

### 3

## Realce no domínio da DWT

### 3.1

#### Introdução

Neste capítulo será apresentada uma nova proposta de realce no domínio da Transformada Wavelet Discreta (DWT), cujo principal objetivo é realçar um grande número de detalhes da imagem, por meio de um parâmetro de ajuste simples de realce e evitar a amplificação de ruídos que estejam eventualmente contaminando a imagem. Resultados de simulação mostram a eficácia do método quando comparado com outras técnicas apresentadas na literatura.

A Transformada Wavelet Discreta Bidimensional (2D-DWT) vem sendo muito usada em algoritmos de realce, visto que a sensibilidade humana ao contraste depende da distribuição das componentes da imagem em frequências espaciais. A DWT também vem sendo muito utilizada em sistemas de compressão de imagens, como é o caso do padrão JPEG2000 [14]. Esse padrão é capaz de fornecer maior taxa de compressão com menos perda de qualidade visual que o JPEG [15]. Porém, o custo computacional requerido pelo JPEG2000 é significativamente maior que o do JPEG [16].

Vários métodos clássicos de realce baseados em wavelets modificam os coeficientes da transformada utilizando funções lineares [8] ou não-lineares [9],[10] de tal forma que a imagem processada por estas técnicas apresenta qualidade visual superior quando comparada à imagem original. Apesar destes métodos apresentarem baixa complexidade computacional, eles empregam um grande número de parâmetros que necessitam ser mudados a cada nível de decomposição wavelet. Como a escolha destes parâmetros é feita de forma subjetiva, geralmente não é simples e prático o uso destes métodos.

Nossa proposta consiste de um esquema baseado em uma função que depende das frequências espaciais, e é capaz de produzir uma melhor resposta visual sem realçar eventuais ruídos presentes na imagem, e que ao mesmo tempo facilita o ajuste do parâmetro responsável pela intensidade de realce aplicada. A

nova técnica não será testada no domínio da compressão, como tem sido mais comum em aplicações de realce envolvendo a transformada DWT.

Este capítulo está organizado da seguinte forma: na Seção 3.2 fazemos um resumo dos fundamentos da DWT e descrevemos os princípios empregados pelos métodos que utilizam funções lineares e não-lineares para alterar os coeficientes DWT; na Seção 3.3 apresentamos a nova proposta; a Seção 3.4 contém os resultados da simulação e a Seção 3.5 as conclusões.

## 3.2

### Princípios de métodos de realce no domínio da DWT

Nesta seção serão apresentados os fundamentos da transformada wavelet aplicados ao processamento de imagens e o princípio dos métodos que utilizam funções lineares e não-lineares para modificar os coeficientes DWT.

A transformada wavelet discreta bidimensional pode ser interpretada como uma filtragem em sub-bandas de frequências [8],[14]. Ou seja, a imagem é passada em um banco de filtros direcionais resultando em um conjunto de coeficientes agrupados por sub-bandas de frequências como exemplificado na Figura 22. Estes coeficientes representam as contribuições de cada sub-banda para a formação da imagem. É importante ressaltar que esses coeficientes estão distribuídos no domínio espacial, em cada sub-banda. Os coeficientes de baixas frequências são responsáveis pelas nuances da imagem e os coeficientes de altas frequências são responsáveis pelos detalhes e pelo ruído, sendo que os coeficientes de mais altas frequências são os mais responsáveis por ruídos.

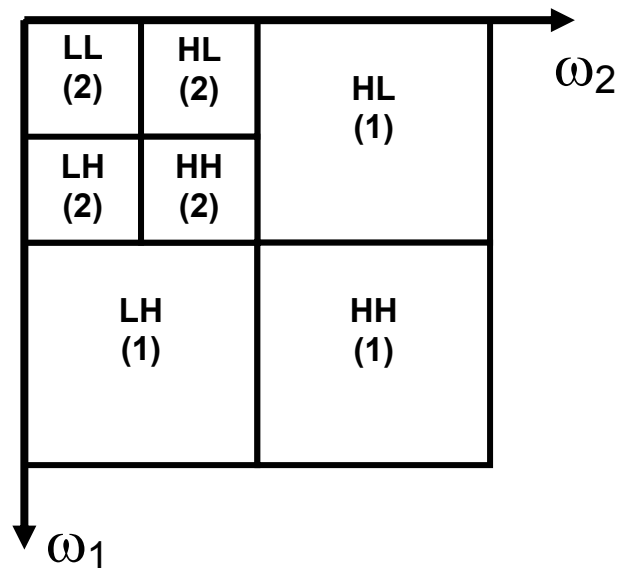


Figura 22-Grupos de coeficientes wavelet

Na Figura 22 estão representados sete grupos de coeficientes gerados pela decomposição wavelet em dois níveis. Cada grupo foi nomeado por duas letras e um número, onde a primeira letra corresponde à faixa de frequências horizontais, a segunda letra corresponde à faixa de frequências verticais e o número corresponde ao nível de decomposição wavelet. A letra L (“Low”) representa a faixa de baixas frequências e a letra H (“High”) representa a faixa de altas frequências. As setas  $\omega_1$  e  $\omega_2$  indicam o sentido de crescimento das frequências nas sub-bandas. Porém, ressalte-se, novamente, que cada uma delas contém uma sub-imagem no domínio espacial.

Existem métodos de realce no domínio da transformada wavelet que redistribuem os coeficientes utilizando funções lineares [8] ou não-lineares [9],[10]. Os coeficientes da imagem não realçada são mapeados através das funções, a cada sub-banda, em um novo conjunto de coeficientes. A imagem realçada é obtida aplicando-se a DWT inversa. Estes métodos tendem a aplicar ganho, ou ênfase, aos coeficientes de altas frequências. O ganho aplicado pela função a cada coeficiente é controlado pelos parâmetros de ajuste destes métodos, que em muitos casos são ajustados a cada nível da decomposição. Geralmente os coeficientes da sub-banda LL não são alterados para evitar distorções [10] e não piorar a qualidade do realce.

Um exemplo de função linear usada em [8] para alterar coeficientes DWT é expressa por

$$W_{out\ ij} = K \cdot W_{in\ ij} \quad (16)$$

onde  $i$  e  $j$  são os índices que indicam as posições dos coeficientes nas sub-bandas,  $W_{in\ ij}$  são os coeficientes wavelet da imagem original,  $W_{out\ ij}$  são os coeficientes DWT realçados e  $K$  é o parâmetro de ajuste do método, dependente do nível de decomposição, que neste caso é o próprio ganho. Em [8] o valor deste parâmetro decresce a uma taxa de  $K^{0.5}$  com o nível de decomposição wavelet. Por exemplo, o valor do parâmetro no nível 2 é igual à raiz quadrada do valor do parâmetro escolhido no nível 1. Isso pode ser visto na Figura 23, onde está sendo mostrado o gráfico da expressão (16) para quatro níveis com  $K = 5$  no nível 1 (n.1).

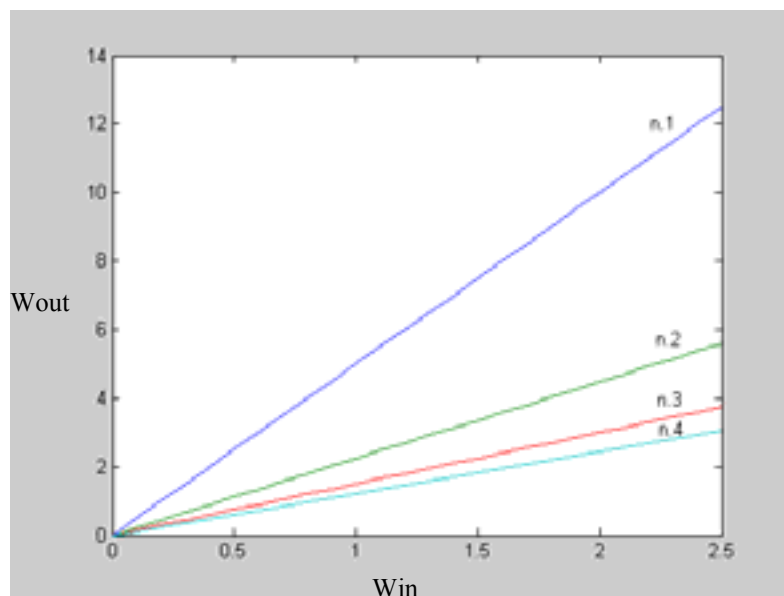


Figura 23-Gráfico da função linear

Para mostrar como os coeficientes estão sendo realçados em cada sub-banda, está sendo mostrada na Figura 24 uma analogia com níveis de cinza. Regiões com mesmas cores, significam regiões cujos coeficientes são amplificados com a mesma intensidade. Neste caso linear, os coeficientes da sub-banda LL não são amplificados (branco), os das sub-bandas do nível 2 são multiplicados por um valor da constante  $K$  (cinza claro) e os coeficientes do nível 1 são amplificados por outro valor da constante  $K$  (cinza escuro).

