



República Federativa do Brasil
Ministério da Economia
Instituto Nacional da Propriedade Industrial

(21) BR 102018014244-5 A2



(22) Data do Depósito: 12/07/2018

(43) Data da Publicação Nacional: 21/01/2020

(54) **Título:** TRANSFORMADAS DISCRETAS DE COMPRIMENTOS 8, 16 E 32 COM BAIXO CUSTO ARITMÉTICO PARA APLICAÇÕES DE COMPRESSÃO DE IMAGEM E VÍDEO

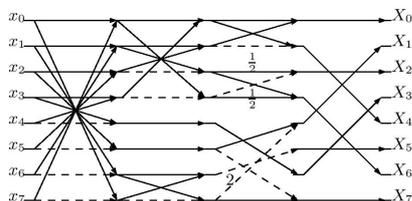
(51) **Int. Cl.:** H04N 19/42; H04N 19/60; H04N 19/13; H04N 19/91.

(52) **CPC:** H04N 19/42; H04N 19/60; H04N 19/13; H04N 19/91.

(71) **Depositante(es):** UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO; UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA - UFSM.

(72) **Inventor(es):** DIEGO RAMOS CANTERLE; RENATO JOSÉ DE SOBRAL CINTRA; FÁBIO MARIANO BAYER.

(57) **Resumo:** TRANSFORMADAS DISCRETAS DE COMPRIMENTOS 8, 16 E 32 COM BAIXO CUSTO ARITMÉTICO PARA APLICAÇÕES DE COMPRESSÃO DE IMAGEM E VÍDEO Devido à crescente demanda por elevadas taxas de processamento de dados, as comunidades científica e tecnológica vem dando grande atenção à metodologias que exijam baixo custo computacional. Uma maneira de reduzir o custo computacional em processamento de sinais é a utilização de transformadas que tenham custo multiplicativo nulo. Na presente invenção, são propostas três novas transformadas de comprimentos 8, 16 e 32. Essas transformadas são aproximações da transformada discreta do cosseno (DCT) e possuem grande utilidade em compressão de imagem e vídeo, como nos padrões JPEG, MPEG-1, MPEG-2, H.261, H.263, H.264 e, mais recentemente, o HEVC. O esquema proposto baseia-se em uma aproximação ortogonal para a DCT de comprimento 8 baseada na série de aproximações propostas por Ahmed, Bouguezel e Swamy. A nova transformada de comprimento 8 foi escalonada pelo método de Jridi, Alfalou e Meher para comprimentos 16 e 32. São também introduzidos algoritmos rápidos para estas novas aproximações. Os métodos propostos foram avaliadas a partir de métricas de similaridade com a DCT e medidas de codificação, assim como experimentos de compressão de imagem, o que estabelece seu bom desempenho em aplicações para esse fim.



TRANSFORMADAS DISCRETAS DE COMPRIMENTOS 8, 16 E 32 COM BAIXO CUSTO ARITMÉTICO PARA APLICAÇÕES DE COMPRESSÃO DE IMAGEM E VÍDEO

→ Campo de aplicação

01. A presente invenção tem como aplicabilidade a compressão de dados digitais baseada em transformada de bloco. O sistema de codificação de imagem e vídeo desta invenção é similar ao utilizado nos padrões JPEG e HEVC. Para utilizar esta invenção basta substituir a transformada comumente utilizada, para transformação dos blocos, nesses padrões de compressão pela invenção proposta. A invenção proporciona grande poder de decorrelação de sinais modelados por um processo Markoviano de primeira ordem. Um exemplo de dados que se encaixam nesse tipo de modelos são imagens estacionárias. A presente invenção tem baixo custo aritmético, o que potencializa a sua aplicação em sistemas que necessitam o processamento de quantidades massivas de dados, severa limitação de recursos e limitação em potência.

→ Antecedente da invenção

02. No contexto de processamento de sinais, a transformada discreta do cosseno (DCT) [44] é uma ferramenta central. Em especial, no contexto de codificação de imagem e vídeo, a transformada discreta do cosseno é fundamental [45, 46, 47]. A DCT vem sendo amplamente utilizada, como nos padrões JPEG [48], H.264 [49] e HEVC [50]. A transformada de Karhunen-Loève (KLT) é uma transformada que possui propriedades ótimas de compactação de energia [51], sendo a DCT uma aproximação assintótica da KLT. Nesse contexto, tem-se um grande interesse na utilização da DCT, pois, diferentemente da KLT, a DCT não depende do sinal de entrada [45].

03. Nos dias atuais, é notável a transmissão de grandes massas de dados, portanto, tal tipo de transmissão vem merecendo grande atenção. Logo, ao aplicar a DCT, uma mudança na etapa do processamento pode afetar a velocidade e o consumo de energia do processo de forma significativa [52, 53]. Quando os dados seguem processo Markoviano de primeira ordem altamente correlacionado, como no caso de imagens, aplica-se a DCT em blocos do sinal de entrada para maior eficiência computacional. Contudo, o cômputo da DCT pode se tornar ainda mais eficiente com a utilização de algoritmos rápidos, os quais não podem ser aplicados na KLT devido a sua dependência do sinal de entrada [45]. Para o cálculo de algoritmos rápidos da DCT, existem diversas opções na literatura [54, 55, 56, 57].

