunto com um *array* de microlentes (*lenslet*), que obtém amostras de feixes de luz emanados de diferentes direções (vide Figura 1a). No caso de uma imagem de *light field* capturada por

Figura 2 – Exemplo de (a) um *array* de câmeras utilizado para capturar imagens de *light field* e (b) uma imagem capturada por este tipo de sistema.



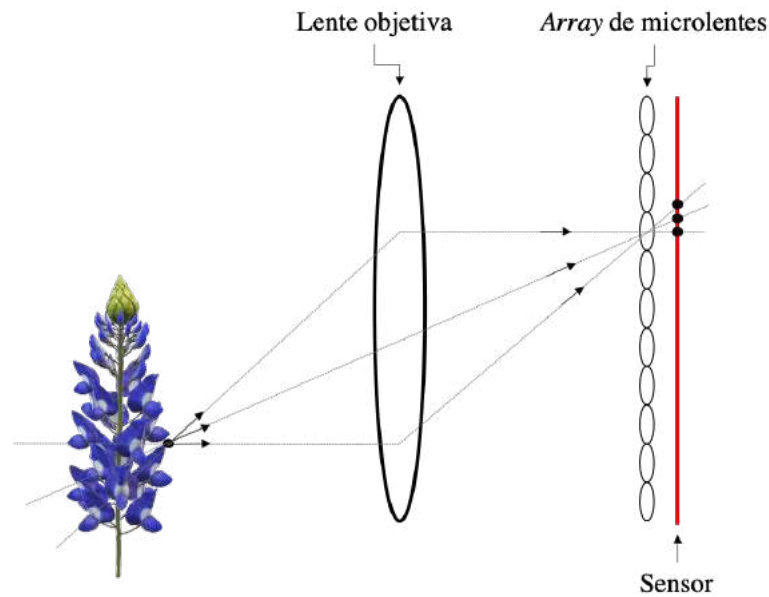
Fonte: (ZHANG; CHEN, 2004)

um denso *array* de câmeras, o resultado é um *array* de imagens em que cada uma apresenta a vista e angulação de sua respectiva câmera em uma mesma cena. A Figura 2 apresenta um sistema de *array* de câmeras construído no Laboratório de Processamento Multimídia Avançado (AMPL, do inglês *Advanced Multimedia Processing Lab*) da Universidade Carnegie Mellon e uma imagem produzida pelo sistema; note a diferença de posicionamento e angulação da mesma cena nas subimagens produzidas.

Imagens de *light field* adquiridas por meio de câmeras *lenslet* (PEREIRA; SILVA; LAFRUIT, 2018) têm em seu formato bruto um padrão similar ao que é chamado de olho de mosca (*fly eye*) devido à forma de aquisição deste tipo de dispositivo. A Figura 3 apresenta de modo simplificado um esquema para captação da informação de luz por meio de uma câmera *lenslet*. Note que entre a lente objetiva e o sensor fotossensível existe um *array* de microlentes. Esse esquema permite que seja capturada informação de diferentes direções a partir de um mesmo ponto. Por este motivo ocorre o padrão olho de mosca nas imagens adquiridas por dispositivos desta natureza, como pode ser visualizado na Figura 4; esse formato de visualização também é conhecido como *microarrays*. Esse formato permite a visualização da imagem de *light field* como uma única imagem bidimensional.

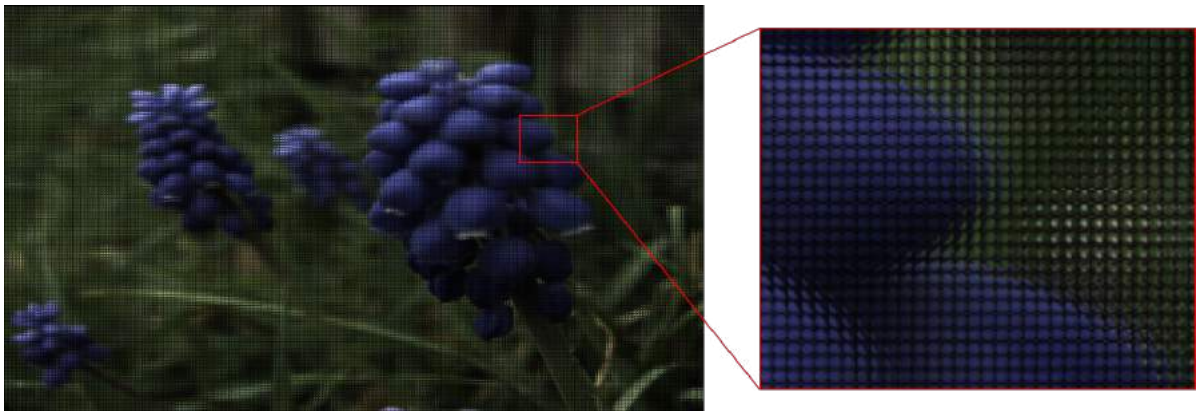
Por uma questão de conveniência, imagens de *light field* também podem ser representadas em uma estrutura de quatro dimensões; os feixes de luz capturados são parametrizados pelas coordenadas de sua interseção com dois planos (WU et al., 2017). O sistema de coordenadas é denotado por  $(s, t)$  para o primeiro plano e  $(u, v)$  para o segundo; um feixe de luz definido nesse sistema primeiro intercepta o plano  $st$ , na coordenada  $(s, t)$ , e em seguida intercepta o plano  $uv$ , na coordenada  $(u, v)$ , sendo então denotado por  $L(s, t, u, v)$ . Dessa forma, em vez de uma única imagem bidimensional formada por *microarrays*, um *light field* 4D pode ser representado como um *array* de imagens 2D, conforme apresentado na Figura 5, em que é possível visualizar todas as possíveis vistas do *light field* da Figura 4. Essa forma de representação é adotada tanto

Figura 3 – Esquema de captação da informação de luz em uma câmera *lenslet*.



Fonte: O Autor (2020).

Figura 4 – Imagem bruta obtida por uma câmera *lenslet* e uma porção da mesma imagem expandida.

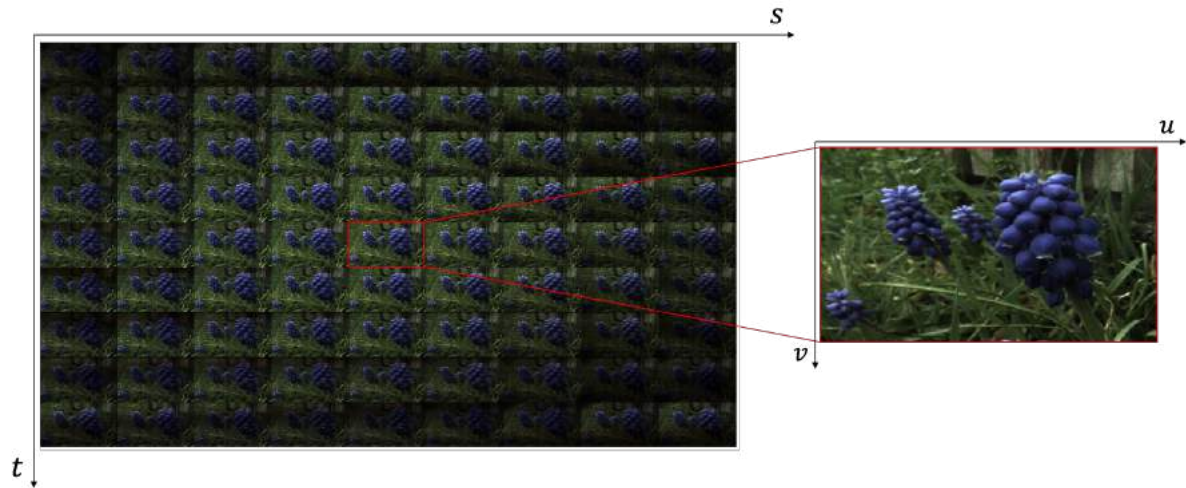


Fonte: O Autor (2020).

para imagens adquiridas com um denso *array* de câmeras quanto para imagens adquiridas por câmeras *lenslet*.

Outra modalidade de imagens plenópticas é a chamada de nuvem de pontos 3D. Enquanto para imagens de *light field* é adotado um modelo de representação regular, no sentido de que os *pixels* são dispostos em um *grid* fixo e regular, para nuvens de pontos é adotado um modelo de representação irregular, em que os pontos são dispostos em um espaço, normalmente tridimensional, definido por um dado sistema de coordenadas. A rigor uma nuvem de pontos pode ser representada por uma lista de pontos identificados por três coordenadas; a cada ponto, pode estar associado ou não, um ou mais atributos (PEREIRA; SILVA; LAFRUIT, 2018). Por

Figura 5 – Visualização de todas as vistas de uma imagem de *light field* capturada por um dispositivo com microlentes (*lenslet*), em que cada vista é referenciada por um sistema de coordenadas  $(s, t)$ , e a vista central expandida, em que cada *pixel* é referenciado por um sistema de coordenadas  $(u, v)$ .



Fonte: O Autor (2020).

Figura 6 – Modelos de nuvens de pontos 3D.

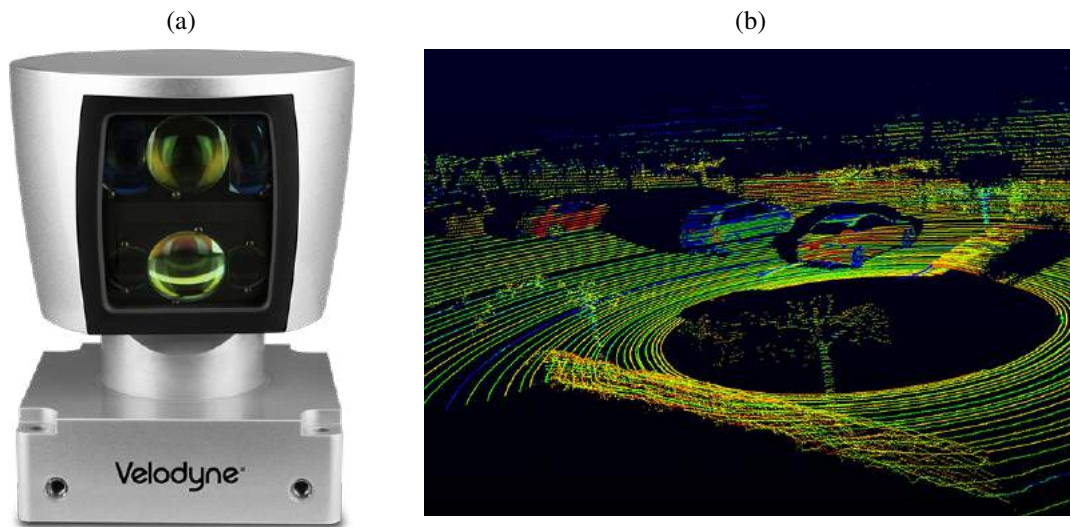


Fonte: (UNIVERSITY..., 2017)

exemplo, a Figura 6 apresenta dois modelos de nuvem de pontos obtidos da base de dados de nuvens de pontos da Universidade de São Paulo (UNIVERSITY..., 2017). Cada ponto dessas nuvens contém um atributo relacionado à intensidade de cor naquele ponto e é definido em um espaço tridimensional, podendo assumir qualquer posição em um intervalo contínuo dentro dos limites dos eixos espaciais  $x$ ,  $y$  e  $z$ . A nuvem da Figura 6a possui 8.128.921 pontos, enquanto a nuvem da Figura 6b possui 150.388 pontos.

Este tipo de dado normalmente é adquirido por meio de *scanners* 3D ou sensores LIDAR (*Light and Radar*). No caso de sensores LIDAR, o equipamento emite pulsos de *lasers* e a distância a um determinado ponto é calculada pela diferença de tempo entre a emissão e a

Figura 7 – (a) Sensor LIDAR e (b) nuvem de pontos construída por um veículo autônomo utilizando um desses sensores.



Fonte: (VELODYNE..., 2019)

detecção do pulso refletido em um ponto de um objeto. Além disso, pela frequência da onda refletida é possível obter também a informação de cor do ponto. Um exemplo de aplicação de grande potencial que utiliza sensores LIDAR para construção de nuvens de pontos envolve veículos autônomos (por exemplo, (YUE et al., 2018)), que possuem um sensor desse tipo em sua parte superior para identificação de objetos em sua redondeza, como pode ser visto na Figura 7. Além disso, outras aplicações de nuvens de pontos são: construção de ambientes de realidade aumentada / virtual para treinamento e/ou entretenimento (MORRIS et al., 2004), aquisição de imagens médicas para diagnóstico (OBRIST; FLISCH; HOFMANN, 2004), reconstrução de monumentos históricos para preservação (BITELLI et al., 2018; AICARDI et al., 2018), reconstrução de áreas urbanas (SANTIS et al., 2018), etc.

### 1.1.1 Novos Desafios

Conforme mencionado anteriormente, a grande quantidade de informação contida nessas estruturas de dados faz com que haja necessidade de novas técnicas de codificação (QUEIROZ; CHOU, 2017; VIOLA; ŘEŘÁBEK; EBRAHIMI, 2017), compressão (SANDRI; QUEIROZ; CHOU, 2019; CONTI et al., 2019; VIOLA; RERABEK; TOURADJ, 2017) e renderização (SCHNABEL; MÖSER; KLEIN, 2008; NAM et al., 2017) mais eficientes e que tirem o máximo proveito de suas características. Nesse contexto, diversos trabalhos vêm sendo realizados com relação a esses dois tipos de imagens plenópticas para as aplicações supracitadas. Outro desafio é relacionado à segurança dessas imagens, mais precisamente no que diz respeito à proteção de direitos autorais e identificação de modificações e usos indevidos. De maneira geral, o processo de aquisição dessas imagens é custoso, financeiramente e computacionalmente, principalmente para modelos mais complexos; isso tem motivado o desenvolvimento de métodos baseados em

estratégias de ocultação de dados para garantir a segurança e a autenticidade desses objetos. Estes objetivos normalmente são alcançados utilizando algum tipo de técnica clássica de marca d'água digital e esteganografia, cuja aplicabilidade em diversos tipos de mídias, como imagem, áudio e vídeo, é bem estabelecida (WANG; WANG, 2005; TSAI, 2016; HUANG et al., 2013; XIAOQING, 2015; ANSARI et al., 2018). No entanto, esse tipo de aplicação não tem sido muito explorado para imagens de *light field* e nuvens de pontos 3D; poucos trabalhos foram publicados e ainda não se tem uma metodologia clara para uma avaliação adequada das técnicas propostas. Na seção seguinte são apresentados alguns conceitos gerais quanto à marcas d'água digital e um apanhado da literatura a respeito de técnicas para inserção / extração de marcas d'água em nuvens de pontos 3D e imagens de *light field*.

## 1.2 MARCA D'ÁGUA DIGITAL

Atualmente, para uma comunicação digital segura, é imprescindível o uso de criptografia e / ou marca d'água digital nos objetos (comumente chamados de objetos de cobertura, sejam áudio, vídeo ou imagem) transmitidos para protegê-los contra redistribuição e / ou modificações não autorizadas (ALFACE; MACQ, 2007). De uma maneira geral, no contexto de segurança de informação, podemos categorizar as aplicações para técnicas de marca d'água digital em dois contextos principais: proteção de direitos de propriedades intelectuais e verificação de conteúdo (NIKOLAIDIS et al., 2001). No primeiro, é importante que a marca d'água seja robusta contra modificações (intencionais ou não), permitindo assim que a marca seja extraída e corretamente identificada. Faz parte desse contexto as aplicações de proteção de direitos autorais (CHEN; XU, 2018), impressão digital (CHEN; QU; CUI, 2017) e rastreamento de distribuição de conteúdo não autorizado (HARTUNG; RAMME, 2000), por exemplo. No contexto de verificação de conteúdo, o processo de marca d'água digital é utilizado para indicar se houve alguma modificação no conteúdo; em alguns casos também é possível indicar onde a alteração foi realizada no objeto e o tipo de alteração. Exemplos de aplicações típicas nesse contexto são autenticação (WONG; MEMON, 2001) e verificação de integridade (COATRIEUX et al., 2013). Os requisitos para as aplicações de marca d'água variam de acordo com o contexto em que está inserido, mas são normalmente avaliados em termos de robustez, imperceptibilidade, capacidade de inserção e segurança (COX et al., 2007).

O requisito de robustez é relacionado a capacidade da marca d'água sobreviver a alterações no objeto de cobertura. Essas alterações podem ser intencionais, muitas vezes com o objetivo de destruir a marca d'água ou com o objetivo de adulterar o objeto marcado. Além disso, as alterações também podem ser não intencionais, como por exemplo a interferência por algum tipo de ruído existente no meio de comunicação ou a perda de informação causada por processos de compressão. A robustez é comumente avaliada contra ataques geométricos, como translação, rotação e cisalhamento, filtros espaciais, ataques de remoção, como o recorte de uma porção do objeto marcado, compressão com perdas, entre outros. Em muitas técnicas a robustez

pode ser controlada por um parâmetro de força de inserção. Marcas d'água digitais podem ser inseridas no domínio espacial ou no domínio da transformada do objeto de cobertura. Em geral, técnicas que utilizam o domínio da transformada se apresentam mais robustas do que as técnicas que realizam a inserção da marca no domínio espacial ([NEMATOLLAHI; VORAKULPIPAT; ROSALES, 2017](#); [GHAZY et al., 2015](#)). A desvantagem dos métodos baseados no domínio da transformada é sua alta complexidade computacional. Apesar disso, a maioria das transformadas possuem implementações eficientes que reduzem a quantidade de operações necessárias. Além de marcas d'água robustas também existe a categoria de marcas d'água frágeis. Nesta categoria, a menor alteração que o objeto de cobertura sofra deve ser capaz de destruir uma porção ou a marca d'água completa. Neste caso, o objetivo é garantir que o objeto marcado não sofreu nenhuma alteração, ou caso tenha sofrido identificar onde a alteração foi realizada e, possivelmente, o tipo de modificação realizada.

Em muitas aplicações é importante que a marca d'água não seja percebida por terceiros ou deseja-se que a inserção da marca no objeto de cobertura altere suas características o mínimo possível. Este requisito é conhecido por imperceptibilidade, que indica o grau de degradação do objeto após ter a marca inserida. O terceiro requisito, conhecido como capacidade de inserção, indica a quantidade de bits que podem ser inseridos no objeto de cobertura. Em algumas aplicações é importante ser capaz de inserir o máximo de informação possível, por exemplo. De uma maneira geral, esses requisitos são inversamente proporcionais. Normalmente, aumentar a robustez significa diminuir a quantidade de bits inseridos (potencialmente diminuindo a taxa de erros) e diminuir a imperceptibilidade (por exemplo, degradando com mais intensidade o objeto marcado devido a força de inserção mais elevada). Situações equivalentes ocorrem ao aumentar a imperceptibilidade ou a capacidade de inserção, portanto, é importante que esses requisitos sejam bem avaliados e encontrado a relação de custo-benefício ideal para a aplicação desejada.

O requisito de segurança diz respeito a dificuldade de um possível atacante descobrir a chave secreta utilizada no processo de inserção, sendo assim capaz de extrair a marca d'água ou até mesmo destruí-la ([BAS et al., 2016](#)). Naturalmente, o nível de dificuldade requerido pode variar de acordo com nível esperado de possíveis atacantes. Aplicações militares, por exemplo, podem precisar de um nível de dificuldade alta ([COX et al., 2007](#)). Quanto ao tipo de chave utilizada e modo de extração da marca d'água, a técnica ainda pode ser classificada como cega, semi-cega ou não-cega. Em uma técnica cega, conhecida também por marca d'água de chave pública, é possível extrair a marca d'água tendo posse apenas do objeto de cobertura e da chave privada utilizada na inserção. Já em técnicas do tipo não-cega, ou marca d'água de chave pública, para extrair é preciso do objeto original, do objeto de cobertura e da chave privada. Em técnicas semi-cegas, para extrair a marca é preciso do objeto de cobertura, da chave privada e de alguma informação acerca do objeto original, que pode ser alguma informação estatística quanto ao objeto original, por exemplo ([COX et al., 2007](#)). Em geral, técnicas não-cegas e semi-cegas tendem a ser mais robustas em relação a técnicas cegas devido a informação extra que facilita a extração da marca. Porém, a gama de aplicações para técnicas cegas é mais vasta do que para os

outros dois tipos.

### 1.2.1 Nuvens de Pontos 3D: Estado-da-Arte

Modelos tridimensionais (3D) são bastante utilizados em diversas aplicações (KOZ; TRIANTAFYLLIDIS; ALATAN, 2008; ALFACE; MACQ, 2007), tais como em imagens médicas (KLYUZHIN; SOSSI, 2017), escaneamento terrestre (CAI et al., 2019; FEDORENKO; GABDULLIN; FEDORENKO, 2018), veículos autônomos (WANG et al., 2017; ZENG et al., 2018), reconstrução de patrimônios culturais (SHAO et al., 2018) e modelagem de cenas internas (WANG et al., 2018). Essas aplicações dependem da reconstrução ou análise de modelos 3D, que são comumente representados como malhas 3D (3D *meshes*) ou nuvens de pontos (*point clouds*). Normalmente, malhas 3D demandam altos requisitos de armazenamento e transmissão, devido à presença de informação a respeito da conectividade entre os pontos; isso não é necessário para nuvens de pontos 3D, o que pode tornar o custo computacional para manipular este tipo de dado mais atrativo em alguns casos. Nuvens de pontos podem ser adquiridas por diferentes técnicas e tecnologias, como fotogrametria, sensores LIDAR, sensoriamento remoto via satélites, etc.

A extensão de técnicas de marca d'água para espaços tridimensionais tem recebido uma atenção particular nos últimos anos e, neste contexto, soluções aplicáveis a modelos 3D (LUO; BORS, 2011; LIU; PRABHAKARAN; GUO, 2012; YANG et al., 2017; ITIER; PUECH, 2017), vídeo 3D (ASIKUZZAMAN et al., 2016) e hologramas (CHENG et al., 2014; CHAN; HWANG; CHENG, 2015) têm sido propostas. Com relação a modelos 3D, têm sido descritas na literatura diversas técnicas de marca d'água voltadas principalmente para malhas 3D (BORS; LUO, 2013; GARG; AGRAWAL; VARSHNEYA, 2013; ROLLAND-NEVIERE; DOËRR; ALLIEZ, 2014). Por outro lado, esquemas especificamente projetados para nuvens de pontos 3D parecem ainda estar em um estágio inicial de desenvolvimento; técnicas tradicionais de marca d'água digital (KOZ; TRIANTAFYLLIDIS; ALATAN, 2008) ou até mesmo técnicas propostas originalmente para malhas 3D não são diretamente aplicáveis em nuvens de pontos (AGARWAL; PRABHAKARAN, 2009) devido à falta de informação de conectividade.

Nesta seção, é apresentada uma breve revisão dos trabalhos recentemente publicados em que é tratado o problema de marca d'água para nuvens de pontos. Na maioria destes trabalhos, são descritos métodos aplicados no domínio espacial e todos realizam a inserção dos *bits* da marca d'água na informação das coordenadas espaciais dos modelos. Em 2004, Cotting et al. (COTTING et al., 2004) propuseram a construção de um grafo Riemanniano baseado na distância Euclideana dos  $k$ -vizinhos mais próximos. A partir deste grafo é calculada sua matriz Laplaciana e em seguida é obtida a representação em frequência da nuvem de pontos realizando a decomposição do sinal em uma combinação linear de seus autovetores. Os *bits* da marca d'água são inseridos por um esquema de codificação nas baixas frequências. Antes do processo de extração é realizado um processo de registro para diminuir os efeitos de ataques

com transformações afins. Ainda em 2004, Ohbuchi, Mukaiyama e Takahashi (OHBUCHI; MUKAIYAMA; TAKAHASHI, 2004) propuseram outro método no domínio de uma transformada. Nesse trabalho, a técnica de análise espectral de malhas (*mesh spectral analysis*), proposta por Karni e Gotsman (KARNI; GOTSMAN, 2000), é utilizada. Inicialmente, um modelo de malhas 3D é gerado a partir da nuvem de pontos fornecida. Então, é realizada a análise espectral de malhas para calcular componentes de baixa frequência, que são modificados para inserir a sequência de *bits*.

Luo, Lu e Pan (LUO; LU; PAN, 2006) apresentaram, em 2006, um método com o objetivo de explorar a alta correlação existente entre pontos vizinhos para inserir a marca d'água. Inicialmente, grupos de 8 vizinhos mais próximos são formados a partir de pontos selecionados de forma pseudo-aleatória. Então, a transformada discreta do cosseno inteira (aproximada) é calculada para cada grupo e o coeficiente de maior frequência é modulado para inserir um *bit* da marca d'água. Em 2009, Agarwal e Prabhakaran (AGARWAL; PRABHAKARAN, 2009) apresentaram um mecanismo de marca d'água cega e robusta para nuvens de pontos 3D. O procedimento é baseado em encontrar uma estrutura de árvore para os pontos e formar agrupamentos; a marca d'água pode ser inserida em uma ordem específica, globalmente (intragrupo) ou localmente (intergrupo). A sequência de *bits* é codificada e decodificada dentro de cada grupo baseado em uma extensão da técnica QIM (CHEN; WORNELL, 2001b). Qi, Xie e Zhang apresentaram, em 2010 (QI; DONG-QING; DA-FANG, 2010), uma técnica cega de marca d'água baseada em partições de auto-similaridade. A nuvem de pontos é organizada em uma *octree* de no máximo  $k$  pontos em cada bloco. Os *bits* da marca d'água são inseridos no ângulo médio formado pelo vetor direção de cada bloco de pontos.

Em 2015, Xiaoqing (XIAOQING, 2015) apresentou um método de marca d'água em que os *bits* são inseridos modificando a média da distribuição normalizada de características do modelo de nuvem de pontos. As coordenadas cartesianas,  $v_i = (x_i, y_i, z_i)$ , são convertidas em coordenadas esféricas,  $q_i = (r_i, \theta_i, \varphi_i)$ . Um conjunto de distâncias,  $r_i$ , em ordem ascendente, é dividido em diversos grupos de tamanho igual à quantidade de *bits* da marca d'água. Cada grupo é normalizado, e um *bit* é inserido de acordo com um processo de modulação baseado na média dos valores de  $r_i$  em cada grupo. Finalmente, em 2018, Liu *et al.* (LIU *et al.*, 2018) propuseram um método em que cada ponto é classificado em grupos mutuamente exclusivos de acordo com a média da curvatura média do modelo (calculada de acordo com (MEYER *et al.*, 2003)). Cada vértice  $v_i = (x_i, y_i, z_i)$  é convertido em coordenadas esféricas  $q_i = (r_i, \theta_i, \varphi_i)$  baseado no baricentro de um dos grupos. Então, a marca d'água é inserida nas distâncias radiais  $r_i$  dos pontos.

Na Tabela 1, são apresentadas, de forma concisa, as técnicas de marca d'água para nuvens de pontos mencionadas anteriormente; é indicado o tipo da marca d'água (cega ou não-cega), o domínio em que a marca é inserida (espacial ou de alguma transformada), os ataques avaliados e as métricas de desempenho considerando robustez e imperceptibilidade.

Tabela 1 – Resumo das técnicas de marca d’água para nuvens de pontos 3D publicados na literatura. A coluna Ref. apresenta as referências de cada trabalho, numeradas de 1 a 7 conforme: [1] (COTTING et al., 2004), [2] (OHBUCHI; MUKAIYAMA; TAKAHASHI, 2004), [3] (LUO; LU; PAN, 2006), [4] (AGARWAL; PRABHAKARAN, 2009), [5] (QI; DONG-QING; DA-FANG, 2010), [6] (XIAOQING, 2015), [7] (LIU et al., 2018).

| Ref. | Tipo     | Domínio                       | Ataques                                                                          | Robustez                    | Imperceptibilidade                                          |
|------|----------|-------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|-------------------------------------------------------------|
| [1]  | Não-cega | <i>Mesh Spectral Analysis</i> | Transformações afins, re-amostragem, filtro passa-baixa, corte e adição de ruído | Taxa de erro de <i>bits</i> | Subjetivo                                                   |
| [2]  | Não-cega | <i>Mesh Spectral Analysis</i> | Transformações afins, simplificação, corte e adição de ruído                     | Taxa de erro de <i>bits</i> | Não informado                                               |
| [3]  | Não-cega | <i>Integer DCT</i>            | –                                                                                | –                           | Distância de Hausdorff                                      |
| [4]  | Cega     | Espacial                      | Transformações afins, re-ordenação, simplificação, corte e adição de ruído       | Taxa de Detecção            | Distância de Hausdorff e Taxa de erro de <i>bits</i>        |
| [5]  | Cega     | Espacial                      | Transformações afins, re-amostragem, simplificação, corte e adição de ruído      | Taxa de erro de <i>bits</i> | PSNR                                                        |
| [6]  | Não-cega | Espacial                      | Transformações afins, re-ordenação, simplificação, corte e adição de ruído       | Correlação de Pearson       | Distância de Hausdorff                                      |
| [7]  | Não-cega | Espacial                      | Rotação, simplificação, corte e adição de ruído                                  | Correlação de Pearson       | Raíz do erro médio quadrático e Taxa de erro de <i>bits</i> |

### 1.2.2 Imagens de *Light Field*: Estado-da-Arte

Imagens de *light field* vêm ganhando a atenção da comunidade acadêmica nos últimos anos (IHRKE; RESTREPO; MIGNARD-DEBISE, 2016; WU et al., 2017). Isso se deve principalmente à possibilidade de captura de mais informação visual do que aquela proporcionada por métodos convencionais de imagens 2D e aos avanços no poder de processamento para tratar todos esses dados. Conforme mencionado anteriormente, imagens de *light field* são formadas a partir da função plenóptica que descreve a luz em uma cena em função da posição, ângulo, comprimento de onda e tempo (WU et al., 2017). Essa abordagem provê benefícios e dá suporte

a incrementos em operações como segmentação (XU et al., 2015; FISS; CURLESS; SZELISKI, 2015), detecção por meio de oclusão (YANG et al., 2013), classificação e reconhecimento (LI et al., 2014; WANG et al., 2016), etc.

O uso de imagens de *light field* como objeto de cobertura para aplicação de uma marca d'água possui algumas possibilidades de acordo com o objeto que se quer proteger. Dentre elas, o objeto de interesse pode ser a imagem renderizada (normalmente exibido na forma de um vídeo), a informação de profundidade da imagem ou a informação de forma bruta (ou seja, a própria imagem de *light field*) (PAUDYAL et al., 2015). Em se tratando da informação em seu estado bruto, a associação de técnicas já existentes de marca d'água não é uma tarefa simples. A quantidade de vistas resulta em uma variedade de possibilidades para inserção da marca e algumas dúvidas devem ser respondidas. Por exemplo, a depender da aplicação deve-se responder se é preciso explorar todas as vistas ou apenas um subconjunto delas e como devemos explorar a redundância intrínseca ao método de aquisição presente nas diferentes vistas de forma a obter um melhor desempenho da técnica de marca d'água. De fato, a maioria dos trabalhos publicados consideram a aplicação de marca d'água no contexto de renderização de *light fields* ou propõem a adaptação de técnicas de marca d'água para imagens 2D. Têm sido documentadas na literatura proposições de técnicas de marca d'água para *light fields* no domínio da *wavelet* de Haar (PAUDYAL et al., 2015) e da 2D-DCT (ANSARI et al., 2018), por exemplo. Porém, a representação mais natural de um *light field* parece ser por meio de uma estrutura 4-dimensional, com duas dimensões para o plano das vistas e outras duas para o plano espacial da imagem. Tal possibilidade é considerada em (ALVES et al., 2018), em que se demonstra que, usando a 4D-DCT, consegue-se explorar com maior eficiência a redundância presente na estrutura de um *light field lenslet* do que usando suas versões bidimensionais. Essa conclusão deu suporte para que, em (CARVALHO et al., 2018), fosse proposto um CODEC (codificador/decodificador) para imagens *lenslet* de *light fields* utilizando a 4D-DCT, explorando a alta correlação entre as vistas e o plano espacial. Os resultados apresentados nesses trabalhos sugerem a 4D-DCT como uma alternativa promissora para métodos de compressão de *light fields*.

Conforme mencionado, a maioria das técnicas de marca d'água para imagens de *light field* foi publicada no contexto de proteção durante a exibição de imagens renderizadas na chamada *free-view television* (FVT). Neste tipo de conteúdo o telespectador pode selecionar livremente a posição da vista e o ângulo de visualização através da aplicação de renderização baseada em imagens (IBR, do inglês *image based rendering*) em um vídeo de múltiplas vistas (MVV, do inglês *multi-view video*), ou seja, formado por imagens de *light field*. Esses trabalhos se propõem a proteger direitos autorais e prover proteção contra cópias indevidas considerando que o telespectador pode gravar um trecho do vídeo transmitido após selecionar uma vista e um ângulo específicos. Em 2006, foi publicado um trabalho de marca d'água especificamente para imagens geradas pela renderização de *light fields*, no cenário de MVV (KOZ; CIGLA; ALATAN, 2006), considerando que a posição e a rotação da vista renderizada escolhida são conhecidas. Neste trabalho, a representação em 4 dimensões de uma imagem de *light field* é

interpretada como um *array* de subimagens 2D, e a marca d'água é inserida em cada uma dessas subimagens; a técnica é aplicada no domínio espacial. Em 2007, foi publicada uma extensão desse trabalho em que a vista renderizada escolhida pode estar localizada em uma posição e num ângulo arbitrários (KOZ; ÇİĞLA; ALATAN, 2007; APOSTOLIDIS; TRIANTAFYLLIDIS, 2008). Em 2008, foram apresentados dois estudos utilizando a mesma abordagem de (KOZ; ÇİĞLA; ALATAN, 2007), porém a avaliação foi feita com renderização por interpolação bilinear em vez de interpolação pelo vizinho mais próximo (APOSTOLIDIS; TRIANTAFYLLIDIS, 2008; KOZ; ÇİĞLA; ALATAN, 2008). Em 2010, foi publicado um trabalho nesse mesmo contexto, em que o detector realiza análises e estimativas das variações de padrão da marca d'água, devido às operações de renderização para concluir a extração (KOZ; ÇİĞLA; ALATAN, 2010). Ainda em 2010, foi apresentado um esquema de marca d'água para FVT baseado em espalhamento espectral; a marca d'água é inserida em todas as vistas e sua detecção é realizada explorando os coeficientes da transformada discreta do cosseno (DCT, do inglês discrete cosine transform) gerados pela transformação da vista renderizada (TIAN et al., 2011).

Em 2015, foi proposto um método em que todas as vistas da imagem de *light field* são reorganizadas em uma sequência de vistas formando uma única imagem. A marca é então inserida no domínio da transformada *wavelet* de Haar desta única imagem (PAUDYAL et al., 2015). Nesse trabalho, é avaliada a qualidade do *light field* renderizado como uma animação circular. Além disso, foi avaliada a degradação do mapa de profundidade após a inserção da marca d'água, com o objetivo de identificar a qualidade na capacidade de mudança de foco da imagem de *light field*. Em 2018, foi proposta uma técnica de marca d'água para imagens de *light field* no domínio da 2D-DCT (ANSARI et al., 2018). Cada *bit* da marca d'água é inserido em uma imagem 2D formada por *pixels* selecionados de forma arbitrária de diferentes vistas do *light field*.

### 1.3 OBJETIVOS

Nesta tese são propostos dois esquemas de marca d'água com o objetivo de garantir a autenticação de imagens plenópticas; um método especificamente voltado para nuvens de pontos 3D e outro para imagens de *light field*:

- É proposto um esquema de marca d'água não-cego para nuvens de pontos 3D baseado na transformada de Fourier sobre grafos (GFT, do inglês *Graph Fourier Transform*) (SHUMAN et al., 2013; ORTEGA et al., 2018; RIBEIRO; LIMA, 2018). Conforme mencionado anteriormente, a aquisição de modelos complexos é, geralmente, custosa; o mapeamento preciso em 3D de um cenário urbano (TOSCHI et al., 2017), por exemplo, deve necessitar de algum tipo de veículo aéreo equipado com um sensor a laser ou dispositivo de imageamento. Recursos similares são necessários para a reconstrução 3D de artefatos patrimoniais para registro histórico e / ou posterior estudo (MENNA et al., 2016). Esses são exemplos de casos em que se pode desejar garantir proteção de direitos autorais e detectar cópias

e / ou distribuidores ilegais. Neste contexto, o uso de um sistema de detecção não-cego melhora substancialmente o desempenho do detector (COX et al., 2007). O método proposto se baseia em inferir a informação de conectividade entre os pontos de uma nuvem e representá-los como vértices de um grafo; pode-se também considerar um sinal sobre este grafo em que as amostras do sinal assumem valores numéricos correspondentes a um atributo associados aos pontos da nuvem. Com o grafo formado (informação de conectividade e sinal) é utilizada a GFT, uma conhecida ferramenta do arcabouço de Processamento de Sinais sobre Grafos (GSP, do inglês *Graph Signal Processing*) (SHUMAN et al., 2013; ORTEGA et al., 2018; RIBEIRO; LIMA, 2018), para representar o sinal mencionado no domínio espectral (Fourier) de grafos, em que a marca d'água é inserida. É importante mencionar que esta proposta é inovadora também no sentido de que a marca d'água é inserida nos atributos da nuvem de pontos, enquanto nos trabalhos publicados anteriormente insere-se a marca d'água sob a perspectiva das coordenadas. Mais especificamente, foram utilizados os valores numéricos correspondentes à cor de cada um dos pontos como sinal sobre o grafo, o qual se espera ser um sinal suave (ORTEGA et al., 2018; RIBEIRO; LIMA, 2018). Consequentemente, o método proposto é robusto contra qualquer tipo de distorção espacial que possa ser causada por um ataque (intencional ou não); isso é confirmado por meio de simulações computacionais. Ainda, os experimentos indicam o método como robusto contra diversos outros tipos de ataques como reordenação, transformações afins (rotação, escalonamento, translação e cisalhamento), adição de ruído e recorte.

- Propõe-se uma técnica cega de marca d'água para imagens *lenslet* de *light fields* no domínio da 4D-DCT; o objetivo principal da técnica, em que a marca é inserida empregando *Quantization Index Modulation* (QIM) (CHEN; WORNELL, 2001a), é prover alta robustez à compressão dessas imagens. Nesse contexto, propõe-se uma estratégia para ordenação dos coeficientes no domínio da transformada; tal procedimento é utilizado nas etapas de inserção e extração da marca. Neste trabalho, foram utilizadas 118 imagens, das quais 88 foram utilizadas para proposição da estratégia de ordenação e 30 para testes. Parte das imagens de teste são sugeridas na chamada de propostas do JPEG (*Joint Photographic Experts Group*) para codificação de *light fields* (ISO/IEC JTC 1/SC29/WG1N74014, 2017). Os resultados obtidos demonstram a imperceptibilidade da marca e evidenciam a robustez da técnica mesmo após o *light field* ser submetido a compressões com percentuais relativamente baixos de coeficientes retidos e a diversos outros ataques. Além disso, o algoritmo de ordenação se mostrou eficiente com relação à capacidade de manter a propriedade de compactação de energia da DCT, abrindo possibilidades de sua utilização em outras aplicações como compressão.

As proposições descritas anteriormente estão alinhadas com os seguintes objetivos:

### Objetivo geral:

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver novas técnicas de marca d'água para estruturas complexas e com grandes quantidades de dados geradas com base na chamada função plenóptica, de forma que as técnicas desenvolvidas contribuam para a proteção de direitos autorais e autenticação de nuvens de pontos 3D e imagens de *light field*.

### Objetivos específicos:

Os objetivos específicos deste trabalho são:

1. Avaliar o comportamento da transformada de Fourier sobre grafos em uma estrutura de nuvem de pontos;
2. Propor uma técnica de marca d'água para nuvens de pontos com base na GFT;
3. Avaliar a aplicação da 4D-DCT em imagens de *light field*;
4. Propor um ordenamento dos coeficientes de uma estrutura 4-dimensional no domínio da transformada, de forma que a energia se concentre nas baixas frequências;
5. Propor uma técnica de marca d'água para imagens de *light field* no domínio da 4D-DCT;
6. Avaliar as técnicas propostas quanto à robustez, ou seja, a capacidade de extração da marca d'água após o objeto marcado ser submetido a ataques (intencionais ou não), e à imperceptibilidade, isto é, o quanto a inserção da marca d'água degrada a qualidade do objeto marcado com relação ao objeto original.

## 1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O documento está organizado da seguinte forma:

- No Capítulo 2 são apresentadas as características da transformada utilizada para aplicação da marca d'água nos modelos de nuvem de pontos, a transformada de Fourier sobre grafos (GFT, *Graph Fourier Transform*). Também são apresentados exemplos de nuvens de pontos no domínio da GFT e seu comportamento quanto à reconstrução do modelo original perante modificações nos coeficientes.
- No Capítulo 3 é apresentada a técnica de marca d'água proposta para nuvens de pontos, sendo discutidas todas as etapas do algoritmo.
- No Capítulo 4 são apresentados os materiais e métodos utilizados nos arranjos experimentais realizados nas simulações para avaliação da técnica de marca d'água proposta para nuvens de pontos. São apresentados resultados de avaliação da imperceptibilidade,

robustez a diversos ataques e capacidade de inserção. Por fim, é realizada uma análise comparativa da técnica proposta com outros algoritmos já publicados na literatura.

- No Capítulo 5 são apresentadas as características da transformada utilizada para aplicação da marca d'água nas imagens de *light field*, a transformada discreta do cosseno 4-dimensional (4D-DCT, *4-Dimensional Discrete Cosine Transform*). Também são apresentados exemplos de imagens de *light field* no domínio da 4D-DCT e seu comportamento quanto à reconstrução da imagem original perante modificações nos coeficientes.
- No Capítulo 6 é apresentada a técnica de marca d'água proposta para imagens de *light field*. São discutidas todas as etapas do algoritmo e é também apresentada uma estratégia para ordenação dos coeficientes de uma estrutura 4D e uma série de alternativas com algoritmos bem definidos para realização da varredura.
- No Capítulo 7 são apresentados os materiais e métodos utilizados nos arranjos experimentais realizados nas simulações para avaliação da técnica de marca d'água proposta para imagens de *light field*. É apresentado um estudo com relação a estratégias de varredura de coeficientes em uma estrutura 4-dimensional de imagens de *light field lenslet*. São apresentados resultados de avaliação da imperceptibilidade, robustez a diversos ataques, em que o método proposto é comparado com outra técnica já publicada na literatura, e é apresentada uma análise de impacto da força de inserção da marca pelo algoritmo proposto.
- No Capítulo 8 são apresentadas as conclusões, os próximos passos e os trabalhos submetidos a periódicos, congressos e depósitos de patente relacionados a esta tese.
- No Apêndice A são apresentados resultados de simulação adicionais da técnica proposta para imagens de *light field*.
- No Apêndice B são apresentados algoritmos de ordenação de coeficientes para imagens de *light field*.
- No Apêndice C são apresentadas informações adicionais a respeito das simulações e estudos realizados para imagens de *light field*.

## 2 NUVENS DE PONTOS NO DOMÍNIO DA TRANSFORMADA

Este capítulo apresenta algumas características da transformada utilizada durante o processo de marca d'água dos objetos de nuvens de pontos 3D; também são apresentados e discutidos alguns resultados quanto ao comportamento dessas estruturas no domínio da transformada utilizada para processá-las. Especificamente para nuvens de pontos 3D foi utilizada a transformada de Fourier sobre grafos (GFT, do inglês *graph Fourier transform*); neste trabalho, cada ponto da nuvem é representado por um vértice do grafo. Foi utilizado um método de inferência para definir as arestas ligadas a cada vértice e os atributos de cada ponto, ou até mesmo as próprias coordenadas espaciais dos pontos podem ser tomados como o sinal sobre o grafo.

### 2.1 A TRANSFORMADA DE FOURIER SOBRE GRAFOS

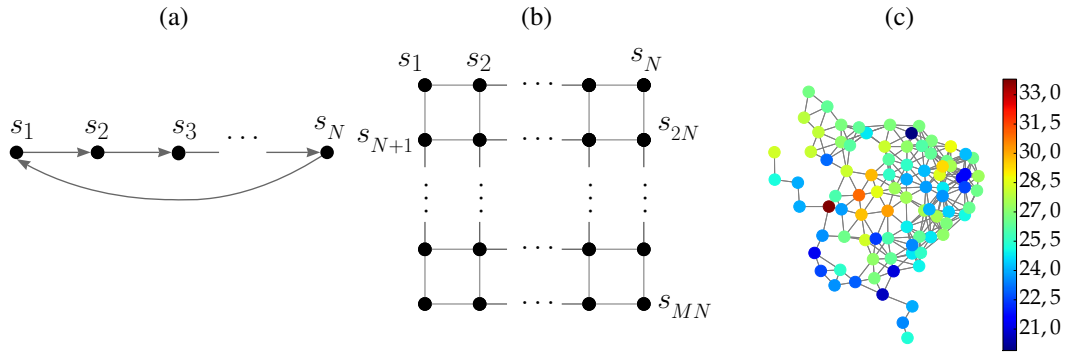
Em uma ampla gama de cenários, dados multivariados definidos em domínios semelhantes a redes são produzidos constantemente. De redes de sensores e dispositivos de IoT (*Internet of Things*) a redes sociais e ecológicas, exemplos de estruturas modeláveis por grafos sobre os quais algumas variáveis podem ser definidas são diversos (ORTEGA et al., 2018; RIBEIRO; LIMA, 2018; JAIN; MOURA et al., 2014; GOLUBSKI; WESTLUND et al., 2016; MEI; MOURA, 2017). Neste contexto, nos últimos anos, tem sido desenvolvido o campo do processamento de sinais sobre grafos (GSP, do inglês *graph signal processing*), que tem proposto ferramentas que levam em conta a estrutura subjacente sobre a qual os sinais são definidos (SANDRYHAILA; MOURA, 2014a). Um sinal  $s \in \mathcal{S}$  indexado por vértices  $v_i \in \mathcal{V}$  de um grafo  $\mathcal{G} = \{\mathbf{A}, \mathcal{V}\}$  é um mapeamento  $s : \mathcal{V} \rightarrow \mathbb{C}^N$ , em que  $\mathcal{S}$  é o espaço do sinal sobre  $\mathcal{G}$  e  $\mathbf{A}$  é matriz de adjacência correspondente (SANDRYHAILA; MOURA, 2014a; CHEN; VARMA et al., 2015; SANDRYHAILA; MOURA, 2014b). Exemplos de sinais sobre grafos são apresentados na Figura 8.

No ramo de GSP originado da teoria espectral de grafos, que é restrito a grafos não direcionados, a matriz Laplaciana

$$\mathcal{L} = \mathbf{D} - \mathbf{A}, \quad (2.1)$$

com a matriz de grau  $\mathbf{D}$  sendo uma matriz diagonal com o grau  $d_i$  como sua  $i$ -ésima entrada, tem uma grande importância;  $\mathcal{L}$  pode ser vista como um operador diferença atuando em um sinal  $s$ , atualizando cada amostra com a diferença entre o valor em um vértice e seu vizinho. Tal interpretação foi utilizada por Shuman et al. para propor uma definição para a transformada de Fourier sobre grafos. Eles iniciaram pelo fato de que a transformada de Fourier de tempo contínuo consiste na decomposição em uma base de autofunções do operador Laplaciano (segunda derivada) (SHUMAN; RICAUD; VANDERGHEYNST, 2012; SHUMAN et al., 2013). Como uma generalização, a GFT de um sinal  $s$  foi definida como a expansão desse sinal em termos dos autovetores da matriz Laplaciana (do grafo sobre o qual o sinal é definido). Como

Figura 8 – Exemplos de sinais sobre (a) um grafo em anel direcionado, (b) um grafo em grade regular não direcionado e (c) um grafo representando as cidades do Nordeste brasileiro, sobre o qual foi definido um sinal de medições de temperatura a partir de 1º de Fevereiro de 2012, recuperadas do Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP), disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>.



Fonte: (RIBEIRO; LIMA, 2018)

$\mathcal{L}$  é sempre real e simétrica e, consequentemente, diagonalizável, então pode ser escrita como  $\mathcal{L} = \mathbf{U}\mathbf{T}\mathbf{U}^{-1}$ , e o par de equações da GFT é dado por (SHUMAN et al., 2013)

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{s}} &\triangleq \mathbf{U}^{-1}\mathbf{s} & (\text{análise}) \\ \mathbf{s} &= \mathbf{U}\tilde{\mathbf{s}}, & (\text{síntese}) \end{aligned} \tag{2.2}$$

em que  $\mathbf{U}$  contém os autovetores em suas colunas e  $\mathbf{T}$  é uma matriz diagonal preenchida com os autovalores da matriz Laplaciana.

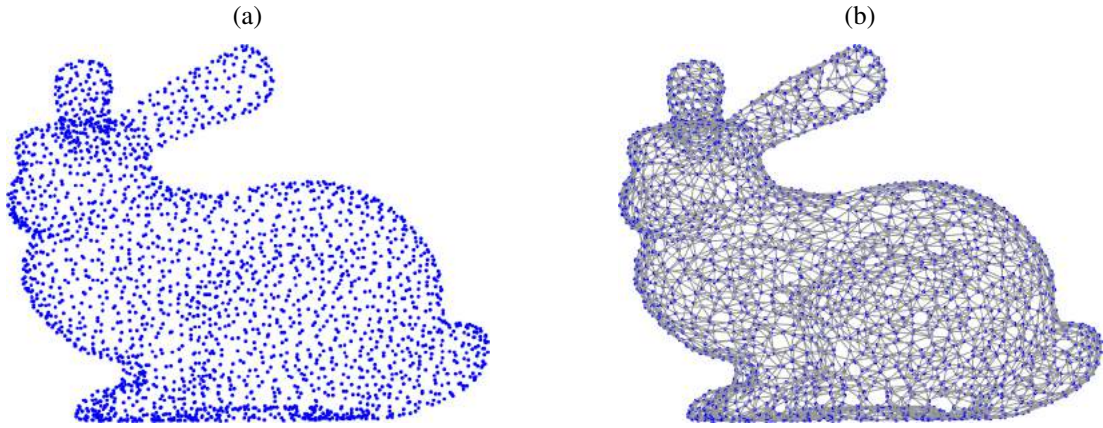
### 2.1.1 A GFT Aplicada a Nuvens de Pontos 3D

Neste trabalho, os pontos de uma nuvem 3D são tratados como vértices de um grafo  $G$  cujas arestas são inferidas de acordo com uma estratégia específica; os atributos de tais pontos são tratados como um sinal  $\mathbf{s}$  sobre  $G$ , para os quais a GFT pode ser calculada. Deste ponto em diante, denota-se a aplicação da transformada de Fourier sobre grafos e sua inversa como  $\text{GFT}(G, \mathbf{s})$  e  $\text{IGFT}(G, \mathbf{s})$ , respectivamente.

A Figura 9a apresenta um modelo de nuvem de pontos 3D subamostrado do bem conhecido modelo *Stanford Bunny* (THE..., 2019a). O modelo original possui um total de 35.947 pontos enquanto o modelo simplificado possui apenas 2.503 pontos. A simplificação do modelo foi realizada neste ponto do trabalho para melhor visualização das informações apresentadas nesta seção<sup>1</sup>. Para permitir o cálculo da GFT, é preciso inferir as arestas entre pares de pontos na nuvem formando um grafo  $G = (V, \xi)$ , em que  $V$  é o conjunto de vértices

<sup>1</sup> As manipulações envolvendo grafos neste trabalho foram realizadas utilizando a ferramenta disponível para MATLAB chamada *Graph Signal Processing toolbox* (Perraudin et al., 2014), desenvolvida no Laboratório de Processamento de Sinais da Escola Politécnica Federal de Lausanne.

Figura 9 – (a) Modelos de nuvem de pontos 3D e (b) um grafo inferido a partir da proximidade (5 vizinhos mais próximos) dos pontos deste modelo.



Fonte: O Autor (2020).

e  $\xi$  é o conjunto de arestas. Em outras palavras, é necessário inferir a topologia de um grafo (arestas) usando as informações fornecidas pela nuvem de pontos: coordenadas e / ou atributos. A Figura 9b apresenta um grafo criado a partir do modelo simplificado. As arestas foram definidas conectando os 5 vizinhos mais próximos de cada ponto em termos da distância Euclidiana. O peso da aresta entre dois pontos  $p_i$  e  $p_j$  é dado por

$$\text{weight}(i, j) \triangleq \exp\left(\frac{-\text{dist}(p_i, p_j)}{\sigma^2}\right), \quad (2.3)$$

em que  $\text{dist}(p_i, p_j)$  é a distância Euclidiana,

$$\text{dist}(p_i, p_j) = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2}, \quad (2.4)$$

e

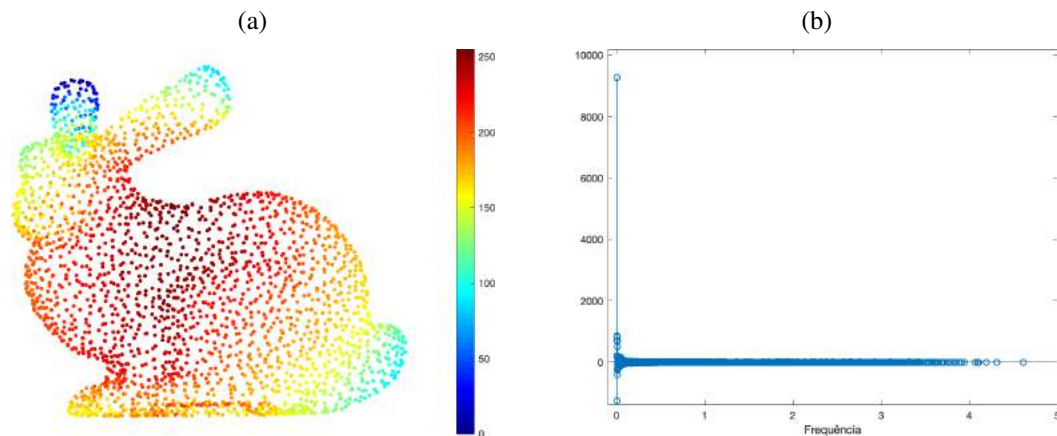
$$\sigma = \frac{\sum_{(i,j) \in \xi} \text{dist}(p_i, p_j)}{|\xi|}, \quad (2.5)$$

em que  $|\xi|$  é o número de arestas do grafo  $G$ .

