

Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro

VISUALIZAÇÃO DE IMAGENS HDR EM DISPOSITIVOS COM ECRÃ PEQUENO

Tese de Doutoramento em Informática

António Carlos Alves Urbano

Orientadores:

Doutor Luís Gonzaga Mendes Magalhães

Doutor Adérito Fernandes Marcos



Vila Real, 2013

Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro

VISUALIZAÇÃO DE IMAGENS HDR EM
DISPOSITIVOS COM ECRÃ PEQUENO

Tese de Doutoramento em Informática

António Carlos Alves Urbano

Orientadores:

Doutor Luís Gonzaga Mendes Magalhães

Doutor Adérito Fernandes Marcos

Composição do Júri:

Vila Real, 2013

Declaração de responsabilidade

As ideias expressas na presente tese são da inteira responsabilidade do autor.

À minha família

Agradecimentos

Quero deixar expresso o meu sincero agradecimento aos orientadores Professor Luis Magalhães e Professor Adérito Marcos que estiveram ao meu lado em mais uma etapa académica. Uma palavra especial ao, também especial, Professor Alan Chalmers da Universidade de Warwick que doutamente sugeriu o tema para este trabalho.

Um “muito obrigado” aos professores João Paulo Moura e Maximino Bessa que me apoiaram de forma incansável nos momentos de maior dificuldade, incentivando e apontando sempre possibilidades para fazer progredir o trabalho.

Aos meus colegas do DEI/ESTG/IPLeiria um grande abraço pela entejuda nesta grande caminhada comum.

Finalmente, uma palavra de gratidão às dezenas de participantes das experiências levadas a cabo durante o trabalho, dado que sem eles os objetivos jamais teriam sido alcançados.

Resumo

Nas duas últimas décadas, assistimos ao desenvolvimento de um número crescente de técnicas, designadas por *tone mapping operators* (TMO), para reprodução de imagens com elevada gama dinâmica (*high dynamic range* – HDR) em ecrãs tradicionais. Apesar de recentemente terem surgido TMO que têm em conta a característica específica de cada dispositivo de visualização, nenhum desses algoritmos foi desenvolvido especificamente para dispositivos com ecrã pequeno (DEP).

Assim, nesta tese foi realizado um estudo sobre a visualização de imagens HDR em DEP, tendo como propósito a proposta de soluções para a melhoria da sua visualização. Inicialmente foi realizada uma avaliação dos TMO atualmente existentes que mostrou que os DEP com tamanho limitado, resolução e profundidade de cor, exigem uma investigação específica para encontrar ou criar uma solução adequada. Esse estudo permitiu, também, identificar um conjunto de características dos TMO que precisam ser enfatizadas para obter imagens mapeadas com uma maior fidelidade nos DEP, especialmente o realce dos detalhes. Com base nesse estudo foi proposta uma solução para visualização de imagens HDR em DEP, que tem por base a construção de um TMO híbrido. O TMO proposto, tendo por base um qualquer TMO, tenta melhorar os detalhes das imagens mapeadas com o TMO original. Através da realização de experiências psicofísicas foi demonstrado que este novo TMO produz melhores resultados em DEP que os obtidos com o TMO original. Apesar de ter sido desenvolvido um protótipo em J2ME do novo TMO, a sua atual implementação ainda é pouco eficiente para a realização de testes diretamente em DEP.

Em conclusão, com este trabalho é identificada a problemática da visualização de imagens HDR em DEP, sendo apontadas sugestões de como melhorar esse processo e fica ainda a proposta de um novo TMO.

Palavras-chave: *high dynamic range, tone mapping operator, dispositivos com ecrã pequeno*

Abstract

In the last two decades, an increasing number of techniques, known as tone mapping operators (TMOs), have been developed to reproduce high dynamic range (HDR) imagery on traditional displays. Despite having recently emerged TMOs taking into account the specific characteristics of different display devices, none of these algorithms has been specifically developed for small screen devices (SSDs).

Thus, in this thesis a study concerning the visualization of HDR images on SSDs was carried out, regarding the proposal of solutions to improve their visualization. Initially a review and evaluation of currently existing TMOs showed that the SSDs with limited size, resolution and colour-depth, require a specific investigation to find or create appropriate solutions. This study also allowed identifying a set of TMO characteristics that need to be emphasized to obtain mapped images with greater fidelity in SSDs. Based on this study a solution for viewing HDR images in SSDs was proposed, which is based on the construction of a hybrid TMO. The proposed TMO, using as basis any existing TMO, tries to improve the details of the images mapped using the original TMO. Through psychophysical experiments it was demonstrated that this new TMO produces better results in SSDs than the original one. Although the development of a J2ME prototype of the TMO was done, its current implementation is still not efficient enough for testing directly into SSDs.

In conclusion, this work identified the problems regarding the visualization of HDR images in SSDs, being pointed suggestions on how to improve this process and a new TMO is also proposed.

Keywords: high dynamic range, tone mapping operator, small screen devices

Índice

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 MOTIVAÇÃO	2
1.2 OBJETIVOS E CONTRIBUIÇÕES PRINCIPAIS	2
1.3 ORGANIZAÇÃO DA TESE	3
2. HIGH DYNAMIC RANGE	5
2.1 SISTEMA VISUAL HUMANO	5
2.2 IMAGEM HDR	10
2.2.1 Aquisição	10
2.2.1 Formatos de armazenamento	17
2.2.2 Software	22
2.3 DISPOSITIVOS DE VISUALIZAÇÃO	24
2.3.1 Dispositivos LDR	24
2.3.2 Dispositivos HDR nativos	29
2.3.3 Dispositivos com ecrã pequeno (VLDR)	30
2.4 <i>TONE MAPPING OPERATORS</i>	33
2.4.1 Operadores globais	33
2.4.1 Operadores locais	39
2.4.1 Dependentes do tempo	47
2.4.2 Operadores em <i>hardware</i> gráfico	51
2.4.3 Outras características dos TMO	54
3. AVALIAÇÃO DE <i>TONE MAPPING OPERATORS</i>	57
3.1 CONCEITOS BÁSICOS	57
3.1.1 Princípios para uma boa conduta experimental	59
3.1.2 Outros aspetos importantes	59
3.2 HISTÓRICO SOBRE AVALIAÇÃO DE TMO	60
3.2.1 Metodologia para comparação de TMO [Drago'03a]	60
3.2.2 Descobrir a influência dos atributos de imagem [Yoshida'05]	60
3.2.3 Avaliação de TMO através de dispositivo HDR [Ledda'05]	61
3.2.4 Medição da qualidade geral de imagem [Cadik'06]	62
3.2.5 Importância da cena real na comparação de TMO [Ashikhmin'06]	63
3.2.6 Criação de TMO genérico facilmente ajustável [Yoshida'06]	64
3.2.7 Proposta de <i>framework</i> para avaliação de TMO [Kuang'07]	65
3.3 RESUMO E ANÁLISE DO ESTUDO	66
4. AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE <i>TONE MAPPING OPERATORS</i> EM DISPOSITIVOS COM ECRÃ PEQUENO	69
4.1 ABORDAGEM E DESENHO EXPERIMENTAL	69
4.1.1 Hipótese estatística	71
4.1.2 Participantes	71
4.1.3 Condições	71
4.1.4 Procedimento	76
4.2 RESULTADOS E DISCUSSÃO	76

4.3 CONCLUSÃO	82
5. PROPOSTA DE UM TONE MAPPING OPERATOR PARA DISPOSITIVOS COM ECRÃ PEQUENO	85
5.1 METODOLOGIA DE INVESTIGAÇÃO ADOTADA.....	85
5.2 ABORDAGEM PROPOSTA.....	86
5.3 AVALIAÇÃO PRELIMINAR/TESTE PILOTO.....	86
5.3.1 Criação do TMO	87
5.3.2 Ajuste dos parâmetros	90
5.3.3 Desenho experimental	92
5.3.4 Análise e discussão dos resultados.....	96
5.4 PROPOSTA FINAL	98
6. AVALIAÇÃO DO TONE MAPPING OPERATOR PROPOSTO	99
6.1 DESENHO EXPERIMENTAL	99
6.2 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	105
6.3 DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO.....	109
7. CONCLUSÕES	111
7.1 PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES	112
7.2 TRABALHO FUTURO	113
8. BIBLIOGRAFIA.....	115
ANEXO A – FORMULÁRIO DE CONSENTIMENTO EXPERIMENTAL	A-1
ANEXO B1 – INSTRUÇÕES PARA A EXPERIÊNCIA (CRT)	A-3
ANEXO B2 – INSTRUÇÕES PARA A EXPERIÊNCIA (LCD)	A-5
ANEXO B3 – INSTRUÇÕES PARA A EXPERIÊNCIA (DEP-PDA)	A-7

Lista de figuras

Figura 2.1 Constituição do olho humano (imagem adaptada de [Wikipedia'12g] e de [Rosa'12]).	5
Figura 2.2 Ordens de magnitude das intensidades percebidas pelo SVH (imagem adaptada de [Richards'05]).	8
Figura 2.3 Diagrama de cromaticidade CIE (imagem original [Wikipedia'12b]).	9
Figura 2.4 Exemplo de uma imagem criada com o RADIANCE (imagem original [Graeme Watt'12]).	11
Figura 2.5 Em cima, três miniaturas de fotografias tiradas a uma cena com tempos de exposição de -2EV, 0EV e +2EV respetivamente. Em baixo, a imagem HDR obtida.	12
Figura 2.6 A SpheroCam HDR (imagem original [Spheronvr'12]) e o HDRC VGAX (imagem original [Omron'06]).	15
Figura 2.7 Casio EX-ZR100 (imagem original [Mchugh'11]).	15
Figura 2.8 Pentax K-7 (imagem original [Digitalcameratracker'10]).	16
Figura 2.9 Nikon D5100 com opção HDR e outras subopções no menu da máquina (imagem original [Barnett'11]).	16
Figura 2.10 iPhone4 com a opção HDR <i>on/off</i> (imagem original [Foresman'10]).	17
Figura 2.11 Posicionamento custo/benefício dos diversos formatos (original [Ward'04]).	22
Figura 2.12 Dispositivo CRT (adaptada de [Howstuffworks'12a]).	25
Figura 2.13 Ecrã de cristais líquidos – LCD (imagem original [Howstuffworks'12b]).	26
Figura 2.14 Estrutura de um <i>pixel</i> de um LCD (a) deixando passar luz (b) a luz não passa (imagem original [Energyefficiency'12]).	27
Figura 2.15 Ecrã HDR Solar 47 desenvolvido em 2009 pela SIM2 (imagem original [Boylan'08]).	30
Figura 2.16 Ecrã HDR desenvolvido pela Dolby – o PRM-4200 (imagem original [Dolby'10]).	30
Figura 2.17 Operador de <i>tone mapping</i> "ideal".	33
Figura 2.18 Exemplos da aplicação do operador revisto de Tumblin e Rushmeier com fatores de escala de 0.1, 1, 10, 20, segundo a ordem de leitura (imagem original livro HDRI - [Reinhard'05b]).	35
Figura 2.19 Exemplos da aplicação do TMO que Greg Ward desenvolveu em 1994 com fatores de escala de 0.01, 0.1, 1 segundo a ordem de leitura (imagem original livro HDRI - [Reinhard'05b]).	36
Figura 2.20 Exemplo da aplicação do operador baseado no ajuste do histograma (imagem original livro HDRI –	37
Figura 2.21 Exemplos da aplicação do algoritmo de Cohen et al. À esquerda, um <i>snapshot</i> do visualizador panorâmico desenvolvido utilizando a técnica descrita e, à direita, a simulação de um material colorido através da adição de um mapa ambiente difuso (imagens original [Cohen'01]).	37
Figura 2.22 Aplicação do TMO do Mantiuk et al com valores para o nível de luminância de 0 e 1, respetivamente (imagem original livro HDRI - [Reinhard'05b]).	38
Figura 2.23 TMO do Drago et al aplicado a uma imagem HDR variando o parâmetro <i>bias</i> : 0.6, 0.7, 0.85 e 1 (imagem original livro HDRI - [Reinhard'05b]).	39
Figura 2.24 Variações do peso da influência dos <i>pixels</i> vizinhos na redução da luminância com o operador do Chiu et al.. Os valores utilizados foram 1, 2, 4 e 8, respetivamente. Repare-se nos halos criados (imagem original livro HDRI - [Reinhard'05b]).	40
Figura 2.25 Em cima à esquerda a camada base que irá sofrer compressão; em baixo à esquerda, a camada de detalhe; à direita, a imagem resultante da aplicação do filtro bilateral de Durand e Dorsey (imagem original livro HDRI - [Reinhard'05b]).	41
Figura 2.26 Exemplo da compressão do TMO de Fattal et al numa imagem HDR onde, na horizontal, o parâmetro beta (controla o valor da atenuação) assume os valores 0.9 e 0.8 e, na vertical, o parâmetro alfa (quais as magnitudes dos gradientes que são atenuados) assume os valores 1, 0.3 e 0.001 (imagem original livro HDRI - [Reinhard'05b]).	43

Figura 2.27 Variação do parâmetro <i>key</i> (0.1, 0.18, 0.3) durante a aplicação do TMO baseado em técnicas fotográficas. Este parâmetro indica se a impressão geral de uma cena é clara ou escura (imagem original livro HDRI - [Reinhard'05b]).	44
Figura 2.28 Funcionamento do TMO de Ashikhmin onde o parâmetro que define a tolerância para o contraste local assume, da esquerda para a direita, os valores 0.1, 0.5 e 0.9 (imagem original livro HDRI - [Reinhard'05b]).	45
Figura 2.29 Decomposição da imagem em áreas e o resultado final da junção dessas áreas (imagem original [Mantiuk'05]).	46
Figura 2.30 Resultados produzidos por mapeamento do contraste, à esquerda, e pela equalização do contraste, à direita (imagem original [Mantiuk'05]).	47
Figura 2.31 Imagens mapeadas utilizando o TMO dependente do tempo do Ferwerda et al (imagem original livro HDRI - [Reinhard'05b]).	48
Figura 2.32 Variações do TMO de Pattanaik et al numa imagem do interior de uma gruta (imagem original livro HDRI - [Reinhard'05b]).	49
Figura 2.33 Adaptação à iluminação após ligar as luzes mais fortes. As <i>frames</i> distam 30ms umas das outras (imagem original [Durand'00]).	49
Figura 2.34 A sequência de cima representa a adaptação à luz depois de 1, 3, 6 e 12 segundos, respetivamente. Na sequência de baixo são mostradas algumas <i>frames</i> da adaptação ao escuro depois de desligada a luz. As 4 <i>frames</i> finais representam a percepção da cena passados 1, 2, 4 e 16 minutos (imagem original [Ledda'04]).	50
Figura 2.35 Exemplo de uma imagem HDR mapeada com o TMO baseado nos fotorreceptores (imagem original [Reinhard'05a]).	50
Figura 2.36 Cena vista interativamente com diferentes níveis de adaptação (imagem original [Scheel'00]).	52
Figura 2.37 Imagem HDR mapeada no GPU usando o TMO de Goodnight et al (imagem original [Goodnight'03]).	53
Figura 2.38 À esquerda, a imagem mapeada obtida pela aplicação do algoritmo Tumblin et al original e, à direita, a versão obtida por <i>hardware</i> gráfico (imagem original [Artusi'03]).	53
Figura 2.39 Classificação e desenvolvimento de TMO (imagem adaptada e estendida de [Devlin'02]).	54
Figura 2.40 – Imagem de cariz perceptivo.	54
Figura 2.41 – Imagem de cariz cognitivo (imagem original [Jonathanw100'12]).	55
Figura 2.42 – Imagem de cariz estético (imagem original [Filion'12]).	55
Figura 3.1 Obtenção da melhor metodologia para as experiências a realizar.	57
Figura 4.1 Experiência em progresso utilizando LCD.	70
Figura 4.2 Macbeth <i>chart</i> .	72
Figura 4.3 Dois tipos de Snellen <i>chart</i> .	72
Figura 4.4 Criação da imagem HDR da cena 1.	73
Figura 4.5 Imagem HDR da cena 2.	74
Figura 4.6 HTC P3300.	75
Figura 4.7 1, 2 e 3 são os possíveis pontos onde o redimensionamento pode ser feito dentro do processo de geração da imagem mapeada.	75
Figura 5.1 O processo da metodologia investigação-ação.	85
Figura 5.2 Abordagem utilizada para o desenvolvimento de um TMO apropriado para DEP.	86
Figura 5.3 Imagem base exemplificativa da construção da máscara de junção.	88
Figura 5.4 Máscara obtida após aplicar o Laplaciano da Gaussiana para deteção de contornos.	88
Figura 5.5 Progresso da máscara após dilatação (em cima à esquerda), preenchimento de buracos (em cima à direita) e erosão (em baixo).	89
Figura 5.6 Aumento do tamanho da máscara.	89
Figura 5.7 <i>Blur</i> (à esquerda) e redução da máscara (à direita).	89
Figura 5.8 Construção do novo TMO para a imagem exemplo.	91
Figura 5.9 Janela para afinação dos parâmetros do TMO do Drago para a imagem da cena 1.	93
Figura 5.10 Janela para afinação dos parâmetros do TMO do Mantiuk para a imagem da cena 1.	93
Figura 5.11 Imagem HDR da cena utilizada na segunda experiência.	95
Figura 5.12 Proposta final do novo TMO híbrido.	98
Figura 6.1 As 7 imagens HDR utilizadas na experiência (1ª, 4ª e 5ª imagens originais de [Reinhard'05b] e 2ª e 3ª imagens originais de [Cadik'08]).	101
Figura 6.2 Máscara da <i>memorial</i> com valores de sigma =2 (à esquerda) e =4 (à direita).	102
Figura 6.3 Máscara da <i>memorial</i> com espessura =5 (cima à esquerda) e =10 (cima à direita) ambas com sigma = 2. Em baixo, as máscaras correspondentes mas já finais (com todos os passos efetuados).	102

Figura 6.4 <i>Memorial</i> com opacidade =0.5 (à esquerda) e =1.0 (à direita) ambas com sigma =2 e espessura = 10.	104
Figura 6.5 Interface gráfica utilizada na experiência.	104
Figura 6.6 Opções disponíveis para os participantes avaliarem a melhoria ou não dos detalhes. Os níveis de melhoria apenas aparecem caso o participante escolha a opção “Melhoraram”.	104

Lista de tabelas

Tabela 2-1 Comparação entre os vários formatos para codificação HDR.....	21
Tabela 2-2 Comparação da gama dinâmica dos diversos tipos de dispositivos de visualização ([Soneira'06a, Soneira'06b, Wikipedia'12a, Wikipedia'12c, Wikipedia'12d, Wikipedia'12e, Wikipedia'12f]).	29
Tabela 2-3 Comparação das características dos ecrãs de alguns <i>smartphones</i> atuais [Soneira'10].....	32
Tabela 2-4 Comparação das características dos ecrãs de alguns <i>tablets</i> atuais [Soneira'11].....	32
Tabela 3-1 Quadro comparativo das experiências realizadas para comparação de TMO.	67
Tabela 4-1 Matriz de preferência para PDA sobre o atributo cor na primeira cena.	77
Tabela 4-2 Esta tabela apresenta o coeficiente de concordância de Kendall (u), o coeficiente de consistência (ζ) e a significância de p de acordo com os testes estatísticos de qui-quadrado (χ^2), para cada tipo de dispositivo e atributo. Os <i>rankings</i> de TMO daí resultantes são também indicados.	79
Tabela 4-3 Pontuação total de cada TMO. Em cada coluna estão marcados os melhores resultados sobre um fundo de cor diferente.	80
Tabela 4-4 Os <i>rankings</i> de TMO finais onde as setas apontam as principais mudanças no <i>ranking</i> dos PDA quando comparado com os <i>rankings</i> dos CRT e LCD.	80
Tabela 4-5 Testes qui-quadrado de Pearson [Spss].....	81
Tabela 5-1 TMO utilizados nas experiências e respetivos parâmetros.	91
Tabela 5-2 Parâmetros utilizados na cena da primeira experiência após o processo de afinação.	94
Tabela 5-3 Parâmetros utilizados na cena da segunda experiência após o processo de afinação.	94
Tabela 5-4 Pontuações obtidas por cada TMO nas duas experiências realizadas.	97
Tabela 5-5 - <i>Rankings</i> obtidos.....	97
Tabela 6-1 Modas dos valores escolhidos para os 3 parâmetros para cada imagem.	105
Tabela 6-2 Resultados gerais da experiência.	107
Tabela 6-3 Contagem das combinações mais vezes utilizadas pelos participantes.	108
Tabela 6-4 Contagem das combinações mais vezes utilizadas pelos participantes que resultaram em melhoria.	108
Tabela 6-5 Contagem das combinações mais vezes utilizadas pelos participantes que resultaram em muita melhoria.	109

Lista de siglas e acrónimos

AMOLED	Active-Matrix OLED
ANOVA	Analysis of variance
CIE	Commission Internationale de l'Eclairage
CPU	Central Processing Unit
CRF	Camera Response Function
CRT	Cathode Ray Tube
DEP	Dispositivo com Ecrã Pequeno
DLP	Digital Light Processing
FED	Field Emission Display
GPU	Graphics Processing Unit
HD	High Definition
HDR	High Dynamic Range
HDTV	High Definition Television
IEEE	Institute of Electrical and Electronic Engineers
IMLED	Individually Modulated LED
J2ME	Java 2 Platform, Micro Edition
JND	Just Noticeable Difference
JPG ou JPEG	Joint Photographic Experts Group
LCD	Liquid Crystal Display
LDR	Low Dynamic Range
OLED	Organic Light Emitting Diode
PBM	Portable Bitmap
PDA	Personal Digital Assistant
PDP	Plasma Display Panel
PFS	Portable Floatmap Streams
PLED	Polymer Light Emitting Diode
PNG	Portable Network Graphics
PPM	Portable Pixmap
QVGA	Quarter Video Graphics Array
RGB	Red/Green/Blue
RGBE	RGB + expoente partilhado
SGI	Silicon Graphics, Inc
SMOLED	Small Molecule Light Emitting Diode
sRGB	Standard RGB
SSD	Small Screen Device
SVH	Sistema Visual Humano
TFT	Thin Film Transistor
TIFF	Tagged Image File Format
TMO	Tone Mapping Operator
TN	Twisted Nematic
VLDR	Very Low Dynamic Range

1. Introdução

Se concordamos que o áudio reproduzido por computador consegue manter a sua fidelidade relativamente ao que ouvimos no mundo real, o mesmo não acontece com imagens e vídeos mostrados pelos dispositivos de visualização convencionais. De facto, apesar de atualmente já ser possível obter imagens, a partir do mundo real ou através da geração de imagens de síntese por computador, com uma elevada gama dinâmica ¹(*High Dynamic Range* - HDR), tal como acontece quando olhamos diretamente para o mundo, os dispositivos de visualização convencionais não têm capacidade para mostrar toda essa gama dinâmica. Isto sucede porque, ao contrário do que frequentemente acontece na Computação Gráfica, onde as aplicações são muito dependentes do *hardware* e da sua evolução (circuitos integrados, dispositivos de interação 3D, placas aceleradoras gráficas, entre outros), existe um notório atraso nos dispositivos de entrada/saída, nomeadamente, nos dispositivos de visualização. A tecnologia utilizada nos dispositivos de visualização comuns não consegue reproduzir convenientemente a gama de cores ou gama dinâmica de uma cena do mundo real captada pelo sistema visual humano mas apenas um subespaço limitado dessas cores [Banterrie'11]. No entanto, algumas empresas têm mostrado interesse no desenvolvimento de dispositivos com capacidade para representar uma maior gama de cores e intensidades, como a BrightSide Technologies Inc., que em 2005 desenvolveu um ecrã onde a luminância máxima é cerca de 40 vezes superior à luminância de um ecrã de computador tradicional. Prevendo uma enorme expansão das tecnologias HDR, uma das mundialmente reconhecidas líderes das tecnologias de som *surround*, a Dolby Laboratories Inc., adquiriu em 2007 a BrightSide Technologies Inc., rebatizando-a de Dolby Vision. Infelizmente, os dispositivos criados e lançados no mercado, estão ainda longe do alcance de um utilizador comum, devido ao seu elevado preço sendo, no entanto, de realçar a aposta feita por uma empresa de som numa tecnologia visual, prevendo que o futuro próximo passe pelo HDR.

¹ Para uma imagem, o termo gama dinâmica (*dynamic range*), é a razão entre o seu *pixel* mais claro e o seu *pixel* mais escuro. Para um dispositivo de visualização, gama dinâmica refere-se à razão entre a luminância máxima e mínima que esse dispositivo é capaz de emitir.

1.1 Motivação

A limitação da visualização direta de uma imagem com elevada gama dinâmica (HDR) em dispositivos de visualização vulgares, pode ser ultrapassada (ou minimizada), aplicando à imagem HDR um determinado algoritmo, por forma a fazer um mapeamento da gama de cores original para a gama presente nos usuais dispositivos de visualização. Claro que, com este processo, haverá perda de informação, uma vez que se passa de uma imagem HDR para LDR (*Low Dynamic Range*), contudo, aplicando-se algoritmos adequados, é possível preservar os detalhes apesar dessa compressão. Estes algoritmos são conhecidos como operadores de mapeamento de tons ou *Tone Mapping Operators* (TMO).

São vários os TMO atualmente existentes. Apesar das diferentes premissas em que cada operador se baseia, a maioria dos TMO foram desenvolvidos tendo em mente que seriam testados e validados em dispositivos de visualização tradicionais, como os ecrãs CRT e LCD normalmente utilizados nos computadores. Outros foram também criados a pensar nos dispositivos de impressão [Artusi'04]. Recentemente [Reinhard'12] tem sido dada mais atenção ao desenvolvimento de TMO que tenham em conta as características próprias de cada tipo de dispositivo de visualização. Porém ainda nenhum foi idealizado propositadamente para pequenos e limitados ecrãs, como os dos dispositivos móveis que são caracterizados por uma muito baixa gama dinâmica (*Very Low Dynamic Range* - VLDR).

1.2 Objetivos e contribuições principais

Previendo-se que a adoção do HDR será uma realidade e que estão a surgir máquinas fotográficas com capacidades HDR que permitem obter imagens com elevada gama dinâmica de forma simples, as pessoas terão estas imagens armazenadas nos mais diversos dispositivos. Deste modo, por que não termos a possibilidade de visualizar as fotografias HDR num dispositivo móvel vulgar ou até mesmo no pequeno ecrã da máquina fotográfica para que se tenha uma ideia da imagem HDR produzida? Dado que a visualização direta de imagens HDR em dispositivos móveis ainda não é uma realidade, serão os TMO existentes os mais adequados para essa tarefa, uma vez que não foram criados a pensar em dispositivos com ecrãs de tão reduzida dimensão ou, por outro lado, torna-se necessário adaptá-los ou criar TMO novos?

Os objetivos principais deste trabalho consistiram no estudo da adequação dos TMO existentes aos dispositivos com ecrã pequeno (DEP), analisando se esses TMO permitem uma correta perceção na visualização de imagens HDR em DEP, e na proposta de soluções para a sua melhoria.

De entre as contribuições desta tese destaca-se a realização de experiências psicofísicas que mostraram que os TMO existentes são percecionados de forma diferente quando utilizados para visualização de imagens HDR em dispositivos com ecrã pequeno. Esta conclusão levou-nos a procurar uma solução que permita manter e perceber as características principais de uma imagem HDR quando visualizada em DEP. Outra contribuição deste trabalho foi a proposta de um novo TMO híbrido para visualizar imagens HDR em DEP e experiências psicofísicas demonstrativas do real valor dessa nova solução. Finalmente, construiu-se ainda um protótipo funcional, no entanto, ainda pouco eficiente para realização de testes diretamente em DEP.

1.3 Organização da tese

Este documento está estruturado pelos seguintes capítulos:

- **Capítulo 1 – Introdução:** é o atual capítulo e contextualiza a problemática, motivação e identifica os objetivos e principais contribuições desta tese.
- **Capítulo 2 – *High Dynamic Range*:** contém a descrição sobre a temática principal que serve de base à investigação contida neste trabalho, nomeadamente, o funcionamento e as características do sistema visual humano; o conceito de imagem HDR, desde a sua aquisição, armazenamento e visualização; a descrição dos diversos tipos de dispositivos de visualização e ainda a classificação e a caracterização de alguns dos principais TMO desenvolvidos nas duas últimas décadas.
- **Capítulo 3 – Avaliação de *Tone Mapping Operators*:** indicação de alguns cuidados a ter aquando da conceção de experiências psicofísicas para que estejam corretas, levando a uma boa aceitação científica. É ainda efetuada a descrição de diversas experiências psicofísicas realizadas por outros autores, com o objetivo de identificar pontos fracos que se devem evitar mas, principalmente, aproveitar os aspetos positivos dessas conceções.
- **Capítulo 4 – Avaliação do Desempenho de *Tone Mapping Operators* em Dispositivos com Ecrã Pequeno:** este capítulo apresenta o grande contributo deste

trabalho onde, através da realização de experiências psicofísicas, mostramos que a maneira como percebemos a visualização de imagens HDR mapeadas em dispositivos com ecrã pequeno é diferente da visualização em ecrãs tradicionais de maiores dimensões. Desta forma, conclui-se que os DEP necessitam TMO apropriados, para que melhor se percebam as imagens HDR neles visualizadas.

- **Capítulo 5 – Proposta de um *Tone Mapping Operator* para Dispositivos com Ecrã Pequeno:** descreve a metodologia de investigação utilizada para o desenvolvimento de um novo TMO que produza melhores resultados na visualização de imagens HDR em DEP. Conclui com a nossa proposta final desse novo TMO.
- **Capítulo 6 – Avaliação do *Tone Mapping Operator* Proposto:** avalia o TMO proposto através de experiências psicofísicas, permitindo concluir que este novo algoritmo é, de facto, mais apropriado à visualização de imagens HDR em DEP comparativamente aos TMO existentes. O capítulo termina descrevendo o desenvolvimento de um protótipo do novo TMO funcionando diretamente em DEP.
- **Capítulo 7 – Conclusões:** este é o capítulo final que resume os resultados e as contribuições obtidas neste trabalho e sugere ainda o trabalho futuro.

2. High Dynamic Range

Neste capítulo são abordadas diversas temáticas relacionadas com HDR (*High Dynamic Range*), descrevendo o seu vasto conceito, as características do Sistema Visual Humano, passando pela aquisição e armazenamento de imagens HDR e do *software* existente, até ao estudo das características dos dispositivos de visualização.

2.1 Sistema visual humano

O Sistema Visual Humano (SVH) é composto por uma rede de sensores existentes nos olhos que são sensíveis à luz. Estes sensores enviam sinais ao cérebro que os processa resultando no fenómeno da visão que são luzes e cores.

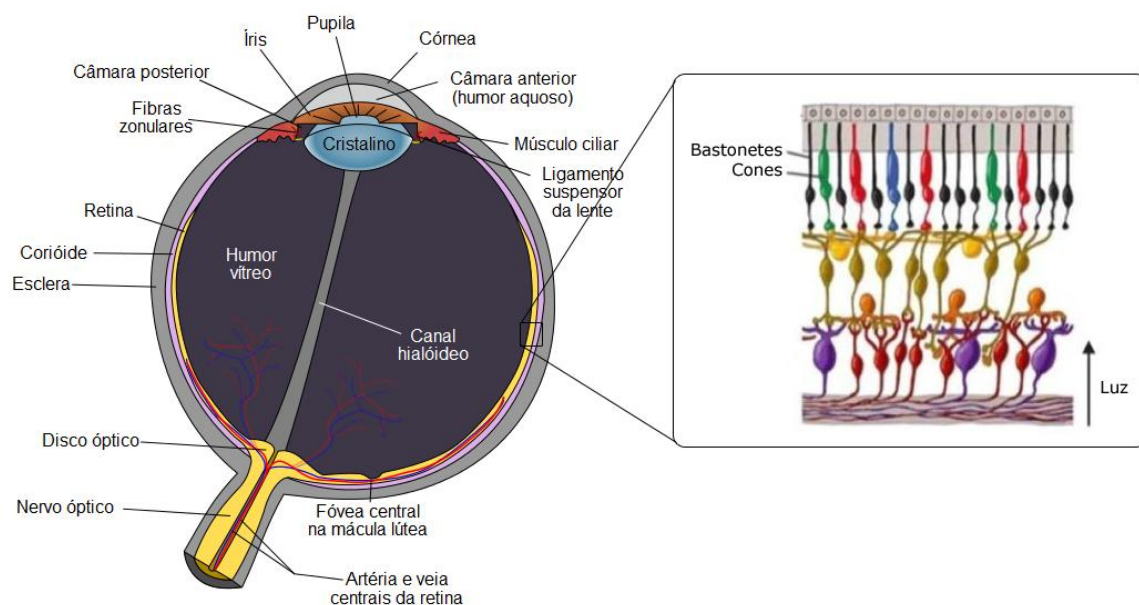


Figura 2.1 Constituição do olho humano (imagem adaptada de [Wikipedia'12g] e de [Rosa'12]).

A luz passa da córnea até ao cristalino através da pupila que é uma abertura que dilata ou contrai de acordo com a intensidade da luz através da ação da íris. A imagem invertida é depois formada na retina situada na parte de trás do olho. A retina é altamente sensível à luz,

sendo a sua superfície composta por fotorreceptores - os cones e os bastonetes (Figura 2.1). Os bastonetes, espalhados ao redor da retina, não são muito sensíveis às diferenças de cores, registrando essencialmente informações monocromáticas, sendo muito úteis para detecção de movimento e visualização em ambientes com baixa luminosidade. Os cones são sensíveis à cor e situam-se mais ao centro da retina, numa região chamada fóvea. Existem três tipos de cones diferenciando-se pelas distintas faixas de cor de cada um – vermelho, verde e azul. Assim, é importante perceber que o SVH é sensível aos comprimentos de onda vermelho, verde e azul, provenientes da luz e, por isso, com diferentes intensidades de luz vermelha, verde e azul conseguimos perceber a visualização das diversas cores. Daqui se entende a razão de os dispositivos de visualização se basearem na mistura destas 3 cores para simular grande parte do espectro visual percebido pela visão humana.

O SVH é caracterizado pelo processo de adaptação que nos permite perceber intensidades de luz muito pequenas, ativando os bastonetes (visão escotópica), e muito grandes, ativando os cones (visão fotópica). Quando ambos cones e bastonetes estão ativos designamos por visão mesópica. Este processo de adaptação não é instantâneo, embora a adaptação à claridade seja de apenas alguns segundos, a adaptação ao escuro pode demorar vários minutos.

A luz visível pelo SVH é uma forma de energia radiante que viaja pelo espaço. Até atingir os olhos essa energia interage com materiais podendo ser refletida, transmitida, absorvida ou refratada. A intensidade de luz, que é definida como radiação eletromagnética, pode ser medida através dos conceitos de fotometria e radiometria [Cohen'95].

A radiometria mede a radiação eletromagnética entre a gama de frequência 3×10^{11} e 3×10^{16} Hz. Esta gama corresponde aos comprimentos de onda que variam entre os 0,01 e os 1000 micrómetros (μm) e inclui regiões chamadas, vulgarmente, como ultravioleta, visível e infravermelho [Palmer'13]. Uma unidade tipicamente utilizada é watts/m^2 .

A fotometria restringe-se apenas à radiação eletromagnética detetável (luz visível) pelo SVH abrangendo a gama entre os 360 e os 830 nanómetros ($1000 \text{ nm} = 1 \mu\text{m}$) [Palmer'13]. Uma unidade de medição típica são as candelas.

Assim, enquanto a radiometria tem como objetivo a medição da radiação eletromagnética, a fotometria dedica-se à medição da luz visível, tal como ela é percebida pelo SVH, dado o olho

humano responder de forma diferente aos diferentes comprimentos de onda do espectro eletromagnético.

As principais medidas radiométricas são[Banterie'11]:

Energia radiante (Ω_e): unidade básica para a luz e é medida em *joules* (J).

Poder radiante ($P_e = \frac{\Omega_e}{dt}$): quantidade de energia que flui por unidade de tempo e é medida em *watts* ($W = J \times s^{-1}$).

Intensidade radiante $I_e = \frac{dP_e}{d\omega}$: quantidade de poder radiante por unidade de direção e é medida em *watts* por esterradiano ($W \times sr^{-1}$).

Irradiância ($E_e = \frac{dP_e}{dA_e}$): quantidade de poder radiante por unidade de área de todas as direções do hemisfério num ponto e é medida em *watts* por metro quadrado ($W \times m^{-2}$).

Radiância ($L_e = \frac{d^2P_e}{dA_e \cos\theta d\omega}$): quantidade de poder radiante chegando ou saindo de ponto numa dada direção e é medida em *watts* por esterradiano por metro quadrado ($W \times sr^{-1} \times m^{-2}$).

As principais medidas fotométricas são[Banterie'11]:

Poder luminoso (P_v): é a energia radiante ponderada e é medida em *lumens* (lm) que é uma medida derivada da candela ($lm = cd \times sr$).