04. Contudo, mesmo com a utilização de algoritmos rápidos e do sistema de blocos, ainda temos aritmética de ponto flutuante para o cálculo da DCT, devido a multiplicações não-triviais que são exigidas em seu cômputo [45]. Desta forma, alternativamente, podem ser utilizadas transformadas que são aproximações da DCT. Caso os valores de entrada de tais transformadas sejam racionais diádicos, serão obtidas aproximações livre de multiplicações não-triviais, assim como, em aproximações baseadas em *lifting scheme* [55]. Alternativamente, podem ser utilizados valores de entrada em $0, \pm 12, \pm 1, \pm 2$, sendo, desta forma, livre de multiplicações não-triviais [59, 60, 61, 62, 63, 64]. Com isso, o cômputo dessas transformadas aproximadas envolverá apenas somas e deslocamentos de *bit*. Na literatura, existem diversos trabalhos que abordam essas aproximações [60, 61, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 74]. De acordo com figuras de mérito relevantes ao problema, tais transformadas são consideradas próximas à DCT. Em vez de fornecerem o cômputo exato da DCT, elas oferecem uma aproximação a um baixíssimo custo computacional.

05. A mais tradicional transformada de complexidade multiplicativa nula da literatura para processamento de imagem é a transformada de Walsh-Hadamard (WHT) [75], porém a mesma não foi proposta como aproximação da DCT. A primeira aproximação proposta para a DCT foi a DCT sinalizada (SDCT) [59]. A SDCT é obtida a partir da aplicação da função sinal em cada elemento da matriz da DCT exata. O cômputo da SDCT de comprimento 8 com algoritmo rápido exige 24 adições. A SDCT é uma transformada não-ortogonal, porém possui inversa simples e seu cômputo com o algoritmo rápido proposto em [76] exige 20 adições e 4 deslocamentos de *bit*. Desta forma, a SDCT mesmo sendo não-ortogonal possui inversa com baixa complexidade computacional.

06. Após a SDCT ser proposta, Lengwehasatit-Ortega [77] propuseram uma série de aproximações para a DCT de baixa complexidade. Entre tais aproximações, destaca-se a “aproximação de nível 1” por ser uma transformada de comprimento 8 com complexidade multiplicativa nula. Essa transformada é ortogonal, ou seja, sua inversa é igual a sua transposta, requerendo 24 adições e 2 deslocamentos de *bit* para o seu cômputo. Essa transformada possui um bom desempenho em relação a relação sinal-ruído de pico (PSNR) em compressão de imagens.

07. Um grupo de transformadas de baixa complexidade computacional de comprimento 8 são as transformadas propostas por Bouguezel-Ahmed-Swamy (BAS) [63, 64, 71, 72, 73, 74]. Essas transformadas têm a característica de não ter boa proximidade com a DCT em relação as métricas erro quadrático médio [45] e erro de energia total [61], porém possuem altos ganho de codificação unificado [78] e de eficiência [79], tornando-as adequadas para aplicações em compressão de imagens. Além das transformadas de comprimento 8, a transformada proposta em [74] foi escalonada para os comprimentos 16

e 32. Já em [64] foi dada uma expressão geral, para a transformada proposta, a fim de obter seu escalonamento para qualquer comprimento N . Esse grupo de transformadas, em geral, consiste de variações de outras transformadas de baixa complexidade da literatura, principalmente da SDCT.

08. A DCT arredondada (RDCT) [61] é uma transformada de comprimento 8 que é obtida a partir da aplicação de uma função de arredondamento na DCT exata. A complexidade computacional de seu algoritmo rápido é de 22 adições. Já a RDCT modificada (MRDCT) [60] é uma transformada obtida a partir da modificação conveniente da RDCT e exige apenas 14 adições para sua implementação. A MRDT é a transformada com menor complexidade computacional encontrada na literatura.

09. Outra aproximação da DCT é uma transformada criada para aplicação em imagens de rádio-frequência [65], obtida a partir do argumento mínimo do erro de energia total, sendo o resultado de um problema de otimização. Em [80], é proposta uma transformada que é uma modificação da matriz proposta por Brahimi e Bouguezel [81], essa transformada necessita apenas 16 adições para o seu cômputo e tem boas medidas de ganho de codificação e eficiência em relação ao seu baixo custo aritmético.

10. Aplicando funções inteiras aos valores de entrada da DCT exata de comprimento 8 surgiu uma classe de transformadas discretas de baixa complexidade computacional [70]. Essa classe considera um parâmetro de busca que varia em um determinado intervalo e isso gera um grande número de novas transformadas. Introduzindo as restrições de ortogonalidade, *quase*-ortogonalidade e, ainda, no caso de não ocorrer uma dessas duas restrições, as transformadas inversas são simples e com baixa complexidade. Desta forma, o grande número de

transformadas geradas pelo método é reduzido a poucas novas transformadas com boas propriedades.

11. A partir da parametrização do algoritmo rápido de Feig-Winograd [57], em [62] foi obtida uma nova classe de transformadas aproximadas da DCT de comprimento 8, sendo um subespaço matricial que depende de parâmetros. Esse método consiste em realizar uma busca computacional considerando que os parâmetros desse subespaço matricial possuem apenas valores, 0, ± 1 , ± 2 . Assim, encontra-se um grande número de novas transformadas que são submetidas a um problema de otimização multicritério [82, 83]. Desta forma, encontram-se transformadas ótimas segundo um conjunto de métricas de distância e qualidade, que inclui as seguintes medidas: erro quadrático médio [45], erro de energia total [61], ganho de codificação unificado [78] e eficiência [79].

12. Considerando a minimização de medidas angulares, em [84] é proposta uma nova transformada ortogonal de comprimento 8. Esta transformada possui custo aritmético de 24 adições e 6 deslocamentos de *bit*. Essa transformada foi escalonada para comprimento 16 e 32 pelo método de Jridi, Alfalou e Meher (JAM) [85], e para seus cálculos são necessárias 64 e 160 adições, respectivamente.

13. O método de JAM [85] é um método de escalonamento de transformadas de comprimentos menores para comprimentos maiores. Por esse método é possível obter transformadas de comprimento $2N$, a partir de transformadas de comprimento N . Ao propor o método em [85], os autores também escalonam a transformada RDCT para comprimentos 16 e 32, que necessitam de 60 e 152 adições, respectivamente.

