

Explorando a adaptação do *Sistema Visual Humano* em aplicações interativas através de *Tone Mapping*

Fábio Mierlo *

Marcelo Walter †

Novembro de 2004

1 Introdução

No *Sistema Visual Humano* (HVS) existem células receptoras, cones e bastonetes, sensíveis a um determinado espectro eletromagnético. Este espectro é classificado como espectro visível e inclui ondas com comprimento entre 380 até 780 nanômetros [GLA 94]. A razão entre a intensidade luminosa de uma noite sem lua e dia ensolarado pode chegar à 1.000.000.000:1 candelas por metro quadrado [GLA 94]. Esta razão tem tamanha magnitude porque a curva de luminância se aproxima da função logarítmica.

O HVS é capaz de visualizar todo este espectro adaptando-se através de um intervalo dinâmico. Este intervalo dinâmico se desloca dentro do espectro visível ativando e desativando os cones e os bastonetes de acordo com a mudança nos valores de luminância percebidos em função do tempo. A diferença entre o valor mínimo e máximo dentro deste intervalo também é dinâmica porque as curvas de eficiência luminosa dos cones e bastonetes não são contínuas.

Os cones são sensíveis aos valores de maior intensidade luminosa enquanto os bastonetes são sensíveis aos menores. Devido a estas características nós percebemos cores e detalhes através dos cones enquanto os bastonetes nos

permitem perceber um ambiente em condições mínimas de iluminação.

Existem três tipos de cones [FOU 95] e cada um deles é mais sensível a uma das cores vermelha, verde ou azul. As cores são percebidas por eles através da combinação de ondas emitidas dentro do espectro visível. Devido às propriedades matemáticas do espectro eletromagnético é possível representar as cores como um sistema de coordenadas tridimensional. Existe vários sistemas para representar as cores.

O sistema RGB [GLA 94] é de interesse especial à computação gráfica porque as imagens sintetizadas são tipicamente visualizadas em monitores CRT, que utilizam somas positivas de luz a partir de três fósforos para gerar cores. Este sistema é convenientemente representado por um cubo com valores RGB nos eixos ortogonais dentro de um intervalo de 0 à 1. Porém existem algumas limitações em utilizar o sistema RGB, como não poder representar muitas cores existentes e a luminância depender da intensidade máxima do monitor CRT.

Atualmente a escala de luminância que pode ser representada pelos monitores CRT é de aproximadamente 100:1 cd/m^2 [GLA 94]. Esta característica explica a utilização de um número inteiro de 8 bits, por cada componente, para armazenar e visualizar imagens em computadores.

Para uso geral e corriqueiro não há problemas em utilizar números inteiros de 8 bits

*email: fmierlo@yahoo.com

†email: marcelow@exatas.unisinos.br

para representar imagens, porém isso gera restrições na renderização de imagens sintéticas tridimensionais. Estas restrições apareceram inicialmente com a introdução de técnicas de iluminação global como Ray Tracing [WHI 80] e Radiosidade [GOR 84]. Com estas técnicas o acúmulo de iluminação em um determinado objeto facilmente ultrapassava os limites do sistema RGB, por este estar restrito à 255 valores entre 0 e 1.

Para eliminar estas restrições optou-se por aumentar o intervalo dinâmico (HDR de *High Dynamic Range*) utilizando números de ponto flutuante com uma precisão maior. Renderizar imagens com HDR diminui os erros de arredondamento em cálculos de iluminação, permite uma maior precisão nos resultados de imagens sintéticas geradas com base em propriedades físicas e estende o sistema RGB além do domínio dos números entre 0 e 1. Apesar de resolver muitos problemas renderizando imagens com HDR, não é possível visualizá-las diretamente em monitores CRT.

Tone Mapping é uma técnica desenvolvida inicialmente para fotografias e televisão. A sua utilização permitiu que imagens com HDR sejam visualizadas em dispositivos com capacidades limitadas [DEV 02]. Em adição a comprimir o intervalo de luminância, esta técnica pode ser utilizada para imitar qualidades perceptuais, resultando em uma imagem que provoca a mesma resposta que alguém teria de uma cena no mundo real. Porém, algoritmos de *Tone Mapping* são computacionalmente caros.

