



Proposta de uma metodologia para calibração da taxa de aquisição de câmeras de alta velocidade

L C Dias¹, I L R Amorim¹, P B Costa¹

¹ Centro de Estudos Metrológicos (CEMETRO), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte-MG, 31.270-901, Brasil

pedro@demec.ufmg.br

Resumo. Câmeras de alta velocidade (HSC) podem ser empregadas para determinar o tempo de captação, a partir da taxa de aquisição da câmera e do número de quadros obtidos. A fim de aprimorar a aplicação dessas, com o intuito de medir a deformação pelo tempo em um ensaio de *crash test* de longarinas automotivas, este estudo visa propor uma nova metodologia abrangente e replicável de calibração da taxa de aquisição (*frame rate*) de tais câmeras. Utilizando uma Phantom Miro LAB 110 e um laser com frequência variável conhecida, com auxílio de programas computacionais, será possível traçar uma curva de calibração para uma frequência de 50 Hz. Este trabalho apresenta um teste inicial e descreve detalhadamente as etapas empregadas, bem como materiais e processos utilizados, baseados em diferentes bibliografias.

Palavras-chave: Calibração. Câmera de alta velocidade. Metrologia por imagem. Taxa de aquisição.

1. Introdução

O avanço da tecnologia empregada em câmeras para aquisição de um grande número de quadros por segundo possibilita o estudo detalhado de diversos fenômenos, assim, as câmeras de alta velocidade vem sendo amplamente utilizadas nas mais diversas áreas, devido à essa capacidade de captar atos que ocorrem em frações de segundos com detalhes precisos. Com isso, informações que antes não poderiam ser observadas pela velocidade com que ocorriam, podem ser exploradas a fundo.

Dessa forma, tal tecnologia se mostra fundamental em aplicações que analisam e medem movimentos rápidos e dinâmicos, como a deflexão de dentes de engrenagens, processamento de imagens em tempo real, vibrações em objetos, reações químicas de detonação e a identificação de fissuras em materiais, conforme estudos já realizados anteriormente [1-4].

Em muitas dessas aplicações uma variável importante no estudo é o tempo de duração do fenômeno observado. Para a avaliação quantitativa do tempo é utilizado o número de quadros da duração do evento ou parte dele. Conhecendo então a configuração da câmera em quadros por segundo, ou *frame rate*, é possível estimar este tempo em unidades do SI.

No entanto, para essas avaliações quantitativas, a câmera, assim como qualquer instrumento de medição, precisa ter sua rastreabilidade evidenciada para a garantia da qualidade dos resultados de tempo medidos através da informação de quadros por segundo.

Alguns estudos para a calibração dessa taxa de aquisição já foram realizados, como por exemplo em H. W. Lai, et al. (2019) [5], foi usado um painel de led que recebe pulsos em intervalos de tempo pré-definidos via GPS como referência. O painel de led em formato circular acende e apaga os leds fazendo o led girar em uma frequência conhecida. O sistema é filmado por uma câmera com capacidade de até 1.000 quadros por segundo. Com o método proposto foi possível obter incertezas na ordem de 0,12 ms com 95% de confiança.

Seguindo a necessidade por este tipo de rastreabilidade, outras pesquisas foram realizadas na área com o mesmo propósito. Y-K Cheng, et al. (2021) [6] apresentou um estudo da calibração da taxa de aquisição para câmeras de monitoramento de veículos. O método proposto também utiliza um painel de led e realiza medições de até 50 quadros por segundo, com incertezas de aproximadamente 2 ms para 95% de confiança.

Os estudos apresentam propostas de métodos, porém ainda com a limitação de uma taxa de aquisição baixa. A aplicação de um painel de led não possui a capacidade luminosa suficiente para aplicação em altas velocidades, como o caso da avaliação de ensaios de *crash test* apresentado por D. A. Sousa (2018) [7]. Com o intuito de medir deformações, ao longo do tempo, de uma longarina automotiva foi usada nesta pesquisa uma câmera com taxa de aquisição de 10.000 frames por segundo.

Seguindo a aplicação mostrada por D. A. Sousa, e visando obter resultados precisos e confiáveis para o sistema de medição de deformação em longarinas veiculares, no presente trabalho será proposto um novo método mais abrangente para calibrar a taxa de aquisição de câmeras de alta velocidade. O método consiste na comparação de um laser com frequência conhecida e uma câmera com capacidade de aquisição de até 400.000 quadros por segundo.