14. Outras transformadas de comprimento 16 são dadas em [68, 76, 87]. Substituindo os valores de entrada da DCT por valores do conjunto $\{0, \pm 1\}$ respeitando ortogonalidade, simetria em relação a DCT

e boas propriedades de compactação de energia, em [68] foi proposta uma aproximação para DCT de comprimento 16 que exige 72 adições para o seu cômputo. A transformada proposta em [87] é obtida a partir de aproximações por inteiros. Tal transformada é ortogonal e necessita 60 adições para o seu cômputo. Em [86], é proposta uma transformada a partir de uma metodologia semelhante a MRDCT e, a melhor de nosso conhecimento, é a transformada de comprimento 16 com menor complexidade aritmética da literatura, demandando apenas de 44 adições para o seu cômputo.

→ **Sumário da invenção**

15. A metodologia para obtenção da invenção proposta objetiva uma transformada de comprimento 8 que aproxime a DCT baseando-se nas transformadas propostas por Bouguezel-Ahmad-Swamy [63, 64, 71, 72, 73, 74]. A transformada aproximada encontrada foi escalonada para comprimentos 16 e 32 pelo método de Jridi, Alfalou e Meher [85]. A presente invenção requer de um baixo custo aritmético para compressão de imagem e vídeo e é livre de multiplicações não-triviais. Desta forma, é proposta a substituição da DCT nos padrões JPEG e HEVC pela invenção aqui proposta. Assim, o dispositivo implementado a partir de invenção proposta terá alta velocidade de processamento, baixo consumo de área em implementação em *hardware* e baixo consumo de energia.

→ **Breve descrição das figuras**

16. A Figura 1 mostra uma matriz T^8 de baixa complexidade de comprimento 8 proposta.

17. A Figura 2 revela uma matriz $A1$ de permutação do algoritmo rápido proposto.

18. A Figura 3 detalha uma matriz A_2 do algoritmo rápido proposto.
19. A Figura 4 apresenta uma matriz K do algoritmo rápido proposto.
20. A Figura 5 versa sobre uma matriz P de permutação do algoritmo rápido.
21. A Figura 6 mostra uma matriz T^{16} de baixa complexidade de comprimento 16 proposta.
22. A Figura 7 revela uma matriz T^{32} de baixa complexidade de comprimento 32 proposta.
23. A Figura 8 detalha um experimento de compressão de imagens para diferentes níveis de compressão, com r coeficientes retidos, considerando a DCT e a transformada proposta de comprimento 8 (C^8).
24. A Figura 9 apresenta um experimento de compressão de imagens para diferentes níveis de compressão, com r coeficientes retidos, considerando a DCT e a transformada proposta de comprimento 16 (C^{16}).
25. A Figura 10 versa sobre um experimento de compressão de imagens para diferentes níveis de compressão, com r coeficientes retidos, considerando a DCT e a transformada proposta de comprimento 32 (C^{32}).
26. A Figura 11 mostra um algoritmo rápido da transformada C^8 em forma de diagrama de fluxo e sinal decompondo a matriz T^8 , relacionando os dados de entrada x_n , $n = 0, 1, 2, \dots, 7$, aos coeficientes da saída X_k , $k = 0, 1, 2, \dots, 7$. Setas tracejadas representando multiplicação por -1 .
27. A Figura 12 revela um algoritmo rápido da transformada C^{16} em forma de diagrama de fluxo e sinal decompondo a matriz T^{16} , relacionando os dados de entrada x_n , $n = 0, 1, 2, \dots, 15$, aos

coeficientes da saída X_k , $k = 0, 1, 2, \dots, 15$. Setas tracejadas representando multiplicação por -1 .

28. A Figura 13 detalha um algoritmo rápido da transformada C^{32} em forma de diagrama de fluxo e sinal decompondo a matriz T^{32} , relacionando os dados de entrada x_n , $n = 0, 1, 2, \dots, 31$, aos coeficientes da saída X_k , $k = 0, 1, 2, \dots, 31$. Setas tracejadas representando multiplicação por -1 .

→ Descrição detalhada

29. A partir de uma matriz de baixa complexidade de comprimento 8 (T^8), obtém-se uma transformada aproximada (C^8), também de comprimento 8. A matriz T^8 possui apenas elementos do conjunto $0, \pm 1, \pm 2$. Para obtenção de C^8 , aplica-se o método da decomposição polar [88] em T^8 , e então obtém-se uma matriz diagonal de ajuste (S). Considerando aplicações de compressão de imagens a matriz S pode ser suprimida na etapa de quantização, assim o custo aritmético da aplicação da transformada aproximada C^8 é dado apenas pelo custo aritmético da aplicação da matriz T^8 . A transformada aproximada (C^8) pode ser escrita através do produto da matriz diagonal de ajuste (S) e a matriz de baixa complexidade (T^8).

30. Assim, a transformada aproximada (C^8) é dada explicitamente por $C^8 = S \cdot T^8$, em que T^8 pode ser visualizada na Figura 1 e $S = \text{diag } 2^{1/2}, 12, 15, 12, 2^{1/2}, 16, 15, 2^{1/2}$.

31. A aplicação de T^8 em um vetor unidimensional exige 42 adições e 10 deslocamentos de *bit*. Porém, fatorando a matriz T^8 , de maneira semelhante a decimação na frequência de Cooley-Tukey base-2 [89], a complexidade aditiva pode ser reduzida em aproximadamente 52,38%, exigindo apenas 20 adições para seu cômputo. Já a complexidade de deslocamento de *bit* pode ser reduzida em 70%,

exigindo apenas 3 deslocamentos de *bit*. Tal fatoração chama-se algoritmo rápido e é dada da seguinte maneira, $T^8 = P \cdot K \cdot A2 \cdot A1$, as matrizes $A1$, $A2$, K e P podem ser visualizadas nas Figuras 2, 3, 4, e 5, respectivamente, sendo P uma matriz de permutação. O algoritmo rápido da transformada C^8 em forma de diagrama de fluxo e sinal decompondo a matriz T^8 é apresentado na Figura 11.