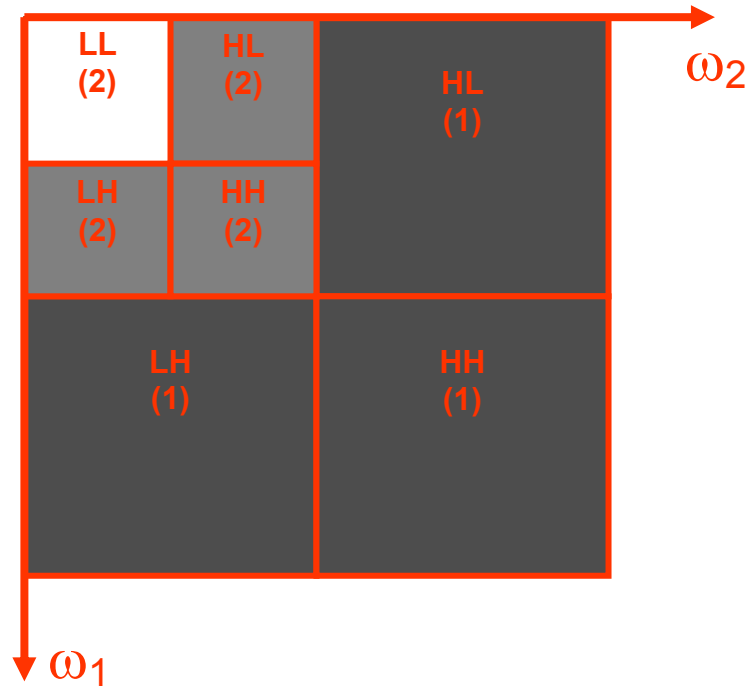


Figura 24-Esquema de aplicação de ganhos aos coeficientes wavelet (caso linear)

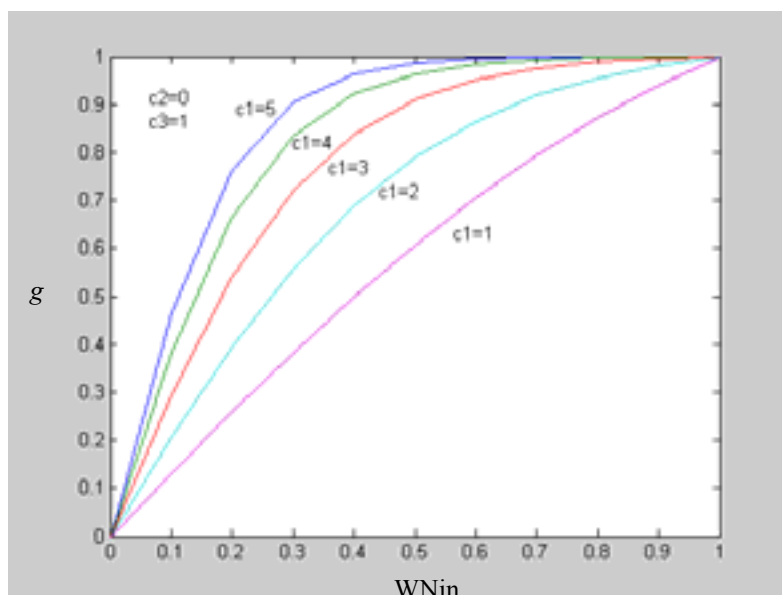
Um exemplo de função não-linear usada em [9] é expressa por

$$g(WNin_{i,j}) = \frac{\tanh(c_1 WNin_{i,j} - c_2) + \tanh(c_2)}{\tanh(c_1 - c_2) + \tanh(c_2)} \quad (17)$$

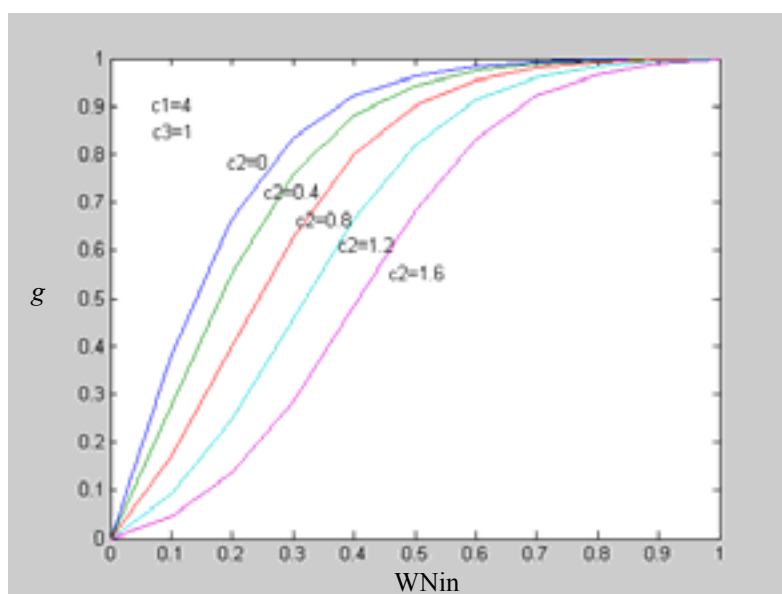
onde  $c_1$  e  $c_2$  ( $c_1 > 0$  e  $0 \leq c_2 \leq 0.5c_1$ ) são parâmetros que determinam a forma da função  $g$ ,  $WNin_{i,j}$  são as magnitudes normalizadas (para efeito de cálculo) dos coeficientes DWT não realçados, e  $\tanh$  é a função tangente hiperbólica. Na Figura 25 estão sendo mostrados gráficos da função  $g$  para vários valores de parâmetros. Os coeficientes DWT modificados são obtidos por

$$WMout_{i,j} = c_3 \cdot g(WNin_{i,j}). \quad (18)$$

Os parâmetros  $c_1$ ,  $c_2$  e  $c_3$  são escolhidos a cada nível de decomposição. Na Figura 25 estão sendo mostrados gráficos da expressão (18) para vários valores de parâmetros.



(a)



(b)

Figura 25-Gráfico da função não-linear (18)

Um outro exemplo de função não-linear, recentemente proposta em [10], é expressa por

$$WP_{out_{ij}} = p_a \cdot \exp[(WP_{in_{ij}} - p_b) / p_c] + WP_{in_{ij}} \quad (19)$$

onde  $pa = (\max - \text{nível} + 1)/\max$ , sendo  $pa$ ,  $pb$  e  $pc$  parâmetros que determinam o realce, *nível* é o número do nível da decomposição e *max* é o nível máximo da decomposição Wavelet. Os parâmetros  $pb$  e  $pc$  independem do nível. Na expressão (19),  $WP_{in_{ij}}$  é o valor do coeficiente não realçado e  $WP_{out_{ij}}$  é o valor do coeficiente realçado, ambos expressos em percentagem para facilidade de cálculo. A Figura 26 apresenta o comportamento da expressão (19) para quatro níveis ( $n.1$ ,  $n.2$ ,  $n.3$ ,  $n.4$ ). Em [10] essa função foi aplicada em imagens médicas.

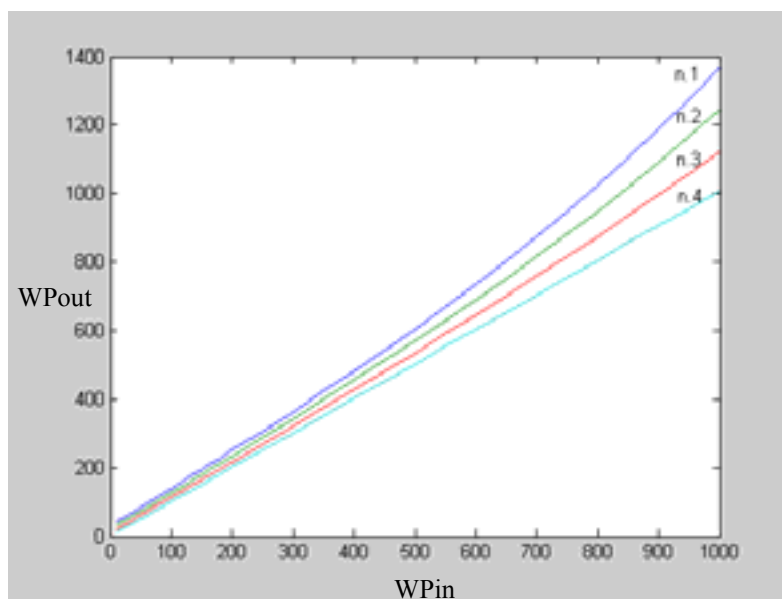


Figura 26-Gráfico da função não-linear (19)

### 3.3

#### O método proposto

Nesta seção será apresentado um método cujo objetivo é fornecer uma boa resposta visual sem realçar eventuais ruídos presentes na imagem. Sabe-se que métodos de realce que utilizam função linear com um ganho em todas as sub-bandas de um mesmo nível, tendem a realçar os detalhes mais proeminentes da imagem, enquanto que pequenos detalhes (pouco visíveis) são pouco realçados, conforme mostrado em [11]. Por esse motivo, no método aqui proposto, optamos por uma função que depende de cada sub-banda dentro de cada nível. O objetivo é evitar estes problemas e, ao mesmo tempo, poder simplificar o parâmetro de ajuste do realce quando comparado aos das funções não-lineares.