Para avaliar a transformada de Fourier sobre grafos com relação à nuvem de pontos da Figura 9a foi atribuída uma cor a cada ponto da nuvem em função da posição de cada ponto. Os pontos foram coloridos de forma que pontos vizinhos tivessem cores similares para simular um modelo real em que existe uma alta correlação entre pontos vizinhos (mais detalhes na Seção 4.1). A Figura 10a apresenta o modelo colorido artificialmente. As cores foram então utilizadas para o cálculo da GFT utilizando-as como sinal sobre o grafo. O sinal na Figura 10b representa os coeficientes da GFT em função dos autovalores (frequências) dispostos no eixo das abscissas.

Um sinal amostrado sobre o grafo pode sofrer degradações devido à ocorrência de “fenômenos” (normalmente ocasionados por ataques, intencionais ou não) que podem acontecer

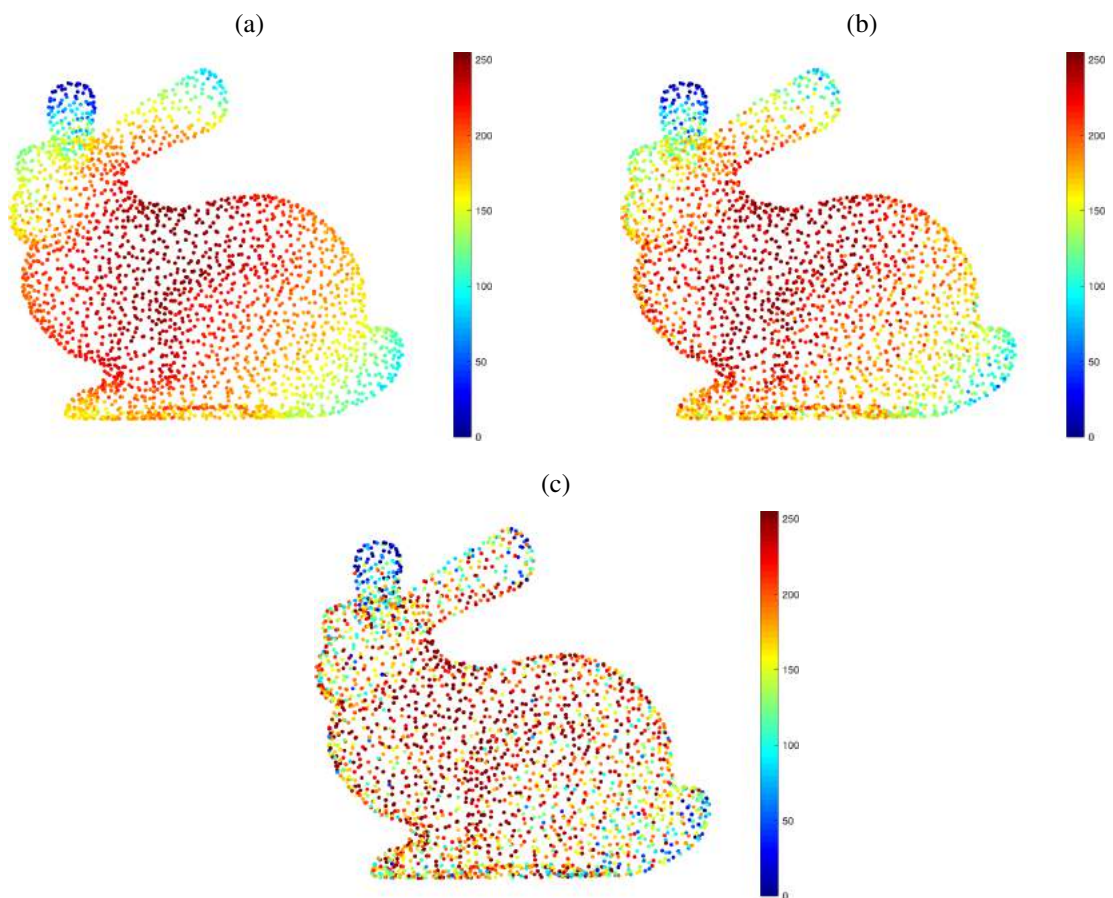
Figura 10 – Análise do espectro de frequência para (a) uma nuvem de pontos colorida artificialmente. Em (b) é apresentado o espectro no domínio da frequência em função dos autovalores.



Fonte: O Autor (2020).

durante a transmissão ou armazenamento do objeto. Algumas simulações ilustrativas foram realizadas para se ter uma “prévia” do nível de degradação do sinal de acordo com a intensidade do ataque. Na Figura 11 são apresentados modelos de nuvem de pontos coloridos com o sinal reconstruído a partir dos coeficientes da GFT utilizando a coloração da Figura 10a como sinal sobre o grafo. Os coeficientes foram alterados com ruído Gaussiano branco aditivo (AWGN, do inglês *additive white Gaussian noise*). Na Figura 11a é apresentado um modelo cujo sinal de coloração foi reconstruído a partir de coeficientes cuja relação sinal-ruído (SNR, do inglês *signal-to-noise ratio*) em relação aos coeficientes originais é de 30 dB; a relação sinal-ruído de pico (PSNR, do inglês *peak signal-to-noise ratio*) entre o sinal reconstruído e o sinal original é de 32,64 dB e a raiz do erro médio quadrático (RMSE, do inglês *root-mean-square error*) é de 5,95. Na Figura 11b é apresentado o modelo cujo sinal foi reconstruído a partir de coeficientes cuja SNR em relação aos coeficientes originais é de 20 dB; o valor de PSNR entre o sinal reconstruído e o sinal original é de 22,57 dB e o valor de RMSE é de 18,97. Já na Figura 11c é apresentado o modelo cujo sinal foi reconstruído a partir de coeficientes cuja SNR em relação aos coeficientes originais é de 10 dB; o valor de PSNR entre o sinal reconstruído e o sinal original é de 12,51 dB e o valor de RMSE é de 60,40. Note que quanto mais degradado é o sinal, menor é a ocorrência de transições suaves com relação a intensidade de cor entre pontos vizinhos.

Figura 11 – Modelos de nuvem de pontos coloridos com sinal reconstruído a partir de versões degradadas dos coeficientes da GFT. (a) SNR do sinal degradado = 30 dB; (b) SNR do sinal degradado = 20 dB; (c) SNR do sinal degradado = 10 dB.



Fonte: O Autor (2020).

### 3 TÉCNICA DE MARCA D'ÁGUA NO DOMÍNIO DA TRANSFORMADA PARA NUVENS DE PONTOS 3D

Neste capítulo é apresentada a técnica de marca d'água proposta para uma das imagens plenópticas consideradas neste trabalho, mais especificamente para nuvens de pontos 3D. São descritas as etapas de inserção e extração e os detalhes concernentes ao método abordado para modulação dos coeficientes no domínio da transformada. A referida técnica é baseada na transformada de Fourier sobre grafos, conforme descrito a seguir.

#### 3.1 PROPOSTA DE TÉCNICA DE MARCA D'ÁGUA PARA NUVENS DE PONTOS

Na técnica introduzida nesta seção, os processos de inserção e extração da marca d'água se baseiam na transformada de Fourier sobre grafos. Conforme mencionado anteriormente, os métodos de marca d'água para nuvens de pontos 3D apresentados na literatura inserem a sequência de *bits* nas coordenadas dos pontos. Em contraste, neste trabalho, usam-se as informações de cores atribuídas a cada ponto da nuvem. Foi decidido adotar essa estratégia porque espera-se que as cores de pontos próximos sejam semelhantes, gerando um padrão “suave” (ou sinal “suave”), que é adequado para ser representado no domínio da GFT (ORTEGA et al., 2018; RIBEIRO; LIMA, 2018). É importante destacar que mesmo para nuvens de pontos que não possuem coloração é possível gerar esta informação de forma sintética, permitindo a aplicação da técnica proposta.

##### 3.1.1 Etapa de Inserção

Com o objetivo de inserir a marca d'água, é realizado um processo de clusterização para formar “pequenos” grupos de pontos; uma réplica da marca d'água é inserida em cada um destes *clusters* (grupos). Isso evita a necessidade de realizar o cálculo da GFT para um conjunto muito grande de pontos, o que teria um alto custo computacional e diminuiria a robustez contra alguns ataques, como o ataque de recorte. Em contrapartida, a quantidade de *bits* que podem ser inseridos é reduzida. Porém, como, de uma maneira geral, nuvens 3D possuem uma quantidade elevada de pontos, ainda é possível inserir marcas d'água com tamanhos relativamente grandes (mais detalhes são apresentados na Subseção 4.2.3). Os mesmos grupos gerados durante o processo de inserção devem ser formados também no processo de extração para a correta recuperação dos *bits*. O processo de inserção é dividido nas seguintes etapas:

1. Os pontos são classificados e embaralhados. Esse passo é importante contra ataques de reordenação e de transformações afins;
2. Um processo de clusterização é executado. Na prática são aplicados dois níveis de clusterização, cujos detalhes são fornecidos na Subseção 3.1.1.2;

3. Para cada *cluster* de segundo nível, um grafo é inferido levando em consideração a distância entre cada par de pontos. As arestas obtidas a partir da inferência do grafo são importantes para o cálculo da GFT;
4. A GFT é computada para cada grafo, usando os valores numéricos das cores dos respectivos pontos como o sinal sobre o grafo e os *bits* da marca d'água são embutidos nos coeficientes da GFT;
5. A transformada inversa é calculada e os pontos são rearranjados de acordo com sua ordem original.

Sequências pseudo-aleatórias são usadas ao longo de todo o processo, de modo que a chave secreta para extração correta da marca d'água corresponde à “semente” utilizada para gerar tais sequências. A Figura 12 apresenta o fluxograma para a fase de inserção. O método recebe uma nuvem de pontos colorida e uma sequência de *bits* de marca d'água  $W$ , e retorna a nuvem de pontos marcada e uma chave. Na figura, o ícone de chave indica em quais etapas são geradas sequências pseudo-aleatórias; cada região colorida do modelo 3D na saída da etapa de clusterização indica um *cluster* de primeiro nível diferente. No exemplo apresentado, foram formados cinco *clusters*, mas esta quantidade pode ser um parâmetro definido pelo usuário. A seguir, detalhes sobre cada etapa são fornecidos.

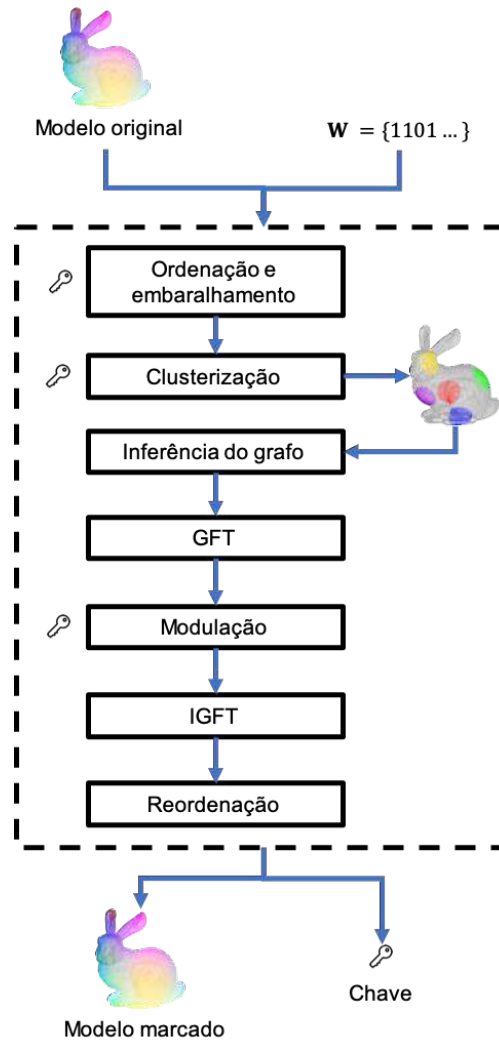
#### 3.1.1.1 Ordenação e Embaralhamento

Como primeiro passo, o método proposto emprega um critério de ordenação previamente estabelecido para ordenar o conjunto de pontos da nuvem. Este passo é importante para evitar ou diminuir o impacto de ataques de reordenação. Esse ataque é possível porque os pontos são organizados em um arquivo na forma de uma lista de coordenadas 3D e informações de atributos (como cor, por exemplo). Se o procedimento de marca d'água depender fortemente da ordem em que os pontos estão organizados neste arquivo, alguém mal intencionado poderia simplesmente alterar essa ordem e a marca d'água seria perdida. Observe que alterar a ordem não afeta a aparência visual da nuvem de pontos, uma vez que a coordenada dos pontos e seus atributos seriam preservados. Assim, para evitar este tipo de ataque, propõe-se ordenar a lista de pontos pela norma  $\ell^2$  de suas coordenadas espaciais ponderadas pelo índice de sua posição. Mais precisamente, considere  $P = \{p_1, p_2, \dots, p_N\}$  um conjunto de pontos em que  $N$  é o número de pontos e  $\{x_i, y_i, z_i\}$  indica as coordenadas 3D do  $i$ -ésimo ponto  $p_i$ . A norma  $\ell^2$  ponderada de  $p_i$  é

$$|p_i| = \sqrt{x_i^2 + 2y_i^2 + 3z_i^2}. \quad (3.1)$$

Uma vez que todas as normas  $\ell^2$  são calculadas, seus valores são ordenados em ordem decrescente e em seguida são embaralhados por um gerador de sequências pseudo-aleatórias. A lista de normas é embaralhada para evitar que a ordem em que os *bits* da marca d'água são inseridos seja

Figura 12 – Fluxograma da etapa de inserção.



Fonte: O Autor (2020).

facilmente descoberta. Algumas informações importantes sobre este passo são: (1) a chave,  $\kappa$ , utilizada no embaralhamento, precisa ser armazenada para uso na etapa de extração da marca d'água e (2) a ordem original dos pontos deve ser revertida no final do processo de inserção.

### 3.1.1.2 Clusterização

Os *bits* da marca d'água não são inseridos em todo conjunto de pontos. Em vez disso, subconjuntos (ou *clusters*) de pontos da nuvem são formados e a marca d'água é replicada em cada um deles. Esta estratégia diminui a capacidade de inserção mas, por outro lado, o esforço computacional para o cálculo da GFT também é reduzido. Outra vantagem de inserir múltiplas cópias da mesma marca d'água em diferentes subconjuntos de pontos é que isso torna o método mais robusto a ataques como recorte e ruído local, por exemplo, pois caso o ataque destruísse uma das cópias ainda pode ser possível extrair a marca d'água pelas demais.

O processo de clusterização é realizado em duas etapas. A nuvem de pontos  $P$  é inicial-

mente dividida em  $M$  *clusters* disjuntos  $C_i$ . Cada *cluster* é iniciado com um ponto “semente” e sua região cresce iterativamente a partir deste ponto. Cada *cluster* tem um ponto “semente” próprio. O número de pontos que um *cluster* pode conter é denotado por  $Q$ . Primeiramente  $M$  pontos da nuvem  $P$  são escolhidos de forma pseudo-aleatória e cada um é tomado como a “semente” de um dos *clusters*. Após a definição das “sementes”, é iniciado um processo iterativo. A cada iteração, para cada ponto “semente”, o ponto mais próximo em termos da distância Euclideana é adicionado ao respectivo *cluster*. Somente pontos que ainda não foram incluídos em iterações anteriores (incluindo os pontos “sementes”) podem ser selecionados. Este procedimento é finalizado assim que todos os *clusters* possuam o limite de  $Q$  pontos.

Em uma segunda etapa, cada *cluster*  $C_i$  é novamente dividido em  $M'$  *subclusters*,  $c_{ij}$ , com  $Q'$  pontos cada, em que  $M' < M$ ,  $Q' < Q$  e  $c_{ij}$  é o  $j$ -ésimo *subcluster* do  $i$ -ésimo *cluster*. Se  $Q' \nmid Q$ , um *subcluster* terá menos que  $Q'$  pontos. O procedimento de clusterização é o mesmo utilizado na primeira etapa de clusterização, porém, considerando que os pontos de cada *subcluster*  $c_{ij}$  pertencem ao *cluster*  $C_i$ . Decidiu-se adicionar um segundo nível de clusterização para reduzir ainda mais o esforço computacional do cálculo da GFT sem comprometer a capacidade de inserção do esquema de marca d'água proposto. Após a etapa de clusterização, para cada *subcluster*, é inferido um grafo  $G = (V, \xi)$  adicionando uma aresta entre cada ponto (vértice) e seus  $k$ -vizinhos mais próximos em termos da distância Euclideana de acordo com o apresentado na Seção 2.1.1.

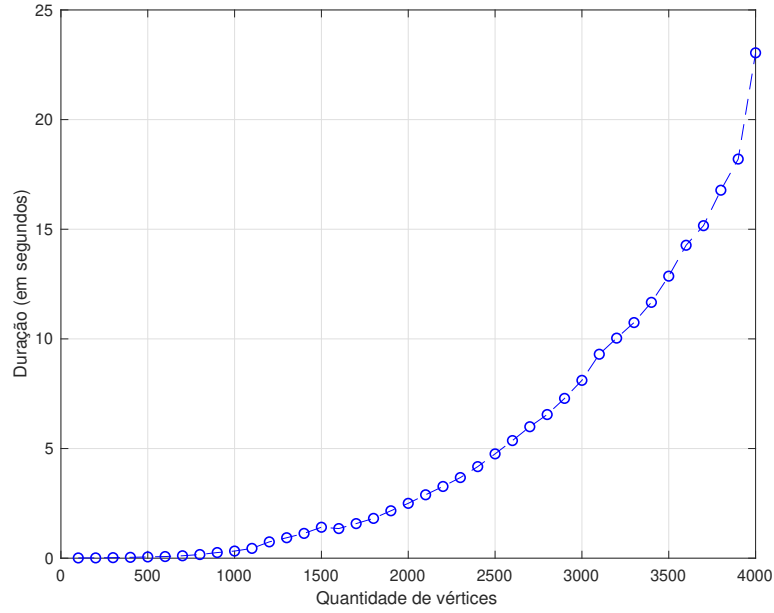
A Figura 13 apresenta resultados de tempo de execução<sup>1</sup> para o cálculo da decomposição da matriz Laplaciana de um grafo em relação à quantidade de vértices. Utilizando um grafo com 4.000 vértices a decomposição chega a durar em torno 23s e para um grafo de 100 vértices a duração da decomposição é em torno de 0,01s. Escolhendo grafos de 100 vértices, por exemplo, precisamos computar 40 vezes a decomposição da matriz para compreender todos os 4.000 vértices. Ainda assim, o tempo necessário é consideravelmente inferior ao tempo para decompor uma matriz de tamanho  $4.000 \times 4.000$ ; seria necessário algo em torno de 0,4s para calcular a decomposição de todas as 40 matrizes  $100 \times 100$ .

### 3.1.1.3 Modulação

A etapa de modulação é baseada em uma classe de algoritmos de ocultação de informação digital denominada *Quantization Index Modulation* (QIM) (CHEN; WORNELL, 2001b). No presente trabalho, os *bits* da marca d'água são inseridos modulando a amplitude dos coeficientes da GFT. Cada grafo  $G$  inferido de um *subcluster* tem  $Q'$  vértices em posições identificadas pelas coordenadas  $(x, y, z)$  e para as quais uma informação de cor  $(r, g, b)$  no espaço RGB é atribuída. Então, as cores são mapeadas em três sinais separados  $s_r$ ,  $s_g$  e  $s_b$  em  $G$ , correspondendo aos canais de cor vermelho, verde e azul, respectivamente. Isso nos permite calcular as três GFTs

<sup>1</sup> O tempo de execução para o cálculo da decomposição da matriz Laplaciana foi mensurado em um computador com Intel Core i5 2,3 GHz de 7ª geração no ambiente de desenvolvimento do MATLAB.

Figura 13 – Tempo, em segundos, para decomposição da matriz Laplaciana de um grafo em relação à quantidade de vértices.



Fonte: O Autor (2020).

conforme

$$\mathbf{S}_r = \text{GFT}(G, \mathbf{s}_r), \quad \mathbf{S}_g = \text{GFT}(G, \mathbf{s}_g), \quad \mathbf{S}_b = \text{GFT}(G, \mathbf{s}_b). \quad (3.2)$$

Por questões de segurança e robustez, os *bits*  $w_i \in \{0, 1\}$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ , da marca d'água  $\mathbf{W} = (w_1, w_2, \dots, w_n)$  são repetidos de acordo com uma taxa  $c$  para produzir a sequência

$$\mathbf{W}' = \left( \overbrace{w_1, w_1, w_1, \dots, w_1}^{c \text{ vezes}}, w_2, w_2, w_2, \dots, w_2, \dots, w_n, w_n, w_n, \dots, w_n \right). \quad (3.3)$$

A repetição de cada *bit* da marca d'água torna-a mais robusta contra ruído ao calcular a média da marca d'água extraída no passo de demodulação. Antes da modulação, o vetor  $\mathbf{W}'$  é mapeado no vetor  $\tilde{\mathbf{W}} = (\tilde{w}_1, \tilde{w}_2, \dots, \tilde{w}_{nc})$  cujos componentes

$$\tilde{w}_i = \begin{cases} -1, & \text{se } w_i = 0, \\ 1, & \text{se } w_i = 1, \end{cases} \quad (3.4)$$

são inseridos em cada *cluster*  $C_i$ ,  $1 \leq i \leq M$ . Dessa forma, considerando um cluster  $C_i$  dividido em  $M'$  grafos  $G_{ij}$ ,  $1 \leq j \leq M'$ , com  $Q'$  vértices cada, a seguinte condição deve ser sustentada:

$$3M'Q' \geq nc. \quad (3.5)$$

Sem seguida, o vetor  $\tilde{\mathbf{W}}$  pode ser dividido em  $M'$  segmentos; os componentes de cada um desses segmentos são inseridos nos  $3Q'$  coeficientes das três GFTs de comprimento  $Q'$  ( $\mathbf{S}_r$ ,  $\mathbf{S}_g$  e  $\mathbf{S}_b$ ) de

cada grafo  $G_{ij} \in C_i$ . Então, o algoritmo proposto pode inserir  $3M'Q'/c$  bits de marca d'água em uma nuvem de pontos  $P$ .

Agora, por motivos de simplificação, considere a modulação dos coeficientes da GFT relacionados com o grafo  $G$ , pertencente ao *cluster*  $C$ , pela  $j$ -ésima porção de  $\tilde{\mathbf{W}}$ . Os coeficientes  $\mathbf{S}_r$  são modulados conforme a seguir:

$$\hat{\mathbf{S}}_r = \mathbf{S}_r + \tilde{\mathbf{W}}_r^{(j)} \mathbf{X}\alpha, \quad (3.6)$$

em que

$$\tilde{\mathbf{W}}_r^{(j)} = \{\tilde{W}_l, j+1 \leq l \leq j+Q'\} \quad (3.7)$$

e  $\mathbf{X}$  é uma sequência de números pseudo-aleatórios formados por 1's e -1's. A amplitude da modulação é controlada por  $\alpha = \phi\beta$ , em que  $\beta$  é um parâmetro definido pelo usuário e

$$\phi = \max(\min(\mathbf{R}) + \max(\mathbf{R}), \min(\mathbf{G}) + \max(\mathbf{G}), \min(\mathbf{B}) + \max(\mathbf{B})), \quad (3.8)$$

em que  $\mathbf{R}$ ,  $\mathbf{G}$  e  $\mathbf{B}$  são vetores com as componentes vermelha, verde e azul de cada ponto de toda a nuvem de pontos. Analogamente, os coeficientes  $\mathbf{S}_g$  e  $\mathbf{S}_b$  são modulados por

$$\hat{\mathbf{S}}_g = \mathbf{S}_g + \tilde{\mathbf{W}}_g^{(j)} \mathbf{X}\alpha, \quad (3.9)$$

e

$$\hat{\mathbf{S}}_b = \mathbf{S}_b + \tilde{\mathbf{W}}_b^{(j)} \mathbf{X}\alpha, \quad (3.10)$$

em que

$$\tilde{\mathbf{W}}_g^{(j)} = \{\tilde{W}_l, j+Q'+1 \leq l \leq j+2Q'\} \quad (3.11)$$

e

$$\tilde{\mathbf{W}}_b^{(j)} = \{\tilde{W}_l, j+2Q'+1 \leq l \leq j+3Q'\}. \quad (3.12)$$

Uma vez modulados os coeficientes, a IGFT é calculada, os novos valores de cor são atribuídos à nuvem de pontos e a ordenação descrita na Subseção 3.1.1.1 é revertida para restaurar a organização original.

### 3.1.2 Etapa de Extração

O fluxograma da etapa de extração é apresentado na Figura 14. O método recebe como entradas o modelo 3D original, o modelo marcado e a chave usada durante a etapa de inserção; uma sequência de bits formada por réplicas da sequência de bits original é retornada. A etapa de extração da marca d'água é semelhante à etapa de inserção em relação aos passos: ordenação e embaralhamento, clusterização e inferência do grafo. Tais passos devem produzir os mesmos

resultados obtidos na etapa de inserção, a fim de permitir a extração adequada dos *bits* da marca d'água.

No passo de ordenação e embaralhamento, a nuvem de pontos original é ordenada e embaralhada e, em seguida, a ordenação resultante é aplicada à nuvem de pontos marcada. Este passo resolve possíveis problemas decorrentes de ataques de transformações afins. Na etapa de clusterização, os *clusters* levam em conta a posição espacial dos pontos do modelo original. Os índices dos pontos pertencentes a cada *cluster* são usados para compor os *clusters* da nuvem de pontos marcada. Da mesma forma, no passo de inferência do grafo, os grafos são inferidos a partir da nuvem de pontos original e as informações de conectividade são repassadas para o modelo marcado, com base em seus índices. Além disso, o método de extração também realiza a reconstrução do modelo (caso seja necessário) e valida a ordenação dos pontos. Estes passos são importantes para aumentar a robustez contra a remoção de pontos e ataques de reordenação, respectivamente. O passo de demodulação corresponde ao inverso do processo de modulação realizado na fase de inserção; ele é responsável pela extração, de fato, dos *bits* da marca d'água. Mais detalhes são fornecidos nas subseções a seguir.

#### 3.1.2.1 Reconstrução da Nuvem de Pontos

Alguns ataques, como o recorte, podem excluir algumas porções de pontos comprometendo a extração da marca d'água. Como o método de extração proposto é fornecido com a nuvem de pontos original, é possível recuperar pontos que foram perdidos. Se o número de pontos da nuvem original for maior que o número de pontos da nuvem marcada, executa-se um procedimento simples para reconstruí-lo: para cada ponto da nuvem original, é verificado se está presente ou não no modelo marcado, considerando a distância Euclideana; se não estiver presente, insere-se o ponto da nuvem original na nuvem marcada. É importante mencionar que apesar deste procedimento recuperar, potencialmente, a estrutura 3D do modelo, não é possível recuperar o sinal modulado pela inserção da marca.

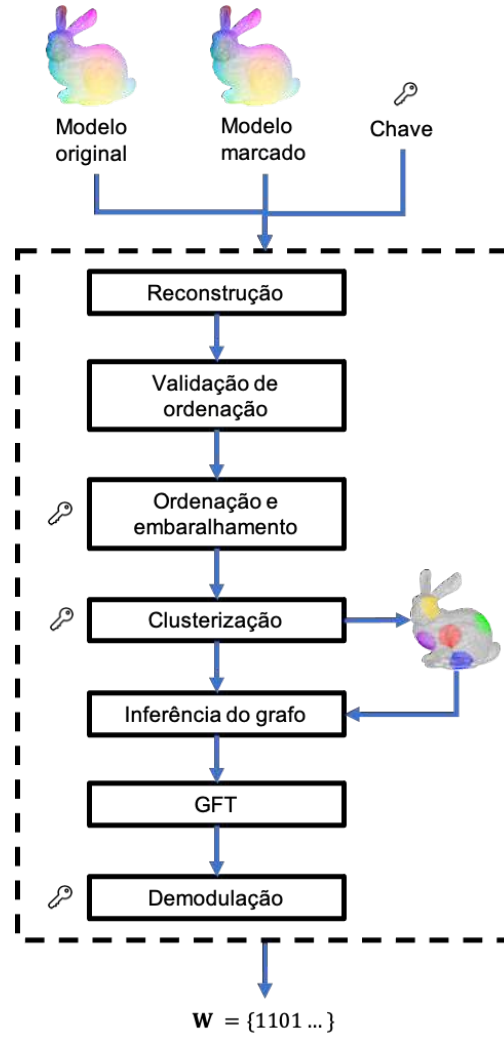
#### 3.1.2.2 Validação de Ordenação

Este passo é necessário para mitigar o ataque de reordenação. Para cada ponto, na lista de pontos do arquivo correspondente à nuvem de pontos original, o ponto mais próximo da lista de pontos do arquivo da nuvem marcada, em relação à distância euclideana, é pesquisado. Se os índices na lista de pontos da nuvem original e sua contraparte na nuvem marcada forem diferentes, isso significa que a ordem do último foi alterada e deve ser reposicionada corretamente. Após essa rotina, os índices de cada ponto e sua contraparte na nuvem marcada são os mesmos.

#### 3.1.2.3 Demodulação

Assim como a modulação, a etapa de demodulação também é baseada em QIM (CHEN; WORNELL, 2001b). Na presente tese, cada *cluster*  $C_i$ ,  $1 \leq i \leq M$  possui os elementos de

Figura 14 – Fluxograma da etapa de extração.



Fonte: O Autor (2020).

$\widetilde{\mathbf{W}}$  “inseridos” nos atributos (cor) do grafo  $G_{ij}$ ,  $1 \leq j \leq M'$  correspondente. Sejam  $\widehat{\mathbf{S}}$  e  $\mathbf{S}$  os coeficientes da GFT do grafo marcado e original  $G_{ij}$ , respectivamente, e considere o canal de cor vermelha como o sinal sobre o grafo. O símbolo  $\widehat{w}_j \in \{-1, 1\}$  é calculado por

$$\widehat{w}_j = \text{sign} \left( \sum_{i=jc}^{(j+1)c-1} (\widehat{S}_i - S_i) X_i \right). \quad (3.13)$$

Note que

$$(\widehat{S}_i - S_i) X_i = (\widetilde{w}_i \alpha X_i) X_i = \widetilde{w}_i \alpha X_i^2, \quad (3.14)$$

$\alpha > 0$  e  $X_i \in \{-1, 1\}$ , isto é,  $X_i^2 = 1$ . Utilizando a Eq. (3.13) podemos calcular

$$\widehat{w}_j = \text{sign} \left( \sum_{i=jc}^{(j+1)c-1} \widetilde{w}_i \right). \quad (3.15)$$

Então,

$$w_j = \begin{cases} 0, & \text{se } \hat{w}_j = -1, \\ 1, & \text{se } \hat{w}_j = 1, \end{cases} \quad (3.16)$$

retorna o *bit* de marca d'água  $w_j \in \{0, 1\}$ . Este processo deve ser executado para cada canal de cor e grafo  $G_{ij} \in C_i$ . As sequências de *bits* extraídas devem ser concatenadas para compor a marca d'água  $\mathbf{W}$ . Essa rotina terá como saída uma sequência de *bits* para cada *cluster*, porém o método deve ter como resultado uma única sequência. Ao final do passo de demodulação, após recuperar as sequências de cada *cluster*, elas precisam ser unificadas em uma única sequência. Para cada índice nas sequências, o *bit* é substituído por aquele que aparece com maior frequência.

## 4 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos quanto à imperceptibilidade e robustez da técnica de marca d'água proposta para nuvens de pontos 3D.

### 4.1 MATERIAIS E MÉTODOS

Esta seção apresenta os materiais e métodos utilizados para realização das simulações da técnica de marca d'água proposta. Nesta seção é apresentado o arranjo experimental realizado para nuvens de pontos 3D. Os modelos de nuvens de pontos tridimensionais utilizados nas simulações, assim como o número de pontos de cada um, são apresentados na Figura 15. A nuvem de pontos *Bunny*, na Figura 15a, foi obtida do repositório de modelos 3D de *Stanford* (THE..., 2019a) e em seguida foi colorida artificialmente com uma função suave baseada na posição espacial dos pontos. Os demais modelos foram obtidos da base Sketchfab (SKETCHFAB, 2019) e foram utilizados com as próprias cores capturadas durante o processo de aquisição. As cores no formato RGB foram atribuídas aos pontos do modelo *Bunny* da seguinte forma. Considerando  $\mathbf{X}$ ,  $\mathbf{Y}$  e  $\mathbf{Z}$  vetores que contêm, respectivamente, os valores das coordenadas  $x$ ,  $y$  e  $z$  do modelo, inicialmente calculamos o alcance máximo de cada coordenada

$$\begin{aligned}\phi_x &= |\mathbf{X}_{\min} + \mathbf{X}_{\max}|, \\ \phi_y &= |\mathbf{Y}_{\min} + \mathbf{Y}_{\max}|, \\ \phi_z &= |\mathbf{Z}_{\min} + \mathbf{Z}_{\max}| \end{aligned} \quad (4.1)$$

e o valor máximo e mínimo entre os valores de alcance

$$\begin{aligned}\phi_{max} &= \max(\phi_x, \phi_y, \phi_z), \\ \phi_{min} &= \min(\phi_x, \phi_y, \phi_z). \end{aligned} \quad (4.2)$$

Para cada ponto, sua respectiva cor (em RGB), foi atribuída conforme

$$\mathbf{C}_i = \left( \begin{bmatrix} \cos \left( \left[ \frac{\phi_{\max}}{\phi_x} + a_x \right] \right) \mathbf{X}_i \times 255 \\ \cos \left( \left[ \frac{\phi_{\max}}{\phi_y} + a_y \right] \right) \mathbf{Y}_i \times 255 \\ \cos \left( \left[ \frac{\phi_{\max}}{\phi_z} + a_z \right] \right) \mathbf{Z}_i \times 255 \end{bmatrix} \right), \quad (4.3)$$

em que  $\mathbf{C}_i$  é um vetor que contém as três componentes RGB do  $i$ -ésimo ponto e

$$a_x = \begin{cases} 1, & \text{se } \phi_{\min} = \phi_x \\ 0, & \text{caso contrário,} \end{cases} \quad (4.4)$$

$$a_y = \begin{cases} 1, & \text{se } \phi_{\min} = \phi_y \\ 0, & \text{caso contrário,} \end{cases} \quad (4.5)$$

e

$$a_z = \begin{cases} 1, & \text{se } \phi_{\min} = \phi_z \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases} \quad (4.6)$$

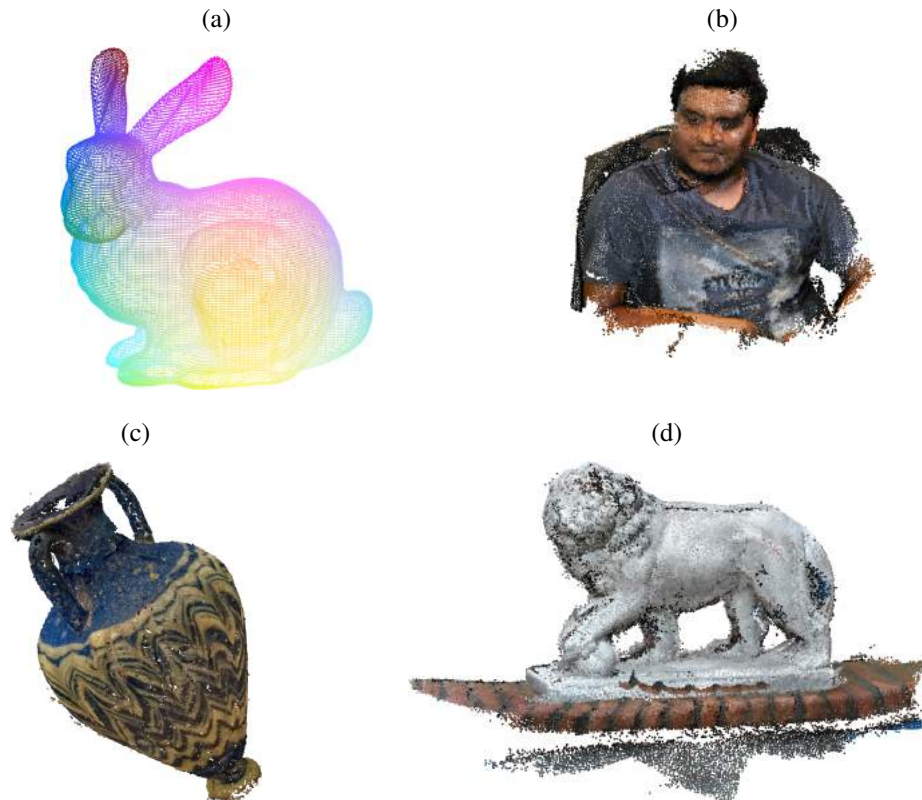
A imagem usada como marca d'água é apresentada na Figura 16. Antes de inserir a marca, a imagem binária é convertida para uma sequência de *bits*, linha por linha e da esquerda para a direita. Nas simulações, três versões de diferentes tamanhos da mesma imagem foram utilizadas:  $32 \times 32$  (1.024 *bits*),  $64 \times 64$  (4.096 *bits*) e  $128 \times 128$  (16.384 *bits*).

As simulações foram realizadas considerando uma taxa de replicação  $c = 10$ , grafos com 320 vértices e um fator de amplitude de modulação  $\beta \in \{0,01; 0,02\}$ . A Tabela 2 apresenta os parâmetros usados nas simulações para cada nuvem de pontos, com relação ao número de *clusters*, tamanho de cada *cluster* (número de pontos), e o tamanho da marca d'água (em termos de número de *bits*). Quanto aos ataques, a adição de ruído foi implementada de acordo com

$$s_{\text{new}} = s_{\text{old}} + a \times \phi \times \text{rand}, \quad (4.7)$$

em que  $s_{\text{new}}$  e  $s_{\text{old}}$  são as componentes do sinal depois e antes da adição de ruído,  $a \in [0, 1]$

Figura 15 – Modelos de nuvem de pontos 3D utilizados nas simulações: (a) *Bunny* (35.947 pontos), (b) *Guy* (66.860 pontos), (c) *Vase* (147.420 pontos) e (d) *Lion statue* (536.240 pontos).



Fonte: O Autor (2020).

Figura 16 – Imagem binária utilizada como marca d’água.



Fonte: O Autor (2020).

Tabela 2 – Configuração dos parâmetros utilizados nas simulações para cada modelo de nuvem de pontos. O símbolo “×” em algumas das células da tabela indica que a simulação foi realizada com a respectiva configuração e nuvem de pontos, enquanto o símbolo “—” indica que não foi realizada. O acrônimo “WM” é para “*watermark*” (marca d’água).

| # | Configuração                                                | <i>Bunny</i> | <i>Guy</i> | <i>Vase</i> | <i>Lion Statue</i> |
|---|-------------------------------------------------------------|--------------|------------|-------------|--------------------|
|   | Número de <i>clusters</i> : 5                               |              |            |             |                    |
| 1 | Tamanho do <i>cluster</i> : 4.000<br>Tamanho da WM: 1.024   | ×            | ×          | ×           | ×                  |
|   | Número de <i>clusters</i> : 4                               |              |            |             |                    |
| 2 | Tamanho do <i>cluster</i> : 13.700<br>Tamanho da WM: 4.096  | —            | ×          | ×           | ×                  |
|   | Número de <i>clusters</i> : 5                               |              |            |             |                    |
| 3 | Tamanho do <i>cluster</i> : 54.700<br>Tamanho da WM: 16.384 | —            | —          | —           | ×                  |

é a amplitude do ruído,  $\phi$  é definido na Equação 3.8 e rand é um número pseudo-aleatório no intervalo  $[0, 1]$ .

A sequência de operações realizadas nas simulações seguiu os passos:

1. Inserção da marca d’água;
2. Quantização das cores (de 0 a 255);
3. Realização de um ataque;
4. Quantização das cores (de 0 a 255);
5. Extração da marca d’água.

Os passos (2) e (4) são necessários para simular o armazenamento do arquivo da nuvem de pontos. Quanto às métricas utilizadas para avaliação do desempenho do algoritmo, foram calculadas as medidas taxa de erro de *bit* (BER, do inglês *Bit Error Rate*) e a relação sinal-ruído de pico

(PSNR, do inglês *Peak Signal-to-Noise Ratio*) das marcas extraídas para avaliar a robustez a ataques. Apesar de muitos artigos já publicados usarem a distância de Hausdorff para avaliação de imperceptibilidade (LUO; LU; PAN, 2006; AGARWAL; PRABHAKARAN, 2009; XIAOQING, 2015), neste trabalho, foi escolhido utilizar as métricas PSNR e a raiz do erro médio quadrático (RMSE, do inglês *Root Mean Square Error*). Essa escolha foi feita pois a distância de Hausdorff é mais comumente adotada para avaliar distâncias em um espaço Euclidiano, enquanto neste trabalho estamos avaliando a possível degradação do sinal sobre o grafo após a realização do ataque.

## 4.2 AVALIAÇÃO DA IMPERCEPTIBILIDADE VERSUS ROBUSTEZ

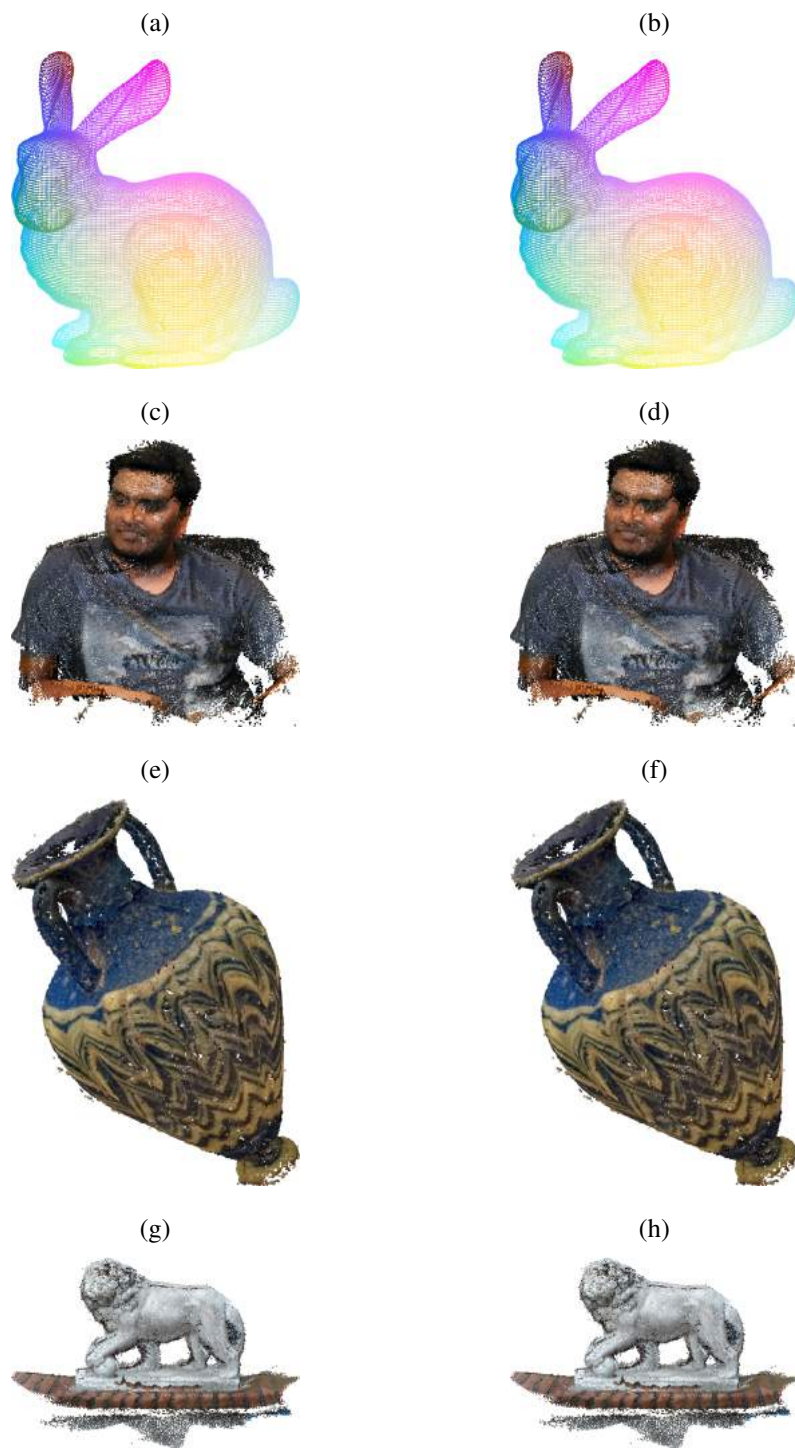
### 4.2.1 Imperceptibilidade

Nesta subseção, avaliamos o quanto a inserção da marca d'água afeta visualmente os objetos marcados quando comparados aos originais. Os modelos originais são apresentados na coluna da esquerda e suas versões marcadas são apresentadas nas colunas da direita da Figura 17. Para cada modelo, foi utilizada a configuração de simulação com o maior número de *bits* de marca d'água, ou seja, o modelo *Bunny* foi marcado com uma marca de 1.024 *bits*, os modelos *Guy* e *Vase* com uma marca d'água de 4.096 *bits* e o modelo *Lion Statue* com uma marca d'água de 16.384 *bits*. Foi utilizada uma amplitude de modulação de  $\beta = 0,02$ . Essas configurações foram escolhidas para produzir o maior impacto visual possível, dentre as configurações de simulação utilizadas neste trabalho. Ao comparar visualmente as nuvens de pontos marcadas e as originais, não é possível notar diferenças e os modelos parecem ser idênticos.

Na Tabela 3 são apresentados os valores de PSNR e RMSE obtidos a partir de uma comparação entre nuvens de pontos originais e marcadas. O PSNR mais baixo obtido é de 34,93 dB para a nuvem *Guy*, com um tamanho de marca d'água de 4.096 *bits* e  $\beta = 0,02$ . Considerando o intervalo  $[0, 255]$  para intensidades de cor, em geral, esse valor de PSNR é considerado alto, indicando uma forte correlação entre os dois modelos (ASIKUZZAMAN; PICKERING, 2018; BHOWMIK; OAKES; ABHAYARATNE, 2016; LIE; LIN; CHENG, 2006; WANG; NI; HUANG, 2012; MEKARSARI et al., 2018; SU et al., 2014). Os valores do RMSE seguem o mesmo comportamento que os resultados do PSNR. Como esperado, quanto maior o tamanho da marca d'água, maior é o erro.

Na Figura 18 são apresentadas versões da nuvem de pontos *Guy* marcada com uma imagem binária de 4.096 *bits*. Foram empregados valores de  $\beta$  5 a 100 vezes maiores que os usados nas simulações anteriores, mais precisamente 0,1; 0,2; 0,5; e 1. As altas amplitudes de modulação utilizadas promovem uma nuvem de pontos visualmente degradada com relação às cores dos modelos. Por exemplo, para  $\beta = 0,1$ , é possível observar uma pequena alteração na cor da nuvem de pontos; as mudanças tornam-se mais evidentes à medida que o valor aumenta, de modo que o modelo atinge um PSNR de 7,56 dB para  $\beta = 1$ .

Figura 17 – Versões originais – (a) *Bunny*, (c) *Guy*, (e) *Vase* e (g) *Lion Statue* – e marcadas – (b) *Bunny*, (d) *Guy*, (f) *Vase* e (h) *Lion Statue* – de cada modelo de nuvem de pontos utilizado neste trabalho.



Fonte: O Autor (2020).

#### 4.2.2 Quanto à Avaliação de Robustez

Neste trabalho, foram analisadas três categorias de ataques para nuvens de pontos: reordenação, alteração de valor e ataques de perda de amostra. Os ataques dentro da categoria de

Tabela 3 – Resultados de imperceptibilidade em termos de PSNR (dB) e RMSE.

| Modelo             | Tamanho (em <i>bits</i> ) | $\beta$ | PSNR  | RMSE |
|--------------------|---------------------------|---------|-------|------|
| <i>Bunny</i>       | 1.024                     | 0,01    | 42,99 | 1,80 |
|                    |                           | 0,02    | 37,09 | 3,56 |
| <i>Guy</i>         | 1.024                     | 0,01    | 45,91 | 1,29 |
|                    |                           | 0,02    | 39,95 | 2,57 |
|                    | 4.096                     | 0,01    | 40,88 | 2,30 |
|                    |                           | 0,02    | 34,93 | 4,57 |
| <i>Vase</i>        | 1.024                     | 0,01    | 50,12 | 0,79 |
|                    |                           | 0,02    | 44,14 | 1,58 |
|                    | 4.096                     | 0,01    | 45,07 | 1,42 |
|                    |                           | 0,02    | 39,09 | 2,83 |
| <i>Lion Statue</i> | 1.024                     | 0,01    | 54,93 | 0,46 |
|                    |                           | 0,02    | 48,95 | 0,91 |
|                    | 4.096                     | 0,01    | 49,88 | 0,88 |
|                    |                           | 0,02    | 43,91 | 1,63 |
|                    | 16.384                    | 0,01    | 42,89 | 1,83 |
|                    |                           | 0,02    | 36,92 | 3,63 |

Fonte: O Autor (2020).

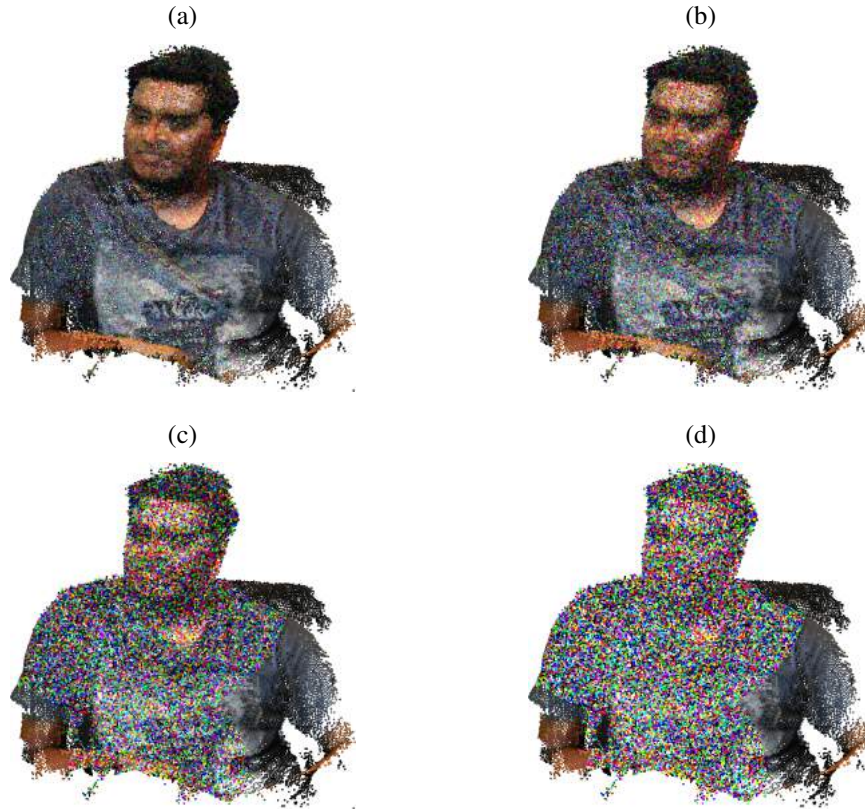
mudança de valor são transformações afins (rotação, escala, cisalhamento e translação) e adição de ruído. Um exemplo de um ataque classificado como perda de amostra é o ataque de recorte. Entre esses ataques, os únicos que afetam a correta extração da marca d'água são adição de ruído e recorte. Pela própria natureza do método proposto, todos os outros ataques não provocam efeitos negativos para a extração da marca d'água.

Especificamente com relação ao ataque de reordenação, as etapas apresentadas nas Subseções 3.1.1.1 e 3.1.2.2 são suficientes para suprimir os efeitos desse ataque. Para ataques de transformações afins, a etapa descrita na Subseção 3.1.1.1 é necessária para permitir a extração correta da marca d'água. Na Figura 19, alguns exemplos de ataques de transformação afim e sua marca d'água extraída usando o modelo de nuvem de pontos *Vase* são apresentados. Naturalmente, os resultados de PSNR e BER para a marca d'água extraída, nesses casos, são sempre tendendo a infinito e 0 (zero), respectivamente, indicando que a imagem extraída é idêntica à original.

#### 4.2.2.1 Ataque de Adição de Ruído

Em relação à adição de ruído, foram realizadas simulações para avaliar a robustez do método proposto considerando três tamanhos de marca d'água: 1.024, 4.096 e 16.384 *bits*. Na Tabela 4 são apresentados os resultados de simulação relativos ao cenário de uma marca d'água

Figura 18 – Versões marcadas do modelo 3D *Guy* com diferentes valores de  $\beta$  – (a)  $\beta = 0,1$ ; (b)  $\beta = 0,2$ ; (c)  $\beta = 0,5$ ; (d)  $\beta = 1$ . Os valores foram escolhidos de forma que os modelos marcados se tornem visualmente degradados. Os resultados de PSNR e RMSE são (a) PSNR: 21,39 dB; RSME: 21,72; (b) PSNR: 15,94 dB; RSME: 40,67; (c) PSNR: 9,98 dB; RSME: 80,81 e (d) PSNR: 7,56 dB; RSME: 106,69.



