

Técnicas de Processamento Digital de Imagem (*High-Dynamic Range*)

Daniel Rodrigues Ferraz Izario

Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP
Campinas/SP, Brasil
daniel_izario@hotmail.com

Bruno Rodrigues Ferraz Izario

Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP
Campinas/SP, Brasil
bruno_izario@hotmail.com

Yuzo Iano

Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP
Campinas/SP, Brasil
yuzo@decom.fee.unicamp.br

Carlos Nazareth Motta Marins

Instituto Nacional de Telecomunicações - INATEL
Santa Rita do Sapucaí/MG, Brasil
carlosn@inatel.br

Resumo—Este artigo aborda uma aplicação que utiliza técnicas de processamento digital de imagem, juntamente com um processamento computacional, de modo a representar uma imagem de ampla faixa dinâmica com maior fidelidade para os níveis de intensidade da cena real. Através da mesma, uma análise completa do ambiente é executada, tendo como resultado uma outra imagem que, posteriormente, apresentará novas componentes de cor que são visualizadas através de mapa de radiância e histograma de cor. A aplicação traz benefícios a área de fotografias artísticas, digitalizações e de algoritmos de processamento de imagens, além de agregar qualidade em todo o processo.

Palavras chave—Processamento Digital de Imagem, *High-Dynamic Range*, Fotografias e Histograma.

I. INTRODUÇÃO

High-Dynamic Range (HDR) ou *High-Dynamic Range imaging* (HDRi) são conjuntos de técnicas e métodos utilizados no processamento digital de imagens, fotografias e computação gráfica, para capturar um alcance dinâmico superior entre as áreas mais claras e mais escuras de uma imagem, quando comparados a métodos convencionais.

O HDR é um recurso desenvolvido para que dispositivos eletrônicos gerem ou reproduzam imagens que apresentem cores mais vivas, com melhores níveis de contraste, tons claros com mais brilho (fonte de luz) e tons pretos mais escuros (sombras). As câmeras, são capazes de registrar imagens com grande alcance dinâmico, ou os televisores e monitores, habilitados em aceitar esse padrão e reproduzir as imagens com maior qualidade de cor. [1]

As fotografias são, geralmente, padronizadas em JPEG (*Joint Photographic Experts Group*), que possui uma profundidade de cor de 8-bit por canal, isso é, cores de 0 a 255, do preto ao branco, em cada canal. O desafio é utilizar 16-bit por canal, que permite ter uma fidelidade maior nas cores, devido ao alcance dinâmico entre 8-bit e 16-bit.

Para tal, foram desenvolvidas técnicas que a partir de múltiplas imagens com diferentes tempos de exposição, uma resultante das imagens é gerada em HDR, baseado no

algoritmo “*Debevec & Malik*” [2], na utilização de uma função de câmera e um mapa de radiância / histograma das camadas das cores, as novas componentes RGB (R - *red*, G - *green* e B - *blue*) da imagem são criadas.

O item II aborda as etapas da aplicação e suas funcionalidades. O item III apresenta os resultados obtidos. Em IV, é abordado à conclusão e os trabalhos futuros.

II. APLICAÇÃO

A aplicação está presente em um *website* que é uma ferramenta para executar um processamento digital de imagem em HDR. Para o desenvolvimento foi utilizado a linguagem de marcação HTML5 (*HyperText Markup Language*) [3], a de estilização CSS3 (*Cascading Style Sheets*) [4] e a de programação *javascript* [5].

Baseado no algoritmo “*Debevec & Malik*”, que possibilita recuperar um mapa de radiância de alto alcance dinâmico de uma cena, a partir de imagens geradas com sistemas de câmeras, em diferentes tempos de exposição, foi realizado um estudo para melhorar o processamento da imagem e gerar uma resultante HDR de visualização *online* em monitores convencionais.

O algoritmo utiliza múltiplas imagens de um dado momento e tempo de exposição ao ambiente, para realizar a união dessas imagens em um único mapa de radiância de alto alcance dinâmico, cujos valores associados aos pixels são proporcionais aos valores reais de radiância da cena, fazendo com que a interpretação dessa radiância seja representada em um histograma para padronização dos *pixels* por camada RGB.