Os modelos de *Tone Mapping* podem ser classificados como *global*, que aplicam a mesma transformação para todo pixel independente da sua posição na imagem, ou *local*, que aplicam uma transformação diferente para diferentes partes de uma imagem. Estes modelos podem ser subdivididos como dependentes de tempo ou não. Os modelos dependentes de tempo consideram características de adaptação

em função do tempo do HVS.

1.1 Motivação

HDR e *Tone Mapping* pertencem ao estado da arte em pesquisa e na indústria baseadas em computação gráfica. Sendo estas áreas abertas e com demanda em inovações.

A evolução tecnológica das placas gráficas programáveis (GPUs) tornou possível renderizar cenas com HDR [NVI 04] e executar algoritmos de *Tone Mapping* interativamente através de APIs como OpenGL ¹ e DirectX ².

A principal motivação deste trabalho está na utilização destas tecnologias para aumentar o realismo e a percepção visual de ambientes virtuais na área de entretenimento digital, especialmente nos jogos.

1.2 Objetivos

As aplicações interativas, com renderização em HDR, utilizam como último passo um algoritmo de *Tone Mapping* para permitir que a imagem sintetizada seja visualizada em um monitor CRT.

Este trabalho tem como objetivo geral implementar em GPU um algoritmo de *Tone Mapping* dependente de tempo para explorar o potencial uso da adaptação do HVS em aplicações interativas. Temos como características que podem ser exploradas a dependência de tempo, perda de cor e o aumento do realismo visual. Estas características permitem gerar imagens mais próximas com o que é observado na realidade.

Após um estudo da produção científica realizada sobre os modelos de *Tone Mapping* e de um levantamento bibliográfico, serão gerados os critérios para efetuar um comparativo entre os modelos dependentes de tempo. Como

¹<http://www.opengl.org>

²<http://www.microsoft.com/directx>

resultado, este comparativos irá definir a escolha de um dos modelos para ser implementado como protótipo.

Antes da implementação do protótipo, serão estudadas as implementações em GPU disponíveis. Tendo o resultado do comparativo e o estudo das implementações em GPU será implementado o protótipo do modelo escolhido. Este protótipo será validado comparando os resultados com os de uma implementação em CPU do modelo de *Tone Mapping* escolhido.

Ao final serão efetuados testes e validações no protótipo implementado com relação a utilização de modelos dependentes de tempo em aplicações interativas e quanto a novas características que podem ser exploradas.

1.3 Apresentação deste artigo

Inicialmente os trabalhos que introduziram a técnica de *Tone Mapping* serão apresentados na seção 2, juntamente com a evolução do mecanismo e o atual estado de desenvolvimento. Na seção 3 serão apresentados os resultados preliminares atingidos e finalmente este artigo será concluído pela seção 4, que apresentará algumas conclusões e futuras direções deste trabalho.

2 Estado-da-Arte

Debevec [DEB 97], propôs um método para aquisição de imagens com HDR utilizando fotografias. Estas imagens tem o valor do pixel proporcional ao valor verdadeiro de luminosidade de uma cena real.

Softwares para edição de imagens, como o Photoshop ³, e modelagem tridimensional, como o Maya ⁴ e o 3ds max ⁵, foram estendidos para serem compatíveis com estas imagens. A

³<http://www.adobe.com/photoshop>

⁴<http://www.alias.com/maya>

⁵<http://www.discreet.com/3dsmax>



Figura 1: Exemplo de *Image-Based Lighting* [DEB 98]

figura 1 mostra objetos sintéticos inseridos em uma cena utilizando mapas de ambiente com HDR através da técnica de *Image-Based Lighting* [DEB 98].

Para estas aplicações executarem interativamente as últimas gerações de GPUs já foram projetadas para renderizar imagens com HDR, o que tornou possível a utilização desta tecnologia em jogos.

2.1 GPU

As GPUs de última geração têm um pipeline de renderização completo com 32 bits por canal de cor mais um canal alpha (RGBA) e efetuam operações aritméticas em ponto flutuante. Apesar de um número de ponto flutuante diminuir o *Dynamic Range*, devido a utilização de alguns bits para o sinal e o expoente, ele ainda é considerado alto e tem como benefício a diminuição dos erros de arredondamento nas operações aritméticas [JYR 03].