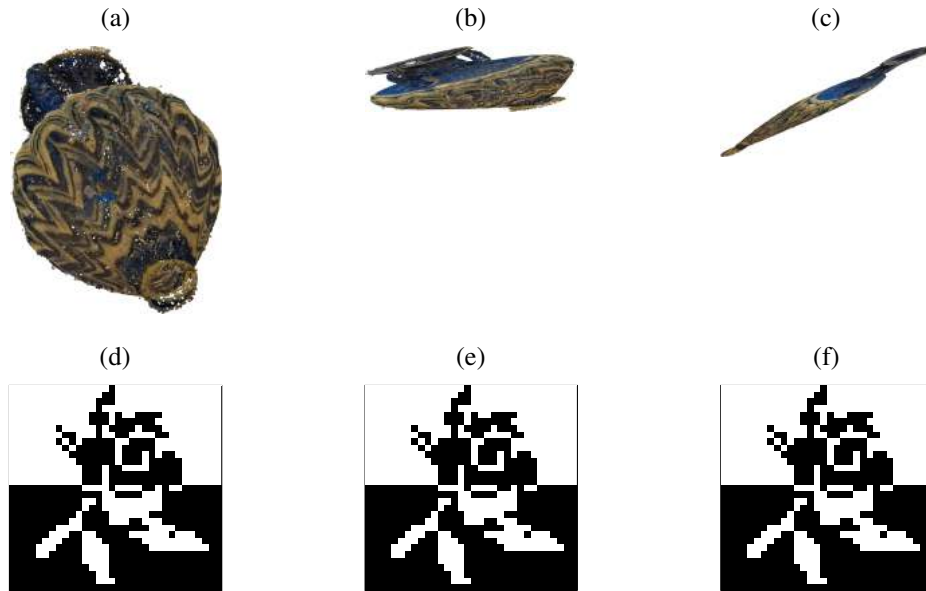
Fonte: O Autor (2020).

de 1.024 *bits* (uma imagem binária com dimensões  $32 \times 32$ ). Nos piores casos, os valores de BER são da ordem de  $10^{-2}$  para todas as simulações com amplitude de ruído de até 5% <sup>1</sup>. Como esperado, uma menor amplitude de modulação ( $\beta = 0,01$ ) torna o método menos robusto, comparado com amplitudes mais altas ( $\beta = 0,02$ ). Mais especificamente, se  $\beta = 0,02$ , em quase todos os casos, a marca d'água começa a ser degradada apenas a partir de amplitudes de ruído correspondentes a 5%; o modelo *Vase* é o único que começou a sofrer degradação, na extração da marca d'água, com uma amplitude de ruído de 2%.

A Tabela 5 apresenta resultados de simulação com relação à robustez contra o ataque de adição de ruído para os modelos *Guy*, *Vase*, e *Lion Statue* utilizando uma marca d'água de 4.096 *bits* (isto é, uma imagem binária de tamanho  $64 \times 64$ ). Mesmo para altas amplitudes de ruído, nos piores casos, o BER é da ordem de  $10^{-2}$ . Novamente, utilizando  $\beta = 0,02$ , é possível recuperar a marca d'água sem qualquer erro para baixas amplitudes de ruído, como 0,5% e 1%.

<sup>1</sup> A partir deste ponto, vamos nos referir à intensidade do ruído adicionado em um ataque especificando um valor percentual da amplitude do ruído; tal valor, na verdade, corresponde a  $a \times 100\%$ , em que  $a$  é a amplitude usada para produzir o sinal ruidoso conforme a Eq. (4.7).

Figura 19 – Ataques de transformações afins no modelo de nuvem de pontos *Vase* e suas respectivas marcas d'água extraídas. As marcas das figuras (d), (e) e (f) foram extraídas, respectivamente, dos modelos atacados em (a), (b) e (c). Para as três marcas extraídas, o valor de PSNR tende a infinito e o valor de BER é 0 (zero). Os ataques realizados foram (a) rotação, (b) escalonamento e (c) cisalhamento.



Fonte: O Autor (2020).

Tabela 4 – Resultados de simulação de BER para avaliação de robustez a ataques de adição de ruído considerando a extração de uma marca d'água de 1.024 *bits*.

| $\beta$ | Amplitude do Ruído | <i>Bunny</i> | <i>Guy</i> | <i>Vase</i> | <i>Lion Statue</i> |
|---------|--------------------|--------------|------------|-------------|--------------------|
| 0,01    | 0,5%               | 0            | 0          | 0           | 0                  |
|         | 1%                 | 0            | 0          | 0,0019      | 0                  |
|         | 1,5%               | 0,0098       | 0,0137     | 0,0098      | 0,0146             |
|         | 2%                 | 0,0107       | 0,0137     | 0,0098      | 0,0156             |
|         | 5%                 | 0,0107       | 0,0156     | 0,0137      | 0,0166             |
| 0,02    | 0,5%               | 0            | 0          | 0           | 0                  |
|         | 1%                 | 0            | 0          | 0           | 0                  |
|         | 1,5%               | 0            | 0          | 0           | 0                  |
|         | 2%                 | 0            | 0          | 0,0029      | 0                  |
|         | 5%                 | 0,0107       | 0,0137     | 0,0137      | 0,0156             |

Fonte: O Autor (2020).

Em relação às simulações usando uma marca d'água de 16.384 *bits*, isto é, uma imagem binária de tamanho  $128 \times 128$ , os resultados são apresentados na Tabela 6. Nestas simulações, devido à quantidade de *bits* a serem inseridos, foi utilizado apenas o modelo *Lion Statue*. Os resultados se comportam de maneira semelhante aos apresentados anteriormente. Valores de BER menores são obtidos usando  $\beta = 0,02$ ; no pior dos casos, o BER é da ordem de  $10^{-3}$ .

Tabela 5 – Resultados de simulação de BER para avaliação de robustez a ataques de adição de ruído considerando a extração de uma marca d’água de 4.096 *bits*.

| $\beta$ | Amplitude do Ruído | <i>Guy</i> | <i>Vase</i> | <i>Lion Statue</i> |
|---------|--------------------|------------|-------------|--------------------|
| 0,01    | 0,5%               | 0          | 0           | 0                  |
|         | 1%                 | 0,0017     | 0,0007      | 0,0007             |
|         | 1,5%               | 0,0115     | 0,0134      | 0,0146             |
|         | 2%                 | 0,0127     | 0,0146      | 0,0151             |
|         | 5%                 | 0,0151     | 0,0170      | 0,0161             |
| 0,02    | 0,5%               | 0          | 0           | 0                  |
|         | 1%                 | 0          | 0           | 0                  |
|         | 1,5%               | 0,0002     | 0,0002      | 0                  |
|         | 2%                 | 0,0029     | 0,0009      | 0,0015             |
|         | 5%                 | 0,0134     | 0,0151      | 0,0151             |

Fonte: O Autor (2020).

Tabela 6 – Resultados de simulação de BER para avaliação de robustez a ataques de adição de ruído considerando a extração de uma marca d’água de 16.384 *bits*.

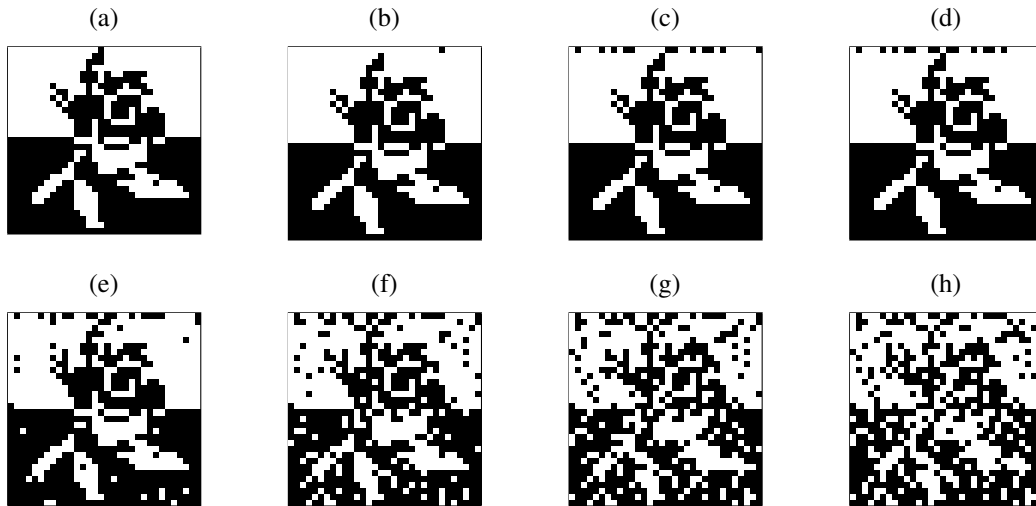
| $\beta$ | Amplitude do Ruído | <i>Lion Statue</i> |
|---------|--------------------|--------------------|
| 0,01    | 0,5%               | 0                  |
|         | 1%                 | 0                  |
|         | 1,5%               | 0,0046             |
|         | 2%                 | 0,0053             |
|         | 5%                 | 0,0065             |
| 0,02    | 0,5%               | 0                  |
|         | 1%                 | 0                  |
|         | 1,5%               | 0                  |
|         | 2%                 | 0,0001             |
|         | 5%                 | 0,0056             |

Fonte: O Autor (2020).

Na Figura 20, são apresentadas marcas d’água de tamanho  $32 \times 32$  extraídas do modelo *Bunny* para altas amplitudes de ruído e os seus respectivos valores de PSNR (em dB). Note que, mesmo para valores de alta amplitude, ainda é possível distinguir visualmente a marca d’água extraída. Por exemplo, na Figura 20d, em que é apresentada a marca d’água extraída após um ataque contra o referido modelo, adicionando ruído com 10% de amplitude, pode-se relacionar claramente a marca d’água extraída com a original. Apenas ruídos de amplitudes maiores ou iguais a 50% tornam a marca d’água indistinguível e altamente degradada, como por exemplo é mostrado na Figura 20h.

Nas Figuras 21 e 22 são apresentados resultados semelhantes aos anteriores. Imagens de marcas d’água de tamanho  $64 \times 64$  extraídas do modelo *Guy* são apresentadas na Figura 21.

Figura 20 – Imagens de marcas d’água extraídas (tamanho  $32 \times 32$ ) e respectivos valores de PSNR (dB). As marcas d’água apresentadas foram extraídas do modelo de nuvem de pontos *Bunny* atacado com ruídos de diferentes amplitudes. Os valores de percentual de ruído utilizado no ataque e respectivo resultado de PSNR foram (a) ruído: 0%, PSNR: tende a infinito; (b) ruído: 2%, PSNR: 30,10 dB; (c) ruído: 5%, PSNR: 19,31 dB; (d) ruído: 10%, PSNR: 18,34 dB; (e) ruído: 20%, PSNR: 13,57 dB; (f) ruído: 30%, PSNR: 8,96 dB; (g) ruído: 40%, PSNR: 7,32 dB; (h) ruído: 50%, PSNR: 6,62 dB.



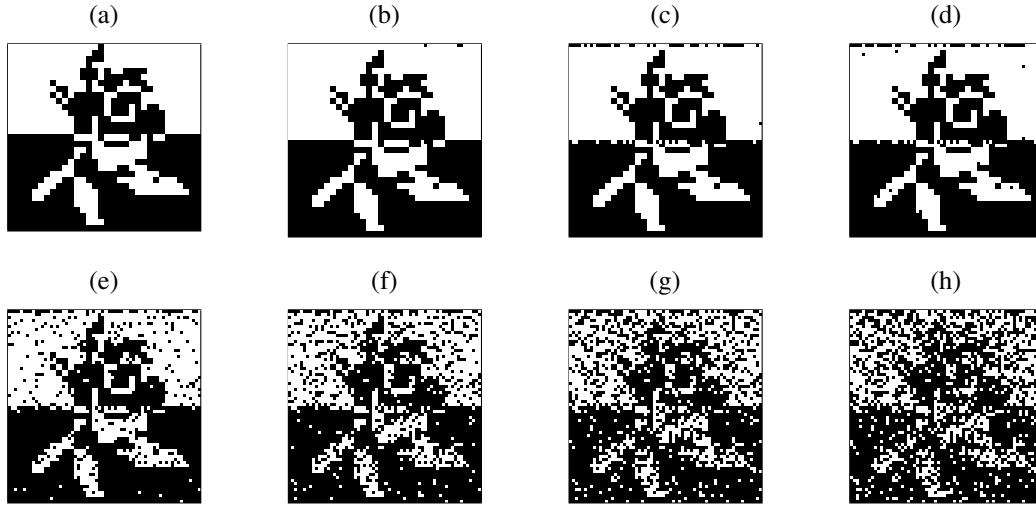
Fonte: O Autor (2020).

As imagens foram extraídas após ataques de adição de ruído com amplitude variando de 0% a 50%. Da mesma forma como nos resultados anteriores, note que ainda é possível distinguir a marca d’água mesmo para um ataque com ruído de amplitude de 40% (que é consideravelmente alto). A marca d’água extraída torna-se visualmente mais degradada somente se um ataque com ruído de amplitude de 50% é executado. Na Figura 22 são apresentados os resultados para marcas d’água, de tamanho  $128 \times 128$ , extraídas do modelo *Lion Statue*. Novamente, é possível distinguir claramente a marca d’água extraída, mesmo sob altas amplitudes de ruído.

#### 4.2.2.2 Ataque de Recorte

Nas simulações realizadas para analisar a robustez do método proposto contra ataques de recorte foi empregado um arranjo experimental semelhante ao utilizado para analisar o ataque de adição de ruído. As simulações foram realizadas nos quatro modelos de nuvens de pontos apresentados na Figura 15, considerando marcas d’água de tamanhos 1.024; 4.096 e 16.384 *bits*. Nas simulações realizadas, notamos que a marca d’água é satisfatoriamente extraída se até 5% dos pontos são cortados de um dos modelos 3D. Nesse cenário, o BER é, na maioria dos casos, da ordem de  $10^{-2}$ . Por esse motivo, as simulações foram realizadas com valores de percentual de recorte mais altos, variando de 5% a 50%. Na Tabela 7 são apresentados os resultados de simulação para as nuvens de pontos, considerando uma marca d’água de 1.024 *bits*. Note que

Figura 21 – Imagens de marcas d’água extraídas (tamanho  $64 \times 64$ ) e respectivos valores de PSNR (dB). As marcas d’água apresentadas foram extraídas do modelo de nuvem de pontos *Guy* atacado com ruídos de diferentes amplitudes. Os valores de percentual de ruído utilizado no ataque e respectivo resultado de PSNR foram (a) ruído: 0%, PSNR: tende a infinito; (b) ruído: 2%, PSNR: 30,10 dB; (c) ruído: 5%, PSNR: 18,64 dB; (d) ruído: 10%, PSNR: 17,80 dB; (e) ruído: 20%, PSNR: 11,45 dB; (f) ruído: 30%, PSNR: 8,33 dB; (g) ruído: 40%, PSNR: 6,75 dB; (h) ruído: 50%, PSNR: 5,81 dB.



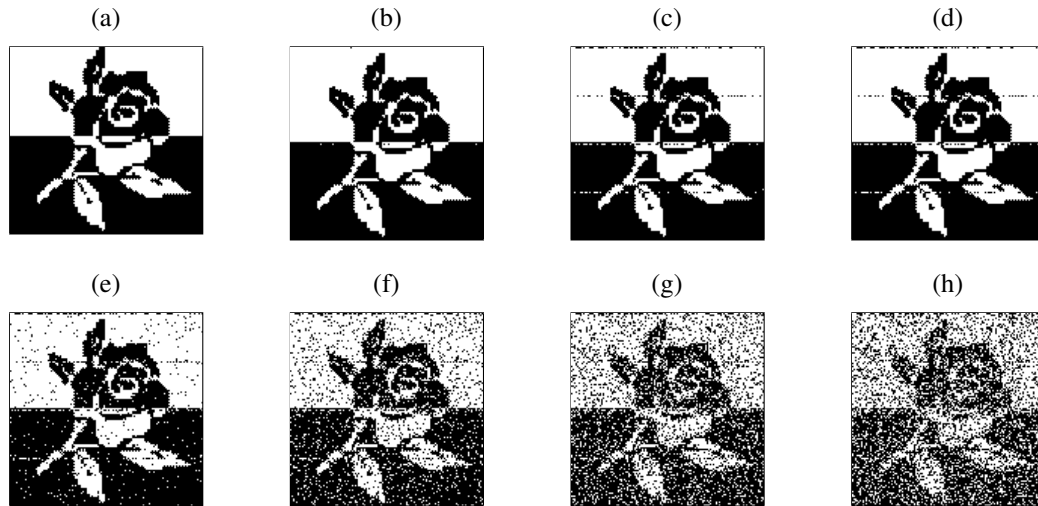
Fonte: O Autor (2020).

para todos os modelos e valores de  $\beta$ , o BER é menor que 0,001 para ataques de recorte de até 40% de pontos removidos; com 50% dos pontos removidos, o BER mais alto obtido foi de 0,0771 para o modelo *Lion Statue* e  $\beta = 0,01$ , que representa um valor de erro significativamente baixo. Além disso, para ataques de recorte de até 30%, todos os resultados de BER foram iguais a 0 (zero).

Na Tabela 8 são apresentados os valores de BER de marcas d’água de tamanho 4.096 extraídos dos modelos *Guy*, *Vase* e *Lion Statue*. Quanto ao modelo *Guy*, para até 30% de pontos removidos no recorte, o valor de BER máximo foi de 0,0622; este é um valor significativamente baixo, considerando a alta porcentagem de pontos removidos. Atacando o modelo com um recorte de 50% dos pontos, a marca d’água foi extraída com BER igual a 0,2568. Quanto aos resultados para o modelo *Vase*, os valores máximos de BER são da ordem de  $10^{-2}$ , mesmo para um ataque de recorte de 50% dos pontos. Os ataques realizados no modelo da *Lion Statue* foram mais eficazes nos casos em que 30% e 50% dos pontos foram removidos; nesses casos a marca d’água extraída foi degradada para valores de BER ( $\beta = 0,01$ ) de 0,3645 e 0,4951, respectivamente.

É importante mencionar que a qualidade da marca d’água extraída após um ataque de recorte está diretamente relacionada ao posicionamento de cada *cluster*. Para um melhor resultado, é importante que os locais dos *clusters* estejam bem distribuídos por toda a nuvem 3D.

Figura 22 – Imagens de marcas d’água extraídas (tamanho  $128 \times 128$ ) e respectivos valores de PSNR (dB). As marcas d’água apresentadas foram extraídas do modelo de nuvem de pontos *Lion Statue* atacado com ruídos de diferentes amplitudes. Os valores de percentual de ruído utilizado no ataque e respectivo resultado de PSNR foram (a) ruído: 0%, PSNR: tende a infinito; (b) ruído: 2%, PSNR: 32,14 dB; (c) ruído: 5%, PSNR: 19,81 dB; (d) ruído: 10%, PSNR: 19,33 dB; (e) ruído: 20%, PSNR: 14,11 dB; (f) ruído: 30%, PSNR: 9,20 dB; (g) ruído: 40%, PSNR: 7,03 dB; (h) ruído: 50%, PSNR: 5,93 dB.



Fonte: O Autor (2020).

Tabela 7 – Resultados de BER para avaliação de robustez a ataques de recorte considerando uma marca d’água de 1.024 *bits*.

| $\beta$ | Percentual | <i>Bunny</i> | <i>Guy</i> | <i>Vase</i> | <i>Lion Statue</i> |
|---------|------------|--------------|------------|-------------|--------------------|
| 0,01    | 5%         | 0            | 0          | 0           | 0                  |
|         | 15%        | 0            | 0          | 0           | 0                  |
|         | 30%        | 0            | 0          | 0           | 0                  |
|         | 40%        | 0            | 0,0009     | 0,0009      | 0                  |
|         | 50%        | 0,0156       | 0,0244     | 0,0732      | 0,0771             |
| 0,02    | 5%         | 0            | 0          | 0           | 0                  |
|         | 15%        | 0            | 0          | 0           | 0                  |
|         | 30%        | 0            | 0          | 0           | 0                  |
|         | 40%        | 0,0009       | 0,0009     | 0,0009      | 0                  |
|         | 50%        | 0,0166       | 0,0253     | 0,0722      | 0,0761             |

Fonte: O Autor (2020).

Se houver grupos muito próximos uns dos outros, é possível que, mesmo um ataque de recorte com uma baixa porcentagem de pontos sendo removidos, seja suficiente para excluir todos os grupos ou a maioria deles, comprometendo a recuperação da marca d’água. Outro comentário importante é sobre o número de *clusters* definidos durante a etapa de inserção. Nas simulações,

Tabela 8 – Resultados de BER para avaliação de robustez a ataques de recorte considerando uma marca d’água de 4.096 *bits*.

| $\beta$ | Percentual | <i>Guy</i> | <i>Vase</i> | <i>Lion Statue</i> |
|---------|------------|------------|-------------|--------------------|
| 0,01    | 5%         | 0          | 0           | 0                  |
|         | 15%        | 0          | 0           | 0,0324             |
|         | 30%        | 0,0622     | 0           | 0,3645             |
|         | 40%        | 0,1650     | 0,0044      | 0,4951             |
|         | 50%        | 0,2568     | 0,0649      | 0,4951             |
| 0,02    | 5%         | 0          | 0           | 0                  |
|         | 15%        | 0          | 0           | 0,0319             |
|         | 30%        | 0,0612     | 0           | 0,3635             |
|         | 40%        | 0,1647     | 0,0044      | 0,4951             |
|         | 50%        | 0,2568     | 0,0644      | 0,4951             |

Fonte: O Autor (2020).

consideramos configurações de simulação com 4 ou 5 *clusters*. Para melhores resultados, o ideal é que o número de *clusters* seja sempre um número ímpar. Isso se deve à forma como as marcas d’água são extraídas de cada *cluster* e são mescladas no final da fase de extração; as sequências de *bits* são unificadas considerando o *bit* que aparece com maior frequência em uma determinada posição. Se temos um número par de marcas d’água, cada uma extraída de um *cluster* diferente, e o número de 0s e 1s são iguais em uma determinada posição, não teremos como “desempatar” e qualquer um dos *bits* (zero ou um) pode ser escolhido.

Os resultados para uma marca d’água de 16.384 *bits* são apresentados na Tabela 9 para o modelo *Lion Statue*. Mesmo com uma marca d’água de  $128 \times 128$ , foi possível obter valores de BER limitados a 0,0292, considerando a porcentagem de pontos removidos de até 30%. Usando ataques com porcentagens de 40% e 50%, os resultados da BER indicam que a marca d’água tem alguma degradação visual.

Na coluna da esquerda da Figura 23 são apresentadas nuvens de pontos do modelo *Guy* após um ataque de recorte com sua respectiva porcentagem de pontos removidos; na coluna da direita, apresenta-se a marca d’água extraída correspondente, com o respectivo valor de PSNR. Note que a degradação visual da marca d’água extraída compromete sua identificação somente quando a porcentagem de pontos removidos atinge 50%. Em outros casos, mesmo com 40% de recorte, por exemplo, ainda é possível distinguir claramente a marca d’água extraída, mesmo que seu aspecto visual seja bastante degradado. É importante mencionar que os valores percentuais de recorte apresentados são consideravelmente altos e causam uma degradação do modelo 3D em um nível muito alto. Em um cenário real, esses modelos dificilmente teriam um uso efetivo devido a tal degradação. No entanto, os exemplos mostram a capacidade do método proposto para recuperar a marca d’água, mesmo em situações extremas, como as apresentadas.

Tabela 9 – Resultados de BER para avaliação de robustez a ataques de recorte considerando uma marca d'água de 16.384 *bits*.

| $\beta$ | Percentual | <i>Lion Statue</i> |
|---------|------------|--------------------|
| 0,01    | 5%         | 0                  |
|         | 15%        | 0                  |
|         | 30%        | 0,0292             |
|         | 40%        | 0,1556             |
|         | 50%        | 0,3477             |
| 0,02    | 5%         | 0                  |
|         | 15%        | 0                  |
|         | 30%        | 0,0287             |
|         | 40%        | 0,1543             |
|         | 50%        | 0,3468             |

Fonte: O Autor (2020).

#### 4.2.2.3 Alteração nas Coordenadas Espaciais

É importante mencionar que qualquer mudança na posição dos pontos não afeta a qualidade da marca d'água extraída. Por exemplo, na Figura 24, o modelo 3D, *Vase*, é apresentado, à esquerda, já com a marca d'água inserida e logo após sofrer um ataque de adição de ruído com amplitude de 50%. Observe que, embora o ruído seja suficiente para destruir completamente o modelo 3D, no sentido de que é impossível reconhecê-lo visualmente, ainda é possível extrair a marca d'água sem nenhum erro, conforme apresentado na Figura 24b. O valor de PSNR tende a infinito e o valor de BER é 0 (zero). Note também que esta capacidade de extração, apesar das mudanças nas coordenadas dos pontos, é precisamente o que garante a eficácia do método contra ataques de transformação afim ou qualquer outro tipo de ataque que altere as coordenadas espaciais do modelo.

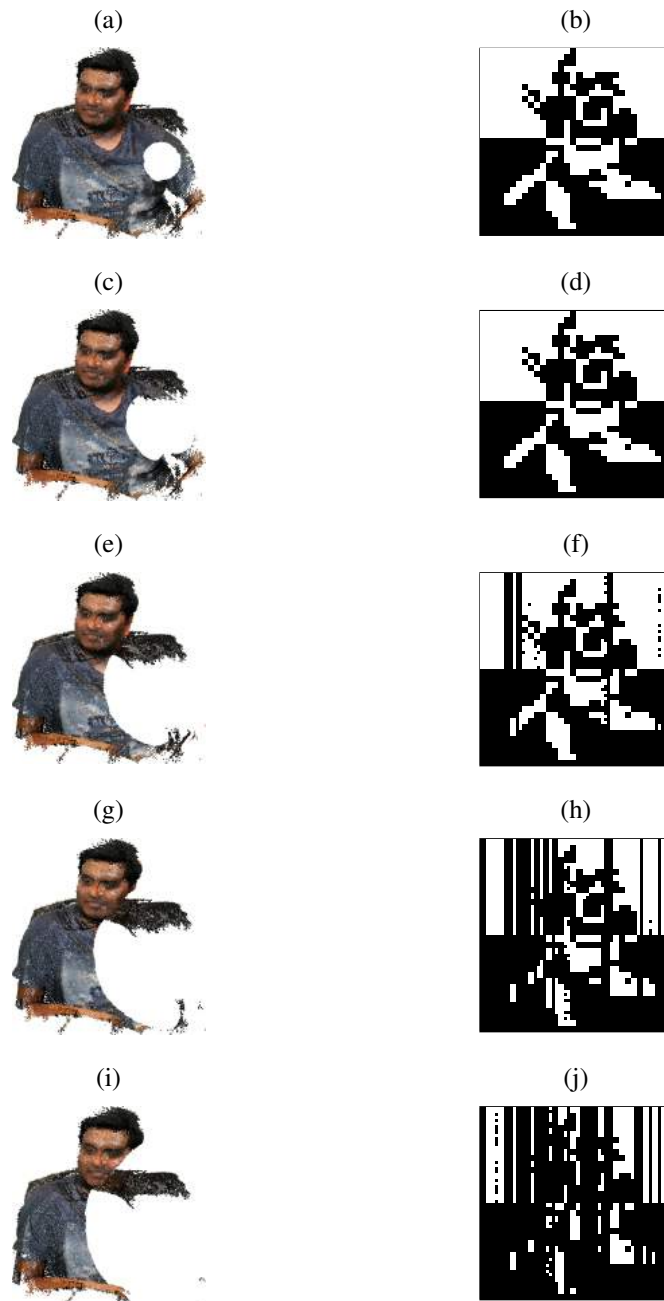
#### 4.2.3 Capacidade de Inserção

Nesta subseção são discutidos aspectos relacionados à capacidade de inserção do algoritmo proposto. A capacidade teórica máxima para inserção de *bits* com o algoritmo proposto é

$$\text{cap} = \frac{3N}{Mc}, \quad (4.8)$$

em que  $N$  é o número de pontos do modelo 3D,  $M$  é o número de *clusters*, e  $c$  é a taxa de replicação de *bit*. Então, o limite de inserção dos modelos *Bunny* e *Lion Statue*, utilizando o método proposto neste trabalho, com  $M = 5$  e  $c = 10$  é 2.156 e 32.174 *bits*, respectivamente. Para os modelos *Guy* e *Vase*, utilizando  $M = 4$  e  $c = 10$ , o limite é 5.014 e 11.056 *bits*, respectivamente.

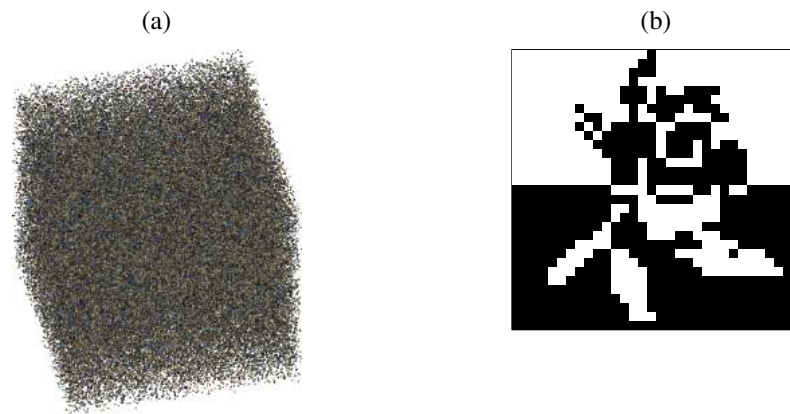
Figura 23 – Modelo *Guy* após ataques de recorte com diferentes valores percentuais de pontos removidos e a respectiva imagem de marca d'água de tamanho  $64 \times 64$  extraída após o ataque. As marcas d'água apresentadas nas figuras (b), (d), (f), (h) e (j) foram extraídas dos modelos apresentados nas figuras (a), (c), (e), (g) e (i), respectivamente. Os valores de PSNR das marcas extraídas são: (b) tende a infinito, (d) tende a infinito, (f) 12,12 dB, (h) 7,83 dB e (j) 5,90 dB. Os valores de percentual de recorte foram: (a) 5%, (c) 15%, (e) 30%, (g) 40% e (i) 50%.



Fonte: O Autor (2020).

Na Figura 25 e na Figura 26 são apresentados os valores de PSNR e RMSE, respectivamente, para todas as nuvens de pontos utilizadas neste trabalho (*Bunny*, *Guy*, *Vase* e *Lion Statue*) e  $\beta \in \{0,01; 0,02\}$ . O objetivo é avaliar o quanto os modelos são degradados à medida

Figura 24 – Ilustração da (a) nuvem de pontos, *Vase*, sob ataque de adição de ruído (50% de amplitude) e (b) marca d’água extraída (PSNR: tende a infinito, BER: 0).



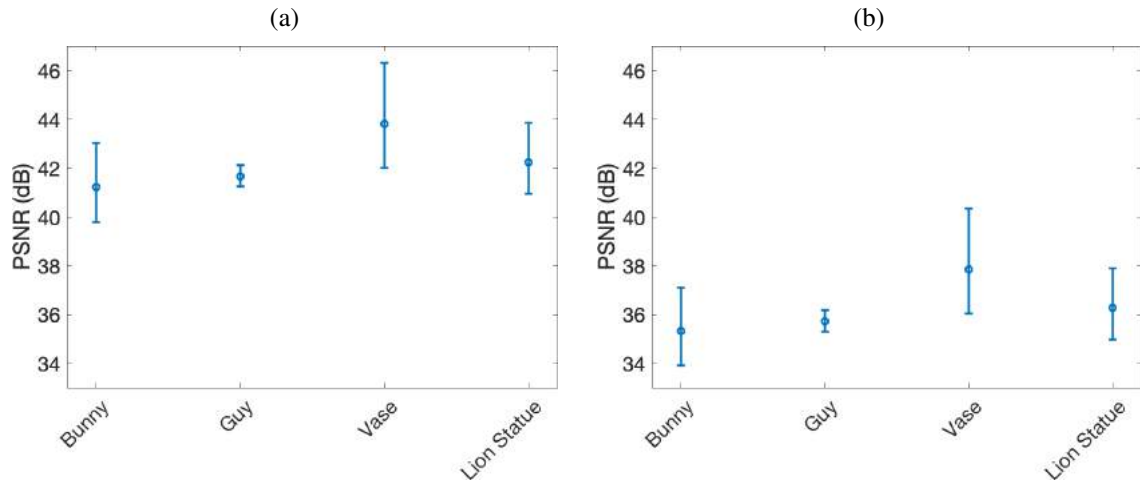
Fonte: O Autor (2020).

que o tamanho da marca d’água aumenta. O PSNR mais baixo obtido é de 33,91 dB e o mais alto é de 46,33 dB, considerando todos os modelos e valores de  $\beta$ . A nuvem de pontos *Vase*, por exemplo, obteve valores de PSNR variando de 36,04 dB a 40,35 dB. Como esperado, os valores de RMSE aumentam conforme o tamanho da marca d’água aumenta. Os resultados estão dentro dos valores obtidos por métodos de marca d’água de imagem digital (ASIKUZZAMAN; PICKERING, 2018; BHOWMIK; OAKES; ABHAYARATNE, 2016; LIE; LIN; CHENG, 2006; WANG; NI; HUANG, 2012; MEKARSARI et al., 2018; SU et al., 2014), mesmo para sequências de *bits* com um tamanho próximo ou igual ao limite teórico dado na Eq. (4.8).

### 4.3 ANÁLISE COMPARATIVA

Inicialmente, gostaríamos de salientar que identificamos várias restrições quanto à comparação do método proposto neste trabalho com outras técnicas previamente publicadas; não conseguimos encontrar um trabalho em que um esquema semelhante ao nosso fosse considerado. Nenhuma das técnicas existentes de marca d’água para nuvem de pontos insere os *bits* nos atributos do modelo; em vez disso, são utilizadas as coordenadas espaciais dos pontos para realizar a inserção (COTTING et al., 2004; OHBUCHI; MUKAIYAMA; TAKAHASHI, 2004; LUO; LU; PAN, 2006; AGARWAL; PRABHAKARAN, 2009; QI; DONG-QING; DA-FANG, 2010; XIAOQING, 2015; LIU et al., 2018). Além disso, os modelos de teste utilizados nos artigos da literatura possuem poucos pontos em comparação a modelos reais. O modelo com o maior número de pontos utilizado nos trabalhos encontrados foi de aproximadamente 71.000 pontos (COTTING et al., 2004). No presente trabalho, escolhemos modelos com quantidades de pontos de 35.947 a 536.240. O uso de diferentes modelos é outro fator que dificulta a comparação. Com relação ao tamanho da marca d’água, também não encontramos trabalhos que realizam a inserção de um número *grande* de *bits*, ou ao menos próximo à quantidade de *bits* utilizada neste trabalho. A maior marca d’água usada nos artigos é de 150 *bits* (LIU et al., 2018); no

Figura 25 – Valores de PSNR de modelos marcados com marcas d’água de diferentes tamanhos. Nos modelos *Bunny*, *Guy*, *Vase* e *Lion Statue*, foram inseridas marcas d’água de tamanho 1.024 a 2.154 *bits* (de 10 em 10), 4.096 a 5.008 *bits* (de 8 em 8), 4.096 a 11.056 *bits* (de 60 em 60) e 16.384 a 32.044 (de 135 em 135), respectivamente; os limites inferiores das barras indicam os respectivos PSNRs obtidos após a inserção da respectiva maior marca d’água e os limites superiores indicam os resultados obtidos após a inserção da respectiva menor marca d’água. São exibidos gráficos de PSNR para (a)  $\beta = 0,01$  e (b)  $\beta = 0,02$ .



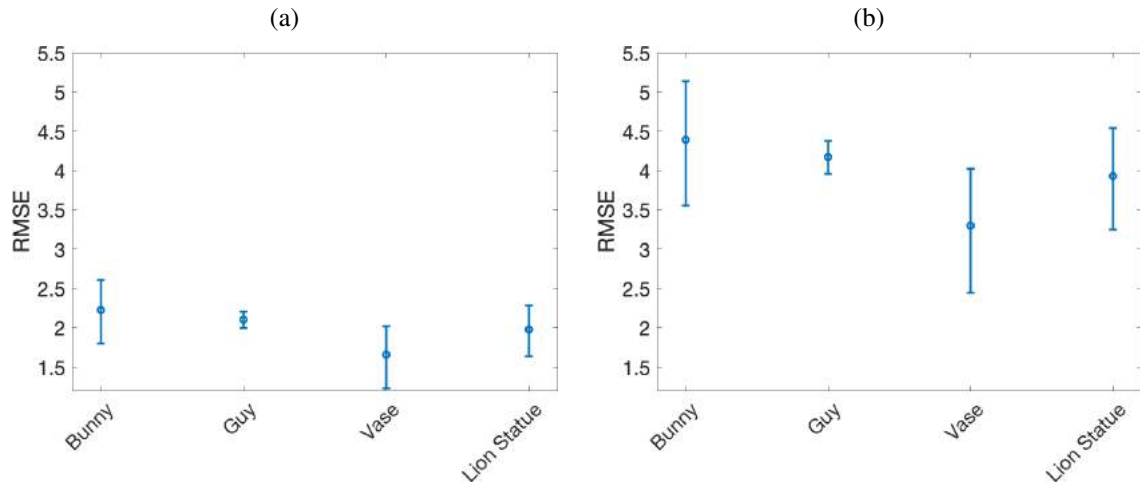
Fonte: O Autor (2020).

presente trabalho, foram inseridas marcas d’água com mais de 16.384 *bits*. Apesar de todas essas restrições, estabelecemos um critério para permitir uma comparação justa entre os diferentes métodos de marca d’água: levamos em conta o percentual do tamanho da marca d’água (em *bits*) em relação ao total de pontos na nuvem.

Em (LIU et al., 2018), os autores realizaram testes de ataque de recorte 10%, 30% e 50% dos pontos removidos. Foram obtidos resultados de coeficiente de correlação iguais a 0,91, 0,85 e 0,65, respectivamente, para uma versão do modelo *Bunny* com 5.326 pontos. Uma marca d’água de 150 *bits* foi usada, representando 2,82% do número total de pontos no modelo. Nosso método obtém resultados de coeficiente de correlação iguais a 1,00, 1,00 e 0,97 para 10%, 30% e 50% de recorte, respectivamente, em uma versão do modelo *Bunny* de 35.947 pontos. A marca d’água utilizada no trabalho atual, para este modelo, possui 1.024 *bits*, o que representa 2,85% do total de pontos. Em (LIU et al., 2018), a robustez contra ataques de rotação também é avaliada. Os testes foram realizados rotacionando o eixo X a 30, 60 e 90 graus; coeficientes de correlação de 1,00 a 0,95 foram obtidos. Em nosso método, obtém-se 1,00 como coeficiente de correlação, independentemente do ângulo de rotação; aqui é importante lembrar que nosso método torna ineficaz qualquer ataque que modifique as coordenadas dos pontos, como transformações afins.

Nos trabalhos em (LIU et al., 2018; QI; DONG-QING; DA-FANG, 2010; BORS; LUO, 2013) é avaliada a robustez contra ataques de adição de ruído usando amplitudes de até 0,5%, o que resulta em 0,17, 0,34 e 0,15 como valores de BER. Em (OHBUCHI; MUKAIYAMA;

Figura 26 – Valores de RMSE de modelos marcados com marcas d'água de diferentes tamanhos. Nos modelos *Bunny*, *Guy*, *Vase* e *Lion Statue*, foram inseridas marcas d'água de tamanho 1.024 a 2.154 *bits* (de 10 em 10), 4.096 a 5.008 *bits* (de 8 em 8), 4.096 a 11.056 *bits* (de 60 em 60) e 16.384 a 32.044 (de 135 em 135), respectivamente; os limites inferiores das barras indicam os respectivos RMSEs obtidos após a inserção da respectiva menor marca d'água e os limites superiores indicam os resultados obtidos após a inserção da respectiva maior marca d'água. São exibidos gráficos de RMSE para (a)  $\beta = 0,01$  e (b)  $\beta = 0,02$ .



Fonte: O Autor (2020).

(TAKAHASHI, 2004), são consideradas amplitudes de ruído de até 2,5% e o valor de BER mais baixo é de aproximadamente 0,05. Em (OHBUCHI; MUKAIYAMA; TAKAHASHI, 2004), foi utilizado um modelo com 8.485 pontos e uma marca d'água de 32 *bits*, representando 0,38% do total de pontos. Em nosso trabalho, obtivemos BER igual a 0,00 para todos os modelos com ruído de amplitude igual a 0,5%. Além disso, foram obtidos resultados de BER da ordem de  $10^{-2}$  para ataques com amplitude de ruído de 2,5% a 5%. Em (XIAOQING, 2015) foram usados modelos com 17.225 e 10.002 pontos e uma marca d'água de 64 *bits* (ou seja, 0,37% e 0,64%, respectivamente, do total de pontos). Embora o tamanho da marca d'água seja proporcionalmente menor que o usado em nosso trabalho, ainda obtemos melhores resultados com relação aos ataques de recorte e adição de ruído. Em (XIAOQING, 2015), ruídos de amplitude de até 1% resultaram em valores de coeficiente de correlação variando entre 0,73 e 0,97. Por outro lado, nosso trabalho resulta em um coeficiente de correlação igual a 1,00 para ataques de ruído de até 1% e, mesmo para ruídos de até 5%, é possível obter resultados de coeficiente de correlação iguais a 0,97 para todos os modelos avaliados.

Com relação aos ataques de recorte, o trabalho em (XIAOQING, 2015) resulta em valores de coeficiente de correlação iguais a 1,00 para um recorte de 20,25% do modelo; de 0,88 a 0,97 para um recorte de 45,28%; e de 0,41 a 0,75 para um recorte de 72,28%. Nosso método resulta em 1,00, 1,00 e 0,55 para recortes de 20,25%, 45,28% e 72,28%, respectivamente, para o modelo *Bunny*. Note que, enquanto a marca d'água usada em nosso trabalho representa 2,82%

do total de pontos do modelo *Bunny*, em (XIAOQING, 2015), a marca d'água representa um máximo de 0,64%. Assim como em nosso trabalho, os autores de (XIAOQING, 2015) indicam que seu método pode recuperar 100% da marca d'água sob ataques de transformações afins ou reordenamento.

Na Subseção 4.2.1, avaliamos a imperceptibilidade da marca d'água usando as medidas PSNR e RMSE. Mais especificamente, com relação aos valores de intensidade de cor, o PSNR dos objetos marcados está entre 34,93 dB e 54,93 dB, dependendo dos parâmetros e modelos utilizados nas simulações. Estes são resultados satisfatórios para imagens digitais de 8 bpp para métodos de marca de água, como pode ser verificado em (ASIKUZZAMAN; PICKERING, 2018; BHOWMIK; OAKES; ABHAYARATNE, 2016; LIE; LIN; CHENG, 2006; WANG; NI; HUANG, 2012; MEKARSARI et al., 2018; SU et al., 2014), por exemplo. Os valores do RMSE variam de 0,46 a 4,57, dependendo também da configuração da simulação. Como os métodos existentes de marca d'água para nuvens de pontos inserem os *bits* nas coordenadas, não é possível realizar uma comparação direta com nosso método; o intervalo de valores (coordenadas vs. intensidades de cor) é bastante diferente; no nosso caso, usamos amostras com intensidades de cor de 0 a 255 (8 bpp). Quanto às coordenadas, os valores no intervalo entre 0 e 5, por exemplo, são comuns. Para permitir uma comparação razoável, normalizamos o intervalo de números inteiros  $[0, 255]$ , obtendo o intervalo de números reais  $[0, 1]$ ; isso gerou valores de RMSE da ordem de  $10^{-3}$  para  $\beta = 0,01$  e  $10^{-2}$  para  $\beta = 0,02$ , para todos os modelos e tamanhos de marca d'água usados em nossos experimentos. Em (LIU et al., 2018; QI; DONG-QING; DA-FANG, 2010; BORS; LUO, 2013), todos os valores do RMSE são da ordem de  $10^{-3}$ .

Embora o esquema utilizado para comparação não seja ideal, a análise que fizemos nos permite posicionar nossa abordagem entre outras técnicas já publicadas. Em geral, nosso método fornece um ganho considerável em relação à robustez contra ataques quando comparado aos outros métodos. Pode-se recuperar a marca d'água com valores de BER da ordem de  $10^{-3}$ , mesmo para amplitudes de ruído acima de 2,5%, por exemplo; isso não é possível em outros trabalhos. O mesmo ocorre quando avaliamos ataques de recorte, em que um valor de coeficiente de correlação de 0,97 é obtido, mesmo se 50% dos pontos são removidos; em (LIU et al., 2018), os autores obtiveram um resultado de 0,65 para a mesma porcentagem de recorte. Em relação à imperceptibilidade, o método proposto apresenta uma perda em relação aos métodos da literatura, quando utilizado  $\beta = 0,02$ . Os resultados do RMSE são obtidos com uma diferença de até  $10^{-1}$  quando o nosso método é comparado com os demais. Assim, entendemos que o método proposto apresenta uma boa relação custo-benefício entre robustez e imperceptibilidade. Como estes requisitos são, na maioria das vezes, inversamente proporcionais, é incomum obter ganhos de robustez sem afetar negativamente a imperceptibilidade.

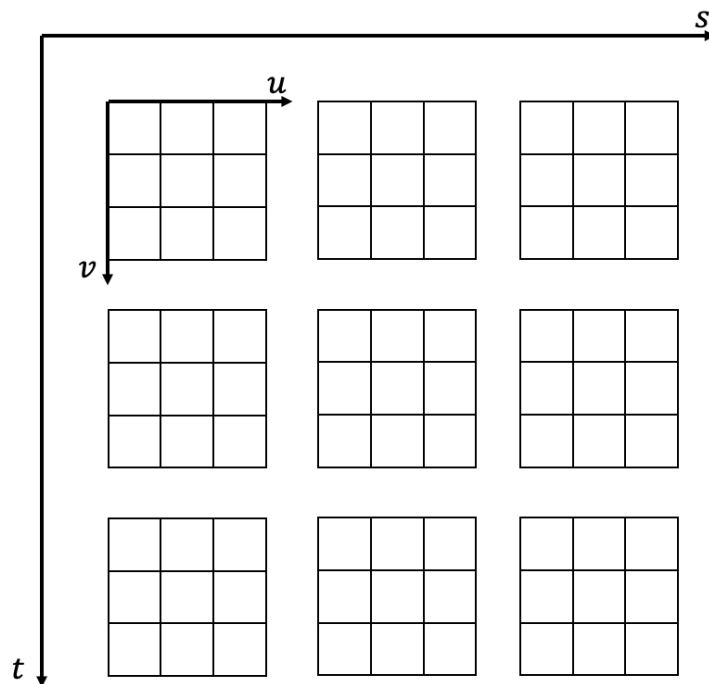
## 5 IMAGENS DE *LIGHT FIELD* NO DOMÍNIO DA TRANSFORMADA

Este capítulo apresenta algumas características da transformada utilizada durante o processo de marca d'água das imagens de *light field*; também são apresentados e discutidos alguns resultados quanto ao comportamento dessas imagens no domínio da transformada utilizada para processá-las. Especificamente para imagens de *light field* foi utilizada a transformada discreta do cosseno 4-dimensional (4D-DCT, do inglês *4-dimensional discrete cosine transform*), definida sobre as coordenadas  $(s, t, u, v)$ , conforme a Figura 27.

### 5.1 A TRANSFORMADA DISCRETA DO COSSENO 4-DIMENSIONAL

A transformada discreta do cosseno (DCT, do inglês *discrete cosine transform*) possui uma propriedade muito interessante para determinadas aplicações como compressão e marca d'água: a possibilidade de concentrar a energia de um sinal em poucos coeficientes, particularmente nos de baixa frequência. Esta propriedade é muito útil para aplicações de compressão pois é possível, muitas vezes, reduzir drasticamente a quantidade de coeficientes que precisam ser armazenados ou transmitidos, e ainda conseguir reconstruir o sinal com um certo grau de fidelidade em relação ao sinal original. A propriedade em questão também é útil para aplicações de marca d'água pois nos permite alterar parte dos coeficientes, para inserção da marca, sem que o sinal reconstruído possua altos níveis de degradação, em relação ao original.

Figura 27 – Exemplo da estrutura de coordenadas de uma imagem de *light field* de dimensões  $(s, t, u, v) = (3, 3, 3, 3)$ .



Fonte: O Autor (2020).

A transformada discreta do cosseno (DCT) para um vetor  $\mathbf{x}$  de comprimento  $N$  é um vetor de saída  $\tilde{\mathbf{x}}$ , de mesmo comprimento, com componentes dadas por

$$\tilde{x}_k = \alpha_k \sum_{n=0}^{N-1} x_n \cos \frac{\pi(2n+1)k}{2N}, \quad (5.1)$$

para  $0 \leq k \leq N-1$ , em que

$$\alpha_k = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{N}}, & \text{se } k = 0 \\ \sqrt{\frac{2}{N}}, & \text{se } 1 \leq k \leq N-1. \end{cases} \quad (5.2)$$

A transformada discreta do cosseno bidimensional (2D-DCT) para uma imagem de entrada  $\mathbf{A}$ , de dimensões  $N \times N$ , é uma imagem de saída  $\tilde{\mathbf{A}}$ , de mesmas dimensões, e componentes calculadas por

$$\tilde{A}_{pq} = \alpha_p \alpha_q \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} A_{ij} \cos \frac{\pi(2i+1)p}{2N} \cos \frac{\pi(2j+1)q}{2N}, \quad (5.3)$$

para  $0 \leq p, q \leq N-1$ , em que  $\alpha_p$  e  $\alpha_q$  são obtidos de forma análoga a  $\alpha_k$  (Equação 5.2).

Como a 2D-DCT é uma transformada separável, matricialmente, o cálculo de  $\tilde{\mathbf{A}}$  a partir de  $\mathbf{A}$  pode ser expresso por

$$\tilde{\mathbf{A}} = \mathbf{\Gamma} \mathbf{A} \mathbf{\Gamma}^T \quad (5.4)$$

em que  $\mathbf{\Gamma}$  é a matriz da DCT unidimensional (Equação 5.1) e  $\mathbf{\Gamma}^T$  é sua versão transposta linha-coluna. A transformada inversa, a 2D-IDCT, pode então ser obtida pelos produtos à esquerda e à direita de  $\tilde{\mathbf{A}}$  por  $\mathbf{\Gamma}^T$  e  $\mathbf{\Gamma}$ , o que fornece

$$\mathbf{\Gamma}^T \tilde{\mathbf{A}} \mathbf{\Gamma} = \mathbf{\Gamma}^T \mathbf{\Gamma} \mathbf{A} \mathbf{\Gamma}^T \mathbf{\Gamma} = \mathbf{A}. \quad (5.5)$$

A transformada discreta do cosseno 4-dimensional (4D-DCT), assim como a 2D-DCT, também é separável. Sendo assim, podemos calcular a 4D-DCT computando a DCT unidimensional em sequência para cada dimensão, ou de forma análoga, podemos computar a 2D-DCT para um par de dimensões e em seguida calcular para outro par. Dessa forma, considere uma imagem de *light field*  $\mathbf{L}$  de dimensões  $S \times T \times U \times V$ . Podemos calcular a 4D-DCT computando a 2D-DCT com relação ao plano  $uv$  e em seguida computando a 2D-DCT com relação ao plano  $st$ . Isto é, para cada vista  $\mathbf{L}(i, j)_{st}$ ,  $1 \leq i \leq S$  e  $1 \leq j \leq T$ , calcula-se

$$\mathbf{L}'(i, j)_{st} = \mathbf{\Gamma}_u \mathbf{L}(i, j)_{st} \mathbf{\Gamma}_v^T, \quad (5.6)$$

e em seguida, para cada subvista  $\mathbf{L}'(k, l)_{uv}$ ,  $1 \leq k \leq U$  e  $1 \leq l \leq V$ , calcula-se

$$\tilde{\mathbf{L}}(k, l)_{uv} = \mathbf{\Gamma}_s \mathbf{L}'(k, l)_{uv} \mathbf{\Gamma}_t^T, \quad (5.7)$$

em que  $\Gamma_n$  representa uma matriz da DCT unidimensional de comprimento  $n$ .

A transformada inversa, 4D-IDCT, pode ser computada, analogamente à 2D-IDCT, com os produtos à esquerda e à direita de todas as vistas de  $\tilde{\mathbf{L}}$  por  $\Gamma_u^T$  e  $\Gamma_v$ , respectivamente,

$$\Gamma_u^T \tilde{\mathbf{L}}(i, j)_{st} \Gamma_v = \Gamma_u^T \Gamma_u \mathbf{L}'(i, j)_{st} \Gamma_v^T \Gamma_v = \mathbf{L}'(i, j)_{st}, \quad (5.8)$$

e em seguida com os produtos à esquerda e à direita de  $\mathbf{L}'$  por  $\Gamma_s^T$  e  $\Gamma_t$ , respectivamente,

$$\Gamma_s^T \mathbf{L}'(k, l)_{uv} \Gamma_t = \Gamma_s^T \Gamma_s \mathbf{L}(i, j)_{uv} \Gamma_t^T \Gamma_t = \mathbf{L}(k, l)_{uv}, \quad (5.9)$$

obtendo a imagem de *light field*,  $\mathbf{L}$ , original.

