

INICIAÇÃO CIENTÍFICA, RELATÓRIO FINAL

Período: 1/Maio/2018 a 31/Dez/2018 (8 meses)

Título do Projeto:	Caracterização do ruído de fundo e direção de apontamento de um imageador do céu
Instituição:	Universidade de São Paulo
Endereço:	Rua do Matão, 1371, São Paulo-SP 05508-090
Orientador:	Henrique M. J. Barbosa +55 (11) 3091-8985 hbarbosa@if.usp.br
Aluno:	Giovanni Souza (nº usp 9021003) giovanni.souza@usp.br
Processo:	2017/22170-6

Resumo	2
1. Objetivo	2
2. Atividades Realizadas	2
2.1. Leituras sugeridas	2
2.1.1. <i>Paper: Roman et al (2012)</i>	2
2.1.2. <i>Livro: Observing Photons in Space: A Guide to Experimental Space Astronomy (Capítulo 23: CCD and CMOS sensor)</i>	2
2.1.3. <i>Tese: H. Tian (2000)</i>	2
3. Resultados	3
3.1. Direção de apontamento	3
3.1.1. <i>Determinação do centro da imagem</i>	3
3.1.2. <i>Sistema de coordenadas</i>	4
3.1.3. <i>Ajuste dos dados</i>	4
3.2. Estudo do ruído de fundo	6
3.2.1. <i>Variação e medida da temperatura</i>	6
3.2.2. <i>Tempos de exposições longos</i>	6
3.2.3. <i>Tempos de exposição curtos</i>	7
3.3. Conclusões	10
4. Reserva técnica	10
5. Apresentação de trabalhos	11
6. Referências	11

Orientador: _____

Bolsista: _____

Resumo

A distribuição angular da radiação do céu tem um papel importante na avaliação da interação desta radiação com alvos complexos, como o corpo humano, animais, e plantas, devido às formas irregulares e orientações complexas e mutáveis. A radiação depende tanto do espalhamento da radiação pelas moléculas, quanto pelas nuvens e pelos aerossóis, e medidas da radiação podem ser usadas para inferir e monitorar as propriedades microfísicas dos aerossóis e das nuvens. Um dos instrumentos que pode realizar observações da radiação do céu com alta resolução angular e temporal é uma câmera fotográfica digital, desde que devidamente calibrada. No nosso laboratório, desenvolvemos um modelo de baixo custo que fotografa o céu a cada 5-min. Este instrumento foi utilizado com sucesso na obtenção da fração de cobertura de nuvens.

1. Objetivo

Este projeto tem dois objetivos principais, o primeiro é caracterizar, em função da temperatura, o ruído de fundo do sensor da câmera utilizada no imageador. Em seguida obter a direção de apontamento de cada pixel do imageador do céu (lente + câmera). Estas são etapas importantes na direção de obter uma calibração absoluta da radiação medida e de usar estes dados para obtenção das propriedades dos aerossóis.

2. Atividades Realizadas

2.1. Leituras sugeridas

Nesta seção, faço um breve resumo dos materiais que li ao longo deste projeto, pois uma das propostas desta iniciação científica foi estudar alguns artigos e capítulos de livros. A leitura destes materiais foi importante para aumentar meu conhecimento, e ajudar a guiar o estudo realizado neste projeto.

2.1.1. Paper: Roman et al (2012)

Neste artigo o autor explica como ele fez para calibrar um imageador, parecido com o utilizado nesta iniciação, para obter a radiação do céu em diferentes comprimentos de onda. Mesmo que o objetivo deste projeto não seja o de fazer o mesmo tipo de calibração discutida no artigo, a leitura dele foi fundamental para entender a importância de se fazer certos ajustes e calibrações deste tipo de instrumento, como considerar a resposta espectral de cada um dos canais vermelho, verde e azul (seção 4.1 do artigo).