A. Imagem

A imagem pode ser de uma fotografia que é obtida através de câmeras ou sensores que captam luz. Toda a imagem gerada é limitada por um plano retangular, no qual, cada posição nesse plano contém a informação de cor relativa, ou seja, a imagem neste caso é um sinal de cor 2D contínuo, onde o domínio é o plano e o contradomínio é o espaço de cor. Todo paradigma para representação da imagem é apresentado na Fig. 1.

A imagem contínua é modelada matematicamente por (1), sendo x e y números reais, limitados ao intervalo de 0 a X , e de 0 a Y , respectivamente.

$$\text{Imagem}(x, y) \leftrightarrow \text{pixel}(x, y) \quad (1)$$

$$x \in [0, X] \text{ e } y \in [0, Y]$$

Já a imagem digital é obtida a partir de uma amostragem ou de uma quantização, modelada matematicamente por (1), mas x e y são números inteiros. A partir disso, é gerado uma matriz de valores que representam o *pixel* da cor.

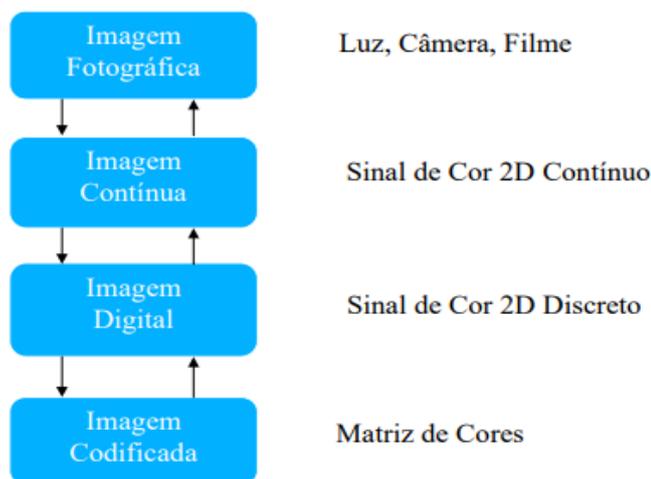


Fig. 1. Paradigma para representação da imagem.

De qualquer forma de obtenção da imagem, quando uma cena é representada em HDR, obtém-se um vetor bidimensional contendo os valores do brilho por *pixel*, em cada imagem. Estes valores não podem ser interpretados como medidas reais da radiação relativa da cena construída, já que não existe um mapeamento linear entre essas informações e o valor de cada *pixel*. O que existe é um mapeamento não-linear desconhecido que determina como, dada a radiação da cena, os valores associados aos *pixels* são obtidos.

B. Tempos de Exposição

Os tempos de exposição (TempE) são ajustados de acordo com cada modelo de câmera, utilizando a velocidade do obturador, a abertura, ou ambas situações. Para padronizar os valores de tempos, serão considerados 3 momentos: -2TempE , 0TempE e $+2\text{TempE}$. [6]

Em 0TempE (Fig. 2), a câmera procurará uma média iluminação para alcançar uma cena cinzenta, o $+2\text{TempE}$ (Fig. 3) resulta em uma imagem mais brilhante que capta mais detalhes nas áreas mais escuras da cena e o -2TempE (Fig. 4) resulta em uma imagem mais escura que captura detalhes nas áreas claras.

Todas as imagens obtidas vão desempenhar uma parte importante na resultante HDR (Fig. 5), cada uma contribuindo com seus melhores pixels para a imagem final.



Fig. 2. Imagem com 0TempE .



Fig. 3. Imagem com $+2\text{TempE}$.



Fig. 4. Imagem com -2TempE .



Fig. 5. Imagem resultante HDR.

C. Algoritmo

A primeira etapa do algoritmo é obter as imagens com suas respectivas informações. Em (2), é representado cada imagem por x , mas todas contêm em suas informações os dados de tempo de exposição (Δt_j) e a radiância (E_i), representado em (3).

$$Z_{ij} = f(x) \quad (2)$$

$$Z_{ij} = f(E_i \Delta t_j) \quad (3)$$

Após essa análise, é criado um valor Z_{ij} para cada valor de intensidade do *pixel* representativo, que é uma função não-linear com relação aos valores de exposição x , representado em (4) e (5).