A função proposta nesta dissertação é aplicada a todos os coeficientes DWT da imagem exceto aos da sub-banda LL. Apesar do parâmetro de ajuste do realce ser independente do nível, os ganhos aplicados aos coeficientes DWT mudam automaticamente a cada nível de decomposição. Esta estratégia facilita o ajuste da intensidade do realce pelo usuário.

A motivação para usar a função de mapeamento proposta é criar uma nova distribuição para os coeficientes DWT, de tal forma que um maior número de componentes de frequências espaciais elevadas sejam realçados, sem degradar as componentes de baixas frequências. O objetivo da nova distribuição é produzir uma imagem melhor realçada que as técnicas apresentadas na literatura. Nestas técnicas as funções são aplicadas a cada sub-banda individualmente. Já na nova proposta, a função é aplicada através das sub-bandas, ou seja, diretamente a todo o conjunto de coeficientes DWT, obedecendo a ordenação em frequência.

Uma outra consideração importante é que quando a imagem está contaminada por ruído, este se concentra nas componentes de frequências espaciais mais altas. Conseqüentemente, os valores da função proposta não devem ser elevados nestas frequências espaciais. Caso contrário, eles realçarão as componentes do ruído. A estratégia proposta elimina a necessidade do uso de técnicas de extração de ruído, que aumentariam a complexidade do sistema de tratamento da imagem em termos de esforço computacional, ou requereriam, no mínimo, de mais um parâmetro de ajuste. Este parâmetro de ajuste controlaria o grau de extração de ruído. Levando em consideração estes argumentos propomos a seguinte expressão para o fator de ganho

$$h(r,s) = \beta^{r+s}(r,s) \quad (20)$$

onde

$$\beta(r,s) = 1 + \frac{\mu}{r + s} \quad (21)$$

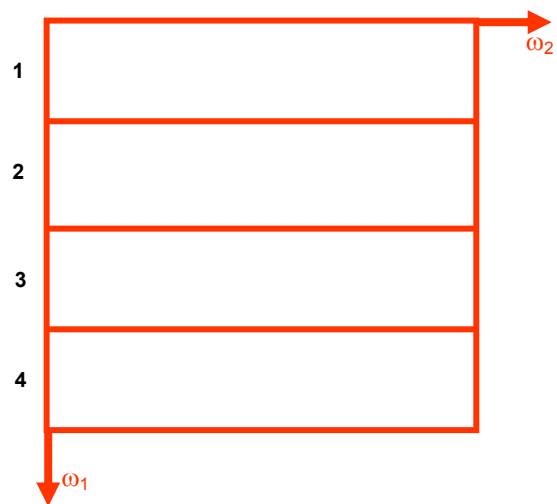
$\mu$  é o parâmetro de ajuste do realce e  $(r,s)$  são pares de índices associados às diferentes sub-bandas. Em (21) a constante unitária assegura que para qualquer



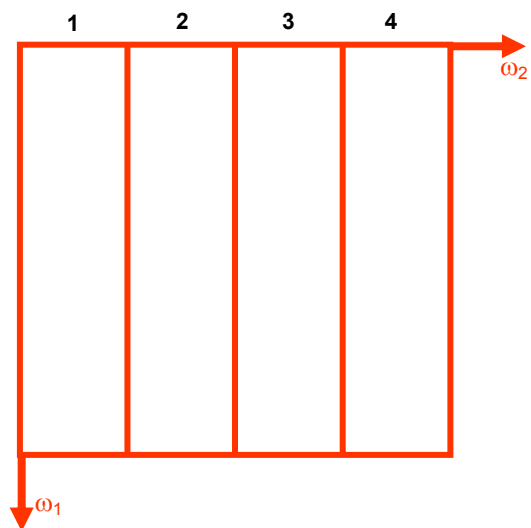
valor de  $\mu$  positivo todos os termos  $Win_{ij}$  sejam realçados. Os coeficientes realçados usando (20) são expressos por

$$Wout_{ij} = h(r,s) \cdot Win_{ij}. \quad (22)$$

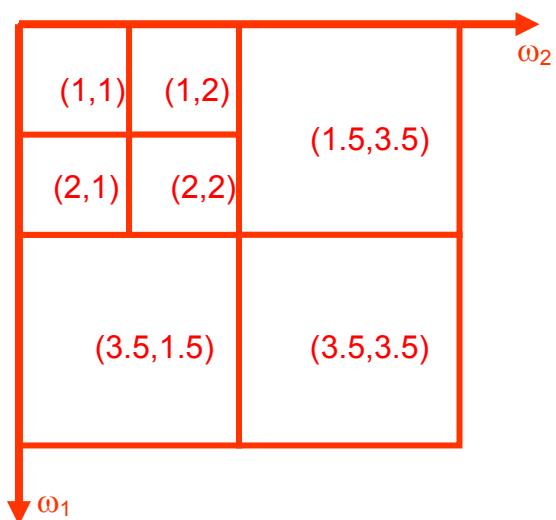
Como mencionado, a função de mapeamento proposta depende de pares de índices  $(r,s)$  associados às sub-bandas de frequências espaciais. Os valores desses índices devem crescer com a frequência com o objetivo de que mais detalhes sejam realçados. Para esse fim utilizamos o seguinte procedimento para o cálculo dos índices  $(r,s)$ : Primeiramente, atribuímos uma numeração na vertical para a decomposição wavelet como mostrado na Figura 27 (a). Feita esta numeração, podemos calcular os valores de  $r$  para uma sub-banda como sendo a média dos números associados a esta sub-banda. O valor de  $r$  para a sub-banda HL do nível 1, por exemplo, é  $(1 + 2)/2 = 1.5$ . Depois de calculados todos os valores de  $r$  para a decomposição, a etapa seguinte consiste em atribuir uma numeração na horizontal para a decomposição wavelet como mostrado na Figura 27 (b). A partir desta numeração pode-se calcular os valores de  $s$  de modo análogo como foram calculados os valores de  $r$ . O valor de  $s$  para a sub-banda HL do nível 1 é, por exemplo,  $(3 + 4)/2 = 3.5$ . Este é um possível procedimento que poderia ser adotado para o cálculo dos pares  $(r,s)$  para a decomposição da Figura 22. Um procedimento análogo será usado para calcular os índices  $(r,s)$  em uma decomposição com outro número de níveis.



(a)



(b)



(c)

Figura 27-Esquema para o cálculo de  $(r,s)$

Em (22) a função  $h$  utilizará o valor de  $(r,s)$  associado à sub-banda que pertencer o coeficiente  $Win_{i,j}$ . Por exemplo, o fator de ganho para o coeficiente da sub-banda HL do nível 2 no exemplo da Figura 22 é  $h(1,2)$ . Na Figura 28 são mostrados gráficos da função de mapeamento proposta (20) com  $\mu = 1.5$ ,  $\mu = 1.7$ ,  $\mu = 1.9$  e  $\mu = 2.1$ .

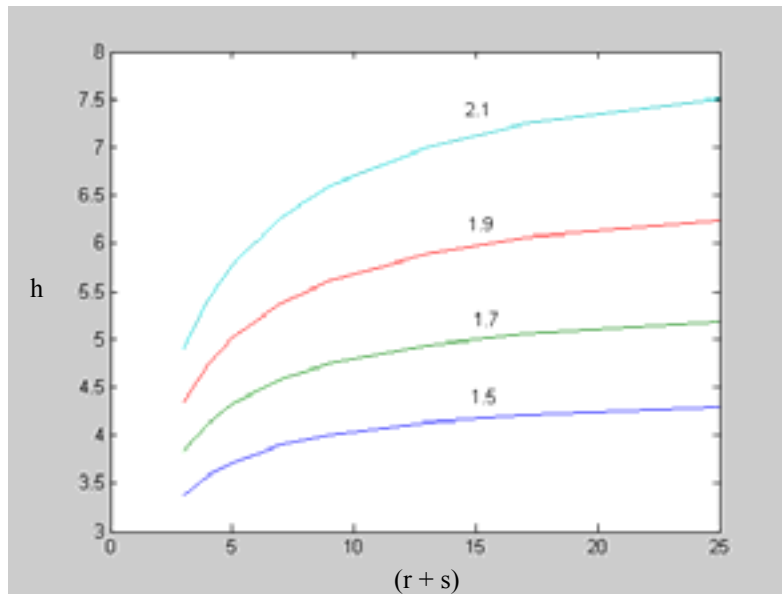


Figura 28-Gráfico da função proposta (20)

A Figura 29 ilustra como os coeficientes estão sendo realçados. As componentes da sub-banda LL não são modificadas (branco), as de sub-bandas de maiores níveis são modificadas por um valor de ganho (cinza mais escuro) e as de sub-bandas de níveis menores são modificadas por outro valor (cinza mais claro).