32. Aplicando o método de Jridi, Alfalou e Meher [85] em T^8 , temos a seguinte matriz de baixa complexidade de comprimento 16, denominada T^{16} , que pode ser visualizada na Figura 6. Para o cômputo dessa transformada são necessárias 186 adições e 32 deslocamentos de *bit*, porém utilizando o esquema proposto por Jridi, Alfalou e Meher e a fatoração da matriz T^{16} são necessárias apenas 56 adições e 6 deslocamentos de *bit*. Desta forma, a complexidade aditiva é reduzida em aproximadamente 69,89% e a complexidade de deslocamento de *bit* em 81,25%. O algoritmo rápido da transformada C^{16} em forma de diagrama de fluxo e sinal decompondo a matriz T^{16} é apresentado na Figura 12.

33. Escalonando a matriz T^{16} pelo método de Jridi, Alfalou e Meher, encontramos a seguinte matriz de comprimento 32 de baixa complexidade, denominada T^{32} , dada na Figura 7. T^{32} necessita 768 adições e 160 deslocamentos de *bit*. Porém, aplicando recursivamente o esquema proposto por Jridi, Alfalou e Meher a matriz T^{32} necessita apenas 144 adições e 12 deslocamentos de *bit*, para o seu cômputo. Assim, a complexidade aditiva é reduzida em 81,25% e a complexidade de deslocamento de *bit* é reduzida em 92,5%. O algoritmo rápido da transformada C^{32} em forma de diagrama de fluxo e sinal decompondo a matriz T^{32} é apresentado na Figura 13.

34. Para encontrar as matrizes diagonais de ajuste referentes as matrizes T^{16} e T^{32} , basta fazer, $S_j = r_h T^j \cdot T^{T j i-1}$, com $j = 16, 32$.

→ **Aplicação em compressão de imagens**

35. Com o objetivo de avaliar o desempenho dos métodos propostos, adotamos a compressão de imagens tipo JPEG baseada na imagem Lena do banco de imagens público “*The USC-SIPI Image Database*” [90] de tamanho 512×512 pixels em escala de cinza com 8 bits. O método de compressão de imagens utilizado segue o seguinte passo-a-passo.

- a) cada imagem A foi dividida em blocos de comprimento 8, 16 e 32, de acordo com o comprimento da transformada considerada;
- b) posteriormente, a cada bloco foi submetido às transformadas propostas da seguinte maneira, $B = C^{\wedge} \cdot A \cdot C^{\wedge T}$, onde B é o bloco transformado;
- c) emprega-se a sequência zig-zag padrão [91] em B, e retém-se r coeficientes iniciais de cada bloco e reconstrói-se a imagem [61];
- d) aos demais coeficientes são atribuídos valor zero, desta forma obtém-se B’;
- e) aplica-se a transformada inversa em cada bloco da seguinte maneira, $A' = C^{\wedge T} \cdot B' \cdot C^{\wedge}$;
- f) recompõe-se os blocos A’ de modo inverso ao descrito no item 1.

36. Transformadas com comprimento 8 fornecem 64 coeficientes no domínio da transformada para cada bloco, enquanto que transformadas de comprimento 16 fornecem 256 coeficientes e transformadas de comprimento 32 fornecem 1024 coeficientes para cada bloco. O percentual de compressão da imagem (PCI) é dado por, $PCI = 1 - r N^2$.

37. A exemplificação deste processo pode ser visualizado nas Figuras 8, 9 e 10. As imagens são comprimidas utilizando a DCT exata e as transformadas propostas para diferentes valores de r.

→ **Comparação com outras invenções**

38. A fim de comparação foram consideradas transformadas ortogonais de comprimento 8, 16 e 32 que podem ser visualizadas nas Tabelas 1, 2 e 3.

39. Foram consideradas medidas de similaridade e eficiência da transformada, complexidade aritmética (A) e complexidade de deslocamento de *bit* (S) para todas transformadas. O erro quadrático médio (MSE) [45] e o erro de energia total (ρ) [61] são medidas de similaridade à DCT e medem empiricamente a distância entre as matrizes aproximadas e a DCT exata. Já o ganho de codificação (C_g^*) [78] e a eficiência da transformada (η) [79] são medidas de codificação e medem o poder de decorrelação e compactação de energia. A Tabela 1 considera todas transformadas de comprimento 8 utilizadas para comparação com a transformada proposta. A Tabela 2 considera todas transformadas de comprimento 16. Já a Tabela 3 considera as de comprimento 32.

Tabela 1: Medidas de avaliação para as transformadas da série de aproximações BAS e demais transformadas consideradas para a comparação entre as transformadas de comprimento 8

Transformada	ρ	MSE	C_g^*	η	A	S
BAS5(0) [63]	26,86	0,07	7,91	85,64	16	0
FW6 [62]	3,32	0,02	6,05	83,08	18	0
BAS3 [73]	6,85	0,03	7,91	85,38	18	0
BAS5(1) [63]	26,86	0,07	7,91	85,38	18	0
BAS5 [63]	26,40	0,07	8,12	86,86	18	2
BAS1 [82]	5,93	0,02	8,12	86,86	18	2
FW5 [62]	7,41	0,05	7,58	83,08	20	10
RDCT [61]	1,79	0,01	8,18	87,43	22	0
BAS6 [64]	35,06	0,10	7,95	85,31	24	0

aproximação de nível 1 (LO) [77]	0,87	0,01	8,39	88,70	24	2
BAS4 [74]	4,09	0,02	8,33	88,22	24	4
ABM [84]	1,22	0,01	8,63	90,46	24	6
$12C^8 = S \cdot T^8$ (proposta)	4,12	0,02	8,12	86,73	20	3

40. De acordo com a Tabela 1, nota-se que a transformada proposta de comprimento 8 possui um custo computacional intermediário com relação as demais transformadas consideradas. Em geral possui resultados melhores que as transformadas com menor complexidade aritmética e piores do que as transformadas que possuem maior complexidade aritmética. Já em relação a transformada FW5 que possui a mesma complexidade aditiva a transformada proposta possui melhor desempenho em relação todas as métricas de comparação.

