XXXVII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TELECOMUNICAÇÕES E PROCESSAMENTO DE SINAIS - SBrT2019, 29/09/2019–02/10/2019, PETRÓPOLIS, RJ

Sistema de Marca d'água em Imagens Utilizando Sequências Caóticas

José A. P. Artiles, Daniel P. B. Chaves, Cecilio Pimentel

***Resumo*— Este artigo descreve um esquema de marca d'água robusto. Os bits inseridos na imagem são os bits de paridade de um código corretor de erro cuja mensagem é formada pela combinação dos bits de marca d'água com bits caóticos. Uma estratégia que propicia robustez e segurança à marca d'água. A inserção se dá em frequências específicas da transformada discreta do cosseno da imagem. A robustez do método proposto é testada para vários ataques utilizados em processamentos de sinais e ataques geométricos. Comparações com resultados da literatura revelam que a técnica proposta apresenta maior imperceptibilidade e robustez.**

***Palavras-Chave*— Marca d'água robusta, códigos corretores de erro, mapas caóticos, ataques geométricos.**

***Abstract*— This article presents a robust watermarking scheme. The bits inserted in the image are the parity bits of an error correcting code whose message is formed by combining the watermark bits with chaotic bits. This strategy provides robustness and security to the watermark. The insertion occurs at specific frequencies of the discrete cosine transform of the image. The robustness of the proposed method is tested against signal processing attacks and geometric attacks. Comparisons with literature results reveal that the proposed technique presents greater imperceptibility and robustness.**

***Keywords*— Robust watermark, error correcting codes, chaotic maps, geometric attacks.**

I. Introdução

Observa-se uma ampla disseminação de conteúdos e de tecnologias de multimédia em redes de comunicação digital, o que alça a discussão sobre a proteção contra o uso e a distribuição não autorizados desse conteúdo. Como resposta a essa questão são disponibilizados os serviços de proteção do direito autoral, de rastreamento de cópias, de proteção de cópias, de autenticação de imagem; que devem ser preservados mesmo com a introdução de distorção, seja esta por manipulação não autorizada (*e.g.*, introdução de ruído, filtragem, rotação, translação, etc) ou decorrente do processamento de dados intrínseco a padrões (*e.g.*, compressão com perdas dos padrões JPEG e JPEG 2000). Essas premissas são atendidas pelo emprego de marcas d'água digitais [1].

A marca d'água digital é tipicamente inserida no domínio espacial ou no domínio da frequência, dependendo do grau de robustez e imperceptibilidade desejados [1]. A inserção da marca d'água no domínio da frequência, o caso mais comum, é utilizada com a finalidade de difundir os bits de marca d'água por vários píxeis da imagem, o que, em associação com as propriedades da transformada, propicia resistência a diversos ataques [2], [3]. As transformadas mais empregadas são a transformada discreta de Fourier (DFT) [2], [4], a transformada Mellin-Fourier [5], a transformada wavelet discreta [6], [7] e a transformada discreta do cosseno (DCT) [3], [8]. A escolha da transformada dependerá de alguns fatores, destacando-se: o esforço computacional, a distorção por manipulação não autorizada ou decorrente de padrões. Entre os atributos pretendidos para a marca d'água ao aplicar-se transformadas estão a robustez a ataques geométricos e a transcodificação.

Para agregar robustez e segurança à marca d'água há duas técnicas comumente aplicadas: a inserção aleatória de bits de marca d'água em posições da imagem ou de sua transformada; e a cifragem da marca d'água. Ambas podem ser incorporadas a um algoritmo de marca d'água com a utilização de mapas caóticos [9]–[13]. Esses mapas são caracterizados por possuírem sensibilidade à condição inicial e comportamento pseudo-aleatório, apesar de serem determinísticos, o que se traduz em trajetórias (ou sinais) assemelhadas à ruído [14]. Os mapas caóticos são empregados para embaralhar os bits de marca d'água [9]–[11] (agregando segurança ao método), bem como para definir as posições na imagem em que serão inseridos estes bits [12], [13] (agregando robustez ao método). Para suportar uma distorção severa imposta à imagem, códigos corretores de erro podem ser aplicados para tornar a marca d'água mais robusta [15]–[18]. Neste caso, códigos corretores de erro projetados para canais AWGN são comumente aplicados, o que nem sempre corresponde ao padrão de erros sofrido pela marca d'água [1]. Dessa forma, os ganhos obtidos com essa técnica são sensíveis a como o código é projetado e incorporado ao algoritmo de marca d'água.

