

# COMPARAÇÃO ENTRE DIFERENTES MÉTODOS DE CALIBRAÇÃO DE IMAGENS DE GRANDE ALCANCE DINÂMICO SOB CONDIÇÃO DE ILUMINAÇÃO NATURAL PARA LENTES OLHO DE PEIXE

**Dennis Flores de Souza (1); Paulo Sergio Scarazzato (2)**

(1) Doutor, Professor do curso de Arquitetura e Urbanismo, [dennis.souza@usf.edu.br](mailto:dennis.souza@usf.edu.br), Universidade São Francisco, Departamento de Arquitetura e Urbanismo, Laboratório de Conforto Ambiental, R. Alexandre Rodrigues Barbosa, 45, Itatiba - SP, 13251-900, Tel.: (11) 4534-8064

(2) Doutor, Professor do Departamento de Arquitetura e Construção, [paulosca@fec.unicamp.br](mailto:paulosca@fec.unicamp.br), Universidade Estadual de Campinas, Laboratório de Conforto Ambiental e Física Aplicada, Rua Saturnino de Brito, 224, Cidade Universitária Zeferino Vaz, Campinas - SP, 13083-889, Caixa Postal 6143, Tel.: (19) 3521-2383

## RESUMO

As imagens de grande alcance dinâmico são cada vez mais comuns em pesquisas da área de iluminação por sua versatilidade de aplicação em medições quantitativas e qualitativas. Para que esta ferramenta possa ser confiável, é necessário que as imagens sejam calibradas. Os métodos usuais são confiáveis, mas melhor adaptados para câmeras com objetivas retilíneas. Com lentes grande-angulares estes podem não ser os mais adequados, pois o campo de visão pode registrar áreas indesejadas. Um novo método foi recentemente desenvolvido para ser mais adequado a esse tipo de objetiva. Os experimentos foram feitos para condições de iluminação artificial e, portanto, para condições de iluminação natural devem ser feitos outros, devido às diferenças de espectro das duas fontes. Este artigo visa demonstrar a viabilidade de um novo método de calibração adaptado para o uso sob a luz natural, comparando-o aos métodos mais usuais. Para tanto, foi construído um protótipo de um semicilindro de calibração com diâmetro de um metro, aberto em seu lado retangular. Este cilindro foi pintado de cinza médio e em sua superfície interna foram dispostos retângulos brancos e pretos, intercalados, em cartão fosco. Foram feitas medições da parte interna com o luminômetro e com a câmera por meio das imagens de grande alcance dinâmico, em condições de céu claro. O método aplicado permitiu detectar as curvas de resposta e os fatores de calibração em diferentes configurações da câmera, comparando-as aos dados obtidos com o luminômetro. Os resultados mostram que o novo método funciona relativamente bem, impedindo o registro de áreas indesejadas no campo de visão da câmera e permitindo analisar mais dados que somente a calibração usual.

Palavras-chave: iluminação natural, imagens HDR, calibração.

## ABSTRACT

The high dynamic range images became a common tool in lighting studies due to their application versatility in quantitative and qualitative measurements. In order to achieve reliable results with these images, they must be calibrated. The common methods are reliable, but adapted to cameras with rectilinear lenses. For wide-angle lenses they might not be the better choice, since the field of view may capture undesired areas. A new method was recently developed for better accuracy with this kind of lens. The experiments were made under artificial light conditions and, therefore, for daylight new studies must be made, due to the spectral differences of these sources. This paper aims to show the viability of a new calibration method adapted for usage under daylight condition, comparing the result to the common methods. For that, a half-cylinder prototype was built with one-meter diameter, open in its rectangular side. The cylinder was painted in medium gray and a black-and white paper strip was positioned inside of it. Measurements were made with the luminance meter and with the camera with the high dynamic range images, under clear sky condition. The devised method allowed calculating the response curves and the calibration factors of different camera configurations. The results show that the new method works fairly well, prevented the capture of undesired areas in the camera's field of view and allowed to analyze more data than the usual calibration.

Keywords: daylight, HDR images, calibration.

## 1. INTRODUÇÃO

O uso de imagens de grande alcance dinâmico (*High Dynamic Range – HDR*) como método de medição é cada vez mais comum em pesquisas da área de iluminação, por suas vantagens em área visual registrada e a possibilidade de diversas aplicações em análises qualitativas e quantitativas. Contudo, para que os dados obtidos sejam confiáveis, é necessário que um método de calibração apropriado seja aplicado. Vários métodos já foram desenvolvidos nos últimos anos (INANICI; GALVIN, 2004; INANICI, 2006; JACOBS, 2007), mas geralmente estas formas de calibração são pensadas para serem aplicadas com objetivas retilíneas, que são as lentes mais comuns em câmeras SLR e amadoras. Quando estes métodos são aplicados a objetivas grande-angulares, como as olho de peixe, há o registro de áreas indesejadas, como mostrado na Figura 1, o que pode gerar dificuldades para a obtenção das variáveis necessárias para a correta calibração das imagens HDR.



Figura 1 – Registro do campo de visão a partir de uma objetiva olho de peixe, mostrando o painel de calibração e as áreas ao redor.