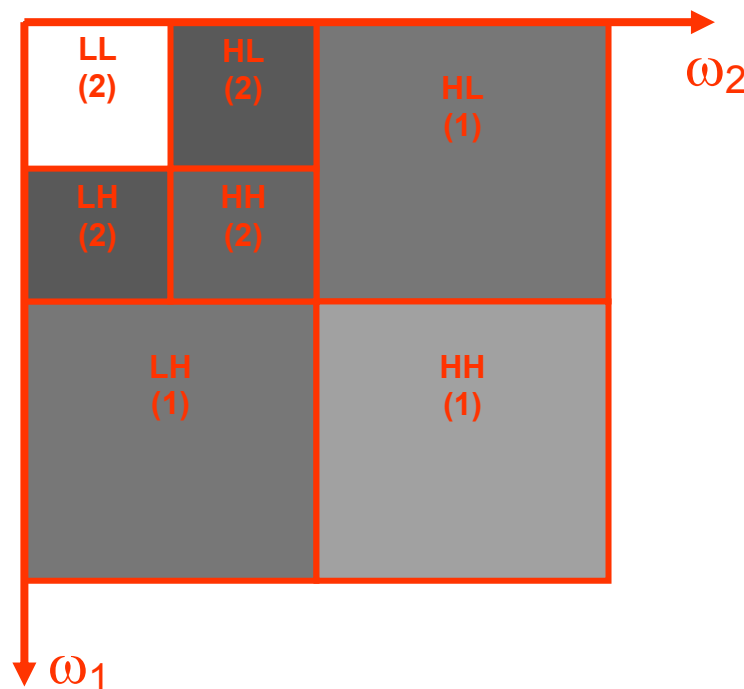


Figura 29-Esquema de aplicação de ganhos aos coeficientes wavelet usando a nova proposta

Observando as expressões (16) e (22) percebe-se que ambas possuem apenas um parâmetro de ajuste. Porém o método [8] que utiliza (16) aplica um ganho uniforme (linear) a cada nível, com as desvantagens inerentes a esse tipo de abordagem. Por outro lado, na nova proposta os ganhos variam também em um mesmo nível, de acordo com a distribuição das sub-bandas em frequência. Além disso a nova técnica proposta é mais simples no ajuste da intensidade do realce que os esquemas não-lineares propostos em [9] e [10].

### 3.4

#### Resultados de simulação

Serão apresentados os resultados obtidos para imagens em tons de cinza não comprimidas. Com o objetivo de verificar o comportamento dos métodos na presença de ruído, foi adicionado à imagem não realçada ruído gaussiano branco de baixa intensidade. A 2D-DWT foi implementada usando a Daubechies 3 wavelet [8] e decomposição em quatro níveis. Para a nossa proposta são apresentados na Figura 30 os valores de  $(r,s)$  usados. As matrizes de coeficientes

DWT foram modificadas pelas diversas técnicas de realce aqui consideradas. Os valores dos parâmetros e a qualidade visual das imagens foram decididos por um teste subjetivo. A função de mapeamento proposta foi comparada com as descritas em [8],[9] e [10].

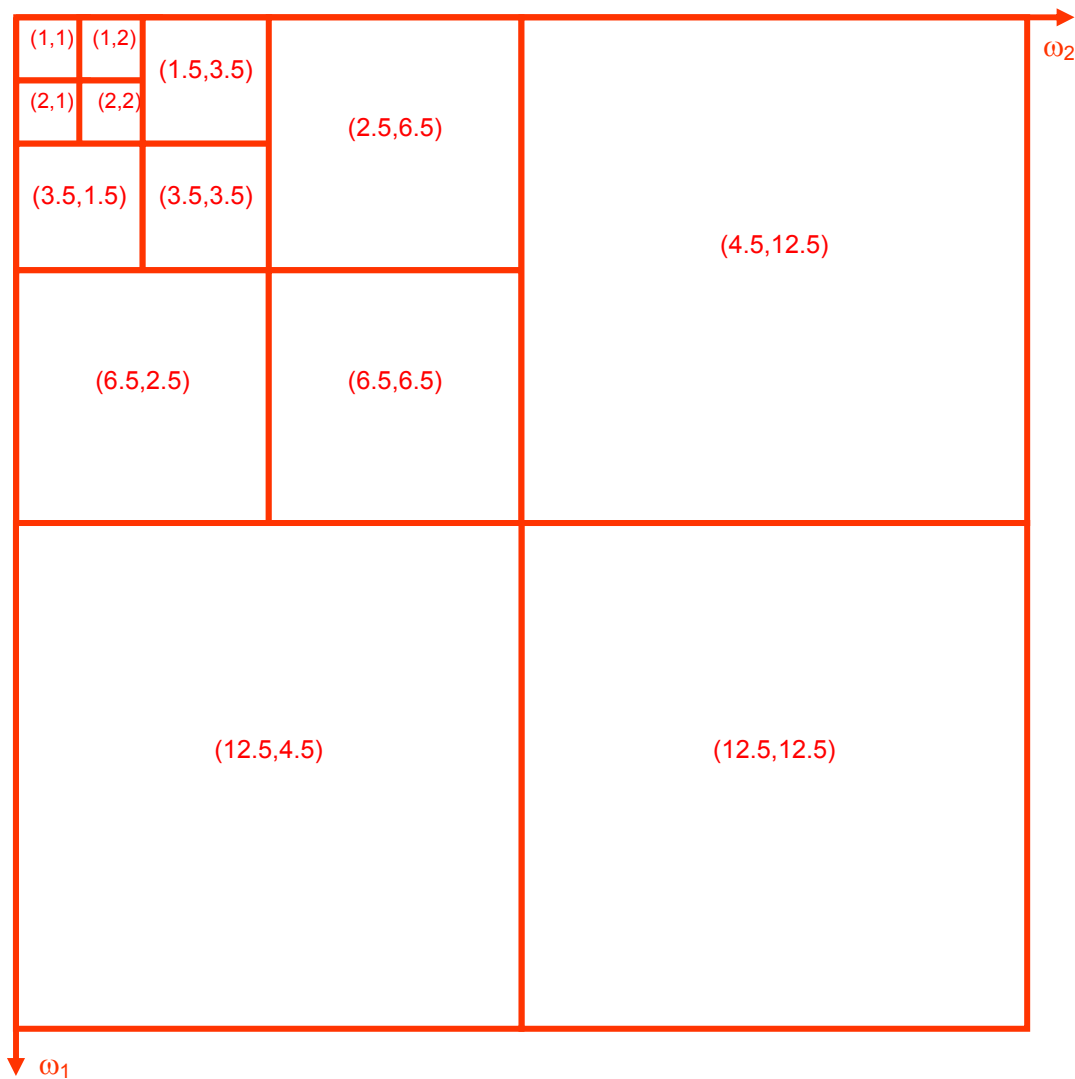


Figura 30-Valores dos índices  $(r,s)$  para quatro níveis de decomposição

A Figura 31 mostra a imagem *aerial*<sup>5</sup>, de tamanho  $200 \times 200$ , processada pelas funções (16), (18), (19) e (22). Nessa figura, a imagem (a) é a original, (b) é a imagem original realçada com o método que utiliza (16) com  $K = 3.00$  [8], (c) é a realçada com o método que usa (18) com  $c_1 = 3.00$ ,  $c_2 = 0.00$ ,  $c_3 = 1.00$  para todos os níveis [9], (d) é a realçada com o método que usa (19) com  $p_b = 20.00$ ,  $p_c = 10.00$  [10], e (e) é a realçada pela nova proposta com  $\mu = 2.00$ .

<sup>5</sup><http://sipi.usc.edu/database/>

A Figura 33 apresenta outro exemplo de imagem processada pelas funções (16), (18), (19) e (22). É uma imagem denominada *airplane*<sup>6</sup> de tamanho  $200 \times 200$ . Nessa figura, a imagem (a) é a original, (b) é a imagem original realçada com o método que utiliza (16) com  $K = 3.00$  [8], (c) é a realçada com o método que usa (18) com  $c_1 = 4.00$ ,  $c_2 = 0.00$ ,  $c_3 = 1.50$  para todos os níveis [9], (d) é a realçada com o método que usa (19) com  $p_b = 18.00$ ,  $p_c = 10.00$  [10], e (e) é a realçada pela nova proposta com  $\mu = 1.50$ .

A Figura 35 mostra mais um resultado de imagem (*pentagon*) processada pelas funções (16), (18), (19) e (22). Nessa figura, a imagem (a) é a original, (b) é a imagem original realçada com o método que utiliza (16) com  $K = 4.00$  [8], (c) é a realçada com o método que usa (18) com  $c_1 = 4.00$ ,  $c_2 = 0.00$  para todos os níveis,  $c_3 = 3.00$  para o nível 1 e  $c_3 = 2.00$  para os outros níveis [9], (d) é a realçada com o método que usa (19) com  $p_b = 16.00$ ,  $p_c = 14.00$  [10], e (e) é a realçada pela nova proposta com  $\mu = 1.70$ .

Comparando as imagens realçadas das Figuras 31, 33 e 35 (b), (c), (d) usando os esquemas descritos em [8],[9] e [10] com a processada pelo método proposto, pode ser observado que a última retém mais detalhes, possui um contraste mais realçado e apresenta uma qualidade visual superior. Além da nova proposta realçar mais os detalhes e os contornos que o método que usa função linear [8], ela também apresenta um desempenho superior, com um parâmetro de realce mais simples, quando comparada com as técnicas não-lineares descritas em [9] e [10].