O objetivo deste trabalho é propor um algoritmo de marca d'água utilizando mapas caóticos e códigos corretores de erro que seja robusto a diferentes ataques. Os bits caóticos e os bits de marca d'água formam a mensagem de um código corretor de erro; enquanto os bits de paridade são a parte da palavra código efetivamente inserida na imagem. Como os bits caóticos só são conhecidos pelos usuários legítimos do sistemas (por compartilharem uma informação sigilosa) os bits de marca d'água ficam protegidos dos demais usuários. Além disso, como parte da palavra código é conhecida na recepção (no caso, os bits caóticos), a capacidade do código de detecção e correção de erros é empregada exclusivamente na recuperação dos bits de marca d'água; isso aumenta a robustez do método proposto. Para obter um compromisso entre robustez e imperceptibilidade os bits de paridade são inseridos em frequências específicas da DCT de sub-blocos de 8×8 píxeis da imagem. A robustez da técnica proposta é verificada com a aplicação de diferentes classes de ataques,

Departamento de Eletrônica e Sistemas, Universidade Federal de Pernambuco, Recife-PE, Brasil, E-mails: joseantonio.artiles@ufpe.br, daniel.chaves@ufpe.br, cecilio@ufpe.br. Este trabalho foi parcialmente financiado pelo CNPq e FACEPE.

além disso, os resultados são comparados com vários métodos propostos na literatura.

Além desta, este trabalho está organizado em outras quatro seções. A Seção II realiza uma descrição das características de mapas caóticos. A Seção III propõe um novo algoritmo de inserção e extração de marca d'água. A Seção IV discute e avalia os resultados experimentais obtidos e os compara com métodos propostos na literatura. As conclusões deste trabalho são resumidas na Seção V.

II. Mapas Caóticos

Uma série temporal discreta $\{x_i\}_{i=0}^{\infty}$, obtida a partir de mapas caóticos unidimensionais é dada pela iteração de uma função não-linear e não-reversível $f(x)$, sob uma condição inicial x_0, de acordo com [14]

$$x_n = f(x_{n-1}), \quad n = 1, 2, 3, \ldots, \tag{1}$$

gerando uma órbita $\{x_n\}_{n=0}^{\infty} = \{x_0, f(x_0), f(f(x_0)), \cdots\}$ de $f(x)$ a partir de uma condição inicial x_0. A chave usada no algoritmo de marca d'água é empregada para gerar x_0. As primeiras 200 amostras da órbita geradas a partir de x_0 são descartadas para eliminar o comportamento transitório. Exemplos de mapas caóticos $f : [-1, 1] \to [-1, 1]$ incluem o mapa cúbico $f(x) = 4x^3 - 3x$, utilizado neste trabalho, e o mapa logístico $f(x) = 4x(1 - x)$.

Mapas caóticos são conhecidos por gerar sequências não correlacionadas e aperiódicas [14]. Uma propriedade importante dos sistemas caóticos é que eles apresentam sensibilidade à condição inicial, o que significa que as trajetórias próximas se separam exponencialmente rápido. Estas características serão utilizadas para obter uma maior robustez nos algoritmos de inserção e extração de marca d'água. Uma sequência binária $\{z_n\}_{n=0}^{\infty}$, denominada por sequência binária caótica, é obtida a partir de $\{x_n\}_{n=0}^{\infty}$ via quantização abrupta [19].