Energia luminosa (Q_v): análoga à energia radiante e é medida em *lumens* por segundo ($lm \times s^{-1}$).

Intensidade luminosa (I_v): é o poder luminoso por direção e é medido em *candelas* (cd) que é equivalente a $lm \times sr^{-1}$.

Iluminância (E_v): análoga à irradiância e é medida em *lux* que é equivalente a $lm \times m^{-2}$.

Luminância (L_v): é a radiância ponderada e é medida em $cd \times m^{-2}$ que é equivalente a $lm \times m^{-2} \times sr^{-1}$.

Tipicamente os algoritmos de mapeamento de tons descritos na secção 2.4 utilizam medidas fotométricas, enquanto os algoritmos de iluminação global utilizam medidas radiométricas.

A expressão de Debevec no SIGGRAPH 2006, «*O mundo real é high dynamic range*», significa que o mundo real apresenta ao nosso sistema visual um vasto conjunto de cores e intensidades, desde a brilhante luz solar até à fraca luz noturna. Os nossos olhos lidam com esta vasta gama de intensidades através do processo de adaptação descrito anteriormente, mudando, assim, as suas sensibilidades conforme o nível de iluminação que lhes é apresentado. Esta adaptação é altamente localizada permitindo-nos ver detalhes num ambiente com elevada gama dinâmica, tanto em zonas escuras como em zonas claras [Ledda'05].

O Sistema Visual Humano é, então, capaz de se adaptar a condições de iluminação extremas que, como foi mencionado, pode variar desde a fraca luz noturna (10^{-3} cd/m²), passando pela luz do luar (10^{-1} cd/m²) e pela luz interior (10^2 cd/m²) até à brilhante luz solar (10^5 cd/m²), fazendo um total de cerca de 14 ordens de magnitude. No entanto, o SVH apenas consegue perceber, simultaneamente, entre 4 a 5 ordens de magnitude adaptando-se às condições de iluminação presentes na cena como ilustrado na Figura 2.2 [Ferwerda'01].

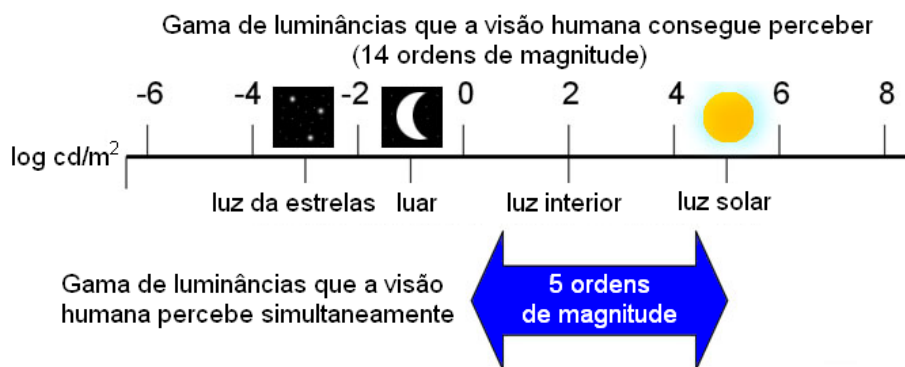


Figura 2.2 Ordens de magnitude das intensidades percebidas pelo SVH (imagem adaptada de [Richards'05]).

Para se utilizar cores em aplicações é necessário representá-las sob a forma numérica – ciência chamada colorimetria. A autoridade responsável pela colorimetria é a Commission International de l’Eclairage (CIE), instituto internacional que define os *standards* e os procedimentos sobre a utilização de cores em aplicações de colorimetria.

A sensação de cor na colorimetria é descrita por três valores chamados *tristimulus values* [Hunt'84]. Em 1931, a CIE criou um *standard* baseado em três cores primárias

cuidadosamente escolhidas X, Y e Z. Apesar de não corresponderem a nenhuma cor real, estas cores têm a propriedade de qualquer cor real poder ser representada como uma combinação linear $xX+yY+zZ$, onde $x+y+z=1$ e x, y e z são valores não-negativos. Ao plano $x+y+z=1$ no espaço XYZ chama-se diagrama de cromaticidade CIE (

Figura 2.3) e tem a forma de uma ferradura.

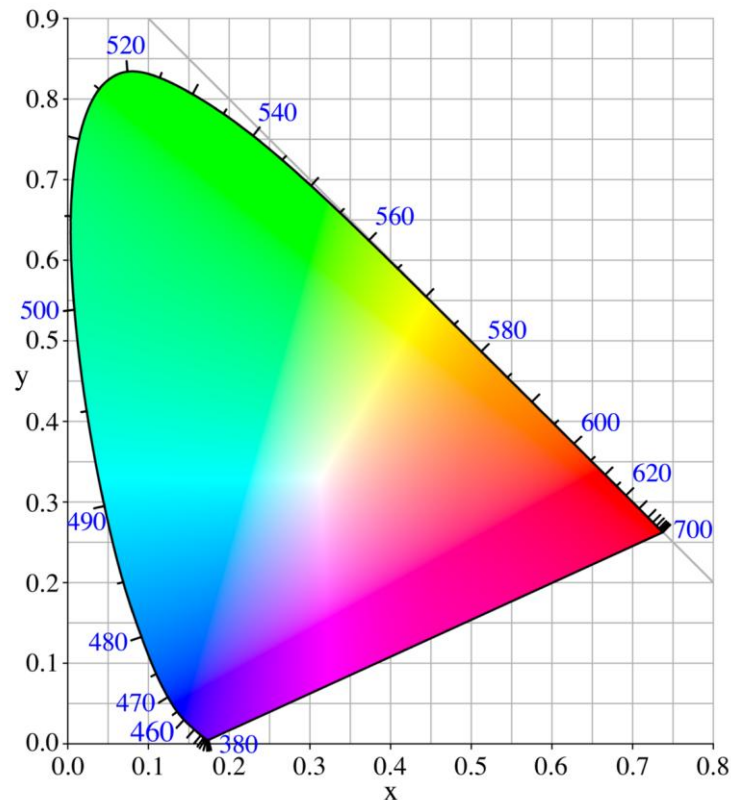


Figura 2.3 Diagrama de cromaticidade CIE (imagem original [Wikipedia'12b]).

O diagrama cobre todas as cores visíveis pelo SVH e o ponto $w=(0.31, 0.316)$ é conhecido como o iluminante branco. Este diagrama fornece assim um *standard* para a descrição de cores. Dada uma amostra de cor, é possível calcular a sua coordenada (x, y) no diagrama CIE, e o contrário também é válido, dada uma coordenada CIE de uma cor, é possível gerar a amostra dessa cor. A gama de cores de um dispositivo é a gama que esse dispositivo consegue mostrar e pode também ser calculada com o diagrama CIE. Por exemplo, um ecrã CRT consegue mostrar combinações de vermelho, verde e azul, mas quais são as cores contidas nessas combinações? Primeiro é necessário identificar as localizações das três cores primárias, que são vermelho $(0.628, 0.33)$, verde $(0.285, 0.59)$ e azul $(0.15, 0.06)$. Depois, basta ligar esses pontos com segmentos de reta, sendo a gama de cores de um ecrã CRT todas

as cores contidas no triângulo resultante. Cada uma dessas cores pode ser expressa como uma combinação de vermelho, verde e azul com coeficientes não-negativos. Este aspeto torna-se interessante porque nenhuma combinação de 3 cores, sobre ou dentro da ferradura pode servir de primários ideais de forma a cobrir todo o espectro. Assim, quaisquer que sejam os 3 primários escolhidos haverá sempre cores que não poderão ser representadas.

2.2 Imagem HDR

As técnicas de HDR foram desenvolvidas originalmente tendo em vista a geração de imagens por computador. Mais tarde, conceberam-se métodos para a produção de imagens HDR a partir de um conjunto de fotografias tiradas com diferentes tempos de exposição, permitindo obter imagens do mundo real com elevadas gamas dinâmicas. Posteriormente houve a necessidade de armazenar esta vasta informação em ficheiros, pelo que foi necessário desenvolver novos formatos (secção 2.2.1). Para lidar com este novo tipo de dados foi desenvolvido *software* apropriado, como os descritos em 0.

2.2.1 Aquisição

Como foi referido atrás, originalmente, as técnicas de HDR foram desenvolvidas para a geração de imagens por computador. Somente mais tarde é que se conceberam métodos para a captura de imagens HDR do mundo real a partir de um conjunto de fotografias tiradas com diferentes tempos de exposição.

Imagens HDR geradas por computador

Gregory Ward Larson é considerado o pioneiro na utilização de técnicas com alta gama dinâmica através do seu *software* RADIANCE [Larson'94] para a geração de imagens por computador. Também é dele um importante contributo para o armazenamento de imagens HDR, como veremos adiante.

RADIANCE é um conjunto de programas que utilizam *raytracing* para análise e visualização de iluminação. Ficheiros de entrada especificam a geometria da cena, materiais, tempo, luz, data e condições do céu (para cálculos sobre a luz do dia). Os valores calculados incluem a radiância espectral (luminância + cor), irradiância (iluminância + cor) e índices de brilho. Os

resultados da simulação podem ser visualizados como imagens coloridas (ver Figura 2.4), valores numéricos ou contornos de desenho.



Figura 2.4 Exemplo de uma imagem criada com o RADIANCE (imagem original [Graeme Watt'12]).

A vantagem principal do RADIANCE sobre as ferramentas para cálculo simples da iluminação e *rendering* é que não existem limitações na geometria e materiais que podem ser simulados. É utilizado por arquitetos e engenheiros para previsão de iluminação, qualidade e aparência visual de espaços inovadores, e por investigadores para avaliação de novas tecnologias de iluminação artificial e natural ou caracterizar ambientes de iluminação existentes no passado (herança cultural) [Gonçalves'09].

Outros programas bem conhecidos, como 3ds Max, o Maya, Blender, LightWave SoftImage XSI, reconhecendo a mais-valia desta tecnologia, desde há alguns anos incorporam também suporte para imagens HDR.

Imagens HDR produzidas por fotografia

Em 1997, Paul Debevec apresentou um método que permite criar uma imagem com elevada gama dinâmica, a partir de um conjunto de fotografias com diferentes tempos de exposição (ver Figura 2.5), tiradas com uma máquina fotográfica convencional [Debevec'97]. Com efeito, é possível recuperar a função (ou curva) de resposta do equipamento que processou as imagens e, assim, gerar um mapa de radiância com *high dynamic range*, onde o valor de cada *pixel* é proporcional ao valor da radiância real da cena.



Figura 2.5 Em cima, três miniaturas de fotografias tiradas a uma cena com tempos de exposição de -2EV, 0EV e +2EV respetivamente. Em baixo, a imagem HDR obtida.

Uma vez conhecida a função de resposta podemos produzir rapidamente a fotografia HDR de uma cena a partir de algumas exposições diferentes (a maior parte das câmaras digitais tem a função de *auto bracketing* que nos permite tirar consecutivamente fotografias com tempos de exposição diferentes). Através desta múltiplas exposições, cada imagem terá diferentes *pixels* adequadamente expostos, outros sub-expostos e outros sobre-expostos. No entanto, cada *pixel* será corretamente exposto numa ou mais imagens da sequência. É conveniente ignorar os *pixels* muito escuros ou muito claros.

Para mais facilmente se perceber os cálculos envolvidos na criação de uma imagem HDR através de múltiplas fotografias com tempos de exposição diferentes, vamos supor que o dispositivo de captura é perfeitamente linear. Assim, os valores da radiância armazenados em cada imagem capturada, para cada canal de cor, podem ser combinados para recuperar a irradiância E através da seguinte equação

$$E(x) = \frac{\sum_{i=1}^{N_e} \frac{1}{\Delta t_i} w(I_i(x)) I_i(x)}{\sum_{i=1}^{N_e} w(I_i(x))} \quad (1)$$

Onde I_i é a imagem correspondente à i -ésima exposição, Δt_i é o tempo de exposição para I_i , N_e é o número de imagens com diferentes exposições e $w(I_i(x))$ é uma função de peso que remove os *outliers*.

No entanto, as máquinas fotográficas não têm uma resposta linear mas uma função, f , designada por *camera response function* (CRF). Um método simples para calcular a função f foi proposto por Mann e Picard [Mann'95] e consiste encaixar os valores dos *pixels* de exposições diferentes na função fixa $f(x) = ax^\gamma + b$. Mas esta função paramétrica é muito limitada e não suporta grande parte das CRF reais. Debevec e Malik [Debevec'97] propuseram um método simples para recuperação da CRF. Considerando apenas imagens em tons de cinzento para melhor clarificação o valor de cada pixel numa imagem é dado pela aplicação de uma CRF à irradiância escalada pelo tempo de exposição:

$$I(x) = f(E(x)\Delta t_i) \quad (2)$$

Aplicando um logaritmo a ambos os lados obtém-se:

$$\log(f^{-1}(I(x))) = \log E_i(x) + \log \Delta t_i \quad (3)$$

Assumindo que f é uma função monotonicamente crescente e suave, f e E podem ser calculadas minimizando o erro dos mínimos quadrados derivado da equação (3)

$$\mathcal{O} = \sum_{i=1}^{N_e} \sum_{j=1}^M \left(w(I_i(x_j)) \left[g(I_i(x_j)) - \log E(x_j) - \log \Delta t_i \right] \right)^2 + \lambda \sum_{x=T_{min}+1}^{T_{max}-1} (w(x)g''(x))^2 \quad (4)$$

Onde $g=f^{-1}$ é a função inversa da CRF, M é o número de *pixels* utilizados e T_{max} e T_{min} são, respetivamente, os valores inteiros máximo e mínimo de todas as imagens I_i . A segunda parte da equação anterior é um termo suavizante para remoção do ruído, sendo a função w definida por

$$w(x) = \begin{cases} x - T_{min} & \text{se } x \leq \frac{1}{2}(T_{max} + T_{min}) \\ T_{min} - x & \text{se } x > \frac{1}{2}(T_{max} + T_{min}) \end{cases} \quad (5)$$

De notar que apenas se utilizam um subconjunto M de *pixels* dado que se torna computacionalmente pesado avaliar para todos os *pixels*.

Existem outros métodos para a criação de uma imagem HDR através da combinação de múltiplas fotografias com diferentes tempos de exposição. Mitsunaga e Nayar [Mitsunaga'99] melhoraram o algoritmo de Debevec e Malik, e Robertson et al apresentaram ainda outra proposta [Robertson'99, Robertson'03].

Imagens HDR capturadas diretamente por *hardware* HDR

Existem no mercado poucos dispositivos para a captura de imagens *high dynamic range*, sendo ainda bastante caros e, por isso, pouco acessíveis.

Dois dos primeiros sensores com capacidade *high dynamic range* foram a SpheroCamHDR e o HDRC VGAX. O primeiro é um sensor desenvolvido pela SpheronVR e captura imagens esféricas com alta resolução e radiância do mundo real num único passo, podendo armazenar a imagem em vários formatos de ficheiro com *high dynamic range*. Cada *pixel* é armazenado com 32 bits por componente de cor. Em condições normais de iluminação são necessários 5 minutos para toda a operação, desde a configuração até à exposição final.

O segundo sensor, o HDRC VGAX, permite capturar imagens sem saturação. Este dispositivo é capaz de gerar 30 imagens por segundo com uma resolução de 512×256 *pixels*. Na Figura 2.6 são mostrados os dois sensores.

Mais recentemente surgiram aparelhos de captura HDR mais convencionais, ou melhor, aparelhos convencionais com capacidades HDR – a chamada *in-camera HDR capabilities*. De

seguida são enumerados alguns desses aparelhos de uma lista que se está a tornar cada vez mais vasta.



Figura 2.6 A SpheroCam HDR (imagem original [Spheronvr'12]) e o HDRC VGAx (imagem original [Omron'06]).

Com a tecnologia HDR presente na Casio EX-ZR100 (Figura 2.7), cada vez que se pressiona o botão do obturador, na realidade são capturadas várias imagens com diferentes tempos de exposição que são instantaneamente combinadas numa única imagem com uma elevada gama dinâmica. A função da opção HDR-ART utiliza esta tecnologia para criar imagens HDR com efeitos artísticos. O contraste e o nível de saturação de cor são controlados localmente e atinge o tipo de efeitos que costumava ser possível somente através de *software* dedicado. Tudo isto com apenas um toque no botão do obturador.



Figura 2.7 Casio EX-ZR100 (imagem original [Mchugh'11]).

A Pentax K-7 (Figura 2.8) com o seu modo de captura de imagem HDR permite combinar três imagens com distintos tempos de exposição numa única imagem com elevada gama dinâmica. Existem dois modos, HDR1 e HDR2, que se aplicam os efeitos *standard* (“pouco” HDR) e *strong* (HDR ao máximo), respetivamente.



Figura 2.8 Pentax K-7 (imagem original [Digitalcameratracker'10]).

A Nikon com a sua D5100 também permite capturar imagens com elevada gama dinâmica através da escolha adequada de opções no menu (ver Figura 2.9). Um único premir do botão captura duas imagens, sendo a primeira intencionalmente sub-exposta e a segunda sobre-exposta. Essas duas imagens são depois combinadas na própria máquina para produzir uma imagem final com muito maior gama dinâmica.



Figura 2.9 Nikon D5100 com opção HDR e outras subopções no menu da máquina (imagem original [Barnett'11]).

Nem a Apple resistiu às potencialidades da tecnologia HDR dotando o iPhone4 com a opção de tirar fotografias HDR (Figura 2.10). Em cerca de 5 segundos, o iPhone4 transforma 3 imagens com tempos de exposição diferentes numa imagem HDR.

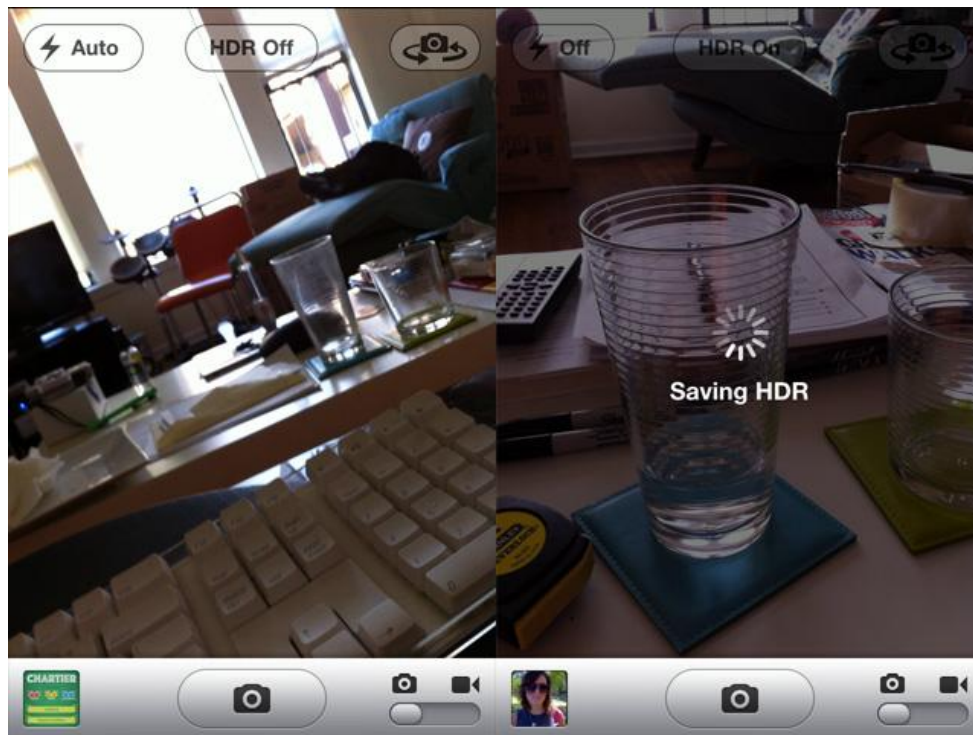


Figura 2.10 iPhone4 com a opção HDR *on/off* (imagem original [Foresman'10]).

2.2.1 Formatos de armazenamento

Em face da necessidade de armazenar imagens com mais informação do que o simples RGB exigia, diversos formatos de codificação de imagens HDR foram aparecendo. Uns desenvolvidos por investigadores académicos, outros por imperativos industriais. Existem muitos formatos que não são HDR completos porque não abrangem a gama total de cores que a visão humana é capaz de distinguir. Serão apresentados, de seguida, alguns dos formatos mais conhecidos para armazenamento de imagens com elevada gama dinâmica, sendo que os dois primeiros, não sendo HDR completos, serão também abordados por razões históricas [Ward'04]. Como veremos, cada um apresenta vantagens e desvantagens consoante os objetivos para os quais foi criado.

Pixar Log Encoding (TIFF)

Investigadores e profissionais da Computação Gráfica estavam, desde há décadas, conscientes das limitações do *standard* da representação de RGB de 24 bits.

Um dos primeiros grupos que chegou a um *standard* de codificação de imagens HDR foi a Computer Graphics Division da Lucasfilm que, em meados dos anos 80, se converteu na Pixar.

A Pixar precisava do formato HDR para preservar as suas imagens de molde a criar os seus próprios filmes, pois uma película de filme é capaz de representar uma gama dinâmica muito melhor do que um monitor convencional. A solução da Pixar assentou a sua implementação numa codificação logarítmica que foi realizada por Loren Carpenter como um *codec* dentro da biblioteca TIFF.

Em cada um dos três canais de cores são utilizados 11 bits (em vez dos tradicionais 8 bits do RGB), codificados através de logaritmos, fazendo um total de 33 bits por *pixel*.

Com este formato, a Pixar conseguiu obter uma gama dinâmica de aproximadamente 3.6 ordens de magnitude (3600:1) com incrementos de 0.4% entre cada valor de luminância (o incremento de 1% de luminância é o valor visível ao olho humano – *threshold* da luminância).

A gama dinâmica tem uma ordem de magnitude de 3.6, valor aquém do limite para trabalhar com HDR, visto que o olho humano consegue ver uma magnitude na ordem de 4.

Este formato é pouco utilizado em Computação Gráfica devido à falta de documentação e artigos sobre o mesmo, estando restrito apenas ao código fonte disponível na biblioteca TIFF.

Randiance RRGBE Encoding (HDR)

Greg Ward, em 1985, aquando do início do desenvolvimento do seu *software* RADIANCE, criou o formato de imagem RRGBE. Este formato surgiu da necessidade do sistema ter sido preparado para calcular quantidades fotométricas, não fazendo sentido descartar informação quando se escrevia o *output* para uma imagem. O formato RRGBE assenta numa representação

de 4 bytes, sendo 1 para a mantissa² do vermelho, 1 para a do verde, 1 para a do azul e 1 para um expoente comum. Este expoente é usado como fator de escala das três mantissas lineares, igual a 2 elevado ao expoente menos 128. Assim, as componentes R, G e B são convertidas das cores da cena (R_w, G_w, B_w) através das seguintes fórmulas:

$$E = \log_2(\max(R_w, G_w, B_w)) + 128 \quad (6)$$

$$R = \frac{256 R_w}{2^{E-128}} \quad G = \frac{256 G_w}{2^{E-128}} \quad B = \frac{256 B_w}{2^{E-128}} \quad (7)$$

Assim, resulta num formato cuja precisão absoluta é cerca de 1%, abrangendo uma gama superior a 76 ordens de magnitude [Larson'94].

Apesar de este formato ser um grande avanço sobre a codificação RGB, quer em termos de precisão, quer em termos de gama dinâmica, denota alguns inconvenientes importantes. A gama dinâmica é muito superior à que um humano consegue perceber. Teria sido preferível se o formato tivesse menor gama mas maior precisão. Outro dos problemas é que a distribuição do erro não é perceptivamente uniforme.

Para resolver alguns destes problemas uma imagem pode ser convertida no espaço de cor XYZ antes da codificação. Este formato é referido como XYZE.

IEEE TIFF 96-bit

Pode-se perguntar a razão da necessidade de tantos formatos de imagem HDR. Por que não optar simplesmente pela codificação do RGB com *floating-points* de 32 bits (do standard IEEE) por cada canal? A causa está no rácio espaço ocupado/qualidade. Por exemplo, uma imagem de tamanho 2048×1536 codificada com *floats* terá um tamanho final de $2048 \times 1536 \times 96/8/1024/1024 = 36$ Mbytes. Mesmo que se compacte, passará para cerca de 32 Mbytes, apenas com um ganho de 11%. Daí a necessidade de outros formatos, em que as diferenças visíveis não são relevantes e o espaço em disco é bastante reduzido.

² A notação científica é uma forma de escrever e representar valores demasiadamente grandes ou demasiadamente pequenos. Esta notação é definida por uma mantissa, uma base e um expoente seguindo o modelo $m \times b^e$ onde m é a mantissa, b a base e e o expoente. No caso descrito a base é 2.

OpenEXR (EXR)

Criado em 2002 pela Industrial Light and Magic sob a forma de código aberto (*open source*), foi utilizado pela empresa internamente para composição e *rendering* de efeitos especiais. É baseado na codificação de 16 bits por canal e foi adotado pela nVidia e ATI nos *frame-buffers* das suas placas gráficas. Este formato não é mais do que a contração lógica do formato anterior, onde os 16 bits se repartem em 1bit para o sinal + 5bits para o expoente + 10bits para a mantissa. O OpenEXR também suporta o *standard* IEEE 32-bit e um outro formato da Pixar de 24-bit.

Esta codificação engloba toda a gama de cores visíveis, uma vez que pode representar valores negativos além dos positivos, atingindo 10.7 ordens de magnitude com uma precisão de cerca de 0.1% [Bogart'03].

Apesar de ser um formato com uma codificação maior por *pixel* (48bits/pixel) do que os descritos a seguir, este é claramente um bom candidato para armazenamento de imagens devido à sua precisão adicional quando se pensa em fazer misturas ou outras operações onde os erros se podem acumular. Além disso, a especificação OpenEXR oferece o benefício adicional de canais extra que podem ser usados para *alpha channels*, *depth channels* ou *spectral channels*.

SGI LogLuv (TIFF)

Já na Silicon Graphics, Inc. (SGI), Gred Ward tentou corrigir os erros cometidos com a sua codificação RGBE anterior. Assim, tentou fazer um novo formato que pudesse ser visto como *standard* para codificação de imagens HDR, resultando num *codec* LogLuv da biblioteca TIFF de Sam Leffler [Leffler'03].

A codificação foi baseada na percepção visual através da separação dos canais de luminância e crominância, aplicando uma codificação logarítmica à luminância [Larson'98].

Atualmente existem 3 variantes desta codificação:

- 10 bits logarítmicos para a luminância e 14 bits para o CIE(u,v), perfazendo um total de 24 bits, criado essencialmente para provar que com apenas 24 bits é possível obter uma melhor codificação quando se tem em conta a percepção visual;

- 16 bits para luminância permitindo valores negativos cobrindo gama dinâmica de 38 ordens de magnitude com precisão de 0.3%;
- 16 bits para luminância e 8 bits para cada coordenada CIE (u,v), perfazendo um total de 32 bits/pixel.

A principal vantagem deste formato comparativamente ao RGBE está no armazenamento da informação de luminância e cor separadamente, tornando estes valores diretamente disponíveis para aplicações como *tone mapping* ou manipulação da cor.

JPEG-HDR

Greg Ward, não satisfeito com os formatos existentes para armazenamento de imagens HDR, juntou-se a Maryann Simmons para desenvolver um novo formato com reconhecidas vantagens: compressão com perdas para tornar menor o tamanho e compatível com um formato LDR bastante utilizado atualmente. Assim, desenvolveram o JPEG-HDR [Ward'05] que mais não é do que um JPEG com duas imagens: uma é a imagem mapeada com um TMO que possibilita a visualização sob a forma de um JPEG normal e outra é uma imagem contendo informação extra para reconstrução e representação de uma gama muito mais elevada. O *software* convencional apenas lida com a imagem mapeada descartando a informação extra.

A Tabela 2-1 apresenta a comparação entre os diversos formatos descritos anteriormente e na Figura 2.11 ilustra o rácio custo/benefício de cada um.

Codificação	HDR completo	Bits/pixel	Gama dinâmica	Precisão
sRGB	Não	24	1.6	Variável
Pixar Log	Não	33	3.6	0.4%
Radiance RGBE	Não	32	76	1%
LogLuv 24	Sim	24	4.8	1.1%
LogLuv 32	Sim	32	38	0.3%
OpenEXP	Sim	48	10.7	0.1%
JPEG-HDR	Pode	1-8	9.5	Variável

Tabela 2-1 Comparação entre os vários formatos para codificação HDR.

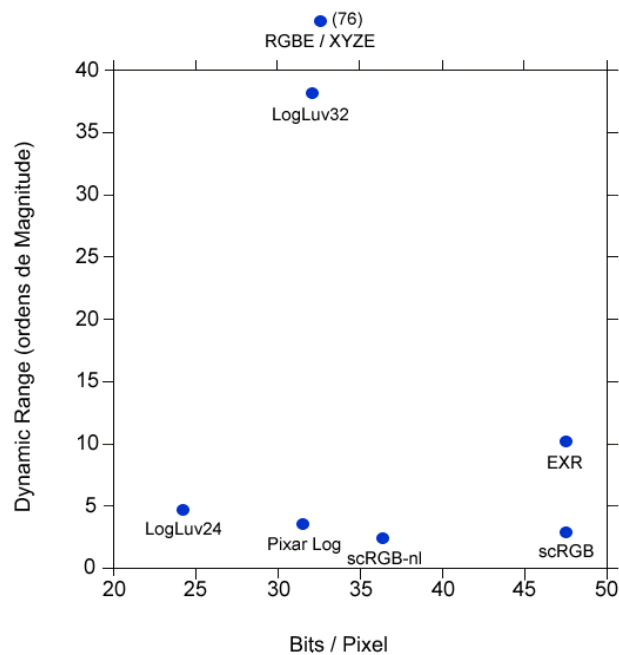


Figura 2.11 Posicionamento custo/benefício dos diversos formatos (original [Ward'04]).

2.2.2 Software

Por forma a construir, armazenar, manipular e mapear imagens HDR foram desenvolvidas diversas aplicações. Assim, surgiram aplicações que permitem criar imagens HDR a partir de várias fotografias com tempos de exposição diferentes; fazer corte, redimensionamento ou rotações de imagens HDR; fazer conversão entre formatos, entre outras funcionalidades. Seguidamente são apresentadas algumas das aplicações pioneiras e que se tornaram não só robustas mas também bastante populares.

Radiance

Radiance é um pacote de *physically based rendering* para geração de imagens por computador desenvolvido por Greg Ward com um potente motor de *rendering*. É mundialmente utilizado para análise de iluminação e pode gerar valores precisos para radiância/luminância ($W/sr.m^2$, cd/m^2) e irradiância/iluminância (W/m , Lux). As imagens geradas são codificadas no já mencionado formato RGBE (extensão *hdr*). Tornou-se código aberto em 2002.

LuminanceHDR

Trata-se de uma aplicação de código aberto com um interface amigável que permite trabalhar imagens HDR. Suporta os formatos HDR OpenEXR (exr), Radiance RGBE (hdr), formatos TIFF: 16bit, 32bit (*float*) e LogLuv (tiff), RAW e o formato nativo PFS. Além destes, suporta ainda os formatos usuais JPEG, PNG, PPM, PBM, TIFF (8 bit).

As principais funcionalidades são a criação de imagens HDR a partir de um conjunto de imagens da mesma cena mas com tempos de exposição diferentes; gravar imagens HDR; fazer rotações, mudanças de escala e recorte em imagens HDR; mapear imagens HDR com um dos diversos algoritmos (TMO) disponibilizados e ainda copiar os dados *exif* entre conjuntos de imagens.

Photomatix Pro

Essencialmente o Photomatix é uma aplicação que permite gerar uma imagem HDR a partir de um conjunto de imagens. É uma ferramenta muito utilizada por fotógrafos pois permite um posterior processamento das imagens HDR para obter imagens artísticas de forma simples e rápida.

EasyHDR Pro

É também uma ferramenta que permite gerar imagens HDR. Aceita os formatos JPEG, 24/48-bit TIFF e qualquer RAW e ainda os formatos HDR Radiance RGBE (*.hdr) e 96-bit TIFF. Tem como funcionalidades a aplicação de um operador de mapeamento de tons global e dois locais, efetuar pós-processamento através de filtros, ajuste de cor, transformações (rotação, espelho, recorte) entre outras.

HDR Shop

É uma aplicação de processamento de imagem que permite interativamente criar, ver e manipular imagens HDR. Consegue ainda efetuar operações de processamento de imagem como aplicação de filtros numa ou várias imagens com precisão *floating-point*. O *software* suporta *scripting* e é extensível através do sistema de *plugins*.

Photoshop

Este bem conhecido *software* da Adobe, desde a sua versão CS2, também lida com tecnologia HDR permitindo criar e manipular imagens HDR. Aceita ainda *plugins* como o Photomatix Pro.

2.3 Dispositivos de visualização

Nesta secção serão explicitados os diferentes tipos de dispositivos de visualização, não só os de baixa gama dinâmica (LDR) como os nativos de elevada gama dinâmica (HDR). Considerando que a base do trabalho proposto assenta nos dispositivos com ecrã pequeno (*very low dynamic range* - VLDR) será feita, também, uma caracterização deste tipo de aparelhos.

2.3.1 Dispositivos LDR

Diferentes tecnologias foram utilizadas para produção de dispositivos de visualização. As duas que mais comumente se encontram são os tubos de raios catódicos (*Cathode-Ray Tubes* - CRT) e os ecrãs de cristais líquidos (*Liquid Crystal Displays* - LCD). Ultimamente a segunda tem ganho vantagem devido à sua leveza, eficiência energética e *design* compacto, sendo aplicada a relógios digitais, telemóveis, computadores portáteis e qualquer dispositivo com ecrã pequeno. Apesar de ter sido concebida inicialmente para dispositivos pequenos expandiu-se, entretanto, a áreas monopolizadas pelos CRT como os ecrãs de computadores e televisões.

Cathode-Ray Tube (CRT)

Um monitor CRT é um dispositivo bastante simples como ilustra a Figura 2.12. Consiste em sete elementos básicos: canhões de eletrões, grelhas de controlo, placas de aceleração, estruturas para focagem, estruturas de deflexão, revestimento de fósforo e uma máscara de sombra. Os eletrões produzidos por um cátodo aquecido são disparados em intervalos controlados através da grelha de controlo. As placas de aceleração aumentam a velocidade dos feixes de eletrões e as estruturas de focagem servem para afinar esse feixe distorcido. As estruturas de deflexão guiam com precisão os feixes de eletrões para pontos do revestimento de fósforo que, ao serem excitados, emitem luz. Todo o ecrã é varrido rapidamente da

esquerda para a direita e de cima para baixo e a intensidade do feixe é modulada durante o varrimento para que a quantidade de luz varie consoante a posição espacial.

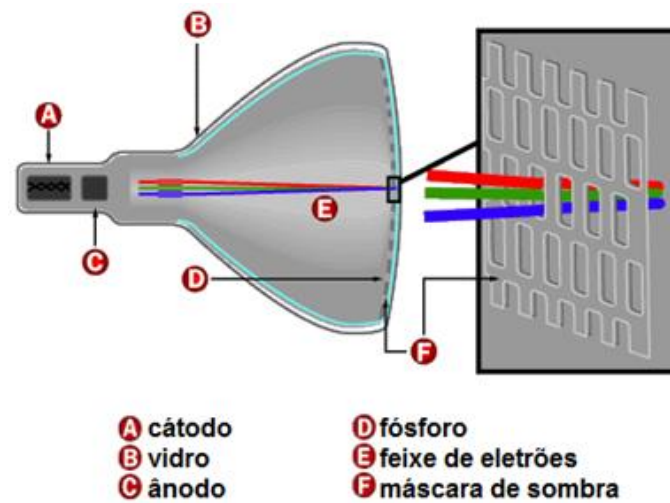


Figura 2.12 Dispositivo CRT (adaptada de [Howstuffworks'12a]).

Os ecrãs a cores contêm três tipos de fósforo entrelaçados: vermelho, verde e azul. São três canhões de elétrons e uma máscara de sombra combinados para que cada feixe ilumine apenas um dos três tipos de fósforo.

Para manter a imagem no ecrã CRT é necessário que o fósforo seja continuamente atingido por elétrons, isto porque a taxa à qual o fósforo desvanece é muito curta.

Liquid Crystal Display (LCD)

Apesar de terem sido descobertos em 1888, os cristais líquidos apenas foram potenciados em 1968 quando investigadores da RCA's David Sarnoff Research Center desenvolveram o primeiro ecrã de cristais líquidos. Desde então, os ecrãs de cristais líquidos (*Liquid Crystal Display - LCD*) revolucionaram o mercado dos dispositivos com ecrã pequeno e a eletrónica portátil oferecendo uma alternativa aos CRT e tornando possível a existência de dispositivos como calculadoras, telemóveis, PDA e computadores portáteis. A realidade é que atualmente os LCD dominam a eletrónica portátil bem como os sistemas de entretenimento doméstico.

