

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
BACHARELADO EM ENGENHARIA FÍSICA

Matheus Vicente W. W. Müller

**APLICATIVO DE SMARTPHONE PARA OBSERVAÇÃO E
MONITORAMENTO DE METEÓROS E OUTROS
FENÔMENOS LUMINOSOS NO CÉU NOTURNO**

Porto Alegre
2016/2

Matheus Vicente Wrasse Wiebusch Müller

**APLICATIVO DE SMARTPHONE PARA OBSERVAÇÃO E
MONITORAMENTO DE METEÓROS E OUTROS
FENÔMENOS LUMINOSOS NO CÉU NOTURNO**

Trabalho de diplomação apresentado à Comissão de Graduação do Curso de Bacharelado em Engenharia Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito obrigatório para obtenção do título Bacharel em Engenharia Física.

Orientador: *Dr. José Eduardo Costa*

Porto Alegre
2016/2

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	6
2	OBJETIVOS	9
2.1	Objetivos específicos	9
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	10
3.1	Fundamentos de Astronomia	10
3.1.1	Magnitude	10
3.1.2	Sistemas de Coordenadas astronômicas	11
3.1.3	Extinção atmosférica	12
3.2	Programação para o sistema operacional <i>Android</i>	13
3.3	Observação de Meteoros	13
3.3.1	Por ondas de radiofrequências	13
3.3.2	Por luz visível	13
3.4	Câmera digital de <i>Smartphones</i>	14
3.4.1	Detectores	14
3.5	CCD	14
3.5.1	Conversão analógico-digital	16
3.5.2	<i>Full Well Capacity</i>	18
3.5.3	Eficiência Quântica	19
3.6	Detector CMOS	20
3.6.1	Óptica	22
3.7	Lentes Ópticas	22
3.7.1	Lentes de Lüneburg	23
3.8	Triangulação	24
3.8.1	Determinação da posição	24
3.9	Recursos de um <i>Smartphone</i>	25
4	METODOLOGIA	27
4.1	Parâmetros do sistema	27
4.1.1	Determinação e controle de parâmetros da câmera	27
4.1.2	Determinação da sensibilidade da câmera	28
4.1.3	Determinação do tempo de exposição	28

4.2	Análise estatística de imagens	28
4.2.1	Análise das médias das distribuições	29
4.2.2	Análise de desvio padrão	29
4.2.3	Aceleração do cálculo por histogramas	30
4.3	Obtenção das coordenadas astronômicas	30
4.3.1	Orientação espacial do dispositivo	31
4.3.2	Coordenadas do pixel central	31
4.3.3	Coordenadas dos pixels da imagem	32
4.3.4	Integração de lentes	32
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	33
5.1	Tempo de exposição de câmeras de <i>Smartphones</i> testados	33
5.1.1	Limitações e consequências para o monitoramento	33
5.2	Sensibilidade de câmeras de <i>Smartphones</i>	34
5.3	Obtenção de coordenadas astronômicas	38
5.3.1	Limitações e adaptações	38
5.3.2	Integração de lentes	38
5.3.3	Teste de campo	41
5.4	Teste de seleção de eventos	43
5.5	Estado atual do aplicativo	43
5.5.1	Consumo de energia	45
6	CONCLUSÕES	46
6.1	Modelo de estação de monitoramento	48
7	PERSPECTIVAS	49
7.1	Possibilidades de usos do aplicativo	49
7.2	Sugestões para futuros projetos	50
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	51

RESUMO

O céu noturno é pouco monitorado na maioria das regiões do planeta. Um monitoramento permanente do céu noturno visando a observação de meteoros poderia auxiliar na localização e coleta de meteoritos. Para observação desses fenômenos pela luz visível são utilizadas, em geral, câmeras. Uma possível alternativa para esses instrumentos seria através do uso de aplicativo de *Smartphones* para a montagem de estações de monitoramento. Nesse trabalho exploramos essa possibilidade e concluimos que seu uso é possível para esse fim, porém existem diversas limitações no uso desse tipo de dispositivo. Uma delas está no tempo de exposição da câmera digital integrada. O aplicativo foi publicado no repositório *Git*(1).

Palavras-chave: Monitoramento. Meteoros. Fenômenos luminosos. Aplicativo. *Smartphone*.

ABSTRACT

The night sky is lacking in monitoring in most parts of the planet. A permanent monitoring of the night sky seeking to observe meteors could help localizing and retrieving meteorites. This phenomena is generally observed with the use of cameras. One possible alternative would be utilizing a *Smartphone* software to build monitoring stations. In this work we explore this possibility and concluded that its use is possible to this end, however, there are several limitations in the use of such device. One of them is the shutter speed of the integrated digital camera. The applicative was published on a *Git* repository (1).

Keywords: Monitoring, Meteors, Light phenomena, app, *Smartphone*.