III. Algoritmo Proposto

Nesta seção, apresentamos um novo esquema de marca d'água, detalhando os processos de inserção e extração de marca d'água. Uma imagem original C_O em escala de cinza de tamanho 512×512 píxeis é dividida em blocos não sobrepostos de 8×8 píxeis (o número de blocos para esta imagem é 4096) e a DCT bidimencional é executada em cada bloco. Considerando $C_O(x, y)$ o valor do píxel (x, y) na imagem original, uma versão da DCT bidimensional é da forma [1]:

$$\begin{aligned} \mathrm{DCT}(u, v) &= \alpha(u)\alpha(v) \sum_{x=0}^{N_b-1} \sum_{y=0}^{M_b-1} C_O(x, y) \\ &\quad \cos\left(\frac{\pi u(2x+1)}{2N_b}\right) \cos\left(\frac{\pi v(2y+1)}{2M_b}\right), \end{aligned} \tag{2}$$

sendo $\alpha(u) = 1/\sqrt{N_b}$ para $u = 0$, caso contrário $\alpha(u) = \sqrt{2/N_b}$, e de forma semelhante $\alpha(v) = 1/\sqrt{M_b}$ para $v = 0$, caso contrário $\alpha(v) = \sqrt{2/M_b}$. Para o tamanho de bloco considerado, $N_b = M_b = 8$. Como as altas frequências têm um grande impacto visual e as baixas frequências apresentam fraquezas a diferentes ataques, a inserção da marca d'água é feita nas frequências médias [1], [20], mostradas na área

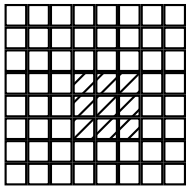


Fig. 1. Um bloco de tamanho 8×8 e em um sub-bloco de tamanho 3×3 (área hachurada).

hachurada da Fig. 1 (as posições de um bloco da DCT em que a marca é inserida estão hachuradas, sendo denominadas de sub-bloco). Define-se γ_i e θ_i a mediana dos coeficientes da DCT do i-ésimo bloco e a média dos coeficientes do sub-bloco correspondente.

A Fig. 2 ilustra três imagens com 256 níveis de cinza (Lena, Pimenta, Avião) de tamanho 512×512 píxeis e a imagem binária de marca d'água (denominada de W) de tamanho 32×32 bits consideradas neste trabalho.

A. Algoritmo de inserção de marca d'água

Para cada bloco, bits de marca d'água são inseridos na imagem original de acordo com os seguintes passos:

- A imagem C_O é divida em blocos 8×8 não sobrepostos e calcula-se os valores de θ_i e γ_i.
- Realiza-se a geração de uma sequência binária a partir de um mapa caótico, sendo sua condição inicial a chave K do algoritmo de marca d'água.
- Dois bits da imagem de marca d'água W são concatenados com cinco bits obtidos com o mapa caótico, obtendo-se uma sequência de 7 bits que é a sequência de informação de um código corretor de erro BCH. Obtém-se uma palavra código de 15 bits, dos quais 8 são bits de paridade. Repetindo este procedimento para todos os bits da imagem de marca d'água, obtêm-se uma sequência de bits de paridade $(p_i, i = 1, \cdots, 4096)$ que são inseridos na imagem C_O de acordo com o procedimento descrito a seguir.
- Cada bit de paridade é inserido em um bloco da imagem de acordo com as seguintes regras. O bit de paridade igual a 0 indica que para este bloco $|\theta_i| - |\gamma_i| \geq df$, em que df é uma constante positiva fixa para todos os blocos. Se esta condição não é satisfeita, a cada coeficiente da DCT do sub-bloco é adicionado um valor ε_i de tal forma que a média do sub-bloco modificado θ_i' satisfaça $|\theta_i'| - |\gamma_i| > df$. O valor de ε_i é calculado para cada bloco. De forma análoga, o bit de paridade 1 indica que subtrai-se ε_i de

(a) (b) (c) (d)

Fig. 2. Imagens utilizadas (a) Lena, (b) Pimenta, (c) Avião, (d) Imagem de Marca d'água.