Tabela 2: Medidas de avaliação para as transformadas da série de aproximações BAS e demais transformadas consideradas para a comparação entre as transformadas de comprimento 16

Transformada	ρ	MS	C	η	A	S
SOBCM [86]						
SBCKMK [87]	41,00					
JAM [85]	30,32					
BAS-2013 [64]	14,74					
BAS-2010 [74]	54,62					
ABM (JAM) [84]						
BCEM [68]						
0,09	7,	0				
0,06	86 67,61	0				
0,05	44	0				
0,13	8,29	0				
	70,83 60					

	8,43 72,23 60 8,19 70,64 64					
16,41 0,056 8,52 73,63 64	8					
13,70	0,05	8,88 76,81 64 12				
8,08	0,05	7,84 65,28 72	0			

$C^{\wedge} 16 = S \cdot T^{\wedge} 16$ (proposta) 18,77 0,06 8,37 72,34 56 6

A partir da Tabela 2, pode-se observar que a transformada proposta de comprimento 16 possui complexidade aritmética maior apenas que a transformada SOBCM, porém tem desempenho superior em todas as métricas consideradas. Ainda, a transformada proposta tem desempenho superior às transformadas SBCKMK e BAS-2013 em relação a todas as métricas consideradas; tem desempenho superior a transformada BCEM em ganho de codificação e eficiência; tem desempenho superior a transformada JAM em relação a eficiência, apesar de possuir menor complexidade aritmética.

Visualizando a Tabela 3, nota-se que a transformada de comprimento 32 proposta possui a menor complexidade aritmética entre as transformadas de comprimento 32 catalogadas na literatura. Apesar da transformada proposta possuir menor complexidade aritmética, possui desempenho superior à transformada BAS-2010 em relação a todas as métricas consideradas e também possui desempenho superior que a transformada JAM de comprimento 32 em relação à eficiência.

Tabela 3: Medidas de avaliação para as transformadas da série de aproximações BAS e demais transformadas consideradas para a comparação de comprimento 32.

Transformada	ρ	MS	C	η	A	S
JAM [85]	48,10	E	*			
BAS-2013 [64]	192,18		g			
BAS-2010 [74]						
ABM (JAM) [84]						
	8,50					
	56,97					
	0,11		0			
	152					
	0,76	0				
	8,27					
	55,91					
	160					

		8,				
		50 58,50				
117,07	0,	160 16				
46,27	24	8,95				
	0,11	61,03				
		160 24				

$$C^{32} = S \cdot T^{32} \text{ (proposta) } 55,27 \ 0,12 \ 8,44 \ 57,33 \ 144 \ 12$$

→ Conclusões

No presente documento, foi proposta uma nova transformada ortogonal aproximada da DCT de comprimento 8 com baixo custo computacional. O algoritmo rápido requer apenas 20 adições, 3 deslocamentos de *bit* e nenhuma multiplicação para o seu cômputo. Ainda, tal transformada foi escalonada pra comprimento 16 e 32 pelo método de Jridi, Alfalou e Meher. A partir do esquema proposto por Jridi, Alfalou e Meher, a transformada escalonada de comprimento 16 demanda 56 adições e 6 deslocamentos de *bit* para o seu cômputo e a transformada escalonada de comprimento 32 necessita 144 adições e 12 deslocamentos de *bit* para o seu cômputo. Os métodos propostos foram comparados com outras invenções em relação a medidas de similaridade e desempenho de codificação, apontando a aplicabilidade da transformada proposta em

codificação de mídias digitais. Reforçando tal ponto, foi apresentada uma aplicação no contexto de compressão de imagens.

→ Referências

44. Ahmed, N. U.; Rao, K. R. **Orthogonal Transforms for Digital Signal Processing**. Springer-Verlag New York, Inc., Secaucus, NJ, USA, 1975.
45. Britanak, V.; Yip, P.; Rao, K. R. *Discrete Cosine and Sine Transforms*. Academic Press, 2007.
46. Gonzalez, R. C.; Woods, R. E. *Digital Image Processing (3rd Edition)*. Prentice-Hall, Inc., Upper Saddle River, NJ, USA, 2006.
47. Pratt, W. K. *Digital Image Processing: PIKS Inside*. John Wiley & Sons, Inc., New York, NY, USA, 3rd edition, 2001.
48. JPEG. Joint photographic experts group, 2012.
49. Wiegand, T.; Sullivan, G. J.; Bjontegaard, G.; Luthra, A. Overview of the H.264/AVC video coding standard. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 13(7):560-576, jul 2003.
50. Pourazad, M. T.; Doutre, C.; Azimi, M.; Nasiopoulos, P. HEVC: The new gold standard for video compression: How does HEVC compare with H.264/AVC? *IEEE Consumer Electronics Magazine*, 1(3):36-46, July 2012.
51. Clark, R. J. Relation between Karhunen-Loève and cosine transform. In *IEE Proceedings-F, Communications, Radar and Signal Processing*, volume 128, pages 359-360, 1981.
52. Potluri, U. S.; Madanayake, A.; Cintra, R. J.; Bayer, F. M.; Kulasekera, S.; Edirisuriya, A. Improved 8-point approximate dct for image and video compression requiring only 14 additions. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I*, 61(6):1727-1740, June 2014.