Recentemente, uma pesquisa foi divulgada (CAUWERTS et al, 2012) em que um novo método de calibração específico para objetivas grande-angulares, analisando não somente a calibração das imagens HDR como também outros fatores de interesse, entre eles o efeito da vinheta e a projeção da lente. Este método utilizou um céu artificial para os testes, uma fonte uniforme e controlada, mas cujo espectro é diferente da luz natural. Como o equilíbrio de branco é um das configurações importantes de serem ajustadas para a correta captura das imagens, há a possibilidade de que as diferenças espectrais possam ter impacto na aplicação dos resultados da calibração em fontes de luz diferentes.

Desta forma, é necessário que a diferença entre as condições de luz seja analisada em um método de calibração que possa impedir o registro de áreas indesejadas no campo de visão da objetiva, mas que também seja capaz de ser utilizado nas mais diversas fontes de luz, inclusive em condição de iluminação natural.

## 2. OBJETIVO

Este artigo tem como objetivo demonstrar a viabilidade de um método desenvolvido para calibração de imagens HDR a partir de câmeras equipadas com lentes olho de peixe sob condições de iluminação natural.

## 3. MÉTODO

Esse trabalho avalia os dados obtidos a partir de um protótipo de cilindro de calibração, desenvolvido para obter imagens HDR em condição de iluminação natural, sem o registro de áreas indesejadas dentro do campo de visão de uma objetiva olho-de-peixe. A pesquisa usou os equipamentos e softwares descritos na Tabela 1.

Tabela 1 – Equipamentos utilizados.

<b>Tipo</b>	<b>Modelo</b>
Máquina Fotográfica	Nikon D60
Objetiva	Sigma 4.5mm f2.8/22 circular fisheye.
Luminômetro	Konica Minolta LS-110
Computador	Macbook Pro 11.1 (Mac OS X 10.10.3)
Programa de controle da câmera	Sofortbild 1.3 (EHRMANN; ALBRECHT, 2014)
Programa de Compilação	Photosphere 1.8.16U (WARD, 2014)

### 3.1. Configurações da câmera

A câmera fotográfica foi ajustada conforme as recomendações presentes no trabalho de Inanici e Galvin (2004), em que as configurações devem estar travadas em opções específicas, como mostra a Tabela 2.

Tabela 2 – Ajuste da câmera, adaptado de Inanici e Galvin (2004).

Configuração	Ajuste
Sensibilidade	ISO 100
Balanco do branco	Luz do Dia
Equilíbrio de cores	Normal
Foco	Manual
Corretor / redutor de ruído	Desligado
Medida da luminosidade	Central
Ajuste da imagem	Normal

Este ajuste se justifica pela necessidade de se assegurar que todas as imagens serão tratadas da mesma maneira pelo sistema de processamento da câmera, sem que esta tente efetuar adaptações ou mudanças indesejadas, devido à variação da quantidade de luz incidente no sensor.

As variáveis utilizadas para modificar os valores de exposição (*Exposure Value – EV*) foram a abertura da objetiva (*f-stop*) e o tempo de exposição (*t*). Desta forma, as fotos foram tiradas em lotes correspondentes às aberturas, desde a maior (f2.8) até a menor (f22) disponíveis na objetiva olho de peixe. O degrau escolhido para a troca de *f-stops* foi de 1 EV, o que levou à adoção das aberturas listadas na Figura 2.

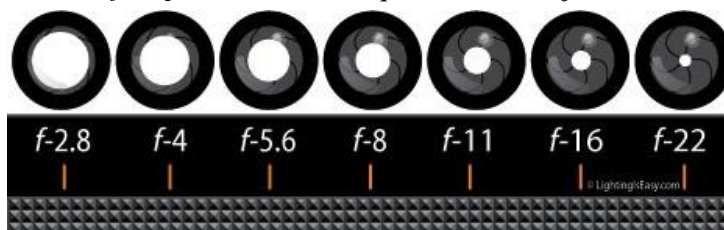


Figura 2 – Aberturas utilizadas (VOSBURGH, 2011).

O tempo de exposição foi a variável escolhida para a modificação dos EVs dentro de cada lote, com o uso da ferramenta de *bracketing* disponível no programa de controle da câmera. Esta opção permite efetuar automaticamente um conjunto de disparos, variando a exposição do sensor à luz em degraus pré-estabelecidos. A exemplo das aberturas, o degrau escolhido para o tempo de exposição também foi de 1EV. Assim, foram tiradas fotos entre 4s e 1/4000s, em intervalos sempre referentes à metade do valor anterior, de acordo com os valores disponíveis nas configurações da câmera (isto é, 4s – 2s – 1s – 1/2s – 1/4s – 1/8s – 1/15s – 1/30s – 1/60s – 1/125s – 1/250s – 1/500s – 1/1000s – 1/2000s – 1/4000s). Para cada lote, foi anotado o valor *t* correspondente ao meio da escala (0EV), para servir como determinante das fotos a serem utilizadas na compilação. Neste trabalho, de acordo com a quantidade de luz incidente no cilindro, foram utilizadas três fotos superexpostas e três subexpostas, totalizando 7 fotos: +3EV, +2EV, +1EV, 0EV, -1EV, -2EV e -3EV.