1 INTRODUÇÃO

Meteoróides são pequenos objetos rochosos ou metálicos que viajam pelo espaço ou orbitam ao redor de estrelas. Quando esses objetos penetram ou tangenciam a atmosfera da Terra eles são chamados de meteoros, ou, popularmente, de estrelas cadentes. A velocidade dos meteoroides depende da altitude em relação ao solo, a 100 km de altitude as velocidades típicas destes objetos são da ordem de 20 km/s (4), fazendo com que o atrito de arraste com o ar gere abrasão e vaporização dos materiais que os compõem. As partículas também se tornam incandescentes devido à alta temperatura, além de deixar rastros de gás ionizado em sua trajetória. Quando parte do meteoro sobrevive à destruição causada no trajeto e atinge a superfície da Terra, seus fragmentos são chamados de meteoritos. As condições envolvidas no processo são tão extremas que por vezes são encontradas em meteoritos diversas estruturas até então desconhecidas, como alguns quasicristais (5) e até mesmo fases desconhecidas de alguma substância, como exemplo recente, a fase ultradura do carbono descrita por Ferroir e colaboradores em (6). Os meteoritos são objetos muito valiosos para a ciência, tanto pela sua estrutura única quanto pela possibilidade de encontrar restos orgânicos que possam indicar a presença de vida fora da Terra. A observação e monitoramento dos meteoros auxilia na localização do impacto e no possível recolhimento de meteoritos.

As duas maneiras mais comuns de detectar um meteoro são através da luz emitida pelas partículas incandescentes e por ecos na faixa do rádio, utilizando um transmissor de radiofrequências para se detectar as reflexões das ondas causadas pelo gás ionizado presente no rastro dos meteoros. O segundo método é mais empregado quando não se tem interesse ou não é possível gerar imagens do evento e apenas se deseja realizar uma estatística deles. Este método possui a vantagem de não depender das condições atmosféricas. Aviões e objetos que refletem ondas de rádio também serão detectados por este método mas, são diferenciados pelas baixas velocidades. A localização precisa dos eventos é desfavorecida. Também é necessário um transmissor de alta potência, ou aproveitar o sinal de emissoras de rádio e TV locais, sintonizando nas faixas de frequências que operam. Trabalhar com a luz visível tem a vantagem de gerar registros de cada evento individualmente, e a desvantagem de depender de condições atmosféricas favoráveis. Normalmente são utilizadas câmeras de vigilância ligadas a computadores para monitorar meteoros pela luz visível.

Estamos em um momento histórico que possibilita uma colaboração efetiva da população na ciência, devido ao grande acesso à informação através da internet, aos

recursos tecnológicos acessíveis através de dispositivos pessoais, e também pela crescente curiosidade da população por assuntos científicos.

Mesmo que dispositivos de uso pessoal sejam menos sofisticados que aqueles em instituições de pesquisa e universidades, eles podem ser de grande utilidade quando se leva em conta a quantidade dos mesmos, em especial para áreas que exijam monitoramento de alguma espécie, devido ao caráter disperso da tecnologia em questão. Diversas áreas do conhecimento podem ser beneficiadas por este tipo de parceria, como astronomia, meteorologia e geologia. O monitoramento de recursos naturais como o vento, a radiação solar, a qualidade da água e do ar também podem se valer destes recursos provenientes da população. Além disso, também há um certo esforço para desenvolver acessórios que possibilitam implementar técnicas científicas em tais dispositivos.

No contexto da ciência cidadã, um dos recursos mais interessantes à disposição são os smartphones. Smartphones contam com GPS, acesso à internet, câmeras de alta resolução, processador embutido e também sensores como sensores magnéticos (para geoposicionamento) e acelerômetros, capazes de indicar a orientação espacial do dispositivo, podendo ser utilizados na determinar as coordenadas astronômicas de um evento luminoso, que em conjunto com outros dispositivos similares, permitem realizar triangulações com muitos pontos de referência. Eles são em geral, uma alternativa de menor custo.

O diâmetro de abertura das câmeras, por ser pequeno, geralmente não permitem observar corpos de pouco brilho ou do céu profundo, mas para a detecção e registro de objetos que penetrem na atmosfera, como o caso dos meteoros, é um instrumento suficientemente sensível. Considerando a diferença de custo entre um smartphone e o de uma câmera especial para este tipo de monitoramento em larga escala, ele se torna muito interessante.

Este trabalho propõe estudar a viabilidade de *Smartphones* como estação de monitoramento, e para tanto desenvolver um aplicativo para este fim. Para ampliar o monitoramento de meteoros e outros fenômenos luminosos é buscado o uso de recursos civis. Para tanto o software será disponibilizado para uso livre, com a possibilidade de coletar os dados gerados pelos usuários para uso acadêmico.