Com este pipeline, outra vantagem é não se preocupar com os valores de iluminação, entre zero e um, como em um pipeline de 32 bits com

números inteiros.

Porém GPUs são basicamente processadores de stream e não são todos os problemas que podem ser computados nesta arquitetura. Outro problema é o suporte limitado, ainda apenas pelas de última geração, a desvio condicional, sendo que sua utilização pode diminuir o desempenho [MOR 03].

2.2 HDR displays

A utilização de imagens com HDR vai se tornar necessária quando dispositivos de visualização com HDR, que foram considerados pelos dois últimos anos consecutivos como tecnologia emergente pela conferência anual do ACM SIGGRAPH ⁶, forem produzidos em massa. Estes dispositivos podem reproduzir uma imagem com *Dynamic Range* próximo à 40.000:1 cd/m^2 , enquanto os atuais reproduzem apenas 100:1 cd/m^2 [SEE 04].

2.3 Tone Mapping

Um modelo simples de *Tone Mapping* global é o mapeamento linear entre a imagem com HDR e o intervalo do dispositivo de saída. Escalas lineares preservam um contraste relativo mas removem a maior parte dos detalhes contidos na imagem devido a escala uniforme [GOO 03a]. Tumblin e Rushmeier [TUM 93] foram os primeiros a propor um modelo baseado na percepção humana, este método preserva o brilho percebido. Ward [WAR 94] propôs preservar o contraste ao invés do brilho mapeando a menor diferença de luminância perceptível (Just Noticeable Difference) na imagem com HDR para a menor perceptível no monitor. Ward Larson et al. [LAR 97] apresentou um ajuste de histograma baseado na distribuição da luminância da cena. Então Drago [DRA 03] propôs um método interativo baseado em compressão lo-

garítmica dos valores de luminância imitando a resposta humana à luz.

Modelos globais são simples e computacionalmente eficientes, mas eles tem dificuldade em preservar o contraste local. Modelos locais resolvem este problema usando mapeamento espacial variável, que pode mapear valores diferentes a duas luminâncias idênticas de acordo com seus vizinhos.

Chiu et al. [CHI 93] e Schlick [SCH 94] apresentaram os primeiros experimentos em modelos locais de *Tone Mapping*. Jobson et al. [JOB 97] e Pattanaik et al. [PAT 98] mais tarde apresentaram técnicas multi-resolução que buscavam imitar as características do HVS. Tumblin e Turk [TUM 99] desenvolveram um método que usa uma fórmula inspirada na difusão anisotrópica para detectar discontinuidades em gradientes.

Recentemente Fattal et al. [FAT 02] apresentou um novo método baseado em atenuar a magnitude de gradientes. O trabalho de Reinhard et al. [REI 02] é inspirado em uma técnica fotográfica chamada "Zone System". O método de Durand e Dorsey [DUR 02] utiliza um filtro bilateral para decompor a imagem em duas camadas. Ashikhmim [ASH 02] propôs um modelo com três passos para imagens com alto contraste onde os detalhes são re-introduzidos no passo final sobre a imagem.

Finalmente existem os modelos que levam em consideração a adaptação do HVS em função do tempo, também chamados de dependentes de tempo. Ferwerda et al. [FER 96] desenvolveu um modelo perceptual que considera mudanças em limiares de visibilidade, na aparência das cores e sensibilidade temporal. Pattanaik et al. [PAT 00] propôs um modelo psicofísico com adaptação dependente de tempo e modelos de aparência. O método de Durand e Dorsey [DUR 00] é interativo e simula a percepção visual e a adaptação cromática. Dentre os modelos dependentes de tempo apenas o de Ledda et al. [LED 04] é