### 3.2. Cilindro de Calibração

O protótipo do cilindro de calibração foi desenvolvido a partir de uma tentativa de adaptação do modelo apresentado por Cauwerts et al. (2012) para uso em condição de iluminação natural, em vez do uso de um céu artificial. A Figura 3 mostra o desenho esquemático deste protótipo, que se caracteriza por ser um semicilindro com raio de 50cm e altura de 100cm. Na parte interna de sua superfície curva, foram dispostos retângulos de papel com 2,2 x 4x4cm em uma fileira na área central, com alternância entre brancos e pretos. Cada retângulo cobre um ângulo de 2,5° da superfície.

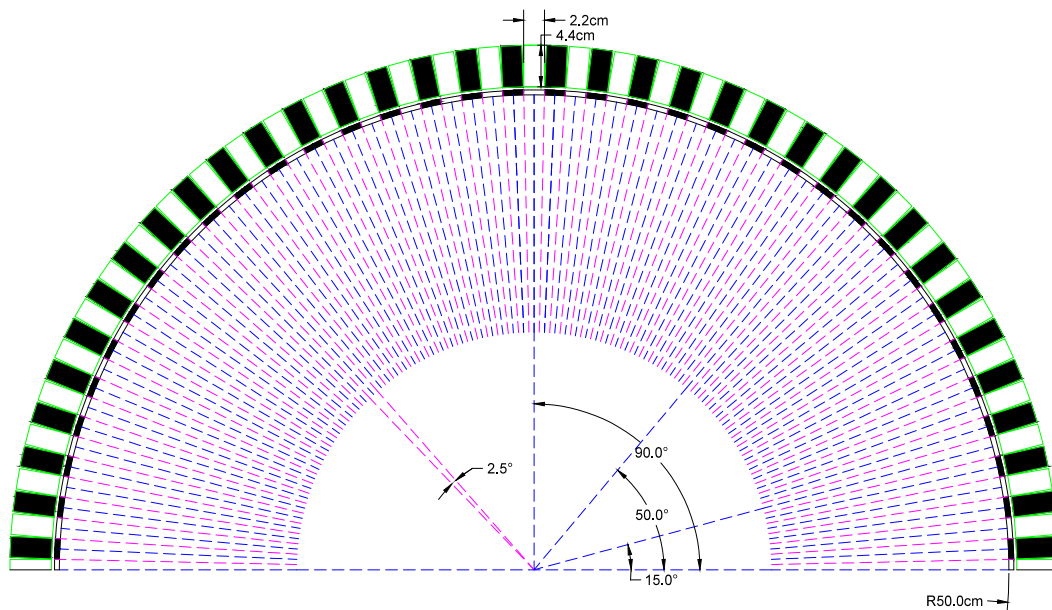


Figura 3 - Dimensões do cilindro e dos cartões colados em sua superfície interna, corte transversal.

Este cilindro foi construído em aço, a partir de uma chapa calandrada no raio de 50cm, sustentada por uma moldura quadrada de 100 x 100cm, com uma estrutura para sustentação da câmera no centro da mesma. Toda a estrutura foi pintada em cinza (aproximadamente 65% de refletância). Os retângulos foram recortados a partir de folhas de papel ColorPlus preto e Opaline branco, ambos com gramatura de 180g. A Figura 4 mostra algumas imagens do cilindro construído com a câmera acoplada.

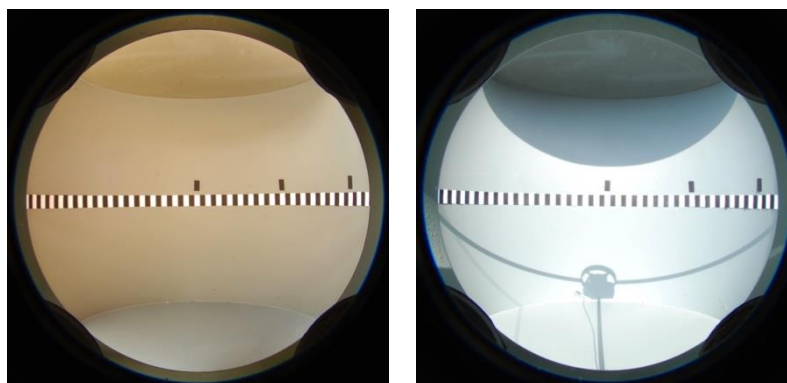


(A)

(B)

Figura 4 – Imagens do cilindro montado, vista superior (A) e frontal, com a câmera acoplada (B).

De forma a melhor testar as diferenças de condições de iluminação, o protótipo foi posicionado em duas condições diferentes, como mostra a Figura 5: com a abertura do semicilindro posicionada contrária ao sol, estando o seu interior sombreado (Figura 5A); e com a abertura direcionada à normal do azimute do sol, estando o seu interior exposto ao Sol (Figura 5B). Em ambas as situações, as fotos foram feitas em condição de céu claro.



(A)

(B)

Figura 5 – Imagens tomadas com a câmera acoplada ao cilindro, em condição de sombra (A) e com a incidência direta do Sol (B).