Para contornar o potencial problema de grandes volumes de dados gerados, será feito o processamento dos dados obtidos no próprio *Smartphone*, selecionando imagens que potencialmente captaram eventos e descartando as demais. Para eventos detectados serão calculadas as coordenadas astronômicas, que em conjunto com outras estações

permite o uso da técnica de triangulação, para a localização do objeto no espaço.

O projeto leva em conta a possibilidade do uso de lentes, como as lentes de Maxwell (*fish-eye*), que permitem o monitoramento do céu inteiro com apenas uma câmera, reduzindo a quantidade de dispositivos necessários para uma mesma extensão de monitoramento.

2 OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho é estudar a viabilidade do uso de dispositivos *Smartphones* em estações de monitoramento de meteoros e outros fenômenos luminosos noturnos. Para isto, serão realizados alguns testes utilizando alguns modelos de Smartphones e será desenvolvido um aplicativo para o sistema operacional Android, para adaptação de Smartphones para atividades de monitoramento.

2.1 Objetivos específicos

Desenvolver um aplicativo para o sistema operacional Android que utilize a câmera integrada do *Smartphone* para gerar uma sequência de imagens do céu noturno, obtendo controle das configurações da câmera. Calcular, pela posição e orientação espacial do dispositivo, as coordenadas astronômicas dos eventos detectados. No cálculo de coordenadas levar em conta o uso de lentes. Estudar as capacidades e limitações desse sistema. O aplicativo será distribuído para uso livre e em código aberto.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Fundamentos de Astronomia

Alguns conceitos de astronomia e astrofísica utilizados neste trabalho incluem magnitude, extinção atmosférica e coordenadas astronômicas.

3.1.1 Magnitude

A magnitude possui duas escalas adimensionais principais: a magnitude absoluta e a magnitude aparente. A magnitude aparente é uma escala de brilho (2) que representa o fluxo luminoso proveniente de um objeto observado a partir da Terra. A magnitude absoluta pode ser definida como a magnitude aparente de um objeto a uma distância específica de 10 parsecs (3.086×10^{14}) km. A relação entre magnitude e fluxo luminoso é dada pela equação:

$$m = -2,5 \cdot \log F + PZ,$$

onde m é a magnitude aparente, F é o fluxo luminoso, PZ é uma constante de calibração que faz o ajuste do ponto zero da escala. PZ pode ser determinada a partir da medida do fluxo de um objeto de referência cuja magnitude é conhecida.

Existem também outras definições de magnitude, normalizadas por tamanho aparente ou banda espectral (3).

3.1.2 Sistemas de Coordenadas astronômicas

São sistemas de coordenadas esféricas usadas para representar a posição de objetos na esfera celeste (2)(3).

Sistema de coordenadas horizontal

Tem como origem o observador e usa como referências o plano do horizonte e o Norte (ou Sul) geográfico. Tem como eixo de referência a vertical do local (Zênite-Nadir). As coordenadas são: azimute (a), e altura (h , ou distância azimutal z), como ilustrado na Fig. 1.

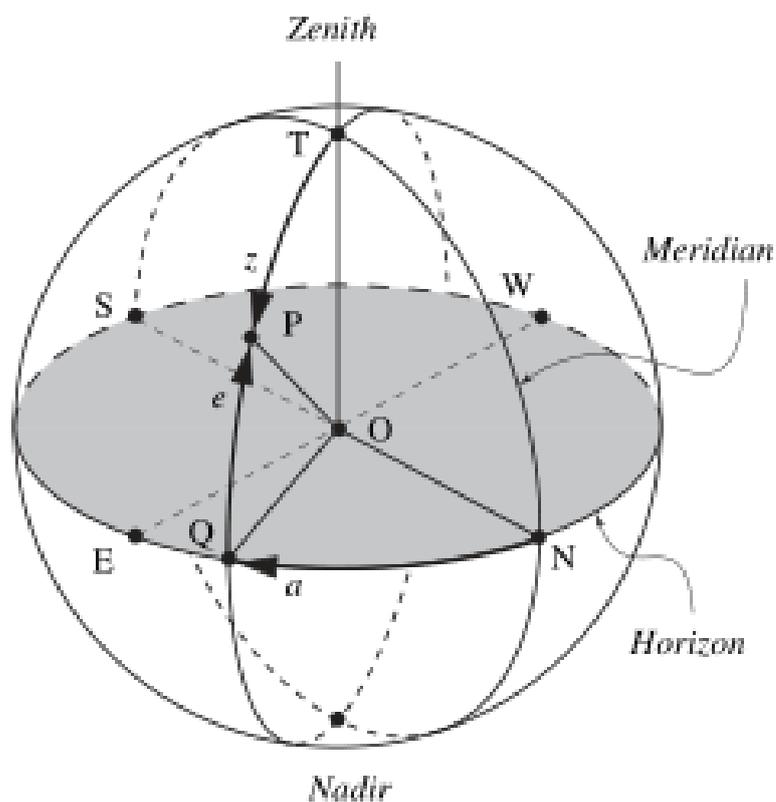


Fig. 1: Representação do sistema horizontal. Fonte:(2)

Sistema de coordenadas equatorial

Centrado na Terra, utiliza o plano equador celeste e o eixo dos polos celestes como referências. As coordenadas são: ascensão reta α e declinação δ . Esse sistema rotaciona em relação ao sistema horizontal, e é ilustrado na Fig. 2.