Os cristais líquidos podem estar numa de várias fases distintas dependendo da temperatura e da natureza particular da substância. São os cristais líquidos na fase nemática que tornam os LCD possíveis. A característica fundamental dos cristais líquidos é que são afetados por

correntes elétricas. Existe um tipo particular de cristal líquido nemático, chamado nemático torcido (TN), que sendo naturalmente torcido, ao aplicar-se-lhe corrente elétrica, destorce-se vários graus dependendo da voltagem usada. Os LCD utilizam esses tipos de cristais líquidos porque reagem de forma previsível à corrente elétrica possibilitando controlar a passagem de luz [Gurski'05].

Um LCD simples consiste numa célula de cristal líquido, elétrodos e um conjunto de vidros opostamente polarizados. A Figura 2.13 ilustra a estrutura de um LCD simples. Quando os cristais líquidos estão no seu estado original (torcidos) conduzem a luz de forma a passar pelo segundo vidro polarizado. Se pelos cristais líquidos passa corrente elétrica estes destorcem-se e, como os vidros estão opostamente polarizados, a luz é impedida de passar (Figura 2.14).

Para obter ecrãs coloridos é necessário ter um conjunto de 3 células adjacentes, uma para vermelho, outra para verde e outra para azul. Estas 3 células são colocadas de forma a que pareçam um único *pixel* retangular. A luz utilizada é tipicamente uma lâmpada fluorescente.

Dispositivos de visualização alternativos

A tecnologia utilizada nos ecrãs deverá continuar a evoluir de molde a acompanhar a progressão das outras áreas tecnológicas. Esta evolução produzirá dispositivos mais rápidos, mais brilhantes e com melhor eficiência energética.

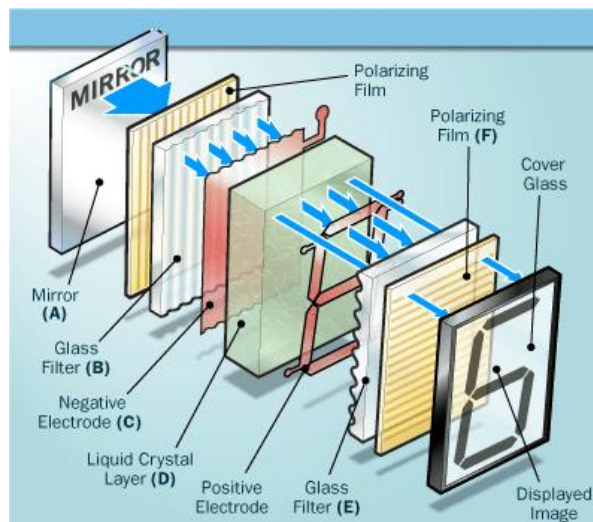


Figura 2.13 Ecrã de cristais líquidos – LCD (imagem original [Howstuffworks'12b]).

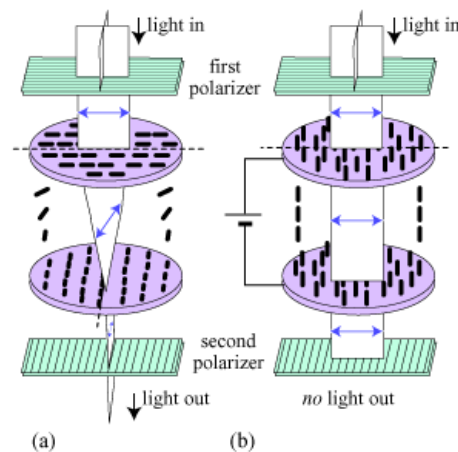


Figura 2.14 Estrutura de um *pixel* de um LCD (a) deixando passar luz (b) a luz não passa (imagem original [Energyefficiency'12]).

As tecnologias mais promissoras para atingir esses objetivos são os OLED (*Organic Light Emitting Diodes*), a tecnologia DLP (*Digital Light Processing*), os plasmas, os FED (*Field Emission Displays*) e os *ePapers*.

Os OLED e as suas variantes *Polymer Light Emitting Diodes* (PLED), *Small Molecule Light Emitting Diodes* (SMOLEDS) e a tecnologia dos dendrímeros³, permitem obter dispositivos mais brilhantes, com maior nível de contraste, melhor eficiência energética e maiores ângulos de visão.

A tecnologia DLP utiliza um semiconductor ótico desenvolvido em 1987 pelo Dr. Larry Hornbeck. Essencialmente consiste num interruptor de luz muito preciso que pode modular a luz através de 2 milhões de espelhos microscópicos agrupados numa matriz retangular. Combinados com um sinal gráfico ou de vídeo, uma fonte de luz e lentes de projeção, os espelhos do DLP podem refletir uma imagem completa numa superfície.

Os Plasmas ou *Plasma Display Panels* (PDP) são caracterizados por um ecrã muito fino e de grandes dimensões. São capazes de gerar uma excelente qualidade de imagem em grande escala sendo adequados para televisão de alta definição (HDTV).

Muito parecidos com os CRT, os FED (*Field Emission Displays*) contêm não um mas milhões de pequenos canhões de eletrões. Dessa forma, obtém-se um ecrã que pode ser tão fino como um LCD, pode reproduzir com a qualidade de um CRT e ser tão grande como um plasma.

³ Dendrímeros são moléculas construídas através de crescimento radial, às camadas, de forma repetitiva, a partir de um núcleo. Também conhecidos por moléculas em cascata ou arboróis.

Infelizmente, a fiabilidade, a longevidade e o custo de construção tornam essa tecnologia comercialmente pouco viável.

Os *Electronic Ink Displays* ou *ePapers* são matrizes ativas que utilizam “tinta eletrónica”. Tendo sido apontada como a sucessora do papel, esta tecnologia utiliza pigmentos semelhantes à tinta das impressoras, permitindo ver conteúdo em plena luz do dia. Necessitando apenas uma milésima parte da energia de um LCD, esta tecnologia pode preservar o conteúdo mesmo quando desligado e não necessita *backlight*.

Comparativo

Além das tecnologias descritas atrás existem medidas comuns que permitem comparar os diversos dispositivos de visualização existentes como, dimensão, resolução do ecrã, brilho, ângulo de visão, tempo de resposta, taxa de refrescamento, entre outras.

Dimensão é medida em polegadas correspondendo à distância entre os cantos opostos do ecrã (diagonal);

Resolução do ecrã indica o número de *pixels* distintos que podem ser visualizados em cada dimensão do ecrã (largura × altura);

Brilho e o rácio do contraste estão relacionados. O brilho corresponde à luminância sendo o rácio do contraste o quociente entre a luminância da cor branca e a luminância da cor preta (gama dinâmica);

Ângulo de visão refere-se ao ângulo máximo do qual se consegue ver de forma visualmente aceitável o conteúdo presente no ecrã. Num ecrã plano esta medida pode atingir o máximo de 180°;

Tempo de resposta refere-se ao tempo que um *pixel* demora a passar de um valor para outro e retornar ao primeiro. É medido em milissegundos e quanto menor for, mais rápido são as transições significando menos artefactos;

Taxa de refrescamento indica quantas vezes por segundo um ecrã consegue (re)desenhar dados. É medida em Hz.

A Tabela 2-2 mostra um comparativo dos valores usuais nos dispositivos de visualização atuais e, como se pode aferir, têm ainda uma gama dinâmica bastante limitada para reprodução do espectro que a visão humana consegue perceber. Caso a audiência seja composta por várias pessoas, o ângulo de visão torna-se um aspeto muito importante, visto que alguma tecnologia como LCD e DLP perdem muitas características quando o ângulo de visão aumenta: como contraste, brilho, fidelidade da cor, entre outras.

Tecnologia/Característica	CRT	LCD	OLED	DLP	PDP
Tamanho (")	7-40	2,5-65	2,5-40	< 92	30-150
Resolução máx. (px)	2560 × 1600	3840 × 2400	1920 × 1080	4096 × 2160	1920 × 1080
Brilho máx. (cd/m ²)	100-200	250-500	120-600	400-800	700-1.000
Rácio contraste	15.000:1	1.000:1	1.000.000:1	4.000:1	10.000:1
Ângulo de visão (°)	180	< 180	180	< LCD	180
Tempo de resposta (ms)	< 1	2-16	0,01	< 1	1
Taxa de refrescamento (Hz)	50-200	50-600	60-480	60-120	72-600

Tabela 2-2 Comparação da gama dinâmica dos diversos tipos de dispositivos de visualização ([Soneira'06a, Soneira'06b, Wikipedia'12a, Wikipedia'12c, Wikipedia'12d, Wikipedia'12e, Wikipedia'12f]).

2.3.2 Dispositivos HDR nativos

Algumas empresas mostraram interesse no desenvolvimento de dispositivos com capacidade de representar uma maior gama de cores e intensidades. Em 2005 a BrightSide Technologies Inc desenvolveu o ecrã DR-37P com tecnologia IMLED-LCD (*Individually Modulated LED*), onde a luminância máxima é cerca de 3.000cd/m² e a mínima de 0,015cd/m². A tão conhecida na área do som, Dolby Laboratories Inc., antevendo uma enorme expansão das tecnologias HDR, adquiriu em 2007 a BrightSide Technologies Inc. A partir daí, a tecnologia foi licenciada à companhia italiana SIM2 que, em 2009, anunciou o primeiro ecrã HDR comercial – o Solar 47 (Figura 2.15).

A própria Dolby apresentou, em 2010, o ecrã PRM-4200 (Figura 2.16) que foi 100% fabricado pela Dolby na sua Image Division que emprega atualmente tantas pessoas como o seu tradicional departamento de som.

Infelizmente estes dispositivos ainda estão longe do alcance de um utilizador comum devido ao seu elevado preço, além de que a sua gama dinâmica, apesar de superior, não abrange a completa gama que a visão humana consegue perceber. Assim, torna-se necessário recorrer a algoritmos especiais que mantenham os detalhes de uma imagem HDR quando a transformam

numa imagem LDR para permitir a visualização nos dispositivos convencionais. Uma abordagem a esses algoritmos é feita na secção 2.4.



Figura 2.15 Ecrã HDR Solar 47 desenvolvido em 2009 pela SIM2 (imagem original [Boylan'08]).



Figura 2.16 Ecrã HDR desenvolvido pela Dolby – o PRM-4200 (imagem original [Dolby'10]).

2.3.3 Dispositivos com ecrã pequeno (VLDR)

O número de dispositivos com ecrã pequeno como os telemóveis, *smartphones* e os mais recentes *tablets* continua a aumentar em todo o mundo. Este crescimento tem sido acompanhado pela evolução da conectividade, uma vez que as tarifas de internet estão cada vez mais acessíveis e com largura de banda aceitável. Este aspeto permite a partilha de conteúdos multimédia mais diversificados [Capin'08, Chittaro'06, Lindsay'08] num vasto mercado que só agora começa a ser explorado.

No entanto, sabe-se que estes dispositivos móveis têm limitações de *hardware* que podem prejudicar tanto as aplicações de suporte como a captura ou reprodução de conteúdos multimédia. À medida que o *software* e *hardware* dos dispositivos móveis evoluem rapidamente, aproximando-se a pequenos computadores de bolso, também o conteúdo multimédia tende a ser de melhor qualidade. É neste contexto que entra em cena o conteúdo HDR.

Atualmente, as maiores limitações dos DEP relativamente ao *hardware* gráfico são a fonte de energia, poder de processamento, tamanho físico do ecrã, características gráficas, memória limitada, suporte a operações em vírgula flutuante e espaço de armazenamento [Bilcu'08, Capin'08, Chittaro'06, Choi'11]. Em seguida são tecidas considerações sobre algumas das características mencionadas.

Fonte de energia

Sendo a energia dos dispositivos móveis proveniente essencialmente de bateria, tentar visualizar conteúdos multimédia de elevada qualidade pode tornar-se um grande problema.

Poder de processamento

Apesar do crescimento contínuo do poder de processamento dos dispositivos móveis, na verdade, este é ainda muito limitado. Por exemplo, muitos dos processadores atuais não suportam operações em vírgula flutuante [Bilcu'08, Choi'11]. Alguns dos recentes dispositivos móveis de topo já tem uma unidade dedicada para processamento gráfico, que alivia o CPU para outras operações, melhora o desempenho e reduz o consumo de energia, pois está mais otimizado.

Tamanho do ecrã e características gráficas

Os dispositivos móveis são, na sua maioria, dispositivos de mão ou de bolso com ecrãs pequenos, com exceção dos *tablets* que os têm ligeiramente maiores. O detalhe e a qualidade de conteúdos multimédia que podem ser apresentados nesses pequenos ecrãs, dotados de menos cores disponíveis e resoluções mais baixas, poderiam por em causa a necessidade de visualizar conteúdos HDR em dispositivos móveis. Todavia, depois de novas tecnologias que estão a surgir nos dispositivos móveis de topo, como a família do ainda dispendioso

AMOLED (*active-matrix* OLED) que não precisam retroiluminação, consomem menos energia e têm uma relação de contraste superior comparativamente ao LCD tradicional, e com melhor resolução como o iPhone 4 com 640×960 (a resolução normal é cerca de 480×800) [Bolton'11], juntamente com a produção crescente de conteúdos HDR, significa que a sua visualização em dispositivos móveis deva ser cuidadosamente estudada [Chittaro'06].

A Tabela 2-3 e a Tabela 2-4 ajudam a perceber melhor as características dos ecrãs de alguns dos *smartphones* e *tablets* atuais, respetivamente.

<i>Smartphone</i> /Característica	Google Nexus One	Samsung Galaxy S	Motorola Droid	Apple iPhone 4
Tecnologia e tamanho (")	OLED 3,7	OLED 4,0	IPS LCD 3,7	IPS LCD 3,5
Resolução (px)	800×480	800×480	854×480	940×640
ppi	252	233	265	326
Profundidade de cor	24 bit	24 bit	24 bit	24 bit
Brilho máx. medido (cd/m^2)	292	365	449	541
Brilho min. medido (cd/m^2)	0,0035	< 0,005	0,31	0,48
Diminuição do brilho (com ângulo de visão 30°)	28% para 116 cd/m^2	28% para 221 cd/m^2	64% para 160 cd/m^2	57% para 235 cd/m^2

Tabela 2-3 Comparação das características dos ecrãs de alguns *smartphones* atuais [Soneira'10]

<i>Tablet</i> /Característica	Apple iPad 2	Motorola Xoom	Asus Transformer	Acer Iconia A500	Samsung Galaxy Tab
Tecnologia e tamanho (")	IPS LCD 9,5	LCD 10,1	IPS LCD 10,1	LCD 10,1	PLS LCD 10,1
Resolução (px)	1024×768	1280×800	1280×800	1280×800	1280×800
ppi	132	149	149	149	149
Profundidade de cor	24 bit	24 bit	18 bit	18 bit	24 bit
Brilho máx. medido (cd/m^2)	410	408	325	342	464
Brilho min. medido (cd/m^2)	0,43	0,35	0,42	0,18	0,51
Diminuição do brilho (com ângulo de visão 30°)	58% para 171 cd/m^2	52% para 196 cd/m^2	58% para 135 cd/m^2	57% para 146 cd/m^2	52% para 224 cd/m^2

Tabela 2-4 Comparação das características dos ecrãs de alguns *tablets* atuais [Soneira'11]

2.4 Tone Mapping Operators

O conceito de operador de *tone mapping* foi introduzido pela primeira vez na área da Computação Gráfica por Tumblin e Rushmeier em 1993 [Tumblin'93]. O objetivo de um operador de *tone mapping* (TMO) é comprimir a gama dinâmica de uma imagem para a gama limitada que um dispositivo físico suporta mas garantindo a semelhança perceptual entre a imagem visualizada no dispositivo e a cena/imagem original (ver Figura 2.17). Nestas últimas décadas, foram propostos diversos TMO, os quais podem ser classificados, de uma forma abrangente, como globais ou locais [Devlin'02]. Geralmente, os globais servem de base a operadores dependentes do tempo, simulando a adaptação da visão humana ao longo do tempo.

Para evitar comparações subconscientes utilizámos imagens diferentes para ilustrar o resultado da utilização de cada um dos TMO descritos.

2.4.1 Operadores globais

Esta classe de algoritmos aplica a mesma transformação a cada *pixel* independentemente da sua posição na imagem.

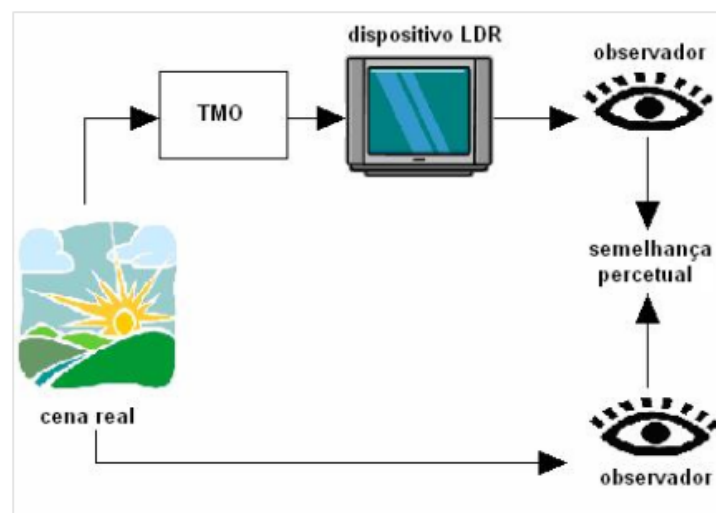


Figura 2.17 Operador de *tone mapping* "ideal".

Uma das principais características dos TMO globais é serem computacionalmente eficientes podendo, muitos deles, serem executados em tempo real. Por este motivo, as aplicações interativas devem considerar este tipo de operadores.

Preservação do brilho [Tumblin'93]

Apesar de já existirem há diversos anos os chamados *tone reproduction methods* em fotografia, impressão e televisão que permitiam preservar as sensações visuais, este é considerado o TMO pioneiro na área da Computação Gráfica. Este TMO tem por base o trabalho sobre medidas de brilho de Stevens and Stevens [Stevens'60], em que afirmam que a relação entre o brilho e a luminância segue leis de potência. Esta relação foi utilizada para desenvolver um multiplicador para que o brilho percebido no mundo real seja também percebido em dispositivos de visualização. Na verdade, este operador existe em duas formas, a original [Tumblin'93] e a revista [Tumblin'99b]. Esta última corrige algumas deficiências, incluindo o facto de o original ser calibrado em *sieverts* que é uma unidade pouco utilizada. Várias imagens da Figura 2.18 mapeadas ilustram como atua este TMO.

Baseado no contraste [Ward'94]

Enquanto o operador anterior tinha como objetivo a preservação do brilho, este algoritmo direciona-se na preservação do contraste. A ideia da preservação do brilho sustenta-se na ideia de que se um objeto parece duas vezes mais brilhante do que outro no mundo real, então o mesmo deve acontecer quando esses objetos são visualizados num ecrã. No entanto, apesar de parecer um raciocínio lógico, a visão humana é muito mais sensível ao contraste do que ao brilho, pelo que, mapear o brilho de forma independente do contraste muitas vezes não irá representar adequadamente o que se vê na realidade.

Assim, utilizando $\Delta L(L_{da})$ é possível relacionar as diferenças das luminâncias visíveis no ecrã com as diferenças das luminâncias da cena:

$$\Delta L(L_{da}) = m \Delta L(L_{wa}) \quad (8)$$

Onde L_{da} é luminância adaptada do ecrã, L_{wa} é a luminância adaptada da cena e $\Delta L(L_{da})$ é a mínima perceção na mudança da luminância em L_{da} .

Baseado no estudo de Blackwell [Blackwell'81] que indica que a *Just Noticeable Difference* (JND) no mundo real pode ser mapeada como uma JND no dispositivo de visualização. Desse estudo deduz-se o seguinte fator de escala:

$$m = \frac{1}{L_{dmax}} \left(\frac{1.219 + \left(\frac{L_{dmax}}{2}\right)^{0.4}}{1.219 + L_{wa}^{0.4}} \right)^{2.5} \quad (9)$$

A Figura 2.19 mostra imagens mapeadas utilizando este operador.



Figura 2.18 Exemplos da aplicação do operador revisto de Tumblin e Rushmeier com fatores de escala de 0.1, 1, 10, 20, segundo a ordem de leitura (imagem original livro HDRI - [Reinhard'05b]).

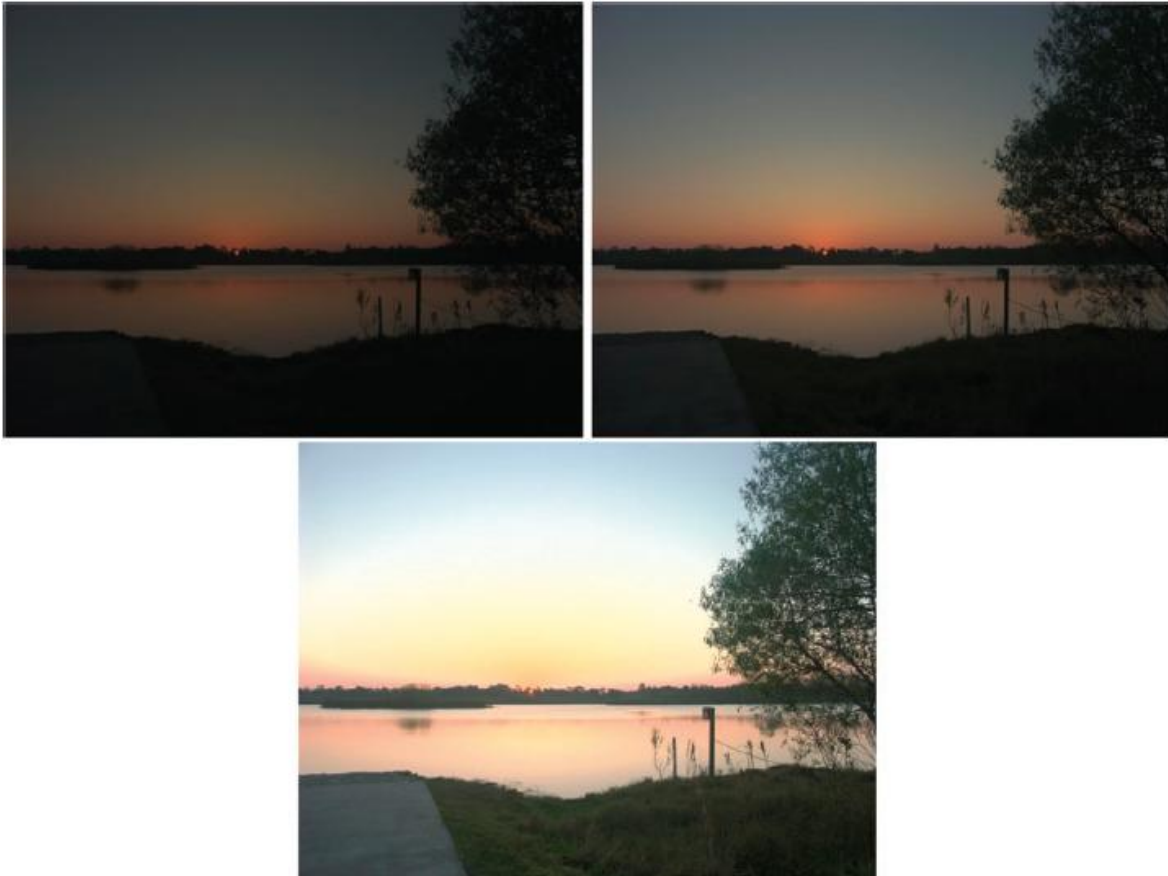


Figura 2.19 Exemplos da aplicação do TMO que Greg Ward desenvolveu em 1994 com fatores de escala de 0.01, 0,1, 1 segundo a ordem de leitura (imagem original livro HDRI - [Reinhard'05b]).

Ajuste do histograma [Ward-Larson'97]

Operador desenvolvido com base no trabalho de Ferwerda descrito mais adiante [Ferwerda'96] e no ajuste iterativo do histograma. Em vez de se focar em preservar o brilho como o operador anteriormente apresentado, este preserva o contraste, explorando o facto das áreas claras deverem ser visualizadas com luminâncias maiores do que as áreas escuras. Este operador simula halos, variações na acuidade visual e sensibilidade à cor. A Figura 2.20 mostra um exemplo de uma imagem mapeada com este TMO.

Cohen01 [Cohen'01]

Neste trabalho os autores atacam o problema da visualização de imagens HDR através do armazenamento e *rendering* de mapas de textura com alta gama dinâmica em tempo real recorrendo a *hardware*. Assim, os mapas de textura HDR são decompostos e armazenados como 2 mapas de textura 8-bits, um representando as intensidades elevadas e outros as

intensidades mais baixas. Na visualização, estes 2 mapas são recombinados por *hardware* permitindo que o nível de exposição da textura seja continuamente e arbitrariamente ajustado em tempo de *rendering*, tendo em conta o valor *gamma* e as restrições do dispositivo de visualização. Exemplos da utilização deste TMO são ilustrados na Figura 2.21.



Figura 2.20 Exemplo da aplicação do operador baseado no ajuste do histograma (imagem original livro HDRI – [Reinhard'05b]).



Figura 2.21 Exemplos da aplicação do algoritmo de Cohen et al. À esquerda, um *snapshot* do visualizador panorâmico desenvolvido utilizando a técnica descrita e, à direita, a simulação de um material colorido através da adição de um mapa ambiente difuso (imagens original [Cohen'01]).

Mapeamento logarítmico [Drago'03b]

Este operador baseia-se num algoritmo onde é feita a compressão logarítmica dos valores da luminância de forma a simular o funcionamento da resposta à luz da visão humana.

É um algoritmo desenvolvido para ser usado em aplicações interativas. Consegue-se um equilíbrio entre a compressão e o detalhe através do ajustamento da base do logaritmo de acordo com o valor de cada *pixel*. Os valores variam entre 2 e 10, possibilitando preservar os detalhes, tanto nas regiões escuras como nas regiões mais claras.

O algoritmo também recorre a uma função de *bias* para compressão da luminância. Este parâmetro orienta a quantidade de contraste que irá estar disponível na imagem mapeada. Valores mais altos originam menor contraste e melhor compressão e valores menores aumentam o contraste. As imagens da Figura 2.23 mostram estas variações.

Adaptativo ao ecrã [Mantiuk'08]

Os autores propõem um operador de mapeamento de tons que minimiza as distorções visíveis no contraste para uma vasta gama de dispositivos de saída, que vão desde visualizadores *ePaper* até aos ecrãs HDR. O operador pesa as distorções no contraste de acordo com a sua visibilidade prevista no modelo do SVH. Essas distorções são minimizadas dado um modelo do ecrã que imponha restrições sobre a solução. A técnica de mapeamento de tons empregue consegue ajustar o conteúdo da imagem ou vídeo para a visibilidade ideal do contraste, tendo em conta a iluminação ambiente e as características do ecrã (Figura 2.22).



Figura 2.22 Aplicação do TMO do Mantiuk et al com valores para o nível de luminância de 0 e 1, respetivamente (imagem original livro HDRI - [Reinhard'05b]).



Figura 2.23 TMO do Drago et al aplicado a uma imagem HDR variando o parâmetro *bias*: 0.6, 0.7, 0.85 e 1 (imagem original livro HDRI - [Reinhard'05b]).

2.4.1 Operadores locais

Os algoritmos locais aplicam transformações distintas a diferentes partes da imagem.

Filtro de suavização [Chiu'93]

Este TMO foi uma das primeiras propostas para operadores locais. Apesar de não ser ótimo, os autores demonstraram que os operadores locais são essenciais para comprimir imagens HDR. O operador surgiu de forma exploratória e é baseado apenas em métodos experimentais não tendo em consideração as características do SVH.

O algoritmo basicamente gera uma imagem de baixa resolução, obtida através de um filtro de suavização, em que o resultado é a média dos *pixels* vizinhos da imagem original. Depois os valores da imagem são interpolados para aumentarem a luminância da imagem original. Computacionalmente é muito dispendioso e cria halos indesejados como pode ser observado na Figura 2.24.

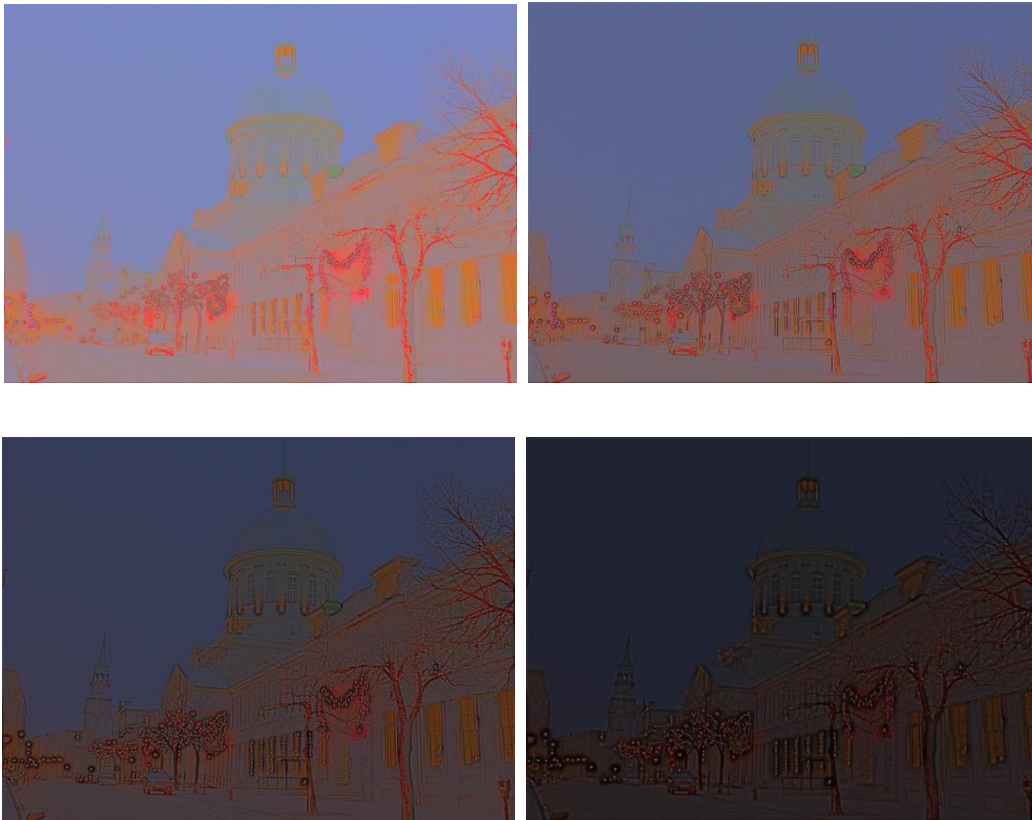


Figura 2.24 Variações do peso da influência dos *pixels* vizinhos na redução da luminância com o operador do Chiu et al.. Os valores utilizados foram 1, 2, 4 e 8, respectivamente. Repare-se nos halos criados (imagem original livro HDRI - [Reinhard'05b]).

Filtro bilateral [Durand'02]

Os autores deste TMO apresentaram uma nova técnica de amostragem de imagens HDR que reduz o contraste preservando o detalhe. O algoritmo baseia-se na decomposição da imagem em duas camadas (*layers*) – a camada base (*base layer*) e a camada de detalhe (*detail layer*). Apenas a primeira vê o seu contraste reduzido embora preservando o detalhe.

A camada base é obtida através de um filtro para preservação de contornos (*edge-preserving*) denominado filtro bilateral. Trata-se de um filtro não-linear, cujo valor de cada *pixel* é calculado com base numa filtragem Gaussiana, multiplicada por uma função de influência no domínio das frequências, fazendo diminuir o valor dos *pixels* com intensidades elevadas.

Esta convolução Gaussiana foi altamente acelerada através do uso de uma Transformada de Fourier (*Fast Fourier Transform*) e de uma versão *downsampled* da imagem com pouca perda de qualidade. Neste TMO é usada a técnica do vizinho mais próximo, uma vez que não causa alterações ao histograma. Todos estes procedimentos proporcionaram um aumento significativo de desempenho comparativamente a outros operadores locais [Chiu'93, Tumblin'99b].

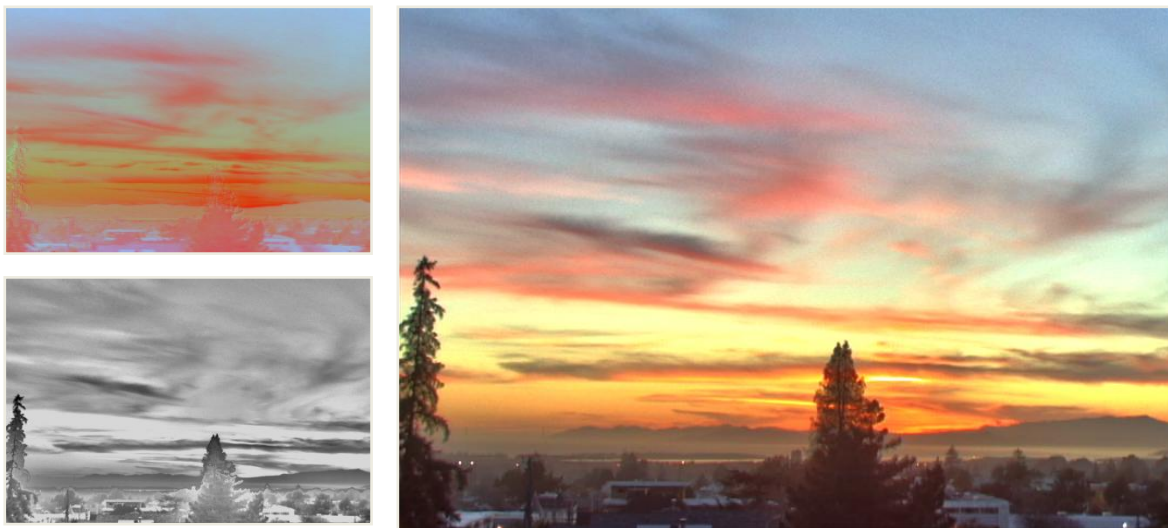


Figura 2.25 Em cima à esquerda a camada base que irá sofrer compressão; em baixo à esquerda, a camada de detalhe; à direita, a imagem resultante da aplicação do filtro bilateral de Durand e Dorsey (imagem original livro HDRI - [Reinhard'05b]).

Este operador permite que o utilizador controle, por parâmetro, o brilho geral da imagem e a base do contraste. Este operador é rápido, preserva os detalhes sem criar halos, tudo isto

apesar de não ter em consideração o funcionamento do Sistema Visual Humano. A Figura 2.25 ilustra um exemplo com as camadas base e de detalhe bem como a imagem resultante.

Domínio dos gradientes [Fattal'02]

Por observação, os autores do algoritmo concluíram que qualquer mudança drástica na luminância causa gradientes com grandes magnitudes. Por outro lado, os detalhes finos, como as texturas, estão relacionados com gradientes com magnitude inferior. Assim, através da identificação dos grandes gradientes no domínio dos logaritmos conseguiram alterar a sua magnitude mantendo a direção. Obtém-se compressão resolvendo uma equação de *Poisson* no domínio dos gradientes atenuados. A solução proposta identifica os gradientes nas diversas escalas espaciais e atenua as suas magnitudes, onde os gradientes maiores são mais atenuados que os menores.

Trata-se de um operador robusto, simples e computacionalmente eficiente mas não considera a exatidão psicofísica. Imagens exemplificativas da atuação deste TMO podem ser vistas na Figura 2.26.

Reprodução fotográfica [Reinhard'02]

Este operador de *tone mapping* foi desenvolvido com base em técnicas fotográficas, nomeadamente, na técnica chamada *Zone System* de Ansel Adams [Adams'83]. Este sistema baseia-se na medição prática da sensibilidade, onde o fotógrafo utiliza informações medidas na cena que vai ser fotografada, de forma a garantir melhores resultados finais.

O processo usado pelo fotógrafo é algo moroso e difícil de automatizar. Este operador de *tone mapping* não usa estas técnicas mas apoia-se no conjunto subjetivo de controlos que o processo fornece ao fotógrafo. Estas técnicas surgiram porque o filme fotográfico consegue armazenar um contraste maior do que o papel. As imagens HDR têm vantagens em relação a um filme pois são como negativos perfeitos onde nenhuma informação é perdida durante o processo fotográfico.