2.1.2. Livro: **Observing Photons in Space: A Guide to Experimental Space Astronomy (Capítulo 23: CCD and CMOS sensor)**

O capítulo 23 deste livro explica o funcionamento de dois dos sensores mais utilizados em fotografias e também em instrumentos científicos de medição. O primeiro deles é o sensor do tipo CCD, da sigla em inglês *Charge-Coupled Device*. O CCD foi desenvolvido na década de 70 e até hoje é o principal sensor utilizado em experimentos científicos, principalmente na área de astronomia, além de ser utilizado em câmeras fotográficas em geral. A função do CCD é converter sinais luminosos em carga elétrica, o que possibilita obter imagens digitais. O capítulo discute sobre os diferentes tipos de CCD, que captam a informação luminosa e a converte em sinal elétrico de diferentes maneiras. No último item deste capítulo discute-se o

sensor do tipo CMOS da sigla em inglês, *Complementary Metal Oxide Semiconductor*. A diferença do CMOS, em relação ao CCD, é que seu chip é feito da mesma maneira que os microprocessadores, constituído de vários transistores integrados. Essa tecnologia do CMOS permite que uma quantidade maior de pixels seja integrado em uma imagem, além de precisar de uma baixa tensão para operar (entre 1,5V e 8V). De acordo com o autor, o CMOS tem sido capaz de diminuir o domínio de CCDs no mercado de sensores, sendo que ele já é utilizado em muitos celulares e instrumentos modernos. A câmera utilizada pelo nosso imageador também possui um sensor do tipo CMOS, de acordo com o manual do fabricante.

A leitura deste capítulo foi importante para compreender o funcionamento do sensor de uma câmera digital, e assim compreender os tipos de cuidados e ajustes necessários para se obter melhores resultados com o imageador.

2.1.3. Tese: H. Tian (2000)

Nesta tese, intitulada “Noise Analysis in CMOS Image Sensors”, o autor faz um estudo sobre o ruído de fundo em sensores do tipo CMOS. O texto é longo e avançado, e como prometido, eu li apenas os dois primeiros capítulos, onde ele discute a questão do ruído térmico. Ao contrário do texto anterior que apresentava diversas vantagens do sensor do tipo CMOS em relação ao CCD, o autor da tese argumenta que a questão do ruído é mais complicada para o CMOS do que para o CCD, onde ele diz ser mais fácil de mapear. Isto acontece pois o CCD converte os fótons recebidos diretamente em carga elétrica, não havendo assim muita relação com a temperatura do sensor. Contudo, o CMOS é um circuito integrado e isso faz com que a temperatura tenha interferência nas leituras do sensor. O ruído térmico é mais acentuado na ausência de luz no sensor, e diversos fatores podem causar o aumento deste tipo de ruído. Muitas informações desta tese foram aproveitadas para reduzir o ruído luminoso, durante a calibração. Uma das medidas foi de cobrir a lente com um material que fosse escuro por dentro e refletivo do lado de fora, para refletir possíveis raios de luz.

3. Resultados

3.1. Direção de apontamento

A primeira etapa deste projeto foi a de estudar a distorção na imagem causada pela lente olho de peixe, e assim obter a direção de apontamento para cada pixel na imagem. Para isso foi necessário determinar o centro da imagem, e definir um sistema de coordenadas em que a câmera tivesse uma boa abertura angular.

3.1.1. Determinação do centro da imagem

Para se obter um bom resultado na calibração da direção de apontamento é necessário fazer um alinhamento correto entre a câmera e o sistema de coordenadas. Para obter este alinhamento o centro da imagem, por onde passa o eixo óptico da lente, foi utilizado como referência.

O método da saturação foi utilizado para se obter o centro da imagem. Colocamos uma lâmpada sobre a lente da câmera, onde instalamos um difusor como mostrado na **Fig. 1**. Como a lente esta distante do sensor, toda a imagem produzida é projetada em um círculo que cabe dentro da área sensível do sensor. Regulamos o tempo de exposição para que a imagem produzida estivesse saturada. Separamos então os pixels saturados (valores de 4096) e

calculamos a posição média dos pixels saturados, i.e., a posição do centro do círculo projetado pela lente olho de peixe (**Fig. 2**). O valor médio obtido para a coordenada X foi de 574,4(8) e para a coordenada Y foi de 570,6(6). Ou seja o centro da imagem se encontra na posição cujo par ordenado é dado por (574,4; 570,6). Note que o centro da imagem não poderia ser definido como sendo o centro geométrico da figura, já que é possível observar que há um deslocamento da imagem em relação ao sensor (desalinhamento entre a lente e o sensor).



Fig. 1 – A esquerda temos uma imagem da câmera coberta por um recipiente que foi utilizado apenas para tornar a luz difusa. Na imagem da direita temos a luminária utilizada para saturar o sensor.