$$f^{-1}(Z_{ij}) = E_i \Delta t_j \quad (4)$$

$$\ln f^{-1}(Z_{ij}) = \ln E_i + \ln \Delta t_j \quad (5)$$

Nas equações apresentadas, os valores conhecidos são Z_{ij} e Δt_j de cada imagem. Os valores a serem obtidos são E_i , assim como, uma nova função $g(Z_{ij})$. Essa nova função, representada em (6), possui um intervalo de domínio finito e bem definido de valores (0-255), que é o valor dos *pixels* RGB, já que o domínio do brilho associado a cada um desses *pixel* é finito.

$$g(Z_{ij}) = \ln E_i + \ln \Delta t_j \quad (6)$$

Nesse caso, é preciso utilizar uma análise matemática para encontrar os pontos de $g(Z_{ij})$ e E_i que minimizam o erro quadrático da função, representada em (7).

$$\varrho = \sum_{I=1}^N \sum_{J=1}^P \left[g(Z_{ij}) - \ln E_i - \ln \Delta t_j \right]^2 + \lambda \sum_{z=Z_{min}+1}^{Z_{max}-1} g''(z)^2 \quad (7)$$

Onde:

P = número de fotos disponíveis;

N = número de *pixels* avaliados;

Z_{max} = valores máximos de intensidade dos *pixels*;

Z_{min} = valores mínimos de intensidade dos *pixels*;

Utilizando (7), a imagem não fica adequada para a aplicação, então é criada uma função de peso triangular, suavizando a imagem, representada em (8).

$$w(z) = \begin{cases} z - Z_{min} \rightarrow z \leq \frac{1}{2}(Z_{min} + Z_{max}) \\ Z_{max} - z \rightarrow z > \frac{1}{2}(Z_{min} + Z_{max}) \end{cases} \quad (8)$$

Inserindo a suavização na equação (7), a nova função é obtida, representada por (9).

$$\varrho = \sum_{I=1}^N \sum_{J=1}^P \left\{ w(Z_{ij}) \left[g(Z_{ij}) - \ln E_i - \ln \Delta t_j \right] \right\}^2 + \lambda \sum_{z=Z_{min}+1}^{Z_{max}-1} [w(z) g''(z)]^2 \quad (9)$$

Obtendo os valores de $g(Z_{ij})$, são convertidos para valores de radiância relativos, assumindo que Δt_j de cada foto é conhecido, representado em (10).

$$\ln E_i = g(Z_{ij}) - \ln \Delta t_j \quad (10)$$

Para gerar o mapa de radiância / histograma, são utilizadas as informações das imagens, realizando uma média ponderada destes valores, representado em (11).

$$\ln E_i = \frac{\sum_{j=1}^P w(Z_{ij}) (g(Z_{ij}) - \ln \Delta t_j)}{\sum_{j=1}^P w(Z_{ij})} \quad (11)$$

D. Mapa de Radiância / Histograma

O mapa de radiância (Fig. 6) representa a quantidade de potência radiante (luminosidade) que incide sobre uma superfície, real ou imaginária, por unidade de área. Este processo é feito para cada componente RGB de forma a gerar cada canal de cor e se adequar aos padrões HDR, sendo realizado sua aproximação via cálculo matemático. [7]

Já o histograma (Fig. 7), descreve a distribuição estatística dos níveis de cinza em termos do número de amostras com cada nível. Pode ser estabelecida uma analogia entre o histograma de uma imagem e a função densidade de probabilidade, que é um modelo matemático da distribuição de tons de cinza de uma classe de imagens.

Para o segundo modelo, o primeiro conceito é conhecer o estado da cor. A cor é uma onda eletromagnética que matematicamente pode ser representada por uma função

unidimensional, mas que usa um número finito, pequeno e discreto. Quando a cor é codificada, o comum é usar 1 *byte* para cada componente, permitindo $2^8 = 256$ possibilidades,

assumindo valores de 0 a 255. Todo paradigma para representação da cor é apresentado na Fig. 8.