⁶<http://www.siggraph.org/>

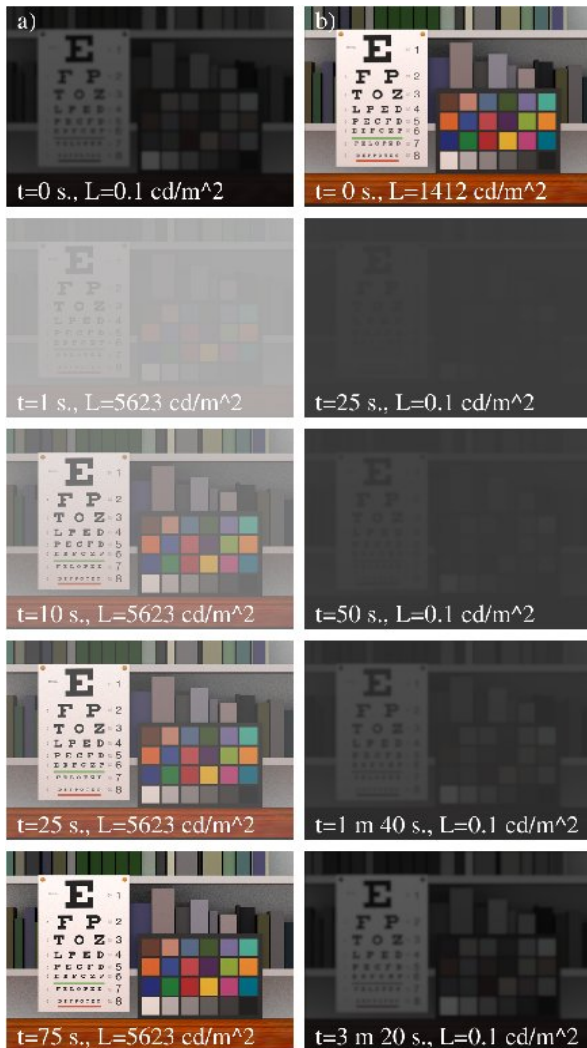


Figura 2: Exemplo de adaptação em função do tempo [FER 96]

local. Este modelo é baseado em um filtro bilateral e dados fisiológicos. A figura 2 mostra a adaptação em função do tempo utilizando o modelo de Ferwerda.

Alguns modelos foram implementados em hardware gráfico. Scheel et al. [SCH 00] modificou o modelo de Ward Larson utilizando texturas em hardware. Goodnight et al. [GOO 03b] implementou o modelo de Fattal em GPU, porém sem executar interativa-

mente. Goodnight et al. [GOO 03a] incluiu dependência de tempo no modelo de Reinhard executando interativamente em GPU. Artusi et al. [ART 03] desenvolveu um framework híbrido entre CPU e GPU para acelerar a execução de algoritmos de *Tone Mapping*.

3 Resultados Preliminares

Conforme estava previsto no cronograma apresentado na proposta deste trabalho, foi escolhido um modelo de *Tone Mapping* para ser implementado em GPU.

Ao contrário do que era esperado, o estudo das implementações dos modelos em GPU influenciou na geração dos critérios de seleção.

A seguir serão apresentados os critérios de seleção, um comparativo entre os modelos, a seleção do modelo e uma aplicação prática para este trabalho.

3.1 Critérios de seleção

Como resultado do estudo da produção científica e da revisão bibliográfica foram gerados os critérios para efetuar o comparativo entre os modelos de *Tone Mapping*.

Foi estabelecido que o modelo deveria ser dependente de tempo, local, computacionalmente eficiente e adaptativo.

- Dependente de tempo – é necessário que o modelo seja dependente de tempo para permitir a simulação da adaptação do HVS em função do tempo.
- Local – algoritmos que implementam muitas operações globais sobre os pixels não são eficientes quanto a manter os detalhes e os contrastes da imagem e não são trivialmente ou eficientemente mapeados para a arquitetura das GPUs, devido a característica de operações sobre streams destas.

- Computacionalmente eficiente – alguns modelos, mesmo implementados em GPU, não podem ser executados interativamente devido a complexidade de seus algoritmos.
- Adaptativo – o modelo deve permitir que a aplicação escolha se o algoritmo deve gerar resultados com eficiência ou com qualidade.

Outro critério, mas não exclusivo, seria a disponibilidade de código fonte para comparar resultados com a implementação em GPU.

3.2 Comparativo entre os modelos

De acordo com a proposta original estes critérios seriam utilizados apenas para efetuar o comparativo entre os modelos dependentes de tempo.