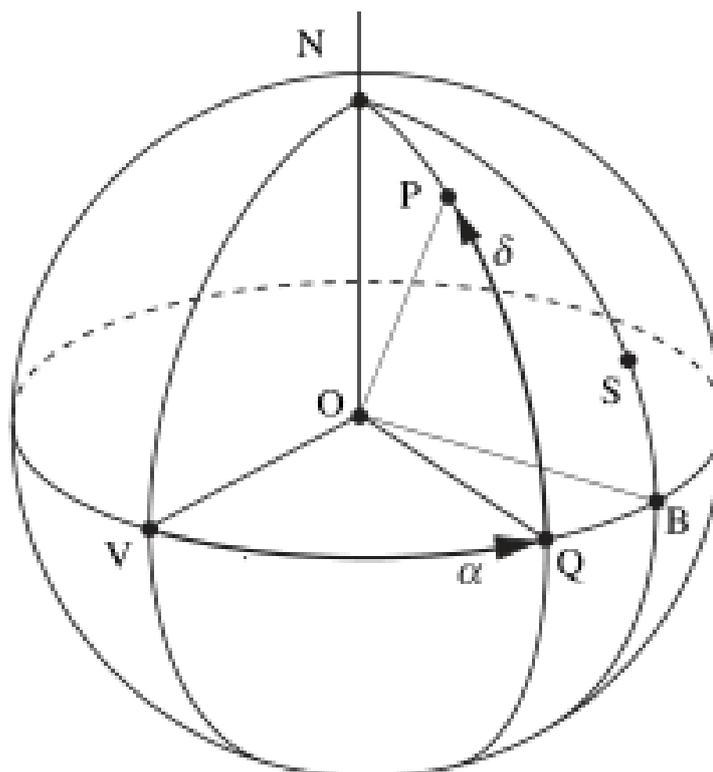


Fig. 2: Representação do sistema equatorial. Fonte:(2)

3.1.3 Extinção atmosférica

A extinção atmosférica refere-se a soma dos efeitos de absorção e espalhamento que a luz sofre ao atravessar a atmosfera terrestre. Quanto maior a distância percorrida dentro da atmosfera antes de chegar ao observador, maior será a extinção da luz. A extinção atmosférica altera o espectro da luz observada, pois a absorção e o espalhamento da luz dependem do comprimento de onda, e seu maior efeito é a diminuição da intensidade luminosa observada, pois menos fótons estarão incidindo sobre o detector. A

magnitude extinta em função da massa de ar percorrida pode ser estimada pela equação:

$$m = m_0 + K.X,$$

onde m é a magnitude aparente considerando o efeito de extinção, m_0 a magnitude aparente sem extinção, K o coeficiente de extinção da atmosfera e X a massa de ar, [$X = \sec(z)$]. O coeficiente de extinção depende do comprimento de onda da luz incidente, e para a região visível do espectro o valor médio de $K \approx 0,4$.

3.2 Programação para o sistema operacional *Android*

Aplicativos para o sistema operacional Android são escritos utilizando duas linguagens de programação diferentes simultaneamente, Java e XML. A parte em XML (*Extensible Markup Language*) lida com a declaração de elementos que compõem o aplicativo e com o gerenciamento de permissões de uso de componentes do dispositivo pelo aplicativo. A parte em Java é onde se concentram os cálculos, processos e interações executadas pelo aplicativo. Plataformas de desenvolvimento incluem *Eclipse* e *Android Studio*

3.3 Observação de Meteoros

3.3.1 Por ondas de radiofrequências

A detecção de meteoros pode ser feita utilizando um receptor de ondas eletromagnéticas na faixa de rádio, valendo-se do fato que gases atmosféricos são parcialmente ionizados com a energia recebida no atrito ao longo da trajetória do objeto (meteoro). Esse gás ionizado reflete ondas de rádio, causando um "eco" no sinal no receptor. Aviões e satélites também podem produzir ecos, podendo gerar falsos indicativos. Utilizando RADAR é possível determinar a altitude e velocidade dos objetos (8)(9).