53. Coutinho, V. A.; Cintra, R. J.; Bayer, F. M.; Kulasekera, S.; Madanayake, A. A multiplierless pruned DCT-like transformation for image and video compression that requires ten additions only. *Journal of Real-Time Image Processing*, 12(2):247-255, aug 2016.
54. Chen, W. H.; Smith, C.; Fralick, S. A fast computational algorithm for the discrete cosine transform. *IEEE Transactions on Communications*, 25(9):1004-1009, 1977.
55. Lee, B. G. A new algorithm for computing the discrete cosine transform. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing*, ASSP-32:1243-1245, December 1984.
56. Loeffler, C.; Ligtenberg, A.; Moschytz, G. Practical fast 1D DCT algorithms with 11 multiplications. In *Proceedings of the International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, pages 988-991, 1989.
57. Feig, F.; Winograd, S. Fast algorithms for the discrete cosine transform. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 40(9), 1992.
58. Liang, J.; Tran, T. D. Fast multiplierless approximations of the DCT with the lifting scheme. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 49(12):3032-3044, Dec 2001.
59. Haweel, T. I. A new square wave transform based on the DCT. *Signal Processing*, 82:2309-2319, 2001.
60. Bayer, F. M.; Cintra, R. J. DCT-like transform for image compression requires 14 additions only. *Electronics Letters*, 48(15):919-921, 2012.
61. Cintra, R. J.; Bayer, F. M. A DCT approximation for image compression. *IEEE Signal Processing Letters*, 18(10):579-582, 2011.
62. Tablada, C. J.; Bayer, F. M.; Cintra, R. J. A class of DCT approximations based on the feig-winograd algorithm. *Signal Processing*, 11:1-20, 2015.

63. Bouguezel, S.; Ahmad, M. O.; Swamy, M. N. S. A low-complexity parametric transform for image compression. In *Proceedings of the 2011 IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, 2011.
64. Bouguezel, S.; Ahmad, M. O.; Swamy, M. N. S. Binary discrete cosine and Hartley transforms. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I*, 60(4):989-1002, 2013.
65. Potluri, U. S.; Madanayake, A.; Cintra, R. J.; Bayer, F. M.; Rajapaksha, N. Multiplier-free DCT approximations for RF multi-beam digital aperture-array space imaging and directional sensing. *Measurement Science and Technology*, 23(11):114003, 2012.
66. Potluri, U. S.; Madanayake, A.; Cintra, R. J.; Bayer, F. M.; Kulasekera, S.; Edirisuriya, A. Improved 8-point approximate DCT for image and video compression requiring only 14 additions. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I*, 2013.
67. Bayer, F. M.; Cintra, R. J. Image compression via a fast DCT approximation. *IEEE Latin America Transactions*, 8(6):708-713, December 2010.
68. Bayer, F. M.; Cintra, R. J.; Edirisuriya, A.; Madanayake, A. A digital hardware fast algorithm and FPGA-based prototype for a novel 16-point approximate DCT for image compression applications. *Measurement Science and Technology*, 23(8):114010, 2012.
69. Bayer, F. M.; Cintra, R. J.; Madanayake, A.; Potluri, U. S. Multiplierless approximate 4-point DCT VLSI architectures for transform block coding. *Electronics Letters*, 49(24):1532-1534, November 2013.
70. Cintra, R. J.; Bayer, F. M.; Tablada, C. J. Low-complexity 8-point DCT approximations based on integer functions. *Signal Processing*, 99:201-214, 2014.

71. Bouguezel, S.; Ahmad, M. O.; Swamy, M. N. S. Low-complexity 8×8 transform for image compression. *Electronics Letters*, 44(21):1249-1250, September 2008.

72. Bouguezel, S.; Ahmad, M. O.; Swamy, M. N. S. A multiplication-free transform for image compression. In *2nd International Conference on Signals, Circuits and Systems*, pages 1-4, November 2008.

73. Bouguezel, S.; Ahmad, M. O.; Swamy, M. N. S. A fast 8×8 transform for image compression. In *2009 International Conference on Microelectronics (ICM)*, pages 74-77, December 2009.

74. Bouguezel, S.; Ahmad, M. O.; Swamy, M. N. S. A novel transform for image compression. In *53rd IEEE International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS)*, pages 509-512, August 2010.

75. Tallia, R.; Morello, P.; Castellano, G. The Walsh-Hadamard transform: an alternative means of obtaining phase and amplitude maps. *Journal of Nuclear Medicine*, 25(5):608-612, 1984.

76. Oliveira, R. S.; Cintra, R. J. Uma fatoração para SDCT inversa. Trabalho de IC da UFPE, 2013.

77. Lengwehasatit, K.; Ortega, A. Scalable variable complexity approximate forward DCT. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 14(11):1236-1248, November 2004.

78. Jayant, N. S.; Noll, P. Digital coding of waveforms: principles and applications to speech and video. *Englewood Cliffs, NJ*, pages 115-251, 1984.

79. Takala, J.; Nikara, J. Unified pipeline architecture for discrete sine and cosine transforms of type IV. In *Proceedings of the 3rd International Conference on Information Communication and Signal Processing*, 2001.

80. Oliveira, R. S.; Cintra, R. J.; Bayer, F. M.; Tablada, C. J. Uma aproximação ortogonal para a DCT. In *XXXI Simpósio Brasileiro de Telecomunicações*, 2013.

81. Brahim, N.; Bouguezel, S. An efficient fast integer DCT transform for images compression with 16 additions only. *Int'l Workshop on Systems, Signal Processing and their Applications*, 2011. 71-74.

82. Miettinen, K. *Nonlinear Multiobjective Optimization*, volume 12 of *International Series in Operations Research and Management Science*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1999.