### 5.1.1 A 4D-DCT aplicada a Imagens de *Light Field*

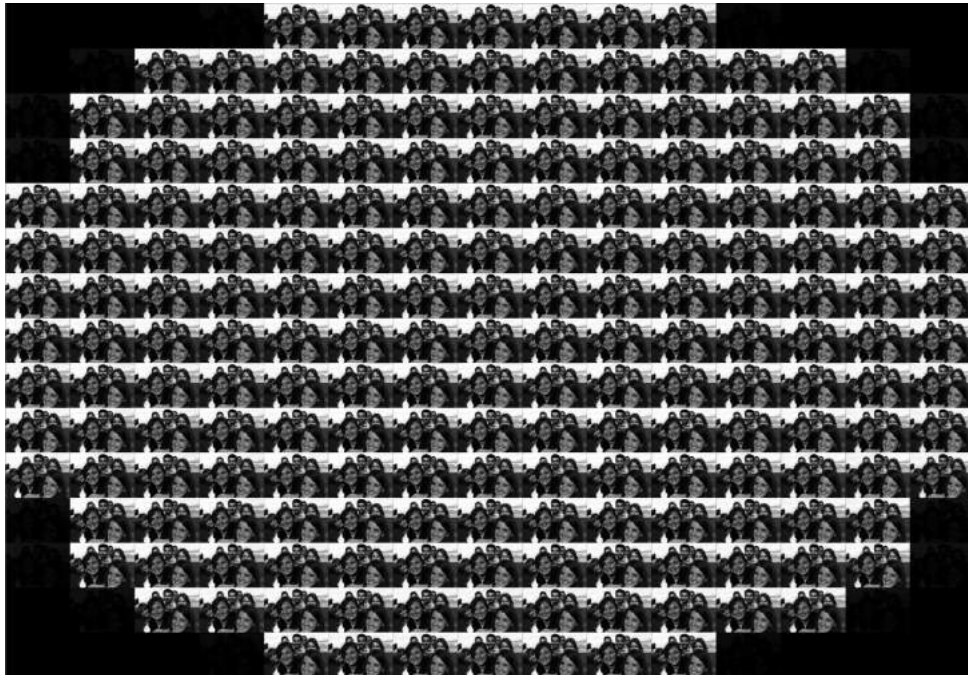
Como apresentado anteriormente, a DCT possui uma alta capacidade de concentrar a energia do espectro em baixas frequências. Quando se trata de imagens bidimensionais, a energia do espectro da 2D-DCT é concentrada nos coeficientes dispostos no canto superior esquerdo. De forma similar, esse comportamento também é encontrado com relação ao espectro da 4D-DCT. A energia é concentrada no canto superior esquerdo tanto para o plano  $st$  quanto para o plano  $uv$ , o que é uma característica interessante que pode ser explorada para aplicações de compressão e marca d'água de imagens de *light field*, pois permite alterar (ou zerar) vários coeficientes, obtendo um nível baixo de degradação das imagens reconstruídas.

Na Figura 28 é apresentada uma imagem de *light field* de dimensão  $15 \times 15 \times 434 \times 625$  convertida do formato de cores RGB para YCbCr como um *array* de imagens bidimensionais; apenas o canal Y é apresentado na figura e utilizado nos experimentos a seguir. Já na Figura 29 é apresentada a mesma imagem em *microarrays*.

Pode-se obter um melhor desempenho em termos de tempo de execução e no que diz respeito às capacidades de compactação de energia da 2D-DCT computando a transformada em blocos. Para a 4D-DCT isso não é diferente; por este motivo, nesta seção, foram utilizados blocos de dimensão  $8 \times 8 \times 8 \times 8$ . Para a utilização de um bloco deste tamanho, a imagem de *light field* foi reduzida para o tamanho  $8 \times 8 \times 432 \times 624$ ; foram considerados os *frames* no plano  $st$  para  $3 \leq s, t \leq 10$  e os *pixels* no plano  $uv$  para  $1 \leq u \leq 432$  e  $0 \leq v \leq 623$ . Na Figura 30 é apresentada a imagem de *light field* reduzida.

A Figura 31 apresenta os coeficientes da 4D-DCT para a Figura 30 utilizando blocos de tamanho  $8 \times 8 \times 8 \times 8$ . Conforme esperado, o espectro 4-dimensional (visualizado de forma bidimensional) da 4D-DCT tem um aspecto similar ao espectro da 2D-DCT, no sentido de que os coeficientes de maior magnitude estão concentrados no canto superior esquerdo do espectro bidimensional. Na Figura 31 também é apresentado um dos *frames* da imagem de *light field* ampliado; mais precisamente o *frame* na posição  $s = 0$  e  $t = 0$ . Note que a concentração dos coeficientes no canto superior esquerdo pode ser visualizada tanto no plano  $st$ , que pode ser

Figura 28 – Canal Y de uma imagem de *light field* de dimensão  $15 \times 15 \times 434 \times 625$  visualizada como um *array* de imagens bidimensionais.



Fonte: (RERABEK; EBRAHIMI, 2016)

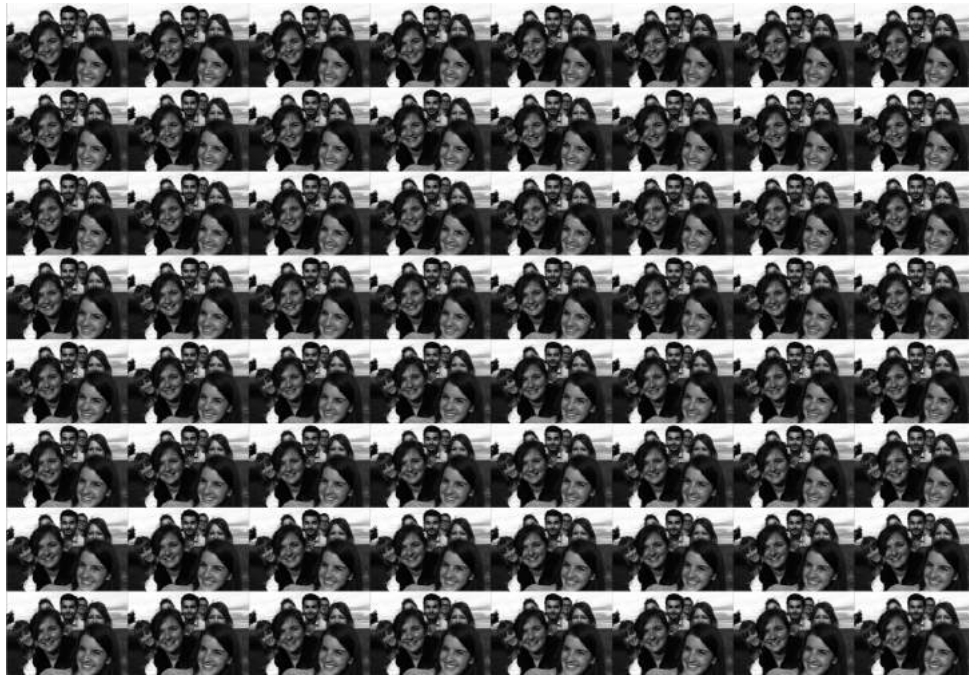
Figura 29 – Canal Y de uma imagem de *light field* visualizada em *microarrays*.



Fonte: (RERABEK; EBRAHIMI, 2016)

observado pela imagem superior da Figura 31, quanto nos blocos  $8 \times 8$  do plano  $uv$ , que podem ser observados na imagem inferior.

Figura 30 – Canal Y da imagem de *light field* reduzida para dimensão  $8 \times 8 \times 432 \times 624$ .



Fonte: O Autor (2020).

Tabela 10 – Valores de  $\text{PSNR}_{\text{médio}}$  e  $\text{SSIM}_{\text{médio}}$  para imagens de *light field* reconstruídas após retenção de apenas um percentual do total de coeficientes de maior magnitude da 4D-DCT.

| %   | $\text{PSNR}_{\text{médio}}$ | $\text{SSIM}_{\text{médio}}$ |
|-----|------------------------------|------------------------------|
| 90% | 85,07                        | 0,9999                       |
| 70% | 69,65                        | 0,9996                       |
| 50% | 61,33                        | 0,9990                       |
| 30% | 54,54                        | 0,9979                       |
| 10% | 46,31                        | 0,9934                       |
| 1%  | 36,42                        | 0,9668                       |

Para demonstrar a capacidade de compactação de energia da 4D-DCT, a Tabela 10 apresenta alguns resultados de  $\text{PSNR}_{\text{médio}}$  e  $\text{SSIM}_{\text{médio}}$  (vide Seção 7.1 para mais informações) calculados entre a imagem original apresentada na Figura 30 e imagens reconstruídas após a retenção de uma parcela dos coeficientes da 4D-DCT; os demais foram zerados. Especificamente, consideramos reter um total de 90%, 70%, 50%, 30%, 10% ou 1% dos coeficientes de maior magnitude. Note que os resultados de  $\text{PSNR}_{\text{médio}}$  e  $\text{SSIM}_{\text{médio}}$  reduzem à medida em que menos coeficientes são retidos, conforme esperado, e que mesmo mantendo apenas 1% dos coeficientes de maior magnitude ainda é possível obter altos valores de  $\text{PSNR}_{\text{médio}}$  e  $\text{SSIM}_{\text{médio}}$ . A Figura 32 apresenta o espectro com apenas 1% dos coeficientes retidos e a imagem reconstruída a partir deles.

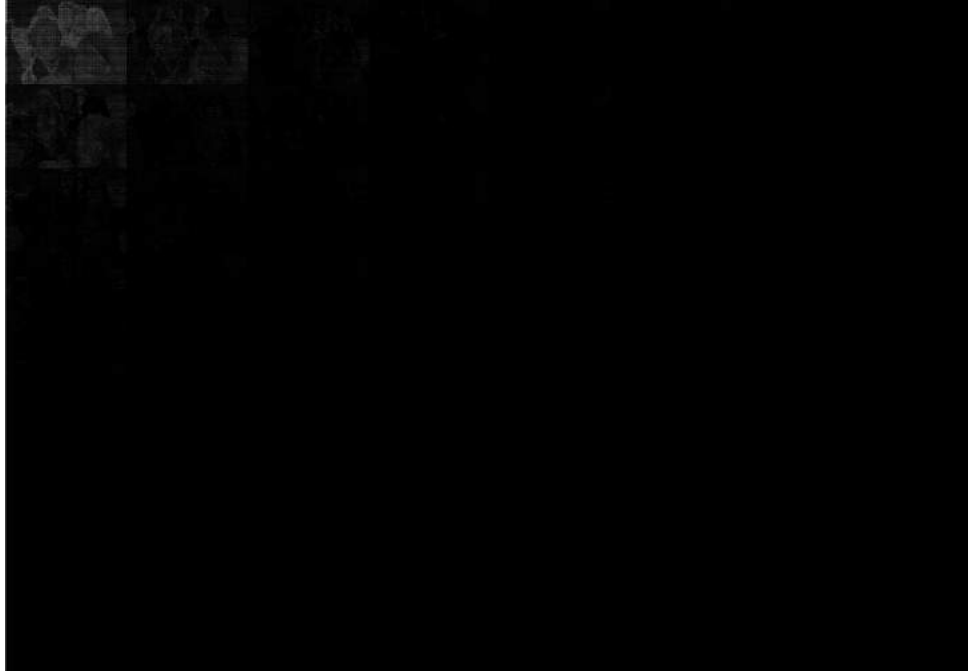
Figura 31 – Espectro da 4D-DCT (visualizado de forma bidimensional) de uma imagem de *light field* (canal Y) calculado com blocos de tamanho  $8 \times 8 \times 8 \times 8$  e o *frame* na posição  $s = 0$  e  $t = 0$  ampliado.



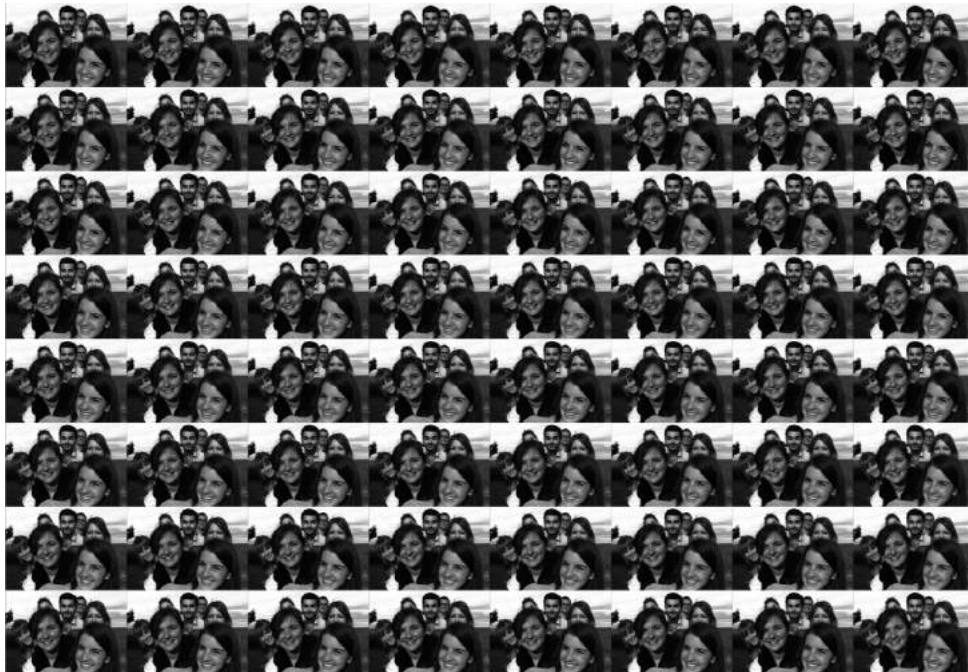
Fonte: O Autor (2020).

Figura 32 – (a) Espectro da 4D-DCT com apenas 1% dos coeficientes retidos e (b) imagem de *light field* reconstruída a partir desses coeficientes.

(a)



(b)



Fonte: O Autor (2020).

## 6 TÉCNICAS DE MARCA D'ÁGUA NO DOMÍNIO DA TRANSFORMADA PARA IMAGENS DE *LIGHT FIELD*

Neste capítulo é apresentada a técnica de marca d'água proposta para uma das imagens plenópticas consideradas neste trabalho, mais especificamente para imagens de *light field*. São descritas as etapas de inserção e extração e os detalhes concernentes aos métodos abordados para modulação dos coeficientes no domínio da transformada. Para imagens de *light field*, a marca d'água é inserida no domínio da transformada discreta do cosseno 4-dimensional.

### 6.1 PROPOSTA DE TÉCNICA DE MARCA D'ÁGUA PARA IMAGENS DE *LIGHT FIELD*

O esquema de marca d'água para imagens de *light field* proposto neste trabalho envolve duas etapas, uma para inserção da marca d'água e outra para extração. Em ambas as etapas, são utilizados mecanismos pseudo-aleatórios que devem estar em sincronia para que a marca d'água seja recuperada corretamente. A semente utilizada para geração de sequências pseudo-aleatórias é utilizada como chave do processo de marca d'água proposto neste trabalho. Além do esquema de marca d'água também é proposta uma forma de ordenação para os coeficientes de um bloco 4-dimensional. O objetivo é ter uma estratégia de ordenação que permita a concentração da energia do espectro nas baixas “frequências”. A seguir, os detalhes concernentes às referidas etapas são descritos.

#### 6.1.1 Inserção

Considere um *light field*  $\mathbf{L}$  em escala de cinza e com dimensões  $S \times T \times U \times V$ , e uma marca d'água  $\mathbf{W}$  com dimensões  $N \times N$ . Os passos para inserção da marca d'água são os seguintes.

**Passo 1:** Inicialmente, embaralhe os *bits* da marca d'água  $\mathbf{W}$  utilizando a transformada de Arnold (SVANSTROM, 2014), e obtenha a marca embaralhada  $\mathbf{W}'$ . Isso é feito para des-correlacionar os *pixels* da marca no domínio espacial. A transformada de Arnold consiste no mapeamento de um ponto na posição  $(x, y)$ , em que  $x, y \in \{1, 2, 3, \dots, N\}$ , na posição  $(x', y')$ , em que  $x', y' \in \{1, 2, 3, \dots, N\}$ , conforme

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \pmod{N}, \quad (6.1)$$

em que  $(x, y)$  e  $(x', y')$  são coordenadas dos *pixels* da marca d'água original  $\mathbf{W}$  e da embaralhada  $\mathbf{W}'$ , respectivamente.

**Passo 2:** Calcule a 4D-DCT do *light field*  $\mathbf{L}$  utilizando blocos  $\mathbf{B}$  de tamanho  $s \times t \times u \times v$ . A 4D-DCT é calculada de forma separada utilizando a 2D-DCT para computar a transformada no plano  $uv$  (plano espacial da imagem) e em seguida no plano  $st$  (plano das vistas). Para cada vista  $\mathbf{B}(i, j)_{st}$ ,  $1 \leq i \leq s$  e  $1 \leq j \leq t$ , calcule

$$\mathbf{B}'(i, j)_{st} = \mathbf{\Gamma}_u \times \mathbf{B}(i, j)_{st} \times \mathbf{\Gamma}_v^T \quad (6.2)$$

em que  $\Gamma_u$  e  $\Gamma_v$  são as matrizes da DCT de tamanho  $u \times u$  e  $v \times v$ , respectivamente, e  $(\cdot)^T$  denota a transposição linha-coluna. Em seguida, para cada subvista  $B'(k, l)_{uv}$ ,  $1 \leq k \leq u$  e  $1 \leq l \leq v$ , calcule

$$\tilde{B}(k, l)_{uv} = \Gamma_s \times B'(k, l)_{uv} \times \Gamma_t^T. \quad (6.3)$$

**Passo 3:** Ordene os coeficientes de cada bloco 4-dimensional  $\tilde{B}$  em uma estrutura unidimensional (vide detalhes na Subseção 6.2).

**Passo 4:** Para cada *bit*  $b$  da marca d'água embaralhada  $W'$ , realize a modulação dos coeficientes (CHEN; WORNELL, 2001a) em  $\tilde{B}$  conforme descrito a seguir. Seja  $C$  um coeficiente qualquer, faça:

$$\tilde{C} = \begin{cases} 2\Delta \times \text{arred}\left(\frac{C}{2\Delta}\right) + \frac{\Delta}{2}, & \text{se } b = 1; \\ 2\Delta \times \text{arred}\left(\frac{C}{2\Delta}\right) - \frac{\Delta}{2}, & \text{se } b = 0, \end{cases} \quad (6.4)$$

em que  $\Delta$  é um parâmetro definido pelo usuário para controlar a “força” de inserção da marca d'água e  $\text{arred}(\cdot)$  é uma função de arredondamento (para o inteiro mais próximo). É importante salientar que quanto maior for o  $\Delta$  maior será o impacto na qualidade da imagem após a inserção da marca. Os *bits* da marca d'água  $W'$  são inseridos num subconjunto específico de coeficientes no domínio da transformada e respeitando a ordenação mencionada no Passo 3 (vide detalhes na Subseção 6.2). Se um *bit* de  $W'$  for inserido num coeficiente de um certo bloco transformado, o *bit* seguinte será inserido no bloco seguinte; os blocos são tomados de forma cíclica até que todos os *bits* de  $W'$  tenham sido inseridos. Para aumentar a segurança do processo, a ordem em que os blocos são tomados pode ser embaralhada e servir como parte da chave para extração correta dos *bits*.

**Passo 5:** Calcular a 4D-IDCT para cada bloco, obtendo o *light field*  $\tilde{L}$  marcado.

### 6.1.2 Extração

Para a correta extração da marca d'água é preciso utilizar a mesma chave de geração de números pseudo-aleatórios utilizada na inserção. Os passos para extrair a marca são descritos a seguir.

**Passo 1:** Calcule a 4D-DCT bloco a bloco do *light field* marcado  $\tilde{L}$ .

**Passo 2:** Ordene os coeficientes de cada bloco 4-dimensional transformando-o em uma estrutura unidimensional, conforme o Passo 3 da etapa de inserção.

**Passo 3:** Para cada coeficiente marcado  $\tilde{C}$ , extraia (CHEN; WORNELL, 2001a) cada *bit*  $b$  da marca d'água embaralhada  $W'$ :

$$b = \arg \min_{\theta \in \{0,1\}} (|C_\theta - \tilde{C}|), \quad (6.5)$$

em que

$$C_\theta = \begin{cases} 2\Delta \times \text{arred} \left( \frac{\tilde{C}}{2\Delta} \right) + \frac{\Delta}{2}, & \text{se } \theta = 1; \\ 2\Delta \times \text{arred} \left( \frac{\tilde{C}}{2\Delta} \right) - \frac{\Delta}{2}, & \text{se } \theta = 0. \end{cases} \quad (6.6)$$

**Passo 4:** Aplique a transformada de Arnold inversa a  $\mathbf{W}'$  obtendo a marca d'água original  $\mathbf{W}$ :

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 & -1 \\ -1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} \pmod{N}. \quad (6.7)$$

### 6.1.3 Variação do Método com Replicação de Bits

Uma possível variação para a técnica proposta de marca d'água é com o uso de replicação dos *bits* inseridos. Antes da inserção, cada *bit* é replicado a uma taxa  $c$ . Ou seja, considere uma sequência de *bits*  $\mathbf{S} = (s_1, s_2, s_3, \dots, s_n)$ , sua versão replicada a uma taxa  $c$  é

$$\mathbf{S}' = \left( \overbrace{s_1, s_1, \dots, s_1}^{c \text{ vezes}}, \overbrace{s_2, s_2, \dots, s_2}^{c \text{ vezes}}, \dots, \overbrace{s_n, s_n, \dots, s_n}^{c \text{ vezes}} \right). \quad (6.8)$$

Na etapa de extração, a sequência é obtida fazendo

$$s_i = \begin{cases} 1, & \text{se } \sigma \geq 0,5 \\ 0, & \text{caso contrário,} \end{cases} \quad \forall i \leq n, \quad (6.9)$$

em que

$$\sigma = \frac{\sum_{j=1}^c s_{(i-1)c+j}}{c}. \quad (6.10)$$

É importante mencionar que esta variação pode aumentar a robustez contra ataques devido à replicação dos *bits*, mas, em contrapartida, diminui a imperceptibilidade pois afeta com mais intensidade a imagem marcada.

## 6.2 PROPOSTA DE ORDENAÇÃO DE COEFICIENTES NO DOMÍNIO DA 4D-DCT

Esta seção apresenta uma proposta para ordenação dos coeficientes no domínio da 4D-DCT. O objetivo é permitir que se identifique um subconjunto de coeficientes em que seja mais adequado inserir a marca d'água no referido domínio; em linhas gerais, a ideia é evitar coeficientes que, ao serem modificados pela inserção da marca, levem a altas degradações na imagem de *light field* marcada, em relação à original, ou tornem o processo de marcação insuficientemente robusto.

Quando se aplica a 2D-DCT a uma imagem para fins de compressão, normalmente, os coeficientes no respectivo domínio são visitados em *zig-zag* (do canto superior esquerdo para

o canto inferior direito de cada bloco da imagem), a fim de que se gere uma versão vetorizada de cada bloco transformado; nas primeiras posições de cada vetor, aparecem coeficientes com magnitudes mais altas (frequências mais baixas) e, nas últimas, coeficientes com magnitudes mais baixas (frequências mais altas). Tais propriedades permitem que se explore, combinando quantização e codificação, a compactação de energia proporcionada pela 2D-DCT e que se determine uma faixa de coeficientes adequada à inserção de marcas d'água robustas à respectiva compressão.

Na ausência de uma estratégia análoga à descrita acima para ordenação dos coeficientes no domínio da 4D-DCT de uma imagem de *light field*, optou-se, neste trabalho, por desenvolver uma nova abordagem. Inicialmente foi criada uma abordagem empírica com base na média dos coeficientes no domínio da transformada de um conjunto de imagens de *light field*. Mais especificamente, a 4D-DCT foi calculada bloco a bloco (blocos de tamanho:  $8 \times 8 \times 8 \times 8$ ) para um total de 88 imagens do banco de imagens de *light field* da EPFL (École Polytechnique Fédérale de Lausanne) (RERABEK; EBRAHIMI, 2016) e, em seguida, foi computada a média do valor absoluto de cada um dos coeficientes de acordo com suas posições nos blocos. Esse processo resultou em um único bloco  $8 \times 8 \times 8 \times 8$  contendo a média de cada coeficiente em sua respectiva posição. Após isso, o bloco foi vetorizado, resultando em uma sequência de 4.096 valores. Então, os índices dos valores nessa sequência foram ordenados de acordo com o valor absoluto dos coeficientes de forma decrescente. Ou seja, considere  $n$  blocos de coeficientes  $\mathbf{B}_i, i \leq n$ ,

$$\mathbf{B}_1 = \begin{bmatrix} c_{1,1}^1 & c_{1,2}^1 & \cdots & c_{1,64}^1 \\ c_{2,1}^1 & c_{2,2}^1 & \cdots & c_{2,64}^1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ c_{64,1}^1 & c_{64,2}^1 & \cdots & c_{64,64}^1 \end{bmatrix}, \dots, \mathbf{B}_n = \begin{bmatrix} c_{1,1}^n & c_{1,2}^n & \cdots & c_{1,64}^n \\ c_{2,1}^n & c_{2,2}^n & \cdots & c_{2,64}^n \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ c_{64,1}^n & c_{64,2}^n & \cdots & c_{64,64}^n \end{bmatrix}, \quad (6.11)$$

em que  $n$  é a quantidade total de blocos<sup>1</sup>. Neste caso, como cada imagem utilizada possui dimensões  $8 \times 8 \times 432 \times 624$  e foram utilizadas 88 imagens, então  $n = 370.656$ . A partir de todos os blocos  $\mathbf{B}_i$  é obtido o bloco que contém a média de cada coeficiente,

$$\hat{\mathbf{B}} = \begin{bmatrix} \frac{\sum_{i=1}^n c_{1,1}^i}{n} & \frac{\sum_{i=1}^n c_{1,2}^i}{n} & \cdots & \frac{\sum_{i=1}^n c_{1,64}^i}{n} \\ \frac{\sum_{i=1}^n c_{2,1}^i}{n} & \frac{\sum_{i=1}^n c_{2,2}^i}{n} & \cdots & \frac{\sum_{i=1}^n c_{2,64}^i}{n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\sum_{i=1}^n c_{64,1}^i}{n} & \frac{\sum_{i=1}^n c_{64,2}^i}{n} & \cdots & \frac{\sum_{i=1}^n c_{64,64}^i}{n} \end{bmatrix}. \quad (6.12)$$

O bloco  $\hat{\mathbf{B}}$  é então vetorizado seguindo a ordem lexicográfica dos índices de seus elementos, isto é,

$$\mathbf{V} = \left( \hat{B}_{1,1}, \hat{B}_{1,2}, \dots, \hat{B}_{1,64}, \hat{B}_{2,1}, \hat{B}_{2,2}, \dots, \hat{B}_{2,64}, \dots, \hat{B}_{n,1}, \hat{B}_{n,2}, \dots, \hat{B}_{n,64} \right), \quad (6.13)$$

<sup>1</sup> Os blocos  $\mathbf{B}_i$  são estruturas 4-dimensionais ( $8 \times 8 \times 8 \times 8$ ) e estão aqui representados de forma bidimensional como um *array*  $64 \times 64$ .

e, em seguida, os índices  $i, 1 \leq i \leq 4096$ , dos elementos de  $\mathbf{V}$ , são ordenados na ordem decrescente do valor absoluto dos elementos de  $\mathbf{V}$ , obtendo  $\mathbf{I} = (\pi(V_i) \mid V_i \geq V_j \text{ e } i < j)$ , em que  $\pi(V_i)$  é o índice do  $i$ -ésimo elemento de  $\mathbf{V}$ . Desta forma, para ordenar um bloco  $\mathbf{X}$  qualquer de dimensões  $8 \times 8 \times 8 \times 8$ , primeiro ele deve ser vetorizado conforme mencionado anteriormente e em seguida é ordenado fazendo

$$\mathbf{X}_{\text{ord}} = (X_{I_1}, X_{I_2}, X_{I_3}, \dots, X_{I_{4096}}). \quad (6.14)$$

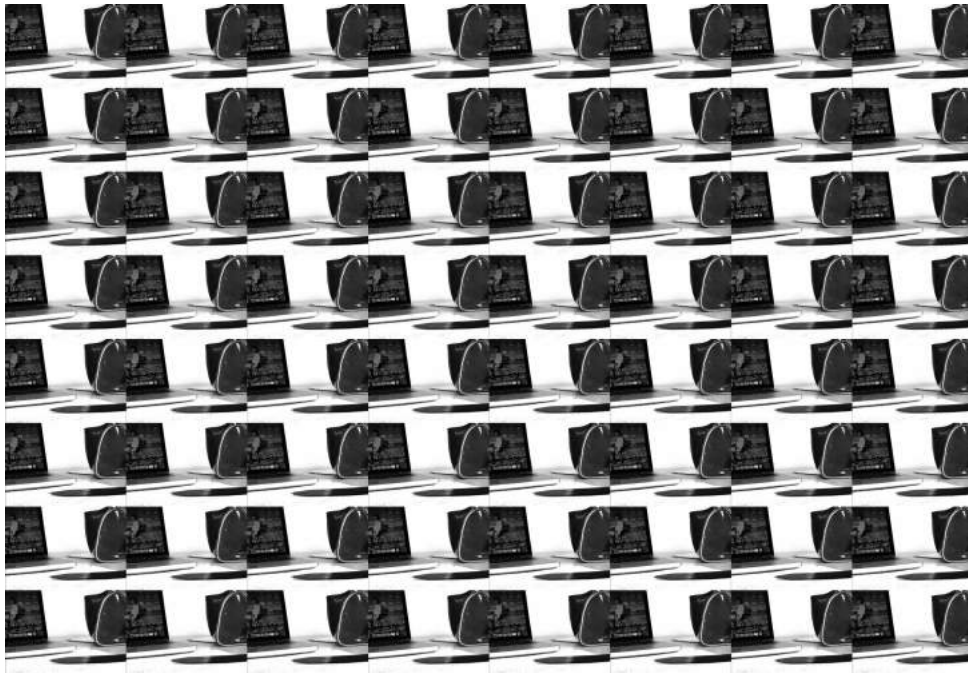
De agora em diante, neste trabalho, esta abordagem empírica de ordenação, utilizando os índices da ordem decrescente da energia média dos coeficientes no domínio da transformada, será referenciada como ordenação pelas médias.

Originalmente, as imagens de *light field* da base da EPFL possuem dimensões  $15 \times 15 \times 434 \times 625$ . Neste trabalho, foram utilizadas versões destas imagens com dimensões  $8 \times 8 \times 432 \times 624$  para que todas as dimensões fossem divisíveis por 8 e o uso de blocos  $8 \times 8 \times 8 \times 8$  fosse possível. Essa escolha foi feita pois o cálculo da DCT de sequências de tamanho  $2^n$  é mais eficiente em termos do número de operações realizadas, embora o uso de blocos com outras dimensões não seja um impeditivo. Nesta base existe um total de 118 imagens de *light field*, divididas em 10 categorias como construções (*buildings*), malhas (*grids*), luz (*light*), natureza (*nature*), entre outros. Conforme mencionado anteriormente, 88 dessas imagens foram utilizadas como imagens de “treino” para gerar a sequência de ordenação dos coeficientes no domínio da 4D-DCT; as 30 restantes foram utilizadas como imagens de “teste” para avaliação do trabalho. A escolha das imagens de teste seguiu dois critérios; o primeiro é garantir o máximo de imagens em cada uma das 10 categorias. O segundo critério é incluir as imagens que fazem parte do conjunto de teste do *JPEG Pleno Call for Proposals on Light Field Coding (ISO/IEC JTC 1/SC29/WG1N74014, 2017)*, uma vez que um dos objetivos deste trabalho é propor um método de marca d’água robusto à compressão no domínio da 4D-DCT. No Apêndice C são apresentadas na Tabela C.1 as 30 imagens de teste utilizadas bem como suas respectivas categorias.

Na Figura 33 é apresentada a imagem *Desktop*, do conjunto de imagens de “teste” e, na Figura 34 é apresentada a distribuição de energia dos coeficientes da 4D-DCT desta imagem. A estimativa de energia de cada coeficiente da 4D-DCT é dada pelo cálculo da variância entre todos os blocos 4-dimensionais de uma imagem de *light field* para cada posição de coeficiente (LAM; GOODMAN, 2000). Na Figura 35, a distribuição de energia dos coeficientes da 4D-DCT desta imagem é apresentada de forma sequencial sem ordenação<sup>2</sup> (Figura 35a) e utilizando a ordenação pelas médias (Figura 35b), descrita anteriormente. Note que a energia na Figura 35b se concentra no que seriam as “baixas frequências” mais do que na Figura 35a, que possui uma série de “picos” de energia em diversos pontos da sequência. Para referência, na Figura 35c a mesma sequência é apresentada ordenada por um algoritmo tradicional de ordenação, *quicksort*. Na Figura 36 é apresentada a energia acumulada percentual da sequência anterior, sem ordenação,

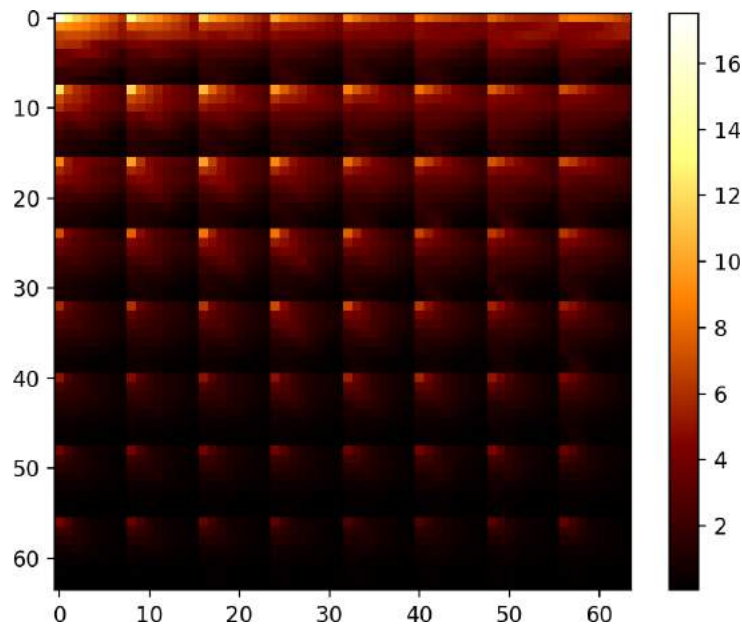
<sup>2</sup> Por **sem ordenação**, quer-se dizer que os coeficientes são ordenados segundo uma sequência lexicográfica das quatro coordenadas que os identificam.

Figura 33 – Imagem *Desktop* do conjunto de imagens de “teste”.



Fonte: O Autor (2020).

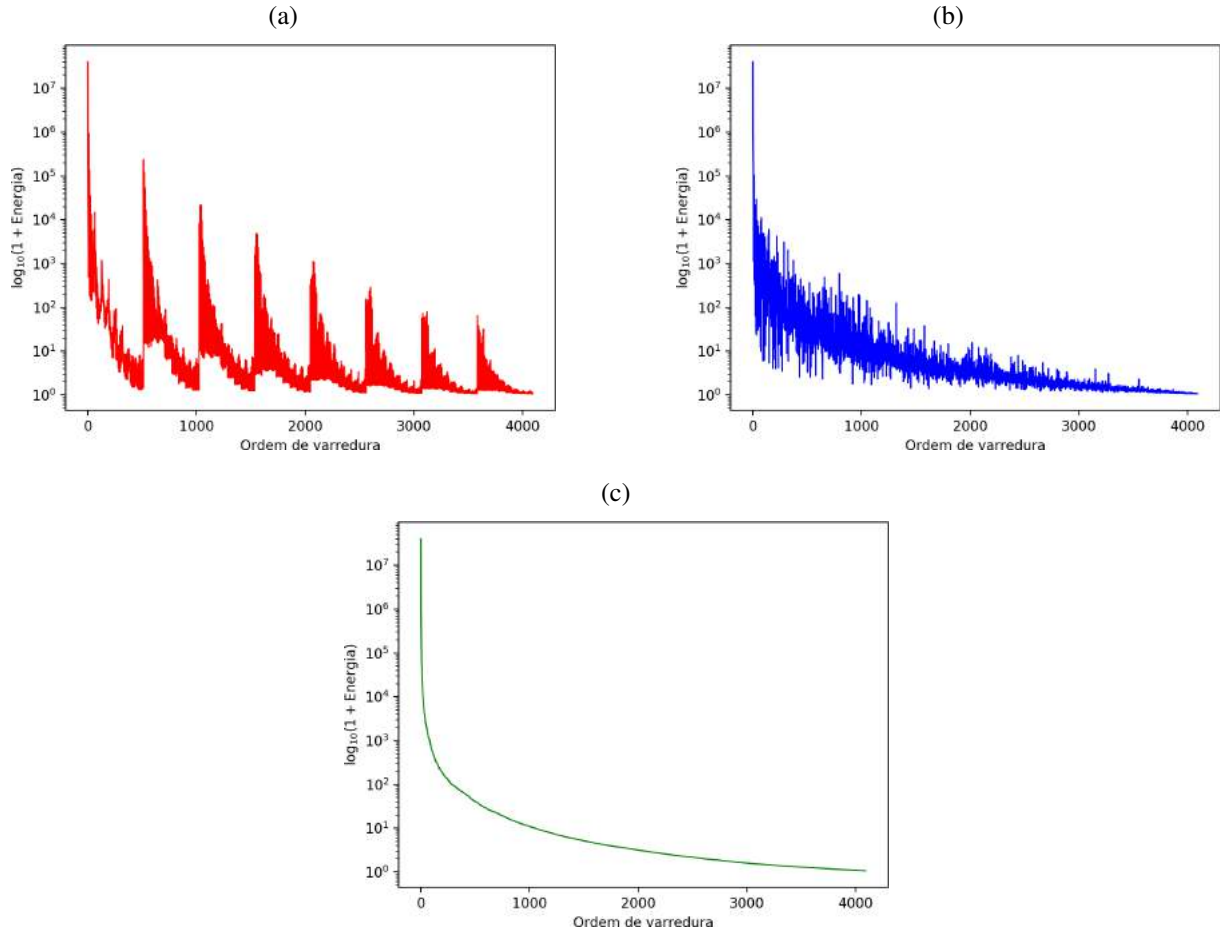
Figura 34 – Mapa de calor da distribuição de energia dos coeficientes da 4D-DCT da imagem *Desktop*.



Fonte: O Autor (2020).

ordenada pelas médias e ordenada pelo algoritmo *quicksort*, de acordo com a ordem de visitação dos coeficientes durante o algoritmo de varredura. Uma sequência com energia mais concentrada nas “baixas frequências” tende a apresentar uma maior inclinação da curva e consequentemente uma maior área sob a mesma. Note que esta característica ocorre na curva da sequência ordenada

Figura 35 – Sequência da distribuição de energia dos coeficientes da 4D-DCT da imagem de *light field Desktop* (a) sem ordenação, (b) ordenada pelas médias e (c) ordenada com o algoritmo *quicksort*. A sequência é apresentada em escala logarítmica para uma melhor visualização.



Fonte: O Autor (2020).

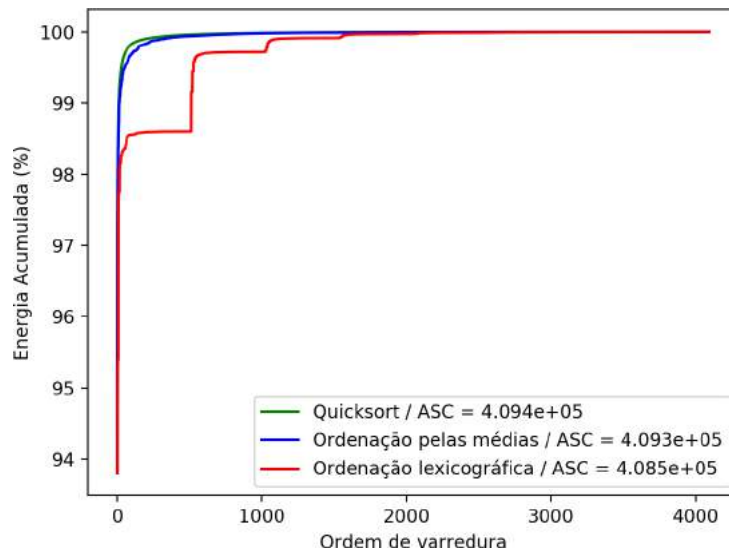
pelas médias em comparação à curva não ordenada. Comparando a sequência ordenada pelas médias e a sequência ordenada pelo algoritmo *quicksort* é possível notar que a ordenação pelas médias é relativamente próxima de uma ordenação “real”.

### 6.2.1 Estudo da Ordenação pelas Médias

Com o objetivo de entender com mais detalhes a ordem de varredura gerada pela ordenação pelas médias e traçar uma correlação entre esta ordenação e o decaimento da energia ao longo dos eixos  $(s, t, u, v)$  de uma imagem de *light field*, foi realizada uma série de experimentos, descritos a seguir nesta subseção. Um segundo objetivo desta análise foi derivar um “algoritmo de ordenação” através do método empírico de ordenação pelas médias. A ordenação pelas médias é entendida neste trabalho como um método subótimo<sup>3</sup> e é esperado que o novo algoritmo apresente uma “boa” aproximação deste método.

<sup>3</sup> Uma vez que o método ótimo seria utilizando um algoritmo de ordenação tradicional como o *quicksort*, por exemplo.

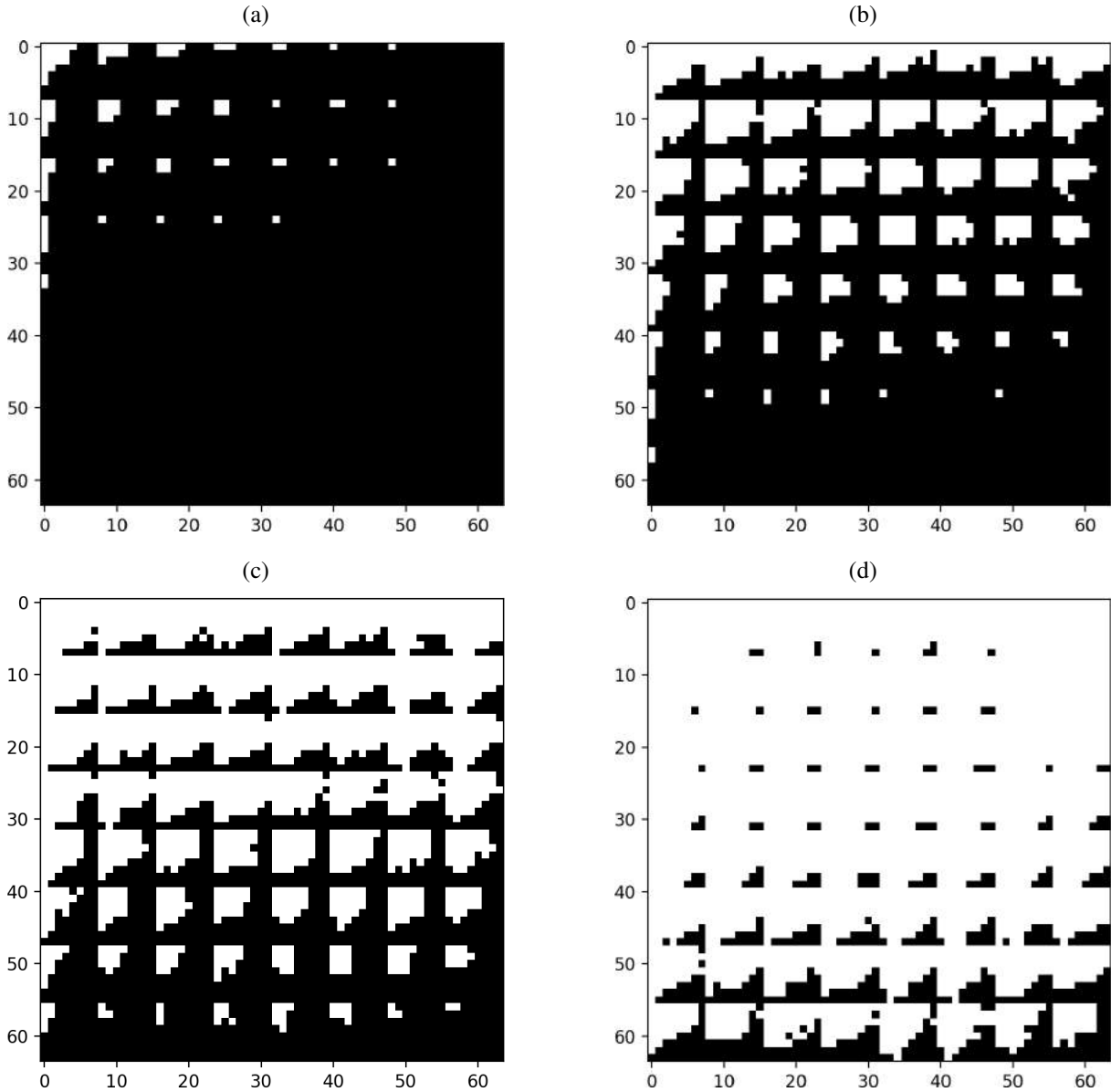
Figura 36 – Área sob a curva (ASC) e curva da energia acumulada percentual em função da ordem de varredura da energia ordenada dos coeficientes da 4D-DCT da imagem *Desktop*.



Fonte: O Autor (2020).

Para entender a forma de “passeio” entre os coeficientes durante a varredura, foi criado um vídeo contendo um bloco 4-dimensional de tamanho  $8 \times 8 \times 8 \times 8$ , apresentado como um bloco 2D de tamanho  $64 \times 64$ . Inicialmente este bloco é preenchido de preto (nível de cinza 0), e a cada “frame” do vídeo, a posição do coeficiente seguinte, segundo a ordenação pelas médias, é “pintado” de branco (nível de cinza 255, em uma escala de 0 a 255). Desta forma é possível visualizar o padrão que se forma à medida em que as posições são percorridas. A Figura 37 apresenta alguns “frames” deste vídeo. Note o padrão que vai se formando à medida em que mais coeficientes são “percorridos” na imagem. Considerando o bloco de tamanho  $(s, t, u, v) = (8, 8, 8, 8)$ , a ordenação pelas médias provoca o aparecimento de um padrão que se forma em colunas *interframe* para cada posição da coordenada  $s$  das imagens, de tamanho  $(8, 64)$ , que vão crescendo da esquerda para a direita e de cima para baixo, à medida em que mais posições são visitadas, até preencher completamente a imagem de branco. Note que o padrão que se forma é similar à distribuição de energia apresentada na Figura 34. Ao total têm-se 8 colunas na dimensão  $s$  de tamanho  $(8, 64)$ , isto é, considerando uma imagem 4-dimensional, fixamos a dimensão  $s$  e percorremos as demais. Podemos verificar como a energia decai entre uma coluna e a seguinte na Figura 38, em que é apresentada a energia total de cada uma. Além disso, a figura também apresenta a energia total das linhas de tamanho  $(64, 8)$ , fixando a dimensão  $t$  e percorrendo as demais. Note que, de fato, a energia decai da esquerda para direita e de cima para baixo. Além disso, a energia decai mais rapidamente entre as linhas e é mais concentrada nas colunas. Esse padrão é interessante e pode ser utilizado para propor um algoritmo ou uma estrutura fixa para realizar a ordenação de forma satisfatória dos coeficientes da 4D-DCT para uma vasta gama de imagens de *light field*, assim como é o processo de *zig-zag*

Figura 37 – Sequência de imagens de blocos de tamanho  $8 \times 8 \times 8 \times 8$  em que a posição dos  $n$  primeiros coeficientes (de acordo com a ordenação pelas médias) é destacada de branco. São apresentadas imagens com uma quantidade de (a) 100, (b) 1.024, (c) 2.048 e (d) 3.500 coeficientes destacados.



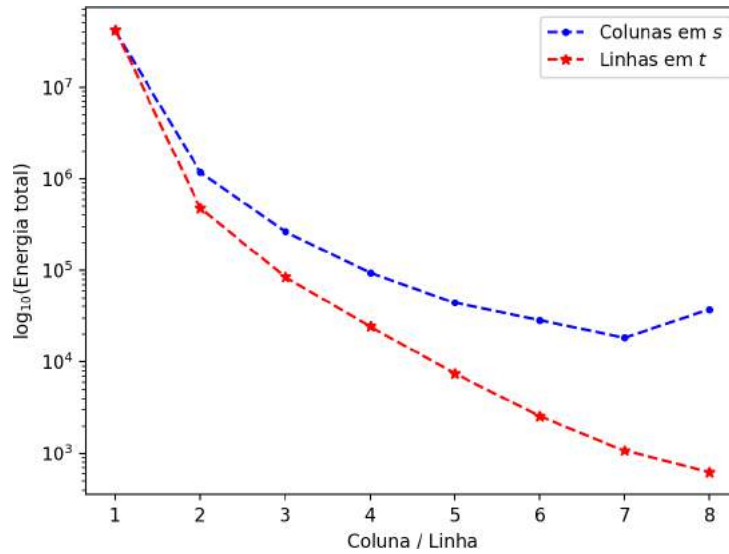
Fonte: O Autor (2020).

utilizado para ordenar os coeficientes da 2D-DCT de imagens bidimensionais. Destacamos que um comportamento similar também ocorre para as demais imagens de *light field* avaliadas.

### 6.2.2 Alternativas de Ordenação por Colunas em $s$

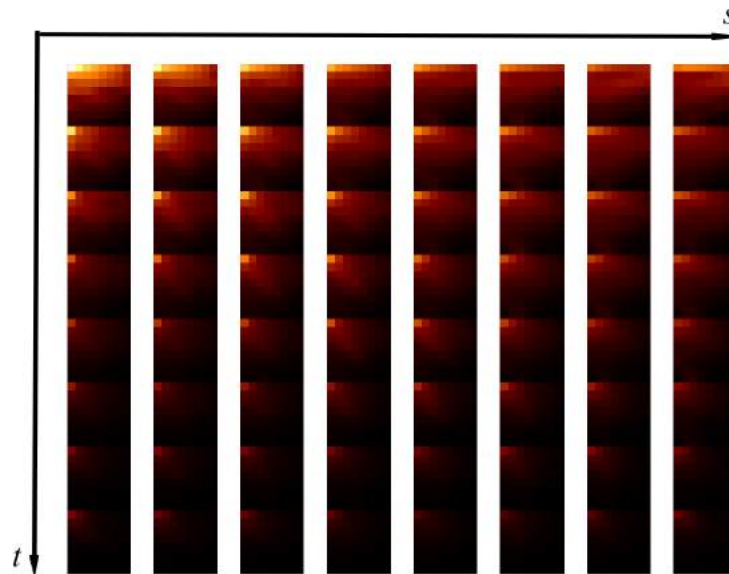
Tendo em vista a análise feita na subseção anterior, a abordagem proposta é explorar o padrão que se forma nas colunas da dimensão  $s$  dos coeficientes da 4D-DCT de uma imagem de *light field*, como pode ser visto na Figura 39. A proposta é percorrer cada coluna individualmente,

Figura 38 – Energia total de coluna na dimensão  $s$  e linha na dimensão  $t$ . As colunas estão numeradas de 1 a 8 da esquerda para a direita e as linhas de cima para baixo.



Fonte: O Autor (2020).

Figura 39 – Distribuição de energia dos coeficientes da 4D-DCT de cada coluna do eixo  $s$  do *light field Desktop*.



Fonte: O Autor (2020).

da esquerda para a direita.

A seguir são apresentadas algumas variações seguindo esta abordagem, considerando um bloco 4D de dimensões  $(s, t, u, v) = (S, T, U, V)$ . Todas as variações apresentadas possuem um padrão bem definido de como percorrer os coeficientes em uma coluna; o mesmo padrão é replicado para as demais colunas que são percorridas intercaladamente e de forma cíclica, da esquerda para a direita. No Algoritmo 1 é descrito este procedimento. Na linha 5, `VARREDURA()` é

um procedimento que recebe um bloco tridimensional e retorna seus elementos ordenados; este procedimento deve ser trocado pelo método de varredura escolhido.

---

**Algoritmo 1** Varredura dos elementos de um *array* 4D em função do padrão de colunas

---

```

1: procedure VARREDURA_COLUNAS(bloco,  $S, T, U, V$ )
2:    $ordem \leftarrow []$ 
3:    $ordem\_coluna \leftarrow [ , ]$ 
4:   for  $s$  in  $[1, S]$  do
5:      $ordem\_coluna[s] \leftarrow \text{VARREDURA}(\text{bloco}[:, s, :, :])$ 
6:      $indice\_coluna \leftarrow [ \overbrace{1, 1, 1, \dots, 1}^{S \text{ vezes}} ]$ 
7:      $s \leftarrow 1$ 
8:     for  $i$  in  $[1, S \times T \times U \times V]$  do
9:        $ordem[i] \leftarrow ordem\_coluna[s, indice\_coluna[s]]$ 
10:       $indice\_coluna[s] \leftarrow indice\_coluna[s] + 1$ 
11:       $s \leftarrow s + 1$ 
12:      if  $s > S$  then
13:         $s \leftarrow 1$ 
14:   return  $ordem$ 

```

---

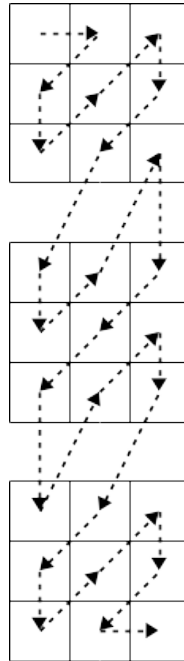
#### 6.2.2.1 Zig-Zag 2D

Nesta variação, cada coluna é considerada como um único bloco bidimensional de  $T \times V$  linhas e  $U$  colunas e tem seus coeficientes percorridos seguindo o zig-zag bidimensional padrão do formato JPEG. Na Figura 40 este modo de varredura é exemplificado em uma coluna  $9 \times 3$ , como parte de um bloco de tamanho  $(s, t, u, v) = (3, 3, 3, 3)$ .