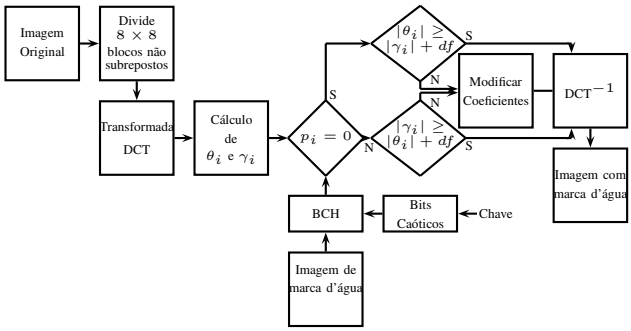


Fig. 3. Diagrama de blocos do algoritmo de inserção de marca d'água.

cada elemento do sub-bloco quando $|\gamma_i| - |\theta_i| \leq df$, com a finalidade que $|\gamma_i| - |\theta'_i| > df$. O valor de df estabelece um compromisso entre imperceptibilidade e robustez e sua escolha será descrita na Seção IV.

- Após a inserção dos bits de paridade na imagem, faz-se a DCT inversa de cada bloco, obtendo-se a imagem com marca d'água, denominada de C_W.

A Fig. 3 mostra o diagrama de blocos do algoritmo de inserção de marca d'água proposto. A Fig. 4 ilustra os resultados deste algoritmo para as três imagens mostradas na Fig. 2. Observa-se que a marca d'água é visualmente imperceptível.

B. Algoritmo de recuperação da marca d'água

Dada uma imagem com marca d'água C'_W, podendo ser diferente de C_W devido a ataques, e a chave K, o algoritmo de recuperação da marca d'água segue os seguintes passos:

- A imagem C'_W é divida em blocos 8×8 não sobrepostos e executa-se a DCT para cada bloco.
- Calcula-se γ_i para o i-ésimo bloco e θ_i para o sub-bloco correspondente, e estima-se o bit de paridade $\hat{p}_i$ do i-ésimo bloco da seguinte forma: se $|\theta_i| > |\gamma_i|$, então $\hat{p}_i = 0$, caso contrário $\hat{p}_i = 1$. A sequência de bits de paridade obtida para a imagem $(\hat{p}_i, i = 1, \cdots, 4096)$ é dividida em subsequências de 8 bits cada, $\hat{\mathbf{p}}_j = \hat{p}_{j1} \cdots \hat{p}_{j8}$, para $j = 1, \cdots, 512$.
- Utiliza-se a chave K para replicar a sequência binária gerada a partir do mapa caótico.
- Para cada $\hat{\mathbf{p}}_j$, o algoritmo de extração conhece os 5 bits caóticos de uma sequência de informação de 7 bits, existem 4 possíveis sequências de paridade, dependendo dos bits de marca d'água $00, 01, 10, 11$. Uma estimativa inicial destes bits de marca d'água é obtida pela menor distância Hamming entre $\hat{\mathbf{p}}_j$ e estas possíveis sequências de paridade. A seguir concatena-se os bits de marca d'água estimados, os cinco bits de caos e os oito bits $\hat{\mathbf{p}}_j$, obtendo-se uma palavra de 15 bits. Esta palavra é decodificada usando o algoritmo Berlekamp-Massey (BM), obtendo-se 2 bits da imagem de marca d'água.
- Repete-se este procedimento para cada $j = 1, \cdots, 512$.

(a) (b) (c)

Fig. 4. Imagens com marca d'água (a) Lena, (b) Pimenta, (c) Avião.

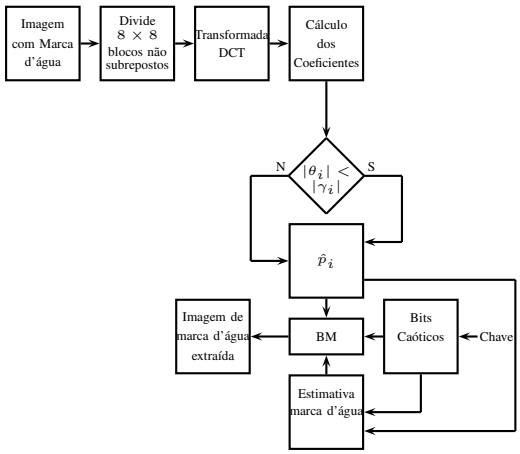


Fig. 5. Diagrama de blocos do algoritmo de extração de marca d'água.