3.3.2 Por luz visível

Ao penetrar a atmosfera, os meteoróides são desacelerados devido ao atrito com os gases da atmosfera. Meteoros então sofrem uma fragmentação de maneira sequencial: o corpo inicialmente perde pedaços relativamente grandes, que seguem se quebrando

em pedaços cada vez menores até que finalmente volatilizam, e simultaneamente ao processo são ejetados pequenos grãos incandescentes (10). A presença dessas partículas incandescentes nos dá um indicativo claro do evento de um meteoro, podendo ser visto a olho nú e por vezes com intensidade luminosa superior a outros objetos do céu noturno, incluindo a lua cheia.

3.4 Câmera digital de *Smartphones*

3.4.1 Detectores

Os detectores encontrados em câmeras de *Smartphones* possuem tipicamente detectores CMOS. Em casos mais raros são utilizados CCDs. O funcionamento do CMOS foi inspirado no CCD, seu antecessor, coletando a luz através de fotodiodos. Como ambos são semelhantes, o CCD será apresentado na próxima seção em detalhes, e a seguir serão discutidas as diferenças e semelhanças do CMOS em relação ao CCD.

3.5 CCD

Um CCD (charged-coupled device) é basicamente um circuito integrado em uma superfície de silício que forma uma matriz de elementos foto-sensíveis chamados pixels. Quando um fóton com energia maior ou igual à afinidade eletrônica do material incide sobre ele, uma carga livre é gerada por efeito fotoelétrico. Para que esse elétron não recombinde com a lacuna também gerada se cria um poço de potencial aplicando-se uma tensão positiva na matriz de pixels correspondente a cada pixel, prendendo os elétrons livres gerados.

Para fazer a leitura de uma imagem após a exposição da parte sensível, os elétrons são transferidos utilizando uma sequência de etapas com diferentes tensões aplicadas sobre a superfície, que gera um efeito de arraste dos elétrons direcionando-os até o conversor analógico-digital. O conversor analógico-digital (ADC) realiza a leitura do número de contagens pixel a pixel, que corresponde ao fluxo luminoso relativo em cada pixel, proporcional à carga gerada e armazenada. As contagens de elétrons são armazenados na memória de um computador para utilização e visualização. Os elétrons se movimentam em direção às posições adjacentes quando uma tensão positiva é aplicada nelas, fazendo com que eles se distribuam entre o poço “alargado”. Após isso se desativa

(zero ou low) a tensão aplicada na posição anterior, fazendo com que os elétrons agora se concentrem na nova posição. Desta maneira os elétrons são direcionados de maneira controlada. A sequência é ilustrada na Fig. 3, mostrando tres instantes de tempo "(1)" "(2)" e "(3)" da movimentação de cargas para o pixel adjacente.

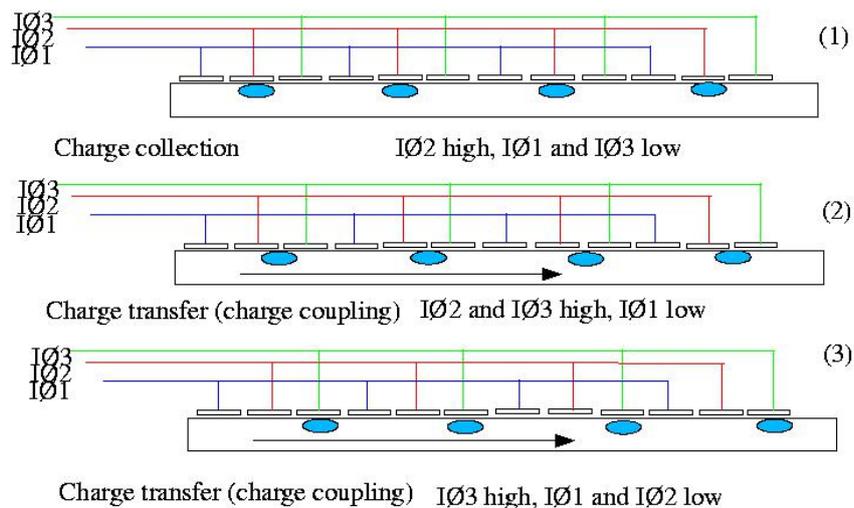


Fig. 3: Movimentação das cargas em um CCD.
 Fonte: *An introduction to CCD operation*, disponível em: www.mssl.ucl.ac.uk/www_detector/ccdgroup/opttheory/ccdoperation.html

A estrutura de um CCD consiste em camadas dopadas via epitaxia em um substrato de silício, que formam os elementos foto-sensíveis. O gate do dispositivo é posto em tensão elétrica positiva que atrai os elétrons em direção a ele, porém uma camada de óxido é posta entre eles para não permitir a captura desses elétrons, assim permitindo o acúmulo das cargas durante a exposição e a subsequente movimentação delas até a região de leitura. Existem diferentes métodos para fazer a varredura dos pixels, o mais comum usa duas direções de transporte, a paralela e a serial. O movimento paralelo transporta os últimos pixels de cada coluna para uma linha de leitura, enquanto que o serial lê individualmente cada pixel dessa coluna de leitura, lendo todos os pixels nela antes do próximo movimento paralelo, ilustrado na Fig. 4. A leitura serial é escolhida pois o transporte para a memória feito pelo processador se dá de maneira serial, mas não há perdas significativas na velocidade de leitura, visto que a leitura serial permite trabalhar com frequências de operação elevadas.