#### 6.2.2.2 Zig-Zag 2D Expandido

Nesta variação, assim como na anterior, cada coluna é considerada como um bloco bidimensional de  $T \times V$  linhas e  $U$  colunas. Seus coeficientes são percorridos com uma versão expandida do zig-zag 2D convencional. Na varredura convencional, em um bloco de dimensão  $A \times B$ , em que  $A$  é o número de linhas e  $B$  é o número de colunas, quando o processo alcança um elemento  $(a, 0)$ , o elemento seguinte será  $(a + 1, 0)$ , que é o elemento imediatamente inferior, e em seguida o elemento  $(a, 1)$ , o que continua a varredura seguindo em uma “diagonal crescente”. Na variação expandida, ao alcançar um elemento  $(a, 0)$ , os elementos seguintes serão  $(a + 1, 0)$ ,  $(a + 2, 0)$ ,  $\dots$ ,  $(a + B, 0)$ . Em seguida, o próximo elemento percorrido é  $(a + B - 1, 1)$ , continuando a varredura em uma “diagonal crescente”. Esta modificação visa tornar as colunas mais “proeminentes”, de forma a simular o padrão que ocorre na Figura 37 e no mapa de calor da Figura 34.

Figura 40 – Zig-zag bidimensional do padrão JPEG aplicado em uma coluna de dimensão  $(t, u, v) = (3, 3, 3)$ .



Fonte: O Autor (2020).

#### 6.2.2.3 Varredura 3D

Nesta variação, cada coluna é considerada como um bloco tridimensional  $(t, u, v) = (T, U, V)$ . Seus coeficientes são percorridos de forma sequencial, de acordo com as três coordenadas que os identificam. Para isso, são utilizados três laços de repetição, o mais externo na dimensão  $t$ , o seguinte em  $v$  e o mais interno em  $u$ . Esta variação é descrita, para uma coluna, no Algoritmo 2.

---

#### Algoritmo 2 Varredura 3D

---

```

1: procedure VARREDURA_3D(bloco,  $T, U, V$ )
2:   ordem  $\leftarrow []$ 
3:    $i \leftarrow 1$ 
4:   for  $t$  in  $[1, T]$  do
5:     for  $v$  in  $[1, V]$  do
6:       for  $u$  in  $[1, U]$  do
7:          $ordem[i] \leftarrow bloco[t, v, u]$ 
8:          $i \leftarrow i + 1$ 
9:   return ordem

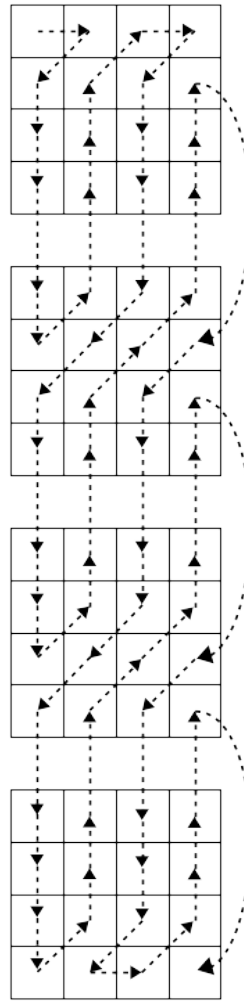
```

---

#### 6.2.2.4 Varredura 3D Diagonal

Nesta variação, cada coluna também é considerada como um bloco tridimensional  $(t, u, v) = (T, U, V)$ . Diferente da variação anterior, seus coeficientes são percorridos pelas

Figura 41 – Zig-zag bidimensional expandido em uma coluna de dimensão  $(t, u, v) = (4, 4, 4)$ .



Fonte: O Autor (2020).

diagonais, na ordem  $t, v, u$  das coordenadas. Esta variação é descrita, para uma coluna, no Algoritmo 3.

---

**Algoritmo 3** Varredura 3D Diagonal

---

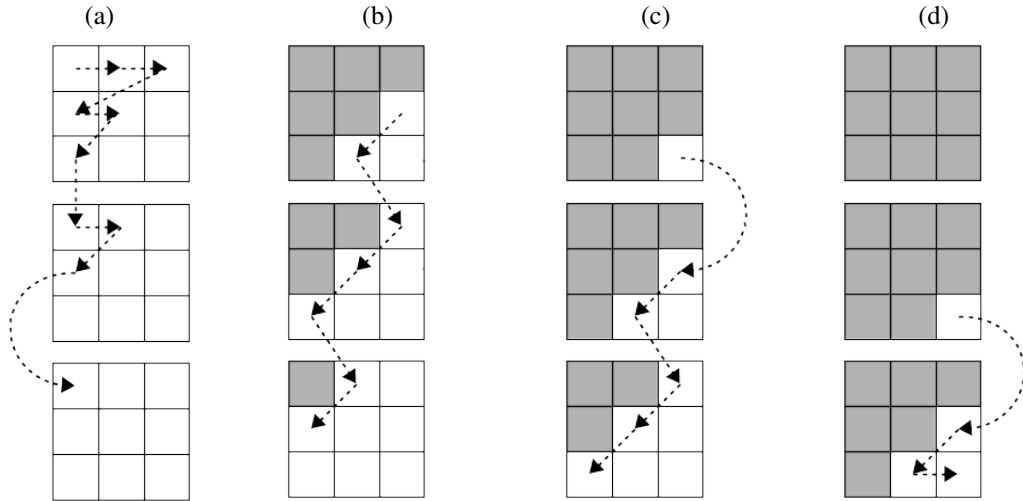
```

1: procedure VARREDURA_3D_DIAGONAL(bloco,  $T, U, V$ )
2:   ordem  $\leftarrow []$ 
3:   soma  $\leftarrow T + U + V$ 
4:    $i \leftarrow 1$ 
5:   for soma_atual in  $[1, soma]$  do
6:     for  $t$  in  $[1, T]$  do
7:       for  $v$  in  $[1, V]$  do
8:         for  $u$  in  $[1, U]$  do
9:           if  $t + v + u = soma\_atual$  then
10:            ordem $[i] \leftarrow bloco[t, v, u]$ 
11:             $i \leftarrow i + 1$ 
12:   return ordem

```

---

Figura 42 – Ilustrações da varredura 3D Diagonal Principal + Diagonais em um bloco  $(t, u, v) = (3, 3, 3)$ . Em (a) é ilustrada a primeira etapa e em (b), (c) e (d) são ilustrados passos da segunda etapa. As posições destacadas em cinza são referentes aos elementos já percorridos no passo anterior.



Fonte: O Autor (2020).

#### 6.2.2.5 Varredura 3D Diagonal Principal + Diagonais

De forma similar ao método anterior, esta alternativa também considera cada coluna como uma estrutura tridimensional. Este padrão de varredura ocorre em duas etapas. Na primeira etapa, os coeficientes posicionados na coordenada  $t = 1$  são percorridos sequencialmente até a linha da diagonal principal. Já os coeficientes posicionados na coordenada  $t = 2$  são percorridos até a linha anterior à diagonal principal, e assim sucessivamente até os coeficientes posicionados em  $t = T$ . Na segunda etapa, os elementos restantes são percorridos em diagonal de forma intercalada entre a coordenada  $t$ . Na Figura 42 este processo é apresentado visualmente; a Figura 42a compreende a primeira etapa, em que os coeficientes são percorridos limitados pela diagonal principal e as Figuras 42b, 42c e 42d compreendem a segunda etapa.

Este modo de varredura é descrito no Algoritmo 4; o primeiro conjunto de laços de repetição é referente à primeira etapa e o segundo é referente à segunda etapa.

#### 6.2.2.6 Varredura 3D Diagonal Principal + Horizontais

Também como uma estrutura 3D, esse modo de varredura percorre as colunas de forma similar ao método anterior. Na primeira etapa a mesma limitação pela diagonal principal se mantém. Na segunda, os elementos restantes são percorridos de forma sequencial de  $t = 1$  até  $t = T$ . Nas Figuras 43a e 43b são apresentadas as etapas 1 e 2, respectivamente. O procedimento também é descrito de forma mais detalhada no Algoritmo 5.

---

**Algoritmo 4** Varredura 3D Diagonal Principal + Diagonais
 

---

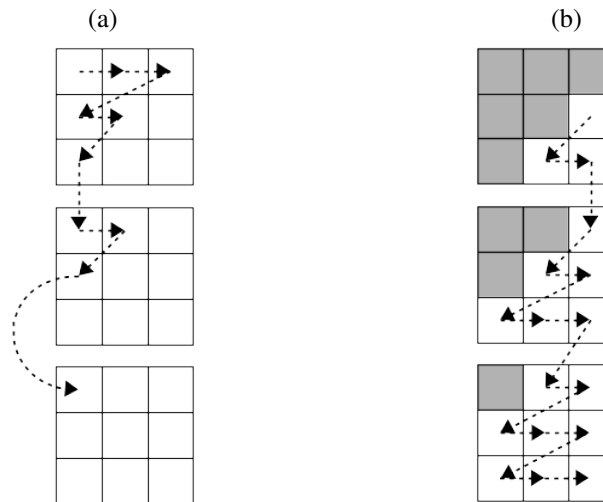
```

1: procedure VARREDURA_3D_DIAG_PRINCIPAL_DIAGONAIS(bloco, T, U, V)
2:   ordem  $\leftarrow$  []
3:   soma  $\leftarrow T + U + V$ 
4:   i  $\leftarrow 1$ 
5:   for t in [1, T] do
6:     for v in [1, V] do
7:       for u in [1, U] do
8:         if  $v + u < U - t$  then
9:           ordem[i]  $\leftarrow$  bloco[t, v, u]
10:          i  $\leftarrow i + 1$ 
11:   D  $\leftarrow U \times 2 - 1$ 
12:   for d in [1, D] do
13:     for t in [1, T] do
14:       for v in [1, V] do
15:         for u in [1, U] do
16:           if  $v + u = U - t + d$  then
17:             ordem[i]  $\leftarrow$  bloco[t, v, u]
18:             i  $\leftarrow i + 1$ 
19:   return ordem

```

---

Figura 43 – Ilustrações da varredura 3D Diagonal Principal + Horizontais em um bloco  $(t, u, v) = (3, 3, 3)$ . Em (a) é ilustrada a primeira etapa e em (b) é ilustrada a segunda etapa. As posições destacadas em cinza são referentes aos elementos já percorridos na etapa anterior.



Fonte: O Autor (2020).

### 6.2.3 Comparação entre as Alternativas de Ordenação

Nesta subseção é feita uma comparação entre os métodos de ordenação apresentados, que exploram o padrão que ocorre nas colunas discutido anteriormente. Em (ALVES et al., 2020) também são apresentados métodos de varredura para blocos 4-dimensionais provenientes de

---

**Algoritmo 5** Varredura 3D Diagonal Principal + Horizontais
 

---

```

1: procedure VARREDURA_3D_DIAG_PRINCIPAL_HORIZONTAIS(bloco, T, U, V)
2:   ordem  $\leftarrow$  []
3:   soma  $\leftarrow T + U + V$ 
4:   i  $\leftarrow$  1
5:   for t in [1, T] do
6:     for v in [1, V] do
7:       for u in [1, U] do
8:         if  $v + u < U - t$  then
9:           ordem[i]  $\leftarrow$  bloco[t, v, u]
10:          i  $\leftarrow$  i + 1
11:   D  $\leftarrow U \times 2 - 1$ 
12:   for d in [1, D] do
13:     for t in [1, T] do
14:       for v in [1, V] do
15:         for u in [1, U] do
16:           if  $v + u \geq U - t + d$  then
17:             ordem[i]  $\leftarrow$  bloco[t, v, u]
18:             i  $\leftarrow$  i + 1
19:   return ordem

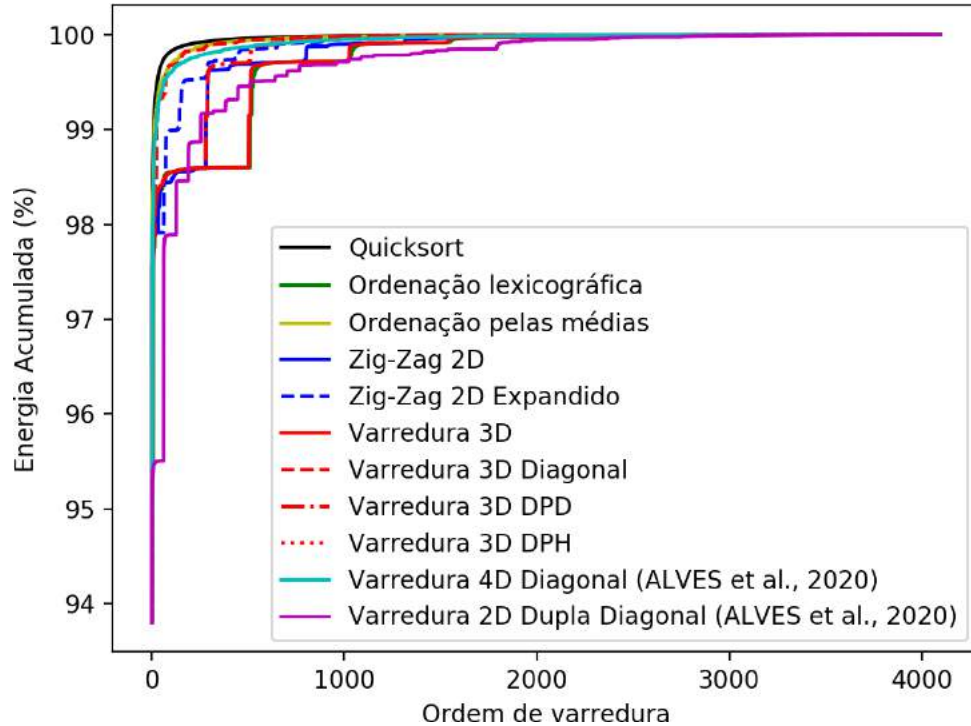
```

---

imagens de “*light field*”, dentre as quais duas delas tiveram melhor desempenho. Então, além das alternativas propostas no presente trabalho também são comparados os dois métodos de ordenação de maior destaque no trabalho de Alves, *et al.* Uma das alternativas é um padrão de varredura 4-dimensional em diagonal, referenciado neste trabalho por Varredura 4D Diagonal, e a outra alternativa trata-se de um padrão de varredura bidimensional com dupla diagonal, uma interna nas coordenadas *vu* e uma externa nas coordenadas *ts*. No presente trabalho, a segunda alternativa é referenciada por Varredura 2D Dupla Diagonal. Os algoritmos da primeira e segunda alternativa de ordenação do trabalho citado são apresentados no Apêndice B em Algoritmo 7 e Algoritmo 8, respectivamente.

Para a comparação dos métodos de varredura é apresentada a curva de energia acumulada percentual (EAP) na Figura 44, com todos os padrões de varredura avaliados. Na curva também é apresentada a EAP considerando uma real ordenação utilizando o método *quicksort* e a ordenação pelas médias para referência. Dentre os métodos avaliados, os que obtiveram curvas com maior inclinação foram o Zig-Zag 2D Expandido, a Varredura 3D Diagonal, a Varredura 3D Diagonal Principal + Diagonais e a Varredura 4D Diagonal. Na Figura 45 é apresentado um *zoom* da curva com estes 4 métodos. Note que as curvas da Varredura 3D Diagonal e da Varredura 4D Diagonal ficam relativamente próximas à curva da Ordenação pelas Médias. Na Figura 46 são apresentados os valores das áreas sob as curvas para todas as 30 imagens de “teste” utilizadas neste trabalho. Conforme esperado, os métodos de Varredura 3D Diagonal e o Varredura 4D Diagonal obtiveram, em média, valores mais elevados, com destaque para o primeiro. No Apêndice C, na Figura C.1, são apresentadas imagens para cada método de varredura com os primeiros 2.048 coeficientes

Figura 44 – Energia acumulada percentual considerando a energia dos coeficientes da 4D-DCT da imagem de *light field Desktop* após varredura de seus elementos. DPD é referente a Diagonal Principal + Diagonais e DPH é referente a Diagonal Principal + Horizontais.



Fonte: O Autor (2020).

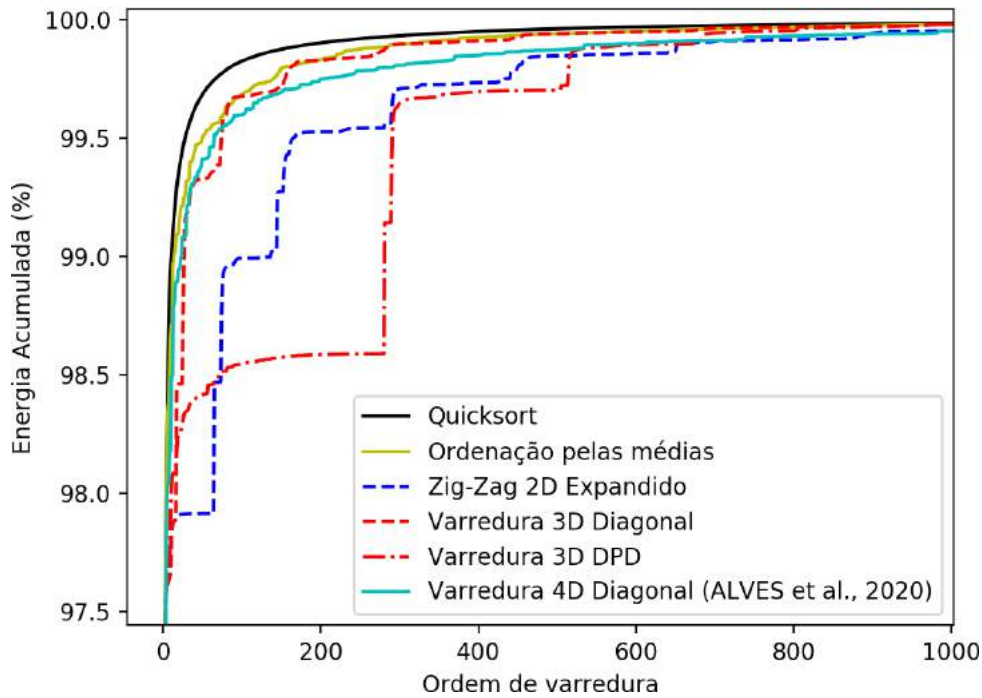
preenchidos. É possível notar o padrão que vai se formando à medida que os coeficientes são “visitados” para cada um dos métodos.

Na curva de energia acumulada percentual da Varredura 3D Diagonal, na Figura 45, apesar deste ser o método que possui maior área sob a curva, também é possível notar que nos primeiros coeficientes, a curva do método de Varredura 4D Diagonal possui uma maior concentração de energia. De fato, o método de Varredura 3D Diagonal passa a ter uma maior concentração de energia a partir do coeficiente de número 75, que segue superior até o coeficiente de número 4.096. Desta forma, para fins de compressão, por exemplo, pode-se utilizar a Varredura 3D Diagonal, suprimindo-se a partir do septuagésimo quinto coeficiente para uma maior preservação da qualidade da imagem, em comparação com a Varredura 4D Diagonal. Caso se deseje um maior grau de compressão, em detrimento da qualidade da imagem, pode-se avaliar o uso da Varredura 4D Diagonal e suprimir mais coeficientes, isto é, zerando a partir de algum coeficiente anterior ao de número 75. Na Figura 47 é apresentado um *zoom* da região em que ocorre o ponto de cruzamento entre as duas curvas.

Também é possível avaliar o grau de ordenação<sup>4</sup> de uma permutação ou sequência numé-

<sup>4</sup> Também conhecido como *sortedness* ou *measure of disorder* (MANNILA, 1985; ESTIVILL-CASTRO; WOOD, 1992).

Figura 45 – Zoom da curva de energia acumulada percentual após varredura dos 1000 primeiros elementos da energia dos coeficientes da 4D-DCT da imagem *Desktop*. DPD é referente a Diagonal Principal + Diagonais.



Fonte: O Autor (2020).

rica. Uma métrica importante que pode ser utilizada é o número de inversões (NI) (ESTIVILL-CASTRO; WOOD, 1992). Para uma ordenação decrescente, uma inversão pode ser definida da seguinte maneira: seja  $S$  uma sequência numérica, se  $i < j$  e  $S_i < S_j$ , então o par de elementos  $(S_i, S_j)$  é uma inversão de  $S$ . Neste trabalho foi calculado o número de inversões por combinação (NIC) considerando todas as possíveis combinações com  $i < j$ ; esta métrica é descrita no Algoritmo 6.

---

**Algoritmo 6** Número de Inversões por Combinação

---

```

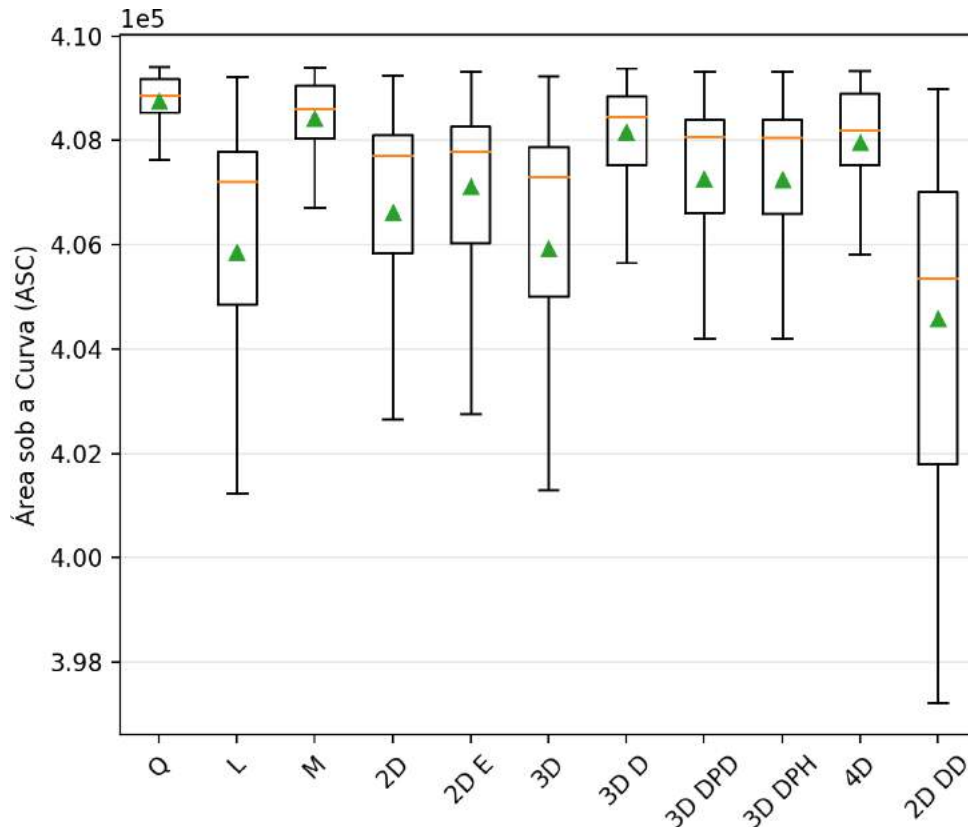
1: procedure NIC( $S, n$ )                                 $\triangleright S \rightarrow$  sequência numérica;
                                                          $n \rightarrow$  comprimento da sequência.
2:    $qtd\_comb \leftarrow 0$ 
3:    $qtd\_inv \leftarrow 0$ 
4:   for  $i$  in  $[1, n - 1]$  do
5:     for  $j$  in  $[i + 1, n]$  do
6:       if  $|S[i]| < |S[j]|$  then
7:          $qtd\_inv \leftarrow qtd\_inv + 1$ 
8:        $qtd\_comb \leftarrow qtd\_comb + 1$ 
9:   return  $qtd\_inv \div qtd\_comb$ 

```

---

A vantagem da utilização desta métrica é a possibilidade de comparar o grau de ordenação obtido pelos métodos propostos com o grau de ordenação obtido pela já bem estabelecida varredura para imagens bidimensionais, o zig-zag utilizado no padrão JPEG. Com este objetivo,

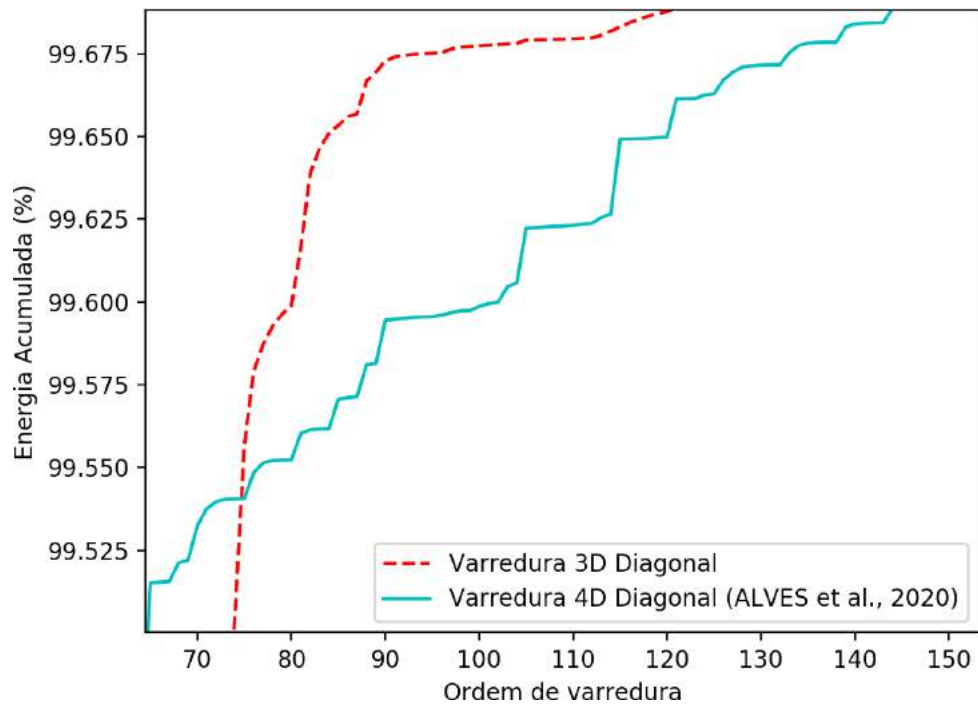
Figura 46 – *Boxplot* da área sob a curva da energia acumulada percentual para as 30 imagens de “teste”. O traço laranja indica a mediana e o triângulo verde indica a média da área sob a curva para cada método de varredura. Os métodos de varredura são abreviados como Q (*Quicksort*), L (Ordenação Lexicográfica), M (Ordenação pelas Médias), 2D (Zig-Zag 2D), 2D E (Zig-Zag 2D Expandido), 3D (Varredura 3D), 3D D (Varredura 3D Diagonal), 3D DPD (Varredura 3D Diagonal Principal + Diagonais), 3D DPH (Varredura 3D Diagonal Principal + Horizontais), 4D (Varredura 4D Diagonal), 2D DD (Varredura 2D Dupla Diagonal).



Fonte: O Autor (2020).

neste trabalho foi calculado o NIC médio entre todos os blocos  $8 \times 8$ , no domínio da 2D-DCT, para 210 imagens do banco de imagens do Instituto de Processamento de Sinais e Imagens da Universidade da Califórnia do Sul (THE..., 2019b) para comparar com o NIC médio calculado entre todos os blocos  $8 \times 8 \times 8 \times 8$ , no domínio da 4D-DCT, para as 30 imagens de “teste” obtidas do banco de imagens de *light field* da EPFL (RERABEK; EBRAHIMI, 2016), considerando os 7 métodos de varredura propostos no presente trabalho e os 2 apresentados em (ALVES et al., 2020). Na Tabela 11 são apresentados os resultados do NIC médio e desvio padrão para as 30 imagens avaliadas. O primeiro método de ordenação trata-se do *zig-zag* convencional utilizado no padrão JPEG; note que todos os métodos propostos neste trabalho obtêm um NIC médio inferior ou próximo do padrão utilizado no JPEG, o que pode indicar que a ordenação realizada por estes métodos é satisfatória em termos de concentrar a energia nas “baixas frequências”. Os modos de varredura de maior destaque foram a Ordenação pelas Médias e a Varredura 3D

Figura 47 – Zoom do cruzamento entre as curvas de energia acumulada percentual dos métodos de Varredura 3D Diagonal e Varredura 4D Diagonal.



Diagonal.

Tabela 11 – Número de Inversões por Combinação (NIC) para 30 imagens de *light field*.

| Método                      | NIC    |               |
|-----------------------------|--------|---------------|
|                             | Média  | Desvio Padrão |
| <i>Zig-Zag</i> JPEG         | 0,3331 | 0,0470        |
| Ordenação pelas Médias      | 0,2877 | 0,0344        |
| <i>Zig-Zag</i> 2D           | 0,3388 | 0,0283        |
| <i>Zig-Zag</i> 2D Expandido | 0,3311 | 0,0251        |
| Varredura 3D                | 0,3443 | 0,0295        |
| Varredura 3D Diagonal       | 0,2951 | 0,0312        |
| Varredura 3D DPD            | 0,2975 | 0,0311        |
| Varredura 3D DPH            | 0,3211 | 0,0295        |
| Varredura 4D Diagonal       | 0,3235 | 0,0259        |
| Varredura 2D Dupla Diagonal | 0,3912 | 0,0198        |

Fonte: O Autor (2020).

## 7 RESULTADOS

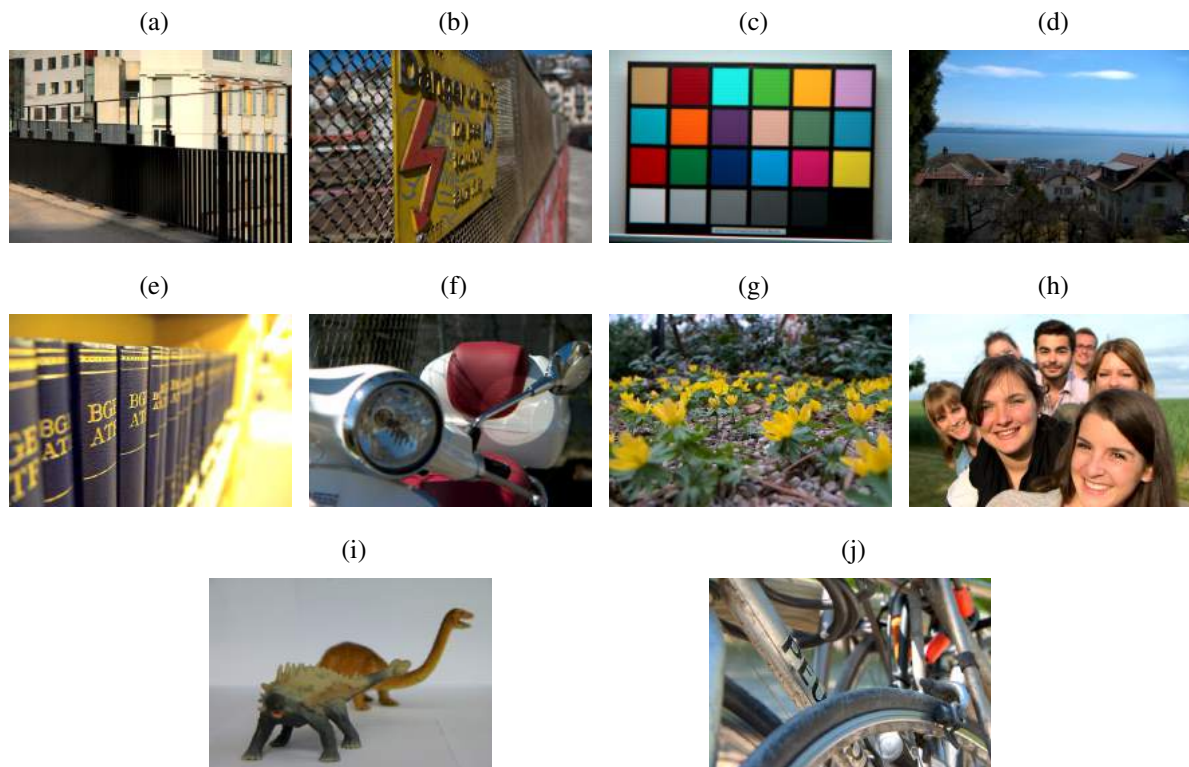
Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos quanto à imperceptibilidade e robustez da técnica de marca d'água proposta para imagens de *light field*. Também são apresentados os materiais e métodos utilizados para realização das simulações da técnica de marca d'água proposta e o arranjo experimental realizado nas simulações.

### 7.1 MATERIAIS E MÉTODOS

Na Figura 48 é apresentada a vista central de 10 das 30 imagens de teste utilizadas neste trabalho, uma para cada categoria, todas adquiridas no banco de imagens *lenslet* do *Multimedia Signal Processing Group* (<http://mmspg.epfl.ch/EPFL-light-field-image-dataset> (RERABEK; EBRAHIMI, 2016)).

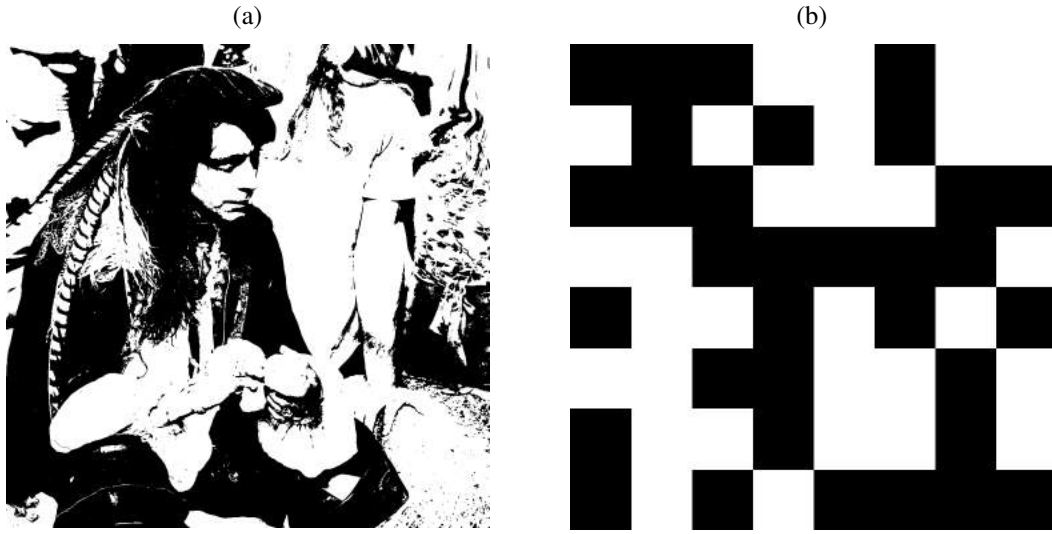
As marcas d'água utilizadas nos testes são apresentadas na Figura 49. A Figura 49a foi obtida do banco de imagens do *Signal and Image Processing Institute* da *University of Southern California* (THE..., 2019b). Foi selecionada a imagem *Male*, em escala de cinza e com tamanho

Figura 48 – Vista central de imagens de *light fields* utilizados como teste neste trabalho: (a) *Black Fence (buildings)*, (b) *Danger de Mort (grids)*, (c) *Color Chart 1 (ISO and color charts)*, (d) *Houses and Lake (landscapes)*, (e) *Books (light)*, (f) *Vespa (mirrors and transparency)*, (g) *Flowers (nature)*, (h) *Friends 1 (people)*, (i) *Ankylosaurus and Diplodocus 1 (studio)* e (j) *Bikes (urban)*.



Fonte: (JPEG..., 2017).

Figura 49 – Imagens utilizadas como marca d’água nos testes: (a) *Male* binarizada e (b) bloco binário  $8 \times 8$  pseudo-aleatório.



Fonte: O Autor (2020).

$1024 \times 1024$  pixels, a qual foi também redimensionada para  $512 \times 512$  e  $2048 \times 2048$  pixels. Em seguida, essas imagens foram binarizadas utilizando como limiar o valor médio de nível de cinza presente na imagem. A Figura 49b é um bloco binário de tamanho  $8 \times 8$  pixels gerado de forma pseudo-aleatória.

Durante o processo de inserção e extração, a marca d’água é inserida após conversão do esquema de cores do *light field* de RGB para YCbCr. Todos os testes foram realizados utilizando apenas o canal Y para simplificar o processo. Para avaliação de imperceptibilidade da marca d’água, foi utilizada a média da similaridade estrutural (SSIM, do inglês *structural similarity*) de cada uma das vistas individuais, ou seja

$$\text{SSIM}_{\text{médio}} = \frac{1}{ST} \sum_{i=1}^S \sum_{j=1}^T \text{SSIM}(i, j), \quad (7.1)$$

em que

$$\text{SSIM}(i, j) = \frac{(2\mu_I\mu_R + Z_1)(2\sigma_{IR} + Z_2)}{(\mu_I^2 + \mu_R^2 + Z_1)(\sigma_I^2 + \sigma_R^2 + Z_2)} \quad (7.2)$$

corresponde ao SSIM da  $i$ -ésima e  $t$ -ésima vista,  $I$  e  $R$  correspondem, respectivamente, às imagens em avaliação e de referência da vista em questão, e  $Z_1$  e  $Z_2$  são definidos por  $(0,01 \times F)^2$  e  $(0,03 \times F)^2$  (WANG et al., 2004), respectivamente, com  $F$  sendo a faixa dinâmica dos valores dos *pixels* (255 para 8 bpp). Além do  $\text{SSIM}_{\text{médio}}$  também foi calculada a média do PSNR de cada uma das vistas individuais para avaliação de imperceptibilidade, isto é

$$\text{PSNR}_{\text{médio}} = \frac{1}{ST} \sum_{i=1}^S \sum_{j=1}^T \text{PSNR}(i, j), \quad (7.3)$$

em que

$$\text{PSNR}(i, j) = 10 \log_{10} \frac{255^2}{\text{MSE}(i, j)}, \quad (7.4)$$

$$\text{MSE}(i, j) = \frac{1}{NM} \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^M (I(k, l) - R(k, l))^2 \quad (7.5)$$

e  $I(k, l)$  e  $R(k, l)$  é o  $k$ -ésimo *pixel* da  $l$ -ésima linha da vista  $(i, j)$  original e marcada, respectivamente.

Para análise de robustez da marca d'água extraída além do SSIM e PSNR, foi utilizada a correlação normalizada (NC, do inglês *normalized correlation*) e a taxa de erro de *bit* (BER, do inglês *bit error rate*). A NC é definida por

$$\text{NC} = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M I(i, j) R(i, j)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M I(i, j)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M R(i, j)^2}}, \quad (7.6)$$

em que  $N$  e  $M$  são, respectivamente, o número de linhas e o de colunas da marca d'água, e  $I(i, j)$  e  $R(i, j)$  é o  $j$ -ésimo *pixel* da  $i$ -ésima linha da marca d'água em avaliação e da marca d'água de referência, respectivamente. Já a BER pode ser definida por

$$\text{BER} = \frac{\text{quantidade de erros}}{\text{total}}. \quad (7.7)$$

## 7.2 AVALIAÇÃO DE IMPERCEPTIBILIDADE VERSUS ROBUSTEZ

Nesta seção, são apresentados resultados de testes de imperceptibilidade da marca e de sua robustez à compressão no domínio da 4D-DCT, após o método descrito na Seção 6.1 ter sido aplicado empregando a estratégia de ordenação pelas médias e a varredura 3D diagonal. O parâmetro de força utilizado nas simulações de imperceptibilidade e robustez foi 40. Também foi realizada uma análise do impacto na imperceptibilidade e robustez com vários outros valores de força da marca d'água; esses resultados são apresentados na Subseção 7.2.3.

### 7.2.1 Imperceptibilidade

Na Figura 50 são apresentados os resultados de  $\text{SSIM}_{\text{médio}}$  de acordo com a “faixa de frequência” utilizada para inserção da marca d'água sem a replicação de *bits*. Para cada tamanho de marca d'água foi utilizado um intervalo diferente do espectro de frequências de acordo com a quantidade de coeficientes necessários para inserção. Para a marca de  $2048 \times 2048$  foram inseridos 995 *bits* por bloco, enquanto, para a marca de  $1024 \times 1024$  foi necessário alterar 248 coeficientes por bloco, para a marca de tamanho  $512 \times 512$  foi necessário inserir 62 *bits* por bloco e, para a marca de tamanho  $8 \times 8$ , foi alterado 1 coeficiente de 64 blocos diferentes<sup>1</sup>. Um

<sup>1</sup> Considerando uma imagem de *light field* de dimensões  $8 \times 8 \times 432 \times 624$  temos 4212 blocos de dimensão  $8 \times 8 \times 8 \times 8$ .

ponto importante é que, em todos os testes, a componente DC não foi utilizada para inserção da marca. Por exemplo, para a marca de tamanho  $2048 \times 2048$ , a primeira faixa de coeficientes utilizada foi de 2 até 995 (ao longo da versão vetorizada do bloco com dimensões  $8 \times 8 \times 8 \times 8$  no domínio da 4D-DCT, obtida após aplicação da estratégia de ordenação proposta).

Conforme esperado, note que, à medida que são utilizadas frequências mais altas, maiores são os resultados de  $SSIM_{\text{médio}}$ , uma vez que estas regiões possuem uma menor concentração de energia e modificá-las degrada o *light field* com menor intensidade. Os menores valores são obtidos quando a faixa de coeficientes utilizada para inserção da marca está em regiões de baixa frequência. Esse comportamento é mais evidente para os casos em que são inseridos mais *bits* por bloco, como para as marcas de tamanho  $2048 \times 2048$ ,  $1024 \times 1024$  e  $512 \times 512$  pixels. Para marca de tamanho  $8 \times 8$  pixels, em que é inserido apenas 1 *bit* em alguns blocos, o comportamento não é tão claro; neste caso a variação dos resultados de  $SSIM_{\text{médio}}$  é baixa, tendo por exemplo, 0,998532 como máximo e 0,998510 como mínimo ao utilizar a Varredura 3D Diagonal como método de ordenação. Os valores de máximo, mínimo e médio são apresentados na Tabela 12. A sigla OPM é referente ao método de marca d'água proposto utilizando a Ordenação pelas Médias e V3DD utilizando a Varredura 3D Diagonal. Apesar dos resultados obtidos ao ordenar os coeficientes com o método da Ordenação pelas Médias e com a Varredura 3D Diagonal serem próximos, é notável que a curva apresenta menos oscilações (ou de menor amplitude) ao utilizar o método de Ordenação pelas Médias. Os resultados apresentados são para a imagem *Bikes*, porém o mesmo comportamento é encontrado nos demais *light fields*.

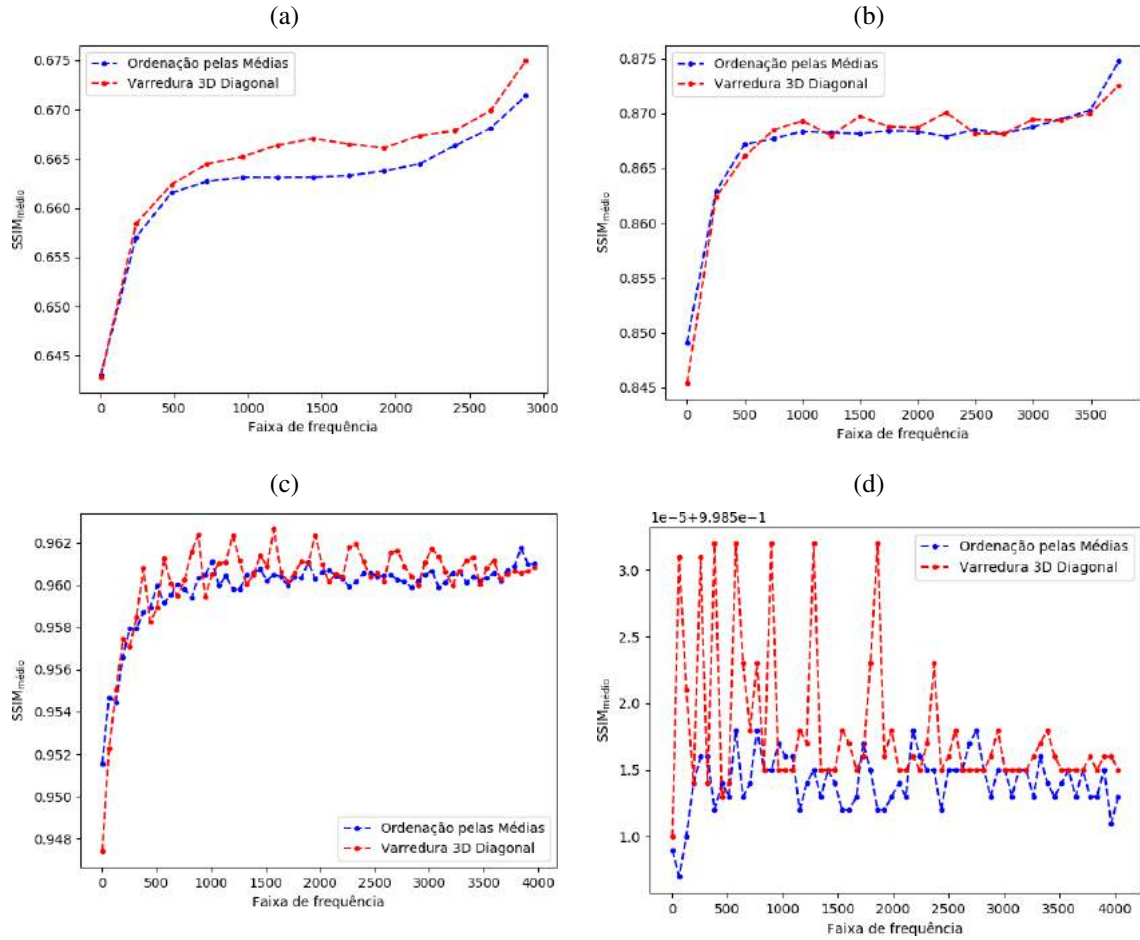
Tabela 12 – Valores máximo, mínimo e médio de  $SSIM_{\text{médio}}$  obtidos ao ordenar os coeficientes com o método da Ordenação pelas Médias (OPM) e com a Varredura 3D Diagonal (V3DD).

|               | 2048 × 2048 |       | 1024 × 1024 |       | 512 × 512 |       | 8 × 8       |             |
|---------------|-------------|-------|-------------|-------|-----------|-------|-------------|-------------|
|               | OPM         | V3DD  | OPM         | V3DD  | OPM       | V3DD  | OPM         | V3DD        |
| <b>Máximo</b> | 0,671       | 0,675 | 0,875       | 0,873 | 0,962     | 0,963 | 9,98518e-01 | 9,98532e-01 |
| <b>Mínimo</b> | 0,643       | 0,643 | 0,849       | 0,845 | 0,952     | 0,947 | 9,98507e-01 | 9,98510e-01 |
| <b>Média</b>  | 0,662       | 0,665 | 0,867       | 0,867 | 0,960     | 0,960 | 9,98514e-01 | 9,98518e-01 |

Na Figura 51 são apresentados os resultados de  $PSNR_{\text{médio}}$ , para a imagem de *light field Bikes*, de acordo com a faixa de frequência utilizada na inserção da marca d'água. Os resultados foram obtidos utilizando a mesma configuração de simulação para obtenção dos resultados de  $SSIM_{\text{médio}}$ , utilizando os mesmos tamanhos de marca d'água, mesma quantidade de *bits* inseridos por bloco e também sem alterar a componente DC. Conforme esperado, note que os resultados de  $PSNR_{\text{médio}}$  possuem um comportamento similar aos resultados de  $SSIM_{\text{médio}}$ . À medida que utilizamos faixas de frequências mais altas obtemos valores de  $PSNR_{\text{médio}}$  mais elevados, destacando uma maior estabilidade<sup>2</sup> dos resultados ao utilizar a Ordenação pelas Médias. Os valores de máximo, mínimo e médio são apresentados na Tabela 12. Resultados similares são obtidos para as demais imagens de *light field*.

<sup>2</sup> Estabilidade no sentido de uma curva que apresenta menos oscilações ou oscilações com menor amplitude.

Figura 50 – Ilustração de curva com os valores de  $SSIM_{\text{médio}}$  para o *light field Bikes* com diferentes tamanhos de marca d'água – (a)  $2048 \times 2048$ , (b)  $1024 \times 1024$ , (c)  $512 \times 512$  e (d)  $8 \times 8$  – e diferentes faixas de frequência usadas para inserção da marca.



Fonte: O Autor (2020).

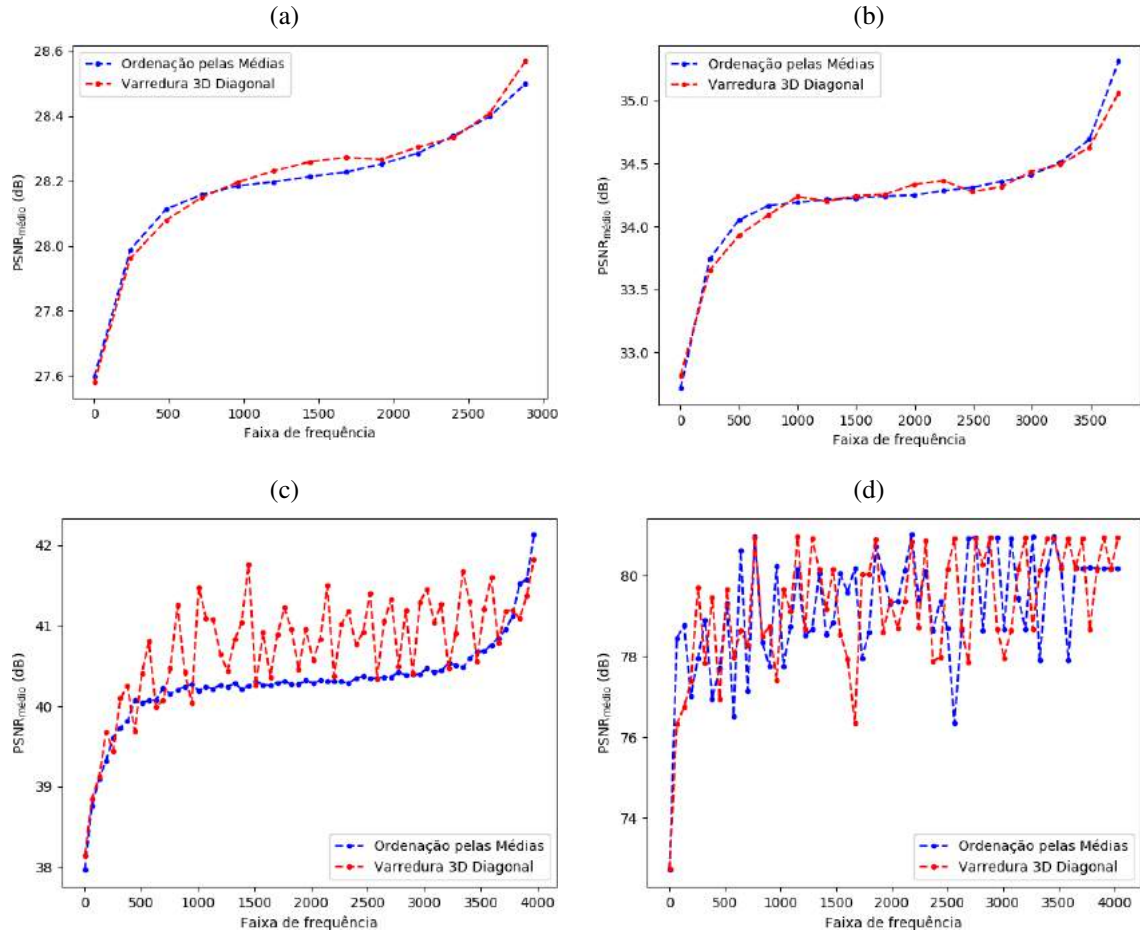
Tabela 13 – Valores máximo, mínimo e médio de  $PSNR_{\text{médio}}$  obtidos ao ordenar os coeficientes com o método da Ordenação pelas Médias (OPM) e com a Varredura 3D Diagonal (V3DD).

|               | $2048 \times 2048$ |        | $1024 \times 1024$ |        | $512 \times 512$ |        | $8 \times 8$ |        |
|---------------|--------------------|--------|--------------------|--------|------------------|--------|--------------|--------|
|               | OPM                | V3DD   | OPM                | V3DD   | OPM              | V3DD   | OPM          | V3DD   |
| <b>Máximo</b> | 28,500             | 28,569 | 35,311             | 35,062 | 42,131           | 41,828 | 81,011       | 80,959 |
| <b>Mínimo</b> | 27,596             | 27,579 | 32,715             | 32,815 | 37,959           | 38,139 | 72,706       | 72,733 |
| <b>Média</b>  | 28,189             | 28,201 | 34,230             | 34,209 | 40,298           | 40,730 | 79,195       | 79,252 |

## 7.2.2 Robustez à Compressão

O processo de compressão utilizado consiste em calcular a 4D-DCT bloco a bloco do *light field* marcado e, para cada bloco, os  $P\%$  coeficientes de maior valor absoluto são retidos, ao passo em que os demais  $(100 - P)\%$  são zerados. Na Figura 52, são apresentados os resultados de NC da marca d'água original com relação às marcas extraídas após o *light field Black Fence*

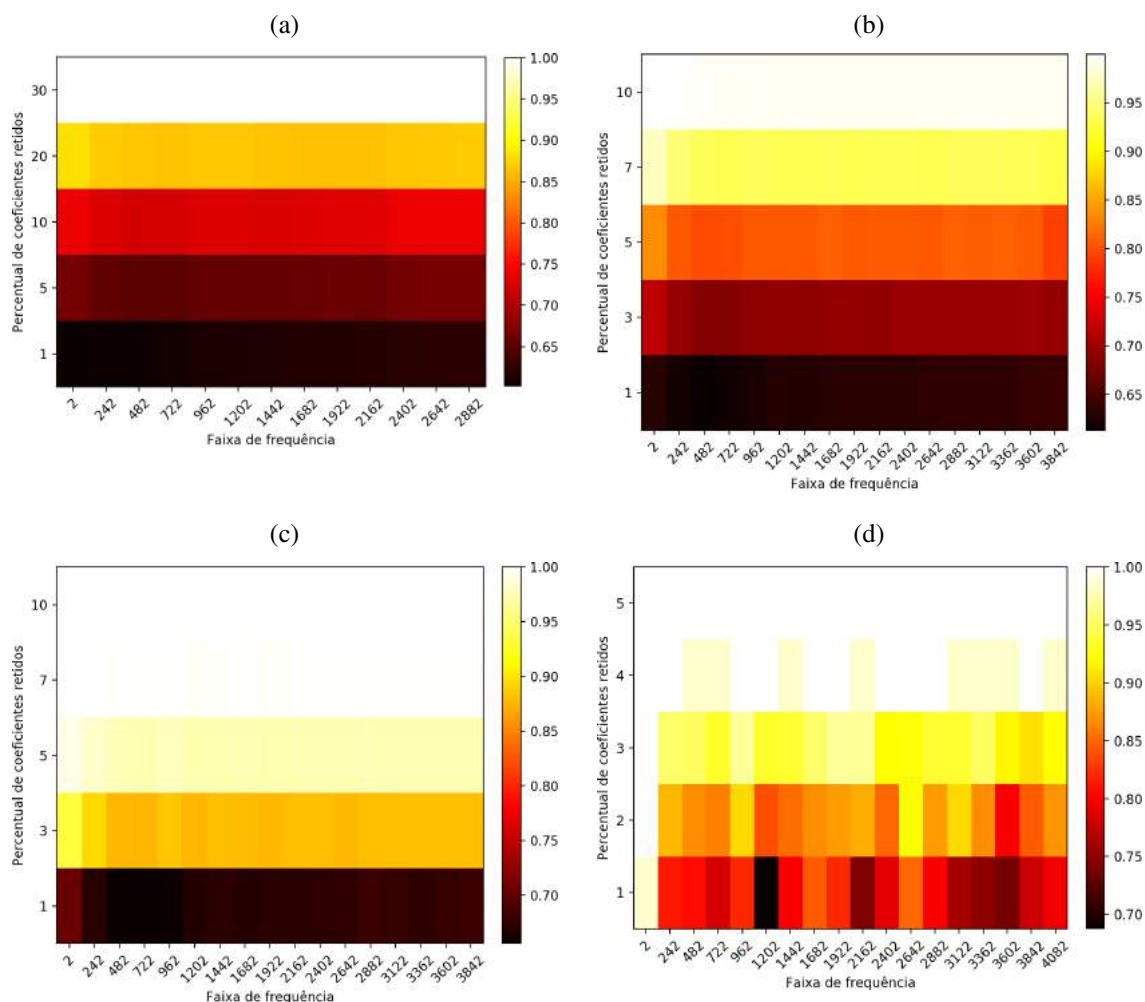
Figura 51 – Ilustração de curva com os valores de  $PSNR_{\text{médio}}$  para o *light field Bikes* com diferentes tamanhos de marca d'água – (a)  $2048 \times 2048$ , (b)  $1024 \times 1024$ , (c)  $512 \times 512$  e (d)  $8 \times 8$  – e diferentes faixas de frequência usadas para inserção da marca.