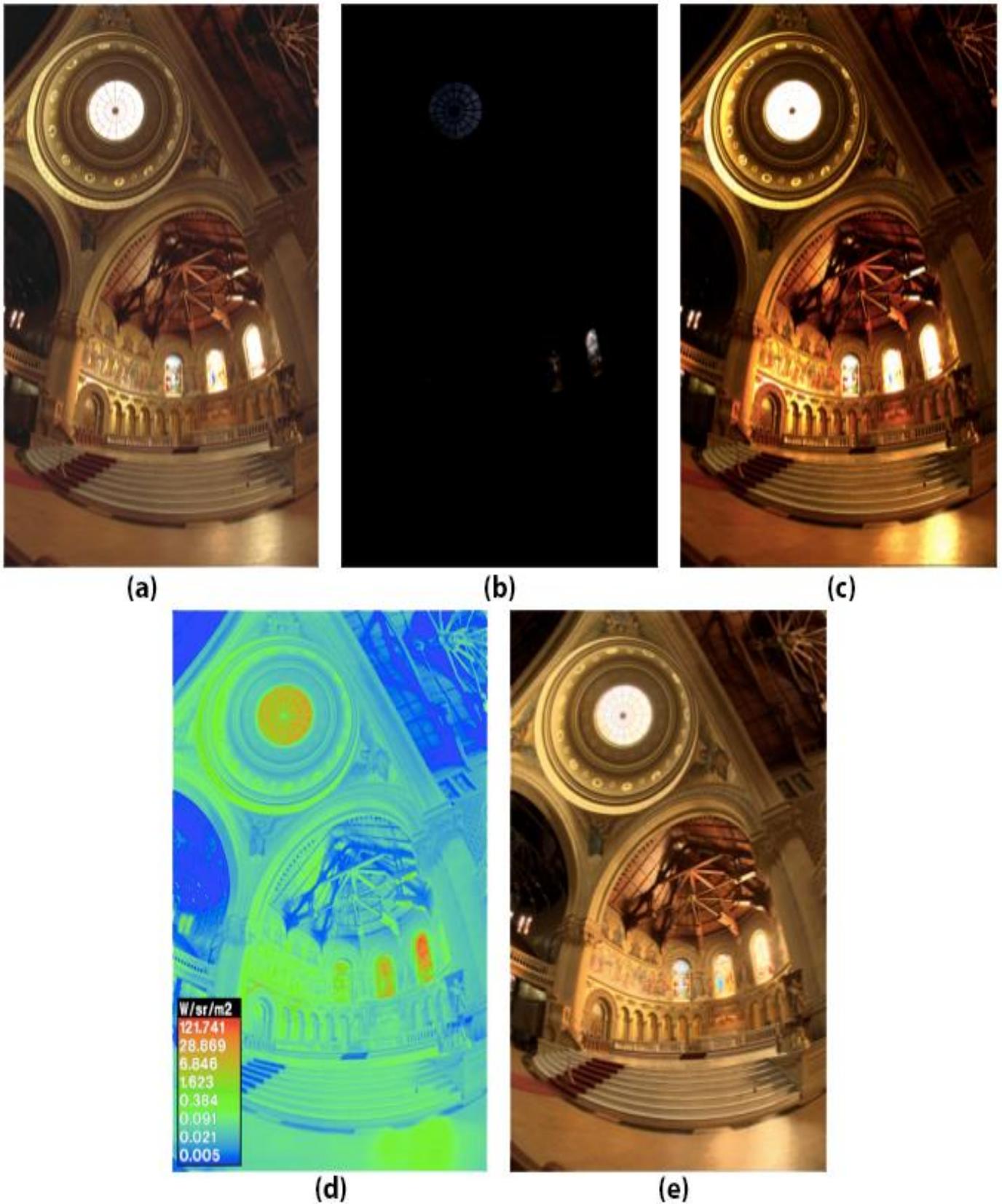


Fig. 6. (a) 0TempE, (b) -2TempE, (c) +2TempE, (d) Mapa de Radiância e (e) Resultante HDR.