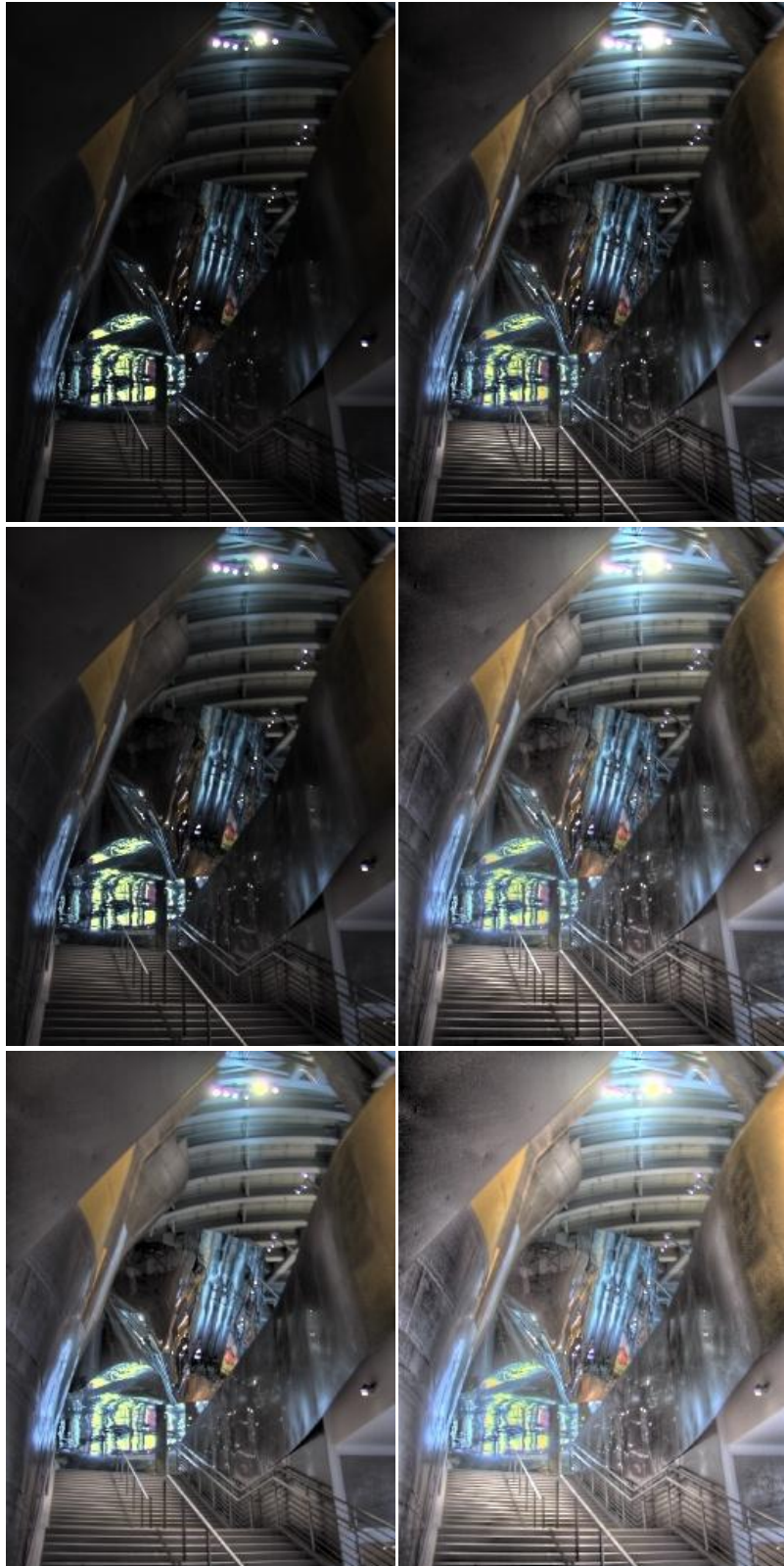


Figura 2.26 Exemplo da compressão do TMO de Fattal et al numa imagem HDR onde, na horizontal, o parâmetro beta (controla o valor da atenuação) assume os valores 0.9 e 0.8 e, na vertical, o parâmetro alfa (quais as magnitudes dos gradientes que são atenuados) assume os valores 1, 0.3 e 0.001 (imagem original livro HDRI - [Reinhard'05b]).

Este operador primeiro aplica uma mudança de escala análoga à manipulação do tempo de exposição na máquina fotográfica. Depois, caso seja necessário, aplica um *dodging-and-burning* automático para melhor compressão da gama dinâmica. Foram realizadas duas implementações, uma usando *Fast Fourier Transform* e outra usando uma aproximação da convolução Gaussiana por *splines* [Peter'83], sendo esta última mais rápida, por força da introdução de artefactos de blocos nalgumas regiões da imagem final.

A Figura 2.27 mostra algumas variações da aplicabilidade deste TMO.



Figura 2.27 Variação do parâmetro *key* (0.1, 0.18, 0.3) durante a aplicação do TMO baseado em técnicas fotográficas. Este parâmetro indica se a impressão geral de uma cena é clara ou escura (imagem original livro HDRI - [Reinhard'05b]).

Modelo simples [Ashikhmin'02]

A estratégia definida pelos autores consiste numa abordagem em 3 etapas. Em primeiro lugar, é realizada uma estimativa da luminância da adaptação local em cada *pixel* da imagem original. Depois é aplicada uma função simples para comprimir esses valores de acordo com a

gama dinâmica pretendida. Como esta etapa pode causar perda de detalhe, a última etapa reintroduz detalhes na imagem.

Esta abordagem permite preservar os detalhes e a informação absoluta do brilho da imagem. Além disso, utiliza um modelo perceptual simples e funcional, sendo fácil de implementar e com uma eficiência computacional moderada.

Este TMO tem como vantagem a sua modularidade mas tem alguns inconvenientes como a técnica usada para calcular a estimativa da luminância da adaptação local que algumas vezes cria saltos no nível de adaptação, produzindo artefactos. Além disso, este algoritmo não é adequado para imagens onde o contraste local é bastante uniforme. Ilustrações do funcionamento podem ser vistas na Figura 2.28.

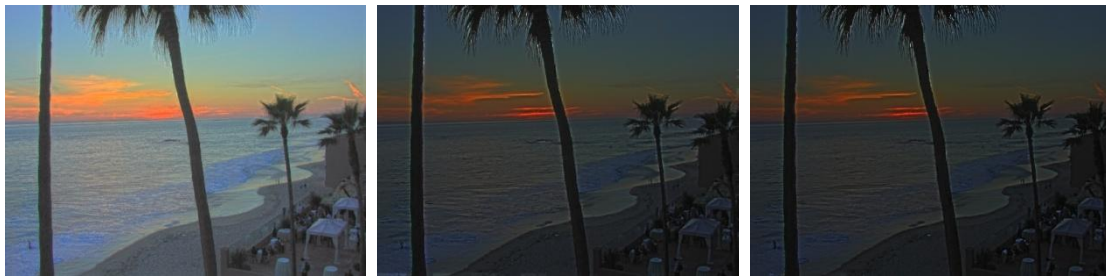


Figura 2.28 Funcionamento do TMO de Ashikhmin onde o parâmetro que define a tolerância para o contraste local assume, da esquerda para a direita, os valores 0.1, 0.5 e 0.9 (imagem original livro HDRI - [Reinhard'05b]).

Percepção da luminosidade [Krawczyk'05]

O conceito chave deste método traduz-se na decomposição da imagem HDR em áreas (*frameworks*) de luminâncias consistentes e no cálculo dos valores de luminosidade local. A luminosidade de uma imagem é calculada através da junção das *frameworks* proporcionalmente aos seus pesos. Este método não afeta o contraste local e preserva as cores naturais de uma imagem HDR devido ao tratamento linear da luminosidade (Figura 2.29).

Baseado no contraste espacial [Mantiuk'05]

Foi proposta uma *framework* para operações numa imagem baseada no contraste espacial em vez do valor absoluto dos *pixels*. Este método envolve a transformação do valor da luminância de cada *pixel* da imagem em valores de contraste físico que posteriormente são traduzidos em valores de resposta do SVH. A imagem resultante é depois modificada

alterando os valores de resposta novamente para valores de luminância. Este operador preserva os detalhes das imagens HDR e mostrou que uma operação complexa para compressão do contraste, preserva texturas de pequeno contraste e pode ser reduzida a uma mudança de escala linear no espaço de resposta visual (Figura 2.30).

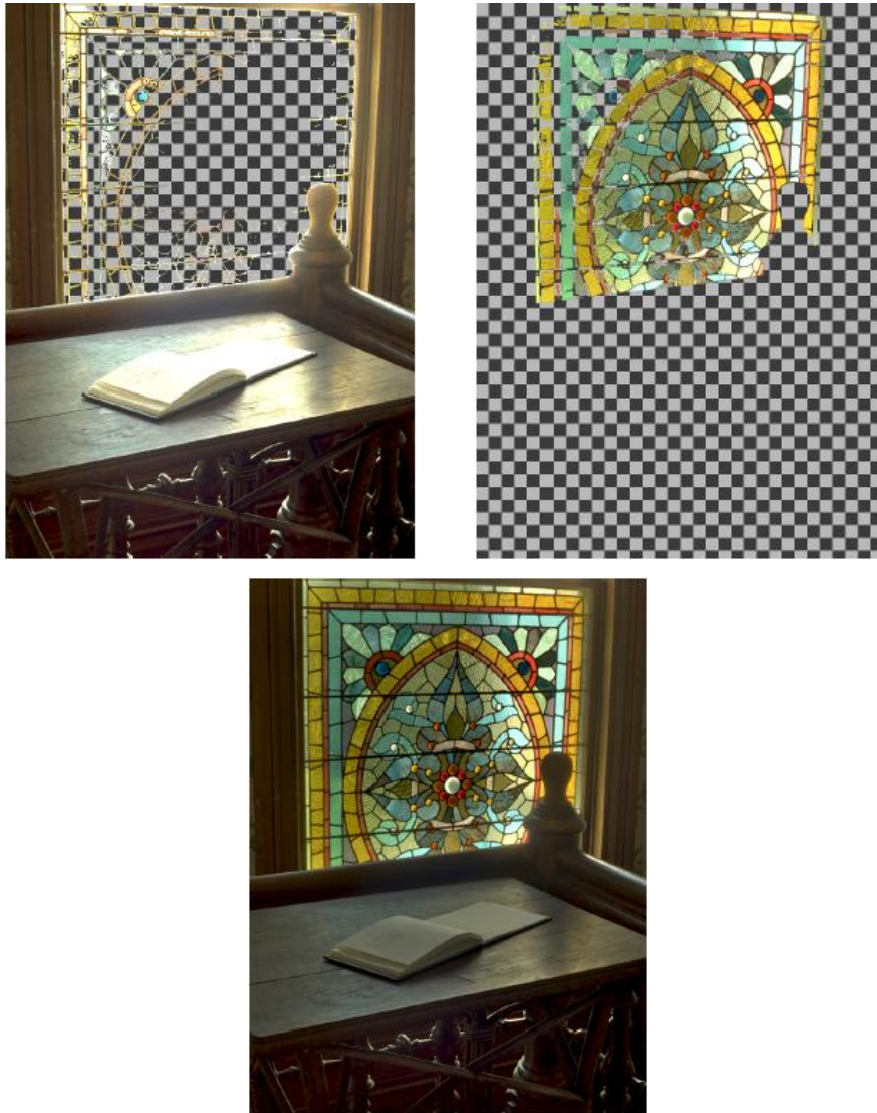


Figura 2.29 Decomposição da imagem em áreas e o resultado final da junção dessas áreas (imagem original [Mantiuk'05]).



Figura 2.30 Resultados produzidos por mapeamento do contraste, à esquerda, e pela equalização do contraste, à direita (imagem original [Mantiuk'05]).

2.4.1 Dependentes do tempo

Conforme referido anteriormente, a adaptação visual possibilita que percebamos a luz em intensidades diferentes. Além disso, essa adaptação não acontece instantaneamente. A adaptação visual à escuridão pode demorar minutos, enquanto na passagem da escuridão para a claridade a adaptação demora apenas segundos.

Alguns TMO têm em consideração estas características da adaptação do SVH e serão explanados em seguida.

Baseado na percepção [Ferwerda'96]

Apesar de ser um operador linear não incorpora apenas condições de iluminação fotópica mas também uma componente escotópica. Modela ainda a perda de acuidade visual sob iluminação escotópica, bem como o processo de adaptação à escuridão e à claridade que acontece ao longo do tempo.

Assim, este algoritmo reflete as mudanças súbitas na visibilidade, aparência da cor, acuidade visual e sensibilidade ao longo do tempo. É baseado num modelo perceptual e útil para dispositivos de visualização imersivos. Exemplos da variação do fator de escala podem ser vistos na Figura 2.31.



Figura 2.31 Imagens mapeadas utilizando o TMO dependente do tempo do Ferwerda et al (imagem original livro HDRI - [Reinhard'05b]).

Baseado no SVH [Pattanaik'00]

Neste operador todos os componentes são derivados de medidas quantitativas vindas da psicologia, psicofísica, ciência das cores e fotografia. Por conseguinte, a construção do operador baseou-se no modelo matemático da visão humana de Hunt [Hunt'95]. Este é um modelo de aparências onde os observadores estimam a intensidade da cena através da comparação de referências mentais do que é branco e do que é preto. Estas referências descrevem a intensidade necessária para que os objetos possam ser corretamente percebidos na cena (Figura 2.32).

Perceptual melhorado [Durand'00]

Os autores deste TMO estenderam o trabalho de Ferwerda et al [Ferwerda'96] introduzindo uma fórmula baseada em testes psicofísicos, utilizada quando os cones e os bastonetes estão mutuamente ativos. Foi adicionado um efeito de aumento de azul (*blue-shift*) para melhorar as cenas escuras e a adaptação cromática em relação ao operador original. A fórmula da acuidade visual foi também melhorada (Figura 2.33).

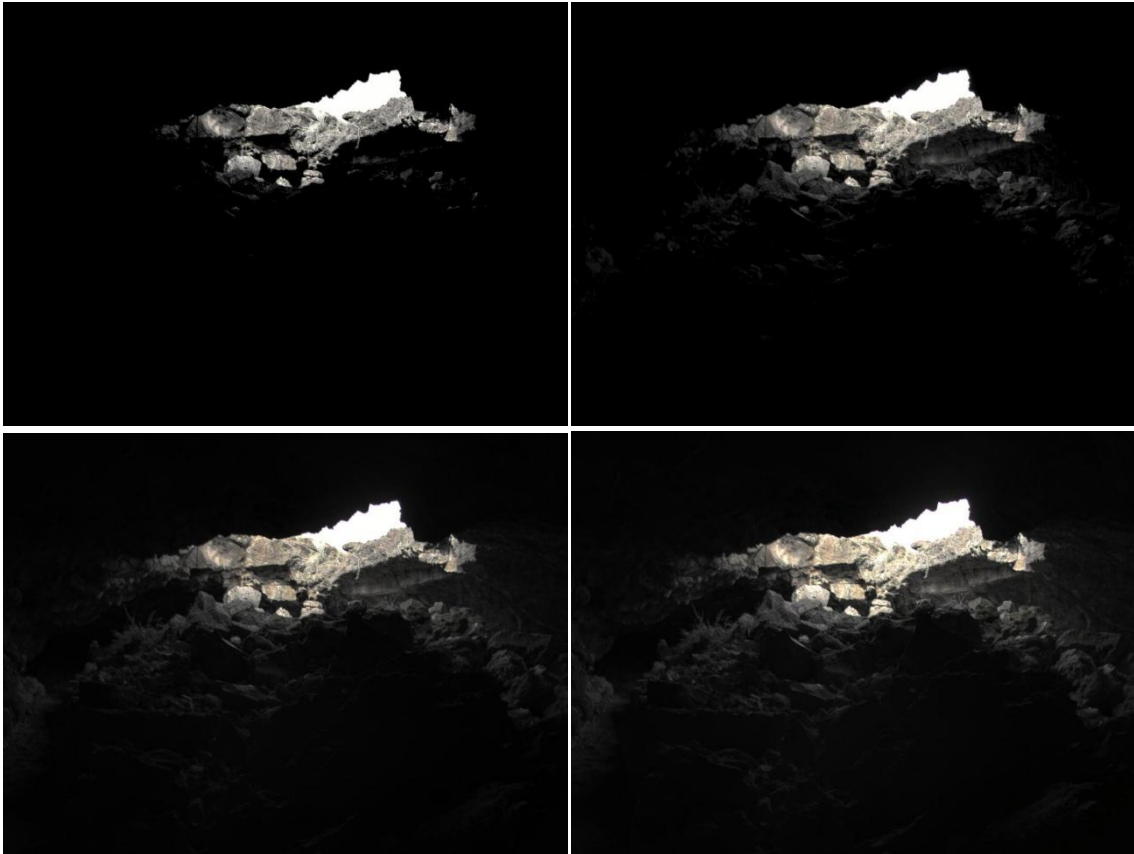


Figura 2.32 Variações do TMO de Pattanaik et al numa imagem do interior de uma gruta (imagem original livro HDRI - [Reinhard'05b]).

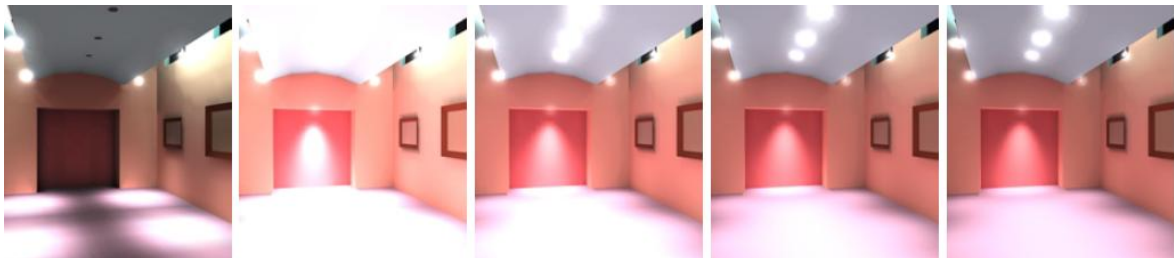


Figura 2.33 Adaptação à iluminação após ligar as luzes mais fortes. As *frames* distam 30ms umas das outras (imagem original [Durand'00]).

Adaptação local [Ledda'04]

Este foi o primeiro operador local e dependente do tempo a ser proposto. Estende com importantes melhoramentos o trabalho de Pattanaik et al. [Pattanaik'00]. A adaptação é localizada e utilizada para calcular uma resposta local. Isto possibilita adaptar diferentemente cada *pixel* com base nos valores dos *pixels* vizinhos e simular a sensibilidade apenas dos cones ou apenas dos bastonetes. Exemplo de utilização na Figura 2.34.

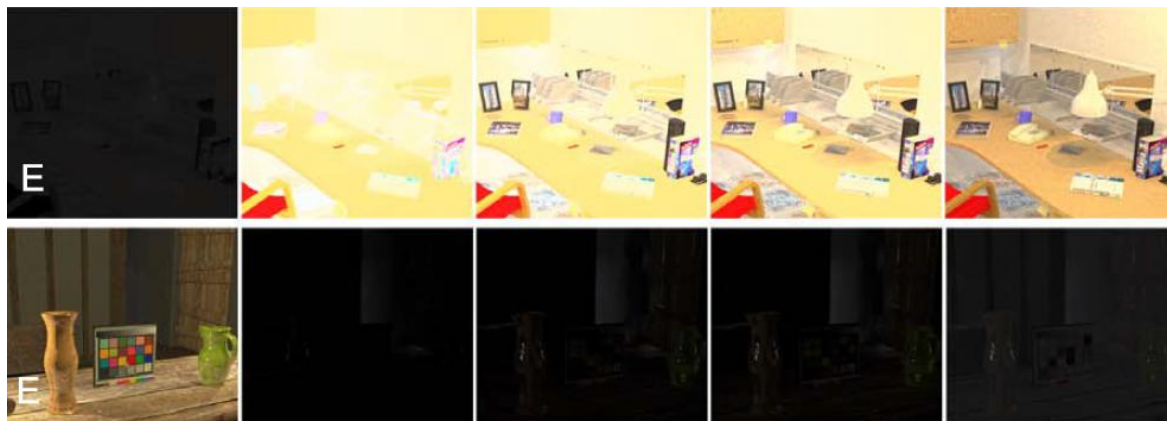


Figura 2.34 A sequência de cima representa a adaptação à luz depois de 1, 3, 6 e 12 segundos, respetivamente. Na sequência de baixo são mostradas algumas *frames* da adaptação ao escuro depois de desligada a luz. As 4 *frames* finais representam a percepção da cena passados 1, 2, 4 e 16 minutos (imagem original [Ledda'04]).

Baseado nos fotorreceptores [Reinhard'05a]

Os autores deste algoritmo afirmaram que a tarefa de mapear imagens HDR em dispositivos com baixa gama dinâmica é semelhante ao processo de adaptação que ocorre no SVH. Algumas evidências psicológicas sugerem que o processo de adaptação ocorre, de facto, nos fotorreceptores. Esta observação conduz a um modelo simples, que pode facilmente ser utilizado para o mapeamento de tons.

Foi construído, deste modo, um algoritmo rápido e prático para uso geral com a entrada de parâmetros para controlar a intensidade, o contraste e o nível de adaptação (Figura 2.35).

Apesar de este TMO ser global pode facilmente ser adaptado para local como demonstraram os seus autores ao introduzirem a vizinhança de cada *pixel* no cálculo da intensidade.



Figura 2.35 Exemplo de uma imagem HDR mapeada com o TMO baseado nos fotorreceptores (imagem original [Reinhard'05a]).

2.4.2 Operadores em *hardware* gráfico

Alguns algoritmos foram criados com o objetivo de promover o seu uso interativo através do auxílio de *hardware* gráfico. Não são, na verdade, novos TMO mas *frameworks* para implementar TMO existentes, ou simplificações deles, em *hardware* gráfico.

Baseado na radiosidade [Scheel'00]

Scheel et al. desenvolveram um método de mapeamento de tons para aplicações interativas onde efetuam a representação de luminâncias através de texturas. A luminância de cada vértice é codificada em coordenadas de textura onde, antes do *rendering*, essas coordenadas de textura são mapeadas em valores de luminância do ecrã através dos TMO [Ward'94] e [Ward-Larson'97]. Isto permite interação com grandes cenas onde a reprodução de tons pode ser ajustada *frame-a-frame* relativamente à posição atual do utilizador e centra-se em soluções de iluminação global obtidas por métodos de radiosidade. Os TMO globais foram escolhidos dada a sua eficiência computacional necessária para este tipo de tarefas. Este processo origina um novo nível de interatividade apesar de ainda não considerar a correta adaptação ao longo do tempo Figura 2.36.

Baseado no GPU [Goodnight'03]

Nesta proposta foi explorada a capacidade de processamento genérico e paralelo do *hardware* gráfico programável tendo em vista a utilização de TMO em aplicações interativas. Isto flexibiliza substancialmente o desenho da aplicação e adiciona realismo à simulação visual interativa. Devido ao enorme poder computacional do GPU, os autores conseguiram implementar TMO a taxas de refrescamento interativas. Foi adicionada também uma dependência de tempo simples, que é crucial para este tipo de aplicações (Figura 2.37).

CPU+GPU [Artusi'03]

Os autores deste trabalho propuseram uma *framework* híbrida entre CPU (*Central Processing Unit*) e GPU (*Graphics Processing Unit*) que permite interatividade em TMO globais e é facilmente integrável com o *pipeline* de *rendering* do *hardware* gráfico atual. A divisão da carga de trabalho permite que algumas etapas sejam executadas no CPU e outras no GPU. O operador global é aplicado no CPU e o GPU resolve operações computacionais mais simples

mas com peso no algoritmo. A Figura 2.38 mostra que a imagem mapeada resultante pela aplicação da *framework* proposta é bastante similar à obtida pelo TMO original, neste caso, o algoritmo de Tumblin et al [Tumblin'99a].

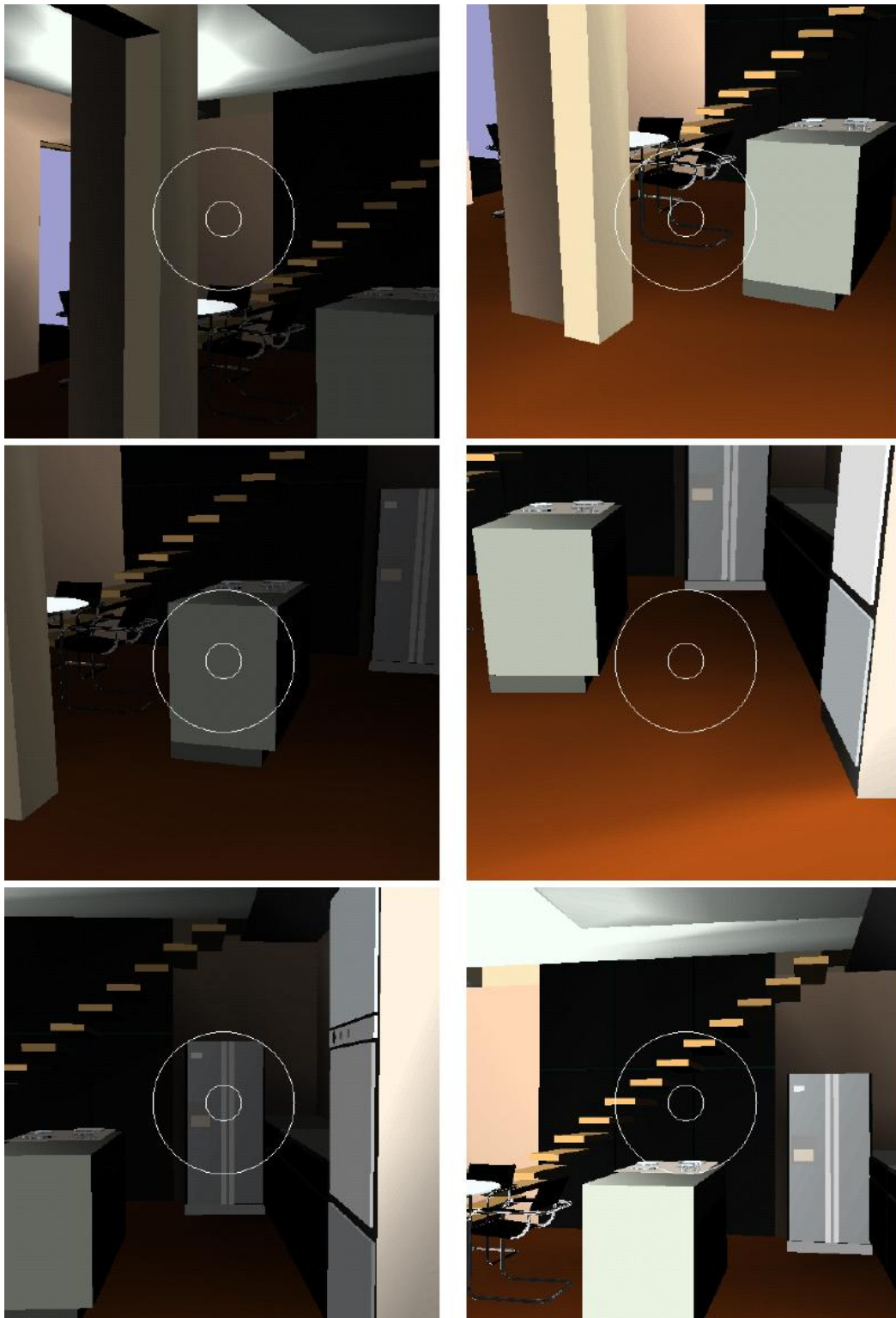


Figura 2.36 Cena vista interativamente com diferentes níveis de adaptação (imagem original [Scheel'00]).



Figura 2.37 Imagem HDR mapeada no GPU usando o TMO de Goodnight et al (imagem original [Goodnight'03]).



Figura 2.38 À esquerda, a imagem mapeada obtida pela aplicação do algoritmo Tumblin et al original e, à direita, a versão obtida por *hardware* gráfico (imagem original [Artusi'03]).

A Figura 2.39 ajuda a perceber o agrupamento e classificação de alguns dos principais TMO desenvolvidos ao longo dos anos.

	Global				Local			
Independente do Tempo	Miller et al. 1984			Mantiuk et al. 2008	Chiu et al. 1993	Stockham 1993	Oppenheim et al. 1968	Schlick 1994
	Upstill 1985	Cohen et al. 2001	Drago et al. 2003	Tumblin & Rushmeier 1993	Jobson et al. 1997	Pattanaik et al. 1998	Tumblin & Turk 1999	Durand & Dorsey 2002
	Larson 1994	Larson et al. 1997	Scheel et al. 2000	Tumblin et al. 1999	Reinhard et al. 2002	Fattal et al. 2002	Ashikhmin 2002	Yee & Pattanaik 2003
					Mantiuk et al. 2005	Li et al. 2005	Krawczyk et al. 2005	Meylan et al. 2006
Dependente do Tempo		Fewerda et al. 1996	Durand & Dorsey 2000	Pattanaik et al. 2000	Ledda et al. 2004			
		Reinhard et al. 2005	Irawan et al. 2005	Van Halteren 2006				
HW Gráfico	Scheel et al. 2000	Goodnight et al. 2003	Artusi et al. 2003					
Interativo					Lischinski et al. 2006			

Figura 2.39 Classificação e desenvolvimento de TMO (imagem adaptada e estendida de [Devlin'02]).

2.4.3 Outras características dos TMO

Outra particularidade dos TMO é que cada algoritmo, ao realizar a compressão e dependendo da sua concepção, pode preservar determinadas características em detrimento de outras. As características a preservar dependem do objetivo da imagem final obtida, podendo ser de cariz perceptivo, cognitivo ou estético. No primeiro caso, o algoritmo deve gerar uma imagem que seja perceptivelmente semelhante à imagem HDR (Figura 2.40).

No caso cognitivo, a imagem resultante deve permitir identificar exageradamente o conteúdo da imagem original mesmo que não seja perceptivamente semelhante, normalmente realçando os detalhes (Figura 2.41).



Figura 2.40 – Imagem de cariz perceptivo.



Figura 2.41 – Imagem de cariz cognitivo (imagem original [Jonathanw100'12]).

Em relação ao cariz estético, o algoritmo implementa alguns efeitos visuais e artísticos criando imagens agradáveis mas que podem até afastar-se um pouco da imagem real original (Figura 2.42).

O âmbito do presente trabalho enquadra-se apenas nos aspetos perceptivos descartando as vertentes cognitivas e estéticas. O nosso objetivo é aproximar a percepção da visualização de imagens em dispositivos comparativamente à visão direta do mundo real.



Figura 2.42 – Imagem de cariz estético (imagem original [Filion'12]).

3. Avaliação de *Tone Mapping Operators*

Neste capítulo é efetuada uma análise sobre a avaliação de *tone mapping operators* (TMO) com o intuito de identificar um conjunto de boas práticas a seguir na conceção de experiências psicofísicas que tenham como objetivo a avaliação de TMO. Os resultados deste estudo serão usados, nos capítulos subsequentes, para conceber as experiências psicofísicas que têm como objetivo a avaliação de *tone mapping operators* (TMO) em dispositivos com ecrã pequeno (DEP), caracterizados pela sua *very low dynamic range* (VLDR).

O processo seguido nesta análise sobre a avaliação de TMO é apresentado na Figura 3.1. Assim, serão, inicialmente, estudados os conceitos básicos sobre conceção de experiências, depois serão revistas as experiências realizadas para avaliação de TMO em dispositivos LDR e outros estudos relacionados.

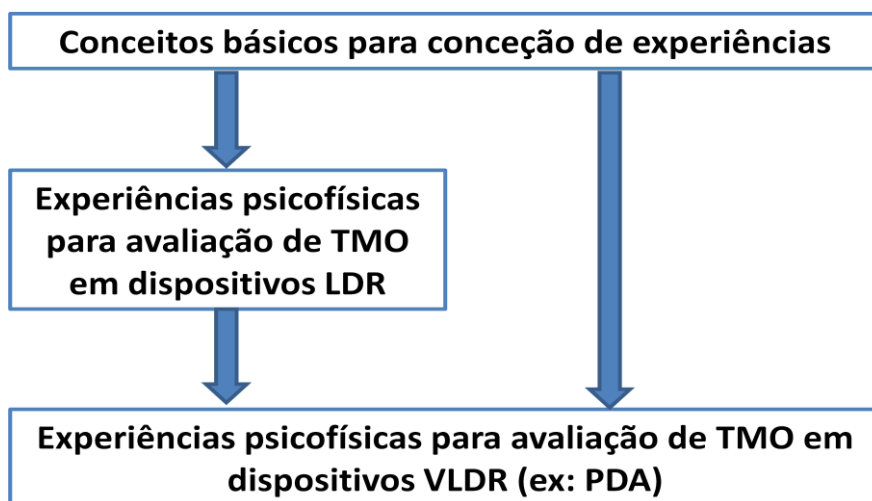


Figura 3.1 Obtenção da melhor metodologia para as experiências a realizar.

3.1 Conceitos básicos

Pode-se dizer que um desenho experimental é um plano onde participantes são sujeitos a condições experimentais e dessas participações são realizadas análises estatísticas [Kirk'95]. A elaboração experimental envolve diversas atividades interrelacionadas:

Hipótese estatística – formulação de uma declaração sobre um ou mais aspectos desconhecidos. A hipótese deve ser clara e objetivamente formulada por forma a tornar possível uma relação entre os dados.

Condições experimentais – determinação das variáveis independentes (a serem manipuladas), das variáveis dependentes (a serem medidas) e das condições estranhas que devem ser controladas (*nuisance variables*). As variáveis dependentes podem ser influenciadas por mudanças em uma ou mais variáveis independentes.

Participantes – especificação do número de participantes necessários e da população da qual esses participantes constituem uma amostra. Normalmente não é possível efetuar a experiência com toda a população. Por conseguinte, apenas um subconjunto é considerado. Esta amostra deve ser representativa do universo populacional. A escolha do tipo e número de participantes depende do propósito do estudo.

Procedimento – define como os participantes irão interagir com as condições experimentais. Isto inclui definir se a experiência vai incidir sobre indivíduos ou sobre diferentes subgrupos ou se deverá existir um tempo de adaptação ou de descanso.

Análise estatística – é uma ferramenta essencial para retirar conclusões dos dados obtidos na experiência. Existem diversos testes estatísticos, paramétricos e não-paramétricos, que deverão ser utilizados em função de diversos fatores como o tipo de variáveis dependentes e independentes bem como a forma como é efetuada a experiência.

Fisher sugere aos investigadores que complementem os testes de significância medindo a intensidade da associação. Infelizmente, não há medidas estatísticas que indiquem a significância prática. Apenas o investigador pode determinar se os resultados são ou não importantes e úteis. Uma maneira de ajudar a decidir é recorrendo aos intervalos de confiança e medir a magnitude do efeito [Kirk'01, Weiner'03].

Resumindo, podemos afirmar que um desenho experimental identifica as variáveis dependentes, independentes e outras estranhas, e indica como abordar a aleatoriedade e os aspetos estatísticos de uma experiência.

3.1.1 Princípios para uma boa conduta experimental

De acordo com as publicações de Ronald A. Fisher *Statistical Methods for Research Works* [Fisher'25] e *The Design of Experiments* [Fisher'37], o pilar de qualquer boa experiência é a aleatoriedade. Este pressuposto é, aliás, unanimemente sufragado por todos os investigadores. De facto, a atribuição aleatória de participantes oferece diversos benefícios. Para não influenciar os resultados da experiência, a atribuição aleatória ajuda a atenuar as características particulares e únicas dos participantes. Também possibilita o cálculo de uma estimativa credível dos efeitos dos erros e ajuda a assegurar que esses efeitos sejam estatisticamente independentes.

Outros dois princípios de uma boa experimentação tornaram-se também populares através de Fisher: replicação e agrupamento (ou controlo local). Replicação é a observação dos participantes em condições idênticas permitindo estimar os efeitos de erro e obter uma estimativa mais precisa do tratamento desses efeitos. O agrupamento é um procedimento experimental que permite isolar variações associadas a uma condição estranha (*nuisance variable*). Estas variáveis podem tratar-se de diferenças entre os participantes, variações na apresentação das instruções aos participantes, mudanças nas condições do ambiente, efeito de fadiga e aprendizagem quando os participantes são observados por diversas vezes.

3.1.2 Outros aspetos importantes

Aspetos éticos

Uma vez que as experiências psicofísicas envolvem a participação de pessoas, é fundamental ter em atenção alguns aspetos éticos. O participante deve ser livre de desistir da experiência a qualquer momento. É comum dar-se alguma forma de compensação a cada participante. A pessoa deve dar o seu consentimento e ficar segura que a confidencialidade será garantida e nenhuma informação será revelada sem a sua autorização. A informação recolhida na experiência deve ficar guardada recorrendo a um identificador aleatório.

Testes piloto

Uma grande parte do trabalho envolvido na realização de experiências está na sua conceção e preparação. Para garantir a praticabilidade da experiência é vulgar a realização de testes piloto

permitindo e, conseqüentemente, identificar problemas antes da coleta dos dados experimentais reais. Um teste piloto é um teste em menor escala do processo experimental pretendido, onde o *feedback* obtido permite preparar experiências mais robustas e refinadas.