2. Método proposto

Visando obter um procedimento de calibração para a câmeras de alta velocidade, foi usada uma câmera Phantom Miro LAB 110, com resolução máxima de 1280x800, tamanho de pixel de 20 micrometros, tempo mínimo de exposição de 2 microssegundos e uma taxa de aquisição que varia de 100 fps até 400.000 fps. A câmera é capaz de gerar visualização dentro do espectro de luz visível.

2.1 Bancada de teste

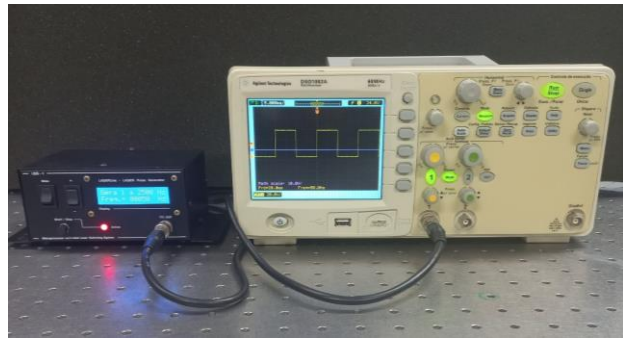
A bancada de teste, nesta proposta de metodologia, é composta pela câmera de alta velocidade e seu um software para controle e configuração da mesma, um sistema com laser com controlador de frequência, um anteparo para a visualização do laser e um osciloscópio.

O laser, do modelo DPSS Laser Driver, é ligado a um controlador de frequência e a um osciloscópio como forma de fornecer rastreabilidade aos pulsos do laser. A luz deste, projetada na direção do anteparo, que por sua vez, é posicionada perpendicularmente à câmera em uma distância escolhida manualmente apenas de forma que a intensidade seja suficiente para a visualização com a câmera.

Na Figura 1(a), é observada a distribuição dos componentes primários da bancada, composto pela câmera, laser, osciloscópio e anteparo. A representação do funcionamento do osciloscópio juntamente com o controlador de frequência do laser também é mostrado na Figura 1(b).



(a)



(b)

Figura 1- Elementos da bancada de teste: a) Montagem com laser e câmera; b) controlador de frequência e osciloscópio.

2.2 Medição da frequência

Realizada a seleção de uma frequência estável de emissão do laser, a primeira fase do procedimento consistiu na escolha de resoluções da câmera para serem trabalhados como pontos para a curva de calibração. Feito isso, foram feitas filmagens da imagem projetada do laser no anteparo.

Em uma primeira etapa, onde a viabilidade do método está sendo estudada, foram avaliados apenas três pontos de calibração: (1) A maior taxa de aquisição da câmera para a maior resolução, (3) a maior taxa de aquisição para a menor resolução e (2) uma resolução intermediária escolhida aleatoriamente, com a maior taxa de aquisição desta resolução selecionada. O detalhamento dos pontos de medição está contido na tabela 1. Para cada taxa de aquisição selecionada para calibração foi usado um tempo de exposição de 50% da taxa da aquisição. Este valor não foi variado pois a investigação foi focada no intervalo entre os quadros do processo de aquisição da câmera. Não sofrendo influência da quantidade de luz que sensibiliza o sensor devido ao tempo que ele fica exposto.

Tabela 1 – Configurações dos pontos selecionados para a calibração

Pontos	Resolução (pixels)	Quadros por segundo	Intervalo entre quadros (μ s)
1	1800 x 800	1.600	625,0
2	512 x 320	10.000	100,0
3	64 x 8	400.000	2,5

Após a seleção dos pontos e configuração da bancada foram realizadas as medidas com base nas imagens capturadas do laser pela câmera. Para os pontos 1 e 2 escolhidos, o laser foi filmado por aproximadamente 2,6 s gerando 4148 imagens e para o último ponto, com taxa de aquisição de 400.000 quadros por segundo, o tempo de aquisição foi de apenas 0,37 s devido à quantidade elevada de imagens geradas, pouco mais de 145 mil imagens.

O software específico do fabricante da câmera utilizada gera arquivos de saída em formato “.cine”, e permite que as mesmas sejam também exportadas em outros formatos. Para facilitar o processamento das imagens e obtenção dos resultados, os testes foram exportados em forma de imagem .TIFF com o objetivo de facilitar a leitura posteriormente por um algoritmo próprio.