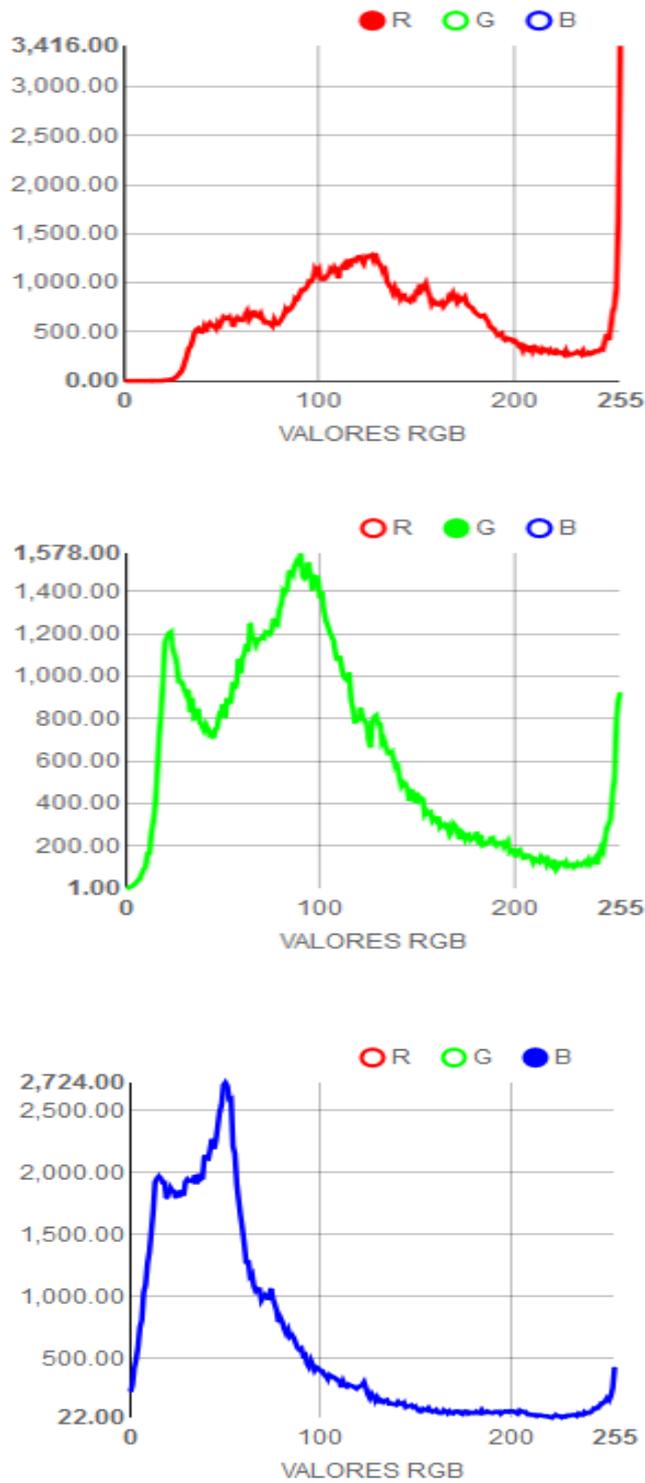


Fig. 7. Histograma RGB da imagem resultante HDR.

Após conhecer o estado da cor, é realizado uma padronização na imagem resultante HDR, para melhorar a qualidade de sua representação. Para a aplicação, é utilizado a técnica de realce de contraste HDR, que tem por objetivo melhorar a qualidade das imagens sob os critérios subjetivos do olho humano.

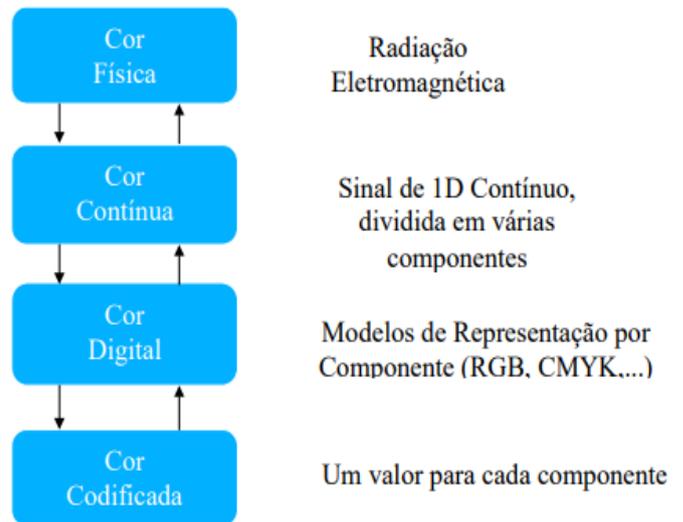


Fig. 8. Paradigma para representação da cor.