83. Ehrgott, M. *Multicriteria optimization*. Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems. Springer-Verlag, 2000.

84. Oliveira, R. S. Aproximações para a DCT baseadas em medida angular: Baixa complexidade e compressão de imagens. Trabalho de conclusão de curso da UFPE, 2016.

85. Jridi, M.; Alfalou, A.; Meher, P. K. A generalized algorithm and reconfigurable architecture for efficient and scalable orthogonal approximation of DCT. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I*, 62(2):449-457, 2015.

86. Silveira, T. L. T.; Oliveira, R. S.; Bayer, F. M.; Cintra, R. J.; Madanayake, A. Multiplierless 16-point DCT approximation for low-complexity image and video coding. *Signal, Image and Video Processing*, 11(2):227-233, 2017.

87. Silveira, T. L. T.; Bayer, F. M.; Cintra, R. J.; Kulasekera, S.; Madanayake, A.; Kozakevicius, A. J. An orthogonal 16-point approximate DCT for image and video compression. *Multidimensional Systems and Signal Processing*, 27(1):87-104, 2016.

88. Higham, N. J. Computing the polar decomposition—with applications. *SIAM Journal on Scientific and Statistical Computing*, 7(4):1160-1174, October 1986.

89. Blahut, R. E. *Fast Algorithms for Signal Processing*. Cambridge University Press, 2010.

90. The USC-SIPI image database, 2011.

91. Wallace, G. K. The JPEG still picture compression standard. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 30(1):xviii-xxxiv, 1992.

REIVINDICAÇÕES

- 1) Sistema, dispositivo ou software de compressão e descompressão de mídias digitais capaz de implementar transformadas discretas de comprimentos 8, 16 e 32 com baixo custo aritmético caracterizados pela execução sem operações em ponto flutuante em que o bloco de circuito responsável pelo cômputo da transformação da DCT de comprimento 8, 16 e 32 sejam substituídos pelas transformadas diretas propostas.
- 2) Sistema, dispositivo ou software de compressão e descompressão de mídias digitais capaz de implementar transformadas discretas de comprimentos 8, 16 e 32 com baixo custo aritmético caracterizado pela substituição do bloco de transformação inversa da DCT por implementação em circuito que realizem as transformadas inversas propostas ($\hat{\mathbf{T}}^T$).
- 3) Sistema, dispositivo ou software de compressão e descompressão de mídias digitais capaz de implementar transformadas discretas de comprimentos 8, 16 e 32 com baixo custo aritmético caracterizado pela execução sem operações em ponto flutuante e capacidade de substituir qualquer circuito esquemático rápido para a DCT pelo circuito esquemático rápido para a transformada direta proposta de comprimento 8 ilustrado na Figura 11.

FIGURAS

$$\hat{\mathbf{T}}_8 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 \\ 1 & \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} & -1 & -1 & -\frac{1}{2} & \frac{1}{2} & 1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 1 \\ 1 & -1 & 0 & 1 & -1 & 0 & 1 & -1 \\ \frac{1}{2} & -1 & 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} & 1 & -1 & \frac{1}{2} \\ 1 & -1 & 0 & -2 & 2 & 0 & 1 & -1 \end{bmatrix}$$

Figura 1

$$\mathbf{A}_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

Figura 2

$$\mathbf{A}_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \end{bmatrix}$$

Figura 3

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{2} & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & \frac{1}{2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -2 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

Figura 4

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Figura 5

$$\hat{\mathbf{T}}_{16} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 \\ 1 & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & -1 & -1 & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & 1 & 1 & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & -1 & -1 & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & 1 \\ 1 & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & -1 & -1 & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & 1 & -1 & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & 1 & 1 & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & -1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 & -1 & 1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & 0 & 1 & -1 & 0 & 1 & -1 & -1 & 1 & 0 & -1 & 1 & 0 & -1 & 1 \\ 1 & -1 & 0 & 1 & -1 & 0 & 1 & -1 & 1 & -1 & 0 & 1 & -1 & 0 & 1 & -1 \\ \frac{1}{2} & -1 & 1 & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & 1 & -1 & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & -1 & 1 & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & 1 & -1 & \frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} & -1 & 1 & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & 1 & -1 & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & 1 & -1 & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & -1 & 1 & \frac{1}{2} \\ 1 & -1 & 0 & -2 & 2 & 0 & 1 & -1 & -1 & 1 & 0 & 2 & -2 & 0 & -1 & 1 \\ 1 & -1 & 0 & -2 & 2 & 0 & 1 & -1 & 1 & -1 & 0 & -2 & 2 & 0 & 1 & -1 \end{bmatrix}$$

Figura 6



8A Original.



8B DCT e $r = 5$.



8C DCT e $r = 10$.



8D DCT e $r = 20$.



8E DCT e $r = 30$.



8F \hat{C}_8 e $r = 5$.



8G \hat{C}_8 e $r = 10$.



8H \hat{C}_8 e $r = 20$.



8I \hat{C}_8 e $r = 30$.

Figura 8



9A Original.



9B DCT e $r = 20$.



9C DCT e $r = 40$.



9D DCT e $r = 80$.



9E DCT e $r = 120$.



9F \hat{C}_{16} e $r = 20$.



9G \hat{C}_{16} e $r = 40$.



9H \hat{C}_{16} e $r = 80$.



9I \hat{C}_{16} e $r = 120$.

Figura 9



10A Original.



10B DCT e $r = 80$.



10C DCT e $r = 160$.



10D DCT e $r = 320$.



10E DCT e $r = 480$.



10F \hat{C}_{32} e $r = 80$.



10G \hat{C}_{32} e $r = 160$.



10H \hat{C}_{32} e $r = 320$.



10I \hat{C}_{32} e $r = 480$.