A Fig. 5 mostra o diagrama de blocos do algoritmo de extração de marca d'água proposto.

IV. Resultados

Esta seção avalia as propriedades de imperceptibilidade e robustez da técnica proposta.

A. Relação Sinal Ruído de Pico

A relação sinal ruído de pico (PSNR, *peak signal to noise ratio)* é uma medida da degradação na imagem causada pela inserção da marca d'água. Esta é uma medida da imperceptibilidade da marca d'água, sendo expressa em unidade de decibéis (dB) e para imagens em escala de cinza com valor máximo igual a 255 é definida por:

$$\text{PSNR} = 10 \log_{10} \left(\frac{255^2}{\text{MSE}} \right) \text{ (dB)}, \tag{3}$$

em que

$$\text{MSE} = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^{M} \sum_{j=1}^{N} (C_O(i,j) - C_W(i,j))^2, \tag{4}$$

é o erro quadrático médio entre a imagem original e a imagem com marca d'água. Em (4), $C_O(i,j)$ e $C_W(i,j)$ são os valores dos píxeis na posição (i,j) na imagem original C_O e na imagem com marca d'água C_W, respectivamente, para uma imagem de tamanho $M \times N$. Outro parâmetro que mede a degradação da imagem com marca d'água com respeito à

imagem original é o Índice de Similaridade Estrutural (SSIM, *Structural Similarity Index*), sendo definida por [20]:

$$\text{SSIM} = \frac{(2\mu_O\mu_W + \alpha)(2\rho_{OW} + \beta)}{(\mu_O^2\mu_W^2 + \alpha)(\sigma_O^2\sigma_W^2 + \beta)}, \quad (5)$$

sendo μ_O e μ_W a média da imagem original e da imagem com marca d'água, respectivamente, σ_O^2 e σ_W^2 as variâncias das duas imagens, ρ_{OW} a covariância entre C_O e C_W, α e β são constantes, sendo $\alpha = 2,55$ e $\beta = 7,65$ [20].

O valor de df utilizado no algoritmo de inserção modifica a degradação da imagem causada pela inserção da marca d'água. As Tabelas I e II mostram os resultados da PSNR e SSIM para vários valores de df, respectivamente, para as imagens ilustradas na Fig. 2. Verifica-se que a redução do valor de df melhora a imperceptibilidade da imagem com marca d'água. Neste trabalho, adotaremos $df = 0,35$, o que implica em um PSNR próximo de 50 dB e um SIMM próximo de 0,998. Os valores de PSNR e SSIM para o método proposto (com $df = 0,35$) e para os métodos aprresentados em [20] e [21] são comparados na Tabela III. Os resultados mostrados nesta tabela foram obtidos com imagens de tamanho 512×512 píxeis e imagem de marca d'água W de tamanho 32×32 bits [20], [21]. Observa-se que o método proposto com $df = 0,35$ apresenta resultados melhores que os obtidos em [20] e [21].

TABELA I

PSNR PARA VÁRIOS VALORES DE df PARA TRÊS IMAGENS.

Fator	df						
	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55
Lena	53,55	51,28	50,26	48,67	44,28	40,91	36,76
Pimenta	53,81	51,32	50,61	48,74	44,51	41,14	37,01
Avião	53,27	50,87	49,93	47,90	43,91	40,62	36,11

TABELA II

SSIM PARA VÁRIOS VALORES DE df PARA TRÊS IMAGENS.

Fator	df					
	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50
Lena	0,9991	0,9986	0,9982	0,9884	0,9841	0,9805
Pimenta	0,9992	0,9988	0,9983	0,9881	0,9850	0,9814
Avião	0,9991	0,9985	0,9982	0,9872	0,9838	0,9799