3.2 Histórico sobre avaliação de TMO

Nos últimos anos foram realizadas alguns estudos relativos à avaliação de TMO recorrendo a experiências psicofísicas onde os participantes compararam imagens mapeadas através de diferentes abordagens. Estes estudos diferem uns dos outros em alguns aspetos. Uns utilizam uma referência para a comparação, normalmente uma cena real ou a imagem HDR correspondente vista num dispositivo HDR; alguns fazem comparações par-a-par enquanto outros utilizam o sistema de pontuações. Nas secções subsequentes apresenta-se uma breve descrição dos estudos relativos à avaliação de TMO mais referenciados na literatura.

3.2.1 Metodologia para comparação de TMO [Drago'03a]

Este trabalho tinha como objetivo a definição de uma metodologia para comparação dos TMO existentes com vista à compreensão dos seus pontos fortes e fracos. Na experiência psicofísica foram utilizadas 24 imagens mapeadas resultantes da aplicação de 6 TMO a 4 imagens HDR de cenas diferentes (tanto sintéticas como reais). Os TMO utilizados foram [Ferwerda'96, Frankle'83, Reinhard'02, Schlick'94, Tumblin'93, Ward-Larson'97]. Onze participantes avaliaram essas imagens de acordo com a sua percepção. Cada um desses 11 observadores comparou, para cada cena, cada par de imagens geradas pelos TMO que eram mostrados aleatoriamente num ecrã CRT. As comparações foram efetuadas sem ter a cena real como referência. Para melhor interpretar os resultados, foram obtidos, para todos os estímulos, valores psicofísicos com respeito a três atributos: contraste, nível de detalhe e naturalidade.

3.2.2 Descobrir a influência dos atributos de imagem [Yoshida'05]

Estes autores conduziram uma experiência psicofísica baseada na comparação direta entre cenas do mundo real e as imagens HDR dessas cenas visualizadas em monitores LDR.

Nesta experiência as imagens HDR foram mapeadas usando mapeamento linear simples mais 6 TMO existentes [Ashikhmin'02, Drago'03b, Durand'02, Pattanaik'00, Reinhard'02, Ward-Larson'97]. O objetivo principal da experiência foi avaliar as diferenças de percepção das imagens mapeadas e descobrir quais os atributos de imagem que influenciam essas diferenças,

quando as imagens mapeadas são comparadas diretamente com a cena real correspondente. Os participantes pontuaram os seguintes atributos de imagem: naturalidade, contraste, brilho, reprodução de detalhes em zonas escuras e claras da imagem, sempre em comparação com a cena real.

Na experiência participaram 14 pessoas, 2 do sexo feminino e 12 do sexo masculino, com idades compreendidas entre os 24 e os 34 anos. Todos os participantes ignoravam os objetivos da experiência e tinham visão normal ou devidamente corrigida. Foram utilizadas 2 cenas *indoor*. Estes autores conduziram previamente um teste piloto com observadores experientes para afinarem os parâmetros de cada operador. Foi pedido aos participantes para permanecerem na mesma posição onde as imagens HDR foram obtidas. Os participantes viram as 7 imagens mapeadas, uma após outra, de cada uma das 2 cenas. Para a visualização das imagens foi usado um monitor LCD Dell com calibração sRGB e resolução 1280×1024 .

Os participantes compararam cada uma das 14 imagens com a sua correspondente cena real e atribuíram pontuações para a aparência e realismo da imagem. Todas as pontuações foram atribuídas movendo *scrollbars* e aos participantes era permitido navegar entre as imagens de uma cena. Cada participante demorou cerca de 20 a 30 minutos a concluir a tarefa.

3.2.3 Avaliação de TMO através de dispositivo HDR [Ledda'05]

Este trabalho consistiu na realização de uma série de experiências para a avaliação de 6 TMO [Drago'03b, Durand'02, Johnson'03, Ledda'04, Reinhard'02, Ward-Larson'97] em comparação com cenas linearmente mapeadas num dispositivo HDR. Os principais objetivos deste estudo foram determinar qual o melhor algoritmo e propor uma metodologia experimental para avaliar esses operadores.

Segundo os autores, a utilização do dispositivo HDR tem algumas vantagens assinaláveis em relação às cenas 3D reais: a comparação é feita entre imagens 2D mostradas em ecrãs LDR com outra também 2D mostrada num dispositivo HDR e que servirá de referência; permite controlar a resolução do ecrã, dimensões, colorimetria, distância de visão e luz ambiente, obtendo-se, assim, um ambiente mais controlado.

A metodologia utilizada baseou-se na comparação par-a-par, na qual os participantes foram confrontados simultaneamente com 3 imagens: 2 mapeadas por diferentes TMO e

visualizadas em dispositivos LDR e 1 cena real (ou, pelo menos, com gama dinâmica superior) mostrada num dispositivo HDR. Cada participante escolheu a imagem LDR que mais se aproximava à de referência mostrada no dispositivo HDR. As comparações par-a-par são vantajosas devido à sua simplicidade e também porque permitem avaliar a transitividade, isto é, a coerência das escolhas de cada participante.

Foram realizadas 2 experiências onde foram usadas 23 cenas de variadas categorias (*indoor*, dia, noite e de síntese), num total de 138 imagens diferentes (6 mapeadas por cena). Cada participante foi instruído para efetuar todas as comparações possíveis de pares retirados do conjunto de teste. Apesar do número de tentativas ser enorme e temporalmente dispendioso, torna-se mais fácil avaliar e comparar as escolhas de cada participante.

Na primeira experiência, os participantes tiveram de escolher qual a imagem mais parecida com a imagem de referência, enquanto na segunda experiência, fizeram julgamentos baseados na reprodução de detalhes.

As imagens mapeadas foram mostradas em 2 monitores LCD de 15” devidamente calibrados. Tanto os LCD como o dispositivo HDR estavam com uma resolução de 1024×768 a 60Hz. Para assegurar que cada participante tinha a visão alinhada com o centro do ecrã HDR foi efetuado o ajuste da cadeira em altura. A distância de visão foi de 80cm.

As experiências foram conduzidas numa sala escura para evitar o efeito da luz ambiente. Cada participante teve 5 minutos para se ajustar ao ambiente antes do início da sua participação. A ordem e localização das imagens apresentadas foram aleatórias. Após um teste piloto, foi estipulado que cada participante teria 13 segundos para fazer cada escolha. Todos os participantes tinham entre 20 e 34 anos de idade e visão normal ou devidamente corrigida.

3.2.4 Medição da qualidade geral de imagem [Cadik'06]

Os autores deste estudo apresentaram uma visão geral dos atributos qualitativos de imagem de diferentes TMO e propuseram um esquema de relações entre esses atributos, conduzindo à definição de medida da qualidade geral de imagem. Para provar o esquema de relações os autores realizaram testes psicofísicos. Além disso, fizeram ainda uma avaliação de TMO existentes em relação a esses atributos com o intuito de demonstrar que este estudo será útil como *framework* para avaliação de novos TMO.

Distintamente de outros estudos, estes autores adotaram tanto a comparação direta das imagens mapeadas com a cena real, como a avaliação subjetiva sem uma referência real. Foi conduzido um teste piloto inicial para melhor preparar a experiência. Os atributos escolhidos para caracterizarem uma imagem foram o brilho, contraste, cor e detalhe.

A primeira experiência foi baseada em pontuação, sendo apresentadas simultaneamente aos participantes a cena real (*indoor*) e a imagem mapeada correspondente a essa cena. Depois de criada a imagem HDR da cena, foram obtidas 14 imagens mapeadas com 14 TMO diferentes [Ashikhmin'02, Chiu'93, Choudhury'05, Drago'03b, Durand'02, Fattal'02, Pattanaik'98, Reinhard'02, Schlick'94, Tumblin'99a, Tumblin'99b, Ward-Larson'97, Ward'94] e ainda um mapeamento linear simples. As imagens foram mostradas aleatoriamente e cada participante pôde visualizar tanto a cena real como a imagem LDR da cena num monitor CRT calibrado. O teste decorreu numa sala escura sob nível de luz ambiente controlado. A 10 participantes com idades compreendidas entre os 26 e os 52 anos foi pedido que avaliassem a qualidade geral da imagem e os 4 atributos básicos para cada imagem com respeito à cena real, atribuindo pontuações (entre 1 e 14, onde 1 representava o melhor resultado e 14 o pior). Os participantes tinham visão normal ou corrigida.

Na segunda experiência participou um conjunto diferente de 10 participantes que nunca tinham visto a cena real. As 14 imagens mapeadas foram impressas e a tarefa dos participantes consistiu em ordená-las de acordo com a qualidade geral da imagem e a qualidade do contraste, brilho, cor e reprodução de detalhe.

Para determinar a importância de cada atributo, os autores recorreram à regressão linear, a funções de potência e a funções multiplicativas, concluindo que o brilho é o atributo com maior peso e a reprodução de detalhe, o de menor.

Em 2008, os autores estenderam as experiências anteriores incluindo 2 novas cenas, uma exterior e outra noturna, utilizando uma conceção experimental idêntica [Cadik'08].

3.2.5 Importância da cena real na comparação de TMO [Ashikhmin'06]

Este trabalho mostrou que é muito difícil julgar o desempenho de técnicas modernas de *tone mapping* com os métodos comparativos existentes e ainda que é fundamental usar ambientes reais nas experiências.

Foram conduzidos três conjuntos de experiências onde foi pedido aos participantes que ordenassem imagens de cenas, obtidas por diferentes técnicas de *tone mapping* [Choudhury'05, Drago'03b, Fattal'02, Reinhard'02, Ward-Larson'97]. A interface gráfica desenvolvida permitiu visualizar todas as imagens, ao mesmo tempo, com reduzida resolução, num só ecrã cuidadosamente calibrado e, caso o utilizador pretendesse, poderia visualizar qualquer das imagens isoladamente numa resolução de 1024×768 .

Cada participante deveria ordenar as imagens segundo um dado critério. Os autores optaram pela ordenação simples, em vez de comparação par-a-par, por ser muito menos cansativo para os participantes. Quinze pessoas de diversas áreas participaram no estudo onde as imagens foram apresentadas aleatoriamente. Os participantes tinham visão normal ou corrigida e foi-lhes dado tempo suficiente para se adaptarem ao local antes do início da sessão não tendo sido imposto qualquer limite de tempo para o processo de ordenação.

As duas primeiras experiências não envolveram cenas reais. Na primeira, foi perguntado a cada participante qual a imagem de que mais gostava, e na segunda qual achava ser a mais real. Na terceira experiência foi perguntado a cada participante qual a imagem que mais se aproximava à cena real à sua frente.

De salientar ainda que os autores realizaram vários testes piloto não tendo sido encontrada nenhuma diferença nos resultados ao variar algumas condições experimentais: distância ao local da cena, nível de luz ambiente e restrição ou não do campo de visão. Foi imperativo que cada cena fosse fielmente reproduzida dado que as experiências se prolongavam por diversos dias. Em virtude deste fator, as cenas de exterior foram excluídas, selecionando-se, assim, quatro cenas de interior (*indoor*), cada uma cobrindo uma vasta gama de fatores que influenciam o desempenho dos TMO. As cenas escolhidas tinham diferentes gamas dinâmicas variando também o número de objetos que continham bem como os níveis de detalhe.

3.2.6 Criação de TMO genérico facilmente ajustável [Yoshida'06]

O trabalho realizado por Yoshida et al em 2006 teve como principal objetivo perceber melhor como é que os utilizadores ajustam os parâmetros dos TMO para obterem imagens mais agradáveis ou imagens mais parecidas com a cena real respetiva [Yoshida'06]. Com base no conhecimento adquirido, propuseram um TMO genérico facilmente ajustável através de apenas 2 parâmetros: branco base e contraste. Esta conclusão foi obtida através da realização

de 2 experiências perceptuais. Na primeira, cada um dos 15 participantes tinha de ajustar 25 imagens HDR mostradas num dispositivo HDR (sem utilizar qualquer referência). Os ajustes possíveis incidiam sobre o brilho, o contraste e a saturação da cor e eram efetuados com o rato de acordo com o gosto de cada participante, cada imagem fique o melhor possível. Através de testes pilotos, os autores verificaram que a tarefa dos participantes seria facilitada se os 2 primeiros parâmetros fossem afinados em conjunto através de um *slider* 2D e a saturação da cor seria afinada num *slider* 1D. Na segunda experiência, 3 grupos de 13, 7 e 6 participantes avaliaram imagens de 3 cenas diferentes, respetivamente. Para isso, tiveram de fazer ajustes, de forma semelhante à primeira experiência, mas desta vez para atingir a afinação que resulte na imagem mais parecida com a cena real situada à frente deles (fidelidade). Os autores fizeram variar a gama dinâmica do dispositivo HDR de forma a simular diferentes dispositivos de visualização. As condições de iluminação durante os testes estavam convenientemente controladas. Cada sessão, em ambas as experiências, demorou cerca de 20 a 30 minutos a ser completada.

3.2.7 Proposta de *framework* para avaliação de TMO [Kuang'07]

Kuang et al também realizaram uma avaliação de algoritmos de *tone mapping* para tentar descobrir qual o melhor TMO existente [Kuang'07]. Os autores propuseram uma nova *framework* genérica baseada em aspetos psicofísicos para testar TMO. Para isso, realizaram 4 experiências psicofísicas para avaliação de TMO, tendo em atenção tanto a preferência dos participantes, como a fidelidade à cena real. Todas as experiências ocorreram num ambiente escuro. Nas duas primeiras experiências utilizaram 12 imagens HDR e foram avaliados 6 TMO [Braun'99, Durand'02, Funt'00, Johnson'03, Reinhard'02, Ward-Larson'97]. As imagens mapeadas foram mostradas num LCD HD Apple Cinema de 23" sem nenhuma referência para comparação. As imagens podiam ser vistas aos pares onde, na primeira experiência, 33 participantes tomaram as suas decisões baseados na sua preferência e em 5 atributos: performance, contraste, cor, *sharpness* e naturalidade. Na segunda experiência participaram 23 pessoas e o único atributo a avaliar era a performance de *rendering*, onde as imagens eram as mesmas mas em tons de cinzento. Nas terceira e quarta experiências os autores usaram 3 cenas reais e aos 4 TMO que obtiveram melhores resultados nas primeiras experiências [Durand'02, Johnson'03, Reinhard'02, Ward-Larson'97] juntaram-se outros 3 TMO recentes [Biggs'04, Ledda'04, Meylan'05]. Dezanove participantes avaliaram esses TMO baseando-se em 6 atributos: contraste nas zonas claras, contraste nas zonas escuras, cor nas zonas claras,

cor nas zonas escuras, contraste geral e semelhança. As principais diferenças entre as duas últimas experiências foram a utilização de comparação par-a-par sem referência na terceira experiência e a utilização de pontuação-escala e cena real como referência na última.

3.3 Resumo e análise do estudo

A Tabela 3-1 sumariza as principais características dos desenhos experimentais utilizados nos estudos anteriormente descritos.

De facto, todas estas comparações de TMO foram realizadas utilizando dispositivos de visualização tradicionais com um tamanho mínimo de 14". Em nenhum caso foi utilizado um DEP (dispositivo com ecrã pequeno) para visualizar as imagens mapeadas.

Este estudo sobre experiências para avaliação de TMO foi tido em conta para conceber o desenho das experiências a realizar para a avaliação de TMO em DEP. A identificação das vantagens e desvantagens de cada experiência foi muito útil para evitar uma conceção *ad-hoc* e errónea. Como exemplo, um dos itens importantes que se teve em consideração foi a utilização da cena real como referência nas comparações, para que cada decisão dos participantes não seja tomada por mera preferência ou gosto em vez da semelhança com a cena real. Outros itens importantes foram a utilização de um número considerável de participantes para que os resultados sejam estatisticamente aceites; a utilização de comparação par-a-par; aleatoriedade levada ao máximo; condições de iluminação ambiente controladas; entre outros aspetos.

	# Participantes	# Cenas	# Imagens	# TMO	Tipo de ecrã	Método de comparação	Atributos
Drago et al (2003)	11	4	24	6	CRT	par-a-par	detalhe naturalidade contraste
Yoshida et al (2005)	14	2	14	6 + linear	LCD	todas + real (pontuação)	contraste brilho naturalidade detalhe
Ledda et al (2005)	48	23	138	6	LCD	par-a-par + real (HDR)	semelhança detalhe
Cadik et al (2006) + Cadik et al (2008)	10	3	42	14	CRT	imagem + real (pontuação)	qualidade da imagem brilho contraste detalhe cor artefactos
	10				fotografias	<i>ranking</i>	
Ashikhmin and Goyal (2006)	15	4	20	5	1024x768	todas + real	semelhança
Yoshida et al (2006)	15	25	25	HDR	HDR	imagem (ajuste dos parâmetros)	preferência
	26	3	3	HDR	HDR (gama variável)	imagem + real (ajuste dos parâmetros)	fidelidade
Kuang et al (2007)	33	12	72	6	23" LCD	par-a-par	performance contraste cor sharpness naturalidade
	23	12	72	6	23" LCD	par-a-par (tons cinzento)	performance
	19	3	21	7	LCD	par-a-par	contraste zonas claras contraste zonas escuras cor zonas claras cor zonas escuras contraste semelhança
	19	3	21	7	LCD	imagem + real (pontuação-escala)	contraste zonas claras contraste zonas escuras cor zonas claras cor zonas escuras contraste semelhança

Tabela 3-1 Quadro comparativo das experiências realizadas para comparação de TMO.

4. Avaliação do Desempenho de *Tone Mapping Operators* em Dispositivos com Ecrã Pequeno

Os dispositivos com ecrã pequeno (DEP) são caracterizados por possuírem limitações quanto ao tamanho do ecrã, resolução e profundidade de cor. Os dispositivos móveis recentes estão equipados com ecrãs de 24-bit e resolução VGA (640×480) e podem ter tamanhos até 5” [Capin'08]. No entanto, a maioria tipicamente tem ecrãs LCD entre 2.5” e 3.5”, resolução de 320×240 (QVGA) e profundidade de cor de 16-bit.

De forma a avaliarmos o desempenho dos TMO existentes em DEP realizou-se um conjunto de experiências psicofísicas para comparar o comportamento dos TMO nos dispositivos tradicionais (CRT e LCD) com 17” e em dispositivos com ecrã de reduzidas dimensões, como PDA.

É importante salientar que o objetivo das experiências descritas de seguida não pode passar pela comparação com estudos já feitos por outros autores, uma vez que os TMO utilizados, os atributos a comparar, as condições e principalmente os objetivos são completamente diferentes.

4.1 Abordagem e desenho experimental

Como se pôde constatar no capítulo anterior, é necessário muito cuidado na conceção e preparação de experiências psicofísicas para que a metodologia seja válida, robusta e utilize a aleatoriedade evitando as variáveis tendenciosas.

Um desenho experimental inicial foi definido e apresentado na conferência IASK2007 [Urbano'07]. Esta conceção foi subsequentemente modificada para melhorar a sua adequação aos objetivos das experiências, pertencendo a parte de um trabalho apresentado na conferência Interacção2008 [Urbano'08].

Neste estudo conduziram-se dois conjuntos de experiências onde em cada um utilizou-se uma cena diferente. Cada conjunto foi dividido em 3 partes: uma usando dois CRT tradicionais, a segunda utilizando dois LCD tradicionais e a última utilizando dois DEP (PDA). Neste estudo, o termo ecrã tradicional refere-se a CRT ou LCD com tamanho superior a 14". Escolhemos como DEP dois PDA, pois apresentam as características consideradas representativas de um DEP típico. Na descrição das experiências, o termo PDA será utilizado em vez de DEP.

Em todas as partes das experiências foi pedido aos participantes que fizessem comparações par-a-par (também conhecida como escolha forçada de duas alternativas) e escolhessem uma das duas imagens mapeadas mostradas em dois ecrãs calibrados que, na sua opinião, fosse mais parecida com a cena real à sua frente, como está ilustrado na Figura 4.1. Em cada comparação, os participantes fizeram a sua escolha baseada em quatro (separadamente) propriedades de imagem. As propriedades avaliadas foram cor, detalhe, contraste e naturalidade e foram escolhidas por caracterizarem bem uma imagem [Cadik'06] e ainda por serem simples de perceber pelos participantes que detinham poucos conhecimentos sobre computação gráfica. A cada participante foram mostrados exemplos de diferentes imagens onde eram variados os quatro atributos de imagem para que o conceito fosse percebido de forma homogénea por todos os participantes.



Figura 4.1 Experiência em progresso utilizando LCD.

Apesar da técnica de comparação par-a-par implicar um elevado número de decisões a cada participante e, consequentemente, necessitar de bastante tempo, torna mais fácil avaliar e comparar o desempenho de cada participante e é considerada mais exata e precisa do que, por exemplo, o método em que se atribui pontuações [Kuang'07].

4.1.1 Hipótese estatística

O estudo que se pretende realizar parte do pressuposto que o desempenho de um TMO em PDA seja diferente comparativamente a um ecrã tradicional. Assim, a hipótese experimental deste estudo afirma que existem diferenças significativas entre os *rankings* dos TMO para PDA e os *rankings* dos TMO para ecrãs tradicionais. Esta hipótese foi testada contra a hipótese nula (H_0) que atesta que não existem diferenças entre os *rankings*.

$$H_0 : ranking_{DEP} = ranking_{CRT} = ranking_{LCD}$$

4.1.2 Participantes

Seis grupos de 19 pessoas participaram nas experiências (2 cenas \times 3 tipos de ecrã), totalizando 114 participantes. Apesar de este número incluir diversos alunos de diferentes áreas de estudo, a maioria eram leigos na problemática dos operadores de *tone mapping* ou perceção humana. Todos os participantes tinham visão normal ou corrigida para normal e tinham idades compreendidas entre os 18 e os 40 anos. Foi dado tempo suficiente a cada observador para se adaptar ao nível de iluminação do local das experiências antes de iniciar a sua participação. Não foi imposto qualquer limite de tempo para o processo de escolha e seleção de imagens.

4.1.3 Condições

Foram criadas cuidadosamente duas cenas com elevada gama de intensidades para cada conjunto de experiências. Tratam-se de cenas *indoor* sob condições de iluminação controladas contendo uma fonte de luz e diversos objetos especificamente escolhidos com o objetivo de facilitar a avaliação. Em todas as cenas foram incluídos Macbeth *chart* e dois tipos diferentes de Snellen *chart*, como aqueles indicados na Figura 4.2 e na Figura 4.3. A inclusão destes objetos nas cenas permitiu que os participantes avaliassem melhor as cores e os detalhes quando comparavam cada par de imagens mapeadas com a cena real à frente deles.

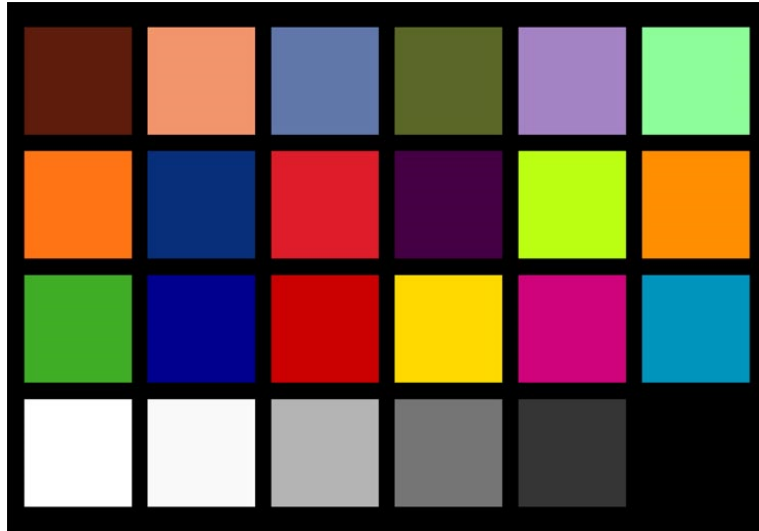


Figura 4.2 Macbeth *chart*.

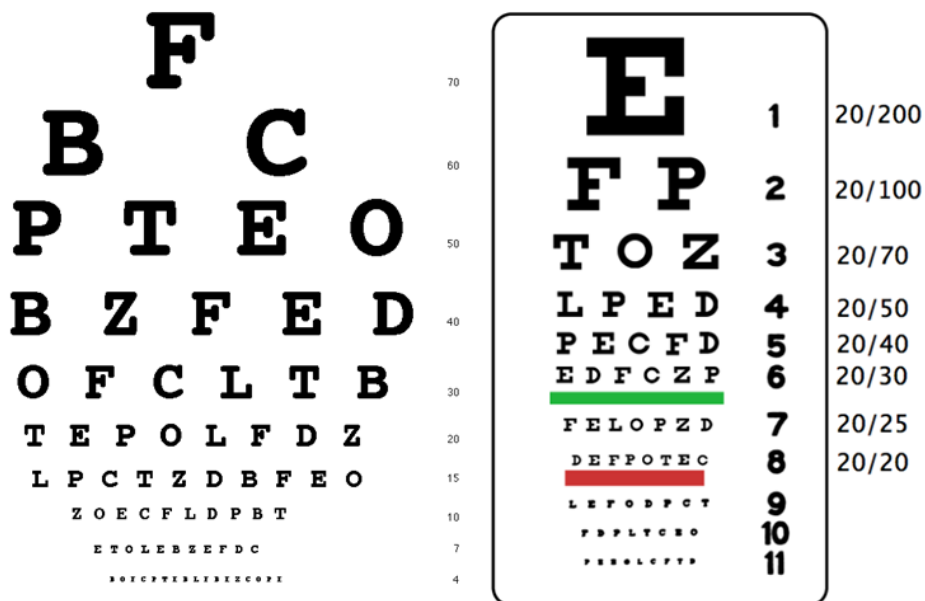


Figura 4.3 Dois tipos de Snellen *chart*.

A imagem HDR de cada cena foi construída com base em fotografias tiradas utilizando a uma máquina fotográfica Canon EOS 350D. Para construir cada imagem HDR foi obtida uma sequência de 3 fotografias com tempos de exposição diferentes, onde a máquina fotográfica estava fixa num tripé localizado na mesma posição e ângulo de visão que os participantes iriam ter no decorrer das experiências. Para fazer a junção de cada sequência, de forma a gerar as imagens HDR, utilizámos o Photomatix Pro [Photomatixpro]. As sequências de fotografias bem como as imagens HDR resultantes para a cena 1 podem ser vistas na Figura 4.4. A

segunda cena está ilustrada na Figura 4.5 e é caracterizada por conter objetos com elevado nível especular.

A cada imagem HDR foram aplicados 7 TMO utilizando o LuminanceHDR [Luminancehdr]. Esses 7 operadores de *tone mapping* utilizados foram: domínio dos gradientes [Fattal'02], modelo simples da variação espacial [Ashikhmin'02], filtro bilateral [Durand'02], mapeamento logarítmico [Drago'03b], baseado no SVH [Pattanaik'00], reprodução fotográfica [Reinhard'02] e modelo baseado nos fotorreceptores [Reinhard'05b].

Estes TMO foram escolhidos para estas experiências porque estavam disponíveis as respetivas implementações e por se considerar serem representativos dos operadores com melhores resultados.

Utilizaram-se os parâmetros por omissão de cada TMO porque este aspeto não era relevante para o propósito das experiências.



Figura 4.4 Criação da imagem HDR da cena 1.



Figura 4.5 Imagem HDR da cena 2.

A cada participante foi pedido que observasse todas as combinações possíveis de pares de imagens mapeadas que, neste caso, perfizeram 21 pares de imagens diferentes. Em todas as ocasiões cada participante observou 2 imagens mais a cena real. A cena real estava situada em frente e ao centro, e deveria ser usada como referência para as comparações. À esquerda e à direita, eram mostradas versões mapeadas da referência em dispositivos de visualização (CRT, LCD ou PDA). De forma a evitar confusões cada participante foi informado que deveria avaliar a semelhança perceptual (conforme descrito na secção 2.4.3). Por exemplo, é mau se uma imagem tem menos detalhe do que a cena real mas, é igualmente mau, se tiver detalhe a mais. Assim, o participante deverá escolher a imagem que, na sua opinião, mais se assemelha à cena real.

Como resultado de todas as experiências obteve-se um total de 9576 valores de observação, correspondentes a 2 cenas \times 19 participantes \times 3 tipos de ecrã \times 4 atributos \times 21 pares. Para cada cena foram utilizados três tipos diferentes de ecrã. Primeiro, as imagens mapeadas foram mostradas em dois CRT Dell de 17", depois em dois TFT LCD Dell de 17" e, por fim, em dois HTC P3300 cujo tamanho de ecrã é de 2.8 polegadas (Figura 4.6).

Em cada experiência, os dispositivos foram cuidadosamente calibrados. Os dispositivos de visualização mesmo sendo da mesma marca e modelo não garantem características de visualização semelhantes. Isto sucedeu inclusivamente com os PDA, onde várias unidades foram rejeitadas até se obter duas com características de visualização semelhantes. Os PDA apenas permitem calibrar o nível de brilho tornando difícil encontrar dois similares. Nos

monitores tradicionais, o valor de *gamma* foi calibrado, dado que muitos TMO necessitam desse valor para obter uma melhor performance. As imagens exibidas nos monitores CRT e LCD de 17" tinham uma resolução de 1024×682 , enquanto as imagens exibidas nos PDA tinham uma resolução de 240×320 (QVGA). A resolução de cada ecrã foi ajustada de modo a que as imagens fossem sempre visualizadas em *fullscreen*.



Figura 4.6 HTC P3300.

Para se obter as imagens com as resoluções pretendidas foi necessário proceder a redimensionamentos dado que as fotografias foram capturadas com uma máquina digital com resolução de 3456×2304 . O redimensionamento pode ser efetuado num de três pontos do processo de geração da imagem mapeada, como está indicado na Figura 4.7.

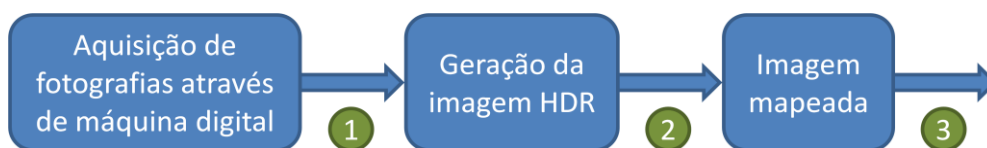


Figura 4.7 1, 2 e 3 são os possíveis pontos onde o redimensionamento pode ser feito dentro do processo de geração da imagem mapeada.

Após proceder a alguns testes visuais simples, observou-se que todas as soluções levam a diferentes resultados. No entanto, comparando as três possíveis imagens resultantes, a pior imagem parece ser a obtida fazendo o redimensionamento no ponto 2. Dado que as imagens HDR, numa utilização comum, não serão geradas especialmente para PDA, assumiu-se que o

redimensionamento deveria ocorrer ou no ponto 2 ou no ponto 3. Para as nossas experiências decidimos efetuar esse redimensionamento no ponto 3 porque, como foi referido anteriormente, de uma forma geral leva a resultados visualmente melhores que no ponto 2. Não obstante, esta operação foi realizada da mesma forma para todos os TMO, tornando esta problemática pouco relevante para os propósitos da experiência. Os redimensionamentos foram feitos utilizando o *software* de imagem ACDS_{See}Pro da ACD Systems [Acidsee_{pro}].

Nas experiências foram usadas, duas variáveis independentes (os tipos de ecrã e os TMO) e quatro variáveis dependentes (os atributos de imagem).

4.1.4 Procedimento

Para refinar as condições e os procedimentos experimentais realizou-se um teste piloto com alguns participantes experientes.

Cada participante fez a sua escolha baseando-se numa dada propriedade a ser testada, ou seja, um atributo de imagem. Todos os pares de imagens foram mostrados de forma aleatória e o participante tinha de escolher a imagem que lhe parecia percetivamente mais semelhante à cena real à sua frente, tendo em conta o atributo de imagem a avaliar. A escolha era feita através de cliques com o rato em cima das imagens, sendo que primeiro clicava na que achava mais semelhante à cena real e depois na outra. Desenvolveu-se uma aplicação para gerir onde (em qual dos dois ecrãs) e quando (aleatório) aparecia cada imagem e ainda armazenar todos os resultados. A aplicação desenvolvida também efetua alguns cálculos para análise estatística.

Cada participante demorou cerca de 20 a 30 minutos a completar as 84 comparações (21 pares de imagens \times 4 atributos).

4.2 Resultados e discussão

Como foi mencionado anteriormente, apesar da metodologia de comparação par-a-par implicar um elevado número de tentativas, originando um processo moroso para os participantes, tem a vantagem de tornar fácil avaliar e comparar a participação de cada um.

A vantagem das comparações par-a-par não é apenas a de ser um processo simples para os participantes, dado que em cada julgamento apenas têm de escolher uma de duas imagens,

mas também permitir avaliar a transitividade, isto é, a consistência das escolhas feitas por cada participante, bem como a consistência (ou o grau de concordância) entre todos os participantes.

Para serem utilizadas na análise estatística, para cada cena, foram criadas 12 matrizes de preferência, correspondentes a 3 tipos de dispositivos de visualização e 4 atributos de imagem. A Tabela 4-1 exemplifica uma dessas matrizes, neste caso, a matriz para o atributo cor avaliado em PDA.

TMO	Fa	Dr	Du	As	Pa	R2	R5	Total
Fa	-	7	7	9	17	4	11	55
Dr	12	-	9	11	18	9	16	75
Du	12	10	-	12	18	9	14	75
As	10	8	7	-	16	8	13	62
Pa	2	1	1	3	-	1	1	9
R2	15	10	10	11	18	-	11	75
R5	8	3	5	6	18	8	-	48

Tabela 4-1 Matriz de preferência para PDA sobre o atributo cor na primeira cena.

Em cada linha da tabela, pode-se observar quantas vezes um determinado TMO foi preferido em relação a cada um dos outros. Por exemplo, o TMO do Drago (Dr) foi preferido 12 vezes quando comparado com o do Fattal (Fa). De notar, que decidimos simplificar a designação de cada TMO onde Fattal é **Fa**, Drago é **Dr**, Durand é **Du**, Ashikhmin é **As**, Pattanaik é **Pa**, Reinhard2002 é **R2** e Reinhard2005 é **R5**.

Se um participante prefere o TMO A comparativamente a B e prefere B comparativamente a C, então, logicamente deveria preferir A comparativamente a C. Se isto acontecer em todos os julgamentos então será atingida uma consistência/transitividade total. O coeficiente de consistência, ζ [Kendall'40], permite avaliar a transitividade para cada participante. O coeficiente de consistência é definido como

$$\zeta = 1 - \frac{24 \left(\frac{t}{24} (t^2 - 1) - \frac{1}{2} \sum (p_i - (t - 1)/2)^2 \right)}{t^3 - 4t} \quad (10)$$

onde t é o número de TMO a comparar e p_i é o número total de preferências obtidas pelo TMO $_i$ ($i=1,2,\dots, t$). Por exemplo, na primeira cena, para o atributo cor usando PDA, o valor de p para o TMO do Fattal foi de 55, de acordo com a Tabela 4-1.

Valores de ζ perto de 1 indicam que há boa consistência dentro das escolhas de um participante. Por exemplo, a média do coeficiente de consistência dos participantes da cena 1 quando avaliando o contraste usando CRT foi 0.8276.

Outra medida importante é a consistência ou concordância entre os participantes. Isto pode ser medido recorrendo ao coeficiente de concordância de Kendall, u [Kendall'40], e que é definido como

$$u = \frac{2 \sum_{i \neq j} \binom{p_{ij}}{2}}{\binom{s}{2} \binom{t}{2}} - 1 \quad (11)$$

onde p_{ij} é o número de vezes que o TMO $_i$ é preferido ao TMO $_j$ e s é o número de participantes.

Dado que o número de participantes é ímpar (19), o coeficiente u de concordância de Kendall pode variar entre $-1/19$ (quando a concordância é mínima) e 1 (quando a concordância é máxima). Para medir a significância do coeficiente, podemos testar a hipótese nula H_0 contra a hipótese alternativa H_1 , onde

H_0 : não há concordância entre os participantes

H_1 : o grau de concordância é maior do que se a avaliação das comparações fosse realizada de forma aleatória

Podemos ainda recorrer ao teste estatístico qui-quadrado (χ^2) para determinar a significância de u [Siegel'98].

$$\chi^2 = \frac{t(t-1)(1+u(s-1))}{2} \quad (12)$$

χ^2 é assintoticamente distribuída com $t(t-1)/2$ graus de liberdade. A significância estatística dos valores obtidos foram facilmente determinados usando tabelas de probabilidades.