Fonte: O Autor (2020).

ser submetido à compressão com diferentes percentuais de coeficientes retidos para cada tamanho de marca d'água. Observando a escala de cores, nota-se, como esperado, a redução no valor de NC à medida que menos coeficientes são retidos. Além disso, à medida que utilizamos faixas de frequência mais altas, os resultados de NC também diminuem, uma vez que inserir a marca d'água em altas frequências as torna mais propensas a serem degradadas pelo processo de compressão. Os resultados de NC mais baixos obtidos foram de 0,62, 0,64, 0,68 e 0,79 para marcas de tamanho  $2048 \times 2048$ ,  $1024 \times 1024$ ,  $512 \times 512$  e  $8 \times 8$ , respectivamente, e com retenção de apenas 1% dos coeficientes. Já os maiores resultados de NC obtidos para marcas de tamanho  $2048 \times 2048$ ,  $512 \times 512$  e  $8 \times 8$ , foram 1 e 0,99 para marcas de tamanho  $1024 \times 1024$ . No Apêndice A são apresentados resultados adicionais para a imagem de *light field Black Fence* considerando este mesmo arranjo experimental para valores de BER, PSNR e SSIM das marcas d'água extraídas sob diferentes condições de percentual de compressão e tamanho da marca. É possível notar as consistências nesses resultados, à medida que menos coeficientes são retidos e são utilizadas faixas de frequências mais elevadas, maiores são os valores de BER,

Figura 52 – Mapa de cores com informação de NC (*normalized correlation*) para marcas de diferentes tamanhos – (a)  $2048 \times 2048$ , (b)  $1024 \times 1024$ , (c)  $512 \times 512$  e (d)  $8 \times 8$  – extraídas do *light field Black Fence* após compressão com diferentes percentuais de coeficientes retidos. Os valores de NC são indicados na barra lateral de acordo com a intensidade da cor.



Fonte: O Autor (2020).

conforme o esperado. Já para os resultados de PSNR e SSIM, o comportamento é similar aos resultados de NC, em que os valores são mais altos para maiores percentuais de retenção e faixas de frequências mais baixas. A faixa de valores de BER obtidos está compreendida entre 0 e 0,46; os valores de PSNR são maiores que 3 dB; e os valores mínimo e máximo de SSIM são 0,006 e 1. Em todos os casos, resultados similares são encontrados para as demais imagens de *light field*.

Na Figura 53, são apresentadas as marcas d'água extraídas com menor valor de NC para cada percentual de coeficientes retidos (essas marcas foram inseridas na faixa de frequência mais alta). Conforme esperado, o processo de compressão dificulta a recuperação dos *bits* da marca, uma vez que os coeficientes zerados (de menor valor absoluto) tendem a se concentrar nas altas frequências. As imagens apresentam artefatos de ruído que aumentam em quantidade à medida

Figura 53 – Marcas d’água extraídas por percentual de coeficientes retidos. Todas estas marcas foram inseridas na última faixa de coeficientes (frequências altas). Foram extraídas marcas de tamanho  $2048 \times 2048$  – (a), (b), (c), (d) e (e) –,  $1024 \times 1024$  – (f), (g), (h), (i) e (j) –,  $512 \times 512$  – (k), (l), (m), (n) e (o) – e  $8 \times 8$  – (p), (q), (r), (s) e (t). Os percentuais de coeficientes retidos foram: 30%, 20%, 10%, 5% e 1% para as marcas de tamanho  $2048 \times 2048$ ; 10%, 7%, 5%, 3% e 1% para as marcas de tamanho  $1024 \times 1024$  e  $512 \times 512$ ; 5%, 4%, 3%, 2% e 1% para as marcas de tamanho  $8 \times 8$ .



Fonte: O Autor (2020).

que menos coeficientes são retidos na compressão do *light field* marcado. Por outro lado, nota-se que, para imagens não geradas de forma pseudoaleatória, mesmo em casos críticos, em que apenas 5%, 3% ou 2% dos coeficientes foram retidos, ainda é possível identificar, visualmente, a marca d’água sem dificuldades.

### 7.2.3 Análise de Impacto da Força da Marca Inserida

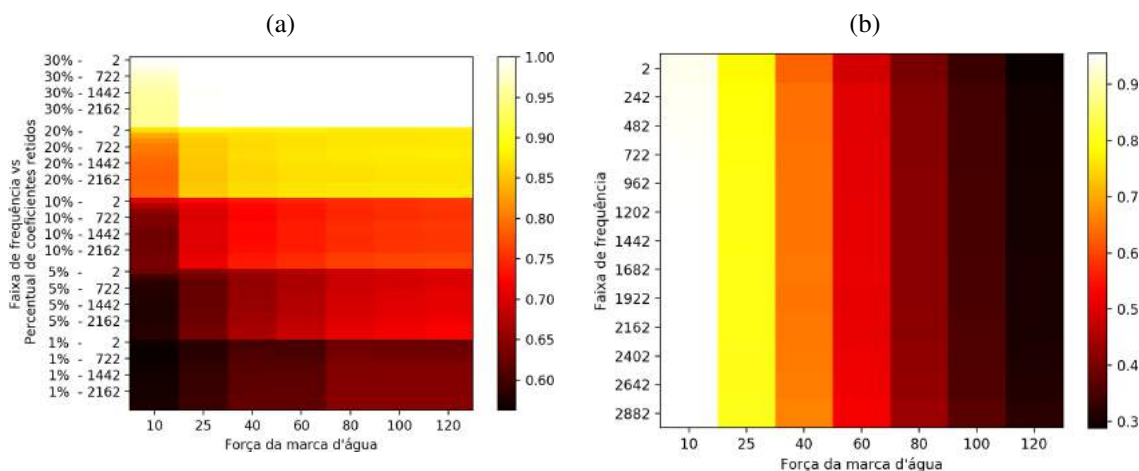
Nas Figuras 54, 55, 56 e 57 são apresentados resultados de NC, para marcas extraídas, e  $SSIM_{\text{médio}}$ , para imagens de *light field* marcadas, considerando a inserção da marca em diferentes faixas de frequência e com diferentes valores de força da inserção. Quanto maior é o parâmetro de força, melhor será a qualidade da marca d'água extraída e pior será a qualidade da imagem de *light field* marcada. Uma relação similar de custo-benefício também existe para as faixas de frequência; quanto mais alta for a faixa de frequência utilizada para inserção, pior será a qualidade da marca extraída e melhor será a qualidade da imagem marcada. Por esse motivo é importante uma análise de custo-benefício para identificar qual faixa de coeficientes e parâmetro de força utilizar de forma que atendam as necessidades específicas da aplicação desejada. Na Figura 54 por exemplo, em que são apresentados resultados para marcas de tamanho  $2048 \times 2048$ , note que é possível obter bons resultados de NC (acima de 0,85), mesmo com apenas 20% de coeficientes retidos, com o parâmetro de força igual a 120. Porém, este parâmetro degrada demasiadamente o *light field* marcado, obtendo valores de  $SSIM_{\text{médio}}$  abaixo de 0,4. Uma alternativa seria utilizarmos o parâmetro de força com valor 10 e a faixa de frequência limitada em 242. Com esses valores podemos obter marcas extraídas com NC acima de 0,8, para retenção de 20% dos coeficientes, e acima de 0,9, para retenção de 30% ou maior. Lembre-se que, como pode ser visto na Figura 53, marcas extraídas com valor de NC acima de 0,8 ainda são facilmente reconhecidas visualmente. Em contrapartida, com esses valores, é possível obter um  $SSIM_{\text{médio}}$  da imagem marcada acima de 0,9, o que representa um alto grau de similaridade com a imagem original. A mesma análise pode ser realizada para os demais tamanhos de marca d'água ( $1024 \times 1024$ ,  $512 \times 512$  e  $8 \times 8$ ).

De maneira geral, entendemos que utilizar o parâmetro de força com valor 40 e realizar a inserção em uma faixa de frequência limitada entre 2 e 240 parece ser adequado para a maioria dos casos. As figuras apresentadas são para a imagem *Black Fence*, porém resultados similares são encontrados nas demais. No Apêndice A são apresentados resultados adicionais para marcas extraídas em termos de BER, PSNR e SSIM, e resultados adicionais para imagens marcadas em termos de  $PSNR_{\text{médio}}$ .

## 7.3 ANÁLISE COMPARATIVA E OUTROS ATAQUES

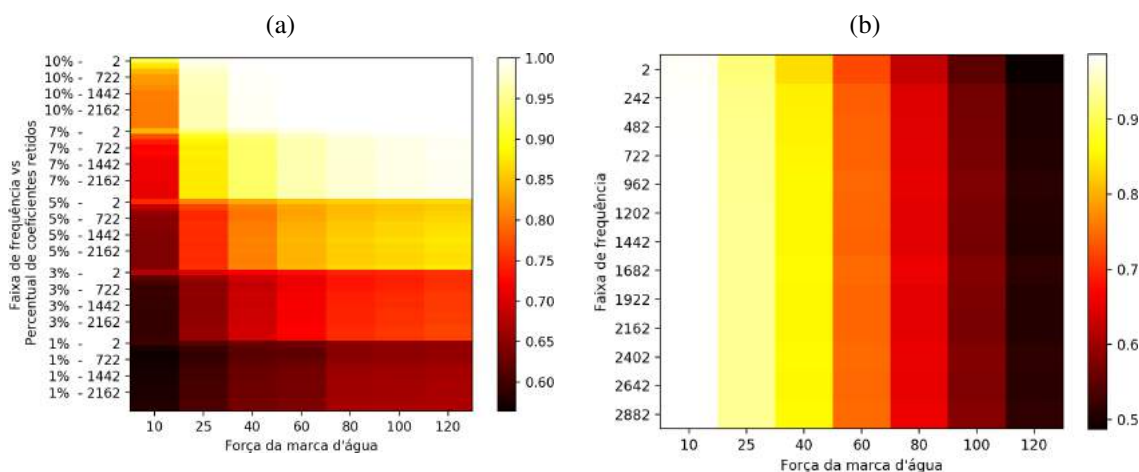
Para avaliar o método de inserção e extração de marca d'água proposto neste trabalho foi calculado o BER de uma série de simulações envolvendo diversos possíveis ataques que uma imagem poderia sofrer e sob diferentes condições. As simulações foram realizadas para as 30 imagens de teste e foi calculada a média desses resultados. O método proposto foi avaliado com e sem replicação de *bits* e foi utilizada a Ordenação pelas Médias (OPM) e a Varredura 3D Diagonal (V3DD). Os termos OPM 10× e V3DD 10× são referentes às respectivas variações do método proposto replicando os *bits* em 10 vezes. Além disso, os resultados das variações do método proposto foram comparados com os resultados de um esquema de marca d'água

Figura 54 – Mapa de cores com informação de (a) NC (*normalized correlation*) de marcas extraídas de tamanho  $2048 \times 2048$  e (b)  $SSIM_{\text{médio}}$  (*structural similarity*) de imagens marcadas para diferentes faixas de coeficientes e valores de força de inserção. As marcas foram extraídas do *light field Black Fence* após compressão com diferentes percentuais de coeficientes retidos. Os valores de NC e  $SSIM_{\text{médio}}$  são indicados na barra lateral de acordo com a intensidade da cor.



Fonte: O Autor (2020).

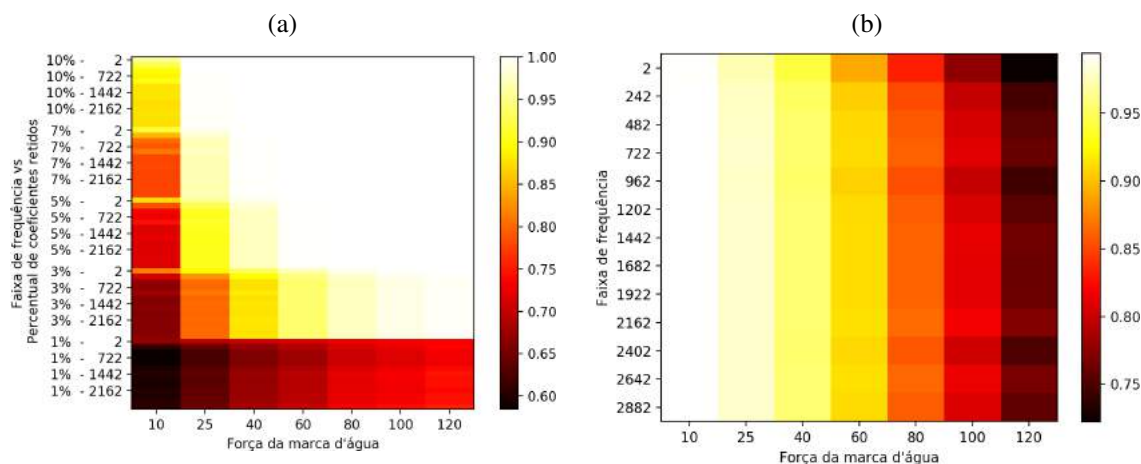
Figura 55 – Mapa de cores com informação de (a) NC (*normalized correlation*) de marcas extraídas de tamanho  $1024 \times 1024$  e (b)  $SSIM_{\text{médio}}$  (*structural similarity*) de imagens marcadas para diferentes faixas de coeficientes e valores de força de inserção. As marcas foram extraídas do *light field Black Fence* após compressão com diferentes percentuais de coeficientes retidos. Os valores de NC e  $SSIM_{\text{médio}}$  são indicados na barra lateral de acordo com a intensidade da cor.



Fonte: O Autor (2020).

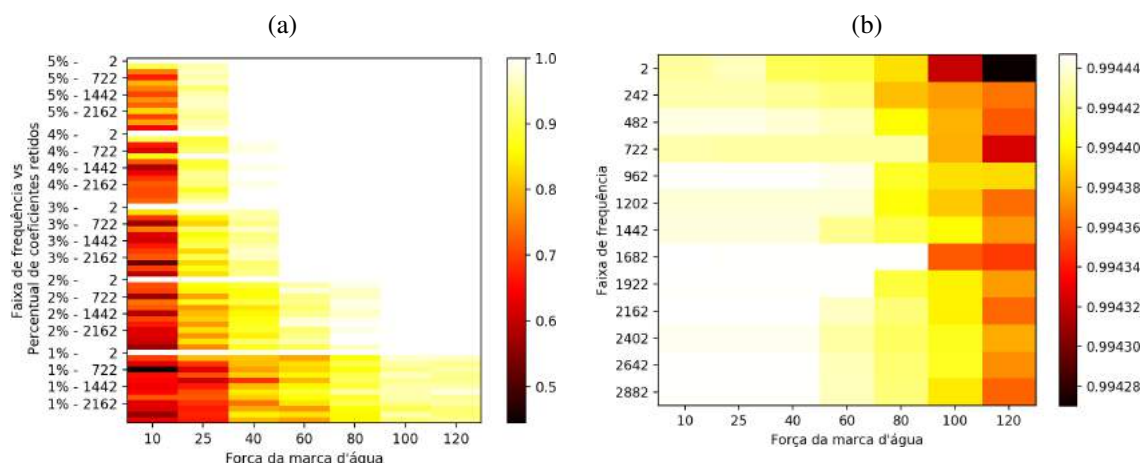
para imagens de *light field* proposto em (ANSARI et al., 2018). Existem diversos trabalhos de marca d'água para imagens de *light field* publicados no cenário de renderização de imagens em *Free-View Television*, porém a literatura referente à aplicação no cenário de armazenamento

Figura 56 – Mapa de cores com informação de (a) NC (*normalized correlation*) de marcas extraídas de tamanho  $512 \times 512$  e (b)  $SSIM_{\text{médio}}$  (*structural similarity*) de imagens marcadas para diferentes faixas de coeficientes e valores de força de inserção. As marcas foram extraídas do *light field Black Fence* após compressão com diferentes percentuais de coeficientes retidos. Os valores de NC e  $SSIM_{\text{médio}}$  são indicados na barra lateral de acordo com a intensidade da cor.



Fonte: O Autor (2020).

Figura 57 – Mapa de cores com informação de (a) NC (*normalized correlation*) de marcas extraídas de tamanho  $8 \times 8$  e (b)  $SSIM_{\text{médio}}$  (*structural similarity*) de imagens marcadas para diferentes faixas de coeficientes e valores de força de inserção. As marcas foram extraídas do *light field Black Fence* após compressão com diferentes percentuais de coeficientes retidos. Os valores de NC e  $SSIM_{\text{médio}}$  são indicados na barra lateral de acordo com a intensidade da cor.



Fonte: O Autor (2020).

e/ou transmissão é escassa; o trabalho citado foi o único trabalho publicado até o momento. É importante mencionar que ainda assim, o presente trabalho e o proposto em (ANSARI et al., 2018) são de categorias de marca d'água distintas. O presente trabalho é um esquema de marca d'água cega, ou seja, para realizar a extração da marca d'água é necessário apenas a imagem

marcada e a chave secreta utilizada na etapa de inserção. Já o trabalho citado está na categoria de marca d'água semi-cega. Isto é, além da imagem marcada e a chave secreta, é necessária alguma informação adicional, normalmente gerada na etapa da inserção. No caso desse trabalho, se trata de uma sequência numérica com o mesmo tamanho da marca inserida. Em geral, esta característica diminui o escopo de possíveis aplicações para o esquema mas, devido à informação adicional, pode facilitar a correta extração da marca d'água e consequentemente aumentar a robustez contra ataques. O método descrito em (ANSARI *et al.*, 2018), devido à forma de realizar a inserção da marca, possui uma maior limitação na quantidade de *bits* que podem ser inseridos. Por isso, só foram realizados testes com marcas d'água de tamanho  $8 \times 8$  e  $512 \times 512$ . Outra característica deste método é que ele não explora a informação 4-dimensional do *light field*; o método de inserção utiliza um esquema baseado na 2D-DCT calculada com base em blocos bidimensionais de pixels escolhidos aleatoriamente de toda a imagem de *light field*.

As simulações foram realizadas para 10 ataques diferentes, cada uma sob diferentes condições de ataque. Além disso, para comparar os métodos, foi selecionada a força de inserção dos métodos de forma que o impacto da inserção fosse próximo em termos de PSNR (dB). Nas Tabelas 14 e 15 são apresentadas as forças de inserção utilizadas em cada método e o respectivo impacto na qualidade da imagem, em termos de PSNR (dB), após o processo de inserção.

Tabela 14 – Forças de inserção utilizadas nas simulações com marcas de tamanho  $8 \times 8$  e respectivo impacto na qualidade da imagem em termos de PSNR (dB).

| PSNR (dB) | OPM | OPM $10 \times$ | V3DD | V3DD $10 \times$ | Ansari <i>et al.</i> |
|-----------|-----|-----------------|------|------------------|----------------------|
| 66,9      | 200 | 60              | 150  | 50               | 60                   |
| 66,4      | 270 | 80              | 200  | 60               | 80                   |
| 62,4      | 340 | 110             | 260  | 80               | 100                  |
| 60,9      | 400 | 130             | 300  | 100              | 120                  |
| 59,5      | 470 | 150             | 360  | 110              | 140                  |

Tabela 15 – Forças de inserção utilizadas nas simulações com marcas de tamanho  $512 \times 512$  e respectivo impacto na qualidade da imagem em termos de PSNR (dB).

| PSNR (dB) | OPM | OPM $10 \times$ | V3DD | V3DD $10 \times$ | Ansari <i>et al.</i> |
|-----------|-----|-----------------|------|------------------|----------------------|
| 30,7      | 120 | 40              | 120  | 40               | 60                   |
| 28,2      | 160 | 50              | 160  | 50               | 80                   |
| 26,3      | 210 | 60              | 200  | 60               | 100                  |
| 24,7      | 250 | 80              | 240  | 80               | 120                  |
| 23,9      | 270 | 90              | 270  | 90               | 140                  |

No Apêndice A, da Tabela A.1 à Tabela A.20, as médias dos resultados para as 30 imagens são apresentadas de acordo com os parâmetros utilizados no ataque e o PSNR<sub>médio</sub> obtido após a inserção da marca. Para facilitar a visualização, os resultados consolidados são apresentados nas Tabelas 16, para marcas de tamanho  $8 \times 8$ , e 17, para marcas de tamanho  $512 \times 512$ , com a média dos valores de BER por ataque realizado. Na maioria dos resultados, como

é esperado, é possível notar uma melhora nos resultados de BER quando utilizamos a versão com replicação de *bits* em detrimento à versão sem replicação. Para marcas de tamanho  $8 \times 8$  o método que obteve melhores resultados para a maioria dos ataques foi o V3DD  $10\times$ , que obteve, em média, um menor BER entre os demais para 7 dos 10 ataques. O método de Ansari *et al.* obteve um melhor resultado apenas para o ataque de compressão JPEG, seguido do método V3DD com uma diferença da ordem de  $10^{-2}$ .

Tabela 16 – Média, para as 30 imagens de *light field* utilizadas como teste, dos resultados de BER de marcas d'água de tamanho  $8 \times 8$  extraídas após ataques sob diferentes condições e com variações da força de inserção. OPM é referente ao método de Ordenação pelas Médias e V3DD ao método de Varredura 3D Diagonal; os métodos foram aplicados sem e com replicação ( $10\times$ ). Os melhores resultados estão destacados em negrito e os segundo melhores estão sublinhados.

| Ataque                    | OPM           | OPM $10\times$ | V3DD          | V3DD $10\times$ | Ansari <i>et al.</i> |
|---------------------------|---------------|----------------|---------------|-----------------|----------------------|
| Filtro da média           | 0,0016        | 0,0023         | <b>0,0000</b> | <b>0,0000</b>   | 0,3617               |
| Filtro Gaussiano          | 0,3086        | 0,0719         | 0,1633        | <b>0,0000</b>   | 0,1398               |
| Filtro da mediana         | 0,2219        | 0,1492         | 0,0016        | <b>0,0000</b>   | 0,4359               |
| Ruído Gaussiano           | <b>0,0000</b> | <b>0,0000</b>  | <b>0,0000</b> | <b>0,0000</b>   | <b>0,0000</b>        |
| Ruído Sal e Pimenta       | <b>0,0000</b> | <b>0,0000</b>  | <b>0,0000</b> | <b>0,0000</b>   | 0,0023               |
| Equalização de Histograma | 0,2906        | 0,1000         | 0,3000        | <b>0,0594</b>   | 0,4844               |
| <i>Sharpening</i>         | 0,2906        | <b>0,1711</b>  | 0,2742        | 0,1766          | 0,2484               |
| Corte em UV               | 0,0938        | <b>0,0430</b>  | 0,0938        | <b>0,0430</b>   | 0,3438               |
| Compressão 4D-DCT         | <b>0,0000</b> | 0,0063         | 0,0039        | 0,0055          | 0,0641               |
| Compressão JPEG           | 0,1698        | 0,2823         | 0,1365        | 0,1615          | <b>0,1000</b>        |

Para marcas d'água de tamanho  $512 \times 512$  o método proposto por Ansari *et al.* obteve, em média, os menores resultados de BER em 5 dos 10 ataques. Destes, o único ataque do qual o método de Ansari *et al.* obtém uma melhora expressiva em termos da quantidade de acertos dos *bits* da marca d'água é para o ataque *sharpening*, com uma diferença de 0,1. Nos demais ataques em que o método de Ansari *et al.* obtém um melhor resultado, a maior diferença é da ordem de  $10^{-2}$ , que é para o ataque de compressão JPEG. Para os demais ataques, os melhores resultados estão quase igualmente distribuídos entre as variações do método proposto. De uma maneira geral, para os dois tamanhos de marca d'água avaliados, o método proposto obtém resultados melhores, ou próximos, em comparação ao método de Ansari *et al.*, com relação à qualidade da marca extraída, mesmo sendo um método totalmente cego.

Tabela 17 – Média, para as 30 imagens de *light field* utilizadas como teste, dos resultados de BER de marcas d'água de tamanho  $512 \times 512$  extraídas após ataques sob diferentes condições e com variações da força de inserção. OPM é referente ao método de Ordenação pelas Médias e V3DD ao método de Varredura 3D Diagonal; os métodos foram aplicados sem e com replicação ( $10\times$ ). Os melhores resultados estão destacados em negrito e os segundo melhores estão sublinhados.

| Ataque                    | OPM           | OPM $10\times$ | V3DD          | V3DD $10\times$ | Ansari <i>et al.</i> |
|---------------------------|---------------|----------------|---------------|-----------------|----------------------|
| Filtro da média           | <u>0,3939</u> | 0,4398         | 0,4269        | 0,4291          | <b>0,3859</b>        |
| Filtro da Gaussiano       | 0,4270        | 0,3759         | 0,4363        | <b>0,3704</b>   | <u>0,3751</u>        |
| Filtro da mediana         | <b>0,3805</b> | 0,4279         | <u>0,4123</u> | 0,4150          | <u>0,4369</u>        |
| Ruído Gaussiano           | <u>0,0009</u> | 0,0053         | <u>0,0037</u> | 0,0059          | <b>0,0000</b>        |
| Ruído Sal e Pimenta       | <b>0,0000</b> | <u>0,0002</u>  | <b>0,0000</b> | <u>0,0002</u>   | 0,0010               |
| Equalização de Histograma | 0,2885        | <b>0,1426</b>  | 0,2961        | <u>0,1436</u>   | 0,4803               |
| <i>Sharpening</i>         | 0,3878        | <u>0,2828</u>  | 0,3865        | <u>0,2913</u>   | <b>0,1759</b>        |
| Corte em UV               | 0,0836        | <b>0,0291</b>  | 0,0868        | <u>0,0293</u>   | 0,3754               |
| Compressão 4D-DCT         | 0,0665        | 0,2030         | <u>0,0653</u> | <u>0,2020</u>   | <b>0,0644</b>        |
| Compressão JPEG           | <u>0,1667</u> | 0,1994         | 0,1901        | 0,1917          | <b>0,1213</b>        |

## 8 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com a ajuda da função plenóptica, que constitui o modelo mais preciso conhecido para representação de feixes de luz, novas tecnologias de captação e exibição de imagens e vídeos vêm sendo produzidas. Formas simplificadas da função plenóptica têm sido propostas como alternativa de representação da luz em função da direção angular, comprimento de onda e posição espacial para representação de cenas com múltiplas vistas e/ou tridimensionais. Essa forma de representação permite a criação de conteúdos mais imersivos e fidedignos de uma cena real. Dentre os tipos de imagens/objetos gerados a partir desta representação podemos destacar as nuvens de pontos 3D e imagens de *light field*, que são adquiridas a partir de processos e mecanismos particulares, e possuem diversas aplicações interessantes desde áreas de entretenimento à indústria. Por se tratarem de novas formas de representação, diversos trabalhos vêm sendo publicados no âmbito de codificação e compressão destes dados. Outra aplicação relevante, porém ainda pouco explorada, é o mecanismo de proteção dessas informações por meio de marcas d'água digitais. Devido à sua natureza tridimensional (no caso de nuvens de pontos) ou 4D (no caso de imagens de *light field*), técnicas tradicionais de marca d'água não são diretamente aplicadas a estes tipos de objetos, fazendo-se necessário um estudo adequado de novos métodos que consigam explorar as características inerentes a esses modelos para proteção de direitos autorais e/ou identificação de alterações não autorizadas (intencionalmente ou não).

Este trabalho apresentou duas técnicas de marca d'água no domínio da transformada para imagens plenópticas, mais especificamente, nuvens de pontos 3D e imagens de *light field*. Uma das técnicas é um algoritmo de marca d'água não-cego, cujo principal cenário de aplicação está relacionado à proteção de direitos autorais de nuvens de pontos. O método proposto utiliza ferramentas de processamento de sinais sobre grafos (*graph signal processing* - GSP), empregando, em particular, a transformada de Fourier sobre grafo (GFT, do inglês *graph Fourier transform*). A outra técnica proposta utiliza a propriedade de compactação de energia no domínio da transformada discreta do cosseno 4-dimensional (4D-DCT, do inglês *4-dimensional discrete cosine transform*) para aplicação de marca d'água cega em imagens de *light field lenslet*. Para explorar de forma mais efetiva a 4D-DCT, também foi realizado neste trabalho um estudo e proposição de algoritmos de varredura em estruturas 4-dimensionais.

Quanto à técnica para nuvens de pontos, diferentemente dos métodos existentes, em nossa abordagem, os *bits* da marca d'água não são inseridos nas coordenadas espaciais dos pontos, mas sim na informação de intensidade de cor presente em cada um; esta estratégia associada aos passos desenvolvidos para inserção e extração, permitem extrair a marca d'água sem erro mesmo após qualquer alteração seja realizada nas coordenadas dos pontos. Os procedimentos de inserção/extração da marca d'água foram projetados para diminuir o impacto, na qualidade da marca d'água extraída, que ataques, como adição de ruído, reordenamento, recorte e transformações afins provocam. Foram realizadas simulações de forma extensiva com a técnica proposta, levando em conta diferentes modelos de nuvens de pontos 3D, tamanhos de marcas

d'água e tipos de ataques. Nossos resultados ratificaram que a marca pode ser perfeitamente recuperada após a rotação, translação, escalonamento, cisalhamento e adição de ruído provocados por ataques nas coordenadas de pontos, por exemplo. Quanto aos ataques de adição de ruído no atributo de cor dos modelos, as simulações indicaram alta robustez; um valor de BER da ordem de  $10^{-2}$  é obtido para ataques com amplitude de ruído de até 5%. Além disso, observou-se que, mesmo após ataques com até 40% de amplitude de ruído, ainda é possível identificar visualmente a imagem da marca d'água extraída. Em relação aos ataques de recorte, o método proposto também apresentou alta robustez; valores de BER da ordem de  $10^{-2}$  são alcançados após até 30% dos pontos serem removidos. Com relação à imperceptibilidade, os resultados mostraram que, utilizando os parâmetros sugeridos neste trabalho, a inserção da marca d'água promoveu baixa degradação dos modelos marcados. Apesar das dificuldades em comparar nosso método com os já existentes, uma análise apresentada sugere que a técnica proposta tem uma maior robustez e uma imperceptibilidade levemente inferior quando comparada a outros métodos; algo esperado uma vez que esses requisitos são inversamente relacionados.

Quanto à técnica para imagens de *light field*, a 4D-DCT parece ser uma candidata promissora para compressão deste tipo de imagem, por ser capaz de compactar, no domínio da transformada, a energia dessas imagens *lenslet*. Tal cenário tem motivado a realização da pesquisa documentada neste trabalho. A técnica de marca d'água para imagens de *light field* apresentada demonstrou satisfazer requisitos importantes de imperceptibilidade e de robustez à compressão, sugerindo que o método em si e, mais especificamente, a estratégia de ordenação de coeficientes desenvolvida, podem ser aplicados de forma bem sucedida a uma classe ampla de imagens. As alternativas de ordenação propostas se mostraram eficientes com relação a obter uma sequência cuja energia se concentre nas baixas “frequências”, inclusive quando comparados a métodos de varredura publicados recentemente na literatura. Os métodos de varredura foram desenvolvidos utilizando um total de 88 imagens “treino” e foram testados em um total de 30 imagens de “teste”. Resultados de similaridade estrutural (SSIM, do inglês *structural similarity*) e da relação sinal-ruído de pico (PSNR, do inglês *peak signal-to-noise ratio*) foram obtidos a partir de diversas simulações com as 30 imagens de *light field* de “teste” para avaliação da imperceptibilidade da técnica proposta considerando a inserção de marcas d'água de tamanho  $2048 \times 2048$ ,  $1024 \times 1024$ ,  $512 \times 512$ ,  $8 \times 8$ . Os resultados de PSNR variaram entre aproximadamente 27 dB e 80 dB, dependendo do tamanho da marca inserida. Com relação aos testes de robustez, a técnica proposta foi avaliada para um total de 10 ataques e comparada com um trabalho recente publicado na literatura, por Ansari et al. Mesmo a técnica proposta por Ansari et al. sendo semi-cega, o que poderia lhe trazer vantagens com relação à robustez, o método proposto se mostrou mais robusto para a maioria dos ataques. Além disso, a técnica proposta possui uma maior capacidade de inserção e, por ser cega, possui uma maior aplicabilidade em diferentes cenários.

## 8.1 TRABALHOS FUTUROS

Como trabalhos futuros, podem ser elencadas as seguintes linhas de pesquisa:

- É possível investigar outros cenários de aplicação nos quais um método de marca d'água para nuvens de pontos 3D baseado na GFT pode ser estabelecido. Em particular, estamos interessados em ajustar nossa técnica para que ela seja aplicada de forma cega em modelos 3D e possua, talvez, propriedades de marca d'água frágil (COX et al., 2007; HUANG et al., 2013);
- Ainda sobre marcas d'água para modelos tridimensionais, pode-se considerar o desenvolvimento de técnicas aplicáveis a malhas triangulares (ALFACE; MACQ, 2007), por exemplo, as quais já proveriam informação de conectividade, permitindo, assim, a inferência quase que direta de grafos que as representariam;
- Com o conhecimento adquirido a respeito da aplicação de ferramentas de GSP a nuvens de pontos 3D, esperamos poder explorar também outras operações importantes nesse contexto, como a compressão (SCHWARZ et al., 2018; CHOU; KOROTEEV; KRIVOKUĆA, 2019) e a segmentação (LANDRIEU; SIMONOVSKY, 2018; WANG et al., 2019);
- Quanto à marca d'água para imagens de *light field*, também é possível avaliá-la no cenário de renderização, o que permitiria uma comparação mais detalhada com outras técnicas documentadas na literatura (KOZ; CIGLA; ALATAN, 2008; APOSTOLIDIS; TRIANTAFYLIDIS, 2008; KOZ; ÇİĞLA; ALATAN, 2007; KOZ; CIGLA; ALATAN, 2006);
- Os métodos de varredura de estrutura 4-dimensionais que foram desenvolvidos podem, também, ser explorados em contextos diferentes do de marca d'água. Uma possibilidade é utilizar o modo de ordenação proposto para realizar compressão de *light fields*; para isso, será necessário investigar técnicas de quantização e de codificação adequadas ao cenário em questão (ALVES et al., 2020);
- Considerando a aplicação de transformadas a *light fields*, também há linhas de investigação que podem ser exploradas. Pode-se estudar, por exemplo, o uso de transformadas aproximadas para redução de complexidade (POTLURI et al., 2014; ALMURIB; KUMAR; LOMBARDI, 2017), o de transformadas manobráveis visando maior compactação de energia (FRACASTORO; FOSSON; MAGLI, 2016; PELOSO et al., 2020) e o de transformadas paramétricas visando a realização de cifragem (ZHOU; PANETTA; AGAIAN, 2009; BEKKOUCHE; BOUGUEZEL, 2018);
- Por fim, enxergamos a possibilidade de desenvolver algumas das linhas mencionadas visando o tratamento de imagens de *light field* do tipo HDCA (HONAUER et al., 2016),

as quais são capturadas de modo diferente daqueles do tipo *lenslet*, requerendo, assim, abordagens por vezes bastante distinta.

## 8.2 ARTIGOS RELACIONADOS À TESE

Nesta seção, são listados os trabalhos publicados / submetidos ao longo do desenvolvimento desta tese.

### **Trabalho publicado em periódico**

- FERREIRA, F. A. B. S.; LIMA, J. B. A robust 3D point cloud watermarking method based on the graph Fourier transform. *Multimedia Tools and Applications*, v. 79, n. 3, p. 1921-1950, 2020.

### **Depósito do pedido de patente**

- Depósito do pedido de patente de invenção intitulado “Processo de marca d’água robusta para nuvens de pontos 3D através da transformada de Fourier sobre grafos” sob número de pedido no INPI: BR 10 2020 017264 6.

### **Trabalho publicado em congresso**

- FERREIRA, F. A. B. S.; LIMA, J. B. Um esquema para inserção de marcas d’água em imagens de light field. *XXXVII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais (SBrT 2019)*, 29/09-02/10, 2019, Petrópolis, RJ, Brasil.

## REFERÊNCIAS

- ADELSON, E. H.; BERGEN, J. R. et al. The plenoptic function and the elements of early vision. Vision and Modeling Group, Media Laboratory, Massachusetts Institute of . . . , 1991. Citado na página 24.
- AGARWAL, P.; PRABHAKARAN, B. Robust blind watermarking of point-sampled geometry. **IEEE Transactions on Information Forensics and Security**, IEEE, v. 4, n. 1, p. 36–48, 2009. Citado 5 vezes nas páginas 31, 32, 33, 56 e 68.
- AICARDI, I. et al. Recent trends in cultural heritage 3d survey: The photogrammetric computer vision approach. **Journal of Cultural Heritage**, Elsevier, v. 32, p. 257–266, 2018. Citado na página 28.
- ALFACE, P. R.; MACQ, B. From 3D mesh data hiding to 3D shape blind and robust watermarking: a survey. In: **Transactions on Data Hiding and Multimedia Security II**. [S.l.]: Springer, 2007. p. 91–115. Citado 3 vezes nas páginas 29, 31 e 115.
- ALMURIB, H. A.; KUMAR, T. N.; LOMBARDI, F. Approximate dct image compression using inexact computing. **IEEE Transactions on computers**, IEEE, v. 67, n. 2, p. 149–159, 2017. Citado na página 115.
- ALVES, G. et al. A study on the 4D sparsity of JPEG Pleno light fields using the discrete cosine transform. In: IEEE. **25th IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)**. [S.l.], 2018. p. 1–5. Citado na página 34.
- ALVES, G. D. O. et al. The jpeg pleno light field coding standard 4d-transform mode: How to design an efficient 4d-native codec. **IEEE Access**, IEEE, v. 8, p. 170807–170829, 2020. Citado 5 vezes nas páginas 93, 97, 115, 152 e 153.
- ANSARI, A. et al. Ownership protection of plenoptic images by robust and reversible watermarking. **Optics and Lasers in Engineering**, Elsevier, v. 107, p. 325–334, 2018. Citado 6 vezes nas páginas 29, 34, 35, 108, 109 e 110.
- APOSTOLIDIS, E. E.; TRIANTAFYLLIDIS, G. A. Watermark selection for light field rendering in ftv. In: IEEE. **2008 3DTV Conference: The True Vision-Capture, Transmission and Display of 3D Video**. [S.l.], 2008. p. 385–388. Citado 2 vezes nas páginas 35 e 115.
- ASIKUZZAMAN, M. et al. Robust DT CWT-based DIBR 3D video watermarking using chrominance embedding. **IEEE Transactions on Multimedia**, IEEE, v. 18, n. 9, p. 1733–1748, 2016. Citado na página 31.
- ASIKUZZAMAN, M.; PICKERING, M. R. An overview of digital video watermarking. **IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology**, IEEE, v. 28, n. 9, p. 2131–2153, 2018. Citado 3 vezes nas páginas 56, 68 e 71.
- BAS, P. et al. **Watermarking Security: Fundamentals, Secure Designs and Attacks**. [S.l.]: Springer, 2016. Citado na página 30.
- BEKKOUCHE, T.; BOUGUEZEL, S. Digital double random amplitude image encryption method based on the symmetry property of the parametric discrete fourier transform. **Journal of Electronic Imaging**, International Society for Optics and Photonics, v. 27, n. 2, p. 023033, 2018. Citado na página 115.

BHOWMIK, D.; OAKES, M.; ABHAYARATNE, C. Visual attention-based image watermarking. **IEEE Access**, IEEE, v. 4, p. 8002–8018, 2016. Citado 3 vezes nas páginas 56, 68 e 71.

BITELLI, G. et al. On the generation of numerical models from point clouds for the analysis of damaged cultural heritage. In: IOP PUBLISHING. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**. [S.l.], 2018. v. 364, n. 1, p. 012083. Citado na página 28.

BORS, A. G.; LUO, M. Optimized 3D watermarking for minimal surface distortion. **IEEE Transactions on Image Processing**, IEEE, v. 22, n. 5, p. 1822–1835, 2013. Citado 3 vezes nas páginas 31, 69 e 71.

CAI, Z. et al. Practical optimal registration of terrestrial LiDAR scan pairs. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, Elsevier, v. 147, p. 118–131, 2019. Citado na página 31.

CARVALHO, M. B. de et al. A 4D DCT-based lenslet light field codec. In: IEEE. **25th IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)**. [S.l.], 2018. p. 435–439. Citado na página 34.

CHAN, H.-T.; HWANG, W.-J.; CHENG, C.-J. Digital hologram authentication using a hadamard-based reversible fragile watermarking algorithm. **Journal of Display Technology**, IEEE, v. 11, n. 2, p. 193–203, 2015. Citado na página 31.

CHEN, B.; WORNELL, G. Quantization index modulation: A class of provably good methods for digital watermarking and information embedding. **IEEE Transactions on Information Theory**, IEEE, v. 47, n. 4, p. 1423–1443, 2001. Citado 2 vezes nas páginas 36 e 80.

CHEN, B.; WORNELL, G. W. Quantization index modulation: A class of provably good methods for digital watermarking and information embedding. **IEEE Transactions on Information Theory**, IEEE, v. 47, n. 4, p. 1423–1443, 2001. Citado 3 vezes nas páginas 32, 47 e 50.

CHEN, H.; XU, W. Secure and robust color image watermarking for copyright protection based on lifting wavelet transform. In: IEEE. **2018 25th International Conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice (M2VIP)**. [S.l.], 2018. p. 1–5. Citado na página 29.

CHEN, S.; VARMA, R. et al. Discrete signal processing on graphs: Sampling theory. **IEEE Trans. Signal Process.**, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 63, n. 24, p. 6510–6523, Dec. 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109%2Ftsp.2015.2469645>>. Citado na página 39.

CHEN, X.; QU, G.; CUI, A. Practical ip watermarking and fingerprinting methods for asic designs. In: IEEE. **2017 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)**. [S.l.], 2017. p. 1–4. Citado na página 29.

CHENG, C.-J. et al. A fragile watermarking algorithm for hologram authentication. **Journal of Display Technology**, IEEE, v. 10, n. 4, p. 263–271, 2014. Citado na página 31.

CHOU, P. A.; KOROTEEV, M.; KRIVOKUĆA, M. A volumetric approach to point cloud compression—part i: Attribute compression. **IEEE Transactions on Image Processing**, IEEE, v. 29, p. 2203–2216, 2019. Citado na página 115.

COATRIEUX, G. et al. A watermarking-based medical image integrity control system and an image moment signature for tampering characterization. **IEEE journal of biomedical and health informatics**, IEEE, v. 17, n. 6, p. 1057–1067, 2013. Citado na página 29.

CONTI, C. et al. Light field image compression. In: \_\_\_\_\_. **3D Visual Content Creation, Coding and Delivery**. Cham: Springer International Publishing, 2019. p. 143–176. ISBN 978-3-319-77842-6. Disponível em: <[https://doi.org/10.1007/978-3-319-77842-6\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-319-77842-6_6)>. Citado na página 28.

COTTING, D. et al. Robust watermarking of point-sampled geometry. In: IEEE. **Shape Modeling Applications, 2004. Proceedings**. [S.l.], 2004. p. 233–242. Citado 3 vezes nas páginas 31, 33 e 68.

COX, I. et al. **Digital watermarking and steganography**. [S.l.]: Morgan Kaufmann, 2007. Citado 4 vezes nas páginas 29, 30, 36 e 115.

ESTIVILL-CASTRO, V.; WOOD, D. A survey of adaptive sorting algorithms. **ACM Computing Surveys (CSUR)**, ACM New York, NY, USA, v. 24, n. 4, p. 441–476, 1992. Citado 2 vezes nas páginas 95 e 96.

FEDORENKO, R.; GABDULLIN, A.; FEDORENKO, A. Global UGV path planning on point cloud maps created by UAV. In: IEEE. **2018 3rd IEEE International Conference on Intelligent Transportation Engineering (ICITE)**. [S.l.], 2018. p. 253–258. Citado na página 31.

FISS, J.; CURLESS, B.; SZELISKI, R. Light field layer matting. In: **Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition**. [S.l.: s.n.], 2015. p. 623–631. Citado na página 34.

FRACASTORO, G.; FOSSON, S. M.; MAGLI, E. Steerable discrete cosine transform. **IEEE Transactions on Image Processing**, IEEE, v. 26, n. 1, p. 303–314, 2016. Citado na página 115.

GARG, H.; AGRAWAL, S.; VARSHNEYA, G. A non-blind image based watermarking for 3-D polygonal mesh using its geometrical properties. In: IEEE. **Contemporary Computing (IC3), 2013 Sixth International Conference on**. [S.l.], 2013. p. 313–318. Citado na página 31.

GHAZY, R. A. et al. Block-based svd image watermarking in spatial and transform domains. **International Journal of Electronics**, Taylor & Francis, v. 102, n. 7, p. 1091–1113, 2015. Citado na página 30.

GOLUBSKI, A. J.; WESTLUND, E. E. et al. Ecological networks over the edge: Hypergraph trait-mediated indirect interaction (TMII) structure. **Trends in Ecology & Evolution**, Elsevier BV, v. 31, n. 5, p. 344–354, May 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.tree.2016.02.006>>. Citado na página 39.

GORTLER, S. J. et al. The lumigraph. In: **Siggraph**. [S.l.: s.n.], 1996. v. 96, n. 30, p. 43–54. Citado na página 24.

HARTUNG, F.; RAMME, F. Digital rights management and watermarking of multimedia content for m-commerce applications. **IEEE communications magazine**, IEEE, v. 38, n. 11, p. 78–84, 2000. Citado na página 29.

HOLOGRAFIKA. 2019. Acessado em: 22/05/2019. Disponível em: <<http://www.holografika.com>>. Citado na página 24.

HONAUER, K. et al. A dataset and evaluation methodology for depth estimation on 4d light fields. In: SPRINGER. **Asian Conference on Computer Vision**. [S.l.], 2016. p. 19–34. Citado na página 115.

HUANG, C.-C. et al. A spherical coordinate based fragile watermarking scheme for 3D models. In: SPRINGER. **International Conference on Industrial, Engineering and Other Applications of Applied Intelligent Systems**. [S.l.], 2013. p. 566–571. Citado 2 vezes nas páginas 29 e 115.

IHRKE, I.; RESTREPO, J.; MIGNARD-DEBISE, L. Principles of light field imaging: Briefly revisiting 25 years of research. **IEEE Signal Processing Magazine**, IEEE, v. 33, n. 5, p. 59–69, 2016. Citado na página 33.

ISO/IEC JTC 1/SC29/WG1N74014. JPEG Pleno call for proposals on light field coding. In: . Geneva, Switzerland: [s.n.], 2017. Citado 2 vezes nas páginas 36 e 83.

ITIER, V.; PUECH, W. High capacity data hiding for 3D point clouds based on static arithmetic coding. **Multimedia Tools and Applications**, Springer, v. 76, n. 24, p. 26421–26445, 2017. Citado na página 31.

JAIN, R. K.; MOURA, J. M. F. et al. Big data+ big cities: Graph signals of urban air pollution. **IEEE Signal Process. Mag.**, IEEE, v. 31, n. 5, p. 130–136, Sep. 2014. Citado na página 39.

JPEG Pleno Database: EPFL Light-field data set. 2017. Acessado em: 23/10/2020. Disponível em: <http://plenodb.jpeg.org/lf/epfl>. Citado na página 99.

KARNI, Z.; GOTSMAN, C. Spectral compression of mesh geometry. In: ACM PRESS/ADDISON-WESLEY PUBLISHING CO. **Proceedings of the 27th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques**. [S.l.], 2000. p. 279–286. Citado na página 32.

KLYUZHIN, I. S.; SOSSI, V. PET image reconstruction and deformable motion correction using unorganized point clouds. **IEEE Transactions on Medical Imaging**, IEEE, v. 36, n. 6, p. 1263–1275, 2017. Citado na página 31.

KOZ, A.; CIGLA, C.; ALATAN, A. A. Free-view watermarking for free-view television. In: IEEE. **2006 International Conference on Image Processing**. [S.l.], 2006. p. 1405–1408. Citado 2 vezes nas páginas 34 e 115.

KOZ, A.; ÇİĞLA, C.; ALATAN, A. A. Watermarking for light field rendering. In: IEEE. **2007 15th European Signal Processing Conference**. [S.l.], 2007. p. 2296–2300. Citado 2 vezes nas páginas 35 e 115.

KOZ, A.; CIGLA, C.; ALATAN, A. A. Watermarking for image based rendering via homography-based virtual camera location estimation. In: IEEE. **2008 15th IEEE International Conference on Image Processing**. [S.l.], 2008. p. 1284–1287. Citado 2 vezes nas páginas 35 e 115.

KOZ, A.; CIGLA, C.; ALATAN, A. A. Watermarking of free-view video. **IEEE Transactions on Image Processing**, IEEE, v. 19, n. 7, p. 1785–1797, 2010. Citado na página 35.

KOZ, A.; TRIANTAFYLLIDIS, G. A.; ALATAN, A. A. 3D watermarking: techniques and directions. In: **Three-Dimensional Television**. [S.l.]: Springer, 2008. p. 427–470. Citado na página 31.

LAM, E. Y.; GOODMAN, J. W. A mathematical analysis of the dct coefficient distributions for images. **IEEE transactions on image processing**, IEEE, v. 9, n. 10, p. 1661–1666, 2000. Citado na página 83.

LANDRIEU, L.; SIMONOVSKY, M. Large-scale point cloud semantic segmentation with superpoint graphs. In: **Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition**. [S.l.: s.n.], 2018. p. 4558–4567. Citado na página 115.

LI, N. et al. Saliency detection on light field. In: **Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition**. [S.l.: s.n.], 2014. p. 2806–2813. Citado na página 34.

LIE, W.-N.; LIN, G.-S.; CHENG, S.-L. Dual protection of jpeg images based on informed embedding and two-stage watermark extraction techniques. **IEEE Transactions on information forensics and security**, IEEE, v. 1, n. 3, p. 330–341, 2006. Citado 3 vezes nas páginas 56, 68 e 71.

LIGHT. 2019. Acessado em: 22/05/2019. Disponível em: <<http://light.co/camera>>. Citado na página 24.

LIU, J. et al. A watermarking algorithm for 3D point cloud models using ring distribution. In: **Transactions on Edutainment XIV**. [S.l.]: Springer, 2018. p. 56–68. Citado 5 vezes nas páginas 32, 33, 68, 69 e 71.

LIU, Y.; PRABHAKARAN, B.; GUO, X. Spectral watermarking for parameterized surfaces. **IEEE Transactions on Information Forensics and Security**, IEEE, v. 7, n. 5, p. 1459–1471, 2012. Citado na página 31.

LUO, H.; LU, Z.-m.; PAN, J.-s. A reversible data hiding scheme for 3D point cloud model. In: IEEE. **Signal Processing and Information Technology, 2006 IEEE International Symposium on**. [S.l.], 2006. p. 863–867. Citado 4 vezes nas páginas 32, 33, 56 e 68.

LUO, M.; BORS, A. G. Surface-preserving robust watermarking of 3-D shapes. **IEEE Transactions on Image Processing**, IEEE, v. 20, n. 10, p. 2813–2826, 2011. Citado na página 31.

MANNILA, H. Measures of presortedness and optimal sorting algorithms. **IEEE transactions on computers**, IEEE, v. 100, n. 4, p. 318–325, 1985. Citado na página 95.

MEI, J.; MOURA, J. M. F. Signal processing on graphs: Causal modeling of unstructured data. **IEEE Trans. Signal Process.**, IEEE, v. 65, n. 8, p. 2077–2092, Apr. 2017. Citado na página 39.