B. Correlação Normalizada

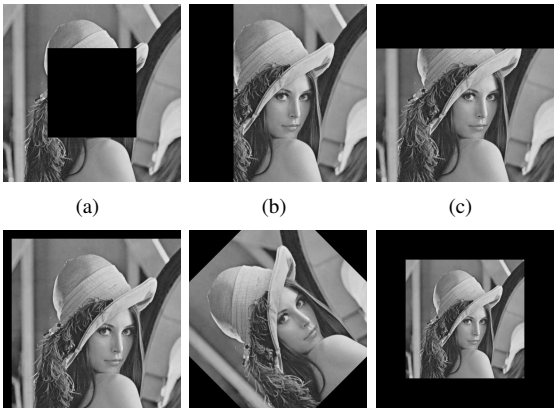
Para avaliar a qualidade da marca d'água extraída, define-se a correlação normalizada (NC), da seguinte forma [20]:

$$\text{NC} = \frac{\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n} W(i,j) \times W'(i,j)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n} W(i,j)^2 \sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n} W'(i,j)^2}}, \quad (6)$$

TABELA III

COMPARAÇÃO DE PSNR E SIMM PARA TRÊS IMAGENS SEM ATAQUES.

Algoritmo	PSNR			SIMM		
	Lena	Pimenta	Avião	Lena	Pimenta	Avião
Proposto	50,26	50,61	49,93	0,998	0,998	0,998
[20]	45,69	45,53	45,93	0,994	0,994	0,993
[21]	41,39	43,07	42,75	0,994	0,995	0,994



(a) (b) (c)

(d) (e) (f)

Fig. 6. Ataques geométricos (a) Corte 25% Centro, (b) Corte 25% coluna, (c) Corte 25% linha, (d) translação 5×5, (e) Rotação $45°$, (f) Escalonamento 0.5.

em que W' é a marca d'água extraída e W a marca d'água original, ambas de dimensão $m \times n$. O valor máximo igual a 1 indica que $W' = W$. A NC é uma medida de robustez da inserção da marca d'água. Uma definição similar deste parâmetro é usada em [21]:

$$\text{NC}_1 = \frac{\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n} W(i,j) \times W'(i,j)}{m \times n}. \quad (7)$$

Os resultados da correlação normalizada são apresentados para vários ataques. Adição de ruído gaussiano (variância $\sigma^2 = \{0,001; 0,003; 0,005\}$), ruído sal e pimenta (densidade de ruído $d = \{0,001; 0,002; 0,01\}$), filtro de mediana (janelas de tamanho $\{3 \times 3; 5 \times 5; 7 \times 7\}$) e compressão JPEG com fatores de compressão $q = 40, 50, 60, 70$. O esquema proposto também é avaliado sob diferentes tipos de ataques geométricos mostrados na Fig. 6. As Tabelas IV e V apresentam comparações dos valores da correlação normalizada obtidas com o algoritmo proposto e algoritmos propostos na literatura, considerando diferentes ataques. Os resultados mostram que o algoritmo proposto apresenta robustez aos ataques analisados, apresentando em vários casos valores de correlação normalizada melhores que os obtidos com as técnicas existentes para um PSNR em torno de 50 dB e SSIM próximo a 0,998. A robustez do algoritmo é devido ao código corretor de erro, uma vez que no processo de recuperação da marca d'água, cinco bits são obtidos a partir do mapa caótico e são reproduzidos no processo de extração sem erros. Após estes procedimentos o algoritmo Berlekamp-Massey é capaz de corrigir até dois erros. No caso da existência de mais de dois erros, estes nem sempre estão localizados nas posições da mensagem referentes aos bits de marca d'água.

V. CONCLUSÕES

Este artigo apresenta uma nova técnica de inserção e extração de marca d'água em imagens em escala de cinza. Os bits da marca d'água são incorporados nos coeficientes da DCT dependendo do valor de um limiar (df) no qual existe um compromisso entre imperceptibilidade e robustez. O valor deste limiar é escolhido para que o esquema proposto atinja

níveis de imperceptibilidade com PSNR perto de 50 dB e SSIM em torno a 0,998. O esquema é avaliado para diferentes tipos de ataques. Os resultados experimentais demonstram que o esquema proposto apresenta, em alguns casos, maior robustez do que algumas técnicas existentes em termos da correlação normalizada.

REFERÊNCIAS

[1] S. Katzenbeisser and F. Petitcolas, *Information Hiding Techniques for Steganography and Digital Watermarking*. Artech House Print on Demand, 1999.