E. Visualização Online

Para mapear os conjuntos de cores da imagem resultante HDR, foi realizado um estudo na técnica “*Tone Mapping*” [8]. Monitores comuns possuem um alcance dinâmico muito menor do que o solicitado por imagens HDR, o que os torna inadequados para a exibição de toda a faixa de intensidades luminosas presentes em uma determinada cena. A técnica, representada na Fig. 9, tenta corrigir o problema da forte redução de contraste, preservando os detalhes e as cores capturadas.

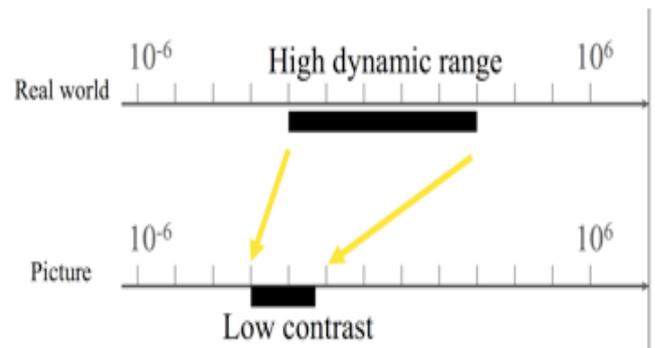


Fig. 9. Técnica “*Tone Mapping*”.

III. RESULTADOS

Depois de realizada todas as implementações citadas anteriormente, foram efetuados vários testes para provar que o conjunto da nova técnica desenvolvida é mais adequada, comparado ao algoritmo baseado neste artigo: “*Debevec & Malik*”.

O primeiro teste realizado, é para medir o tempo de processamento na geração da imagem resultante, utilizando para isso a Fig. 10. Como resultado, a nova técnica processou a imagem em 7,9 segundos, enquanto o algoritmo em 10,4 segundos, como apresentado na Fig. 11.

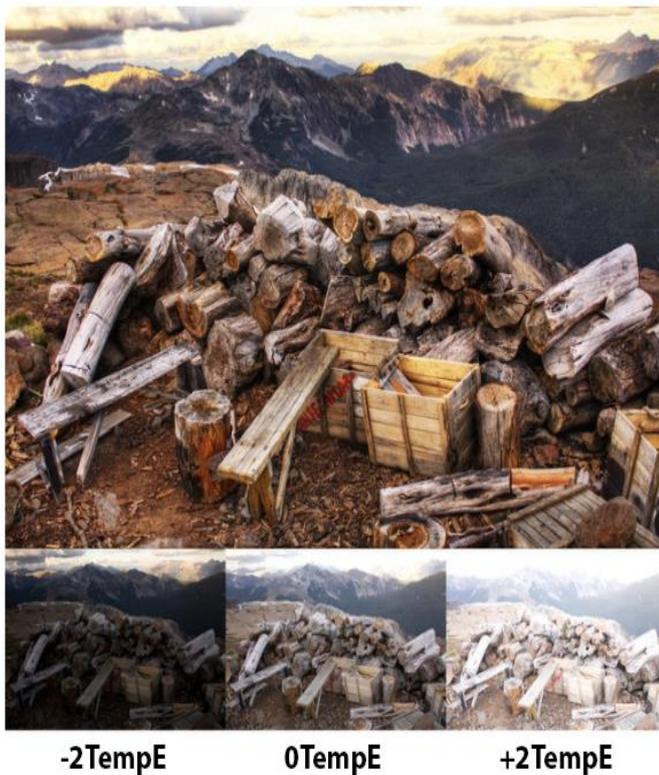


Fig. 10. Imagem resultante HDR escolhida para os testes.

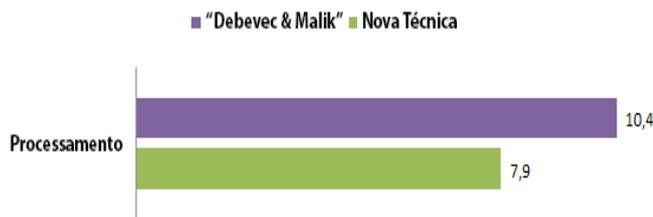


Fig. 11. Resultado do teste de processamento da imagem em segundos.