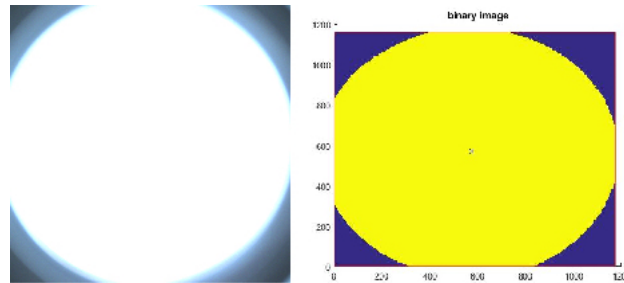


Fig. 2 – Exemplo de uma imagem utilizada para determinar o centro. Do lado esquerdo temos a imagem real do sensor saturado, e do lado direito a imagem binária apenas com a informação dos pixels saturados e dos pixels fora da região de interesse. O “x” representa o ponto central calculado para esta imagem.

3.1.2. Sistema de coordenadas

O sistema de coordenada não poderia ser feito em uma folha comum de papel, mesmo que fosse um papel de tamanho A0, pois a abertura angular da câmera é maior do que a extensão da folha. A solução para este problema então foi de usar o teto do laboratório como sistema de coordenada. Isto foi possível pois o teto possui retângulos em sua arquitetura, e verificou-se que a distância entre cada retângulo é bastante regular com um erro de 0,1 centímetros. Utilizando este tipo de sistema seria possível calcular o ângulo real de abertura e comparar com a quantidade de pixels na imagem.

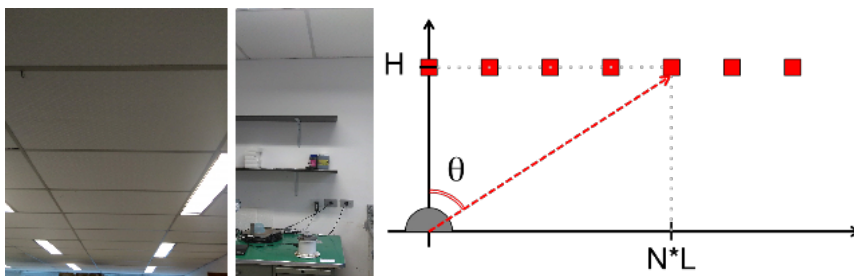


Fig. 3 – A esquerda temos o sistema de coordenadas escolhido. Cada retângulo tem uma largura de $(62,2 \pm 0,1)$ cm, e um comprimento de $(124,7 \pm 0,1)$ cm. No centro está representada a posição da câmera em relação ao centro do sistema de coordenada. A distância entre lente da câmera na mesa e o teto é de $(171,4 \pm 0,2)$. A direita temos um diagrama do sistema de coordenadas.

3.1.3. Ajuste dos dados

O alinhamento do sistema é um fator que tem grande influência no resultado final, assim tomou-se cuidado no momento de alinhar o centro da imagem com a linha escolhida como origem do sistema de coordenadas. Para determinar a distância de cada ponto em pixel, foram feitas marcações manuais através do MATLAB (indicados na **Fig. 4**).

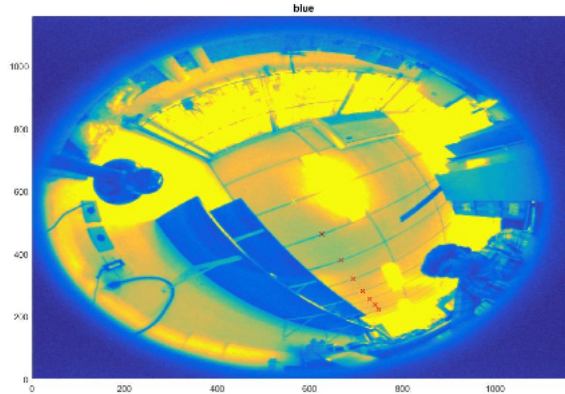


Fig. 4 – Exemplo das marcações feitas no MATLAB para se obter a distância entre cada ponto em número de pixels.