[2] J. O'Ruanaidh and T. Pun, "Rotation, scale and translation invariant spread spectrum digital image watermarking," *Signal Processing*, vol. 66, no. 3, pp. 303–317, May 1998.

[3] A. Qasim, F. Meziane, and R. Aspin, "Digital watermarking: Applicability for developing trust in medical imaging workflows state of the art review," *Computer Science Review*, vol. 27, pp. 45–60, February 2018.

[4] Q. Su, D. Liu, Z. Yuan, G. Wang, X. Zhang, B. Chen, and T. Yao, "New rapid and robust color image watermarking technique in spatial domain," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 30 398–30 409, January 2019.

[5] Z. Shao, Y. Shang, Y. Zhang, X. Liu, and G. Guo, "Robust watermarking using orthogonal Fourier-Mellin moments and chaotic map for double images," *Signal Processing*, vol. 120, pp. 522–531, March 2016.

[6] Y. Lee, Y. Seo, and D. Kim, "Digital blind watermarking based on depth variation prediction map and DWT for DIBR free-viewpoint image," *Signal Processing: Image Communication*, vol. 70, pp. 104–113, February 2019.

[7] R. Keshavarzian and A. Aghagolzadeh, "ROI based robust and secure image watermarking using DWT and Arnold map," *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, vol. 70, no. 3, pp. 278–288, March 2016.

[8] M. Moosazadeh and G. Ekbatanifard, "A new DCT-based robust image watermarking method using teaching-learning-based optimization," *Journal of Information Security and Applications*, vol. 47, pp. 28–38, August 2019.

[9] N. Loan, N. Hurrah, S. Parah, J. Lee, J. Sheikh, and G. Bhat, "Secure and robust digital image watermarking using coefficient differencing and chaotic encryption," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 19 876–19 897, March 2018.

TABELA IV

COMPARAÇÃO DA NC PARA AS IMAGENS LENA E AVIÃO

Ataque	Fator	Imagem Lena		Imagem Avião	
		Proposto	[20]	Proposto	[20]
Ruído Gaussiano	$\sigma^2 = 0,001$	0,9682	0,9393	0,9586	
	$\sigma^2 = 0,005$	0,9431		0,9390	
Compressão JPEG	$q = 70$	1	1	1	1
	$q = 60$	1	1	1	1
	$q = 50$	0,9951	0,9990	0,9944	0,9971
	$q = 40$	0,9786	0,8733	0,9706	0,8669
Ruído Sal e Pimenta	$d = 0,001$	1		0,9984	
	$d = 0,01$	0,9484	0,8314	0,9216	
Filtro de Mediana	3×3	0,9990	0,9854	0,9987	
	5×5	0,9355		0,9199	
	7×7	0,9047		0,8867	
Cortar	25%Centro	0,9921	1	0,9801	0,9904
	25%Coluna	0,9921	0,9168	0,9835	0,8839
	25%Fila	0,9812	0,8564	0,9815	0,9971
	50%Centro	0,9686	0,9733	0,9377	0,9639
	50%Coluna	0,9377	0,8908	0,9119	0,9352
	50%Fila	0,9606	0,7680	0,9307	0,8606
Translação	(5,5)	0,9837	0,5197	0,9796	0,5201
	(10,10)	0,9471		0,9110	
	(10,20)	0,8993		0,8643	
Rotação	5°	0,8454	0,4942	0,7991	0,4936
	45°	0,7692		0,7588	
	50°	0,7681		0,7159	
	70°	0,6936		0,6620	
Escalonamento	0,25	0,9671		0,9173	
	0,5	0,9768	0,7056	0,9498	0,7112
	0,8	0,9983	1	0,9806	1