O segundo teste realizado foi a nível de histograma, já que, a nova técnica efetua uma padronização na imagem resultante HDR, sendo assim, a resultante da Fig. 10 é comparada nas duas técnicas e visualizado na Fig. 12, tendo como resultado, que a nova técnica implementada é superior, principalmente em ambiente com monitores comuns, comprovado pela imagem resultante HDR da nova técnica, apresentando em cada camada RGB um número maior de *pixels* localizado na zona de tons médios.

O último teste realizado, é para analisar o perfil em termos de qualidade dos *pixels* gerados na imagem resultante HDR, para isso, as imagens foram transformadas matricialmente e comparadas a nível de *pixel*. [9] Para essa análise comparativa foi utilizado uma placa de vídeo *GeForce GTX 980* e um processador *Intel® Core™ i7-7700*, demorando 49 horas, 36 minutos e 28 segundos para conclusão. Como resultado, a nova técnica atingiu 94% de qualidade e precisão nos *pixels* gerados, enquanto o algoritmo atingiu 72%, como apresentado na Fig. 13 as imagens resultantes finais.

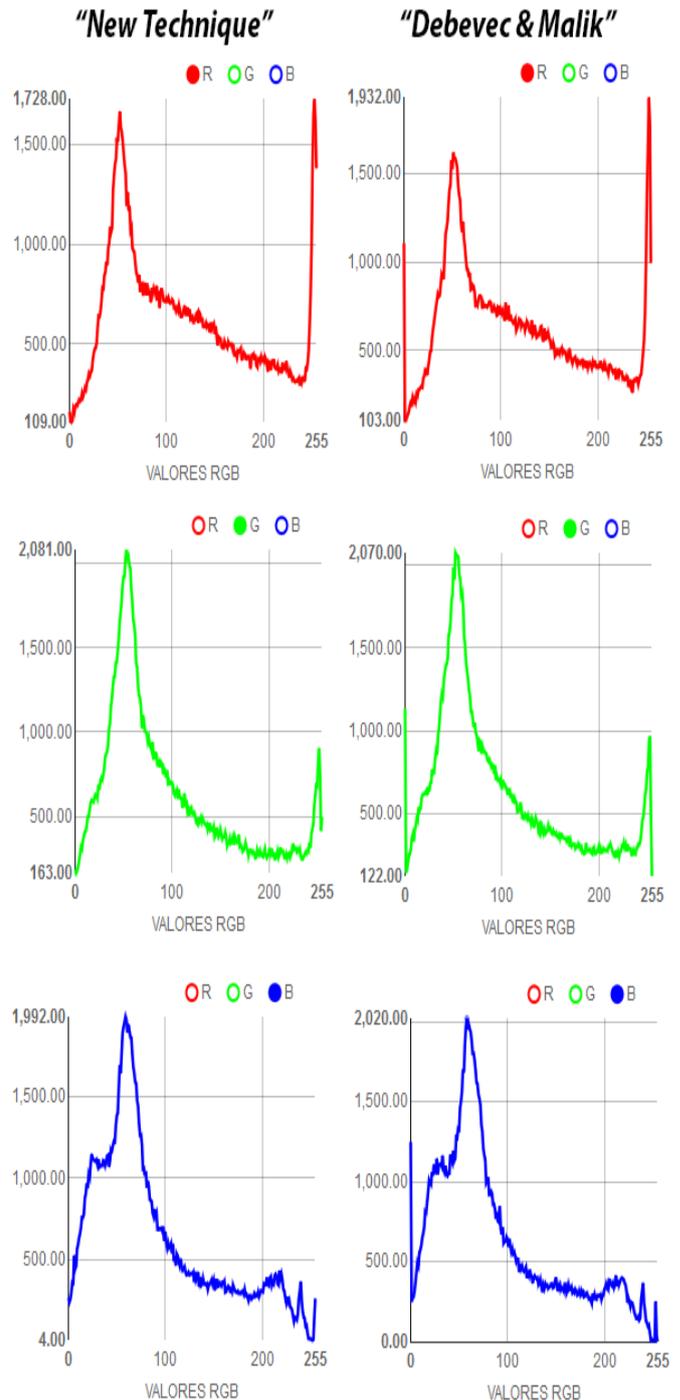


Fig. 12. Comparação da imagem resultante HDR no histograma RGB.