O ângulo de abertura foi obtido utilizando o conceito básico de geometria do triângulo retângulo. Onde os catetos são respectivamente, a distância da câmera ao teto H e o número de retângulos L em cada abertura N (ver **Fig.3**). A partir do arcotangente destes dois valores obtém-se o ângulo de abertura.

$$\arctan\left(\frac{NL}{H}\right) = \theta \quad (1)$$

Para se obter um maior número de dados, a altura da câmera foi variada em relação ao teto, e com isso obteve-se o gráfico da **Fig. 5**.

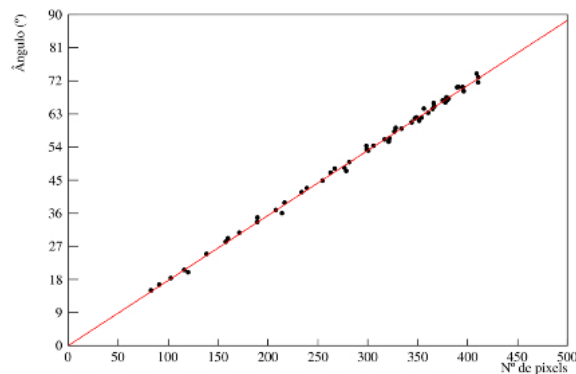


Fig. 5 – Ajuste de reta para todos os pontos obtidos, de ângulo de abertura em função do número de pixel. O ajuste realizado é do tipo $y = ax + b$, onde $a = 0,176(3)^\circ/\text{pix}$ e $b = 0,017(1)^\circ$.

Vemos que os dados possuem um comportamento linear mesmo para ângulos superiores a 60 graus. Ou seja, como esperado, a lente tem uma geometria que chamamos de f-theta, i.e., há uma relação linear entre o ângulo de visada e a posição na imagem (em pixel ou microns). A equação da reta ajustada aos pontos tem como coeficiente angular o valor $0,176(3)^\circ/\text{pix}$ e seu coeficiente linear é $0,017(1)^\circ$. Esperávamos obter um coeficiente linear nulo, e realmente o valor é de apenas um décimo de pixel (cada pixel tem uma abertura

angular de 0.176°). Entretanto, apesar de pequeno, vemos que este não é compatível com zero. A razão é que não consideramos o erro na medida da distância em pixels (eixo x), que é de pelo menos 0,6 a 0,8 pixel (erro na coordenada do centro da lente), muito maior que o valor absoluto do coeficiente linear do nosso ajuste.

3.2. Estudo do ruído de fundo

Para monitorar a variação do ruído em função da temperatura foi instalado um sensor de temperatura no interior da câmera. Assim foi possível obter a equação paramétrica do ruído em função da temperatura.

3.2.1. Variação e medida da temperatura

O sensor de temperatura utilizado é da fabricante Maxim modelo MAX6675, ele possui um termopar do tipo K. Este tipo de termopar é ideal para se utilizar no interior de recipientes fechados, e instalamos o termopar no corpo da nossa câmera. Fizemos a leitura do sensor de temperatura utilizando um Arduino Nano, que se comunicava com o computador através da porta serial. Um programa escrito em LabView, de autoria do técnico de laboratório Fábio Jorge, foi utilizado para registrar os valores em um arquivo texto. A figura abaixo mostra o sensor e a montagem.

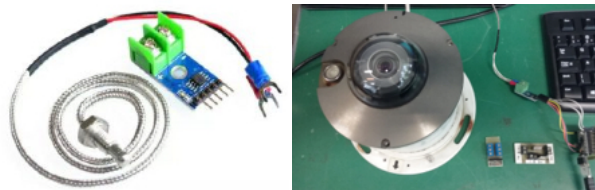


Fig. 6 – Sensor de temperatura utilizado modelo MAX6675. O intervalo de temperaturas que este sensor é capaz de fazer as leituras é de 0-1024°C, de acordo com o fabricante.

Para variar a temperatura, o imageador foi colocado no interior de uma estufa Fanem 515, onde variamos a temperatura de 25 a 60 graus Celsius. Para atingir temperaturas mais baixas, utilizamos uma geladeira convencional.



Fig. 7 – Estufa Fanem modelo 515 (esquerda) e geladeira (direita) utilizadas para variar a temperatura da câmera para o estudo do ruído de fundo.