Tabela 1: Modelos Dependentes de Tempo

Modelos	Local	Eficiente	Adapta.
Ferwerda 96		✓	
Pattanaik 00		✓	
Durand 00		✓	
Ledda 04	✓		

A tabela 1 relaciona os principais modelos de *Tone Mapping* dependentes de tempo com os critérios estabelecidos. Porém foi constatado que dos quatro modelos dependentes de tempo três são modelos globais e o único local utiliza um filtro que preserva bordas chamado *filtro bilateral*. Para utilizar um filtro bilateral seria necessário implementar uma FFT em GPU e até o momento não existe uma implementação de FFT em GPU eficiente [MOR 03], o que inviabiliza a utilização deste modelo no trabalho. Escolher um deles poderia influenciar na qualidade dos resultados desejados e ainda não ser eficiente a sua implementação para GPUs.

A exemplo de Goodnight et al. [GOO 03a], a solução adotada foi incorporar um modelo de adaptação dependente de tempo a um modelo não dependente de tempo que atenda aos outros critérios.

Tabela 2: Modelos não Dependentes de Tempo

Modelos	Local	Eficiente	Adapta.
Fattal 02	✓		
Ashikhmim 02	✓	✓	
Durand 02	✓		
Reinhard 02	✓	✓	✓

Existe uma dúzia de modelos locais de *Tone Mapping* e tipicamente um novo modelo apresenta melhorias em relação ao modelo anterior em que foi baseado. Para simplificar a seleção do modelo final foi efetuada uma pré-seleção onde o critério utilizado foi a data de publicação. A tabela 2 relaciona os modelos de *Tone Mapping* não dependentes de tempo pré-selecionados com os critérios estabelecidos.

3.3 Seleção do modelo

O modelo de Fattal [FAT 02] tem excelentes resultados, porém já foi implementado em GPU [GOO 03b] e não foi possível ser executado interativamente. Ashikhmim [ASH 02], apesar de atender dois dos três critérios, criou o modelo otimizado para imagens com alto contraste. Apesar de não estar nos critérios, o modelo deve atender a maior variedade de imagens possíveis. O modelo de Durand e Dorsey [DUR 02] utiliza um filtro bilateral, assim como no modelo de Ledda seria necessário implementar uma FFT em GPU.

Foi selecionado o modelo de Reinhard [REI 02] por ele atender a todos os critérios, o código fonte estar disponível e por já ter sido implementado em GPU [GOO 03a] executando interativamente.

Entre os modelos dependentes de tempo, o



Figura 3: Exemplo de adaptação local [LED 04]

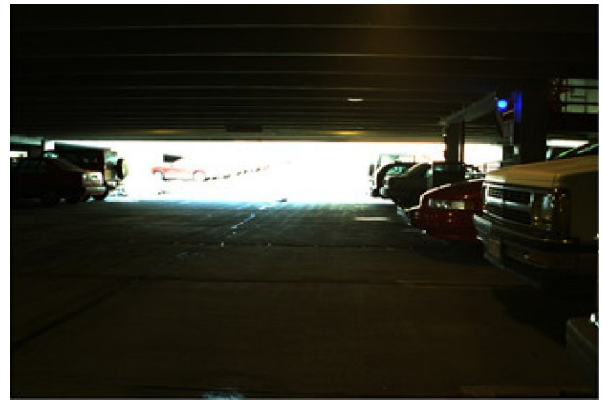
modelo de Ledda seria o mais interessante de incorporar ao modelo de Reinhard porque a adaptação do HVS é independente para cada pixel. A figura 3 mostra este modelo adaptado diferentemente em várias partes da imagem, porém esta adaptação também é baseada no filtro bilateral.

O modelo de Pattanaik foi selecionado por não ser limitado a cenas estáticas e por não adotar soluções simples em busca de interatividade.

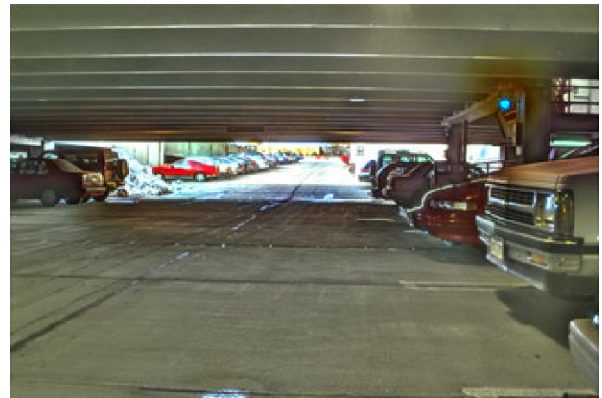
3.4 Aplicação prática

Uma aplicação deste trabalho seria a capacidade adaptativa em função do tempo ser utilizada como nível de dificuldade em jogos. Tendo como exemplo um jogo de corrida de carros, ao entrar em um túnel o jogador poderia ficar temporariamente sem visão, até que o modelo de *Tone Mapping* utilizado se adaptasse a nova situação, como acontece na vida real.