### 3.3. Comparação com método tradicional

O método de calibração anterior, referido neste trabalho como tradicional, foi descrito em trabalhos anteriores (SOUZA; SCARAZZATO, 2009), adaptado de outros estudos (INANICI; GALVIN, 2004; INANICI, 2006; JACOBS, 2007). Neste artigo, foi aproveitada a face superior do cilindro presente na Figura 4A para dispor retângulos de papel brancos e pretos, como mostra a Figura 6, que foram medidos da mesma maneira que os papéis da face interna do cilindro.



Figura 6 –Cilindro ajustado para o método tradicional.

### 3.4. Variáveis analisadas

Foram analisadas as luminâncias dos pontos medidos, de forma a obter a curva de resposta (CR), o fator de calibração (FC) e o fator de vinheta (FV).

A curva de resposta é uma derivação da curva polinomial proposta por Mitsunaga e Nayar (1999), que pode ser originalmente representada pela função N-dimensional descrita na Equação 1:

$$f(M) = \sum_{n=0}^N c_n M^n \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

M é a medição da luminosidade do pixel;

$c_n$  é o vetor de coeficientes da equação polinomial.

Esta forma pode ser utilizada para derivar a CR de qualquer câmera. Este processo gera a estrutura descrita na Equação 2:

$$y = c_n x^n + c_{n-1} x^{n-1} + c_{n-2} x^{n-2} + \dots + c_1 x + c_0 \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

y é a luminosidade relativa do pixel;

$c_n$  são os coeficientes da equação polinomial;

x é valor do pixel.

No caso das imagens digitais, são geradas três CRs, uma para cada canal de cor: vermelho (r), verde (g) e azul (b). Os coeficientes foram obtidos a partir do arquivo de configuração do Photosphere (WARD, 2011). Como demonstrado na Figura 7, as curvas de cada um dos canais são diferentes, devido às diferenças das interações entre os diferentes comprimentos de onda com as propriedades ópticas das lentes que compõem a objetiva.

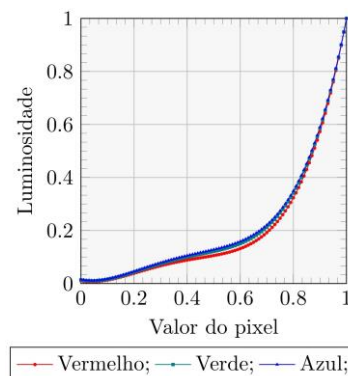


Figura 7 – Exemplo de CR obtida a partir da imagem de calibração.



De posse das curvas para cada lote, foram geradas CRs para cada situação de iluminação do cilindro, a partir do cálculo das médias para cada coeficiente das equações polinomiais, assim como uma CR para as situações combinadas. Essas curvas foram comparadas com a obtida no teste com o método tradicional. Todas essas situações foram usadas para gerar novas imagens a partir de cada CR, das quais foram obtidos diferentes fatores de calibração.

O FC é uma razão, conforme a Equação 3, que compara as luminâncias obtidas com o equipamento de controle (por exemplo, o luminômetro) e com a imagem HDR, de forma a achar um fator a ser aplicado para corrigir os valores dos pixels.

$$FC = \frac{L_M}{L_H} \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

$L_M$  é a luminância medida pelo luminômetro, em  $\text{cd/m}^2$ ;

$L_H$  é a luminância medida a partir da imagem HDR, em  $\text{cd/m}^2$ .

O fator de vinheta é o último valor a ser obtido, pois depende da correta normalização dos dados a partir das CRs e dos FCs previamente calculados. O FV pode ser definido como uma razão entre as luminâncias obtidas com o equipamento de controle com a imagem HDR calibrada a partir do FC médio obtido, conforme a Equação 4.

$$FV = \frac{L_M}{L_C} \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

$L_M$  é a luminância medida pelo luminômetro, em  $\text{cd/m}^2$ ;

$L_C$  é a luminância calibrada da imagem HDR, em  $\text{cd/m}^2$ .

## 4. ANÁLISE DE RESULTADOS

No total, foram tirados 15 lotes de imagens HDR, sendo:

- Sete em condição de sombreamento;
- Sete em condição de incidência direta do sol;
- Um utilizando o método tradicional.

Desta forma, foram geradas 4 situações diferentes para cada lote:

- Uma de HDRs geradas com CRs individuais, correspondentes a cada conjunto de imagens-fonte;
- Uma de HDRs geradas com a CR média calculada a partir da condição de iluminação correspondente;
- Uma de HDRs geradas com a CR média calculada a partir de todos os lotes;
- Uma de HDR geradas com a CR do método tradicional.

### 4.1. Curvas de Calibração

As Figuras 8 e 9 contêm os resultados das curvas de calibração obtidas a partir de cada lote nas condições de sombreamento e insolação direta, respectivamente. Também é mostrada a curva média de cada condição de iluminação.