Com o objetivo de determinar se os métodos em [8],[9] e [10] são capazes de melhorar a visibilidade dos detalhes aumentando o valor da intensidade do realce, foram realizados vários testes. Foi verificado que em todos eles a qualidade visual da imagem decai severamente, devido à amplificação de ruído. Adicionalmente, a visibilidade dos detalhes é inferior à obtida com a nova técnica. Isto pode ser visto nas Figuras 32, 34 e 36. Está claro que o ruído começa a degradar severamente a qualidade da imagem devido a um pequeno aumento da intensidade do realce. Por outro lado, o método proposto proporciona um melhor realce de detalhes antes do ruído começar a ficar visível devido a um aumento do parâmetro de ganho. Conseqüentemente, não é necessário o uso de um algoritmo adicional para redução de ruído. A aplicação do novo esquema produz uma imagem com os detalhes e os contornos mais claramente definidos que os

<sup>6</sup><http://sipi.usc.edu/database/>

apresentados nas Figuras 32, 34 e 36 sendo menos afetada por ruído. Além disso, o parâmetro de realce do novo método é muito simples de ser ajustado pelo usuário.

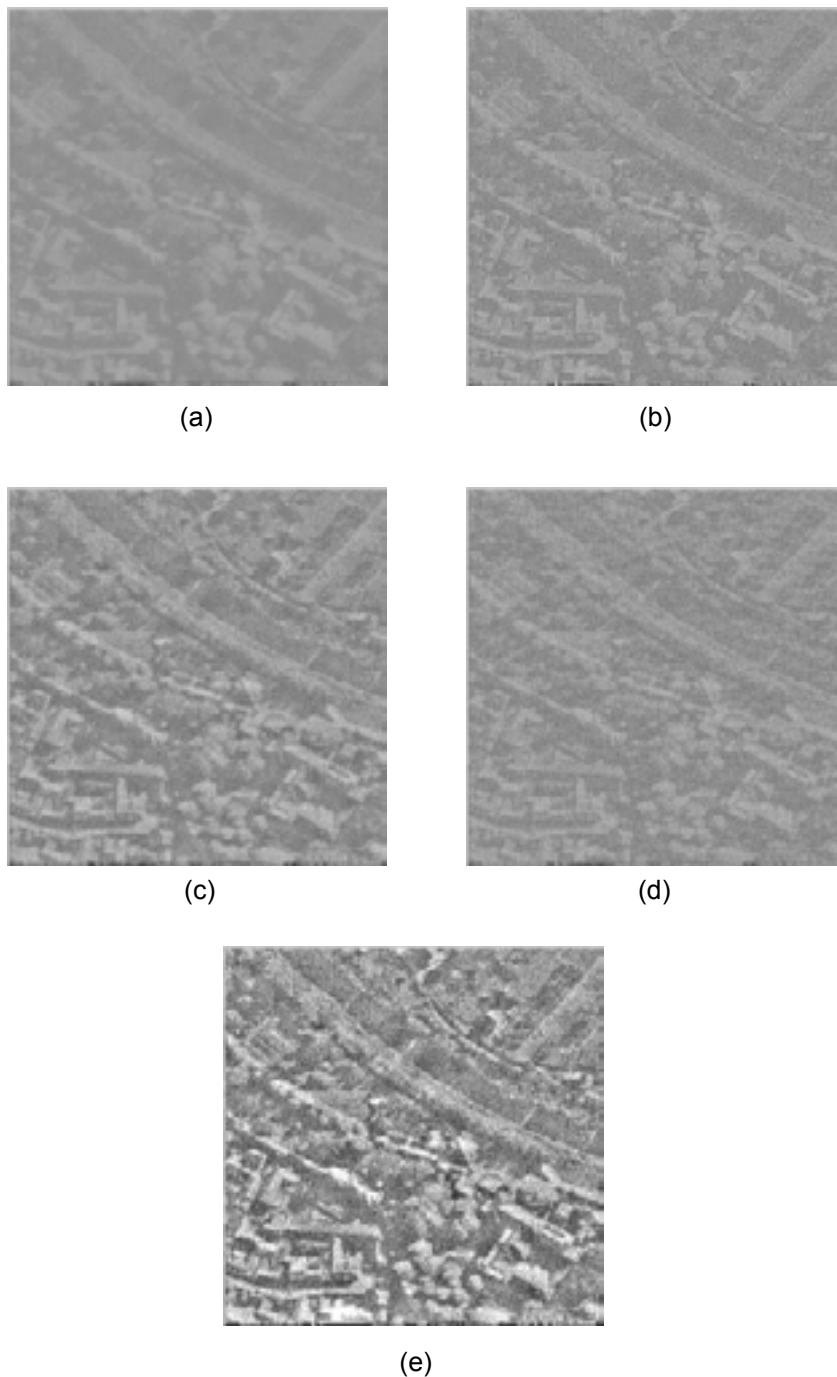


Figura 31-Resultados de simulação na DWT (*aerial*): (a) imagem original; (b) realce linear [8]; (c) realce não-linear que usa (18) [9]; (d) realce não-linear que usa (19) [10]; (e) nova proposta

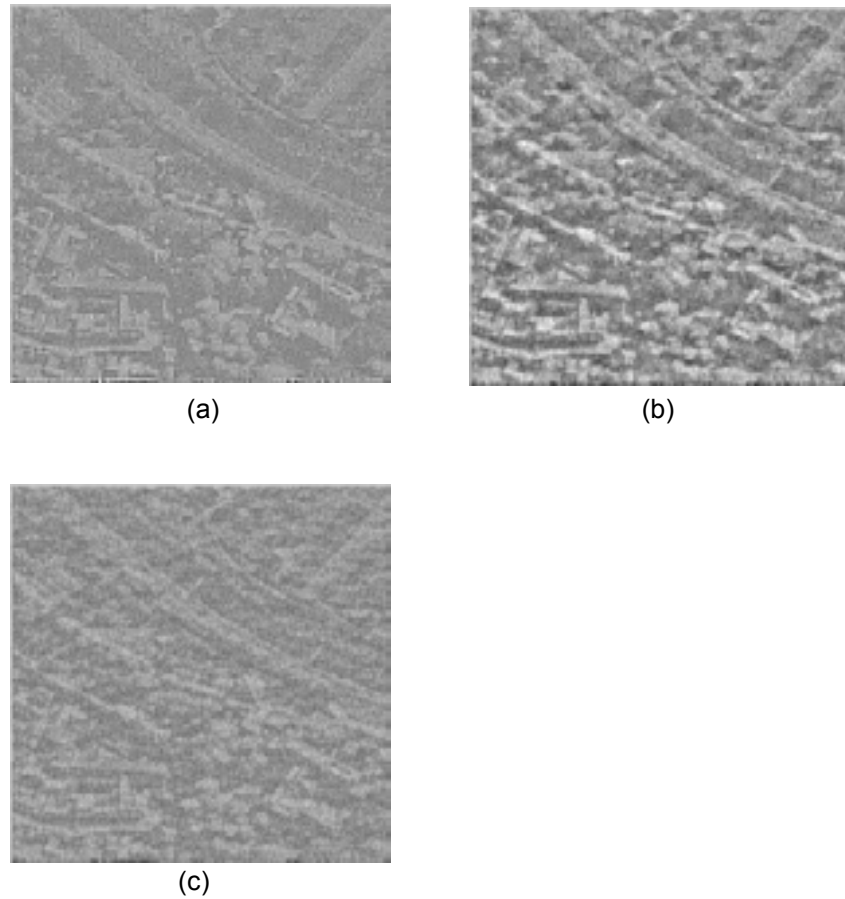


Figura 32-Resultados de simulação na DWT com mais realce (*aerial*): (a) método que usa (16) com  $K = 5.0$ ; (b) método que usa (18) com  $c_1 = 7.0$ ,  $c_2 = 0.0$ ,  $c_3 = 1.0$  em todos os níveis; (c) método que usa (19) com  $p_b = 20.00$ ,  $p_c = 15.00$