IV. CONCLUSÃO

A utilização de técnicas já existentes no mercado para o processamento digital de imagens HDR, como a implementação do algoritmo "Debevec & Malik" tem se mostrado eficiente para imagens RGB de análise simples, mas o uso da nova técnica apresentada no artigo, tem grande vantagem, já que aumenta a precisão matematicamente dos *pixels* analisados em um processo numérico minucioso da cor,



Fig. 13. Resultado do teste de qualidade a nível de pixels.

fazendo todo o passo a passo de implementação, utilizando o método de mapa de radiância / histograma para obtenção e verificação da imagem resultante HDR.

No futuro será possível fazer a técnica com todo o conjunto de algoritmos específicos desenvolvidos de forma online, já que as informações estão sendo produzidas para se ter melhores resultados, dando maior eficiência a nível do processamento para obtenção e criação de imagens HDR para visualização *online* em monitores convencionais.

REFERÊNCIAS

- [1] R. Concepcion, “*The HDR Book: Unlocking the Pros’ Hottest Post-Processing Techniques*”, 1st ed., Peachpit Press, 2011.
- [2] P. E. Debevec; J. Malik, “*Recovering high dynamic range radiance maps from photographs*”, SIGGRAPH ACM Special Interest Group on Computer Graphics and Interactive Techniques, ACM New York, NY, USA, 2008.
- [3] J. Keith; R. Andrew, “*HTML5 for Web Designers*”, 2nd ed., A Book Apart, 2016.
- [4] D. Cederholm, “*CSS3 for Web Designers*”, 2nd ed., A Book Apart, 2015.
- [5] D. Flanagan, “*JavaScript: The Definitive Guide*”, 6th ed., O’Reilly Media, 2011.
- [6] F. McCollough, “*What is HDR Photography?*”, *HDR Photography Resources*. Disponível em: <http://www.hdr-photography.com/articles/what_is_hdr_photography.php>. Acesso em: 29 de outubro de 2017.
- [7] M. A. S. Silva, “Grandezas e unidades radiométricas”, Casa das Ciências. Disponível em: <http://wikiciencias.casadasciencias.org/wiki/index.php/Grandezas_e_unidades_radiom%C3%A9tricas>. Acesso em: 25 de outubro de 2017.
- [8] Macphun, “*Tone Mapping in HDR. What It is and How to Use It?*”, *Macphun*. Disponível em: <<https://macphun.com/blog/what-is-tone-mapping>>. Acesso em: 29 de outubro de 2017.
- [9] M. S. Nixon; A. S. Aguado, “*Feature Extraction & Image Processing for Computer Vision*”, 3rd ed., Academic Press, 2012.

Daniel Rodrigues Ferraz Izario. Graduado no Instituto Nacional de Telecomunicações (Inatel) em Engenharia da Computação (2017), estudante de mestrado em Engenharia da Computação pela Universidade Estadual de Campinas (Unicamp). Atualmente é *freelancer* em desenvolvimento e planejamento de sites para lojas, empresas e sites pessoais.

Yuzo Iano. Graduação - 1972, mestrado - 1974 e doutorado - 1986 em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual de Campinas (Unicamp). Atualmente é Professor Titular MS6 do Departamento de Comunicações da Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Unicamp, Editor chefe da *SET International Journal of Broadcast Engineering* e Presidente Geral do *Brazilian Technology Symposium* (BTSym).

Bruno Rodrigues Ferraz Izario. Graduado no Instituto Nacional de Telecomunicações (Inatel) em Engenharia Elétrica (2011), mestrado em Engenharia Elétrica na Universidade Presbiteriana Mackenzie (2015) e estudante de doutorado em Telecomunicações na Universidade Estadual de Campinas (Unicamp). Trabalha como Engenheiro de Sistemas da SAVIS Embraer: Defesa e Segurança.

Carlos Nazareth Motta Marins. Doutor em Engenharia Elétrica pela Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação (Unicamp) - 2010. Mestre em Telecomunicações, pelo Instituto Nacional de Telecomunicações (Inatel) - 2004. Graduado em Engenharia Elétrica, ênfase em Eletrônica e Telecomunicações (Inatel) - 1994. Técnico de Eletrônica (ETE-FMC) - 1989. Atualmente é Vice-Diretor (Inatel).