A figura 4 mostra como um jogo poderia exibir uma cena antes e depois de estar adaptado



(a) Não adaptado



(b) Adaptado

Figura 4: Exemplo de uma aplicação [PAT 98]

à baixa iluminação do túnel.

4 Conclusões

Este trabalho tem como influência o desejo de simular características do HVS em jogos. Foi efetuada uma pesquisa para saber quais áreas da computação gráfica teriam relação com este tópico. Esta pesquisa serviu de base para a elaboração da proposta deste trabalho, que é explorar a utilização do estado da arte em mo-

delos de *Tone Mapping* dependentes de tempo em aplicações interativas. Quando o trabalho foi proposto não era de conhecimento se a tecnologia atual permitiria que estes modelos fossem executados interativamente.

Uma revisão bibliográfica específica e direcionada à *Tone Mapping* permitiu saber que estes modelos podem ser executados interativamente, se implementados em GPU. Esta revisão também mostrou que nem todos os problemas podem ser mapeados para a arquitetura das GPUs.

Esta constatação causou um desvio em relação à proposta original. Esperava-se que os critérios de seleção seriam gerados apenas com a comparação entre os modelos de *Tone Mapping*, porém os critérios *Adaptativo* e *Computacionalmente Eficiente* também foram estabelecidos através do estudo das implementações em GPU.

Para a elaboração dos critérios e seleção do modelo foi necessário em alguns momentos desviar dos objetivos do trabalho. Isto aconteceu porque a idéia inicial seria apenas utilizar *Tone Mapping* e não fazer um trabalho específico nesta área. Porém nenhum dos modelos atendeu a todos os critérios e foi necessário achar uma solução para este problema.

Estes desvios levaram a um conhecimento melhor sobre o assunto e ajudaram a elucidar dúvidas como:

- É necessário utilizar um modelo dependente de tempo que cause uma impressão próxima a realidade em jogos? Não é necessário, porém se alguém deseja utilizar ele deve estar disponível.
- O que é mais importante para um bom resultado neste trabalho, o modelo de *Tone Mapping* ou o modelo de adaptação visual? É necessário dar uma maior atenção para a implementação do modelo de adaptação visual do que a do modelo de *Tone Mapping*, porém é fundamental

que o modelo de *Tone Mapping* gere bons resultados.

Com relação as GPUs, o trabalho deve ser desenvolvido utilizando a API OpenGL tendo como arquitetura alvo as placas compatíveis com a especificação do DirectX 9.0. Esta categoria de GPUs foi escolhida por ser a primeira com suporte a renderização em HDR, tem-se acesso a dispositivos desta categoria e porque as GPUs mais atuais continuam compatíveis com esta especificação. Talvez seja necessário modificar a implementação dos modelos selecionados devido as limitações desta categoria.

A cada geração as GPUs aumentam o desempenho, porém as limitações relacionadas com a arquitetura vão continuar. Devido a isso é importante que o modelo permita o controle entre desempenho e qualidade de acordo com a capacidade de processamento da GPU.

Como trabalho futuro seria interessante criar um modelo especialmente projetado para a arquitetura das GPUs. Este modelo poderia permitir que os sensores do HVS fossem lesionados ao ficar um longo período em sua capacidade máxima de percepção de intensidade de luz.