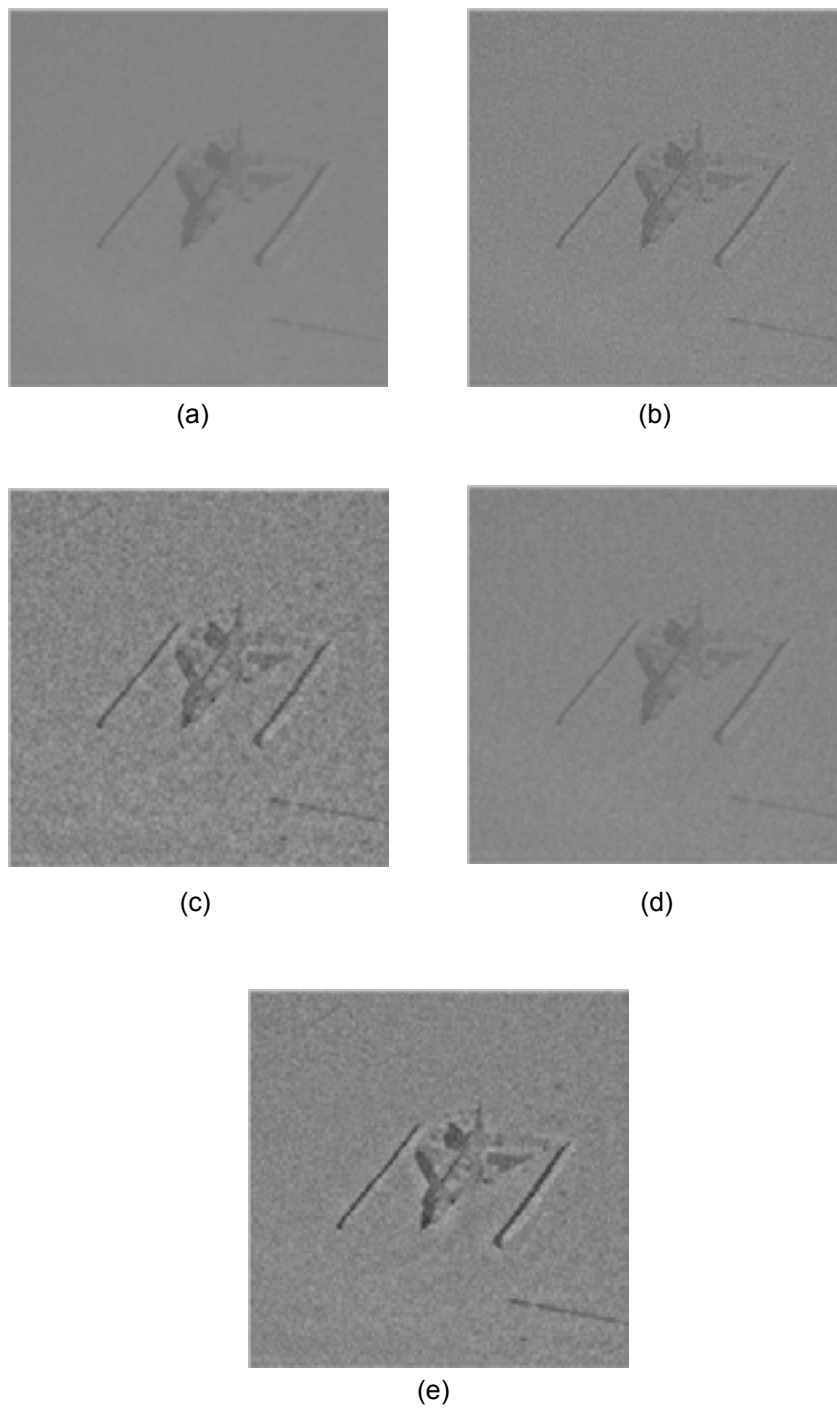


Figura 33-Resultados de simulação na DWT (*airplane*): (a) imagem original; (b) realce linear [8]; (c) realce não-linear que usa (18) [9]; (d) realce não-linear que usa (19) [10]; (e) nova proposta

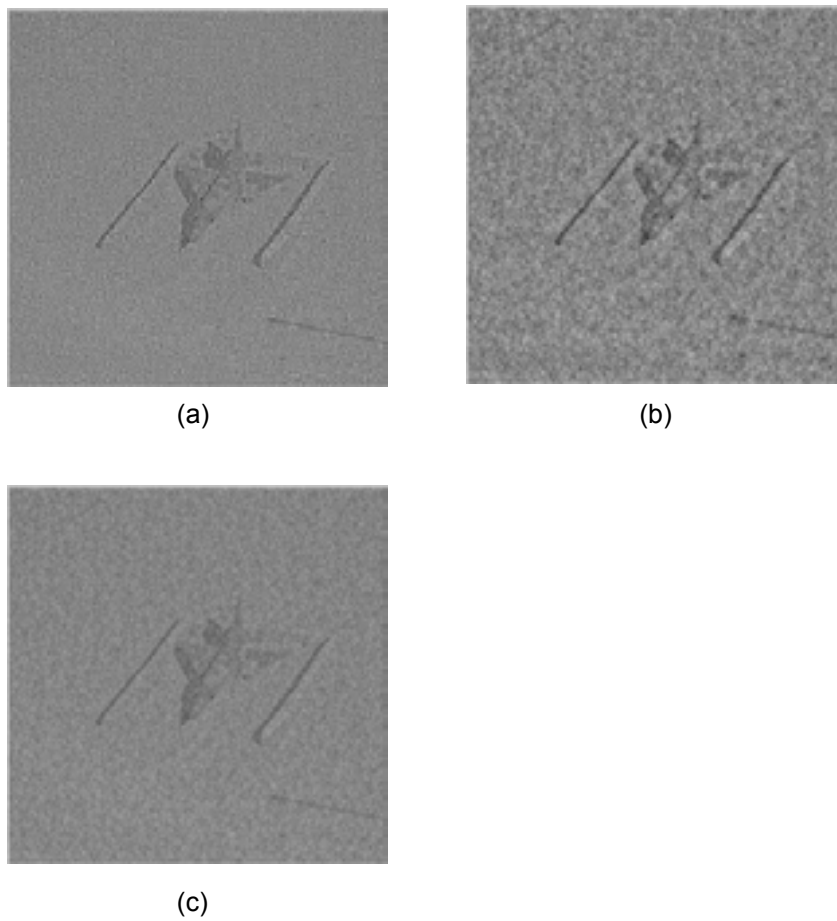


Figura 34-Resultados de simulação na DWT com mais realce (*airplane*): (a) método que usa (16) com  $K = 5.0$ ; (b) método que usa (18) com  $c_1 = 7.0$ ,  $c_2 = 0.0$ ,  $c_3 = 1.5$  em todos os níveis; (c) método que usa (19) com  $p_b = 14.00$ ,  $p_c = 20.00$

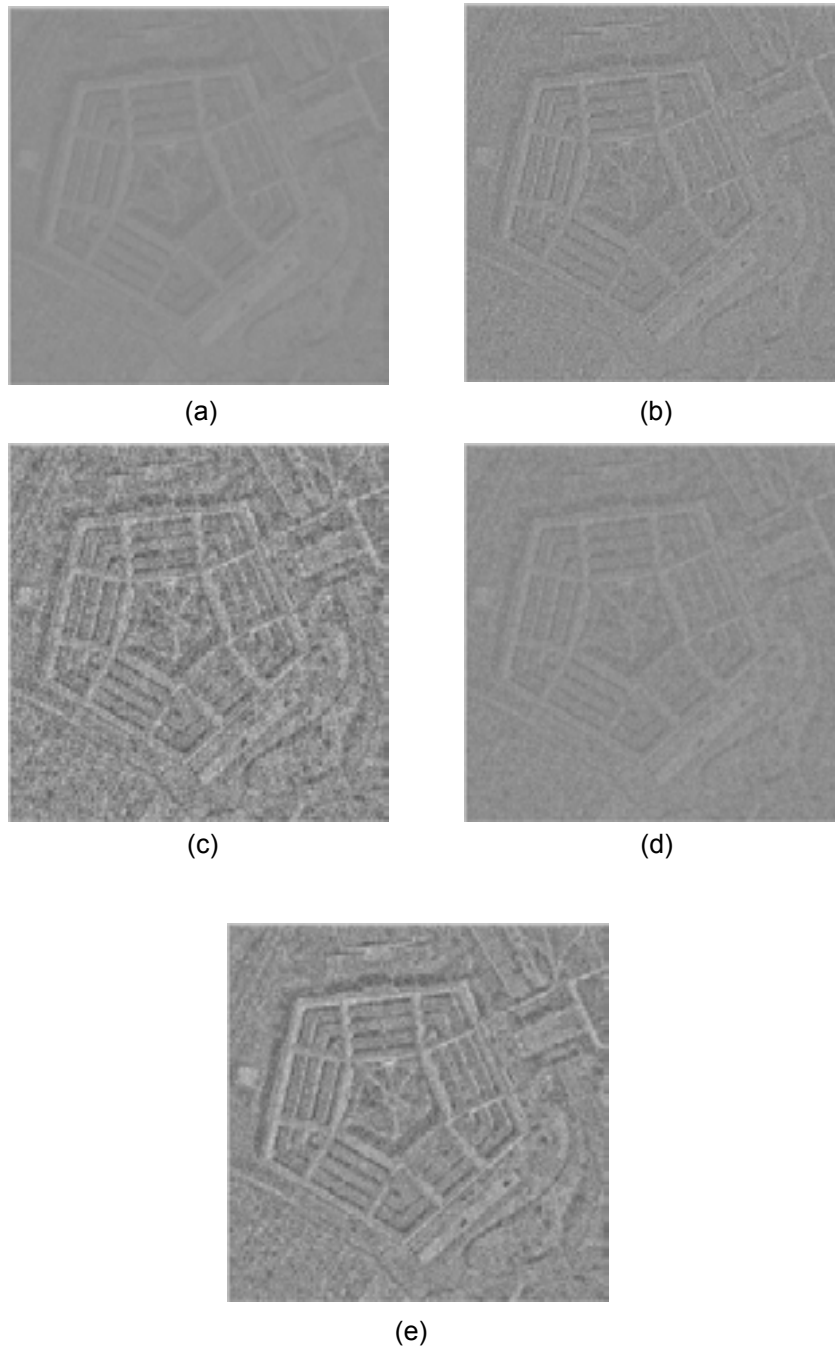


Figura 35-Resultados de simulação na DWT (*pentagon*): (a) imagem original; (b) realce linear [8]; (c) realce não-linear que usa (18) [9]; (d) realce não-linear que usa (19) [10]; (e) nova proposta