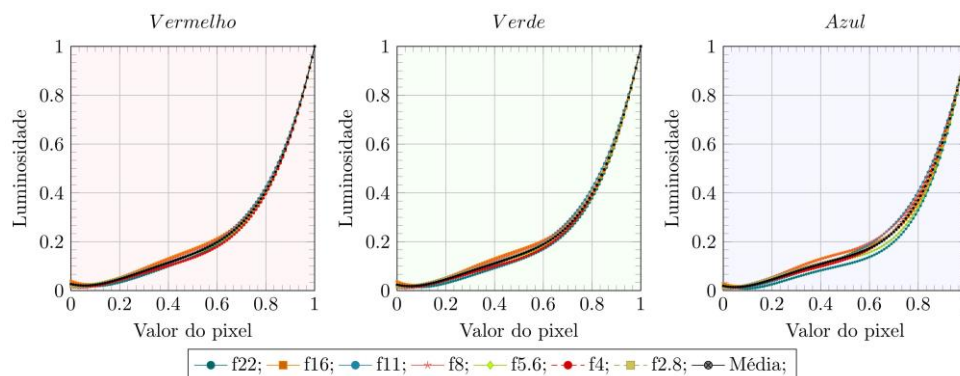


Figura 8 – Curvas de respostas obtidas em cada abertura de objetiva para a condição de sombra, comparadas à média calculada.

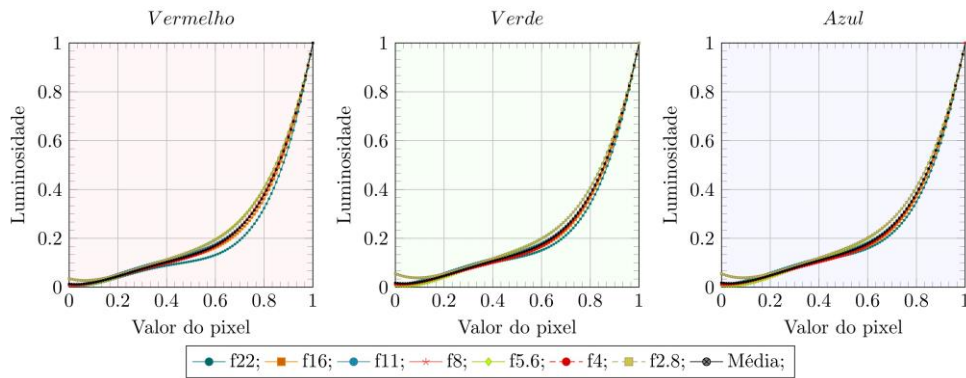


Figura 9 – Curvas de respostas obtidas em cada abertura de objetiva para a condição de sol, comparadas à média calculada.

É possível perceber que as curvas, apesar de serem geradas com aberturas de objetivas diferentes, são bem equilibradas, concentrando-se ao redor da média calculada. Analisando cada canal isoladamente, é possível perceber que há um maior distanciamento entre as CR do azul para a condição de sombreamento e a CR do vermelho para a condição de insolação direta. Isto pode ser um desdobramento do fato de as imagens tiradas em cada situação, como mostrado anteriormente nas Figuras 5A e 5B, há um desvio para um tom avermelhado sob sombra e para um tom azulado sob sol. Desta forma, pode existir uma menor quantidade, ou qualidade, de dados para a composição das curvas desses canais de cor.

Como já relatado na parte dos métodos, dos coeficientes individuais de cada CR gerada foram calculados valores médios. Estes novos coeficientes estão demonstrados nas Equações 5, 6 e 7, para os lotes em sombra, sob sol e a média calculada geral, respectivamente. O cálculo da média geral só foi possível devido ao fato de todos os lotes terem produzido equações polinomiais de mesma potência.

$$y = \begin{cases} 3,69r^4 - 5,07r^3 + 2,60r^2 - 2,46 \times 10^{-1}r + 2,69 \times 10^{-2} \\ 3,89g^4 - 5,34g^3 + 2,66g^2 - 2,40 \times 10^{-1}g + 2,41 \times 10^{-2} \\ 4,36b^4 - 5,98b^3 + 2,83b^2 - 2,31 \times 10^{-1}b + 1,93 \times 10^{-2} \end{cases} \quad \text{Equação 5}$$

$$y = \begin{cases} 3,81r^4 - 4,91r^3 + 2,21r^2 - 1,18 \times 10^{-1}r + 1,32 \times 10^{-2} \\ 3,92g^4 - 5,17g^3 + 2,39g^2 - 1,58 \times 10^{-1}g + 1,76 \times 10^{-2} \\ 3,89b^4 - 5,13b^3 + 2,38b^2 - 1,51 \times 10^{-1}b + 1,80 \times 10^{-2} \end{cases} \quad \text{Equação 6}$$

$$y = \begin{cases} 3,75r^4 - 4,99r^3 + 2,41r^2 - 1,82 \times 10^{-1}r + 2,01 \times 10^{-2} \\ 3,91g^4 - 5,25g^3 + 2,53g^2 - 1,99 \times 10^{-1}g + 2,08 \times 10^{-2} \\ 4,12b^4 - 5,55b^3 + 2,60b^2 - 1,91 \times 10^{-1}b + 1,87 \times 10^{-2} \end{cases} \quad \text{Equação 7}$$

A Equação 8, por sua vez, mostra a CR obtida a partir do lote de controle, gerado a partir do método tradicional de calibração.