MEKARSARI, Y. et al. Non-blind rgb image watermarking technique using 2-level discrete wavelet transform and singular value decomposition. In: IEEE. **International conference on information and communications technology (ICOIAC)**. [S.l.], 2018. p. 623–627. Citado 3 vezes nas páginas 56, 68 e 71.

MENNA, F. et al. 3D digitization of an heritage masterpiece-a critical analysis on quality assessment. **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 41, p. B5, 2016. Citado na página 35.

MEYER, M. et al. Discrete differential-geometry operators for triangulated 2-manifolds. In: **Visualization and Mathematics III**. [S.l.]: Springer, 2003. p. 35–57. Citado na página 32.

- MORRIS, D. et al. A collaborative virtual environment for the simulation of temporal bone surgery. In: SPRINGER. **International conference on medical image computing and computer-assisted intervention**. [S.l.], 2004. p. 319–327. Citado na página 28.
- NAM, D. et al. Flat panel light-field 3-d display: concept, design, rendering, and calibration. **Proceedings of the IEEE**, IEEE, v. 105, n. 5, p. 876–891, 2017. Citado na página 28.
- NEMATOLLAHI, M. A.; VORAKULPIPAT, C.; ROSALES, H. G. **Digital watermarking**. [S.l.]: Springer, 2017. Citado na página 30.
- NIKOLAIDIS, A. et al. A survey on watermarking application scenarios and related attacks. In: IEEE. **Proceedings 2001 International Conference on Image Processing (Cat. No. 01CH37205)**. [S.l.], 2001. v. 3, p. 991–994. Citado na página 29.
- OBRIST, A. F.; FLISCH, A.; HOFMANN, J. Point cloud reconstruction with sub-pixel accuracy by slice-adaptive thresholding of x-ray computed tomography images. **NDT & E International**, Elsevier, v. 37, n. 5, p. 373–380, 2004. Citado na página 28.
- OHBUCHI, R.; MUKAIYAMA, A.; TAKAHASHI, S. Watermarking a 3D shape model defined as a point set. In: IEEE. **Cyberworlds, 2004 International Conference on**. [S.l.], 2004. p. 392–399. Citado 4 vezes nas páginas 32, 33, 68 e 70.
- ORTEGA, A. et al. Graph signal processing: overview, challenges, and applications. **Proceedings of the IEEE**, v. 106, n. 5, p. 808–828, May 2018. Citado 4 vezes nas páginas 35, 36, 39 e 44.
- OSTENDO. 2019. Acessado em: 22/05/2019. Disponível em: <<http://ostendo.com>>. Citado na página 24.
- PAUDYAL, P. et al. A study of the impact of light fields watermarking on the perceived quality of the refocused data. In: IEEE. **2015 3DTV-Conference: The True Vision - Capture, Transmission and Display of 3D Video (3DTV-CON)**. [S.l.], 2015. p. 1–4. Citado 2 vezes nas páginas 34 e 35.
- PELOSO, R. et al. Steerable-discrete-cosine-transform (sdct): Hardware implementation and performance analysis. **Sensors**, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 20, n. 5, p. 1405, 2020. Citado na página 115.
- PEREIRA, F.; SILVA, E. A. da; LAFRUIT, G. Plenoptic imaging: Representation and processing. In: **Academic Press Library in Signal Processing, Volume 6**. [S.l.]: Elsevier, 2018. p. 75–111. Citado 4 vezes nas páginas 23, 24, 25 e 26.
- Perraudin, N. et al. GSPBOX: A toolbox for signal processing on graphs. **ArXiv e-prints**, ago. 2014. Citado na página 40.
- POTLURI, U. S. et al. Improved 8-point approximate dct for image and video compression requiring only 14 additions. **IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers**, IEEE, v. 61, n. 6, p. 1727–1740, 2014. Citado na página 115.
- QI, K.; DONG-QING, X.; DA-FANG, Z. A robust watermarking scheme for 3D point cloud models using self-similarity partition. In: IEEE. **Wireless Communications, Networking and Information Security (WCNIS), 2010 IEEE International Conference on**. [S.l.], 2010. p. 287–291. Citado 5 vezes nas páginas 32, 33, 68, 69 e 71.

QUEIROZ, R. L. de; CHOU, P. A. Transform coding for point clouds using a gaussian process model. **IEEE Transactions on Image Processing**, IEEE, v. 26, n. 7, p. 3507–3517, 2017. Citado na página 28.

RAYTRIX. 2019. Acessado em: 22/05/2019. Disponível em: <<http://www.raytrix.de>>. Citado na página 24.

RERABEK, M.; EBRAHIMI, T. New light field image dataset. In: **8th International Conference on Quality of Multimedia Experience (QoMEX)**. [s.n.], 2016. p. 1–2. Disponível em: <<http://www.epfl.ch/labs/mmspg/EPFL-light-field-image-dataset>>. Citado 5 vezes nas páginas 75, 82, 97, 99 e 154.

RIBEIRO, G. B.; LIMA, J. B. Graph signal processing in a nutshell. **Journal of Communication and Information Systems**, v. 33, n. 1, p. 1–15, 2018. Citado 5 vezes nas páginas 35, 36, 39, 40 e 44.

ROLLAND-NEVIERE, X.; DOËRR, G.; ALLIEZ, P. Triangle surface mesh watermarking based on a constrained optimization framework. **IEEE Transactions on Information Forensics and Security**, IEEE, v. 9, n. 9, p. 1491–1501, 2014. Citado na página 31.

SANDRI, G.; QUEIROZ, R. L. de; CHOU, P. A. Compression of plenoptic point clouds. **IEEE Transactions on Image Processing**, v. 28, n. 3, p. 1419–1427, 2019. Citado na página 28.

SANDRYHAILA, A.; MOURA, J. M. F. Big data analysis with signal process. on graphs: Representation and process. of massive data sets with irreg. struct. **IEEE Signal Process. Mag.**, IEEE, v. 31, n. 5, p. 80–90, Sep. 2014. Citado na página 39.

SANDRYHAILA, A.; MOURA, J. M. F. Discrete signal processing on graphs: Frequency analysis. **IEEE Trans. Signal Process.**, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 62, n. 12, p. 3042–3054, Jun. 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109%2Ftsp.2014.2321121>>. Citado na página 39.

SANTIS, R. D. et al. A comparative analysis of 3-d representations of urban flood map in virtual environments for hazard communication purposes. In: **EDP SCIENCES. E3S Web of Conferences**. [S.l.], 2018. v. 40, p. 06037. Citado na página 28.

SCHNABEL, R.; MÖSER, S.; KLEIN, R. Fast vector quantization for efficient rendering of compressed point-clouds. **Computers & Graphics**, Elsevier, v. 32, n. 2, p. 246–259, 2008. Citado na página 28.

SCHWARZ, S. et al. Emerging mpeg standards for point cloud compression. **IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems**, IEEE, v. 9, n. 1, p. 133–148, 2018. Citado na página 115.

SHAO, J. et al. Automated markerless registration of point clouds from TLS and structured light scanner for heritage documentation. **Journal of Cultural Heritage**, Elsevier, 2018. Citado na página 31.

SHUMAN, D. I. et al. The emerging field of signal processing on graphs: Extending high-dimensional data analysis to networks and other irregular domains. **IEEE Signal Process. Mag.**, IEEE, v. 30, n. 3, p. 83–98, 2013. DOI: [10.1109/MSP.2012.2235192](https://doi.org/10.1109/MSP.2012.2235192). Citado 4 vezes nas páginas 35, 36, 39 e 40.

SHUMAN, D. I.; RICAUD, B.; VANDERGHEYNST, P. A windowed graph Fourier transform. In: IEEE. **Statistical Signal Processing Workshop (SSP), 2012 IEEE**. [S.l.], 2012. p. 133–136. Citado na página 39.

SKETCHFAB. 2019. Acessado em: 27/06/2019. Disponível em: <<http://sketchfab.com>>. Citado na página 53.

SU, Q. et al. Color image blind watermarking scheme based on qr decomposition. **Signal Processing**, Elsevier, v. 94, p. 219–235, 2014. Citado 3 vezes nas páginas 56, 68 e 71.

SVANSTROM, F. **Properties of a generalized Arnold's discrete cat map**. Dissertação (Mestrado) — Department of Mathematics of Linnaeus University, Sweden, June 2014. Citado na página 79.

THE Stanford 3D Scanning Repository. 2019. Acessado em: 27/06/2019. Disponível em: <<http://graphics.stanford.edu/data/3Dscanrep/>>. Citado 2 vezes nas páginas 40 e 53.

THE USC-SIPI Image Database. 2019. Acessado em: 09/04/2019. Disponível em: <<http://sipi.usc.edu/database/database.php>>. Citado 2 vezes nas páginas 97 e 99.

TIAN, H. et al. Spread spectrum-based multi-bit watermarking for free-view video. In: SPRINGER. **International Workshop on Digital Watermarking**. [S.l.], 2011. p. 156–166. Citado na página 35.

TOSCHI, I. et al. Oblique photogrammetry supporting 3D urban reconstruction of complex scenarios. **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 42, p. 519–526, 2017. Citado na página 35.

TSAI, Y.-Y. An efficient 3D information hiding algorithm based on sampling concepts. **Multimedia Tools and Applications**, Springer, v. 75, n. 13, p. 7891–7907, 2016. Citado na página 29.

UNIVERSITY of São Paulo Point Cloud DataSet. 2017. Acessado em: 21/06/2019. Disponível em: <<http://uspaulopc.di.ubi.pt>>. Citado na página 27.

VELODYNE Lidar HDL-64E. 2019. Acessado em: 21/06/2019. Disponível em: <<https://velodynelidar.com/hdl-64e.html>>. Citado na página 28.

VIOLA, I.; ŘEŘÁBEK, M.; EBRAHIMI, T. Comparison and evaluation of light field image coding approaches. **IEEE Journal of selected topics in signal processing**, IEEE, v. 11, n. 7, p. 1092–1106, 2017. Citado na página 28.

VIOLA, I.; RERABEK, M.; TOURADJ, E. Comparison and evaluation of light field image coding approaches. **IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing**, IEEE, v. 11, n. 7, p. 1092–1106, 2017. Citado na página 28.

WANG, C.; NI, J.; HUANG, J. An informed watermarking scheme using hidden markov model in the wavelet domain. **IEEE Transactions on Information Forensics and Security**, IEEE, v. 7, n. 3, p. 853–867, 2012. Citado 3 vezes nas páginas 56, 68 e 71.

WANG, C.-M.; WANG, P.-C. Data hiding approach for point-sampled geometry. **IEICE Transactions on Communications**, The Institute of Electronics, Information and Communication Engineers, v. 88, n. 1, p. 190–194, 2005. Citado na página 29.

WANG, H. et al. Pedestrian recognition and tracking using 3D LiDAR for autonomous vehicle. **Robotics and Autonomous Systems**, Elsevier, v. 88, p. 71–78, 2017. Citado na página 31.

WANG, J. et al. Modeling indoor scenes with repetitions from 3D raw point data. **Computer-Aided Design**, Elsevier, v. 94, p. 1–15, 2018. Citado na página 31.

WANG, L. et al. Graph attention convolution for point cloud semantic segmentation. In: **Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition**. [S.l.: s.n.], 2019. p. 10296–10305. Citado na página 115.

WANG, T.-C. et al. A 4D light-field dataset and CNN architectures for material recognition. In: SPRINGER. **European Conference on Computer Vision**. [S.l.], 2016. p. 121–138. Citado na página 34.

WANG, Z. et al. Image quality assessment: from error visibility to structural similarity. **IEEE transactions on image processing**, IEEE, v. 13, n. 4, p. 600–612, 2004. Citado na página 100.

WONG, P. W.; MEMON, N. Secret and public key image watermarking schemes for image authentication and ownership verification. **IEEE transactions on image processing**, IEEE, v. 10, n. 10, p. 1593–1601, 2001. Citado na página 29.

WU, G. et al. Light field image processing: An overview. **IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing**, IEEE, v. 11, n. 7, p. 926–954, 2017. Citado 3 vezes nas páginas 24, 25 e 33.

XIAOQING, F. A watermarking for 3D point cloud model using distance normalization modulation. In: IEEE. **Computer Science and Network Technology (ICCSNT), 2015 4th International Conference on**. [S.l.], 2015. v. 1, p. 1449–1452. Citado 7 vezes nas páginas 29, 32, 33, 56, 68, 70 e 71.

XU, Y. et al. Transcut: Transparent object segmentation from a light-field image. In: **Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision**. [S.l.: s.n.], 2015. p. 3442–3450. Citado na página 34.

YANG, T. et al. A new hybrid synthetic aperture imaging model for tracking and seeing people through occlusion. **IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology**, IEEE, v. 23, n. 9, p. 1461–1475, 2013. Citado na página 34.

YANG, Y. et al. A 3D steganalytic algorithm and steganalysis-resistant watermarking. **IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics**, IEEE, v. 23, n. 2, p. 1002–1013, 2017. Citado na página 31.

YUE, X. et al. A lidar point cloud generator: from a virtual world to autonomous driving. In: ACM. **Proceedings of the 2018 ACM on International Conference on Multimedia Retrieval**. [S.l.], 2018. p. 458–464. Citado na página 28.

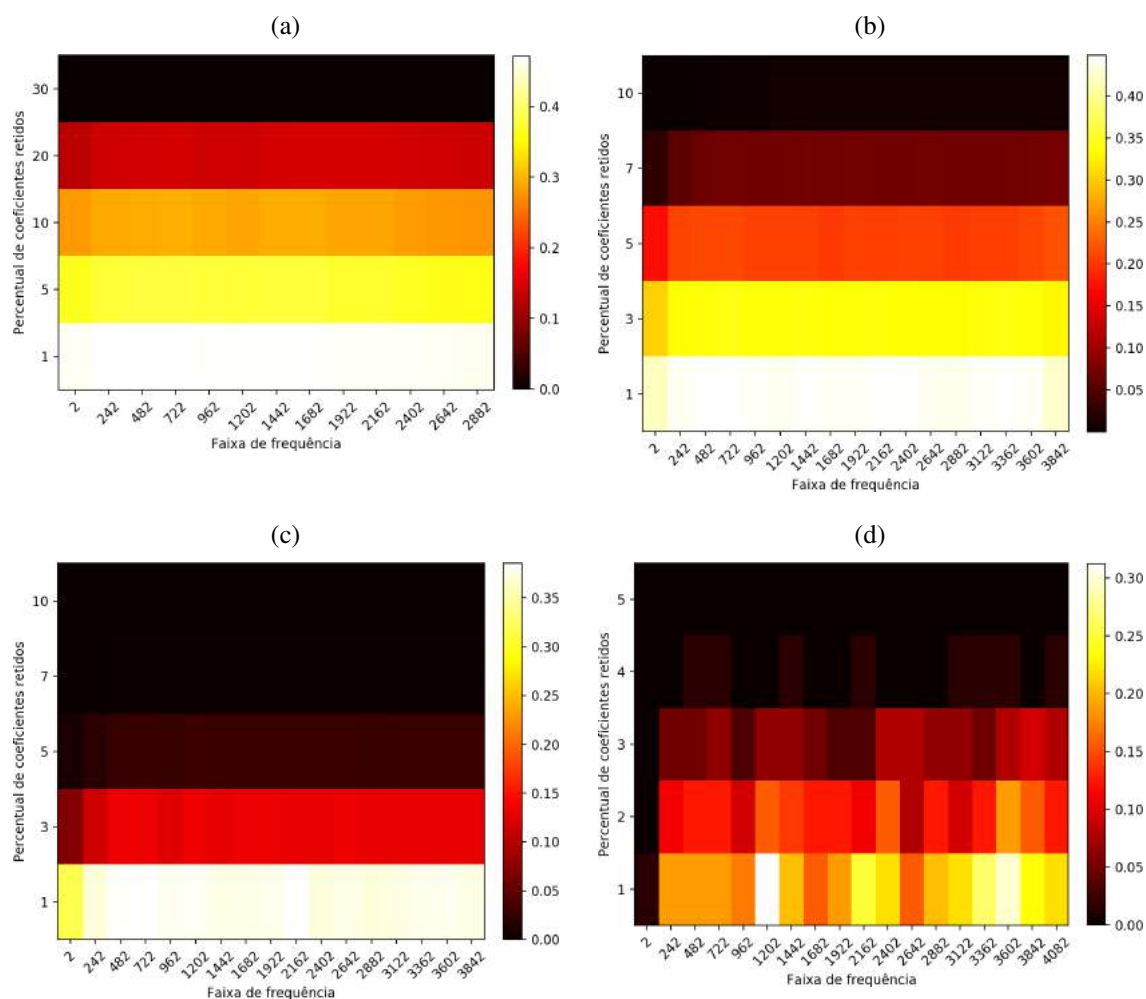
ZENG, Y. et al. Rt3d: Real-time 3-d vehicle detection in lidar point cloud for autonomous driving. **IEEE Robotics and Automation Letters**, IEEE, v. 3, n. 4, p. 3434–3440, 2018. Citado na página 31.

ZHANG, C.; CHEN, T. A self-reconfigurable camera array. In: EUROGRAPHICS. **Eurographics Symposium on Rendering**. [S.l.], 2004. p. 243–254. Citado na página 25.

ZHOU, Y.; PANETTA, K.; AGAIAN, S. Image encryption using discrete parametric cosine transform. In: IEEE. **2009 Conference Record of the Forty-Third Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers**. [S.l.], 2009. p. 395–399. Citado na página 115.

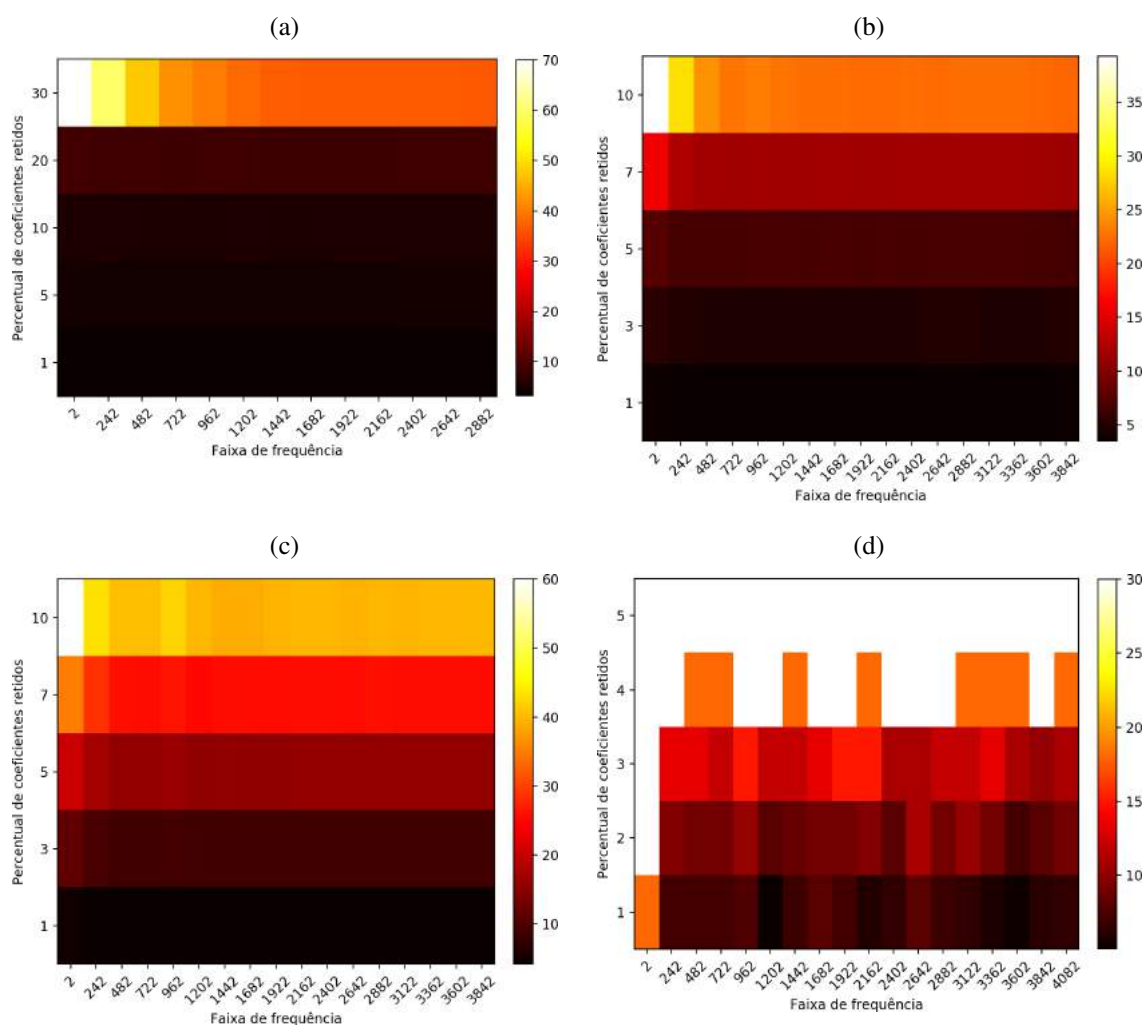
## APÊNDICE A – RESULTADOS ADICIONAIS PARA IMAGENS DE *LIGHT FIELD*

Figura A.1 – Mapa de cores com informação de BER (*bit error rate*) para marcas de diferentes tamanhos – (a)  $2048 \times 2048$ , (b)  $1024 \times 1024$ , (c)  $512 \times 512$  e (d)  $8 \times 8$  – extraídas do *light field Black Fence* após compressão com diferentes percentuais de coeficientes retidos. Os valores de BER são indicados na barra lateral de acordo com a intensidade da cor.



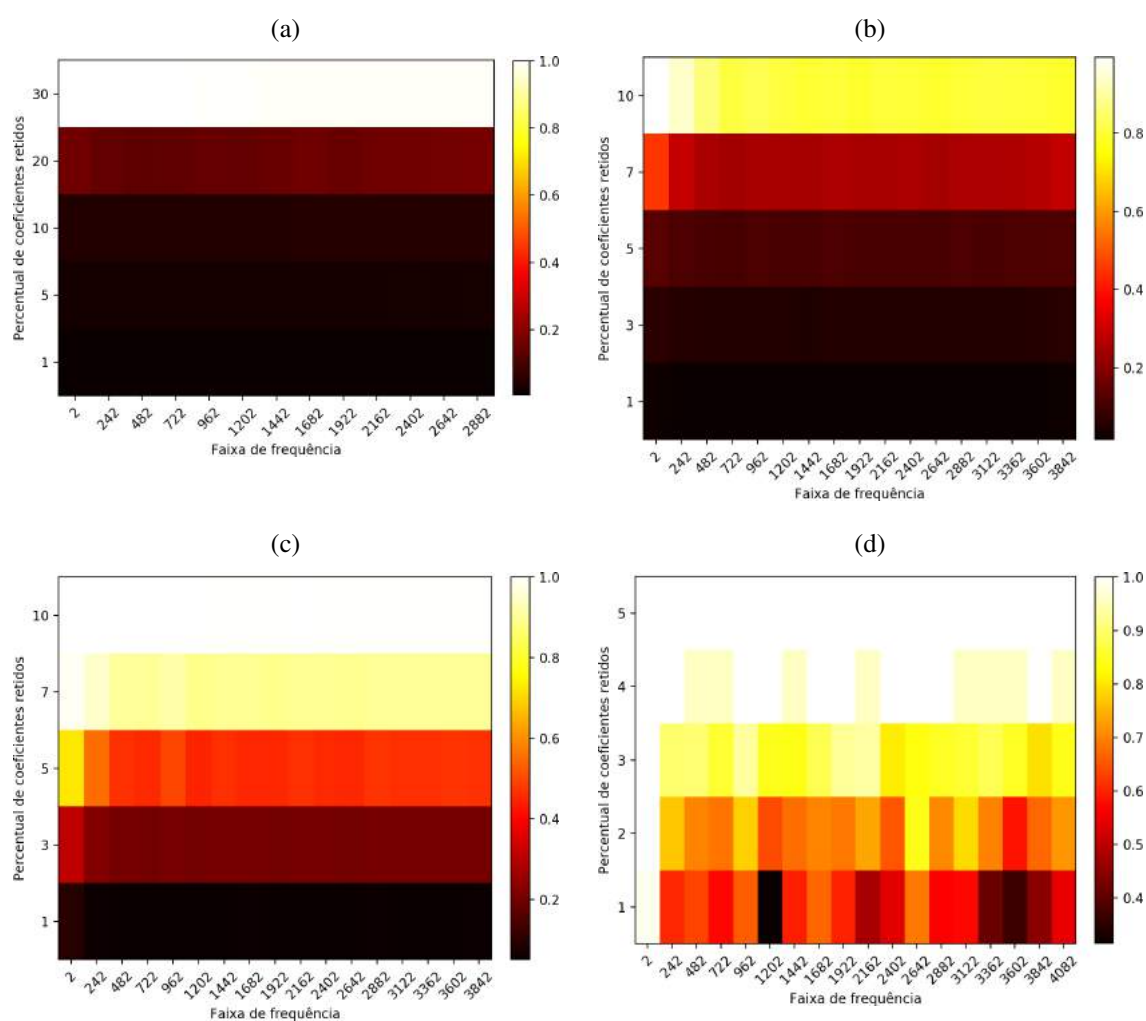
Fonte: O Autor (2020).

Figura A.2 – Mapa de cores com informação de PSNR (*peak signal-to-noise ratio*) para marcas de diferentes tamanhos – (a)  $2048 \times 2048$ , (b)  $1024 \times 1024$ , (c)  $512 \times 512$  e (d)  $8 \times 8$  – extraídas do *light field Black Fence* após compressão com diferentes percentuais de coeficientes retidos. Os valores de PSNR são indicados na barra lateral de acordo com a intensidade da cor.



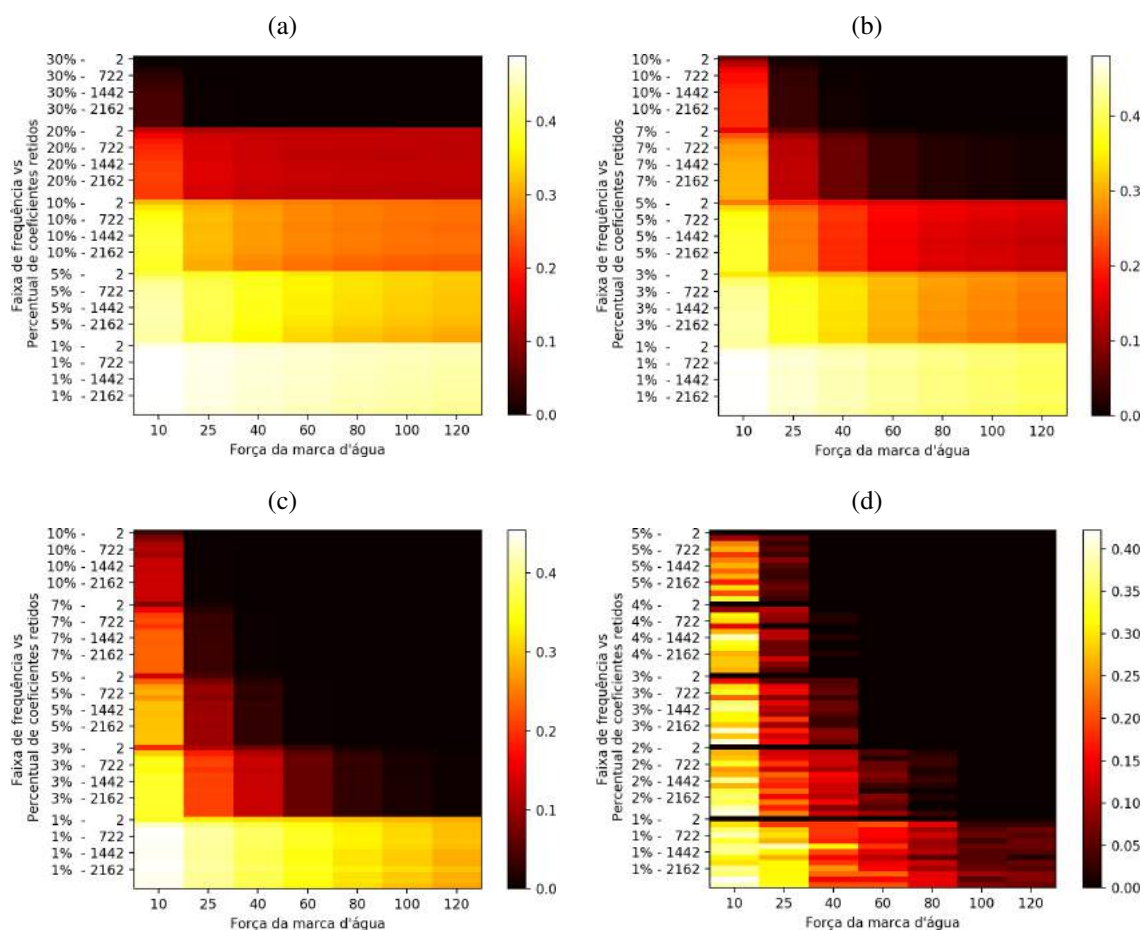
Fonte: O Autor (2020).

Figura A.3 – Mapa de cores com informação de SSIM (*structural similarity*) para marcas de diferentes tamanhos – (a)  $2048 \times 2048$ , (b)  $1024 \times 1024$ , (c)  $512 \times 512$  e (d)  $8 \times 8$  – extraídas do *light field Black Fence* após compressão com diferentes percentuais de coeficientes retidos. Os valores de SSIM são indicados na barra lateral de acordo com a intensidade da cor.



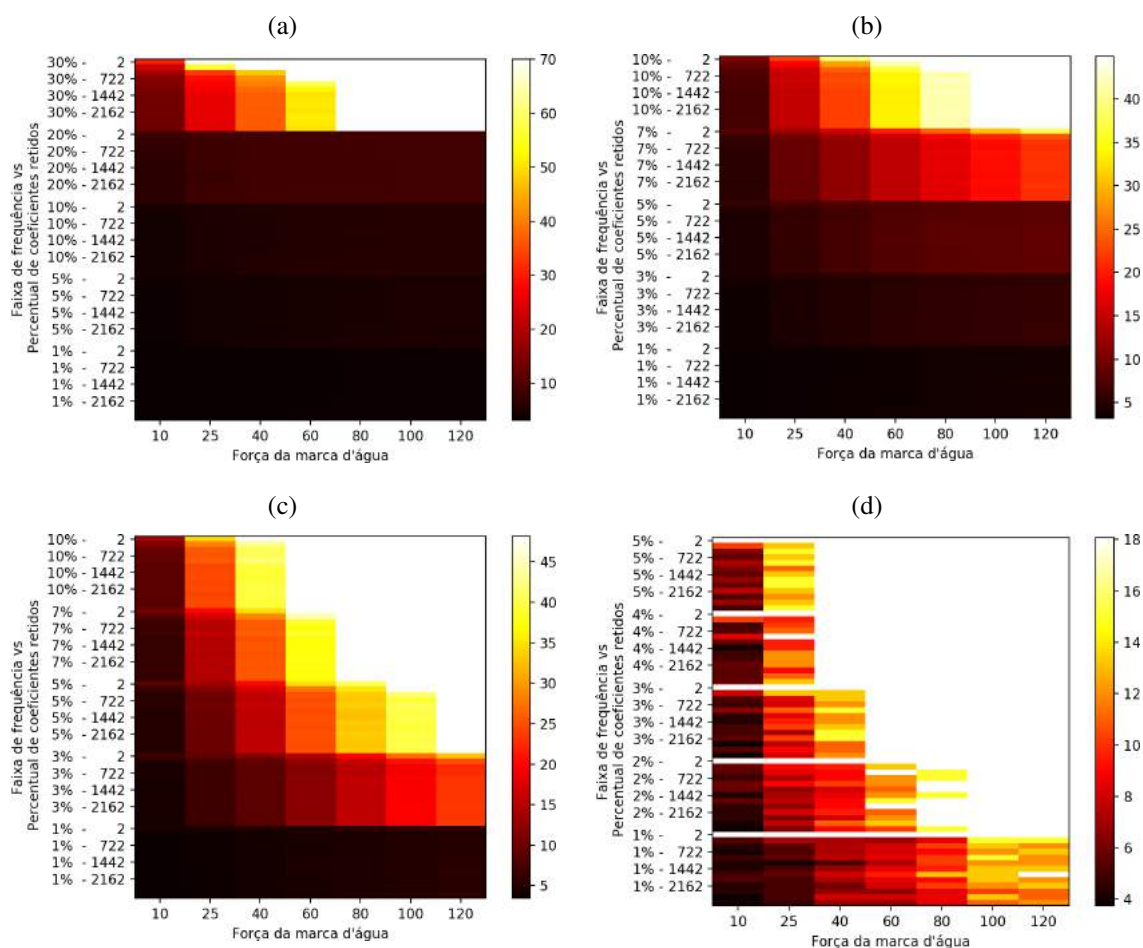
Fonte: O Autor (2020).

Figura A.4 – Mapa de cores com informação de BER (*bit error rate*) para marcas de diferentes tamanhos – (a)  $2048 \times 2048$ , (b)  $1024 \times 1024$ , (c)  $512 \times 512$  e (d)  $8 \times 8$ – extraídas do *light field Black Fence* após compressão com diferentes percentuais de coeficientes retidos, faixas de frequência e valores de força de inserção. Os valores de BER são indicados na barra lateral de acordo com a intensidade da cor.



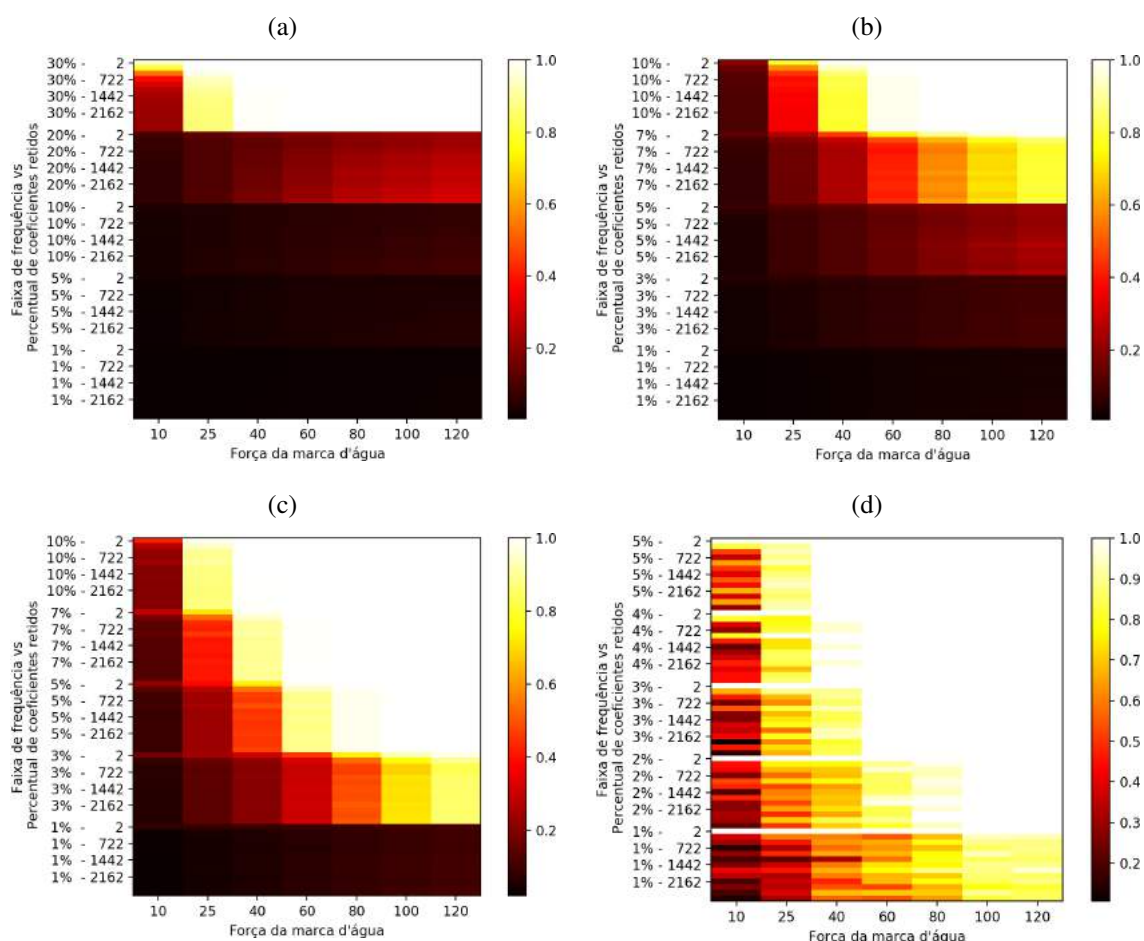
Fonte: O Autor (2020).

Figura A.5 – Mapa de cores com informação de PSNR (*peak signal-to-noise ratio*) para marcas de diferentes tamanhos – (a)  $2048 \times 2048$ , (b)  $1024 \times 1024$ , (c)  $512 \times 512$  e (d)  $8 \times 8$  – extraídas do *light field Black Fence* após compressão com diferentes percentuais de coeficientes retidos, faixas de frequência e valores de força de inserção. Os valores de PSNR são indicados na barra lateral de acordo com a intensidade da cor.



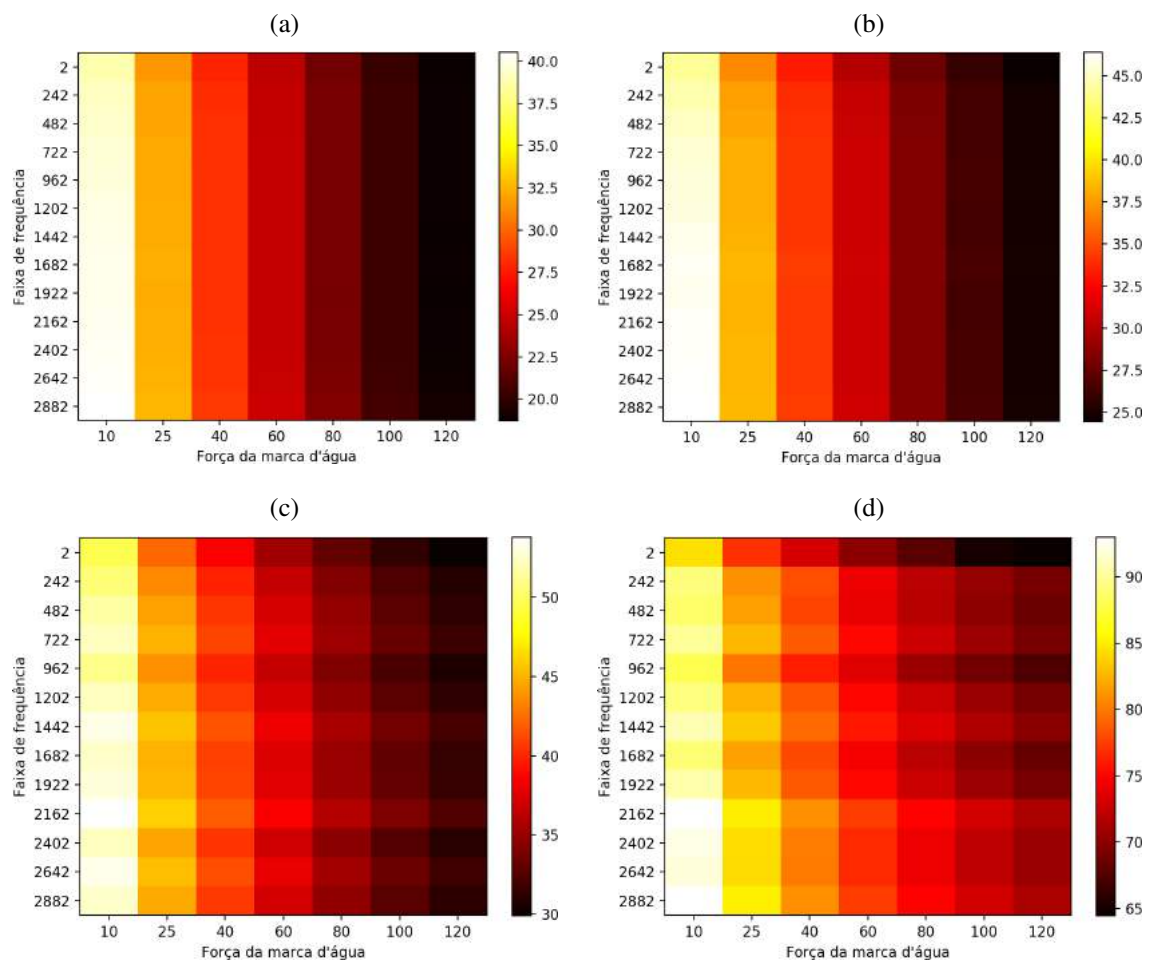
Fonte: O Autor (2020).

Figura A.6 – Mapa de cores com informação de SSIM (*structural similarity*) para marcas de diferentes tamanhos – (a)  $2048 \times 2048$ , (b)  $1024 \times 1024$ , (c)  $512 \times 512$  e (d)  $8 \times 8$  – extraídas do *light field Black Fence* após compressão com diferentes percentuais de coeficientes retidos, faixas de frequência e valores de força de inserção. Os valores de SSIM são indicados na barra lateral de acordo com a intensidade da cor.



Fonte: O Autor (2020).

Figura A.7 – Mapa de cores com informação de  $\text{PSNR}_{\text{médio}}$  (*peak signal-to-noise ratio*) de imagens marcadas com marcas de diferentes tamanhos – (a)  $2048 \times 2048$ , (b)  $1024 \times 1024$ , (c)  $512 \times 512$  e (d)  $8 \times 8$  – para diferentes faixas de frequência e valores de força de inserção. Os valores de  $\text{PSNR}_{\text{médio}}$  são indicados na barra lateral de acordo com a intensidade da cor.



Fonte: O Autor (2020).

Tabela A.1 – Média, para as 30 imagens de *light field* utilizadas como teste, dos resultados de BER de marcas d'água de tamanho  $8 \times 8$  extraídas após aplicação do filtro da média. Os resultados são apresentados de acordo com o tamanho do filtro quadrado utilizado (coluna “Parâmetro”) e o PSNR (dB) obtido após a inserção da marca. OPM é referente ao método de Ordenação pelas Médias e V3DD ao método de Varredura 3D Diagonal; os métodos foram aplicados sem e com replicação ( $10\times$ ).

| Parâmetro    | PSNR (dB) | BER    |                |        |                 |                      |
|--------------|-----------|--------|----------------|--------|-----------------|----------------------|
|              |           | OPM    | OPM $10\times$ | V3DD   | V3DD $10\times$ | Ansari <i>et al.</i> |
| 3            | 67,0      | 0,0000 | 0,0000         | 0,0000 | 0,0000          | 0,2969               |
|              | 64,5      | 0,0000 | 0,0000         | 0,0000 | 0,0000          | 0,2188               |
|              | 62,5      | 0,0000 | 0,0000         | 0,0000 | 0,0000          | 0,1406               |
|              | 61,0      | 0,0000 | 0,0000         | 0,0000 | 0,0000          | 0,1250               |
|              | 59,5      | 0,0000 | 0,0000         | 0,0000 | 0,0000          | 0,0938               |
| 5            | 67,0      | 0,0000 | 0,0000         | 0,0000 | 0,0000          | 0,4531               |
|              | 64,5      | 0,0000 | 0,0000         | 0,0000 | 0,0000          | 0,4219               |
|              | 62,5      | 0,0000 | 0,0000         | 0,0000 | 0,0000          | 0,4062               |
|              | 61,0      | 0,0000 | 0,0000         | 0,0000 | 0,0000          | 0,3906               |
|              | 59,5      | 0,0000 | 0,0000         | 0,0000 | 0,0000          | 0,3906               |
| 7            | 67,0      | 0,0000 | 0,0156         | 0,0000 | 0,0000          | 0,4375               |
|              | 64,5      | 0,0000 | 0,0000         | 0,0000 | 0,0000          | 0,4219               |
|              | 62,5      | 0,0000 | 0,0000         | 0,0000 | 0,0000          | 0,4219               |
|              | 61,0      | 0,0000 | 0,0000         | 0,0000 | 0,0000          | 0,4062               |
|              | 59,5      | 0,0000 | 0,0000         | 0,0000 | 0,0000          | 0,4062               |
| 9            | 67,0      | 0,0156 | 0,0312         | 0,0000 | 0,0000          | 0,4531               |
|              | 64,5      | 0,0156 | 0,0000         | 0,0000 | 0,0000          | 0,4375               |
|              | 62,5      | 0,0000 | 0,0000         | 0,0000 | 0,0000          | 0,4375               |
|              | 61,0      | 0,0000 | 0,0000         | 0,0000 | 0,0000          | 0,4375               |
|              | 59,5      | 0,0000 | 0,0000         | 0,0000 | 0,0000          | 0,4375               |
| <b>Média</b> |           | 0,0016 | 0,0023         | 0,0000 | 0,0000          | 0,3617               |

Tabela A.2 – Média, para as 30 imagens de *light field* utilizadas como teste, dos resultados de BER de marcas d'água de tamanho  $512 \times 512$  extraídas após aplicação do filtro da média. Os resultados são apresentados de acordo com o tamanho do filtro quadrado utilizado (coluna “Parâmetro”) e o PSNR (dB) obtido após a inserção da marca. OPM é referente ao método de Ordenação pelas Médias e V3DD ao método de Varredura 3D Diagonal; os métodos foram aplicados sem e com replicação ( $10\times$ ).

| Parâmetro | PSNR (dB) | BER    |                |        |                 |                      |
|-----------|-----------|--------|----------------|--------|-----------------|----------------------|
|           |           | OPM    | OPM $10\times$ | V3DD   | V3DD $10\times$ | Ansari <i>et al.</i> |
| 3         | 30,7      | 0,2304 | 0,3526         | 0,3201 | 0,3434          | 0,2634               |
|           | 28,2      | 0,2300 | 0,3523         | 0,3194 | 0,3436          | 0,2054               |
|           | 26,3      | 0,2293 | 0,3519         | 0,3188 | 0,3433          | 0,1610               |
|           | 24,7      | 0,2290 | 0,3520         | 0,3181 | 0,3431          | 0,1280               |
|           | 23,9      | 0,2289 | 0,3520         | 0,3177 | 0,3432          | 0,1148               |
| 5         | 30,7      | 0,4497 | 0,4581         | 0,4467 | 0,4459          | 0,4486               |
|           | 28,2      | 0,4500 | 0,4583         | 0,4471 | 0,4457          | 0,4295               |
|           | 26,3      | 0,4499 | 0,4584         | 0,4476 | 0,4458          | 0,4106               |
|           | 24,7      | 0,4498 | 0,4588         | 0,4481 | 0,4460          | 0,3921               |
|           | 23,9      | 0,4498 | 0,4587         | 0,4483 | 0,4459          | 0,3833               |
| 7         | 30,7      | 0,4199 | 0,4720         | 0,4625 | 0,4571          | 0,4846               |
|           | 28,2      | 0,4182 | 0,4721         | 0,4617 | 0,4569          | 0,4764               |
|           | 26,3      | 0,4170 | 0,4724         | 0,4612 | 0,4567          | 0,4686               |
|           | 24,7      | 0,4165 | 0,4723         | 0,4607 | 0,4568          | 0,4604               |
|           | 23,9      | 0,4163 | 0,4723         | 0,4606 | 0,4567          | 0,4561               |
| 9         | 30,7      | 0,4786 | 0,4765         | 0,4798 | 0,4709          | 0,4963               |
|           | 28,2      | 0,4786 | 0,4763         | 0,4797 | 0,4707          | 0,4917               |
|           | 26,3      | 0,4787 | 0,4761         | 0,4795 | 0,4704          | 0,4867               |
|           | 24,7      | 0,4785 | 0,4759         | 0,4798 | 0,4701          | 0,4818               |
|           | 23,9      | 0,4786 | 0,4763         | 0,4798 | 0,4701          | 0,4795               |
| Média     |           | 0,3939 | 0,4398         | 0,4269 | 0,4291          | 0,3859               |

Tabela A.3 – Média, para as 30 imagens de *light field* utilizadas como teste, dos resultados de BER de marcas d’água de tamanho  $8 \times 8$  extraídas após aplicação do filtro Gaussiano. Os resultados são apresentados de acordo com o desvio padrão utilizado (coluna “Parâmetro”) na função Gaussiana e o PSNR (dB) obtido após a inserção da marca. OPM é referente ao método de Ordenação pelas Médias e V3DD ao método de Varredura 3D Diagonal; os métodos foram aplicados sem e com replicação ( $10\times$ ).

| Parâmetro | PSNR (dB) | BER    |                |        |                 |                      |
|-----------|-----------|--------|----------------|--------|-----------------|----------------------|
|           |           | OPM    | OPM $10\times$ | V3DD   | V3DD $10\times$ | Ansari <i>et al.</i> |
| 0,5       | 67,0      | 0,1875 | 0,0000         | 0,1719 | 0,0000          | 0,0156               |
|           | 64,5      | 0,1875 | 0,0000         | 0,1875 | 0,0000          | 0,0312               |
|           | 62,5      | 0,1719 | 0,0000         | 0,1562 | 0,0000          | 0,0625               |
|           | 61,0      | 0,2188 | 0,0312         | 0,1719 | 0,0000          | 0,0625               |
|           | 59,5      | 0,2969 | 0,0156         | 0,1250 | 0,0000          | 0,0625               |
| 1         | 67,0      | 0,2500 | 0,0000         | 0,1562 | 0,0000          | 0,0469               |
|           | 64,5      | 0,2656 | 0,0000         | 0,1250 | 0,0000          | 0,0312               |
|           | 62,5      | 0,2344 | 0,0000         | 0,1562 | 0,0000          | 0,0625               |
|           | 61,0      | 0,2969 | 0,0156         | 0,1875 | 0,0000          | 0,0625               |
|           | 59,5      | 0,3594 | 0,0312         | 0,1875 | 0,0000          | 0,0938               |
| 1,5       | 67,0      | 0,2656 | 0,0000         | 0,1094 | 0,0000          | 0,1875               |
|           | 64,5      | 0,2812 | 0,0000         | 0,2031 | 0,0000          | 0,1562               |
|           | 62,5      | 0,3281 | 0,0156         | 0,1094 | 0,0000          | 0,1562               |
|           | 61,0      | 0,3438 | 0,0156         | 0,1719 | 0,0000          | 0,1406               |
|           | 59,5      | 0,4219 | 0,0312         | 0,1562 | 0,0000          | 0,1562               |
| 2         | 67,0      | 0,3750 | 0,2812         | 0,1094 | 0,0000          | 0,3125               |
|           | 64,5      | 0,4062 | 0,2031         | 0,2188 | 0,0000          | 0,3125               |
|           | 62,5      | 0,4219 | 0,2500         | 0,2031 | 0,0000          | 0,3125               |
|           | 61,0      | 0,4219 | 0,2812         | 0,1719 | 0,0000          | 0,2656               |
|           | 59,5      | 0,4375 | 0,2656         | 0,1875 | 0,0000          | 0,2656               |
| Média     |           | 0,3086 | 0,0719         | 0,1633 | 0,0000          | 0,1398               |

Tabela A.4 – Média, para as 30 imagens de *light field* utilizadas como teste, dos resultados de BER de marcas d’água de tamanho  $512 \times 512$  extraídas após aplicação do filtro Gaussiano. Os resultados são apresentados de acordo com o desvio padrão utilizado (coluna “Parâmetro”) na função Gaussiana e o PSNR (dB) obtido após a inserção da marca. OPM é referente ao método de Ordenação pelas Médias e V3DD ao método de Varredura 3D Diagonal; os métodos foram aplicados sem e com replicação ( $10\times$ ).

| Parâmetro | PSNR (dB) | BER    |                |        |                 |                      |
|-----------|-----------|--------|----------------|--------|-----------------|----------------------|
|           |           | OPM    | OPM $10\times$ | V3DD   | V3DD $10\times$ | Ansari <i>et al.</i> |
| 0,5       | 30,7      | 0,2939 | 0,1062         | 0,2961 | 0,1064          | 0,0639               |
|           | 28,2      | 0,3107 | 0,1175         | 0,3012 | 0,1180          | 0,1001               |
|           | 26,3      | 0,3077 | 0,1306         | 0,3034 | 0,1299          | 0,1534               |
|           | 24,7      | 0,2873 | 0,1634         | 0,3113 | 0,1646          | 0,2071               |
|           | 23,9      | 0,2856 | 0,1923         | 0,3257 | 0,1922          | 0,2310               |
| 1         | 30,7      | 0,4249 | 0,3492         | 0,4270 | 0,3332          | 0,3190               |
|           | 28,2      | 0,4522 | 0,3858         | 0,4494 | 0,3662          | 0,3643               |
|           | 26,3      | 0,4888 | 0,4227         | 0,4731 | 0,4008          | 0,4179               |
|           | 24,7      | 0,4810 | 0,4974         | 0,4958 | 0,4727          | 0,4562               |
|           | 23,9      | 0,4665 | 0,4672         | 0,4867 | 0,4917          | 0,4690               |
| 1,5       | 30,7      | 0,4756 | 0,4181         | 0,4651 | 0,4065          | 0,4138               |
|           | 28,2      | 0,4955 | 0,4387         | 0,4773 | 0,4249          | 0,4407               |
|           | 26,3      | 0,4825 | 0,4587         | 0,4908 | 0,4423          | 0,4712               |
|           | 24,7      | 0,4655 | 0,4988         | 0,4958 | 0,4835          | 0,4919               |
|           | 23,9      | 0,4575 | 0,4853         | 0,4851 | 0,4970          | 0,4989               |
| 2         | 30,7      | 0,4976 | 0,4630         | 0,4825 | 0,4570          | 0,4525               |
|           | 28,2      | 0,4844 | 0,4738         | 0,4932 | 0,4669          | 0,4752               |
|           | 26,3      | 0,4686 | 0,4888         | 0,4978 | 0,4785          | 0,4951               |
|           | 24,7      | 0,4597 | 0,4867         | 0,4884 | 0,4937          | 0,4921               |
|           | 23,9      | 0,4549 | 0,4747         | 0,4797 | 0,4822          | 0,4882               |
| Média     |           | 0,4270 | 0,3759         | 0,4363 | 0,3704          | 0,3751               |