Referências

- [ART 03] ARTUSI, A. et al. Delivering interactivity to complex tone mapping operators. In: PROCEEDINGS OF THE 14TH EUROGRAPHICS WORKSHOP ON RENDERING, 2003. **Proceedings...** : Eurographics Association, 2003. p.38–44.
- [ASH 02] ASHIKHMIN, M. A tone mapping algorithm for high contrast images. In: PROCEEDINGS OF THE 13TH EUROGRAPHICS WORKSHOP ON RENDERING, 2002. **Proceedings...** Pisa, Italy: Eurographics Association, 2002. p.145–156.
- [CHI 93] CHIU, K. et al. Spatially Nonuniform Scaling Functions for High Contrast Images. In: PROCEEDINGS OF GRAPHICS INTERFACE '93, 1993. **Proceedings...** San Francisco, CA: Morgan Kaufmann, 1993. p.245–253.

- [DEB 97] DEBEVEC, P. E.; MALIK, J. Recovering high dynamic range radiance maps from photographs. In: PROCEEDINGS OF THE 24TH ANNUAL CONFERENCE ON COMPUTER GRAPHICS AND INTERACTIVE TECHNIQUES, 1997. **Proceedings...** New York, NY, USA: ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., 1997. p.369–378.
- [DEB 98] DEBEVEC, P. Rendering synthetic objects into real scenes: bridging traditional and image-based graphics with global illumination and high dynamic range photography. In: PROCEEDINGS OF THE 25TH ANNUAL CONFERENCE ON COMPUTER GRAPHICS AND INTERACTIVE TECHNIQUES, 1998. **Proceedings...** : ACM Press, 1998. p.189–198.
- [DEV 02] DEVLIN, K. A review of tone reproduction techniques. 2002.
- [DRA 03] DRAGO, F. et al. Adaptive logarithmic mapping for displaying high contrast scenes. In: EUROGRAPHICS 2003, 2003. **Proceedings...** : [s.n.], 2003.
- [DUR 00] DURAND, F.; DORSEY, J. Interactive tone mapping. In: PROCEEDINGS OF THE EUROGRAPHICS WORKSHOP ON RENDERING TECHNIQUES, 2000. **Proceedings...** Held in Brno, Czech Republic: Springer-Verlag, 2000. p.219–230.
- [DUR 02] DURAND, F.; DORSEY, J. Fast bilateral filtering for the display of high-dynamic-range images. In: PROCEEDINGS OF THE 29TH ANNUAL CONFERENCE ON COMPUTER GRAPHICS AND INTERACTIVE TECHNIQUES, 2002. **Proceedings...** : ACM Press, 2002. p.257–266.
- [FAT 02] FATTAL, R.; LISCHINSKI, D.; WERMAN, M. Gradient domain high dynamic range compression. In: PROCEEDINGS OF THE 29TH ANNUAL CONFERENCE ON COMPUTER GRAPHICS AND INTERACTIVE TECHNIQUES, 2002. **Proceedings...** : ACM Press, 2002. p.249–256.
- [FER 96] FERWERDA, J. A. et al. A model of visual adaptation for realistic image synthesis. In: PROCEEDINGS OF THE 23RD ANNUAL CONFERENCE ON COMPUTER GRAPHICS AND INTERACTIVE TECHNIQUES, 1996. **Proceedings...** : ACM Press, 1996. p.249–258.
- [FOU 95] FOURNIER, A. Light, vision and colour. CPSC514, University of British Columbia, Vancouver, CA, 1995.
- [GLA 94] GLASSNER, A. S. **Principles of Digital Image Synthesis**. Morgan Kaufmann Publishers Inc., 1994.
- [GOO 03a] GOODNIGHT, N. et al. Interactive time-dependent tone mapping using programmable graphics hardware. In: PROCEEDINGS OF THE 14TH EUROGRAPHICS WORKSHOP ON RENDERING, 2003. **Proceedings...** Leuven, Belgium: Eurographics Association, 2003. p.26–37.
- [GOO 03b] GOODNIGHT, N. et al. A multigrid solver for boundary value problems using programmable graphics hardware. In: PROCEEDINGS OF THE ACM SIGGRAPH/EUROGRAPHICS CONFERENCE ON GRAPHICS HARDWARE, 2003. **Proceedings...** : Eurographics Association, 2003. p.102–111.
- [GOR 84] GORAL, C. M. et al. Modeling the interaction of light between diffuse surfaces. In: PROCEEDINGS OF THE 11TH ANNUAL CONFERENCE ON COMPUTER GRAPHICS AND INTERACTIVE TECHNIQUES, 1984. **Proceedings...** : ACM Press, 1984. p.213–222.
- [JOB 97] JOBSON, D. J.; UR RAHMAN, Z.; WOODSELL, G. A. A multiscale retinex for bridging the gap between color images and the human observation of scenes. IEEE Transactions on Image Processing, 6(7):965–976, July 1997.
- [JYR 03] JYRINKI, T. High dynamic range images. T-111.500 Seminar on computer graphics, Helsinki University of Technology, Helsinki, FI, <http://www.tml.hut.fi/Opinnot/Tik-111.500/2003/paperit/TimoJyrinki.pdf>, 2003.
- [LAR 97] LARSON, G. W.; RUSHMEIER, H.; PIATKO, C. A visibility matching tone