$$y = \begin{cases} 1,62r^3 - 9,82 \times 10^{-1}r^2 + 3,63 \times 10^{-1}r - 3,49 \times 10^{-3} \\ 1,45g^3 - 7,80 \times 10^{-1}g^2 + 3,36 \times 10^{-1}g - 2,78 \times 10^{-3} \\ 1,54b^3 - 8,92 \times 10^{-1}b^2 + 3,60 \times 10^{-1}b - 3,10 \times 10^{-3} \end{cases} \quad \text{Equação 8}$$

É possível perceber que os comportamentos dos dois métodos geram curvas com potências diferentes, o que torna complexo comparar numericamente os valores de coeficiente obtidos. Mas uma comparação visual, conforme a Figura 10, permite perceber que há um grande desvio dos valores computados por cada método. É esperado, portanto, que os resultados das medições tenham diferenças.

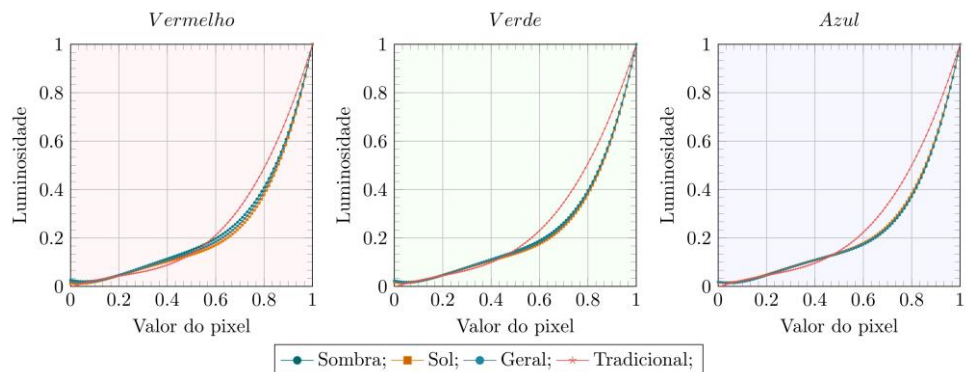


Figura 10 – Curvas de respostas médias de cada uma das condições de iluminação, comparadas à média geral e à curva gerada pelo método tradicional.

A Figura 11 mostra os fatores de calibração gerados a partir de cada lote, bem como as médias de cada ponto e de cada conjunto de fotos.