			Coef	Coef	χ^2	signifi- cância p, 21 gl	1º	2º	3º	4º	5º	6º	7º
			conc u	Cons (méd) ζ									
Cena1	CRT	contraste	0.17905	0.827568	89	< 0.001	Du	Dr	R2	Fa	As	R5	Pa
	LCD	contraste	0.21358	0.851629	102	< 0.001	R2	Dr	Du	R5	As	Fa	Pa
	PDA	contraste	0.27819	0.783458	126	< 0.001	Dr	R2	Fa	As	Du	R5	Pa
	CRT	cor	0.38735	0.851629	167	< 0.001	R2	Du	Dr	R5	As	Fa	Pa
	LCD	cor	0.28822	0.839598	130	< 0.001	R2	Du	Dr	R5	As	Pa	Fa
	PDA	cor	0.23475	0.667167	110	< 0.001	R2	Du	Dr	As	Fa	R5	Pa
	CRT	detalhe	0.16680	0.883709	84	< 0.001	Du	R2	Dr	As	Fa	R5	Pa
	LCD	detalhe	0.25146	0.831578	116	< 0.001	Du	R2	Dr	Fa	As	R5	Pa
	PDA	detalhe	0.33945	0.775438	149	< 0.001	Fa	R2	Dr	As	Du	R5	Pa
	CRT	naturalidade	0.51211	0.923809	215	< 0.001	R2	Dr	Du	R5	As	Pa	Fa
	LCD	naturalidade	0.46978	0.951879	199	< 0.001	R2	Dr	Du	R5	As	Pa	Fa
	PDA	naturalidade	0.32609	0.715288	144	< 0.001	Dr	R2	Fa	Du	As	R5	Pa
Cena 2	CRT	contraste	0.34725	0.911779	152	< 0.001	R2	Dr	Pa	As	Du	Fa	R5
	LCD	contraste	0.45753	0.935839	194	< 0.001	R2	Dr	Pa	Du	As	R5	Fa
	PDA	contraste	0.36173	0.759398	158	< 0.001	R2	Dr	Fa	As	R5	Pa	Du
	CRT	cor	0.51991	0.947869	218	< 0.001	R2	Dr	As	Du	Pa	R5	Fa
	LCD	cor	0.54887	0.931829	228	< 0.001	R2	Dr	As	Du	Pa	Fa	R5
	PDA	cor	0.43748	0.855639	186	< 0.001	Dr	R2	Fa	As	Du	R5	Pa
	CRT	detalhe	0.36062	0.907769	157	< 0.001	Dr	R2	Pa	Fa	As	R5	Du
	LCD	detalhe	0.45976	0.931829	195	< 0.001	R2	Dr	Fa	As	Pa	Du	R5
	PDA	detalhe	0.44527	0.907769	189	< 0.001	Fa	R2	Dr	As	R5	Pa	Du
	CRT	naturalidade	0.56001	0.947869	233	< 0.001	R2	Dr	R5	Pa	As	Du	Fa
	LCD	naturalidade	0.63018	0.935839	259	< 0.001	Dr	R2	R5	As	Pa	Du	Fa
	PDA	naturalidade	0.44305	0.891729	188	< 0.001	Dr	R2	Du	As	R5	Fa	Pa

Tabela 4-2 Esta tabela apresenta o coeficiente de concordância de Kendall (u), o coeficiente de consistência (ζ) e a significância de p de acordo com os testes estatísticos de qui-quadrado (χ^2), para cada tipo de dispositivo e atributo. Os *rankings* de TMO daí resultantes são também indicados.

A Tabela 4-2 mostra que a concordância entre os participantes é estatisticamente significativa e que cada participante foi bastante consistente nas suas escolhas. Isto significa que obteve-se uma base de trabalho válida.

Ainda na Tabela 4-2 é possível observar todos os *rankings* parciais de TMO para cada tipo de dispositivo e critério de comparação (atributo).

A Tabela 4-3 apresenta a pontuação total obtida por cada TMO, estando marcados os valores mais elevados com um fundo de cor diferente. A pontuação total absoluta, isto é, a soma das quatro pontuações parciais por atributo de imagem, mostra que o resultado para CRT e LCD são semelhantes, mas ambos são muito diferentes relativamente aos resultados obtidos com PDA e isto sucede em ambas as cenas. Esta diferença é mais notada nos *rankings* finais obtidos para cada tipo de dispositivo de visualização, e são apresentados na Tabela 4-4.

	TMO	Contraste			Cor			Detalhe			Naturalidade			TOTAL		
		CRT	LCD	PDA	CRT	LCD	PDA	CRT	LCD	PDA	CRT	LCD	PDA	CRT	LCD	PDA
Cena 1	Fattal	46	33	68	23	16	55	40	56	86	11	16	68	120	121	277
	Drago	79	80	87	74	67	75	70	75	73	83	87	85	306	309	320
	Durand	82	76	50	85	79	75	84	83	51	76	82	62	327	320	238
	Ashikhmin	46	49	56	45	49	62	52	55	58	50	43	62	193	196	238
	Pattanaik	29	30	19	19	37	9	37	16	11	17	22	6	102	105	45
	Reinhard02	75	82	84	90	92	75	77	77	85	101	96	79	343	347	323
	Reinhard05	42	49	35	63	59	48	39	37	35	61	53	37	205	198	155
Cena 2	Fattal	38	23	75	23	24	66	53	58	97	6	6	35	120	111	273
	Drago	93	94	81	101	98	98	96	98	67	101	107	106	391	397	352
	Durand	40	47	24	43	54	45	25	24	12	40	43	54	148	168	135
	Ashikhmin	43	34	71	64	58	54	52	51	65	45	48	48	204	191	238
	Pattanaik	53	63	30	36	42	17	57	45	26	50	46	18	196	196	91
	Reinhard02	100	105	86	103	105	91	90	100	77	103	101	91	396	411	345
	Reinhard05	32	33	32	29	18	28	26	23	55	54	48	47	141	122	162

Tabela 4-3 Pontuação total de cada TMO. Em cada coluna estão marcados os melhores resultados sobre um fundo de cor diferente.

		CRT	LCD	PDA
Cena 1	1°	R2	R2	R2
	2°	Du	Du	Dr ↑
	3°	Dr	Dr	Fa ↑
	4°	R4	R4	Du ↓
	5°	As	As	As
	6°	Fa	Fa	R5 ↓
	7°	Pa	Pa	Pa
Cena 2	1°	R2	R2	Dr
	2°	Dr	Dr	R2
	3°	As	Pa	Fa ↑
	4°	Pa	As	As
	5°	Du	Du	R5
	6°	R4	R4	Du
	7°	Fa	Fa	Pa ↓

Tabela 4-4 Os *rankings* de TMO finais onde as setas apontam as principais mudanças no *ranking* dos PDA quando comparado com os *rankings* dos CRT e LCD.

Curiosamente, apesar de não ser o objetivo das experiências, é interessante constatar que os *rankings* de TMO resultantes para CRT e LCD são muito semelhantes a trabalhos realizados anteriormente. Nesses estudos o **R2** era geralmente um dos melhores e o **Dr** também mostrava boas prestações. O **Fa** foi considerado o que gera imagens menos naturais.

Para medir a significância da diferença identificada realizaram-se testes qui-quadrado de Pearson. Como se pode constatar na primeira linha de cada cena da Tabela 4-5 (CRT vs LCD

vs PDA), existem, de facto, diferenças significativas entre os *rankings* dos CRT, LCD e PDA. Consequentemente, pode-se rejeitar a hipótese nula definida inicialmente. Seguidamente, procedeu-se à análise dos outros três casos possíveis: CRT vs LCD, CRT vs PDA e LCD vs PDA. A hipótese nula correspondente a cada caso é:

$$H_0: \text{ranking}_{\text{CRT}} = \text{ranking}_{\text{LCD}} \quad (\text{CRT vs LCD})$$

$$H_0: \text{ranking}_{\text{CRT}} = \text{ranking}_{\text{PDA}} \quad (\text{CRT vs PDA})$$

$$H_0: \text{ranking}_{\text{LCD}} = \text{ranking}_{\text{PDA}} \quad (\text{LCD vs PDA})$$

Os resultados são apresentados na Tabela 4-5.

Testes de qui-quadrado - Cena 1			
	valor	graus de liberdade	significância assintótica
CRT vs LCD vs PDA	153.7	12	.000
CRT vs LCD	0.306	6	.999
CRT vs PDA	110.766	6	.000
LCD vs PDA	107.55	6	.000
Testes de qui-quadrado - Cena 2			
	valor	graus de liberdade	significância assintótica
CRT vs LCD vs PDA	168.618	12	.000
CRT vs LCD	3.741	6	.712
CRT vs PDA	108.205	6	.000
LCD vs PDA	129.601	6	.000

Tabela 4-5 Testes qui-quadrado de Pearson [Spss].

Estes testes mostram que não se pode rejeitar a hipótese nula para CRT vs LCD. Isto significa que os *rankings* obtidos para CRT e LCD não são significativamente diferentes. Por outro lado, podem-se rejeitar as hipóteses nulas para CRT vs PDA e LCD vs PDA, dado que o valor de p é menor que 0.05, resultando que, tanto o *ranking* dos CRT como dos LCD, são significativamente diferentes do *ranking* dos PDA.

Estes resultados demonstram que as pessoas veem as mesmas imagens mapeadas de forma diferente nos PDA em relação aos CRT ou LCD que têm maiores dimensões.

As experiências realizadas não só mostraram que, de facto, existem diferenças mas também indicaram linhas de orientação para o desenvolvimento ou ajuste de TMO para DEP. A

Tabela 4-4 mostra que o TMO do Fattal (***Fa***) desceu no *ranking* dos PDA comparativamente aos *rankings* dos CRT/LCD. Numa escala menor, o mesmo aconteceu com o TMO do Drago (***Dr***).

Tendo em conta esta observação, podemos legitimamente colocar a questão: Quais são as características especiais que um TMO para PDA deve ter? De acordo com os resultados, a aplicação do TMO ***Fa*** tende a exagerar os detalhes nas imagens quando visualizadas nos ecrãs tradicionais (de grandes dimensões) mas esta característica (elevado detalhe) parece ser de extrema importância quando a imagem mapeada é visualizada em PDA. Por outro lado, o TMO ***Dr*** é caracterizado por apresentar cores visualmente mais saturadas e a imagem mapeada ter, na sua globalidade, muito brilho. Estas características são notadas como desvantagens quando a imagem mapeada é vista num CRT ou LCD mas parecem ser fatores importantes nos PDA. Este facto vai de encontro ao trabalho realizado por Ridder, onde menciona que é necessária grande saturação de cor para compensar a redução do brilho nos dispositivos de visualização para atingir uma perceção mais natural da imagem [Ridder'96].

Apesar do TMO ***R2*** surgir no topo dos *rankings* dos CRT e LCD, perde força no *ranking* dos PDA (Tabela 4-3). Uma possível solução para se obter um melhor TMO para PDA pode passar pelo desenvolvimento de uma abordagem híbrida usando como base o TMO ***Dr*** mas melhorando os seus detalhes através do TMO ***Fa***.

4.3 Conclusão

Os resultados das experiências provaram que o tamanho limitado, baixa resolução e profundidade de cor presente nos DEP requerem uma abordagem diferente quando se mapeiam imagens HDR para serem visualizadas nesse tipo de dispositivos.

Os resultados indicam ainda que algumas características de imagem necessitam de ser realçadas pelos TMO para a obtenção de imagens percetivamente melhores para visualização em DEP. Estas características são: uma forte reprodução dos detalhes, cores mais saturadas e aparência da imagem com mais brilho. As experiências descritas neste capítulo e as suas conclusões deram origem a um artigo publicado na revista Computer Graphics Forum [Urbano'10].

O conhecimento obtido com estes resultados permitiu efetuar o desenvolvimento de um novo TMO para DEP que será descrito no próximo capítulo.

5. Proposta de um *Tone Mapping Operator* para Dispositivos com Ecrã Pequeno

Com base nos resultados obtidos nas experiências anteriores pretende-se desenvolver uma nova técnica para visualização de imagens HDR em dispositivos com ecrã pequeno. Assim, neste capítulo é descrita a metodologia de investigação utilizada e as etapas para atingir o objetivo proposto.

5.1 Metodologia de investigação adotada

Dada a natureza do trabalho de investigação a desenvolver, optou-se por seguir a metodologia investigação-ação. Pode-se esta metodologia como toda a tentativa continuada, sistemática e empiricamente fundamentada de aperfeiçoar a prática, baseando-se numa espiral autorreflexiva. Assim, planeia-se, implementa-se, descreve-se e avalia-se uma mudança efetuada para melhorar a prática, com o objetivo de aprender mais no decorrer do processo, tanto a respeito da prática quanto da própria investigação (Figura 5.1).

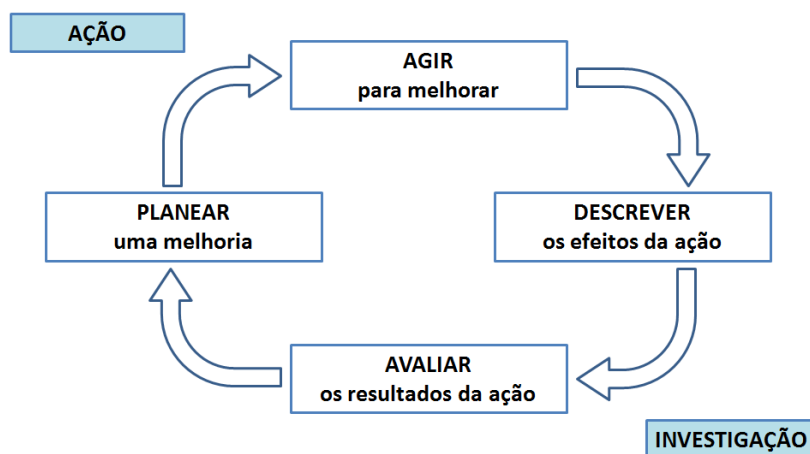


Figura 5.1 O processo da metodologia investigação-ação.

Este modo de investigação torna-se apelativo e motivador na medida em que é um processo essencialmente prático com o objetivo de melhorar as estratégias de trabalho utilizadas conduzindo a um melhoramento significativo na qualidade e eficácia da prática desenvolvida.

5.2 Abordagem proposta

Tendo por base a análise dos resultados obtidos com as experiências anteriores, onde ficou clara a necessidade de algoritmos apropriados para visualização de imagens HDR em DEP, pretende-se construir um TMO que produza melhores resultados em DEP. Um dado interessante desses resultados é que os TMO com melhor desempenho nos PDA demonstraram alguma fraqueza na reprodução de detalhes, conforme se pode observar na Tabela 4-3. Tendo em conta esta pista, a abordagem que se propõe baseia-se na construção de um TMO híbrido, o qual resulta na junção entre dois TMO. Um deles será o TMO base, seleccionado de entre um dos TMO que tenha sido considerado como tendo um desempenho razoável em DEP, o outro terá como objetivo o realce dos detalhes. A junção dos dois TMO será feita através de uma máscara apropriada, a qual identifica as zonas onde deve ser realçado o detalhe, e calculada consoante a imagem HDR a visualizar como ilustra a Figura 5.2.

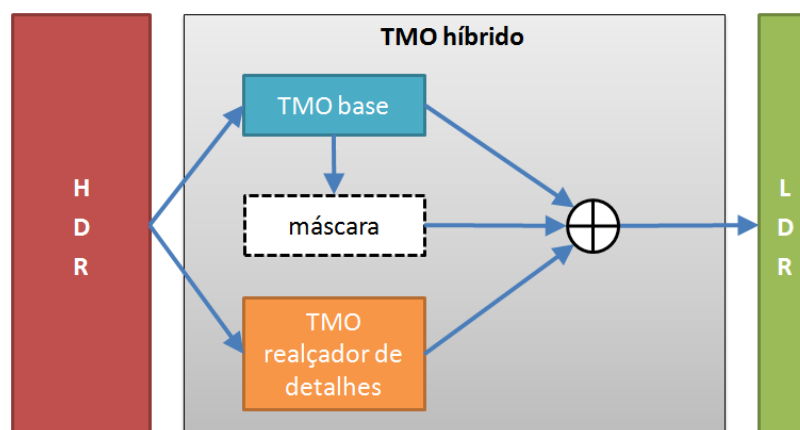


Figura 5.2 Abordagem utilizada para o desenvolvimento de um TMO apropriado para DEP.

Pretende-se, desta forma, melhorar o TMO base através do aperfeiçoamento das zonas da imagem onde existam muitos detalhes. Apesar da construção de TMO híbridos não ser novidade, como por exemplo a abordagem utilizada por Cadik em [Cadik'07], nunca foi utilizada no contexto dos DEP.

5.3 Avaliação preliminar/teste piloto

Da análise do *ranking* obtido para os DEP (Tabela 4-3) percebeu-se que o TMO do Drago funcionou muito bem em todos os atributos de imagem exceto nos detalhes. Com base nesta

observação, a primeira abordagem para construção de um TMO para DEP teve como premissa a melhoria do resultado da aplicação do TMO do Drago no que diz respeito aos detalhes mantendo, tanto quanto possível, as restantes características em que ele é forte. Ora, a mesma tabela indica que o melhor TMO nos detalhes foi o do Fattal. Com efeito, a ideia seria juntar ambos os TMO fazendo com que os detalhes do TMO do Fattal fossem, de certa forma, incluídos no do Drago através da criação de um TMO híbrido.

5.3.1 Criação do TMO

Conforme mencionado anteriormente, a junção do TMO do Drago com o do Fattal será realizada de acordo com uma máscara definida para o efeito. Essa máscara deve ser calculada de tal modo que indique as zonas onde o TMO do Fattal deva ser “acrescentado” ao do Drago de forma a melhorar-lhe os detalhes. A máscara será, então, uma imagem com a mesma dimensão da imagem original contendo o peso, valor $\in [0, 255]$, que o TMO do Fattal terá na imagem mapeada final.

Construção da máscara

É conhecido que existe uma grande relação entre os contornos e as zonas de grande detalhe de uma imagem. Partindo desta premissa, a construção da máscara de junção é baseada num algoritmo de deteção de contornos, nomeadamente, no Laplaciano da Gaussiana (13) que foi aplicado à imagem mapeada com o TMO do Drago depois de convertida em tons de cinzento.

$$LoG(x, y) = -\frac{1}{\pi\sigma^4} \left[1 - \frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2} \right] e^{-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}} \quad (13)$$

Onde σ é o desvio padrão da gaussiana.

Os primeiros testes para construção da máscara de junção fizeram parte de um artigo publicado no 17º EPCG [Urbano'09] mas para melhor se perceber como evoluiu a construção da máscara, será apresentado um exemplo. Assim, se for aplicado o Laplaciano da Gaussiana à imagem em tons de cinzento convertida da imagem da Figura 5.3, obtém-se a máscara ilustrada na Figura 5.4.

Obviamente, neste momento, a máscara é constituída por simples linhas que definem os contornos do conteúdo da imagem. Porém, dado que se pretende usar a máscara de forma

direta e para que a junção dos 2 TMO seja mais suave, é necessário que nela estejam definidas regiões. A ideia seria criar regiões onde houvessem aglomerados de detalhes, ou seja, identificar na imagem, *clusters* de detalhes. Então, com a dilatação dos contornos seguida do preenchimento dos buracos conseguem-se definir os tais *clusters*. Para as zonas não “passem” dos limites definidos pelos contornos, faz-se uma erosão de valor semelhante à da dilatação.



Figura 5.3 Imagem base exemplificativa da construção da máscara de junção.



Figura 5.4 Máscara obtida após aplicar o Laplaciano da Gaussiana para deteção de contornos.

O resultado da execução deste trio algorítmico está demonstrado na Figura 5.5.

Por forma a suavizar a transição entre o TMO do Drago e o TMO do Fattal é importante que as zonas de fronteira da máscara sejam também suavizadas. Isto pode ser obtido com um *blur*. No entanto, para garantir que a aplicação do *blur* seja corretamente efetuada nos limites da imagem, primeiro procedeu-se ao aumento do tamanho da máscara (Figura 5.6).

O *blur* pode agora ser aplicado, sendo necessário proceder posteriormente à redução das dimensões da máscara para que fique com o mesmo tamanho da imagem original (Figura 5.7).

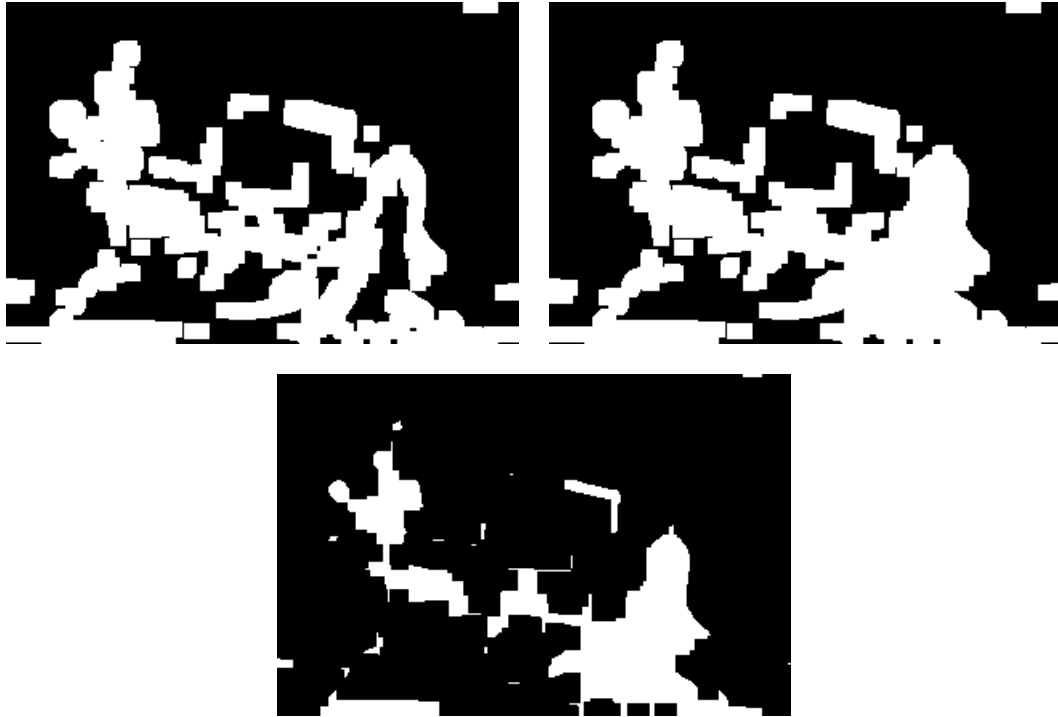


Figura 5.5 Progresso da máscara após dilatação (em cima à esquerda), preenchimento de buracos (em cima à direita) e erosão (em baixo).



Figura 5.6 Aumento do tamanho da máscara.

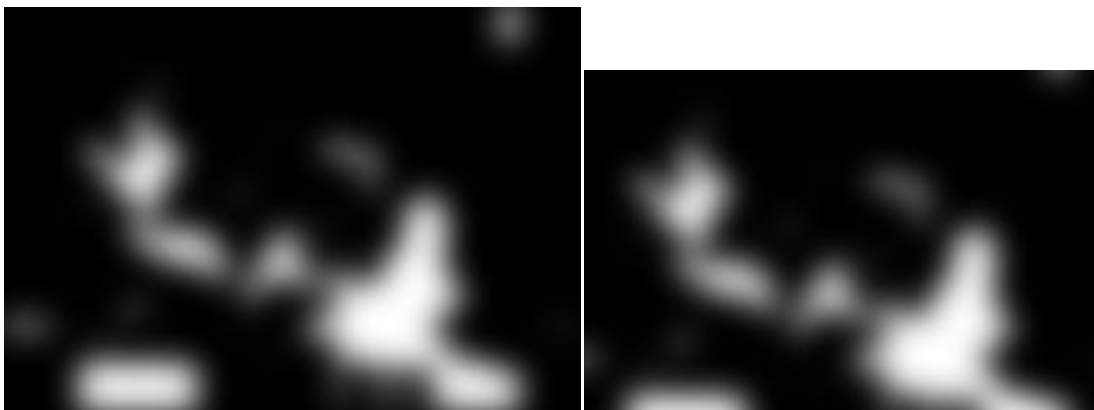


Figura 5.7 *Blur* (à esquerda) e redução da máscara (à direita).

O *blur* aplicado foi um *gaussian blur* cuja equação é dada por

$$G(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \quad (14)$$

Depois de construída a máscara, pode-se realizar a junção dos dois TMO. Esta junção pode ser parametrizável podendo ser afinados o valor da dilatação/erosão, o valor do *blur* e ainda a opacidade. A opacidade pode tomar o valor real entre 0 e 1, definindo o grau de influência que o TMO do Fattal terá na imagem final resultante. A Figura 5.8 mostra como é feito o mapeamento utilizando esta técnica híbrida.

Uma vez definido o TMO, é necessário proceder à sua avaliação através da comparação com outros existentes. Esta avaliação foi realizada recorrendo a experiências psicofísicas, de modo semelhante às anteriormente realizadas mas com uma diferença. Pretendendo que cada TMO veja o seu comportamento maximizado procedeu-se à afinação dos parâmetros de cada um. O processo de afinação será exposto na próxima secção e o desenho experimental abordado posteriormente.

5.3.2 Afinação dos parâmetros

De modo a avaliar o TMO construído, foram realizadas duas experiências psicofísicas para comparação com seis outros TMO bem conhecidos: os cinco que obtiveram melhor classificação nas experiências anteriores ([Drago'03b], [Fattal'02], [Durand'02], [Reinhard'02] e [Reinhard'05a]) e um mais recente cuja principal característica é a adaptação ao dispositivo de visualização ([Mantiuk'08]).

Nas experiências anteriores, a afinação dos parâmetros de cada TMO não era um aspeto relevante, uma vez que apenas se pretendia comparar *rankings* e não determinar qual o melhor ou o pior TMO. No entanto, nas experiências para avaliação do novo TMO, entendeu-se considerar que cada TMO deveria ser utilizado na sua máxima performance, ou seja, com os parâmetros corretamente afinados para cada cena utilizada. Visto tratar-se de uma operação sensível e delicada, no desenho experimental será feita uma descrição pormenorizada da abordagem utilizada para a afinação de cada TMO.

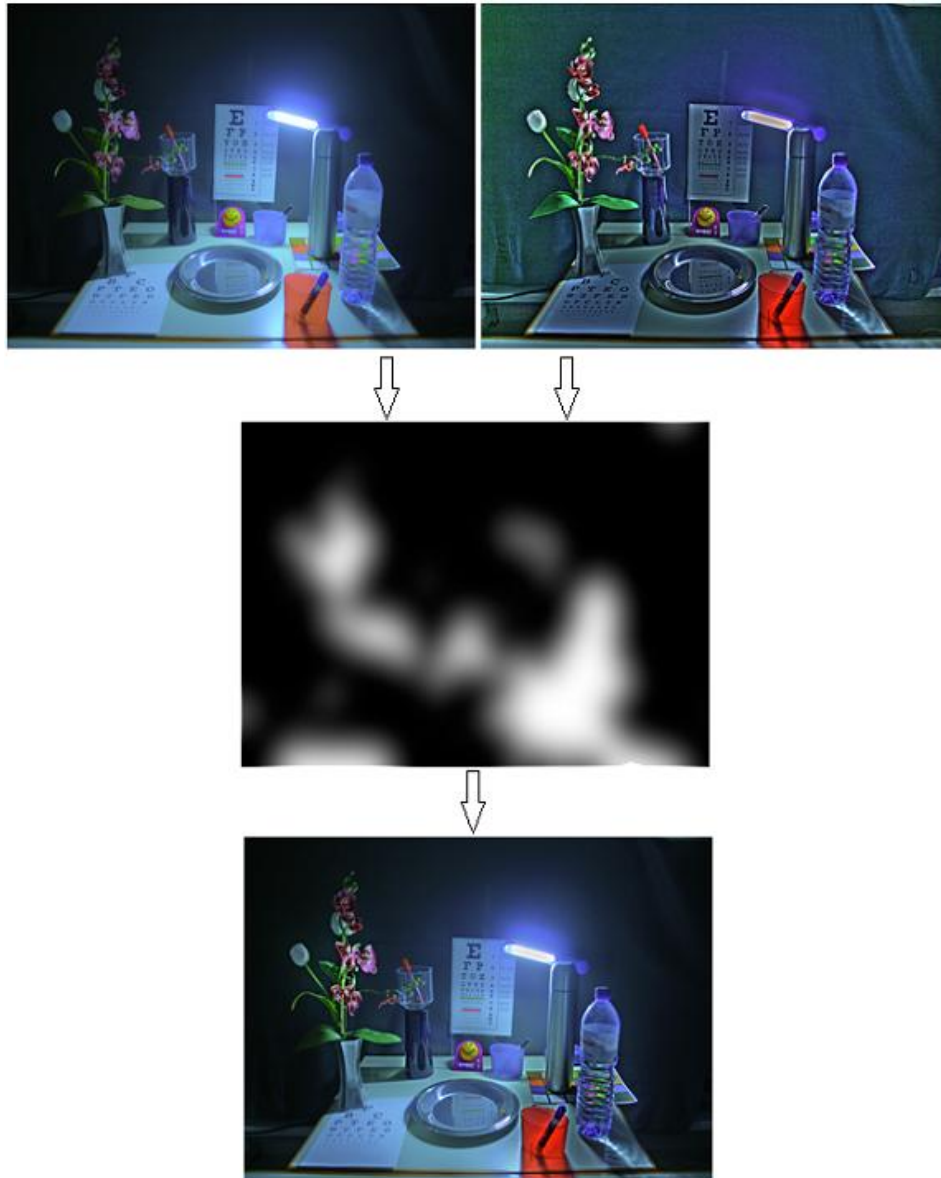


Figura 5.8 Construção do novo TMO para a imagem exemplo.

Na Tabela 5-1 estão identificados os TMO utilizados nas experiências e os seus correspondentes parâmetros.

TMO	Parâmetros
Fattal	Alpha; Beta; Saturation; Gamma
Mantiuk08	Luminance Level; Color Saturation; Contrast Enhancement; Gamma
Drago	Bias; Gamma
Durand	Spatial; Range; Base; Gamma
Reinhard02	Key; Phi; Gamma
Reinhard05	Brightness; Chromatic Adaptation; Light Adaptation; Gamma

Tabela 5-1 TMO utilizados nas experiências e respetivos parâmetros.

5.3.3 Desenho experimental

Conduziram-se duas experiências, cada uma tendo por objeto uma cena diferente. Em cada uma das experiências foram utilizados dois PDA como dispositivos de visualização. Tal como nas experiências anteriores, escolheram-se dois PDA como DEP pois apresentam as características consideradas representativas de um DEP típico. Na descrição das experiências, o termo PDA será utilizado em vez de DEP.

Em cada experiência foi pedido aos participantes que fizessem comparações par-a-par, escolhendo uma das duas imagens mapeadas e mostradas nos dois PDA que, na sua opinião, fosse a mais parecida com a cena real à sua frente. De modo semelhante às anteriores experiências, em cada comparação, os participantes fizeram a sua escolha baseada em quatro propriedades de imagem: cor, detalhe, contraste e naturalidade.

Processo de afinação dos TMO

Conforme previamente aludido, nestas experiências pretendia-se confrontar o TMO proposto com outros 6. Na secção anterior referiu-se que cada um desses 6 TMO tem diferentes parâmetros, tanto em quantidade (uns têm apenas 1, outros têm 4) como em significado. Como se pretende que sejam testados na sua “máxima performance”, tal implicou a afinação dos seus parâmetros de modo a estarem ajustados a cada uma das duas cenas utilizadas. Considerando que estes algoritmos requerem algum tempo de execução torna-se difícil testar, de forma interativa e em tempo real, todas as combinações possíveis de todos os parâmetros.

Assim, foi criada uma aplicação que possibilita de uma forma mais fácil e interativa combinar os diversos parâmetros de cada TMO, permitindo afiná-los a cada uma das duas cenas das experiências. Para cada TMO foram geradas previamente, via *script*, várias imagens fruto de diversas combinações possíveis dos seus parâmetros. Este processo de geração prévia das imagens mapeadas é muito demorado dado a imagem HDR de cada cena ter uma resolução elevada (3456×2304) tornando mais pesada a aplicação dos TMO. Além disso, depois de geradas as imagens, é necessário ainda proceder ao *rescaling* das mesmas de forma que fiquem com resolução apropriada aos DEP (320×214). Para este *rescaling* recorreu-se ao *software* ACDS_{See} Pro [Acdsee_{pro}].

Para afinar os parâmetros dos TMO para a cena utilizada na primeira experiência (ilustrada na Figura 5.3), além dos parâmetros específicos de cada TMO foi incluída a possibilidade de afinar também o valor *gamma* para um de três valores: 1, 2 ou 2.2. O valor 1 mantém a imagem inalterada, enquanto os valores 2 e 2.2 são valores usuais para correção *gamma*.

As Figura 5.9 e Figura 5.10 mostram exemplos de páginas utilizadas para afinação de parâmetros de TMO, no caso concreto do Drago [Drago'03b] e do Mantiuk [Mantiuk'08], respetivamente.

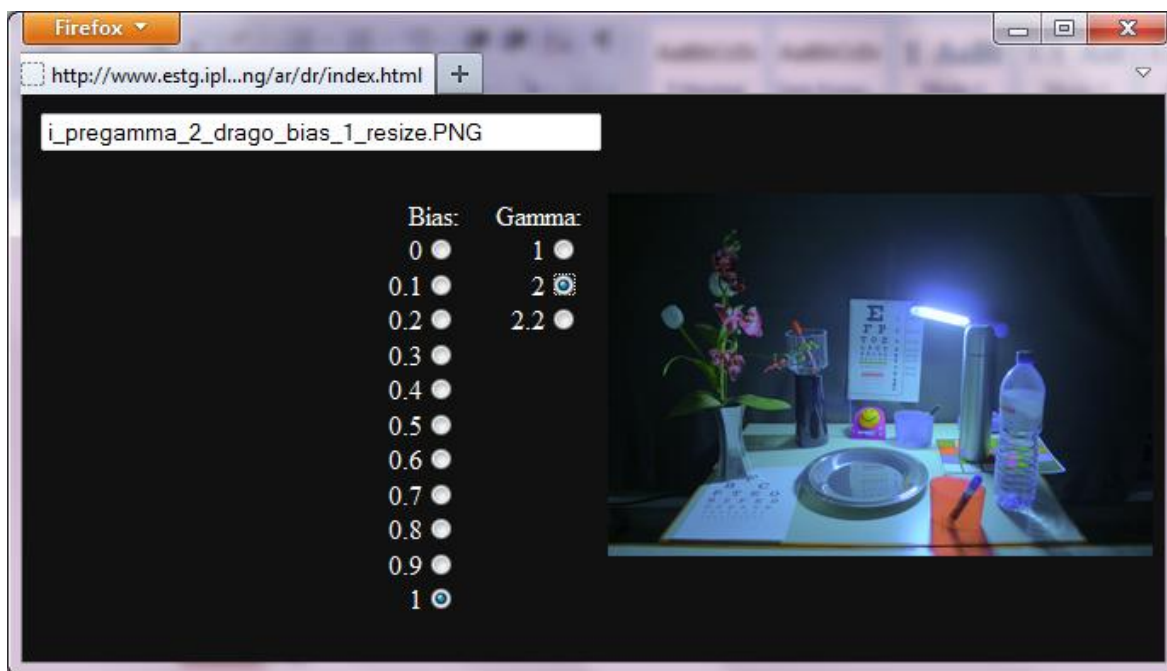


Figura 5.9 Janela para afinação dos parâmetros do TMO do Drago para a imagem da cena 1.

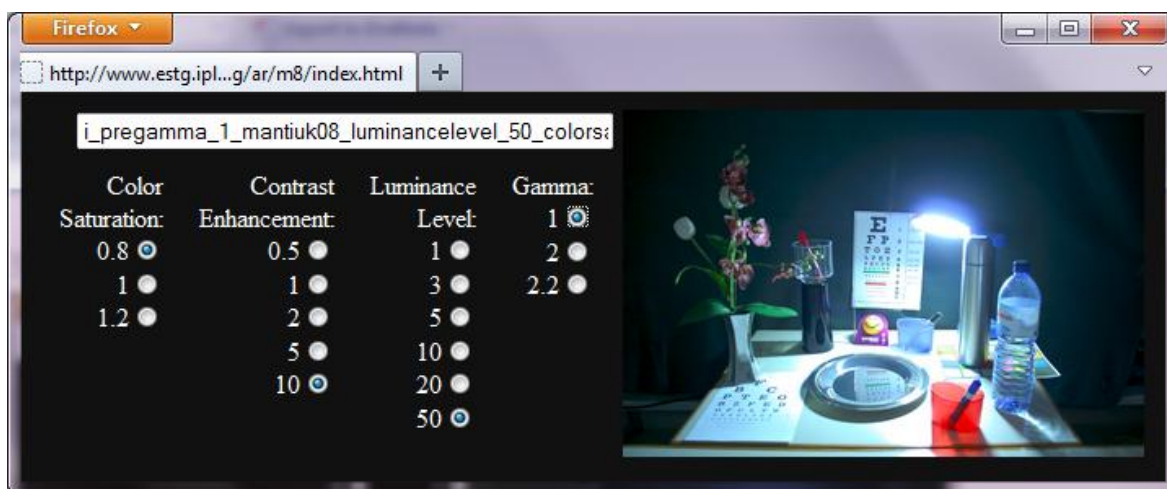


Figura 5.10 Janela para afinação dos parâmetros do TMO do Mantiuk para a imagem da cena 1.