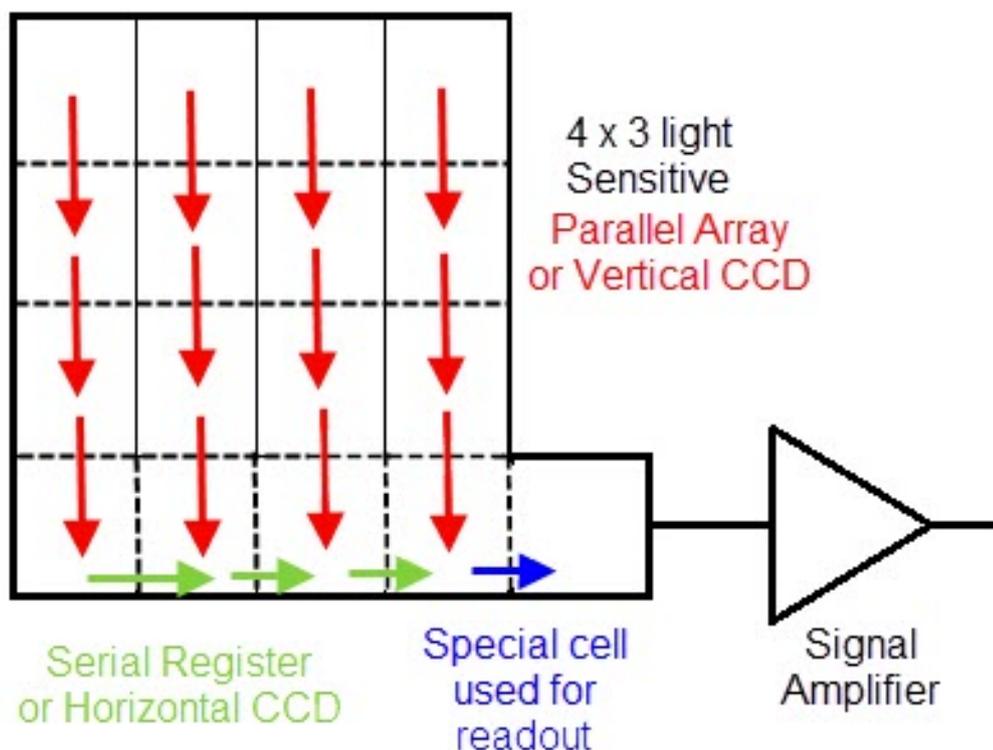


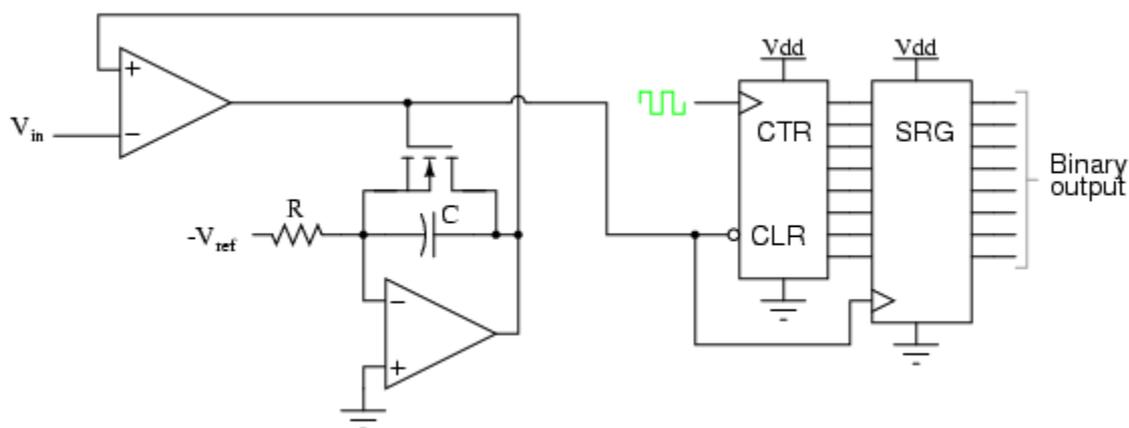
Fig. 4: Leitura dos pixels em um CCD. Fonte: ELPROCUS, 2015, disponível em: www.elprocus.com/know-about-the-working-principle-of-charge-coupled-device/

3.5.1 Conversão analógico-digital

A conversão analógico-digital utiliza principalmente os métodos *single slope integration* e *dual slope integration* para avaliar o conteúdo de cada pixel em um CCD.