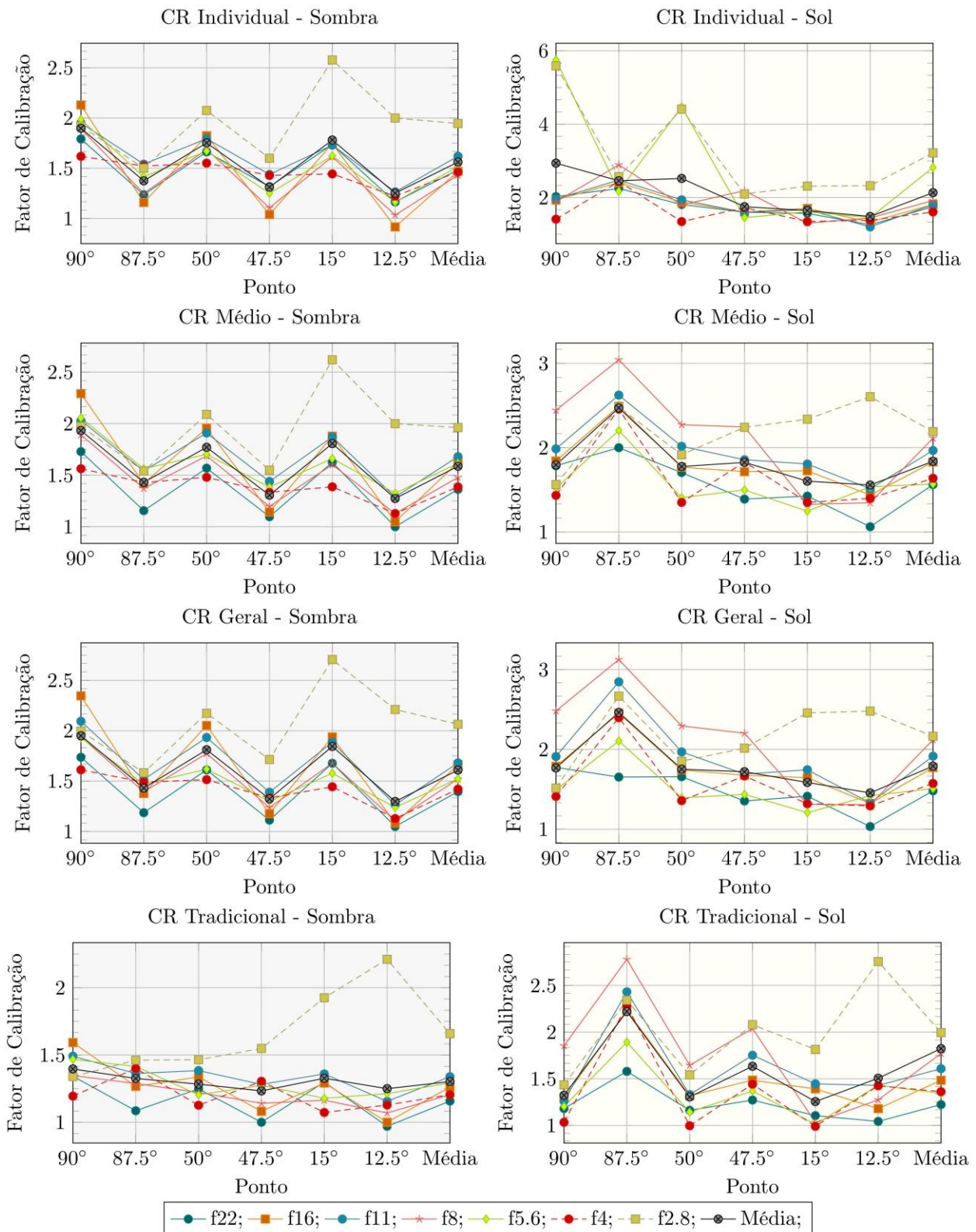


Figura 11 – Fatores de calibração para as situações de teste.

É possível perceber que a média dos valores de FC para a condição de sombreamento é inferior aos detectados na situação de insolação direta – FCs menores significam valores de luminância mais próximos ao detectado pelo luminômetro. Sob sol, há maior dificuldade em se detectar as regiões mais escuras, principalmente ao usar as CRs médias e tradicional. Em comum a todas as situações, há o fato de que as aberturas menores produzem resultados mais discrepantes.



## 4.2. Fator de vinheta

Os dados de fatores de vinheta estão dispostos nos gráficos da Figura 12.

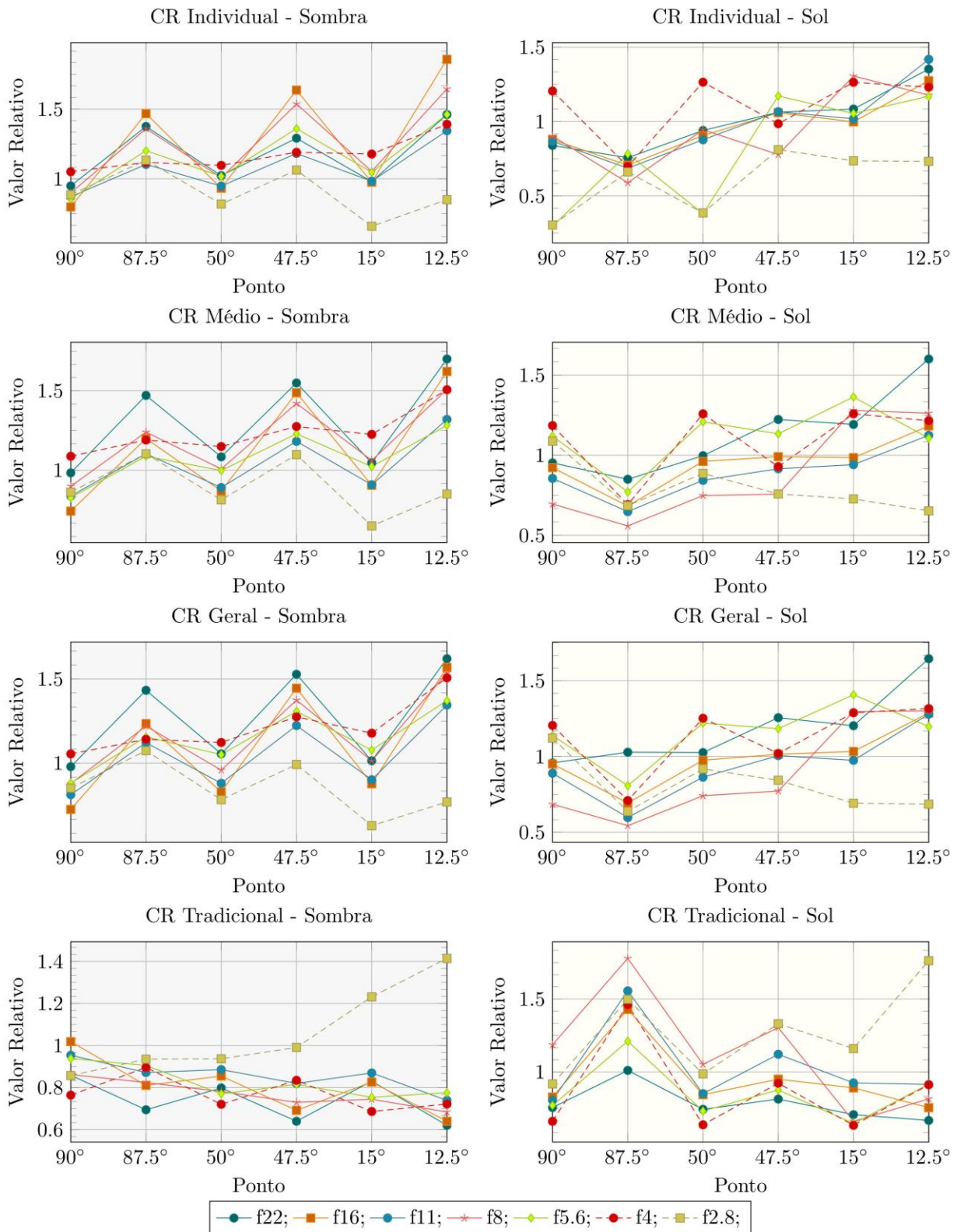


Figura 12 – Fatores de vinheta para as situações de teste.