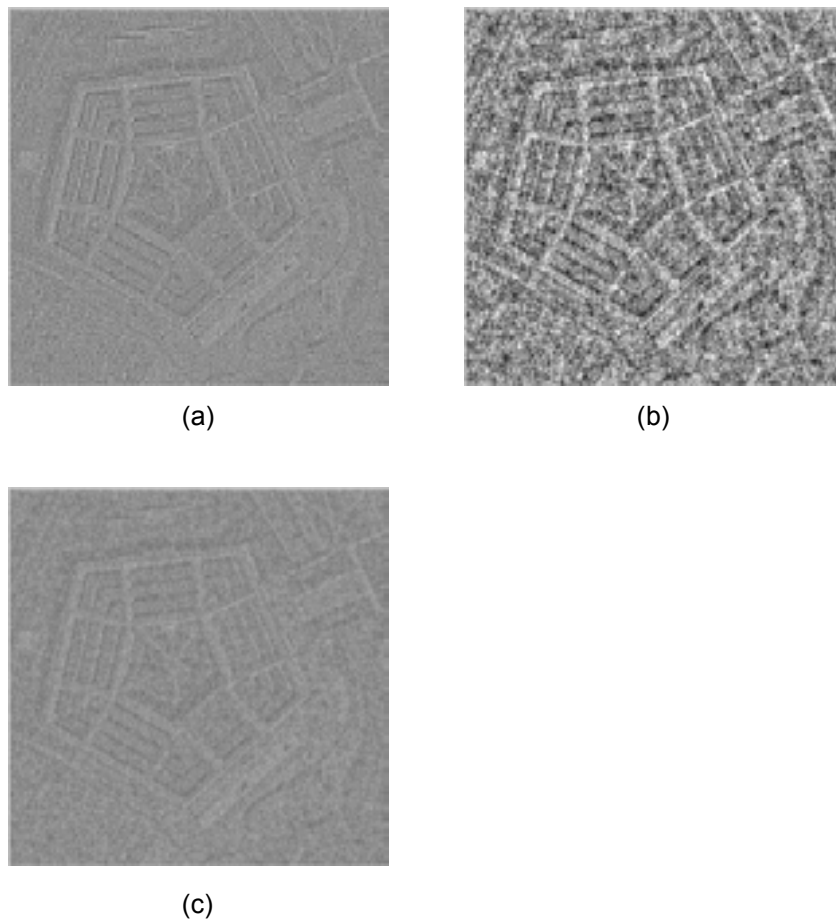


Figura 36-Resultados de simulação na DWT com mais realce (*pentagon*): (a) método que usa (16) com  $K = 5.0$ ; (b) método que usa (18) com  $c_1 = 9.0$ ,  $c_2 = 0.0$  para todos os níveis,  $c_3 = 4.0$  para o nível 1 e  $c_3 = 3.0$  para os outros níveis; (c) método que usa (19) com  $p_b = 12.00$ ,  $p_c = 18.00$

Uma outra forma de verificar o desempenho das técnicas de realce é observar o histograma de cada imagem. Os histogramas das Figuras 37, 38 e 39 se referem aos resultados apresentados nas Figuras 31, 32, 33, 34, 35 e 36.

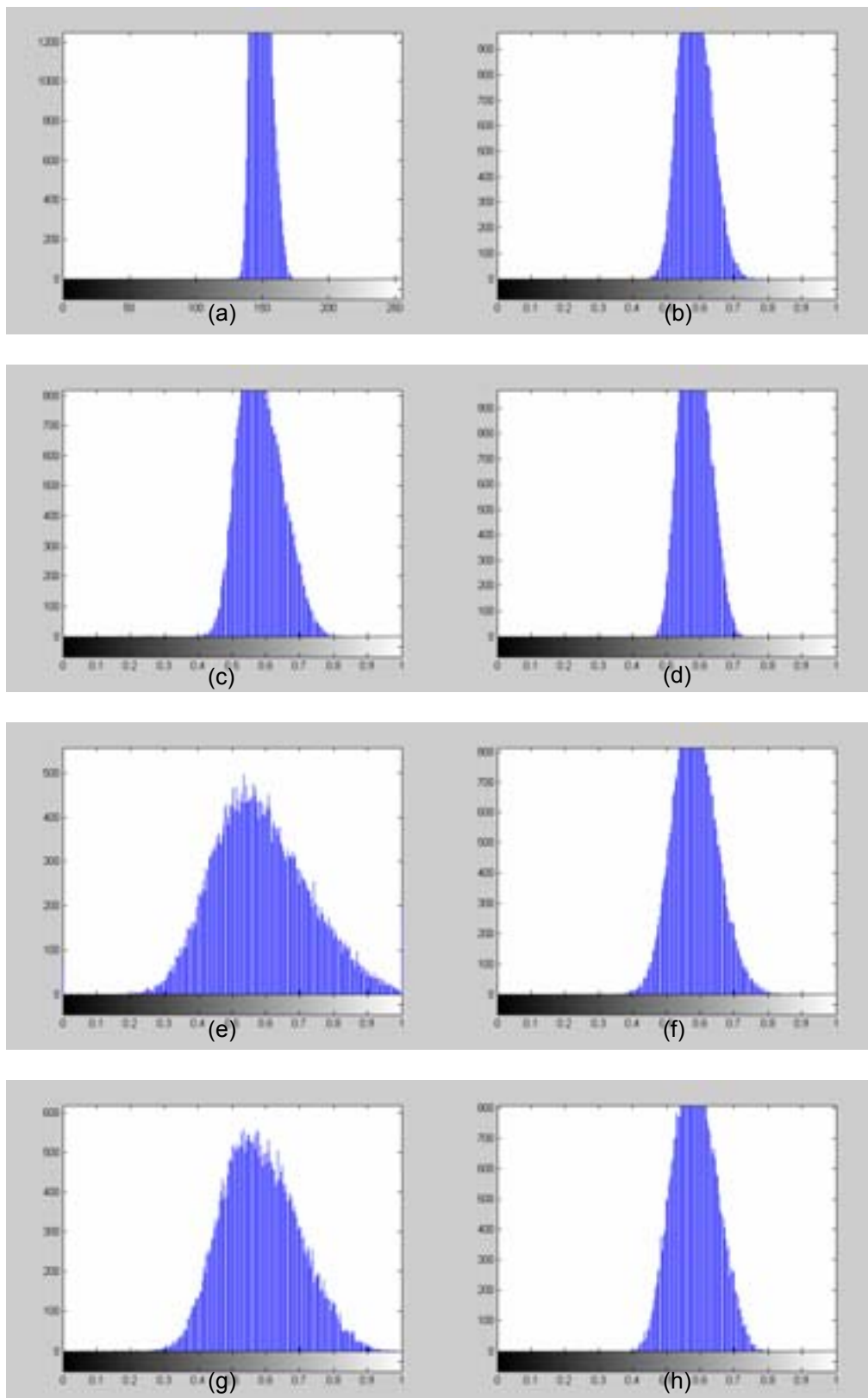


Figura 37-Histogramas das imagens simuladas na DWT (*aerial*): (a) original; (b) realce linear [8]; (c) realce não-linear que usa (18) [9]; (d) realce não-linear que usa (19) [10]; (e) nova proposta; (f) método linear [8] com mais realce; (g) método que usa (18) com mais realce; (h) método que usa (19) com mais realce