3.2.2. Tempos de exposição curtos

Inicialmente, os tempos de exposição escolhidos para serem avaliados foram 100 μ s, 250 μ s, 750 μ s e 1000 μ s. Esses são valores iguais aos que são utilizados quando a câmera está em operação (Giovanni, 2017). Os resultados são apresentados na tabela 1, em termos da

contagem média (sobre todos os pixels da câmera), e do seu desvio padrão. Os resultados obtidos não condizem com o esperado, pois foi observado que o ruído médio diminui a medida que a temperatura da estufa aumenta.

Tabela 1 – Número médio de contagens e desvio padrão do canal vermelho em função da temperatura para cada um dos quatro tempos de exposição. O erro na temperatura é de 0,5°C.

100µs			250µs		
Temperatura (°C)	Contagens	σC	Temperatura (°C)	Contagens	σC
28	236,1	7,7	28	236,3	7,7
33	222,3	6,7	33	224,3	6,7
37	227,5	6,7	37	228,0	6,6
49	220,2	6,7	49	222,2	6,8
750µs			1000µs		
Temperatura (°C)	Contagens	σC	Temperatura (°C)	Contagens	σC
28	237,3	7,7	28	237,0	7,7
33	225,2	6,7	33	224,3	6,9
37	228,7	6,7	37	228,9	6,7
49	224,4	6,7	49	223,5	6,9

Fazendo um gráfico das imagens obtidas durante a medida do ruído de fundo conseguimos visualizar um padrão, com o canto superior esquerdo apresentando maiores valores de ruído (**fig.8**). Este padrão se repetiu em todos os tempos de exposição e em todas as temperaturas. Esta distribuição também se mantém nos três canais da câmera (RGB).

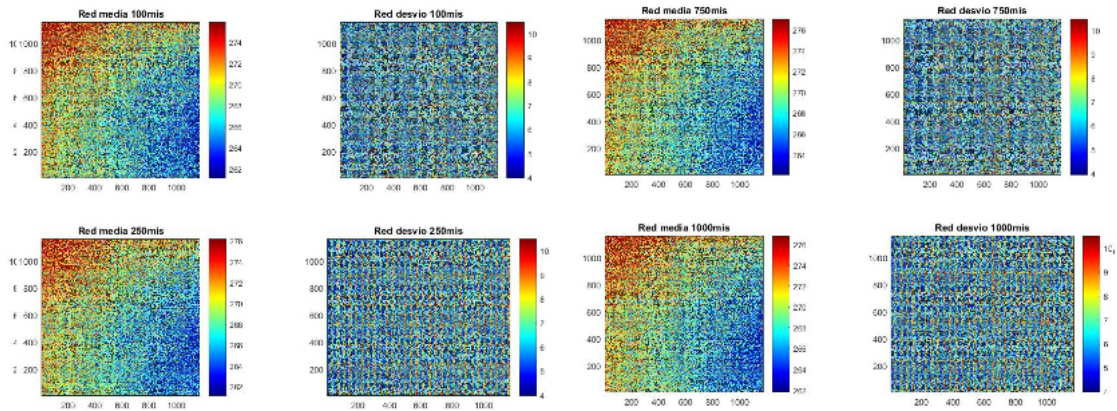


Fig. 8 – Exemplo da distribuição a 28°C do ruído no sensor para o canal vermelho, acompanhados pelos respectivos desvios.

Ressaltamos que em função do tempo de exposição também não houve um aumento do ruído de fundo. As contagens aleatórias advindas da corrente escura (“dark current”) deveriam se acumular no sensor, e assim esperávamos maior ruído de fundo para maiores tempos de exposição.

3.2.3. Tempos de exposição longos

Devido a este resultado não previsto, o próximo passo foi estudar o comportamento do ruído em um intervalo maior entre os tempos de exposição. Os novos valores escolhidos foram 0.1s e 1s, sendo que 1s é o máximo permitido pela câmera. Os valores de 100µs e 1000µs

foram mantidos para que possa haver comparação. As figuras 4 e 5 mostram as imagens escuras obtidas em 10 e 50°C respectivamente, para os 4 tempos de exposição.