Tabela A.5 – Média, para as 30 imagens de *light field* utilizadas como teste, dos resultados de BER de marcas d’água de tamanho  $8 \times 8$  extraídas após aplicação do filtro da mediana. Os resultados são apresentados de acordo com o tamanho do filtro quadrado (coluna “Parâmetro”) utilizado e o PSNR (dB) obtido após a inserção da marca. OPM é referente ao método de Ordenação pelas Médias e V3DD ao método de Varredura 3D Diagonal; os métodos foram aplicados sem e com replicação ( $10\times$ ).

| Parâmetro | PSNR (dB) | BER    |                |        |                 |                      |
|-----------|-----------|--------|----------------|--------|-----------------|----------------------|
|           |           | OPM    | OPM $10\times$ | V3DD   | V3DD $10\times$ | Ansari <i>et al.</i> |
| 3         | 67,0      | 0,0000 | 0,0000         | 0,0000 | 0,0000          | 0,4375               |
|           | 64,5      | 0,0000 | 0,0000         | 0,0000 | 0,0000          | 0,4219               |
|           | 62,5      | 0,0000 | 0,0000         | 0,0000 | 0,0000          | 0,4219               |
|           | 61,0      | 0,0000 | 0,0000         | 0,0000 | 0,0000          | 0,4062               |
|           | 59,5      | 0,0000 | 0,0000         | 0,0000 | 0,0000          | 0,3906               |
| 5         | 67,0      | 0,2812 | 0,1719         | 0,0000 | 0,0000          | 0,5000               |
|           | 64,5      | 0,2656 | 0,1562         | 0,0000 | 0,0000          | 0,5000               |
|           | 62,5      | 0,2812 | 0,1562         | 0,0000 | 0,0000          | 0,5000               |
|           | 61,0      | 0,2812 | 0,1250         | 0,0000 | 0,0000          | 0,5000               |
|           | 59,5      | 0,2812 | 0,1250         | 0,0000 | 0,0000          | 0,5000               |
| 7         | 67,0      | 0,3438 | 0,2656         | 0,0156 | 0,0000          | 0,4062               |
|           | 64,5      | 0,3125 | 0,2656         | 0,0156 | 0,0000          | 0,4062               |
|           | 62,5      | 0,2969 | 0,1719         | 0,0000 | 0,0000          | 0,4062               |
|           | 61,0      | 0,2969 | 0,1875         | 0,0000 | 0,0000          | 0,4062               |
|           | 59,5      | 0,2812 | 0,1562         | 0,0000 | 0,0000          | 0,4062               |
| 9         | 67,0      | 0,3438 | 0,3438         | 0,0000 | 0,0000          | 0,4219               |
|           | 64,5      | 0,3438 | 0,2344         | 0,0000 | 0,0000          | 0,4219               |
|           | 62,5      | 0,3125 | 0,2344         | 0,0000 | 0,0000          | 0,4219               |
|           | 61,0      | 0,2812 | 0,2188         | 0,0000 | 0,0000          | 0,4219               |
|           | 59,5      | 0,2344 | 0,1719         | 0,0000 | 0,0000          | 0,4219               |
| Média     |           | 0,2219 | 0,1492         | 0,0016 | 0,0000          | 0,4359               |

Tabela A.6 – Média, para as 30 imagens de *light field* utilizadas como teste, dos resultados de BER de marcas d’água de tamanho  $512 \times 512$  extraídas após aplicação do filtro da mediana. Os resultados são apresentados de acordo com o tamanho do filtro quadrado utilizado (coluna “Parâmetro”) e o PSNR (dB) obtido após a inserção da marca. OPM é referente ao método de Ordenação pelas Médias e V3DD ao método de Varredura 3D Diagonal; os métodos foram aplicados sem e com replicação ( $10\times$ ).

| Parâmetro | PSNR (dB) | BER    |                |        |                 |                      |
|-----------|-----------|--------|----------------|--------|-----------------|----------------------|
|           |           | OPM    | OPM $10\times$ | V3DD   | V3DD $10\times$ | Ansari <i>et al.</i> |
| 3         | 30,7      | 0,2065 | 0,3361         | 0,2923 | 0,3230          | 0,4506               |
|           | 28,2      | 0,2067 | 0,3383         | 0,2930 | 0,3250          | 0,4573               |
|           | 26,3      | 0,2071 | 0,3401         | 0,2938 | 0,3271          | 0,4615               |
|           | 24,7      | 0,2077 | 0,3428         | 0,2947 | 0,3293          | 0,4640               |
|           | 23,9      | 0,2081 | 0,3433         | 0,2954 | 0,3303          | 0,4650               |
| 5         | 30,7      | 0,4224 | 0,4403         | 0,4284 | 0,4244          | 0,3943               |
|           | 28,2      | 0,4238 | 0,4421         | 0,4297 | 0,4253          | 0,3760               |
|           | 26,3      | 0,4252 | 0,4430         | 0,4307 | 0,4279          | 0,3672               |
|           | 24,7      | 0,4261 | 0,4449         | 0,4325 | 0,4295          | 0,3652               |
|           | 23,9      | 0,4266 | 0,4457         | 0,4331 | 0,4304          | 0,3663               |
| 7         | 30,7      | 0,4195 | 0,4610         | 0,4529 | 0,4454          | 0,4655               |
|           | 28,2      | 0,4175 | 0,4619         | 0,4532 | 0,4462          | 0,4489               |
|           | 26,3      | 0,4166 | 0,4624         | 0,4541 | 0,4474          | 0,4333               |
|           | 24,7      | 0,4172 | 0,4634         | 0,4543 | 0,4490          | 0,4197               |
|           | 23,9      | 0,4167 | 0,4645         | 0,4548 | 0,4492          | 0,4140               |
| 9         | 30,7      | 0,4713 | 0,4633         | 0,4704 | 0,4571          | 0,4929               |
|           | 28,2      | 0,4723 | 0,4636         | 0,4694 | 0,4578          | 0,4857               |
|           | 26,3      | 0,4726 | 0,4664         | 0,4703 | 0,4576          | 0,4772               |
|           | 24,7      | 0,4732 | 0,4662         | 0,4717 | 0,4590          | 0,4688               |
|           | 23,9      | 0,4737 | 0,4682         | 0,4716 | 0,4598          | 0,4644               |
| Média     |           | 0,3805 | 0,4279         | 0,4123 | 0,4150          | 0,4369               |

Tabela A.7 – Média, para as 30 imagens de *light field* utilizadas como teste, dos resultados de BER de marcas d’água de tamanho  $8 \times 8$  extraídas após aplicação de ruído Gaussiano. Os resultados são apresentados de acordo com a variância utilizada (coluna “Parâmetro”) na distribuição Gaussiana e o PSNR (dB) obtido após a inserção da marca. OPM é referente ao método de Ordenação pelas Médias e V3DD ao método de Varredura 3D Diagonal; os métodos foram aplicados sem e com replicação ( $10\times$ ).

| Parâmetro | PSNR (dB) | BER    |                |        |                 |                      |
|-----------|-----------|--------|----------------|--------|-----------------|----------------------|
|           |           | OPM    | OPM $10\times$ | V3DD   | V3DD $10\times$ | Ansari <i>et al.</i> |
| 2         | 67,0      | 0,0000 | 0,0000         | 0,0000 | 0,0000          | 0,0000               |
|           | 64,5      | 0,0000 | 0,0000         | 0,0000 | 0,0000          | 0,0000               |
|           | 62,5      | 0,0000 | 0,0000         | 0,0000 | 0,0000          | 0,0000               |
|           | 61,0      | 0,0000 | 0,0000         | 0,0000 | 0,0000          | 0,0000               |
|           | 59,5      | 0,0000 | 0,0000         | 0,0000 | 0,0000          | 0,0000               |
| 4         | 67,0      | 0,0000 | 0,0000         | 0,0000 | 0,0000          | 0,0000               |
|           | 64,5      | 0,0000 | 0,0000         | 0,0000 | 0,0000          | 0,0000               |
|           | 62,5      | 0,0000 | 0,0000         | 0,0000 | 0,0000          | 0,0000               |
|           | 61,0      | 0,0000 | 0,0000         | 0,0000 | 0,0000          | 0,0000               |
|           | 59,5      | 0,0000 | 0,0000         | 0,0000 | 0,0000          | 0,0000               |
| 5         | 67,0      | 0,0000 | 0,0000         | 0,0000 | 0,0000          | 0,0000               |
|           | 64,5      | 0,0000 | 0,0000         | 0,0000 | 0,0000          | 0,0000               |
|           | 62,5      | 0,0000 | 0,0000         | 0,0000 | 0,0000          | 0,0000               |
|           | 61,0      | 0,0000 | 0,0000         | 0,0000 | 0,0000          | 0,0000               |
|           | 59,5      | 0,0000 | 0,0000         | 0,0000 | 0,0000          | 0,0000               |
| 6         | 67,0      | 0,0000 | 0,0000         | 0,0000 | 0,0000          | 0,0000               |
|           | 64,5      | 0,0000 | 0,0000         | 0,0000 | 0,0000          | 0,0000               |
|           | 62,5      | 0,0000 | 0,0000         | 0,0000 | 0,0000          | 0,0000               |
|           | 61,0      | 0,0000 | 0,0000         | 0,0000 | 0,0000          | 0,0000               |
|           | 59,5      | 0,0000 | 0,0000         | 0,0000 | 0,0000          | 0,0000               |
| Média     |           | 0,0000 | 0,0000         | 0,0000 | 0,0000          | 0,0000               |

Tabela A.8 – Média, para as 30 imagens de *light field* utilizadas como teste, dos resultados de BER de marcas d’água de tamanho  $512 \times 512$  extraídas após aplicação de ruído Gaussiano. Os resultados são apresentados de acordo com a variância utilizada (coluna “Parâmetro”) na distribuição Gaussiana e o PSNR (dB) obtido após a inserção da marca. OPM é referente ao método de Ordenação pelas Médias e V3DD ao método de Varredura 3D Diagonal; os métodos foram aplicados sem e com replicação ( $10\times$ ).

| Parâmetro | PSNR (dB) | BER    |                |        |                 |                      |
|-----------|-----------|--------|----------------|--------|-----------------|----------------------|
|           |           | OPM    | OPM $10\times$ | V3DD   | V3DD $10\times$ | Ansari <i>et al.</i> |
| 2         | 30,7      | 0,0001 | 0,0004         | 0,0003 | 0,0005          | 0,0000               |
|           | 28,2      | 0,0000 | 0,0000         | 0,0004 | 0,0000          | 0,0000               |
|           | 26,3      | 0,0000 | 0,0000         | 0,0004 | 0,0000          | 0,0000               |
|           | 24,7      | 0,0000 | 0,0000         | 0,0002 | 0,0000          | 0,0000               |
|           | 23,9      | 0,0001 | 0,0000         | 0,0002 | 0,0000          | 0,0000               |
| 4         | 30,7      | 0,0018 | 0,0113         | 0,0069 | 0,0129          | 0,0000               |
|           | 28,2      | 0,0004 | 0,0063         | 0,0019 | 0,0072          | 0,0000               |
|           | 26,3      | 0,0001 | 0,0028         | 0,0007 | 0,0032          | 0,0000               |
|           | 24,7      | 0,0001 | 0,0003         | 0,0003 | 0,0004          | 0,0000               |
|           | 23,9      | 0,0001 | 0,0001         | 0,0003 | 0,0001          | 0,0000               |
| 5         | 30,7      | 0,0036 | 0,0152         | 0,0142 | 0,0164          | 0,0000               |
|           | 28,2      | 0,0013 | 0,0111         | 0,0054 | 0,0125          | 0,0000               |
|           | 26,3      | 0,0003 | 0,0070         | 0,0019 | 0,0079          | 0,0000               |
|           | 24,7      | 0,0001 | 0,0017         | 0,0007 | 0,0021          | 0,0000               |
|           | 23,9      | 0,0001 | 0,0007         | 0,0004 | 0,0009          | 0,0000               |
| 6         | 30,7      | 0,0058 | 0,0163         | 0,0226 | 0,0178          | 0,0000               |
|           | 28,2      | 0,0026 | 0,0144         | 0,0104 | 0,0157          | 0,0000               |
|           | 26,3      | 0,0008 | 0,0108         | 0,0046 | 0,0122          | 0,0000               |
|           | 24,7      | 0,0004 | 0,0044         | 0,0018 | 0,0050          | 0,0000               |
|           | 23,9      | 0,0002 | 0,0024         | 0,0010 | 0,0028          | 0,0000               |
| Média     |           | 0,0009 | 0,0053         | 0,0037 | 0,0059          | 0,0000               |

Tabela A.9 – Média, para as 30 imagens de *light field* utilizadas como teste, dos resultados de BER de marcas d'água de tamanho  $8 \times 8$  extraídas após aplicação de ruído sal e pimenta. Os resultados são apresentados de acordo com a densidade do ruído (coluna “Parâmetro”) e o PSNR (dB) obtido após a inserção da marca. OPM é referente ao método de Ordenação pelas Médias e V3DD ao método de Varredura 3D Diagonal; os métodos foram aplicados sem e com replicação ( $10\times$ ).

| Parâmetro | PSNR (dB) | BER    |                |        |                 |                      |
|-----------|-----------|--------|----------------|--------|-----------------|----------------------|
|           |           | OPM    | OPM $10\times$ | V3DD   | V3DD $10\times$ | Ansari <i>et al.</i> |
| 0,5       | 67,0      | 0,0000 | 0,0000         | 0,0000 | 0,0000          | 0,0000               |
|           | 64,5      | 0,0000 | 0,0000         | 0,0000 | 0,0000          | 0,0000               |
|           | 62,5      | 0,0000 | 0,0000         | 0,0000 | 0,0000          | 0,0000               |
|           | 61,0      | 0,0000 | 0,0000         | 0,0000 | 0,0000          | 0,0000               |
|           | 59,5      | 0,0000 | 0,0000         | 0,0000 | 0,0000          | 0,0000               |
| 1         | 67,0      | 0,0000 | 0,0000         | 0,0000 | 0,0000          | 0,0156               |
|           | 64,5      | 0,0000 | 0,0000         | 0,0000 | 0,0000          | 0,0000               |
|           | 62,5      | 0,0000 | 0,0000         | 0,0000 | 0,0000          | 0,0000               |
|           | 61,0      | 0,0000 | 0,0000         | 0,0000 | 0,0000          | 0,0000               |
|           | 59,5      | 0,0000 | 0,0000         | 0,0000 | 0,0000          | 0,0000               |
| 1,5       | 67,0      | 0,0000 | 0,0000         | 0,0000 | 0,0000          | 0,0000               |
|           | 64,5      | 0,0000 | 0,0000         | 0,0000 | 0,0000          | 0,0000               |
|           | 62,5      | 0,0000 | 0,0000         | 0,0000 | 0,0000          | 0,0000               |
|           | 61,0      | 0,0000 | 0,0000         | 0,0000 | 0,0000          | 0,0000               |
|           | 59,5      | 0,0000 | 0,0000         | 0,0000 | 0,0000          | 0,0000               |
| 2         | 67,0      | 0,0000 | 0,0000         | 0,0000 | 0,0000          | 0,0312               |
|           | 64,5      | 0,0000 | 0,0000         | 0,0000 | 0,0000          | 0,0000               |
|           | 62,5      | 0,0000 | 0,0000         | 0,0000 | 0,0000          | 0,0000               |
|           | 61,0      | 0,0000 | 0,0000         | 0,0000 | 0,0000          | 0,0000               |
|           | 59,5      | 0,0000 | 0,0000         | 0,0000 | 0,0000          | 0,0000               |
| Média     |           | 0,0000 | 0,0000         | 0,0000 | 0,0000          | 0,0023               |

Tabela A.10 – Média, para as 30 imagens de *light field* utilizadas como teste, dos resultados de BER de marcas d’água de tamanho  $512 \times 512$  extraídas após aplicação de ruído sal e pimenta. Os resultados são apresentados de acordo com a densidade do ruído (coluna “Parâmetro”) e o PSNR (dB) obtido após a inserção da marca. OPM é referente ao método de Ordenação pelas Médias e V3DD ao método de Varredura 3D Diagonal; os métodos foram aplicados sem e com replicação ( $10\times$ ).

| Parâmetro    | PSNR (dB) | BER    |                |        |                 |                      |
|--------------|-----------|--------|----------------|--------|-----------------|----------------------|
|              |           | OPM    | OPM $10\times$ | V3DD   | V3DD $10\times$ | Ansari <i>et al.</i> |
| 0,5          | 30,7      | 0,0000 | 0,0000         | 0,0000 | 0,0000          | 0,0007               |
|              | 28,2      | 0,0000 | 0,0000         | 0,0000 | 0,0000          | 0,0001               |
|              | 26,3      | 0,0000 | 0,0000         | 0,0000 | 0,0000          | 0,0000               |
|              | 24,7      | 0,0000 | 0,0000         | 0,0000 | 0,0000          | 0,0000               |
|              | 23,9      | 0,0000 | 0,0000         | 0,0000 | 0,0000          | 0,0000               |
| 1            | 30,7      | 0,0000 | 0,0000         | 0,0000 | 0,0000          | 0,0022               |
|              | 28,2      | 0,0000 | 0,0000         | 0,0000 | 0,0000          | 0,0004               |
|              | 26,3      | 0,0000 | 0,0000         | 0,0000 | 0,0000          | 0,0001               |
|              | 24,7      | 0,0000 | 0,0000         | 0,0000 | 0,0000          | 0,0000               |
|              | 23,9      | 0,0000 | 0,0000         | 0,0000 | 0,0000          | 0,0000               |
| 1,5          | 30,7      | 0,0000 | 0,0002         | 0,0000 | 0,0003          | 0,0043               |
|              | 28,2      | 0,0000 | 0,0000         | 0,0000 | 0,0000          | 0,0010               |
|              | 26,3      | 0,0000 | 0,0000         | 0,0000 | 0,0000          | 0,0003               |
|              | 24,7      | 0,0000 | 0,0000         | 0,0000 | 0,0000          | 0,0001               |
|              | 23,9      | 0,0000 | 0,0000         | 0,0000 | 0,0000          | 0,0001               |
| 2            | 30,7      | 0,0001 | 0,0029         | 0,0001 | 0,0029          | 0,0068               |
|              | 28,2      | 0,0000 | 0,0001         | 0,0000 | 0,0001          | 0,0019               |
|              | 26,3      | 0,0000 | 0,0000         | 0,0000 | 0,0000          | 0,0006               |
|              | 24,7      | 0,0000 | 0,0000         | 0,0000 | 0,0000          | 0,0002               |
|              | 23,9      | 0,0000 | 0,0000         | 0,0000 | 0,0000          | 0,0002               |
| <b>Média</b> |           | 0,0000 | 0,0002         | 0,0000 | 0,0002          | 0,0010               |

Tabela A.11 – Média, para as 30 imagens de *light field* utilizadas como teste, dos resultados de BER de marcas d’água de tamanho  $8 \times 8$  extraídas após aplicação de equalização do histograma. Os resultados são apresentados de acordo com o PSNR (dB) obtido após a inserção da marca. OPM é referente ao método de Ordenação pelas Médias e V3DD ao método de Varredura 3D Diagonal; os métodos foram aplicados sem e com replicação ( $10\times$ ).

| PSNR (dB)    | BER    |                |        |                 |                      |
|--------------|--------|----------------|--------|-----------------|----------------------|
|              | OPM    | OPM $10\times$ | V3DD   | V3DD $10\times$ | Ansari <i>et al.</i> |
| 67,0         | 0,3125 | 0,0938         | 0,3281 | 0,0469          | 0,4844               |
| 64,5         | 0,2969 | 0,1406         | 0,2812 | 0,0000          | 0,4844               |
| 62,5         | 0,3281 | 0,1562         | 0,3281 | 0,0625          | 0,4844               |
| 61,0         | 0,2656 | 0,0625         | 0,2812 | 0,0938          | 0,4844               |
| 59,5         | 0,2500 | 0,0469         | 0,2812 | 0,0938          | 0,4844               |
| <b>Média</b> | 0,2906 | 0,1000         | 0,3000 | 0,0594          | 0,4844               |

Tabela A.12 – Média, para as 30 imagens de *light field* utilizadas como teste, dos resultados de BER de marcas d'água de tamanho  $512 \times 512$  extraídas após aplicação de equalização do histograma. Os resultados são apresentados de acordo com o PSNR (dB) obtido após a inserção da marca. OPM é referente ao método de Ordenação pelas Médias e V3DD ao método de Varredura 3D Diagonal; os métodos foram aplicados sem e com replicação ( $10\times$ ).

| PSNR (dB)    | BER    |                |        |                 |                      |
|--------------|--------|----------------|--------|-----------------|----------------------|
|              | OPM    | OPM $10\times$ | V3DD   | V3DD $10\times$ | Ansari <i>et al.</i> |
| 30,7         | 0,2954 | 0,1255         | 0,3021 | 0,1272          | 0,4753               |
| 28,2         | 0,2910 | 0,1300         | 0,2950 | 0,1333          | 0,4779               |
| 26,3         | 0,3067 | 0,1363         | 0,2915 | 0,1377          | 0,4808               |
| 24,7         | 0,2820 | 0,1555         | 0,2928 | 0,1548          | 0,4833               |
| 23,9         | 0,2676 | 0,1659         | 0,2990 | 0,1648          | 0,4841               |
| <b>Média</b> | 0,2885 | 0,1426         | 0,2961 | 0,1436          | 0,4803               |

Tabela A.13 – Média, para as 30 imagens de *light field* utilizadas como teste, dos resultados de BER de marcas d'água de tamanho  $8 \times 8$  extraídas após aplicação de *sharpening* (*unsharp mask*). Os resultados são apresentados de acordo com o peso utilizado (coluna “Parâmetro”) na soma das imagens e o PSNR (dB) obtido após a inserção da marca. OPM é referente ao método de Ordenação pelas Médias e V3DD ao método de Varredura 3D Diagonal; os métodos foram aplicados sem e com replicação ( $10\times$ ).

| Parâmetro    | PSNR (dB) | BER    |                |        |                 |                      |
|--------------|-----------|--------|----------------|--------|-----------------|----------------------|
|              |           | OPM    | OPM $10\times$ | V3DD   | V3DD $10\times$ | Ansari <i>et al.</i> |
| 1,5          | 67,0      | 0,1250 | 0,0000         | 0,1250 | 0,0000          | 0,0469               |
|              | 64,5      | 0,1406 | 0,0000         | 0,1562 | 0,0000          | 0,0938               |
|              | 62,5      | 0,2188 | 0,0000         | 0,1250 | 0,0000          | 0,1250               |
|              | 61,0      | 0,1562 | 0,0000         | 0,1562 | 0,0000          | 0,1875               |
|              | 59,5      | 0,2344 | 0,0156         | 0,1250 | 0,0000          | 0,2500               |
| 2            | 67,0      | 0,2031 | 0,4688         | 0,2031 | 0,0156          | 0,1094               |
|              | 64,5      | 0,2656 | 0,4219         | 0,1250 | 0,0000          | 0,1562               |
|              | 62,5      | 0,2656 | 0,3125         | 0,1250 | 0,1406          | 0,2344               |
|              | 61,0      | 0,1719 | 0,4531         | 0,1406 | 0,0000          | 0,2812               |
|              | 59,5      | 0,3281 | 0,2188         | 0,1406 | 0,0000          | 0,3594               |
| 2,5          | 67,0      | 0,3594 | 0,1719         | 0,3906 | 0,4531          | 0,1562               |
|              | 64,5      | 0,3906 | 0,2344         | 0,4219 | 0,1094          | 0,2188               |
|              | 62,5      | 0,3125 | 0,1406         | 0,4688 | 0,4844          | 0,3125               |
|              | 61,0      | 0,4375 | 0,1562         | 0,4531 | 0,3281          | 0,3750               |
|              | 59,5      | 0,4375 | 0,1094         | 0,4531 | 0,4531          | 0,4062               |
| 3            | 67,0      | 0,2969 | 0,1875         | 0,3438 | 0,2500          | 0,1875               |
|              | 64,5      | 0,3438 | 0,2188         | 0,3906 | 0,4062          | 0,2812               |
|              | 62,5      | 0,2969 | 0,1094         | 0,3750 | 0,3438          | 0,3750               |
|              | 61,0      | 0,3906 | 0,1094         | 0,3750 | 0,2500          | 0,4062               |
|              | 59,5      | 0,4375 | 0,0938         | 0,3906 | 0,2969          | 0,4062               |
| <b>Média</b> |           | 0,2906 | 0,1711         | 0,2742 | 0,1766          | 0,2484               |

Tabela A.14 – Média, para as 30 imagens de *light field* utilizadas como teste, dos resultados de BER de marcas d’água de tamanho  $512 \times 512$  extraídas após aplicação de *sharpening* (*unsharp mask*). Os resultados são apresentados de acordo com o peso (coluna “Parâmetro”) utilizado na soma das imagens e o PSNR (dB) obtido após a inserção da marca. OPM é referente ao método de Ordenação pelas Médias e V3DD ao método de Varredura 3D Diagonal; os métodos foram aplicados sem e com replicação ( $10\times$ ).

| Parâmetro | PSNR (dB) | BER    |                |        |                 |                      |
|-----------|-----------|--------|----------------|--------|-----------------|----------------------|
|           |           | OPM    | OPM $10\times$ | V3DD   | V3DD $10\times$ | Ansari <i>et al.</i> |
| 1,5       | 30,7      | 0,2954 | 0,1196         | 0,2995 | 0,1262          | 0,0511               |
|           | 28,2      | 0,3088 | 0,1333         | 0,3092 | 0,1362          | 0,0692               |
|           | 26,3      | 0,3135 | 0,1470         | 0,327  | 0,1487          | 0,0917               |
|           | 24,7      | 0,3498 | 0,1788         | 0,3481 | 0,1775          | 0,1149               |
|           | 23,9      | 0,3795 | 0,1948         | 0,3614 | 0,1942          | 0,1255               |
| 2         | 30,7      | 0,3810 | 0,3635         | 0,4006 | 0,3688          | 0,0975               |
|           | 28,2      | 0,3752 | 0,3563         | 0,3901 | 0,3574          | 0,1240               |
|           | 26,3      | 0,3566 | 0,3492         | 0,3922 | 0,3474          | 0,1541               |
|           | 24,7      | 0,3812 | 0,3412         | 0,4011 | 0,3393          | 0,1823               |
|           | 23,9      | 0,4084 | 0,3419         | 0,4076 | 0,3409          | 0,1959               |
| 2,5       | 30,7      | 0,4016 | 0,2570         | 0,3922 | 0,2855          | 0,1484               |
|           | 28,2      | 0,4203 | 0,2890         | 0,4132 | 0,3134          | 0,1786               |
|           | 26,3      | 0,4628 | 0,3253         | 0,4294 | 0,3432          | 0,2121               |
|           | 24,7      | 0,4580 | 0,3863         | 0,4386 | 0,4011          | 0,2433               |
|           | 23,9      | 0,4389 | 0,4083         | 0,4436 | 0,4259          | 0,2567               |
| 3         | 30,7      | 0,3796 | 0,2301         | 0,3731 | 0,2452          | 0,1943               |
|           | 28,2      | 0,3921 | 0,2535         | 0,3894 | 0,2673          | 0,2250               |
|           | 26,3      | 0,4269 | 0,2826         | 0,3985 | 0,2928          | 0,2603               |
|           | 24,7      | 0,4221 | 0,3386         | 0,4049 | 0,3458          | 0,2905               |
|           | 23,9      | 0,4038 | 0,3602         | 0,4104 | 0,3698          | 0,3028               |
| Média     |           | 0,3878 | 0,2828         | 0,3865 | 0,2913          | 0,1759               |

Tabela A.15 – Média, para as 30 imagens de *light field* utilizadas como teste, dos resultados de BER de marcas d’água de tamanho  $8 \times 8$  extraídas após aplicação do corte em *UV*. Os resultados são apresentados de acordo com a quantidade de linhas superiores removidas da dimensão *UV* (coluna “Parâmetro”) e o PSNR (dB) obtido após a inserção da marca. OPM é referente ao método de Ordenação pelas Médias e V3DD ao método de Varredura 3D Diagonal; os métodos foram aplicados sem e com replicação (10 $\times$ ).

| Parâmetro | PSNR (dB) | BER    |                 |        |                  |                      |
|-----------|-----------|--------|-----------------|--------|------------------|----------------------|
|           |           | OPM    | OPM 10 $\times$ | V3DD   | V3DD 10 $\times$ | Ansari <i>et al.</i> |
| 20        | 67,0      | 0,0312 | 0,0000          | 0,0312 | 0,0000           | 0,1562               |
|           | 64,5      | 0,0312 | 0,0000          | 0,0312 | 0,0000           | 0,0938               |
|           | 62,5      | 0,0312 | 0,0000          | 0,0312 | 0,0000           | 0,0156               |
|           | 61,0      | 0,0312 | 0,0000          | 0,0312 | 0,0000           | 0,0156               |
|           | 59,5      | 0,0312 | 0,0000          | 0,0312 | 0,0000           | 0,0156               |
| 60        | 67,0      | 0,0781 | 0,0000          | 0,0781 | 0,0000           | 0,4375               |
|           | 64,5      | 0,0781 | 0,0000          | 0,0781 | 0,0000           | 0,4219               |
|           | 62,5      | 0,0781 | 0,0000          | 0,0781 | 0,0000           | 0,3438               |
|           | 61,0      | 0,0781 | 0,0000          | 0,0781 | 0,0000           | 0,3281               |
|           | 59,5      | 0,0781 | 0,0000          | 0,0781 | 0,0000           | 0,2969               |
| 100       | 67,0      | 0,0938 | 0,0312          | 0,0938 | 0,0312           | 0,4844               |
|           | 64,5      | 0,0938 | 0,0312          | 0,0938 | 0,0312           | 0,4844               |
|           | 62,5      | 0,0938 | 0,0312          | 0,0938 | 0,0312           | 0,4688               |
|           | 61,0      | 0,0938 | 0,0312          | 0,0938 | 0,0312           | 0,4531               |
|           | 59,5      | 0,0938 | 0,0312          | 0,0938 | 0,0312           | 0,4375               |
| 140       | 67,0      | 0,1719 | 0,1406          | 0,1719 | 0,1406           | 0,4844               |
|           | 64,5      | 0,1719 | 0,1406          | 0,1719 | 0,1406           | 0,4844               |
|           | 62,5      | 0,1719 | 0,1406          | 0,1719 | 0,1406           | 0,4844               |
|           | 61,0      | 0,1719 | 0,1406          | 0,1719 | 0,1406           | 0,4844               |
|           | 59,5      | 0,1719 | 0,1406          | 0,1719 | 0,1406           | 0,4844               |
| Média     |           | 0,0938 | 0,0430          | 0,0938 | 0,0430           | 0,3438               |

Tabela A.16 – Média, para as 30 imagens de *light field* utilizadas como teste, dos resultados de BER de marcas d’água de tamanho  $512 \times 512$  extraídas após aplicação do corte em *UV*. Os resultados são apresentados de acordo com a quantidade de linhas superiores removidas da dimensão *UV* (coluna “Parâmetro”) e o PSNR (dB) obtido após a inserção da marca. OPM é referente ao método de Ordenação pelas Médias e V3DD ao método de Varredura 3D Diagonal; os métodos foram aplicados sem e com replicação ( $10\times$ ).

| Parâmetro | PSNR (dB) | BER    |                |        |                 |                      |
|-----------|-----------|--------|----------------|--------|-----------------|----------------------|
|           |           | OPM    | OPM $10\times$ | V3DD   | V3DD $10\times$ | Ansari <i>et al.</i> |
| 20        | 30,7      | 0,0182 | 0,0000         | 0,0214 | 0,0000          | 0,2015               |
|           | 28,2      | 0,0182 | 0,0000         | 0,0214 | 0,0000          | 0,1286               |
|           | 26,3      | 0,0181 | 0,0000         | 0,0213 | 0,0000          | 0,0800               |
|           | 24,7      | 0,0181 | 0,0000         | 0,0213 | 0,0000          | 0,0488               |
|           | 23,9      | 0,0181 | 0,0000         | 0,0213 | 0,0000          | 0,0370               |
| 60        | 30,7      | 0,0620 | 0,0028         | 0,0651 | 0,0029          | 0,4937               |
|           | 28,2      | 0,0619 | 0,0028         | 0,0651 | 0,0029          | 0,4858               |
|           | 26,3      | 0,0619 | 0,0028         | 0,0650 | 0,0029          | 0,4560               |
|           | 24,7      | 0,0619 | 0,0027         | 0,0650 | 0,0029          | 0,4188               |
|           | 23,9      | 0,0619 | 0,0027         | 0,0650 | 0,0029          | 0,3977               |
| 100       | 30,7      | 0,1054 | 0,0264         | 0,1086 | 0,0265          | 0,4727               |
|           | 28,2      | 0,1053 | 0,0263         | 0,1085 | 0,0265          | 0,4744               |
|           | 26,3      | 0,1052 | 0,0263         | 0,1084 | 0,0265          | 0,4782               |
|           | 24,7      | 0,1051 | 0,0263         | 0,1083 | 0,0265          | 0,4844               |
|           | 23,9      | 0,1051 | 0,0262         | 0,1083 | 0,0265          | 0,4889               |
| 140       | 30,7      | 0,1493 | 0,0876         | 0,1525 | 0,0879          | 0,4720               |
|           | 28,2      | 0,1492 | 0,0876         | 0,1524 | 0,0879          | 0,4720               |
|           | 26,3      | 0,1491 | 0,0875         | 0,1524 | 0,0878          | 0,4721               |
|           | 24,7      | 0,1491 | 0,0875         | 0,1524 | 0,0878          | 0,4724               |
|           | 23,9      | 0,1491 | 0,0874         | 0,1524 | 0,0878          | 0,4727               |
| Média     |           | 0,0836 | 0,0291         | 0,0868 | 0,0293          | 0,3754               |

Tabela A.17 – Média, para as 30 imagens de *light field* utilizadas como teste, dos resultados de BER de marcas d'água de tamanho  $8 \times 8$  extraídas após aplicação da compressão pela 4D-DCT. Os resultados são apresentados de acordo com o percentual de coeficientes retidos (coluna “Parâmetro”) e o PSNR (dB) obtido após a inserção da marca. OPM é referente ao método de Ordenação pelas Médias e V3DD ao método de Varredura 3D Diagonal; os métodos foram aplicados sem e com replicação ( $10\times$ ).

| Parâmetro | PSNR (dB) | BER    |                |        |                 |                      |
|-----------|-----------|--------|----------------|--------|-----------------|----------------------|
|           |           | OPM    | OPM $10\times$ | V3DD   | V3DD $10\times$ | Ansari <i>et al.</i> |
| 20%       | 67,0      | 0,0000 | 0,0000         | 0,0000 | 0,0000          | 0,0000               |
|           | 64,5      | 0,0000 | 0,0000         | 0,0000 | 0,0000          | 0,0000               |
|           | 62,5      | 0,0000 | 0,0000         | 0,0000 | 0,0000          | 0,0000               |
|           | 61,0      | 0,0000 | 0,0000         | 0,0000 | 0,0000          | 0,0000               |
|           | 59,5      | 0,0000 | 0,0000         | 0,0000 | 0,0000          | 0,0000               |
| 10%       | 67,0      | 0,0000 | 0,0000         | 0,0000 | 0,0000          | 0,0000               |
|           | 64,5      | 0,0000 | 0,0000         | 0,0000 | 0,0000          | 0,0000               |
|           | 62,5      | 0,0000 | 0,0000         | 0,0000 | 0,0000          | 0,0000               |
|           | 61,0      | 0,0000 | 0,0000         | 0,0000 | 0,0000          | 0,0000               |
|           | 59,5      | 0,0000 | 0,0000         | 0,0000 | 0,0000          | 0,0000               |
| 5%        | 67,0      | 0,0000 | 0,0000         | 0,0000 | 0,0000          | 0,0000               |
|           | 64,5      | 0,0000 | 0,0000         | 0,0000 | 0,0000          | 0,0000               |
|           | 62,5      | 0,0000 | 0,0000         | 0,0000 | 0,0000          | 0,0000               |
|           | 61,0      | 0,0000 | 0,0000         | 0,0000 | 0,0000          | 0,0000               |
|           | 59,5      | 0,0000 | 0,0000         | 0,0000 | 0,0000          | 0,0000               |
| 1%        | 67,0      | 0,0000 | 0,0781         | 0,0781 | 0,0625          | 0,3438               |
|           | 64,5      | 0,0000 | 0,0469         | 0,0000 | 0,0469          | 0,2969               |
|           | 62,5      | 0,0000 | 0,0000         | 0,0000 | 0,0000          | 0,2656               |
|           | 61,0      | 0,0000 | 0,0000         | 0,0000 | 0,0000          | 0,2188               |
|           | 59,5      | 0,0000 | 0,0000         | 0,0000 | 0,0000          | 0,1562               |
| Média     |           | 0,0000 | 0,0063         | 0,0039 | 0,0055          | 0,0641               |

Tabela A.18 – Média, para as 30 imagens de *light field* utilizadas como teste, dos resultados de BER de marcas d’água de tamanho  $512 \times 512$  extraídas após aplicação da compressão pela 4D-DCT. Os resultados são apresentados de acordo com o percentual de coeficientes retidos (coluna “Parâmetro”) e o PSNR (dB) obtido após a inserção da marca. OPM é referente ao método de Ordenação pelas Médias e V3DD ao método de Varredura 3D Diagonal; os métodos foram aplicados sem e com replicação ( $10\times$ ).

| Parâmetro | PSNR (dB) | BER    |                |        |                 |                      |
|-----------|-----------|--------|----------------|--------|-----------------|----------------------|
|           |           | OPM    | OPM $10\times$ | V3DD   | V3DD $10\times$ | Ansari <i>et al.</i> |
| 20%       | 30,7      | 0,0000 | 0,0000         | 0,0000 | 0,0000          | 0,0000               |
|           | 28,2      | 0,0000 | 0,0000         | 0,0000 | 0,0000          | 0,0000               |
|           | 26,3      | 0,0000 | 0,0000         | 0,0000 | 0,0000          | 0,0000               |
|           | 24,7      | 0,0000 | 0,0000         | 0,0000 | 0,0000          | 0,0000               |
|           | 23,9      | 0,0000 | 0,0000         | 0,0000 | 0,0000          | 0,0000               |
| 10%       | 30,7      | 0,0000 | 0,1346         | 0,0000 | 0,1401          | 0,0007               |
|           | 28,2      | 0,0000 | 0,1425         | 0,0000 | 0,1479          | 0,0004               |
|           | 26,3      | 0,0000 | 0,1477         | 0,0000 | 0,1517          | 0,0002               |
|           | 24,7      | 0,0000 | 0,1560         | 0,0000 | 0,1603          | 0,0002               |
|           | 23,9      | 0,0000 | 0,1604         | 0,0000 | 0,1648          | 0,0002               |
| 5%        | 30,7      | 0,0000 | 0,2385         | 0,0000 | 0,2361          | 0,0246               |
|           | 28,2      | 0,0000 | 0,2351         | 0,0000 | 0,2315          | 0,0184               |
|           | 26,3      | 0,0000 | 0,2311         | 0,0000 | 0,2277          | 0,0157               |
|           | 24,7      | 0,0000 | 0,2362         | 0,0000 | 0,2312          | 0,0141               |
|           | 23,9      | 0,0000 | 0,2365         | 0,0000 | 0,2306          | 0,0135               |
| 1%        | 30,7      | 0,3023 | 0,4363         | 0,2921 | 0,4310          | 0,2923               |
|           | 28,2      | 0,2776 | 0,4305         | 0,2715 | 0,4262          | 0,2555               |
|           | 26,3      | 0,2602 | 0,4240         | 0,2576 | 0,4206          | 0,2312               |
|           | 24,7      | 0,2488 | 0,4276         | 0,2437 | 0,4223          | 0,2136               |
|           | 23,9      | 0,2413 | 0,4230         | 0,2420 | 0,4174          | 0,2072               |
| Média     |           | 0,0665 | 0,2030         | 0,0653 | 0,2020          | 0,0644               |

Tabela A.19 – Média, para as 30 imagens de *light field* utilizadas como teste, dos resultados de BER de marcas d'água de tamanho  $8 \times 8$  extraídas após aplicação da compressão JPEG. Os resultados são apresentados de acordo com o percentual da qualidade da compressão (coluna “Parâmetro”) e o PSNR (dB) obtido após a inserção da marca. OPM é referente ao método de Ordenação pelas Médias e V3DD ao método de Varredura 3D Diagonal; os métodos foram aplicados sem e com replicação ( $10\times$ ).

| Parâmetro    | PSNR (dB) | BER    |                |        |                 |                      |
|--------------|-----------|--------|----------------|--------|-----------------|----------------------|
|              |           | OPM    | OPM $10\times$ | V3DD   | V3DD $10\times$ | Ansari <i>et al.</i> |
| 100%         | 67,0      | 0,0000 | 0,0000         | 0,0000 | 0,0000          | 0,0000               |
|              | 64,5      | 0,0000 | 0,0000         | 0,0000 | 0,0000          | 0,0000               |
|              | 62,5      | 0,0000 | 0,0000         | 0,0000 | 0,0000          | 0,0000               |
|              | 61,0      | 0,0000 | 0,0000         | 0,0000 | 0,0000          | 0,0000               |
|              | 59,5      | 0,0000 | 0,0000         | 0,0000 | 0,0000          | 0,0000               |
| 50%          | 67,0      | 0,0469 | 0,4688         | 0,0000 | 0,0000          | 0,0156               |
|              | 64,5      | 0,0156 | 0,4688         | 0,0000 | 0,0000          | 0,0000               |
|              | 62,5      | 0,0000 | 0,4219         | 0,0000 | 0,0000          | 0,0000               |
|              | 61,0      | 0,0000 | 0,3125         | 0,0000 | 0,0000          | 0,0000               |
|              | 59,5      | 0,0000 | 0,1406         | 0,0000 | 0,0000          | 0,0000               |
| 5%           | 67,0      | 0,4844 | 0,4844         | 0,4375 | 0,5000          | 0,3281               |
|              | 64,5      | 0,5000 | 0,4844         | 0,4531 | 0,5000          | 0,3125               |
|              | 62,5      | 0,5000 | 0,4844         | 0,4219 | 0,5000          | 0,2969               |
|              | 61,0      | 0,5000 | 0,4844         | 0,3750 | 0,4531          | 0,2812               |
|              | 59,5      | 0,5000 | 0,4844         | 0,3594 | 0,4688          | 0,2656               |
| <b>Média</b> |           | 0,1698 | 0,2823         | 0,1365 | 0,1615          | 0,1000               |

Tabela A.20 – Média, para as 30 imagens de *light field* utilizadas como teste, dos resultados de BER de marcas d'água de tamanho  $512 \times 512$  extraídas após aplicação da compressão JPEG. Os resultados são apresentados de acordo com o percentual da qualidade da compressão (coluna “Parâmetro”) e o PSNR (dB) obtido após a inserção da marca. OPM é referente ao método de Ordenação pelas Médias e V3DD ao método de Varredura 3D Diagonal; os métodos foram aplicados sem e com replicação ( $10\times$ ).

| Parâmetro | PSNR (dB) | BER    |                |        |                 |                      |
|-----------|-----------|--------|----------------|--------|-----------------|----------------------|
|           |           | OPM    | OPM $10\times$ | V3DD   | V3DD $10\times$ | Ansari <i>et al.</i> |
| 100%      | 30,7      | 0,0001 | 0,0000         | 0,0003 | 0,0000          | 0,0000               |
|           | 28,2      | 0,0000 | 0,0000         | 0,0004 | 0,0000          | 0,0000               |
|           | 26,3      | 0,0000 | 0,0000         | 0,0004 | 0,0000          | 0,0000               |
|           | 24,7      | 0,0001 | 0,0000         | 0,0003 | 0,0000          | 0,0000               |
|           | 23,9      | 0,0001 | 0,0000         | 0,0002 | 0,0000          | 0,0000               |
| 50%       | 30,7      | 0,1049 | 0,2003         | 0,1765 | 0,1743          | 0,0137               |
|           | 28,2      | 0,0645 | 0,1647         | 0,1355 | 0,1431          | 0,0019               |
|           | 26,3      | 0,0358 | 0,1344         | 0,1121 | 0,1181          | 0,0003               |
|           | 24,7      | 0,0246 | 0,0886         | 0,0941 | 0,0785          | 0,0000               |
|           | 23,9      | 0,0188 | 0,0718         | 0,0796 | 0,0645          | 0,0000               |
| 5%        | 30,7      | 0,4676 | 0,4724         | 0,4681 | 0,4693          | 0,4166               |
|           | 28,2      | 0,4613 | 0,4710         | 0,4614 | 0,4679          | 0,3876               |
|           | 26,3      | 0,4519 | 0,4693         | 0,4538 | 0,4649          | 0,3581               |
|           | 24,7      | 0,4396 | 0,4628         | 0,4414 | 0,4531          | 0,3281               |
|           | 23,9      | 0,4314 | 0,4553         | 0,4278 | 0,4419          | 0,3125               |
| Média     |           | 0,1667 | 0,1994         | 0,1901 | 0,1917          | 0,1213               |

## APÊNDICE B – ALGORITMOS DE ORDENAÇÃO ADICIONAIS PARA ESTRUTURAS 4D

---

### Algoritmo 7 Varredura 4D Diagonal (ALVES et al., 2020)

---

```

1: procedure VARREDURA_4D_DIAGONAL(bloco, S, T, U, V)
2:   ordem  $\leftarrow$  []
3:   soma  $\leftarrow S + T + U + V$ 
4:   i  $\leftarrow 1$ 
5:   for soma_atual in [1, soma] do
6:     for t in [1, T] do
7:       for s in [1, S] do
8:         for v in [1, V] do
9:           for u in [1, U] do
10:            if  $s + t + v + u = soma\_atual$  then
11:              ordem[i]  $\leftarrow bloco[t, s, v, u]$ 
12:              i  $\leftarrow i + 1$ 
13:   return ordem

```

---



---

### Algoritmo 8 Varredura 2D Dupla Diagonal (ALVES et al., 2020)

---

```

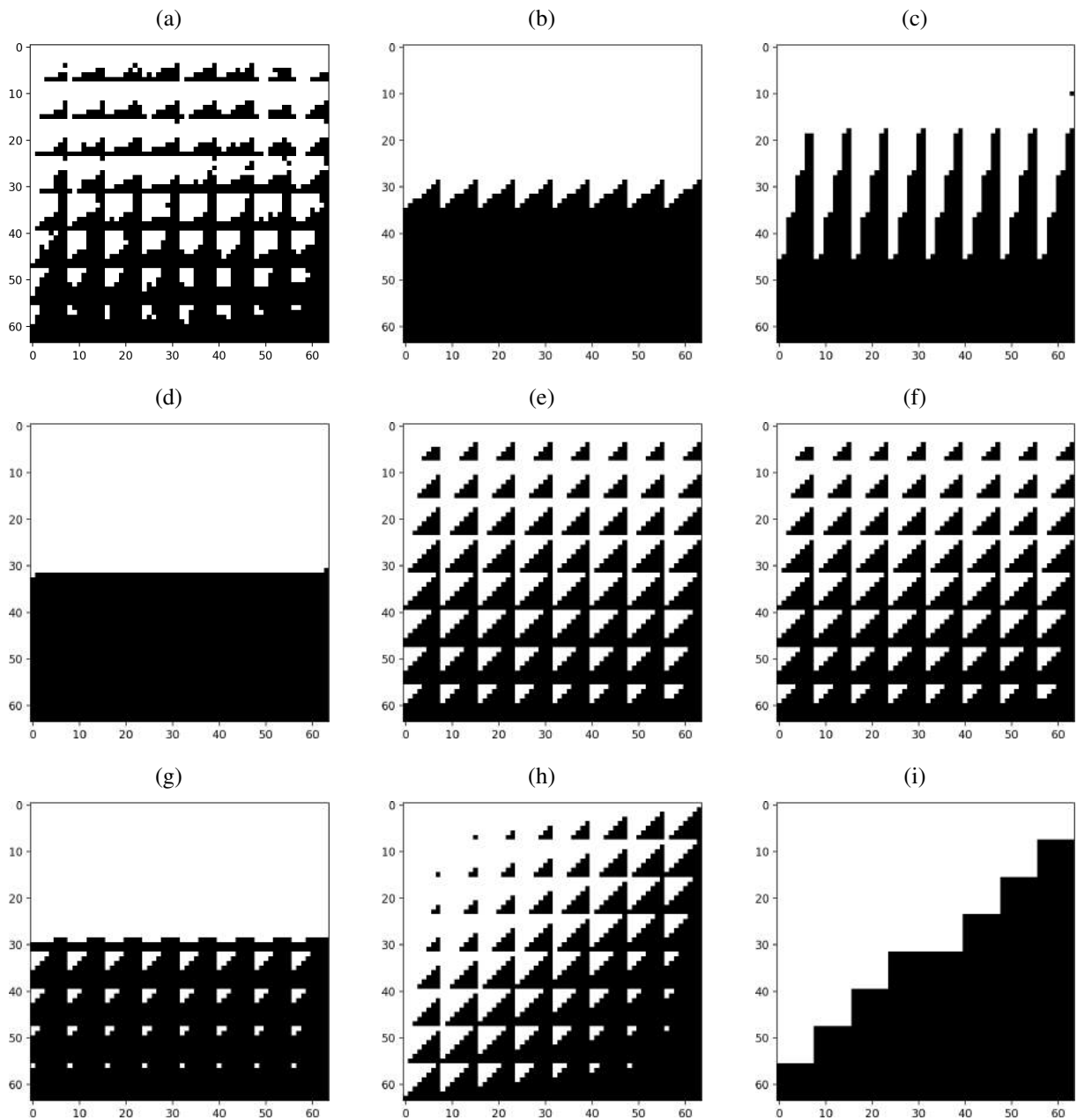
1: procedure VARREDURA_2D_DUPLA_DIAGONAL(bloco, S, T, U, V)
2:   ordem  $\leftarrow$  []
3:   i  $\leftarrow 1$ 
4:   for soma_externa in [1, S + T] do
5:     for t in [1, T] do
6:       for s in [1, S] do
7:         if  $t + s = soma\_externa$  then
8:           for soma_interna in [1, U + V] do
9:             for v in [1, V] do
10:              for u in [1, U] do
11:                if  $v + u = soma\_interna$  then
12:                  ordem[i]  $\leftarrow bloco[t, s, v, u]$ 
13:                  i  $\leftarrow i + 1$ 
14:   return ordem

```

---

## APÊNDICE C – INFORMAÇÕES ADICIONAIS PARA IMAGENS DE *LIGHT FIELD*

Figura C.1 – Sequência de imagens de blocos de tamanho  $8 \times 8 \times 8 \times 8$  em que a posição dos 2048 primeiros coeficientes (de acordo com o respectivo algoritmo de ordenação) é destacada de branco. São apresentadas imagens considerando os algoritmos de varredura propostos, (a) ordenação pelas médias, (b) zig-zag 2D, (c) zig-zag 2D expandido, (d) varredura 3D, (e) varredura 3D diagonal, (f) varredura 3D diagonal principal, (g) varredura 3D diagonal principal + horizontais e os apresentados em (ALVES et al., 2020), (h) varredura 4D diagonal e (i) varredura 2D dupla diagonal.



Fonte: O Autor (2020).

Tabela C.1 – Imagens de *light field* obtidas em (RERABEK; EBRAHIMI, 2016) e utilizadas para teste neste trabalho.

| <b>Imagem</b>                        | <b>Categoria</b>                |
|--------------------------------------|---------------------------------|
| <i>Black Fence</i>                   | <i>Buildings</i>                |
| <i>Palais du Luxembourg</i>          | <i>Buildings</i>                |
| <i>Pillars</i>                       | <i>Buildings</i>                |
| <i>Chain-link Fence 1</i>            | <i>Grids</i>                    |
| <i>Danger de Mort</i>                | <i>Grids</i>                    |
| <i>Spear Fence 1</i>                 | <i>Grids</i>                    |
| <i>Color Chart 1</i>                 | <i>ISO and Color Charts</i>     |
| <i>ISO Chart 12</i>                  | <i>ISO and Color Charts</i>     |
| <i>ISO Chart 23</i>                  | <i>ISO and Color Charts</i>     |
| <i>Houses and Lake</i>               | <i>Landscapes</i>               |
| <i>&amp;</i>                         | <i>Landscapes</i>               |
| <i>Backlight 1</i>                   | <i>Light</i>                    |
| <i>Books</i>                         | <i>Light</i>                    |
| <i>University</i>                    | <i>Light</i>                    |
| <i>Fountain Pool</i>                 | <i>Mirrors and Transparency</i> |
| <i>Semi-reflecting Structure 1</i>   | <i>Mirrors and Transparency</i> |
| <i>Vespa</i>                         | <i>Mirrors and Transparency</i> |
| <i>Bush</i>                          | <i>Nature</i>                   |
| <i>Flowers</i>                       | <i>Nature</i>                   |
| <i>Mirabelle Prune Tree</i>          | <i>Nature</i>                   |
| <i>Fountain and Vincent 2</i>        | <i>People</i>                   |
| <i>Friends 1</i>                     | <i>People</i>                   |
| <i>Sphynx</i>                        | <i>People</i>                   |
| <i>Ankylosaurus and Diplodocus 1</i> | <i>Studio</i>                   |
| <i>Desktop</i>                       | <i>Studio</i>                   |
| <i>Magnets 1</i>                     | <i>Studio</i>                   |
| <i>Bench in Paris</i>                | <i>Urban</i>                    |
| <i>Bikes</i>                         | <i>Urban</i>                    |
| <i>Railway Lines 2</i>               | <i>Urban</i>                    |
| <i>Stone Pillars Outside</i>         | <i>Urban</i>                    |