Single Slope Integration

O circuito ilustrado na Fig. 5 é uma simplificação para representar o funcionamento da integração: enquanto o comparador estiver com saída baixa (isto é, a tensão de entrada vinda do pixel é maior), o capacitor C carrega de maneira linear, enquanto o número de clocks é contabilizado por um contador. No momento em que o capacitor estiver carregado à mesma voltagem que a tensão de entrada, o comparador então tem saída alta, o valor do contador é levado para a memória e o contador é resetado. Ou seja, o tempo de integração (ou número de *clocks*) é diretamente proporcional à tensão de entrada, e assim a tensão elétrica gerada pelos elétrons acumulados no pixel é convertida em um valor digital. É pertinente notar que a frequência de clock não influencia na precisão da medida, visto que a integração é um processo independente do clock.



8

Fig. 5: Circuito simplificado de *single slope integration*. Fonte:(11)

Dual Slope Integration

Para o método *dual slope* uma lógica semelhante é aplicada, porém em dois estágios, envolvendo uma polaridade negativa do circuito integrador ao invés de retornar a zero simplesmente. A Fig. 6 ilustra os dois processos, integração e “de-integração”, e para este método a velocidade de clock está atrelada à tensão acumulada no comparador, de forma que a de-integração compensa erros causados na integração (11).

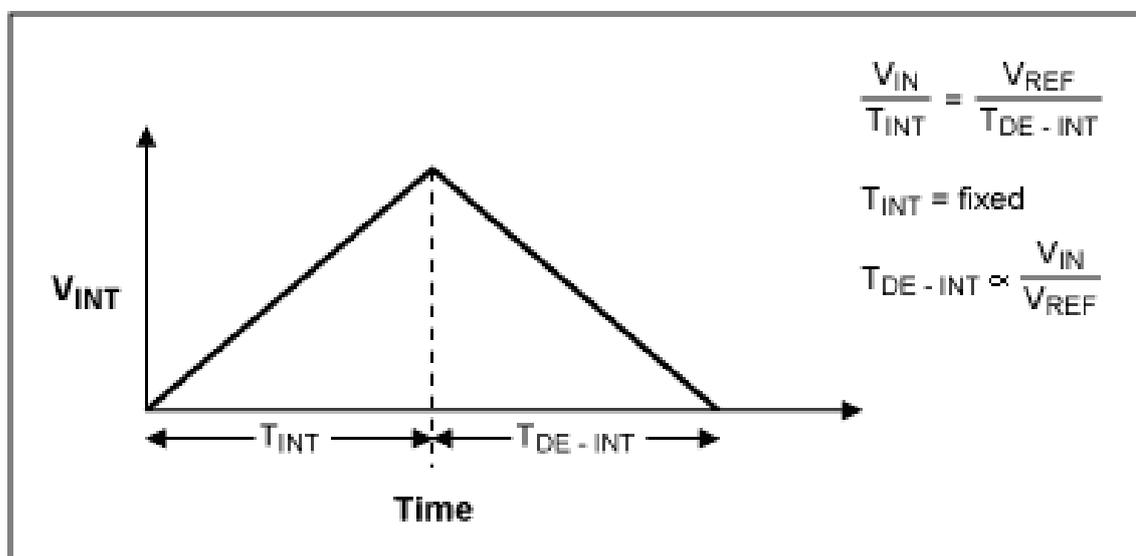


Fig. 6: Integração e “de-integração” – Tempo vs. Tensão. Fonte:(11)

Este método é comumente utilizado por CCDs visto que é superior ao *single slope*. O número de clocks registrado ao final do processo é convertido para um valor dentro da faixa da arquitetura desejada (8-bit = 255, 16-bit = 65535, etc.).

3.5.2 *Full Well Capacity.*

Full Well Capacity (ou *Dynamic Range*) é o nome comum para a capacidade de saturação de captura de elétrons em um pixel de um CCD, ou seja o número máximo de elétrons que pode conter. Esse número de elétrons depende fortemente das dimensões do pixel (quanto maior mais elétrons ele consegue acumular), e fracamente da tensão aplicada. O número pode variar entre dez mil e quinhentos mil elétrons. Quando há mais elétrons gerados no pixel do que este limite, o excesso de elétrons vaza para os pixels adjacentes onde são então capturados, caso estes ainda não estejam saturados. Esse efeito causa artifícios de imagem chamados *blooming*, apresentados na imagem da galáxia de Andrômeda na Fig. 7, cujas estrelas mais próximas apresentam tal efeito.