De salientar o cuidado dispensado para que o tamanho das imagens resultantes da combinação de parâmetros fosse de tamanho semelhante ao de um vulgar PDA. Além disso, pretendeu-se colocar como cor de fundo um tom de cinzento muito escuro, na tentativa de não influenciar a visualização da imagem afinada.

Participaram no processo de afinação 5 pessoas, 3 delas com bastante conhecimento da área da Computação Gráfica e Fotografia e ainda 2 alunos de Engenharia Informática. No final deste processo de afinação, resultaram para a cena da primeira experiência os parâmetros da Tabela 5-2 e para a cena da segunda experiência os parâmetros da Tabela 5-3.

Cena da 1ª experiência	
Fattal	Alpha=1.25; Beta=0.95; Saturation=0.5; Gamma=1
Mantiuk08	Luminance Level=50; Color Saturation=0.8; Contrast Enhancement=10; Gamma=1
Drago	Bias=1; Gamma=2
Durand	Spacial=50; Range=10; Base=2.5; Gamma=2
Reinhard02	Key=0.05; Phi=1; Gamma=2
Reinhard05	Brightness=-2; Chromatic Adaptation=0.9; Light Adaptation=0.3; Gamma=2

Tabela 5-2 Parâmetros utilizados na cena da primeira experiência após o processo de afinação.

Cena da 2ª experiência	
Fattal	Alpha=0.1; Beta=0.95; Saturation=1; Gamma=1
Mantiuk08	Luminance Level=80; Color Saturation=1.2; Contrast Enhancement=1; Gamma=1
Drago	Bias=0.55; Gamma=1
Durand	Spacial=1; Range=2; Base=4; Gamma=1
Reinhard02	Key=1; Phi=1; Gamma=1
Reinhard05	Brightness=-2; Chromatic Adaptation=0.8; Light Adaptation=0.8; Gamma=2

Tabela 5-3 Parâmetros utilizados na cena da segunda experiência após o processo de afinação.

Hipótese estatística

Prevê-se que o TMO proposto produza, em comparação, melhores imagens do que os restantes TMO. A hipótese experimental foi então

$$H_0 : \text{pontuação}_{\text{NOVO_TMO}} > \text{pontuação}_{\text{TMO}_i}$$

onde TMO_i identifica cada um dos outros 6 TMO.

Participantes

Na primeira experiência participaram 19 pessoas e na segunda apenas participaram 6 pessoas. Todos tinham visão normal ou corrigida para normal e com idades compreendidas entre os 18 e os 40 anos. Foi dado tempo suficiente para cada observador se adaptar ao nível de iluminação do local das experiências antes de iniciar a sua participação. Não foi imposto qualquer limite de tempo para o processo de escolha e seleção de imagens.

Condições

Escolheu-se para a primeira experiência uma cena com elevada gama dinâmica onde existiam zonas com muita luz contrastando com zonas de muita escuridão. Além disso, decidiu-se incluir objetos com elevado grau especular. A cena é a já indicada anteriormente na Figura 5.3.

Para a segunda experiência utilizou-se uma cena que partia do interior de um edifício para o seu exterior. O exterior continha a maior parte da cena e caracterizava-se por ter iluminação natural de um dia ensolarado contendo também algumas zonas sombrias (Figura 5.11).

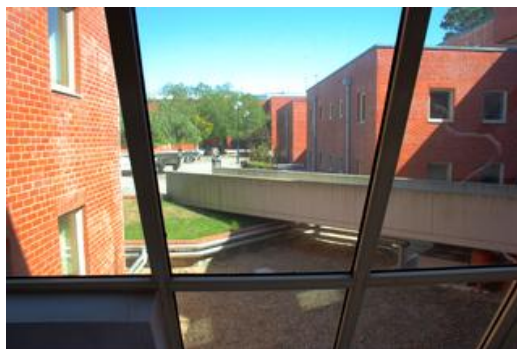


Figura 5.11 Imagem HDR da cena utilizada na segunda experiência.

Na segunda experiência apenas participaram 6 pessoas dado tratar-se de uma cena *outdoor* onde a experiência estava limitada à janela temporal em que a luz solar e as sombras se mantinham aceitavelmente estáveis.

A cada participante foi pedido que observasse todas as combinações de pares de imagens mapeadas possíveis que, neste caso, perfizeram 21 pares de imagens. Em todas as ocasiões, cada participante observou 2 imagens mais a cena real. A cena real estava situada em frente e deveria ser usada como referência para as comparações. Os dois PDA estavam colocados num

suporte portátil que permitia aos utilizadores terem-nos juntos numa só mão. De forma a evitar confusões foi informado a cada participante que deveriam avaliar a semelhança perceptual (conforme descrito na secção 2.4.3). Por exemplo, é mau se uma imagem tem menos detalhe do que a cena real mas, é igualmente mau, se tiver mais detalhe. Assim, o participante deverá escolher a imagem que, na sua opinião, mais se aproxima à cena real.

Como resultado da primeira experiência obteve-se um total de 19 participantes \times 4 atributos \times 21 pares = 1596 valores de observação. Na segunda experiência obteve-se um total de 6 participantes \times 4 atributos \times 21 pares = 504 valores de observação.

Nas experiências existiu, então, uma variável independente (os TMO) e quatro variáveis dependentes (os atributos de imagem).

Procedimento

Cada participante fez a sua escolha baseando-se numa dada propriedade a ser testada, ou seja, um atributo de imagem. Todos os pares de imagens foram mostrados de forma aleatória e o participante tinha de escolher a imagem que lhe parecia perceptivamente mais semelhante à cena real à sua frente, tendo em conta o atributo de imagem a avaliar. A escolha era feita através de cliques em cima das imagens, sendo que primeiro clicava na que achava mais parecida à cena real e depois na outra. Utilizou-se o mesmo *software* desenvolvido nas experiências anteriores.

Cada participante demorou cerca de 20 a 30 minutos a completar os 21 pares de imagens \times 4 atributos = 84 comparações.

5.3.4 Análise e discussão dos resultados

A Tabela 5-4 descreve as pontuações obtidas por cada TMO em ambas experiências. São mostrados os valores parciais por atributo de imagem e também os valores totais.

Os *rankings* finais obtidos podem ser vistos na Tabela 5-5.

TMO	Contraste		Cor		Detalhe		Naturalidade		TOTAL	
	Cena1	Cena2	Cena1	Cena2	Cena1	Cena2	Cena1	Cena2	Cena1	Cena2
Urbano	70	23	64	16	71	23	61	19	266	81
Drago	66	18	68	20	64	22	73	17	271	77
Fattal	38	3	12	4	47	15	1	2	98	24
Mantiuk08	44	28	47	32	52	22	42	31	185	113
Durand	70	13	71	9	68	7	71	10	280	39
Reinhard02	43	19	50	15	40	19	63	17	196	70
Reinhard05	68	22	87	30	57	18	88	30	300	100

Tabela 5-4 Pontuações obtidas por cada TMO nas duas experiências realizadas.

	Cena 1	Cena 2
1º	R5	M8
2º	Du	R5
3º	Dr	Ur
4º	Ur	Dr
5º	R2	R2
6º	M8	Du
7º	Fa	Fa

Tabela 5-5 - *Rankings* obtidos.

Como facilmente se pode observar, o TMO novo (Urbano – Ur) não teve a prestação esperada. O TMO do Fattal que nas experiências anteriores tinha sido o melhor nos detalhes, nestas experiências foi pouco eficaz especialmente nesse aspeto. Isso poderá explicar o fraco desempenho no novo TMO, uma vez que depende dos “bons” detalhes do TMO do Fattal. Provavelmente os fracos detalhes obtidos no TMO do Fattal deveram-se ao processo de afinação, onde se equilibra conjuntamente todos os atributos de imagem.

A base do TMO novo é o do Drago mas, como se pode ver, na primeira experiência, o do Drago foi ligeiramente melhor que o novo, invertendo-se os papéis na segunda experiência. Isto é, a junção do Fattal ao Drago não trouxe grandes melhorias.

Além disso, o novo TMO está longe da primeira posição nos *rankings*, o que permite concluir que a afinação efetuada nos TMO, ao contrário das experiências anteriores, veio baralhar um pouco os *rankings* comparativamente aos anteriormente obtidos.

5.4 Proposta final

Os resultados das últimas experiências orientaram o melhoramento da solução proposta noutra sentença. Salientam-se dois pontos fundamentais nessa melhoria. Um desses pontos é ser o utilizador a escolher o TMO base a utilizar, continuando a aposta no TMO do Fattal para os detalhes. O outro ponto da melhoria é dar ao utilizador a possibilidade de afinar os parâmetros criando a sua própria solução, a que lhe parece mais agradável.

A nossa proposta final passa então por melhorar um qualquer TMO (base) através do aperfeiçoamento dos detalhes recorrendo ao TMO do Fattal com afinação dos parâmetros pelo utilizador (Figura 5.12).

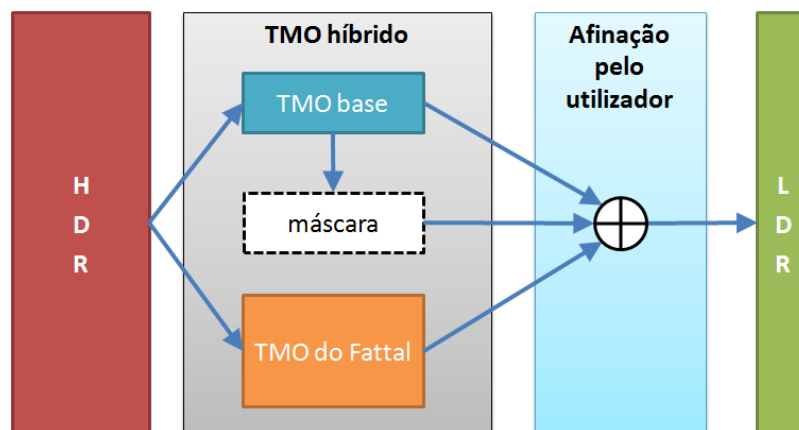


Figura 5.12 Proposta final do novo TMO híbrido.

No próximo capítulo será feita a avaliação desta proposta final.

6. Avaliação do *Tone Mapping Operator* Proposto

Do estudo descrito no capítulo anterior resultou a ideia de construir um TMO que melhora os detalhes de uma imagem obtida pela aplicação de um qualquer TMO base. Assim, dada uma imagem HDR a que tenha sido aplicado um TMO, a nossa metodologia permite melhorar os detalhes contidos nessa imagem, aplicando adequadamente o TMO do Fattal em zonas identificadas como contendo uma elevada concentração de detalhes. Este processo não é estático, sendo possível ao utilizador criar a sua própria solução através da afinação de alguns parâmetros.

Neste capítulo é descrito o processo de avaliação do TMO proposto, sendo explicado o desenho experimental para avaliação deste novo TMO bem como a análise e discussão dos resultados obtidos.

6.1 Desenho experimental

Para avaliar o TMO proposto, realizou-se uma experiência psicofísica onde diversas pessoas tiveram de afinar 3 parâmetros e verificar se a imagem resultante dessa afinação era pior, melhor ou se mantinha em relação à original (resultante da aplicação direta do TMO base). De salientar que os participantes desconheciam o efeito específico da aplicação do TMO proposto.

Hipótese estatística

Presumiu-se que o TMO proposto produz melhorias, na maioria das vezes, a uma imagem mapeada com um qualquer TMO.

$$H_0 : \frac{M_{\text{NOVO_TMO}}}{pm_{\text{NOVO_TMO}}} > 50\%$$

onde $M_{\text{NOVO_TMO}}$ corresponde ao número de melhorias obtidas pelo novo TMO e $pm_{\text{NOVO_TMO}}$ corresponde ao número de imagens que pioraram ou mantiveram-se após as afinações.

Participantes

Participaram na experiência 54 pessoas com visão normal ou corrigida para normal e com idades compreendidas entre os 18 e os 40 anos. Não foi imposto qualquer limite de tempo para o processo de afinação e avaliação das imagens.

Condições

Para a experiência foram utilizadas 7 imagens HDR escolhidas de forma a que abrangessem cenários diversos como exterior, interior, iluminação natural, iluminação artificial, etc. As imagens utilizadas são listadas na Figura 6.1.

Como TMO base escolheu-se o do Mantiuk [Mantiuk'08] e o do Reinhard [Reinhard'05a], por terem obtido bons resultados nas experiências anteriores, tornando o desafio de os melhorar ainda maior. Da aplicação destes 2 TMO às 7 imagens HDR obtiveram-se 14 imagens mapeadas. A estas juntaram-se ainda 6 imagens placebo de forma a avaliar a robustez das decisões dos participantes. Estas 6 imagens mantinham-se sempre iguais à original independentemente da afinação efetuada pelos participantes. Assim, no total, cada participante teve de afinar e avaliar 20 imagens.

Os parâmetros que cada participante teve de afinar para cada imagem permitiam alterar a forma como a junção do TMO do Fattal seria feita na imagem original. A saber, esses parâmetros são: desvio padrão do Laplaciano da Gaussiana (σ), espessura e opacidade. Para melhor se perceber a influência dos parâmetros mostrou-se como exemplo a imagem da bem conhecida *memorial church* [Debevec'98].

σ – é o desvio padrão do Laplaciano da Gaussiana utilizado para calcular as arestas de uma imagem. Por omissão, este parâmetro tem o valor 2 mas, na experiência, foi permitido que cada utilizador escolhesse um dos valores do conjunto $\{2, 3, 4\}$. Ver Figura 6.2.

Espessura – este valor permite aumentar as arestas, determinadas pelo Laplaciano da Gaussiana, transformando-as em áreas que entendeu-se serem suscetíveis de possuírem

detalhes, as quais merecem ser melhoradas. Os valores permitidos para este parâmetro foram {5, 6, 7, 8, 9, 10}. Ver Figura 6.3.

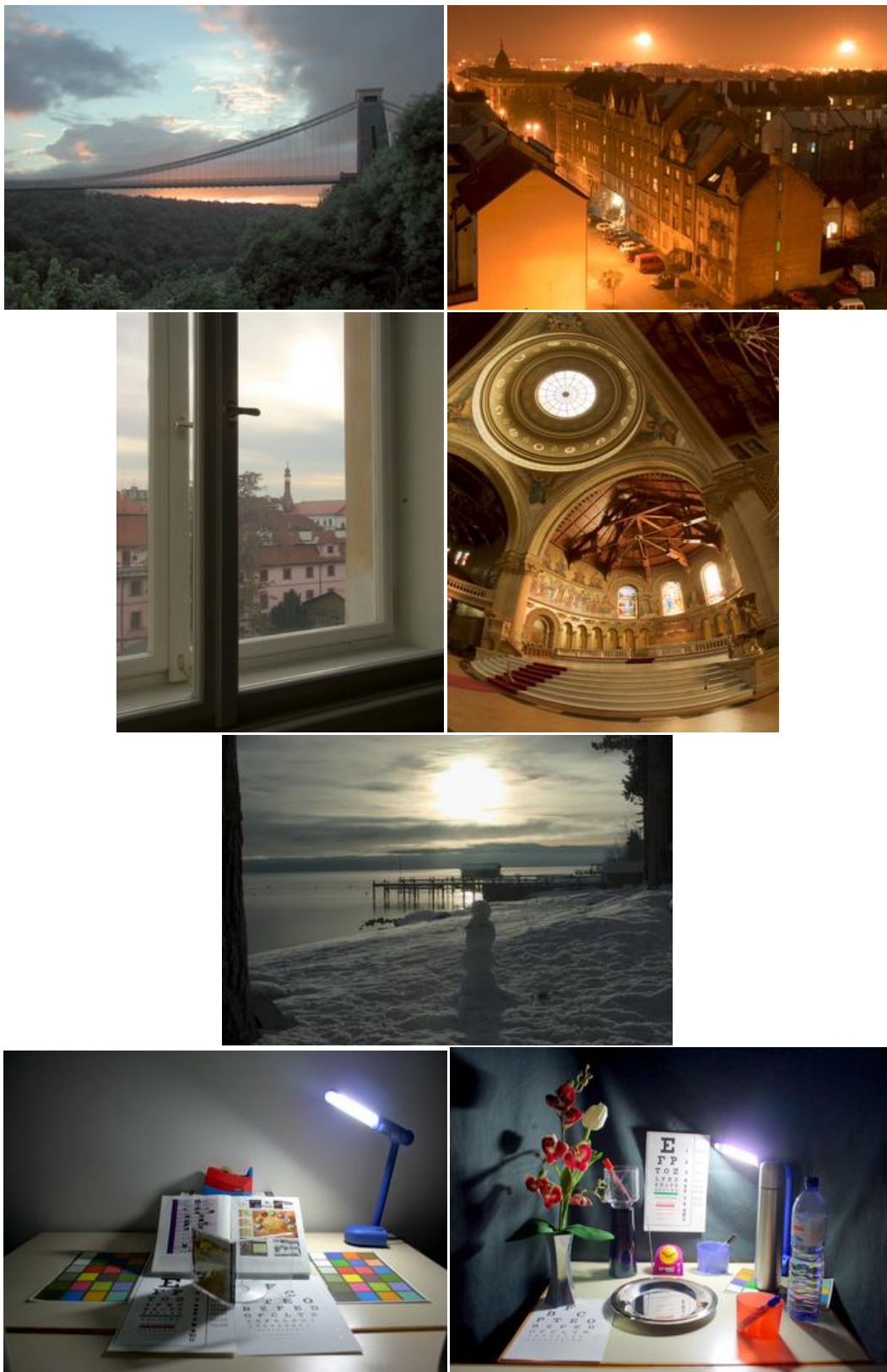


Figura 6.1 As 7 imagens HDR utilizadas na experiência (1ª, 4ª e 5ª imagens originais de [Reinhard'05b] e 2ª e 3ª imagens originais de [Cadik'08]).

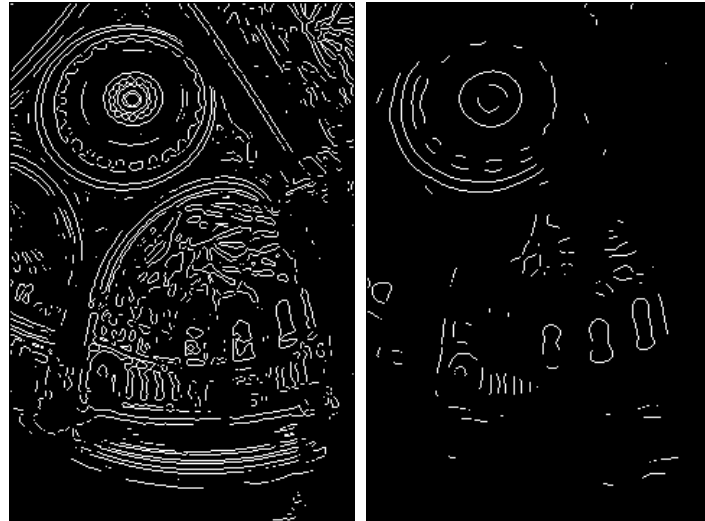


Figura 6.2 Máscara da *memorial* com valores de sigma =2 (à esquerda) e =4 (à direita).

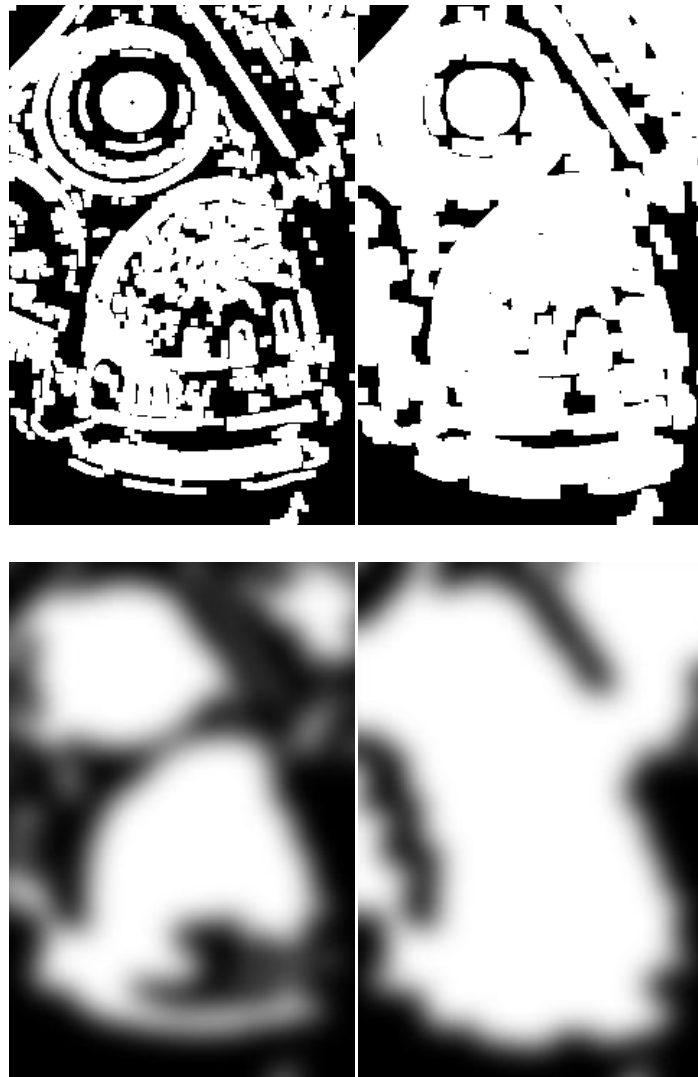


Figura 6.3 Máscara da *memorial* com espessura =5 (cima à esquerda) e =10 (cima à direita) ambas com sigma = 2. Em baixo, as máscaras correspondentes mas já finais (com todos os passos efetuados).

Opacidade – a opacidade define o fator de peso que o TMO do Fattal terá na imagem final nas regiões definidas pela máscara. Na experiência, os valores permitidos foram {0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0}. Ver Figura 6.4.

Procedimento

Para que o número de participantes fosse elevado decidiu-se que a experiência se realizaria em suporte *web*, onde cada participante visualizaria a imagem inicial e a imagem alterada simultaneamente num ecrã LCD tradicional através de um *web browser*. As imagens visualizadas apareciam com o tamanho médio de um ecrã de PDA. Desta forma, para afinação dos parâmetros e tomadas de decisão por parte dos participantes durante a experiência, foi utilizada uma aplicação cuja interface gráfica está ilustrada na Figura 6.5.

Na parte superior, aparece a indicação do teste atual e o número total de testes, permitindo que o participante tenha a perceção do número de testes que fez e que ainda falta fazer. Logo abaixo, são mostradas duas imagens, A e B, onde a imagem A é a original, isto é, mapeada com o TMO do Reinhard ou o TMO do Mantiuk, e que nunca se altera durante o teste pelas afinações realizadas. A imagem B é a alterada tendo em conta as afinações que o participante vai fazendo nos parâmetros situados no lado direito das imagens. Esta abordagem permite a comparação entre a imagem B (alterada) com a imagem A (original), onde o participante deve decidir se os detalhes da imagem melhoraram, pioraram ou se mantiveram. No caso de escolher a opção “melhoraram”, são mostrados 3 níveis de melhoria dos quais deve escolher um (ver Figura 6.6).

Todas as imagens foram mostradas de forma aleatória, onde a sequência das imagens a testar diferia de participante para participante. Cada participante tinha de afinar os 3 parâmetros e depois decidir se com essa afinação os detalhes melhoraram, pioraram ou se mantiveram. Foi desenvolvido um *software* específico para esta experiência, o qual permite, entre outras funcionalidades, que: cada pessoa participe apenas uma vez; as suas escolhas e decisões sejam guardadas em bases de dados; a qualquer momento o participante possa avançar para o teste seguinte ou regressar a um teste anterior, podendo realizar as alterações que entender necessárias; é permitido que a experiência seja realizada em várias sessões (botão “Guardar e Sair”) evitando fadiga por parte do participante; este é ainda livre de desistir a qualquer

momento sendo descartadas todas as suas decisões tomadas (botão “Desistir”). A aplicação efetua ainda uma análise estatística descritiva sobre os resultados.



Figura 6.4 *Memorial* com opacidade =0.5 (à esquerda) e =1.0 (à direita) ambas com $\sigma=2$ e espessura = 10.

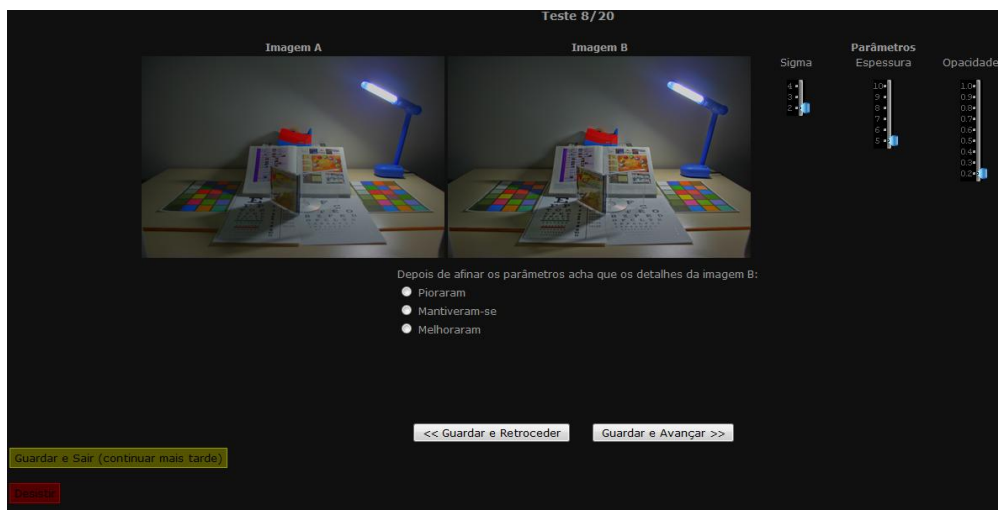


Figura 6.5 Interface gráfica utilizada na experiência.

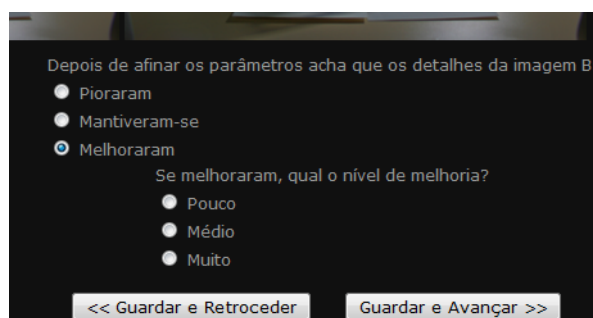


Figura 6.6 Opções disponíveis para os participantes avaliarem a melhoria ou não dos detalhes. Os níveis de melhoria apenas aparecem caso o participante escolha a opção “Melhoraram”.

6.2 Análise e discussão dos resultados

Os resultados obtidos na experiência após participação das 54 pessoas estão descritos na Tabela 6-2.

Constata-se, assim, que os participantes, na sua maioria, avaliaram respondendo de forma robusta e não-aleatória, dado que nas imagens placebo os resultados foram os esperados. Satisfatoriamente, o TMO proposto permitiu melhorar todas as 14 imagens num rácio superior a 50%, demonstrando ser verdadeira a nossa hipótese estatística H_0 definida anteriormente. Claro que distinguir os vários níveis de melhoria não é fácil visto que cada participante tem a sua própria noção de pouco, médio e muito. Ainda assim, é de realçar que todas as 14 imagens obtiveram uma percentagem elevada de “muita melhoria”.

Relativamente aos parâmetros e suas afinações, realizou-se a análise recorrendo ao cálculo da moda para identificar quais as afinações mais utilizadas pelos participantes. A Tabela 6-1 descreve a moda por parâmetro para cada imagem.

Nº Imagem	Moda		
	Sigma	Espessura	Opacidade
1	2	10	2
2	2	8	2
3	4	5	2
4	2	10	2
5	2	10	5
6	2	10	2
7	2	10	2
8	2	10	10
9	4	10	2
10	2	10	10
11	2	10	2
12	4	10	2
13	4	10	2
14	2	10	2
Total	2	10	2

Tabela 6-1 Modas dos valores escolhidos para os 3 parâmetros para cada imagem.

Imagem (TMO)	Piorou	Manteve-se	Melhorou Pouco	Melhorou Médio	Melhorou Muito	Gráficos
1 (Mantiuk08) 	4	3	25	14	8	 <ul style="list-style-type: none"> ■ melhorou muito ■ melhorou médio ■ melhorou pouco ■ manteve-se ■ piorou
2 (Reinhard05) 	8	4	10	18	14	 <ul style="list-style-type: none"> ■ melhorou muito ■ melhorou médio ■ melhorou pouco ■ manteve-se ■ piorou
3 (Mantiuk08) 	6	8	20	18	2	 <ul style="list-style-type: none"> ■ melhorou muito ■ melhorou médio ■ melhorou pouco ■ manteve-se ■ piorou
4 (Reinhard05) 	7	1	15	8	23	 <ul style="list-style-type: none"> ■ melhorou muito ■ melhorou médio ■ melhorou pouco ■ manteve-se ■ piorou
5 (Mantiuk08) 	1	2	20	19	12	 <ul style="list-style-type: none"> ■ melhorou muito ■ melhorou médio ■ melhorou pouco ■ manteve-se ■ piorou
6 (Reinhard05) 	4	2	18	16	14	 <ul style="list-style-type: none"> ■ melhorou muito ■ melhorou médio ■ melhorou pouco ■ manteve-se ■ piorou
7 (Mantiuk08) 	6	7	20	14	7	 <ul style="list-style-type: none"> ■ melhorou muito ■ melhorou médio ■ melhorou pouco ■ manteve-se ■ piorou
8 (Reinhard05) 	6	4	17	20	7	 <ul style="list-style-type: none"> ■ melhorou muito ■ melhorou médio ■ melhorou pouco ■ manteve-se ■ piorou
9 (Mantiuk08) 	6	6	19	11	12	 <ul style="list-style-type: none"> ■ melhorou muito ■ melhorou médio ■ melhorou pouco ■ manteve-se ■ piorou
10 (Reinhard05) 	7	5	14	14	14	 <ul style="list-style-type: none"> ■ melhorou muito ■ melhorou médio ■ melhorou pouco ■ manteve-se ■ piorou

11 (Mantiuk08)		4	6	14	25	5		<ul style="list-style-type: none"> ■ melhorou muito ■ melhorou médio ■ melhorou pouco ■ manteve-se ■ piorou
12 (Reinhard05)		4	4	19	16	11		<ul style="list-style-type: none"> ■ melhorou muito ■ melhorou médio ■ melhorou pouco ■ manteve-se ■ piorou
13 (Mantiuk08)		4	10	16	16	8		<ul style="list-style-type: none"> ■ melhorou muito ■ melhorou médio ■ melhorou pouco ■ manteve-se ■ piorou
14 (Reinhard05)		9	9	21	9	6		<ul style="list-style-type: none"> ■ melhorou muito ■ melhorou médio ■ melhorou pouco ■ manteve-se ■ piorou
15 (placebo)		1	52	0	1	0		<ul style="list-style-type: none"> ■ melhorou muito ■ melhorou médio ■ melhorou pouco ■ manteve-se ■ piorou
16 (placebo)		0	53	0	1	0		<ul style="list-style-type: none"> ■ melhorou muito ■ melhorou médio ■ melhorou pouco ■ manteve-se ■ piorou
17 (placebo)		0	52	1	1	0		<ul style="list-style-type: none"> ■ melhorou muito ■ melhorou médio ■ melhorou pouco ■ manteve-se ■ piorou
18 (placebo)		0	53	1	0	0		<ul style="list-style-type: none"> ■ melhorou muito ■ melhorou médio ■ melhorou pouco ■ manteve-se ■ piorou
19 (placebo)		1	52	1	0	0		<ul style="list-style-type: none"> ■ melhorou muito ■ melhorou médio ■ melhorou pouco ■ manteve-se ■ piorou
20 (placebo)		1	51	1	1	0		<ul style="list-style-type: none"> ■ melhorou muito ■ melhorou médio ■ melhorou pouco ■ manteve-se ■ piorou
Total		79	384	252	222	143	54 participantes	

Tabela 6-2 Resultados gerais da experiência.

A combinação obtida na última linha da tabela ($\sigma=2$; espessura=10; opacidade=2) pode levar a presumir que seria uma boa combinação, por omissão, para o TMO proposto. No entanto, ainda é importante verificar se esta combinação foi realmente a mais escolhida conjuntamente e não pelas modas individuais de cada parâmetro. A Tabela 6-3 mostra que isso não acontece. Na verdade, a combinação mais utilizada foi (2; 5; 2).

Combinações mais utilizadas				
Ranking	Sigma	Espessura	Opacidade	Contagem
1º	2	5	2	112
2º	4	10	10	87
3º	4	5	2	58
4º	2	10	10	50

Tabela 6-3 Contagem das combinações mais vezes utilizadas pelos participantes.

No entanto, a contagem da Tabela 6-4 mostra o *ranking* das combinações mais utilizadas independentemente do resultado obtido ser uma melhoria. Assim, é importante verificar qual a combinação mais escolhida, assumindo apenas as afinações que resultaram em melhorias.

Combinações mais utilizadas que resultaram em melhoria				
Ranking	Sigma	Espessura	Opacidade	Contagem
1º	4	5	2	41
2º	2	10	10	39
3º	2	10	2	27
4º	4	10	10	21
5º	2	10	5	19
6º	2	10	4	15

Tabela 6-4 Contagem das combinações mais vezes utilizadas pelos participantes que resultaram em melhoria.

A Tabela 6-4 apresenta essas contagens onde a combinação (4; 5; 2) é a mais utilizada, estando a combinação (2; 10; 10) a pouca distância.

Ainda outra estatística interessante será saber qual a combinação mais utilizada a partir da qual resultaram muitas melhorias. Este dado é apresentado pela Tabela 6-5 onde a combinação que foi a mais selecionada como resultado em muitas melhorias é a (2; 10; 10).

Combinações mais utilizadas que resultaram em muita melhoria				
Ranking	Sigma	Espessura	Opacidade	Contagem
1º	2	10	10	28
2º	2	10	7	7
3º	2	7	10	6
4º	2	10	4	5

Tabela 6-5 Contagem das combinações mais vezes utilizadas pelos participantes que resultaram em muita melhoria.

Seria ainda útil saber a moda das combinações por imagem, nomeadamente qual a combinação mais utilizada para as melhorias em cada imagem. No entanto, facilmente se verificou que os participantes raramente usaram a mesma combinação em face do elevado número de combinações possíveis ($3 \times 6 \times 9 = 162$). Este tipo de estatística apenas teria convergência caso se aumentasse o número de participantes ou se reduzisse o número de combinações possíveis, diminuindo os valores permitidos para cada parâmetro.

Todos os resultados da experiência podem ser consultados em <http://www.estg.ipleiria.pt/~carlos.urbano/phd/>.

Dos dados obtidos pressupõe-se que cada pessoa tem as suas próprias preferências, reforçando a ideia de que o processo de afinação deverá fazer parte do TMO, permitindo a cada pessoa criar a sua própria solução. Com base nesta premissa, construiu-se um protótipo para PDA (*Pocket PC*) em *Java Micro Edition (J2ME)*, o qual será descrito na próxima secção.

6.3 Desenvolvimento de um protótipo

Depois dos promissores resultados obtidos na experiência anterior, utilizando LCD tradicionais, tornou-se interessante avaliar o novo TMO num DEP. Isto obrigou a que fosse desenvolvido um protótipo, onde o utilizador poderia escolher uma imagem e mapeá-la, afinando os valores do sigma, da espessura e da opacidade.

O protótipo foi desenvolvido em J2ME, contudo, após implementação dos principais algoritmos: conversão para tons de cinzento, deteção dos contornos, dilatação, preenchimento de buracos, erosão, alargamento e *blur*, a aplicação tornava-se bastante lenta e, por isso, pouco aceitável para interação e afinação de parâmetros.

Decidiu-se, então, que a aplicação carregava de início não só uma imagem mas também algumas máscaras de junção. Isto permitiu melhorar o tempo de execução, continuando, ainda assim, pouco prático para interação com o utilizador. Por este motivo, optou-se por não efetuar testes sobre o novo TMO em dispositivos com ecrã pequeno. Esta tarefa de avaliação ficará para o futuro próximo, depois de se ter desenvolvido um protótipo mais eficiente.

Os protótipos desenvolvidos estão disponíveis em <http://www.estg.ipleiria.pt/~carlos.urbano/phd/>.

7. Conclusões

Atualmente já é possível obter ou gerar imagens com elevada gama dinâmica (HDR); a mesma gama dinâmica com que percebemos o mundo quando o olhamos. No entanto, os dispositivos de visualização convencionais não têm capacidade para mostrar toda a gama dinâmica contida nessas imagens HDR, dado terem uma gama bastante inferior.