- reproduction operator for high dynamic range scenes. **IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics**, Piscataway, NJ, USA, v.3, n.4, p.291–306, 1997.
- [LED 04] LEDDA, P.; SANTOS, L. P.; CHALMERS, A. 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, 2004. **Proceedings...** : ACM Press, 2004. p.151–160.
- [MOR 03] MORELAND, K.; ANGEL, E. The fft on a gpu. In: PROCEEDINGS OF THE ACM SIGGRAPH/EUROGRAPHICS CONFERENCE ON GRAPHICS HARDWARE, 2003. **Proceedings...** : Eurographics Association, 2003. p.112–119.
- [NVI 04] NVIDIA. Technical brief: The geforce 6 series of gpus image quality high performance & quality for complex visual effects. TB-01201-001_v02, <http://www.nvidia.com>, 2004.
- [PAT 98] PATTANAIAK, S. N. et al. A multiscale model of adaptation and spatial vision for realistic image display. In: PROCEEDINGS OF THE 25TH ANNUAL CONFERENCE ON COMPUTER GRAPHICS AND INTERACTIVE TECHNIQUES, 1998. **Proceedings...** : ACM Press, 1998. p.287–298.
- [PAT 00] PATTANAIAK, S. N. et al. Time-dependent visual adaptation for fast realistic image display. In: PROCEEDINGS OF THE 27TH ANNUAL CONFERENCE ON COMPUTER GRAPHICS AND INTERACTIVE TECHNIQUES, 2000. **Proceedings...** : ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., 2000. p.47–54.
- [REI 02] REINHARD, E. et al. Photographic tone reproduction for digital images. In: PROCEEDINGS OF THE 29TH ANNUAL CONFERENCE ON COMPUTER GRAPHICS AND INTERACTIVE TECHNIQUES, 2002. **Proceedings...** : ACM Press, 2002. p.267–276.
- [SCH 94] SCHLICK, C. Quantization techniques for the visualization of high dynamic range pictures. In: PHOTOREALISTIC RENDERING TECHNIQUES '94 (PROCEEDINGS OF THE 5TH EUROGRAPHICS WORKSHOP ON RENDERING), 1994. **Proceedings...** : Eurographics, 1994. p.7–20.
- [SCH 00] SCHEEL, A.; STAMMINGER, M.; SEIDEL, H.-P. Tone reproduction for interactive walkthroughs. **Computer Graphics Forum**, Leuven, Belgium, v.19, n.3, p.301–312, 2000.
- [SEE 04] SEETZEN, H. et al. High dynamic range display systems. **ACM Trans. Graph.**, New York, NY, USA, v.23, n.3, p.760–768, 2004.
- [TUM 93] TUMBLIN, J.; RUSHMEIER, H. Tone reproduction for realistic images. **IEEE Comput. Graph. Appl.**, Los Alamitos, CA, USA, v.13, n.6, p.42–48, 1993.
- [TUM 99] TUMBLIN, J.; TURK, G. Lcis: a boundary hierarchy for detail-preserving contrast reduction. In: PROCEEDINGS OF THE 26TH ANNUAL CONFERENCE ON COMPUTER GRAPHICS AND INTERACTIVE TECHNIQUES, 1999. **Proceedings...** : ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., 1999. p.83–90.
- [WAR 94] WARD, G. A contrast-based scalefactor for luminance display. **Graphics gems**, Burlington, USA, v.IV, p.415–421, 1994.
- [WHI 80] WHITTED, T. An improved illumination model for shaded display. **Commun. ACM**, New York, USA, v.23, n.6, p.343–349, 1980.