3. Resultados iniciais

Os experimentos realizados nestes testes iniciais tiveram como foco avaliar a possibilidade de, através do método proposto, obter uma curva de calibração para o parâmetro de taxa de aquisição de uma câmera de alta velocidade. Para isso, utilizando o aparato experimental mostrado no item anterior, o laser foi configurado para pulsar a uma frequência de 50 Hz, para que este valor de frequência pudesse ser comparado com a frequência observada pela câmera.

3.1 Calibração

Para a obtenção de resultados, a primeira etapa do processamento é identificar em cada uma das imagens geradas se o laser está ou não gerando um pulso de luz visível. Para isso o algoritmo observa apenas um ponto central da imagem e armazena em um vetor a intensidade do pixel deste ponto central em uma escala de cinza com valores que podem variar de 0 a 255, como visto no exemplo da figura 2.

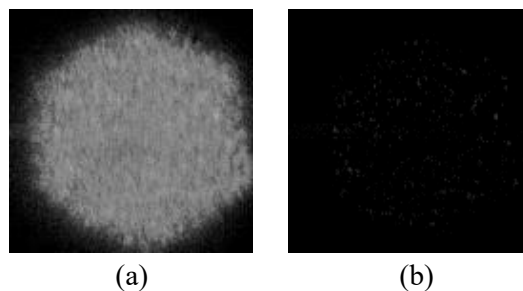


Figura 2 – Exemplo da captura das imagens do feixe de luz do laser.

A leitura desta intensidade para todas as imagens geradas em cada teste fornece um gráfico de uma função periódica, próxima do formato de um sinal de uma onda quadrada, como exemplificado na figura 3.

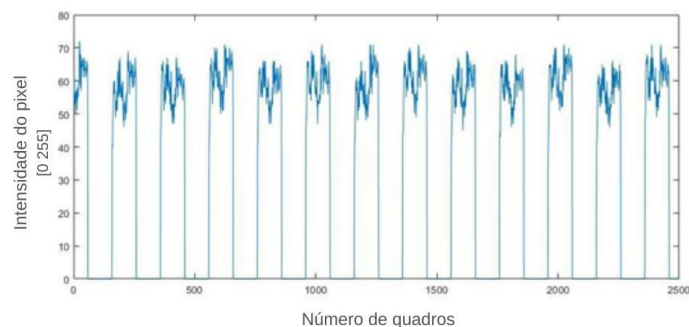


Figura 3 - Gráfico de resultados de intensidade em função dos quadros capturados.

Para a comparação entre o pulso gerado pelo laser e a intensidade identificada nas imagens da câmera, os dados foram ajustados a partir de uma série de Fourier de oito termos, seguindo o modelo da equação 1. Onde $I(q)$ é a intensidade estimada para um determinado quadro, a_n e b_n são os termos ajustados da equação e w é a frequência fundamental do sinal lido pela câmera dado em $rad/quadros$. Assim, a medida de tempo do intervalo médio entre os quadros, $T(q)$, pode ser obtida pela equação 2, onde f é a frequência do laser durante a medição, em Hz.

$$I(q) = a_0 + \sum_{n=1}^8 [a_n \cdot \cos(n \cdot q \cdot w) + b_n \cdot \sin(n \cdot q \cdot w)] \quad (1)$$

$$T(q) = \frac{w}{2\pi f} \quad (2)$$

Seguindo a metodologia proposta de medição dadas pelo método é equações descritas anteriormente foram realizadas três medidas em cada ponto de calibração. Os resultados obtidos estão descritos na tabela 3.

Tabela 3 – Resultados das medições da comparação entre laser e câmera

Quadros por segundo	Tempo nominal (μs)	Valor medido (μs)	Tendência da câmera (μs)
1.600	625,000	625,059	-0,059
10.000	100,000	100,008	-0,008
400.000	2,500	2,501	-0,001

Uma outra forma de compreender os resultados é observando as tendências como uma quantidade de quadros capturados pela câmera. Os resultados obtidos indicam que quando a câmera é configurada para 1.600 *fps* (quadros por segundo) a mesma foi capaz de capturar 1.599,8 *fps*, ou seja, 1600 *fps* em valores arredondados. Para a configuração de 10.000 *fps* foram obtidos 9.999,1 *fps* e para a configuração de 400.000 *fps* foram obtidos 399.790 *fps*. Os dados supõem uma tendência de um crescimento absoluto da tendência em função da velocidade.