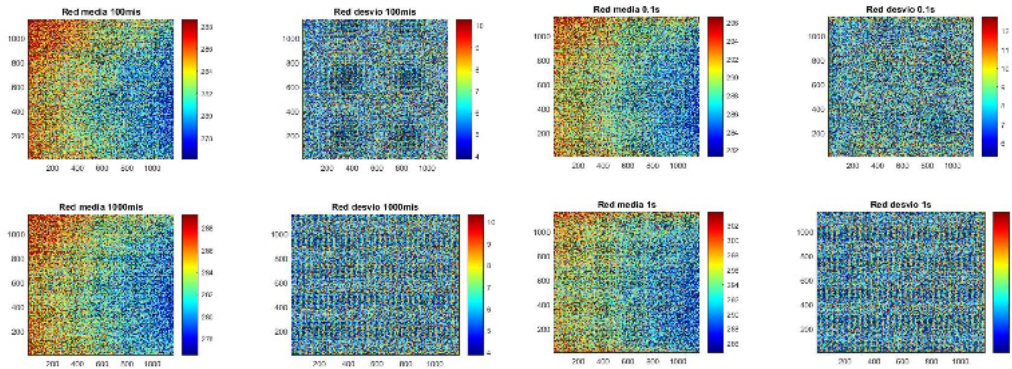


Fig. 9 – Exemplo da distribuição a 10°C do ruído no sensor para o canal vermelho, acompanhados pelos respectivos desvios.

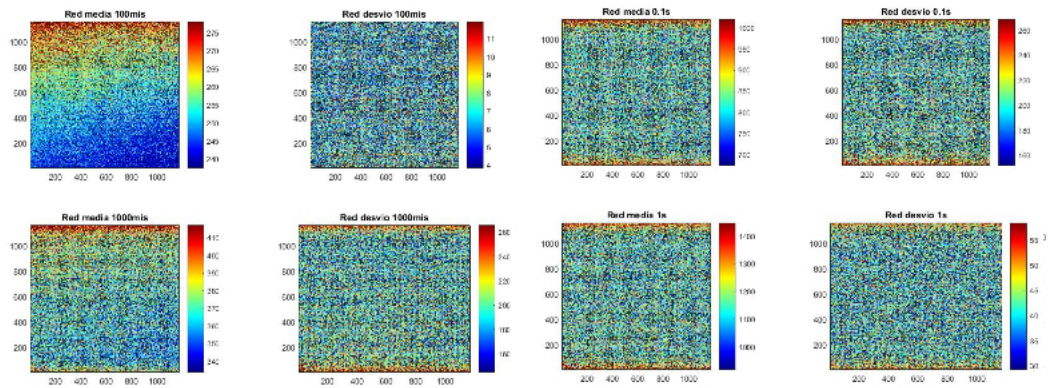


Fig. 10 – Exemplo da distribuição a 52°C do ruído no sensor para o canal vermelho, acompanhados pelos respectivos desvios.

Comparando a **fig. 9** com a **fig. 10** observa-se que o padrão na distribuição do ruído que tínhamos anteriormente só ocorre para baixas temperaturas e baixos tempos de exposição. Ainda não conhecemos a razão, mas para temperaturas altas (52°C), o ruído é máximo próximo às bordas superior e inferior do sensor. Além disso, observando os valores nos gráficos acima, notamos que para os tempos de exposição maiores (0.1s e 1s), há um significativo aumento do ruído de fundo com a temperatura.

Uma hipótese que levantamos é de que a corrente escura deste sensor é muito baixa, assim, apenas para longos tempos de exposição seu efeito é percebido. Na **fig. 11** abaixo, vemos como isso poderia ocorrer. Para tempos de exposição curtos, outros tipos de erros (“ruídos”) nos sensores de imagem podem ser mais importantes, por exemplo, o erro de leitura da CCD. Em sensores CMOS, onde a leitura é feita individualmente para cada pixel, acreditamos que este erro pode ser ainda mais importante. Assim, quando aumentamos a temperatura com baixo tempo de exposição, não vemos um aumento exponencial do ruído pois teríamos apenas os erros de leitura. O estudo e o entendimento mais detalhado desta questão, entretanto, foge do escopo desta iniciação científica.