Figura 10

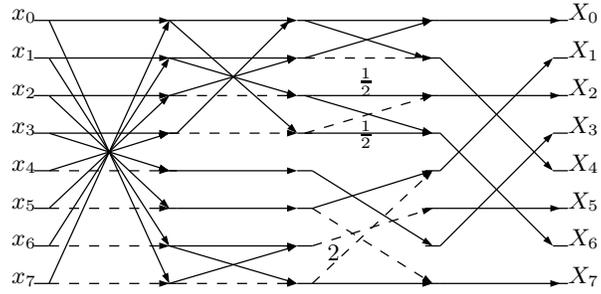


Figura 11

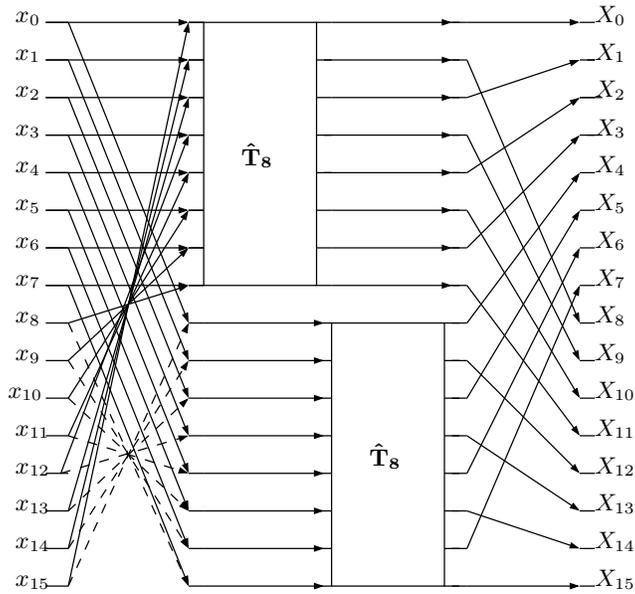


Figura 12

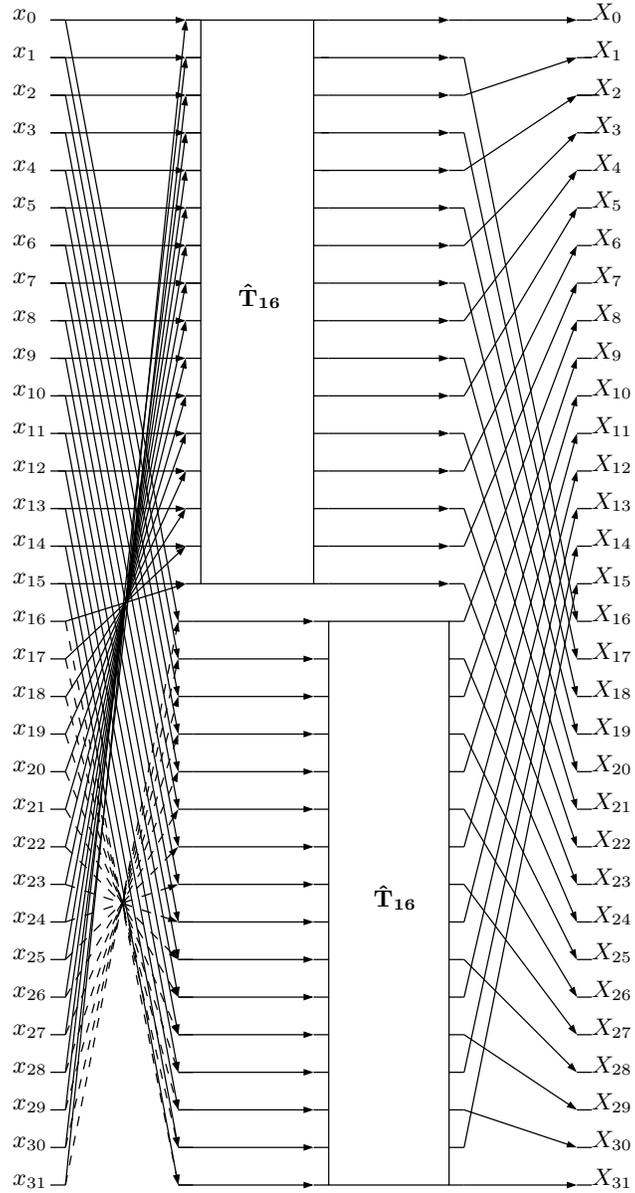


Figura 13

RESUMO

TRANSFORMADAS DISCRETAS DE COMPRIMENTOS 8, 16 E 32 COM BAIXO CUSTO ARITMÉTICO PARA APLICAÇÕES DE COMPRESSÃO DE IMAGEM E VÍDEO

Devido à crescente demanda por elevadas taxas de processamento de dados, as comunidades científica e tecnológica vem dando grande atenção à metodologias que exijam baixo custo computacional. Uma maneira de reduzir o custo computacional em processamento de sinais é a utilização de transformadas que tenham custo multiplicativo nulo. Na presente invenção, são propostas três novas transformadas de comprimentos 8, 16 e 32. Essas transformadas são aproximações da transformada discreta do cosseno (DCT) e possuem grande utilidade em compressão de imagem e vídeo, como nos padrões JPEG, MPEG-1, MPEG-2, H.261, H.263, H.264 e, mais recentemente, o HEVC. O esquema proposto baseia-se em uma aproximação ortogonal para a DCT de comprimento 8 baseada na série de aproximações propostas por Ahmed, Bouguezel e Swamy. A nova transformada de comprimento 8 foi escalonada pelo método de Jridi, Alfalou e Meher para comprimentos 16 e 32. São também introduzidos algoritmos rápidos para estas novas aproximações. Os métodos propostos foram avaliadas a partir de métricas de similaridade com a DCT e medidas de codificação, assim como experimentos de compressão de imagem, o que estabelece seu bom desempenho em aplicações para esse fim.