Os dados demonstram uma tendência parecida com a detectada nos FCs. A maioria dos lotes, representados pelas aberturas de menor diâmetro, tem a tendência de acréscimo nos valores conforme se medem os retângulos mais distantes do centro. A exceção está no lote f2.8, que apresentam um decréscimo nos valores registrados, ou seja, uma perda de iluminação nas bordas.

## 5. CONCLUSÕES

Este trabalho mostra os resultados obtidos com o método de calibração, desenvolvido para responder às necessidades específicas do uso das imagens HDR em máquinas fotográficas equipadas com objetivas olho-de-peixe.

Conforme já descrito anteriormente, o cilindro de calibração construído para a realização desta pesquisa é um protótipo, e os resultados obtidos com o mesmo podem estar sujeitos a algum tipo de desvio pela forma que os lotes foram coletados, pois as medições com o luminômetro aconteceram simultaneamente a correspondente tomada de fotografias. Desta forma, pode-se garantir a mesma condição de iluminação, mas a diferença entre angulações pode produzir alguma diferença de valores. Esta hipótese pode ser futuramente investigada, comparando-a à medição com o luminômetro na mesma posição que a câmera, antes ou depois da tomada de fotografias correspondente.

Os dados coletados neste trabalho indicam que, em condição de iluminação natural, as aberturas de objetiva de menor diâmetro são as mais indicadas para lidar com a quantidade de luz do Sol, tanto na situação de sombreamento quanto na de incidência direta da luz. Apesar das diferenças entre os resultados de fatores de calibração e de vinheta, o comportamento das curvas de resposta para todos os lotes é equivalente, o que permite constatar que há equilíbrio no comportamento do sensor da câmera, independente da abertura escolhida.

Os próximos passos para esta pesquisa são o refinamento de questões construtivas do cilindro de calibração, para obter maior precisão nos dados coletados. Também deve ser investigado a possibilidade de se estudar outras variáveis, como a identificação do tipo de projeção da lente. A adoção de uma plataforma de programação, como o Matlab, pode facilitar o processo, gerando novas variáveis para a comparação.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CAUWERTS, Coralie; BODART, Magali; DENEYER, Arnaud. Comparison of the Vignetting Effects of Two Identical Fisheye Lenses In: **LEUKOS**. vol. 8, no. 3, Jan. 2012, pp. 123–134.
- EHRMANN, Michael; ALBRECHT, Florian. Sofortbild 1.3. 2014. Disponível em: <<http://www.sofortbildapp.com/>>. Acesso em: jan. 2015.
- INANICI; Mehlika. Evaluation of high dynamic range photography as a luminance data acquisition system. In: **Lighting Research and Technology**. vol. 38, no. 2, Jan. 2006, pp. 123–134.
- INANICI, Mehlika; GALVIN, Jim. **Evaluation of high dynamic range photography as a luminance mapping technique**. Lawrence Berkeley National Laboratory. 2004.
- JACOBS, Axel. High dynamic range imaging and its application in building research. In: **Advances in Building Energy Research**. vol. 1, no. 1, 2007, pp. 177–202.
- MITSUNAGA, Tomoo; NAYAR, Shree K. Radiometric self calibration. In: **IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition**. Vol. 1. IEEE, 1999, p. 380.
- SCARAZZATO, Paulo Sergio; SOUZA, Dennis Flores. HDR images in the study of sky vault luminance distribution and identification of prevailing sky types. In: **Proceedings of the 27th Session of the CIE Sun City**. Vol. 1. CIE. South Africa, 2011, pp. 758–766.
- SIGMA. 4.5mm F2.8 EX DC HSM Circular Fisheye. 2013. Disponível em: <<http://www.sigmaphoto.com/product/45mm-f28-ex-dc-hsm-circular-fisheye>>. Acesso em: abr. 2013.
- SOUZA, Dennis Flores; SCARAZZATO, Paulo Sergio. Estudos e avaliações pós-ocupação da iluminação no espaço construído através de imagens HDR e câmeras digitais compactas. In: **Do Moderno ao Digital: Desafios de uma transição**. SiGraDi. São Paulo: Mackenzie, Nov. 2009, pp. 443–445.
- VOSBURGH, Charles. F-stops explained. **Lighting is easy**, fev. 2011. Disponível em: <<http://www.lightingiseasy.com/lighting-is-easy-blog/f-stops-explained>>. Acesso em: abr. 2015.
- WARD, Gregory. **[HDRI] response curve data from Photosphere**. HDRI Mailing List, out. 2011. Disponível em: <<http://www.radiance-online.org/pipermail/hdri/2011-October/000339.html>>. Acesso em: abr. 2015.
- WARD, Gregory. Photosphere 1.8.16u. **Anywhere Software**. 2014. Disponível em: <<http://anywhere.com/>>. Acesso em: mar. 2015.