TABELA V

COMPARAÇÃO DA NC_1 PARA AS IMAGENS LENA E PIMENTA

Ataque	Fator	Imagem Lena		Imagem Pimenta	
		Proposto	[21]	Proposto	[21]
Ruído Gaussiano	$\sigma^2 = 0,001$	0,9677	0,9092	0,9548	0,7910
	$\sigma^2 = 0,005$	0,9413	0,9033	0,9388	0,7910
Compressão JPEG	$q = 70$	1	1	1	0,9746
	$q = 60$	1		1	
	$q = 50$	0,9908	0,9980	0,9910	0,9238
	$q = 40$	0,9722		0,9627	
Ruído Sal e Pimenta	$d = 0,001$	0,9979	0,9990	0,9958	0,9980
	$d = 0,01$	0,9455	0,9883	0,9284	0,9541
Filtro de Mediana	3×3	0,9990	1	0,9981	0,9385
	5×5	0,9319	0,7842	0,9302	0,6875
	7×7	0,9022	0,7842	0,8843	0,4238
Cortar	25%Centro	0,9824		0,9786	
	25%Coluna	0,9904		0,9806	
	25%Fila	0,9871		0,9697	
	50%Centro	0,9572	0,9648	0,9368	0,8643
	50%Coluna	0,9322	0,7305	0,9047	0,5547
	50%Fila	0,9351	0,5703	0,9183	0,6582
Translação	(5,5)	0,9824		0,9618	
	(10,10)	0,9228	0,3984	0,9261	0,4922
	(10,20)	0,9003	0,4395	0,8857	0,4697
Rotação	5°	0,8249		0,8063	
	45°	0,7753	0,4912	0,7708	0,4922
	50°	0,7089	0,5000	0,6920	0,4932
	70°	0,6812	0,4785	0,6573	0,5068
Escalonamento	0,25	0,9475	0,9951	0,9407	0,8584
	0,5	0,9611	1	0,9553	0,9756
	0,8	0,9894		0,9791	

[10] S. Chen and H. Leung, "Ergodic chaotic parameter modulation with application to digital image watermarking," *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 14, no. 19, pp. 1590 – 1602, October 2005.

[11] S. Roy and A. Kumar, "A blind DCT based color watermarking algorithm for embedding multiple watermarks," *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, vol. 72, pp. 149–161, Febraury 2017.

[12] Q. Gu and G. Gao, "A novel reversible robust watermarking algorithm based on chaotic system," *Digital Signal Processing*, vol. 23, pp. 213–217, January 2013.

[13] X. Wu and Z. Guan, "A novel digital watermark algorithm based on chaotic maps," *Physics Letters A*, vol. 365, pp. 403–406, January 2007.

[14] S. Strogatz, *Nonlinear Dynamics and Chaos with Applications to Physics, Biology, Chemistry, and Engineering*, ser. Studies in Nonlinearity Series. Westview Press, 2001.

[15] Y. Tan, J. Qin, X. Xiang, W. Ma, W. Pan, and N. Xiong, "A robust watermarking scheme in YCbCr color space based on channel coding," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 25 026 – 25 036, January 2019.

[16] P. Lefevre, P. Carre, and P. Gaborit, "Application of rank metric codes in digital image watermarking," *Signal Processing: Image Communication*, vol. 74, pp. 119–128, May 2019.

[17] S. Sarreshtedari, M. Akhaee, and A. Abbasfar, "Source-channel coding-based watermarking for self-embedding of JPEG images," *Signal Processing: Image Communication*, vol. 62, pp. 106–116, March 2018.

[18] T. Fan, H. Chao, and B. Chieu, "Lossless medical image watermarking method based on significant difference of cellular automata transform coefficient," *Signal Processing: Image Communication*, vol. 70, no. 174-183, February 2019.

[19] J. V. Evangelista, J. A. Artiles, D. P. Chaves, and C. Pimentel, "Emitter-coupled pair chaotic generator circuit," *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, vol. 77, pp. 112–117, July 2017.

[20] F. Ernawan and M. Kabir, "A robust image watermarking technique with an optimal DCT psychovisual threshold," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 20 464–20 480, April 2018.

[21] N. Makbol, B. Khoo, and T. Rassem, "Block-based discrete wavelet transform-singular value decomposition image watermarking scheme using human visual system characteristics," *IET Image Processing*, vol. 10, no. 1, pp. 34 – 52, December 2017.