4. Incerteza de medição

Segundo a equação 2 apresentada anteriormente, para a determinação do tempo entre os quadros durante a filmagem da câmera são usados como variáveis de entrada o parâmetro w de frequência fundamental do sinal oriundo do ajuste da série de Fourier para os dados medidos, e a frequência de pulsos do laser visualizado pela câmera, dado como f .

Utilizando métodos estatísticos tradicionais de inferência foram determinados intervalos de confiança para o valor de w nos ajustes realizados, foram obtidos intervalos com abrangência de 95% para cada um dos diferentes pontos medidos.

O valor da frequência de pulsos do laser foi determinado por um osciloscópio, com resolução de 0,1 Hz na faixa de 50,0 Hz. Na ausência de um certificado de calibração para o osciloscópio foi estimado um erro máximo de 1% para o equipamento, adotando assim $\pm 0,5$ Hz como grandeza de entrada e atribuindo a este valor uma distribuição de probabilidade uniforme.

A terceira grandeza de entrada para a determinação da incerteza foi a incerteza do Tipo A, resultante do erro padrão da média de três repetições do experimento para cada ponto. A incerteza Tipo A na

metodologia proposta é oriunda da repetibilidade na determinação do valor de w , e estimada como o desvio padrão das medidas realizadas.

A tabela 4 mostra a avaliação da incerteza dos três pontos de calibração, com os detalhes das estimativas de entrada, a função densidade de probabilidade, seus respectivos coeficientes de sensibilidade, as incertezas padronizadas já na grandeza de saída, os graus de liberdade individuais, a incerteza combinada, os graus de liberdade efetivos, o fator de abrangência para a probabilidade de 95,45% e a incerteza expandida de medição.

Tabela 4– Resumo da avaliação da incerteza de medição para os pontos de calibração

<i>Grandezas de entrada</i>	<i>Estimativa</i>	<i>Divisor (fdp)</i>	c_i	$u(T)$ (s)	ν	ν_{eff} k	$U(T)$ (μ s)
<i>1.600 fps – 50 Hz</i>							
Tipo A	0,000028 (1/fr)	1,732 (normal)	0,003183 (s)	5,181E-08	2		
w	0,000500 (1/fr)	1,96 (normal)	0,003183 (s)	8,120E-07	<i>inf</i>	>1000 2,00	7,4
f	0,5 (1/s)	1,732 (uniforme)	-1,3E-05 (s ²)	-3,608E-06	<i>inf</i>		
<i>10.000 fps – 50 Hz</i>							
Tipo A	0,000001 (1/fr)	1,732 (normal)	0,003183 (s)	1,942E-09	2		
w	0,000005 (1/fr)	1,96 (normal)	0,003183 (s)	8,120E-09	<i>inf</i>	>1000 2,00	1,2
f	0,5 (1/s)	1,732 (uniforme)	-2E-06 (s ²)	-5,773E-07	<i>inf</i>		
<i>400.000 fps – 50 Hz</i>							
Tipo A	0,0000006 (1/fr)	1,732 (normal)	0,003183 (s)	1,031E-09	2		
w	0,0000001 (1/fr)	1,96 (normal)	0,003183 (s)	1,624E-10	<i>inf</i>	>1000 2,00	0,029
f	0,5 (1/s)	1,732 (uniforme)	-5E-06 (s ²)	-1,444E-08	<i>inf</i>		

É possível observar que para os três pontos e medição a contribuição oriunda da frequência do laser medida pelo osciloscópio é aproximadamente 100 vezes maior que as demais contribuições. O que abre um grande espaço para a melhoria da incerteza final do método, uma vez que para estes testes iniciais o osciloscópio não foi calibrado e sua contribuição foi majorada como sendo cinco unidades da resolução do instrumento.

A tabela 5 apresenta um resumo dos pontos medidos, resultados e incertezas correspondentes. Além disso, é possível observar o valor percentual da incerteza em função do resultado obtido.