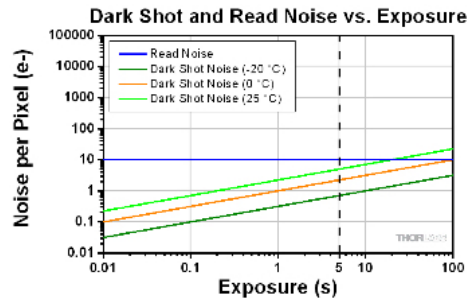


Fig. 11 – Figura obtida no site da Thorlabs, distribuidor de componentes ópticos, que descreve o ruído (em unidades de fotoelétrons, e-) em função do tempo de exposição (em unidades de segundos). O gráfico mostra o ruído de leitura e aquele devido a corrente escura, para 3 valores de temperatura. https://www.thorlabs.com/newgroupage9.cfm?objectgroup_id=10773

A figura 11 foi retirada do site da Thorlabs, que é uma empresa que produz materiais ópticos. De acordo com eles existem quatro tipos de ruídos a se levar em conta em sensores CMOS. Estes são: o ruído de corrente escura (“Dark Current”) discutido anteriormente, o ruído produzido pela leitura do sinal elétrico (“Read Noise”), o ruído associado a estatística de contagem dos fótons que entram no sensor (“Photon Shot Noise”), e por fim o ruído causado por defeitos no sensor (“Fixed Pattern Noise”). Como as medidas foram feitas com a câmera totalmente coberta, não precisamos nos preocupar com o ruído causado pela chegada dos fótons. Além disso, não podemos afirmar que exista algum defeito em alguma região do sensor, seria necessário um estudo mais detalhado para determinar isto. Sendo assim, além da temperatura que influencia no ruído temos também o ruído na leitura, que diminui com o aumento do tempo de exposição, pois o “frame rate” da câmera diminui.

Para se determinar o parâmetro de crescimento do ruído em função da temperatura, observamos o ruído médio no sensor em cada temperatura, para os canais vermelho, verde e azul.

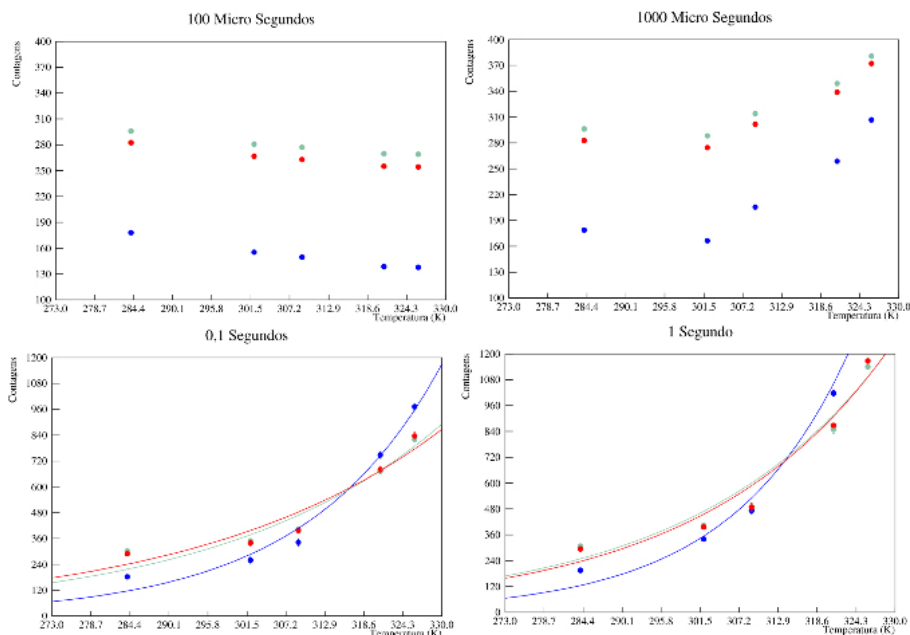


Fig. 12 – Gráficos de dispersão com a média dos ruídos em função da temperatura para todos os canais (vermelho, verde e azul).

Utilizando estes novos valores de tempo de exposição, o comportamento do ruído de fundo apresenta um crescimento exponencial para tempos de exposição de 0,1 e 1s. O tempo de exposição de 100µs continua apresentando o comportamento de queda no ruído em função do aumento de temperatura. Mas o tempo de exposição de 1000µs apresenta um aumento no ruído a partir de 28°C. Ajustando uma curva exponencial podemos determinar os coeficientes τ e A (equação 1).

$$y = Ae^{\tau T} \quad (2)$$

Tabela 2 – Valor médio dos coeficientes τ e A do ajuste exponencial para 0,1s e 1s.