Esta problemática tem sido superada ou, pelo menos, minimizada, recorrendo aos *tone mapping operators* (TMO) que são algoritmos que efetuam uma compressão da gama dinâmica de uma imagem HDR para que seja possível a sua adequada visualização em ecrãs convencionais, preservando determinadas características da imagem como o contraste e os detalhes. Apesar de existirem atualmente dezenas de TMO, estes foram, na sua maioria, desenvolvidos com o objetivo de serem aplicados aos dispositivos tradicionais, não tendo nenhum sido idealizado propositadamente para pequenos e limitados ecrãs, como os dos dispositivos móveis que são caracterizados por possuírem uma gama dinâmica muito baixa.

O trabalho desenvolvido e apresentado nesta tese inclui a avaliação de alguns dos atuais TMO através da realização de experiências psicofísicas. Esta avaliação permitiu concluir que os TMO originam experiências perceptuais distintas quando as imagens mapeadas resultantes são mostradas em ecrãs convencionais (CRT ou LCD de 17") comparativamente à sua visualização em ecrãs pequenos como os dos PDA. Esta constatação é um contributo importante para melhorar a maneira como as imagens HDR podem ser visualizadas em ecrãs pequenos, concluindo-se que são necessários TMO adequados para melhor visualização de imagens HDR em dispositivos com ecrã pequeno (DEP).

A partir das aferições anteriores desenvolveu-se e apresentou-se uma solução para a visualização adequada de imagens HDR em DEP. A solução baseou-se na combinação de um TMO base com o TMO do Fattal. Essa combinação ou junção é feita apenas em algumas regiões da imagem definidas por uma máscara, a qual depende de 3 parâmetros que o próprio utilizador pode afinar: sigma, espessura e opacidade. O primeiro parâmetro é o sigma do

Laplaciano da Gaussiana utilizado para detetar os contornos da imagem; a espessura define a abrangência da junção partindo dos contornos e a opacidade controla o grau da influência do TMO do Fattal na imagem final resultante. Graças a este processo de afinação, o utilizador constrói a sua própria solução podendo inclusivamente fazer variar o TMO base. Fruto de nova experiência psicofísica realizada constatou-se que este novo TMO realmente melhora o TMO base, principalmente no que diz respeito ao realce dos detalhes, atributo comprovadamente importante quando se visualizam imagens em DEP. Nesta experiência utilizaram-se LCD tradicionais (entre 14" a 17"), onde as imagens apareciam com tamanho semelhante ao de um ecrã de DEP.

Desenvolveu-se, ainda, um protótipo deste novo TMO em Java Micro Edition (J2ME) para mais facilmente se efetuarem testes intensivos à solução apresentada. Dada a complexidade de alguns algoritmos utilizados no TMO, o protótipo não está convenientemente eficiente para interação em tempo real.

7.1 Principais contribuições

Uma das principais contribuições deste trabalho foi a comprovação da necessidade de desenvolvimento de TMO específicos para dispositivos com ecrã pequeno, o que, dada a representatividade cada vez maior deste tipo de dispositivos na sociedade atual, motivará certamente a procura e investigação de algoritmos adequados.

Como consequência da constatação anterior e como forma de a complementar, foi proposto um novo TMO adequado aos DEP. Baseado numa conceção híbrida, este TMO pode ver os seus parâmetros afinados pelo utilizador de acordo com os seus gostos permitindo que cada pessoa crie a sua própria solução. Este TMO foi avaliado através de experiências psicofísicas que demonstraram que, de facto, o algoritmo melhora a visualização de imagens HDR em DEP comparativamente a alguns dos melhores TMO existentes.

Foi ainda desenvolvido um protótipo em J2ME do TMO proposto. Apesar de não estar suficientemente eficiente para funcionar interativamente ficou dado o primeiro passo para uma futura versão mais funcional do TMO proposto.

7.2 Trabalho futuro

O próximo passo na prossecução desta investigação será a construção de um protótipo com algoritmos mais eficientes, provavelmente destinado a plataformas Android, para que a interação seja possível, permitindo avaliar o novo TMO em diferentes dispositivos com ecrã pequeno.

Com esta futura avaliação poderá ser possível efetuar testes mais intensivos ao TMO e ainda obter informação preciosa para, eventualmente, melhorá-lo.

A aposta num TMO híbrido traz vantagens dado ser possível variar tanto o TMO base como o TMO “secundário” e a maneira como se misturam. No entanto, o futuro poderá trazer novidades no que diz respeito à construção de um TMO não híbrido, podendo, desta forma, definir um algoritmo próprio e mais eficiente, em detrimento do atual algoritmo que implica a realização de vários passos.

8. Bibliografia

- [Acdseeepro] ACDSEEPRO, "<http://www.acdsee.com/>": ACD Systems.
- [Adams'83] A. ADAMS, *The Print*: Litle, brown and Company, 1983.
- [Artusi'04] A. ARTUSI, "Real Time Tone Mapping", PhD, Vienna University of Technology.
- [Artusi'03] A. ARTUSI, J. BITTNER, M. WIMMER , A. WILKIE, "Delivering Interactivity to Complex Tone Mapping operators", in *Proceedings Eurographics Symposium on rendering EGSR03*, pp. 38-44, June 2003, 2003.
- [Ashikhmin'02] M. ASHIKHMIN, "A Tone Mapping Algorithm for High Contrast Images", in *Thirteenth Eurographics Workshop on Rendering*, 2002.
- [Ashikhmin'06] M. ASHIKHMIN , J. GOYAL, "A reality check for tone-mapping operators", *ACM Trans. Appl. Percept.*, vol. 3, pp. 399-411, 2006.
- [Banterrie'11] F. BANTERIE, A. ARTUSI, K. DEBATTISTA , A. CHALMERS, *Advanced High Dynamic Range Imaging: Theory and Practice*. Natick, MA, USA: AK Peters (CRC Press), 2011.
- [Barnett'11] S. BARNETT, M. TOMKINS , Z. WEIDELICH, "Nikon D5100 Camera - Full Review", <http://www.imaging-resource.com/PRODS/D5100/D5100A.HTM> imagens: ZURBEAUTY2-S.JPG e ZMENHDR.GIF, acedido em 17 de Agosto de 2012.

- [Biggs'04] W. BIGGS, "Perceptual accuracy of tone mapping algorithms", MS. Thesis, Dalhousie University.
- [Bilcu'08] R. C. BILCU, A. BURIAN, A. KNUUTILA , M. VEHVILAINEN, "High dynamic range imaging on mobile devices", presented at Electronics, Circuits and Systems, 2008. ICECS 2008. 15th IEEE International Conference on, 2008.
- [Blackwell'81] H. R. BLACKWELL, *An analytic model for describing the influence of lighting parameters upon visual performance*, vol. I: CIE Pub. Technical committee 3.1, 1981.
- [Bogart'03] R. BOGART, F. KAINZ , D. HESS, "The OpenEXR File Format", in *Siggraph 2003 Technical Sketch*, 2003.
- [Bolton'11] M. BOLTON, "Best phone screen: display tech explained", <http://beta.techradar.com/news/phone-and-communications/mobile-phones/best-phone-screen-display-tech-explained-951855>, 20 Feb.
- [Boylan'08] C. BOYLAN, "Dolby and SIM2 Unveil the Future of LCD HDTV: Infinite Contrast: BigPictureBigSound." <http://www.bigpicturebigsound.com/dolby-sim2-hdr-lcd-hdtv-1485.shtml> imagem: SIM2HDRPrototype-500_1.jpg, acedido em 17 de Agosto de 2012.
- [Braun'99] G. J. BRAUN , M. D. FAIRCHILD, "Image lightness rescaling using sigmoidal contrast enhancement functions", *IS&T/SPIE Electronic Imaging '99, Color Imaging: Device Independent Color, Color Hardcopy, and Graphic Arts IV*, pp. 99-105, 1999.
- [Cadik'07] M. CADIK, "Perception Motivated Hybrid Approach to Tone Mapping", presented at WSCG'07, Pilsen, Czech Republic, 2007.

-
- [Cadik'06] M. CADIK, M. WIMMER, L. NEUMANN , A. ARTUSI, "Image Attributes and Quality for Evaluation of Tone Mapping Operators", presented at Pacific Graphics 2006 (14th Pacific Conference on Computer Graphics and Applications), 2006.
- [Cadik'08] M. CADIK, M. WIMMER, L. NEUMANN , A. ARTUSI, "Evaluation of HDR Tone Mapping Methods Using Essential Perceptual Attributes", *Comput. Graph.*, vol. 32, pp. 330-349, 2008.
- [Capin'08] T. CAPIN, K. PULLI , T. AKENINE-MÖLLER, "The State of the Art in Mobile Graphics Research", *IEEE Computer Graphics and Applications*, pp. 74-84, 2008.
- [Chittaro'06] L. CHITTARO, "Visualizing Information on Mobile Devices", *Computer*, vol. 39, pp. 40-45, 2006.
- [Chiu'93] K. CHIU, M. HERF, P. SHIRLEY, S. SWAMY, C. WANG , K. ZIMMERMA, "Spatially Nonuniform Scaling Functions for High Contrast Images", presented at Graphics Interface '93, San Francisco, CA, 1993.
- [Choi'11] K. CHOI, K.-A. TOH , H. BYUN, "Realtime training on mobile devices for face recognition applications", *Pattern Recognition*, vol. 44, pp. 386-400, 2011.
- [Choudhury'05] P. CHOUDHURY , J. TUMBLIN, "The trilateral filter for high contrast images and meshes", in *ACM SIGGRAPH 2005 Courses*. Los Angeles, California: ACM Press, 2005.
- [Cohen'01] J. COHEN, C. TCHOU, T. HAWKINS , P. DEVEBEC, "Real-Time High-Dynamic Range Texture Mapping", in *graphics3.isi.edu/~jcohen/egwr-01-cohen.pdf*, *EGWR 2001*, 2001.
- [Cohen'95] M. F. COHEN , J. R. WALLACE, *Radiosity and Realistic Image Synthesis*: Academic Press, 1995.

- [Debevec'98] P. DEBEVEC, "Stanford Memorial Church", in http://www.pauldebevec.com/Research/HDR/SourceImages/Memorial_SourceImages.zip, memorial.hdr, Ed., 1998.
- [Debevec'97] P. E. DEBEVEC , J. MALIK, "Recovering High Dynamic Range Radiance Maps From Photographs", in *Proceedings of SIGGRAPH 97, Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, pp. 369-378 (August 1997, Los Angeles, California). Addison Wesley. Edited by Turner Whitted. ISBN 0-89791-896-7, 1997.*
- [Devlin'02] A. K. DEVLIN, A. CHALMERS, A. WILKIE , W. PURGATHOFER, "STAR: Tone Reproduction and Physically Based Spectral Rendering", in *State of the Art Reports, Eurographics 2002: Dieter Fellner and Roberto Scopigno, 2002.*
- [Digitalcameratracker'10] DIGITALCAMERATRACKER, "Pentax K-7 | Digital Camera Tracker", <http://www.digitalcameratracker.com/pentax-k-7-reviews-sample-photos/imagen:pentax-k-7-back.jpg>, acedido em 17 de Agosto de 2012.
- [Dolby'10] DOLBY, "Video Reference Monitor—The Dolby® PRM-4200 Professional Reference Monitor", <http://www.dolby.com/us/en/professional/hardware/video-monitors/prm-4200-professional-reference-monitor.html> imagem: PRM4200_Front_med.jpg, acedido em 17 de Agosto de 2012.
- [Drago'03a] F. DRAGO, W. L. MARTENS, K. MYSZKOWSKI , H.-P. SEIDEL, "Perceptual evaluation of tone mapping operators", in *ACM SIGGRAPH 2003 Sketches & Applications*. San Diego, California: ACM Press, 2003a.
- [Drago'03b] F. DRAGO, K. MYSZKOWSKI, T. ANNEN , N. CHIBA, "Adaptive Logarithmic Mapping For Displaying High Contrast Scenes", in *Eurographics EG2003*, 2003b.
- [Durand'00] F. DURAND , J. DORSEY, "Interactive Tone Mapping", in *Proceedings Eurographics Workshop on Rendering EGWR02*, 2000.

- [Durand'02] F. DURAND , J. DORSEY, "Fast Bilateral Filtering for the Display of High-Dynamic-Range Images", in *ACM Computer Graphics (Proc. of SIGGRAPH)'2002*, pp. 257-266, 2002.
- [Energyefficiency'12] ENERGYEFFICIENCY, "Energy efficiency in office environment", http://www.hk-phy.org/energy/commercial/office_phy05_e.html imagem: lcd_liquid_crystal.gif, acedido em 17 de Agosto de 2012.
- [Fattal'02] R. FATTAL, D. LISCHINSKI , M. WERMAN, "Gradient Domain High Dynamic Range Compression", in *ACM Computer Graphics (Proc. of SIGGRAPH)'2002*, pp. 249-256, 2002.
- [Ferwerda'01] J. A. FERWERDA, "Elements of Early Vision for Computer Graphics", *IEEE Comput. Graph. Appl.*, vol. 21, pp. 22-33, 2001.
- [Ferwerda'96] J. A. FERWERDA, S. N. PATTANAİK, P. SHIRLEY , D. P. GREENBERG, "A Model of Visual Adaptation for Realistic Image Synthesis", in *ACM Computer Graphics (Proc. of SIGGRAPH)'96*, pp. 249-258, 1996.
- [Filion'12] M. FILION, "Old Bus", <http://www.flickr.com> imagem: 495584940_d66f12081f.jpg, acedido em 17 de Agosto de 2012.
- [Fisher'25] R. A. FISHER, *Statistical methods for research workers*. Edinburgh: Oliver & Boyd, 1925.
- [Fisher'37] R. A. FISHER, *The design of experiments*. Edinburgh: Oliver & Boyd, 1937.
- [Foresman'10] C. FORESMAN, "HDR photography with iPhone 4 and iOS 4.1: how good is it?", <http://arstechnica.com/apple/2010/09/hdr-photography-with-iphone-4-and-ios-41/> imagem: iphone4_hdr_onoff.jpg, acedido em 17 de Agosto de 2012.

- [Frankle'83] J. FRANKLE , J. J. MCCANN, "Method and Apparatus for Lightness Imaging", 1983.
- [Funt'00] B. FUNT, F. CIUREA , J. MCCANN, "Retinex in Matlab", in *Proceedings of the IS&T/SID Eighth Color Imaging Conference: Color Science, Systems and Applications*, 2000, pp. 112-121.
- [Gonçalves'09] A. GONÇALVES, L. MAGALHÃES, J. MOURA , A. CHALMERS, "High dynamic range - a gateway for predictive ancient lighting", *ACM - J. Comput. Cult. Herit.*, vol. 2, pp. 1-20, 2009.
- [Goodnight'03] N. GOODNIGHT, R. WANG, C. WOOLLEY , G. HUMPHREYS, "Interactive Time-Dependent Tone Mapping Using Programmable Graphics Hardware", in *Eurographics Symposium on Rendering*, 2003.
- [Graeme Watt'12] S. D. V. L. GRAEME WATT, "Radiance Gallery", <http://radsite.lbl.gov/radiance/gallery/daylite.html> imagem: sLobby.jpg, acessado em 17 de Agosto de 2012.
- [Gurski'05] J. GURSKI , L. M. QUACH, "Display Technology Overview", in *LYTICA WHITE PAPER*, 2005, pp. 37.
- [Howstuffworks'12a] HOWSTUFFWORKS, "The Cathode Ray Tube", <http://www.howstuffworks.com> imagem: tv-cathode.gif, acessado em 17 de Agosto de 2012.
- [Howstuffworks'12b] HOWSTUFFWORKS, "How LCDs Work", <http://www.howstuffworks.com> imagem: lcd-screen.gif, acessado em 17 de Agosto de 2012.
- [Hunt'95] R. HUNT, *The Reproduction of Colour in Photography, Printing and Television*, 5th ed: Fountain Press, 1995.

- [Hunt'84] R. W. G. HUNT, "Colorimetry", in *IBA Technical review*, n. 22, pp. 16-27, November 1984.
- [Johnson'03] G. M. JOHNSON , M. D. FAIRCHILD, "Rendering HDR Images", in *11th Color Imaging Conference*, 2003.
- [Jonathanw100'12] JONATHANW100, "The Good Earth, Linville Falls, North Carolina", <http://www.flickr.com> imagem: 3578812179_301150d6c4.jpg, acessado em 17 de Agosto de 2012.
- [Kendall'40] G. KENDALL , BABINGTON-SMITH, "On the method of paired comparisons", *Biometrika* 31, pp. 324-345, 1940.
- [Kirk'95] R. E. KIRK, *Experimental Design: Procedures for the Behavioral Sciences*, Third ed: Pacific Grove, CA: Brooks/Cole, 1995.
- [Kirk'01] R. E. KIRK, "Promoting Good Statistical Practices: Some Suggestions", in *Educational and Psychological Measurement*, 2001.
- [Krawczyk'05]G. KRAWCZYK, K. MYSZKOWSKI , HANS-PETERSEIDEL, "Lightness Perception in Tone Reproduction for High Dynamic Range Images", in *The European Association for Computer Graphics 26th Annual Conference EUROGRAPHICS 2005*. Dublin, Ireland: Blackwell, 2005.
- [Kuang'07] J. KUANG, H. YAMAGUCHI, C. LIU, G. M. JOHNSON , M. D. FAIRCHILD, "Evaluating HDR rendering algorithms", *ACM Trans. Appl. Percept.*, vol. 4, pp. 9, 2007.
- [Larson'94] G. W. LARSON, "The RADIANCE lighting simulation and rendering system", in *Proceedings of the 21st annual conference on Computer graphics and interactive techniques*: ACM Press, 1994.

- [Larson'98] G. W. LARSON, "Overcoming Gamut and Dynamic Range Limitations in Digital Images", in *Proc. of IS&T 6th Color Imaging Conf.*, 1998.
- [Ledda'05] P. LEDDA, A. CHALMERS, T. TROSCIANKO , H. SEETZEN, "Evaluation of tone mapping operators using a High Dynamic Range display", in *ACM SIGGRAPH 2005 Papers*. Los Angeles, California: ACM Press, 2005.
- [Ledda'04] P. LEDDA, L. P. SANTOS , A. CHALMERS, "A local model of eye adaptation for high dynamic range images", in *Proceedings of the 3rd international conference on Computer graphics, virtual reality, visualisation and interaction in Africa*. Stellenbosch, South Africa: ACM Press, 2004.
- [Leffler'03] S. LEFFLER, "LibTIFF – TIFF Library and Utilities", 2003.
- [Lindsay'08] C. LINDSAY, E. AGU , F. WU, "Dynamic correction of color appearance on mobile displays", in *Proceedings of graphics interface 2008*. Windsor, Ontario, Canada: Canadian Information Processing Society, 2008, pp. 25-31.
- [Luminancehdr] LUMINANCEHDR, "<http://qtpfsgui.sourceforge.net/>".
- [Mann'95] S. MANN , R. W. PICARD, "On Being `undigital' With Digital Cameras: Extending Dynamic Range By Combining Differently Exposed Pictures", in *IS&T 48th Annual Conference*. Washington, DC: Society for Imaging Science and Technology, 1995, pp. 442-448.
- [Mantiuk'08] R. MANTIUK, S. DALY , L. KEROFISKY, "Display adaptive tone mapping", *ACM Trans. Graph.*, vol. 27, pp. 1-10, 2008.
- [Mantiuk'05] R. MANTIUK, K. MYSZKOWSKI , H.-P. SEIDEL, "A perceptual framework for contrast processing of high dynamic range images", in *Proceedings of the 2nd symposium on Applied perception in graphics and visualization*. A Coruña, Spain: ACM Press, 2005.

- [Mchugh'11] M. MCHUGH, "Casio Exilim EX-ZR100 Review", <http://www.digitaltrends.com/digital-camera-reviews/casio-exilim-ex-zr100-review/> imagem: Casio-Exilim-EX-ZR100-top-dt-625x220.jpg, acessado em 17 de Agosto de 2012.
- [Meylan'05] L. MEYLAN , S. SUSSTRUNK, "High dynamic range image rendering using a Retinex-based adaptive filter", in *IEEE Transactions on Image Processing*, 2005.
- [Mitsunaga'99] T. MITSUNAGA , S. K. NAYAR, "Radiometric Self Calibration", in *Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, vol. 1. Fort Collins, CO, USA: IEEE Computer Society, 1999, pp. 1374-1380.
- [Omron'06] OMRON, "Image Sensors", <http://www.hdrc.com/isensors.htm> imagem: CamCube.jpg, acessado em 16 de Julho de 2006.
- [Palmer'13] J. M. PALMER, "Radiometry and photometry FAQ". Tucson: The University of Arizona College of Optical Sciences, 2013.
- [Pattanaik'98] S. N. PATTANAİK, J. A. FERWERDA, M. FAIRCHILD , D. P. GREENBERG, "A Multiscale Model of Adaptation and Spatial Vision for Realistic Image Display", in *ACM Computer Graphics (Proc. of SIGGRAPH)'98*, 287-298, 1998.
- [Pattanaik'00] S. N. PATTANAİK, J. TUMBLIN, H. YEE , D. P. GREENBERG, "Time-Dependent Visual Adaptation For Fast Realistic Image Display", in *ACM Computer Graphics (Proc. of SIGGRAPH)'00*, 47-53, 2000.
- [Peter'83] J. B. PETER , H. A. EDWARD, "A multiresolution spline with application to image mosaics", *ACM Trans. Graph.*, vol. 2, pp. 217-236, 1983.
- [Photomatixpro] PHOTOMATIXPRO, "<http://www.hdrsoft.com/>".

- [Reinhard'05a] E. REINHARD , K. DEVLIN, "Dynamic Range Reduction Inspired by Photoreceptor Physiology", in *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2005a.
- [Reinhard'12] E. REINHARD, T. POULI, T. KUNKEL, B. LONG, A. BALLESTAD , G. DAMBERG, "Calibrated image appearance reproduction", *ACM Trans. Graph.*, vol. 31, pp. 1-11, 2012.
- [Reinhard'02] E. REINHARD, M. STARK, P. SHIRLEY , J. FERWERDA, "Photographic tone reproduction for digital images", in *Proceedings of the 29th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*. San Antonio, Texas: ACM Press, 2002.
- [Reinhard'05b] E. REINHARD, G. WARD, S. PATTANAIAK , P. DEBEVEC, *High Dynamic Range Imaging: Acquisition, Display, and Image-Based Lighting*: Morgan Kaufmann, 2005b.
- [Richards'05] G. RICHARDS, "BrightSide DR37-P HDR display | bit-tech.net", http://www.bit-tech.net/hardware/2005/10/04/brightside_hdr_edr/3 imagem: luminance.jpg, acedido em 17 de Agosto de 2012.
- [Ridder'96] H. D. RIDDER, "Naturalness and image quality: saturation and lightness variation in color images of natural scenes", *The Journal of Imaging Science and Technology* 40, pp. 487-493, 1996.
- [Robertson'99] M. A. ROBERTSON, S. BORMAN , R. L. STEVENSON, "Dynamic Range Improvement Through Multiple Exposures", in *1999 International Conference on Image Processing (ICIP-99)*. Los Alamitos, CA, USA: IEEE, 1999, pp. 159-163.
- [Robertson'03] M. A. ROBERTSON, S. BORMAN , R. L. STEVENSON, "Estimation-Theoretic Approach to Dynamic Range Enhancement Using Multiple Exposures", *Journal of Electronic Imaging*, vol. 12, pp. 219-228, 2003.

- [Rosa'12] D. ROSA, "Cores", <http://www.douglasrosa.com/blog/cores/> imagem: Imagem2-300x197.jpg, acessado em 17 de Agosto de 2012.
- [Scheel'00] A. SCHEEL, M. STAMMINGER , H. P. SEIDEL, "Tone Reproduction for Interactive Walkthroughs", in *Proceedings Eurographics '2000, Vol. 19 (3)* 2000.
- [Schlick'94] C. SCHLICK, "Quantization Techniques for Visualization of High Dynamic Range Pictures", in *5th Eurographics Workshop on Rendering*. Darmstadt, 1994.
- [Siegel'98] S. SIEGEL , N. J. C. JR., *Nonparametric Statistics for The Behavioral Sciences*: McGrall-Hill International, 1998.
- [Soneira'06a] R. SONEIRA, "Display Technology Shoot-Out: Comparing CRT, LCD, Plasma and DLP Displays", http://www.displaymate.com/ShootOut_Part_4.htm, acessado em 24 de Setembro de 2012.
- [Soneira'06b] R. SONEIRA, "Display Technology Shoot-Out: Comparison of CRT, LCD, Plasma, DLP and LCoS Technologies", http://www.displaymate.com/ShootOut_Comparison.htm, acessado em 24 de Setembro de 2012.
- [Soneira'10] R. SONEIRA, "Smartphone “Super” LCD-OLED Display Technology Shoot-Out: iPhone 4 – Samsung Galaxy S – Motorola Droid – iPhone 3GS – Google Nexus One", http://www.displaymate.com/Smartphone_ShootOut_1.htm, acessado em 24 de Setembro de 2012.
- [Soneira'11] R. SONEIRA, "Tablet Display Technology Shoot-Out: Apple iPad 2 – Motorola Xoom – Asus Transformer – Acer Iconia – Samsung Galaxy Tab", http://www.displaymate.com/Tablet_ShootOut_2.htm, acessado em 24 de Setembro de 2012.

- [Spheronvr'12] SPHERONVR, "SPHERON VR : SpheroCam HDR:" <http://www.spheron.com/en/spheron-cgi/products/spheroCam-hdr.html> imagem: prev_spheroCamhdr.jpg, acessido em 17 de Agosto de 2012.
- [Sps] SPSS, "SPSS - Statistical Package for Social Sciences".
- [Stevens'60] S. S. STEVENS , J. C. STEVENS, "Brightness Function: Parametric Effects of Adaptation and Contrast", in *Journal Opt. Soc. Am.* 50, 11 (Nov.) (Program of the 1960 Annual Meeting), 1139, 1960.
- [Tumblin'99a] J. TUMBLIN, J. K. HODGINS , B. K. GUENTER, "Two Methods for Display of High Contrast Images", in *ACM Transaction on Graphics*, Vol. 18, No. 1, January 1999, pp. 56-94, 1999a.
- [Tumblin'93] J. TUMBLIN , H. RUSHMEIER, "Tone Reproduction for Computer Generated images", in *IEEE Computer graphics and Applications*, Vol. 13 (6):42-48, 1993.
- [Tumblin'99b] J. TUMBLIN , G. TURK, "LCIS: A Boundary Hierarchy For Detail-Preserving Contrast Reduction", in *Proceedings ACM SIGGRAPH Conference 1999 Los Angeles*, pp.83-90, 1999b.
- [Urbano'07] C. URBANO, L. MAGALHÃES, J. MOURA , A. MARCOS, "Concepção de Experiências Psicofísicas para Visualização de Imagens HDR em Dispositivos Móveis", in *IASK - E-Activity and Leading Technologies 2007*. Porto, 2007.
- [Urbano'09] C. URBANO, L. MAGALHÃES, J. P. MOURA, M. BESSA , A. MARCOS, "Desenvolvimento de um operador de tone mapping para dispositivos com ecrã pequeno", in *17º Encontro Português de Computação Gráfica*. Covilhã, 2009.

- [Urbano'10] C. URBANO, L. MAGALHÃES, J. P. MOURA, M. BESSA, A. MARCOS , A. CHALMERS, "Tone Mapping Operators on Small Screen Devices: An Evaluation Study", *COMPUTER GRAPHICS forum*, vol. 29, pp. 2469–2478, 2010.
- [Urbano'08] C. URBANO, L. MAGALHÃES, J. P. MOURA , A. MARCOS, "Visualização de Imagens HDR em Dispositivos de Ecrã Pequeno", in *Interacção 2008 – 3ª Conferência Nacional em Interacção Homem-Máquina*. Évora, 2008.
- [Ward-Larson'97] G. WARD-LARSON, H. RUSHMEIER , C. PIATKO, "A Visibility Matching Tone Reproduction Operator for High Dynamic range Scene", in *IEEE Transaction on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 3 (4):291-306, 1997.
- [Ward'94] G. WARD, "A Contrast-based Scale Factor for Luminance Display", in *In P.S. Heckbert (Ed.), Graphic gems IV, Boston: Academic Press Professional*, 1994.
- [Ward'04] G. WARD, "High Dynamic Range Image Encodings", <http://www.anywhere.com/gward/hdrenc/>,
- [Ward'05] G. WARD , M. SIMMONS, "JPEG-HDR: a backwards-compatible, high dynamic range extension to JPEG", in *ACM SIGGRAPH 2005 Courses*. Los Angeles, California: ACM, 2005, pp. 2.
- [Weiner'03] I. B. WEINER, *Handbook of Psychology*, vol. 12, 2003.
- [Wikipedia'12a] WIKIPEDIA, "Cathode ray tube", http://en.wikipedia.org/wiki/Cathode_ray_tube, acedido em 24 de Setembro de 2012.
- [Wikipedia'12b] WIKIPEDIA, "CIE 1931 color space", <http://en.wikipedia.org/wiki/CIExy1931.png/300px-CIExy1931.png>, acedido em 17 de Agosto de 2012.

- [Wikipedia'12c] WIKIPEDIA, "Comparison of CRT, LCD, Plasma, and OLED", http://en.wikipedia.org/wiki/Comparison_CRT,_LCD,_Plasma, acessido em 24 de Setembro de 2012.
- [Wikipedia'12d] WIKIPEDIA, "Display resolution", http://en.wikipedia.org/wiki/Display_resolution, acessido em 24 de Setembro de 2012.
- [Wikipedia'12e] WIKIPEDIA, "LCD", <http://en.wikipedia.org/wiki/LCD>, acessido em 24 de Setembro de 2012.
- [Wikipedia'12f] WIKIPEDIA, "OLED", <http://en.wikipedia.org/wiki/Oled>, acessido em 24 de Setembro de 2012.
- [Wikipedia'12g] WIKIPEDIA, "Visual system", http://en.wikipedia.org/wiki/Visual_system imagem: [Schematic_diagram_of_the_human_eye_en.svg](#), acessido em 17 de Agosto de 2012.
- [Yoshida'05] A. YOSHIDA, V. BLANZ, K. MYSZKOWSKI , H.-P. SEIDEL, "Perceptual evaluation of tone mapping operators with real-world scenes", in *SPIE*, 2005.
- [Yoshida'06] A. YOSHIDA, R. MANTIUK, K. MYSZKOWSKI , H.-P. SEIDEL, "Analysis of Reproducing Real-World Appearance on Displays of Varying Dynamic Range", *Computer Graphics Forum*, vol. 25, pp. 415-426, 2006.

Anexo A – Formulário de Consentimento Experimental

Formulário de Consentimento Experimental

Investigador

Carlos Urbano, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro.

Propósito

A hipótese específica e predições não podem ser divulgadas antes do fim da experiência porque esse conhecimento pode afetar os resultados. Concluída a experiência será dada uma breve explicação.

Seleção dos Participantes

Os participantes são voluntários que concordaram tomar parte da experiência.

Confidencialidade

Os seus dados serão armazenados sem outro identificador que não um número atribuído aleatoriamente.

Procedimento

O procedimento varia conforme o estudo. Ser-lhe-ão dadas instruções detalhadas.

Benefícios

Os participantes não receberão qualquer benefício direto desta investigação.

Riscos

Os procedimentos usados nas experiências são inofensivos e têm sido usados em estudos anteriores.

Compensação

Os participantes entrarão num sorteio final para atribuição de um prémio. Quando o estudo terminar todos os participantes receberão por e-mail um resumo com os resultados.

Desistência

A participação na experiência é voluntária. Os voluntários não são obrigados a completar o estudo e podem cessar a sua participação a qualquer momento.

Outras Questões

Se tiver alguma questão relativa ao propósito, procedimento ou outros aspetos da experiência, envie uma e-mail para carlos.urbano@ipleiria.pt.

=====
Nome:

E-mail:.....

Declaração: Fui informado sobre os objetivos e procedimentos envolvidos na experiência. Reservo-me ao direito de desistir a qualquer momento e a informação fornecida por mim como parte do estudo será destruída ou a minha identidade será removida a não ser que eu concorde em contrário.

Assinatura:

Data:...../...../.....

Anexo B1 – Instruções para a Experiência (CRT)



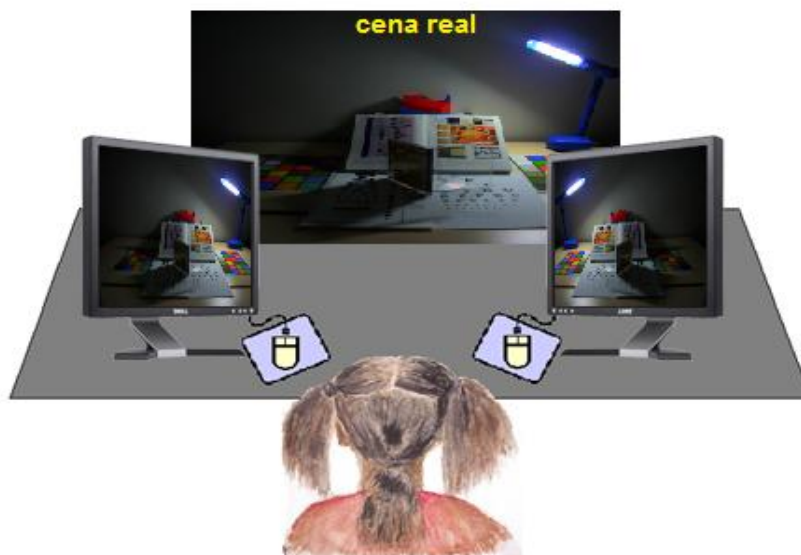
Nesta experiência permanecerá sentado em frente a dois monitores CRT que estarão lado a lado. Entre eles poderá observar uma cena que servirá como ponto de referência na experiência. Por favor, relaxe e sente-se como normalmente se sentaria numa secretária, i.e., nem muito à frente nem muito afastado. A cadeira está alinhada com uma marca no chão – por favor, não a remova dessa posição.

Durante a experiência um par de imagens será aleatoriamente mostrado nos monitores. Em cada passo da experiência deverá escolher a imagem que considera melhor relativamente a um dado atributo de imagem quando comparadas com a cena real à sua frente. A sua decisão será feita clicando com o botão esquerdo do rato sobre a imagem que considera melhor e depois sobre a que considera pior. Depois de cada decisão, um novo par de imagens aparecerão nos ecrãs para nova avaliação. Será informado do fim da experiência quando uma mensagem apropriada aparecer nos ecrãs.

Caso se engane na escolha, não se preocupe, continue. Poderá praticar antes de começar a experiência real.

É livre de desistir da experiência a qualquer momento. Se não quiser completá-la pode terminar prematuramente informando o supervisor da experiência.

Anexo B2 – Instruções para a Experiência (LCD)



Nesta experiência permanecerá sentado em frente a dois monitores LCD que estarão lado a lado. Entre eles poderá observar uma cena que servirá como ponto de referência na experiência. Por favor, relaxe e sente-se como normalmente se sentaria numa secretária, i.e., nem muito à frente nem muito afastado. A cadeira está alinhada com uma marca no chão – por favor, não a remova dessa posição.

Durante a experiência um par de imagens será aleatoriamente mostrado nos monitores. Em cada passo da experiência deverá escolher a imagem que considera melhor relativamente a um dado atributo de imagem quando comparadas com a cena real à sua frente. A sua decisão será feita clicando com o botão esquerdo do rato sobre a imagem que considera melhor e depois sobre a que considera pior. Depois de cada decisão, um novo par de imagens aparecerão nos ecrãs para nova avaliação. Será informado do fim da experiência quando uma mensagem apropriada aparecer nos ecrãs.

Caso se engane na escolha, não se preocupe, continue. Poderá praticar antes de começar a experiência real.

É livre de desistir da experiência a qualquer momento. Se não quiser completá-la pode terminar prematuramente informando o supervisor da experiência.

Anexo B3 – Instruções para a Experiência (DEP-PDA)



Nesta experiência permanecerá sentado tendo à sua frente dois PDA que estarão lado a lado. Por cima deles poderá observar uma cena que servirá como ponto de referência na experiência. Por favor, relaxe e sente-se como normalmente se sentaria numa secretária, i.e., nem muito à frente nem muito afastado. A cadeira está alinhada com uma marca no chão – por favor, não a remova dessa posição.

Durante a experiência um par de imagens será aleatoriamente mostrado nos PDA. Em cada passo da experiência deverá escolher a imagem que considera melhor relativamente a um dado atributo de imagem quando comparadas com a cena real à sua frente. A sua decisão será feita clicando com o botão esquerdo do rato sobre a imagem que considera melhor e depois sobre a que considera pior. Depois de cada decisão, um novo par de imagens aparecerão nos PDA para nova avaliação. Será informado do fim da experiência quando uma mensagem apropriada aparecer nos ecrãs.

Caso se engane na escolha, não se preocupe, continue. Poderá praticar antes de começar a experiência real.

É livre de desistir da experiência a qualquer momento. Se não quiser completá-la pode terminar prematuramente informando o supervisor da experiência.