Tabela 5 – Resumo dos resultados da calibração

<i>fps da câmera</i>	<i>Intervalo entre os quadros nominal (μs)</i>	<i>Intervalo medido (μs)</i>	<i>Incerteza expandida para 95,45% (μs)</i>	<i>Incerteza relativa</i>
1.600	625	625,1	7,4	1,2%
10.000	100	100,0	1,2	1,2%
400.000	2,5	2,501	0,029	1,2%

Os resultados apresentados mostram a capacidade do método proposto em obter resultados de uma calibração da taxa de aquisição de uma câmera de alta velocidade. Para aplicação na qual o estudo está inserido os valores de incerteza estão adequados. O tempo entre os quadros será usado para calcular a velocidade e aceleração de um corpo em queda com tolerâncias que não serão afetadas pelas incertezas obtidas.

5. Conclusões e Trabalhos futuros

O presente trabalho teve como objetivo apresentar um teste inicial para a proposição de uma metodologia para calibração da taxa de aquisição de câmeras de alta velocidade. Alguns estudos, citados neste trabalho, mostram que o intervalo entre quadros deste tipo de câmera é frequentemente usado como informação de tempo para medições de diferentes fenômenos. Outros trabalhos também evidenciam que a calibração dessa taxa de aquisição é um objeto de estudo para fornecer rastreabilidade a estes sistemas.

Para a determinação dos erros da taxa de aquisição da câmera foi montada uma bancada de calibração para a comparação entre a frequência de pulsos de um laser e a visualização destes pulsos pela câmera. A rastreabilidade do sistema é feita por um osciloscópio que mede em tempo real durante a filmagem a frequência dos pulsos gerados pelo laser.

O comportamento crescente dos erros em função da taxa de aquisição é um comportamento similar à de outros instrumentos de medição que possuem erros absolutos maiores ao fim da faixa de indicação. Outro ponto significativo para a validade do método foram as repetibilidades obtidas nas medições.

Para a continuidade desta pesquisa e validação do método serão realizados testes em mais pontos da câmera para a obtenção de uma curva de calibração. Serão também realizados ensaios de reprodutibilidade, e a confirmação da rastreabilidade através da calibração do osciloscópio.

Referências

- [1] B. Černe, M. Petkovšek, “High-speed camera-based optical measurement methods for in-mesh tooth deflection analysis of thermoplastic spur gears”, *Materials & Design*, Volume 223, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.111184>.
- [2] I. Ishii et al "2000 fps Real-time Vision System with High-frame-rate Video Recording", IEEE International Conference on Robotics and Automation, Anchorage, Alaska, USA, 2010
- [3] Mendrok, K.; Dworakowski, Z.; Dziedzic, K.; Holak, K. Indirect Measurement of Loading Forces with High-Speed Camera. *Sensors* 2021, 21, 6643. <https://doi.org/10.3390/s21196643>
- [4] T. Trtík et al "Methods of lighting of concrete structures for high-speed camera measurement", IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 596, 2019
- [5] H. W. Lai, Michael W. K. Chow, C. K. Ma & Aaron Y. K. Yan (2019): Calibration of the Frame



- Rate of High-Speed Digital Video Recorders by Stationary Counting Method: Application of the Stroboscopic Effect, NCSLI Measure, DOI: 10.1080/19315775.2019.1572480
- [6] Y-K Cheng et al "Technical note: Calibration of frame intervals of video recorders using Global Positioning System (GPS) signal as time reference", Forensic Science International: Reports 4, 2021
- [7] D. A Sousa. Influência da resistência mecânica de pontos de solda sobre o desempenho de estruturas similares a longarinas veiculares submetidas a teste de colisão. 2018. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica, Processos de Fabricação) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.



Proposal for a Calibration Method of Frame Rate Acquisition of High-Speed Cameras

L C Dias¹, I L R Amorim¹, P B Costa¹

¹ Centro de Estudos Metrológicos (CEMETRO), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte-MG, 31.270-901, Brasil

pedro@demec.ufmg.br

Abstract. High-speed cameras (HSC) can be employed to determine the exposure time based on the camera's acquisition rate and the number of frames obtained. In order to enhance the application of these cameras for measuring temporal deformation in an automotive longitudinal crash test, this study aims to propose a new comprehensive and replicable methodology for calibrating the acquisition rate (frame rate) of such cameras. Using a Phantom Miro LAB 110 and a laser with a known variable frequency, along with the assistance of computer programs, it will be possible to establish a calibration curve for a frequency of 50 Hz. This work presents an initial test and provides a detailed description of the steps employed, as well as the materials and processes used, drawing from various sources in the literature.

Keywords: Calibration, High-Speed Camera, Image Metrology, Frame Rate.