Exposição	τ (1/K)	$\sigma\tau$ (1/K)	A (counts)	σA (counts)
0,1s	0,039	0,003	0,041	0,034
1s	0,041	0,001	0,005	0,001

Os coeficientes τ das curvas de 0,1s e 1s ficaram próximos, isto sugere que o intervalo entre um décimo de segundo até um segundo é um intervalo que possui uma distribuição do ruído consistente, e coerente com o esperado. Por outro lado o tempo de exposição de 1000µs não há uma característica clara de crescimento exponencial. Além disso, como discutido anteriormente, tempos de exposição menores do que 1000µs apresentam um comportamento que ainda não entendemos para o ruído de fundo. Com isto definimos que o comportamento crescente do ruído em função da temperatura só é observado para valores de tempo de exposição da ordem de um décimo de segundo até um segundo.

3.3. Conclusões

Fazer a calibração de instrumentos é uma das partes mais importantes na realização de experimentos. Uma boa calibração fará com que o instrumento alcance seu objetivo com o um menor número possível de erros. Mas fazer a calibração de instrumentos fabricados por terceiros pode ser uma tarefa desafiadora, e apesar da dificuldade é uma boa oportunidade para desenvolver habilidades científicas. Fazendo o estudo sobre o ruído de fundo da câmera, descobrimos que existe um intervalo onde o ruído de fundo não aumenta em função da temperatura, este é um resultado que contraria a hipótese inicial de que o ruído sempre aumenta com a temperatura. Definimos então o intervalo onde o ruído apresenta o comportamento esperado, e a equação que descreve esta distribuição.

Para a direção de apontamento vimos que os valores de abertura angular possuem uma relação linear com o número de pixel na imagem. No futuro esta informação pode ser usada para corrigir a deformação na imagem causada pela lente do tipo olho de peixe.

4. Reserva técnica

A reserva técnica foi totalmente utilizada para a apresentação dos resultados obtidos na conferência internacional AGU Fall Meeting 2018, realizada em washington DC, em dezembro de 2018. Foram utilizados R\$248,87(60 dólares) para submeter o resumo para a conferência, e os R\$292,57 que sobraram foram utilizados para pagar parte da inscrição no evento cujo valor total era de 135 dólares.

5. Apresentação de trabalhos

Durante esta iniciação científica, apresentamos nossos resultados parciais e finais em 3 eventos científicos internacionais, dois que ocorreram no Brasil, e um nos Estados Unidos. Foram dois trabalhos em pôster, e uma apresentação oral.

1. Giovanni Souza, Henrique M. J. Barbosa, Theotonio Pauliquevis: Using a low cost skyimager to investigate the diurnal cycle of cloud cover in São Paulo, Brazil during the summer and winter of 2017. In: AGU Fall Meeting 2018, Washington DC, USA, 10-14 December 2018, Poster A31G-0020
2. Giovanni Souza, Henrique M. J. Barbosa: Characterization of background noise and pointing direction of a sky-imager. Oral presentation in: 26 Simpósio Internacional de Iniciação Científica e Tecnológica da USP, Setembro 2018
3. Giovanni Souza, Henrique M. J. Barbosa, T. Pauliquevis: Diurnal cycle of cloud cover in Sao Paulo derived from measurements of a low-cost skyimager. Poster in: SPSAS on Frontiers in Lasers and their Applications, IPEN, São Paulo, 16-27 Julho 2018

6. Referências

Giovanni, S., and H. M. J. Barbosa: *Ciclo diurno da cobertura de nuvens em São Paulo a partir de um imageador de baixo custo*, Projeto de iniciação científica, Fapesp 2016/18515-5

Roman, R., M. Anton, A. Cazorla, A. de Miguel, F. J. Olmo, J. Bilbao, and L. Alados-Arboledas: *Calibration of an all-sky camera for obtaining sky radiance at three wavelengths*, Atmos. Meas. Tech., 5, 2013–2024, 2012

H. Tian *Noise analysis in CMOS image sensor*. 2000. Dissertation (PHD) – Stanford University, Palo Alto.

N. Whaltam. CCD and CMOS sensor In: M. C. E. Huber, A. Pauluhn, J. L. Culhane, J. G. Timothy, K. Wilhelm, A. Zehnder. (Ed. 2). *Observing photons ins space*. New York: Springer, 2013. p. 391-407.

THORLABS. Camera Noise and Temperature Tutorial 2018. Disponível em: <https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=10773>. Acesso em: 29 jan. 2019.