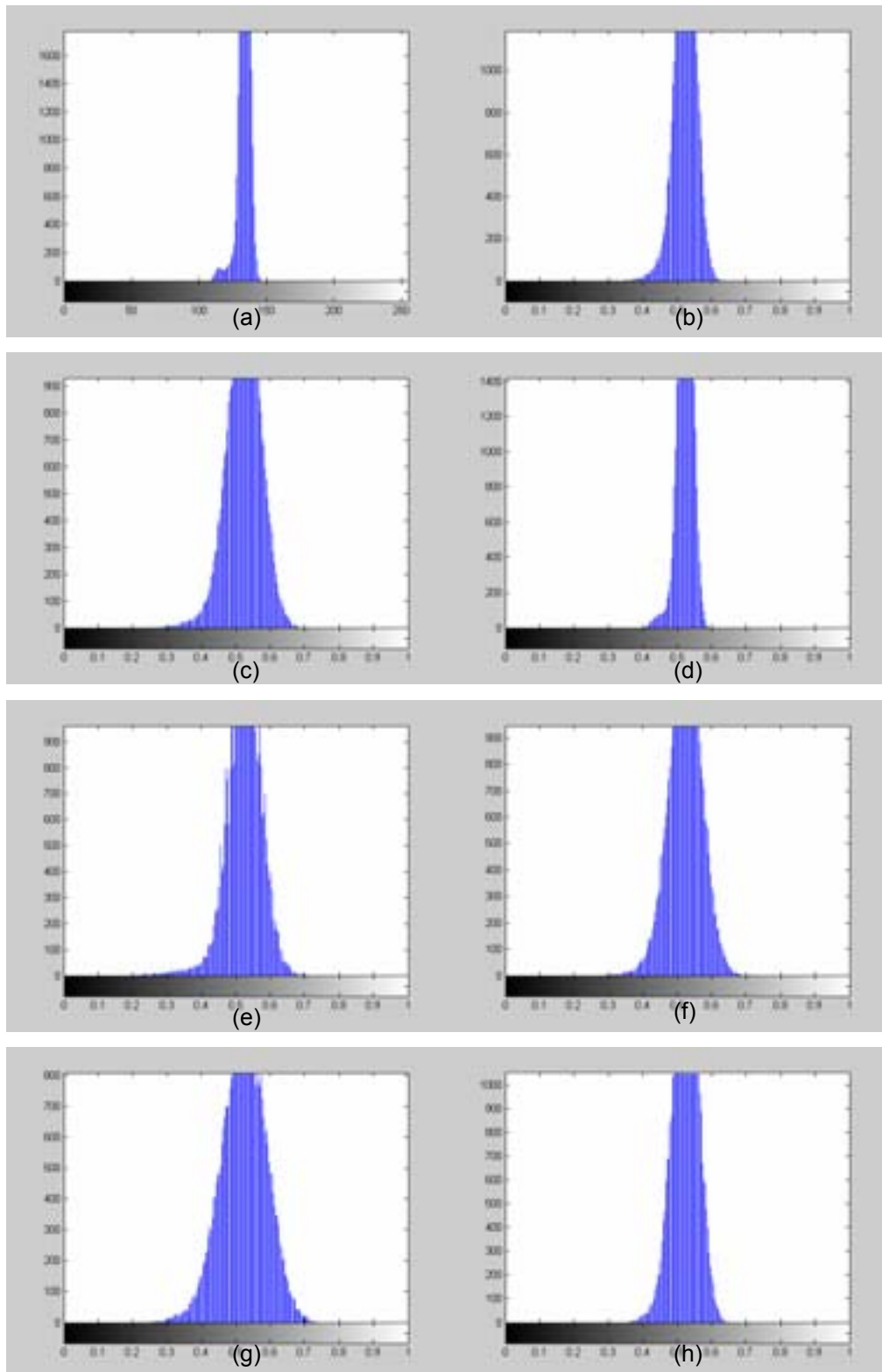


Figura 38-Histogramas das imagens simuladas na DWT (*airplane*): (a) original; (b) realce linear [8]; (c) realce não-linear que usa (18) [9]; (d) realce não-linear que usa (19) [10]; (e) nova proposta; (f) método linear [8] com mais realce; (g) método que usa (18) com mais realce; (h) método que usa (19) com mais realce

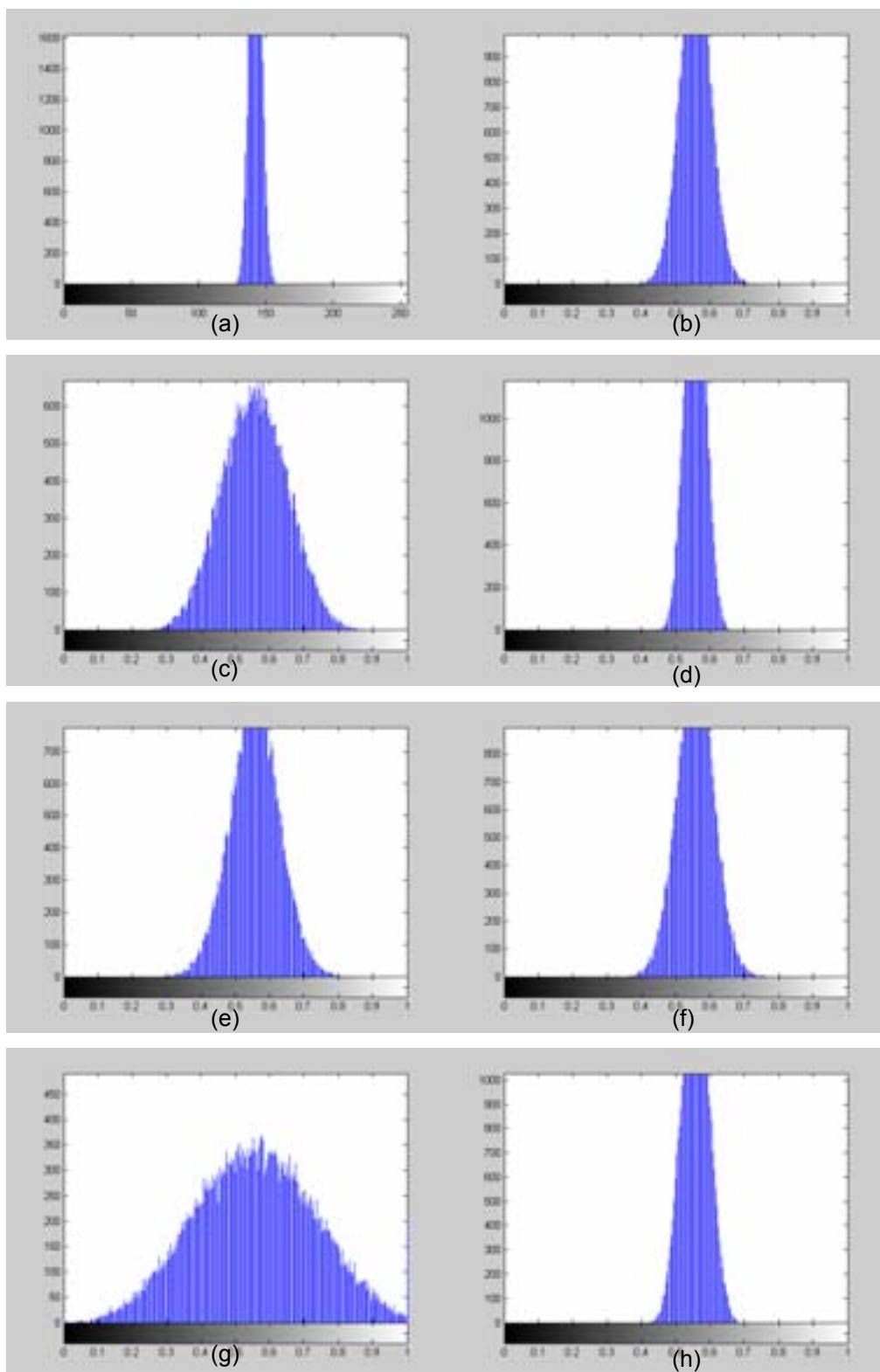


Figura 39-Histogramas das imagens simuladas na DWT (*pentagon*): (a) original; (b) realce linear [8]; (c) realce não-linear que usa (18) [9]; (d) realce não-linear que usa (19) [10]; (e) nova proposta; (f) método linear [8] com mais realce; (g) método que usa (18) com mais realce; (h) método que usa (19) com mais realce

O método linear [8] modificou pouco a distribuição dos níveis de cinza da imagem original, como visto nas Figuras 37, 38 e 39 (b). Houve um pequeno

alargamento no sentido do preto e no sentido do branco, mostrando a ocorrência do realce. Como foi pequeno o alargamento e o formato do histograma praticamente se manteve, percebe-se que a imagem foi suavemente realçada. O método não-linear [9] alargou mais a distribuição dos níveis de cinza que o método linear [8], mostrando que a técnica em [9] realçou mais a imagem. O método não-linear [10] também alargou pouco o histograma e realçou pouco a imagem. A nova proposta alargou muito a distribuição dos níveis de cinza e procurou manter o formato do histograma da imagem original. Isto mostra que esta proposta realçou fortemente muitos detalhes. O aumento na intensidade do realce aplicado pelos métodos linear [8] e não-linear [10] produziram histogramas menos distribuídos que o da nova proposta, evidenciando que esta última tem maior capacidade em realçar detalhes da imagem original. Já o histograma da técnica não-linear [9] apesar de ser mais distribuído na Figura 39 (g) e equivalente nas Figuras 37 e 38 (g) ao da técnica proposta, as imagens resultantes desse método são mais ruidosas que a da nova proposta. Na realidade, o realce de ruído alargou o histograma.

### 3.5

#### Conclusão

Neste capítulo, foi desenvolvida uma nova proposta de realce de imagens no domínio da DWT. Foi mostrado que o novo método pode apresentar uma boa resposta visual sem qualquer percepção significativa de ruído e sem a necessidade do uso de um algoritmo adicional para redução de ruído. O método proposto usa uma função linear que depende da distribuição das sub-bandas em frequência e que tem a vantagem de simplificar o ajuste do parâmetro de intensidade do realce. Os resultados mostraram que o novo esquema apresenta um desempenho superior quando comparado com outras funções de mapeamento descritas na literatura. Em particular, foram apresentados resultados para imagens em tons de cinza. Porém, testes experimentais com outras imagens corroboraram estas conclusões.