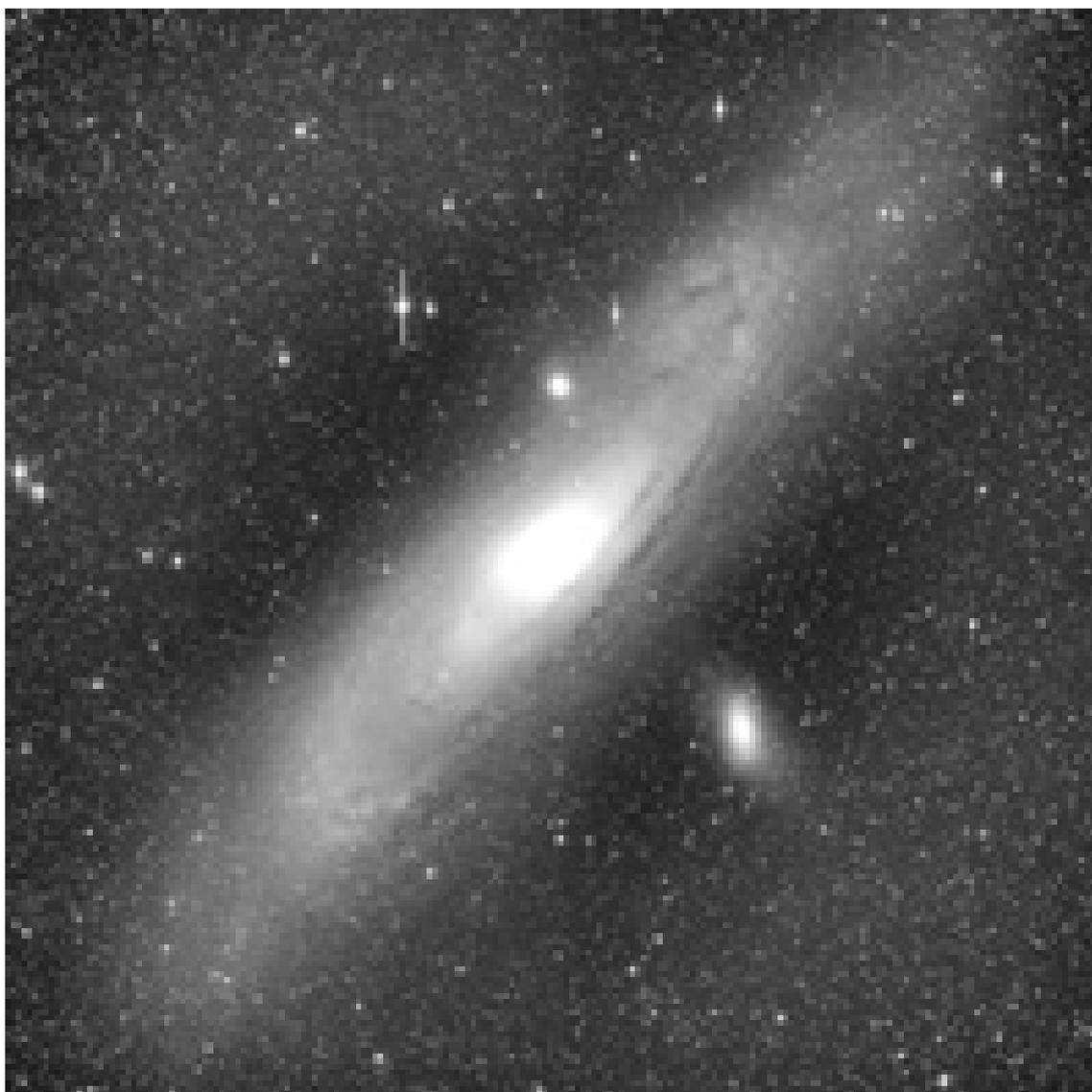


Fig. 7: Imagem de satélite da galáxia de Andrômeda. Fonte: Spectral Instruments, Inc, 2001-2013, disponível em: http://www.specinst.com/What_Is_A_CCD.html

3.5.3 Eficiência Quântica

Eficiência quântica é definida como a fração de fótons incidentes que são efetivamente detectados pelo dispositivo. A eficiência quântica varia em função do comprimento de onda, depende do substrato e os dopantes utilizados, assim como o uso de filmes anti-refletores. Porém o efeito mais significativo na eficiência quântica do CCD está na posição da porta (*gate*) em relação à fonte de luz. Como ilustra a Fig. 8 e os espectros na Fig. 9 (a) e (b), o bloqueio da luz incidente pela própria porta gera uma grande diferença nas curvas de eficiência quântica, especialmente na região do infra vermelho. Atualmente são utilizados nas câmeras também filtros de infra vermelho, a fim de corrigir o excesso da componente vermelha dos pixels, resultando em uma melhor qualidade de cor.

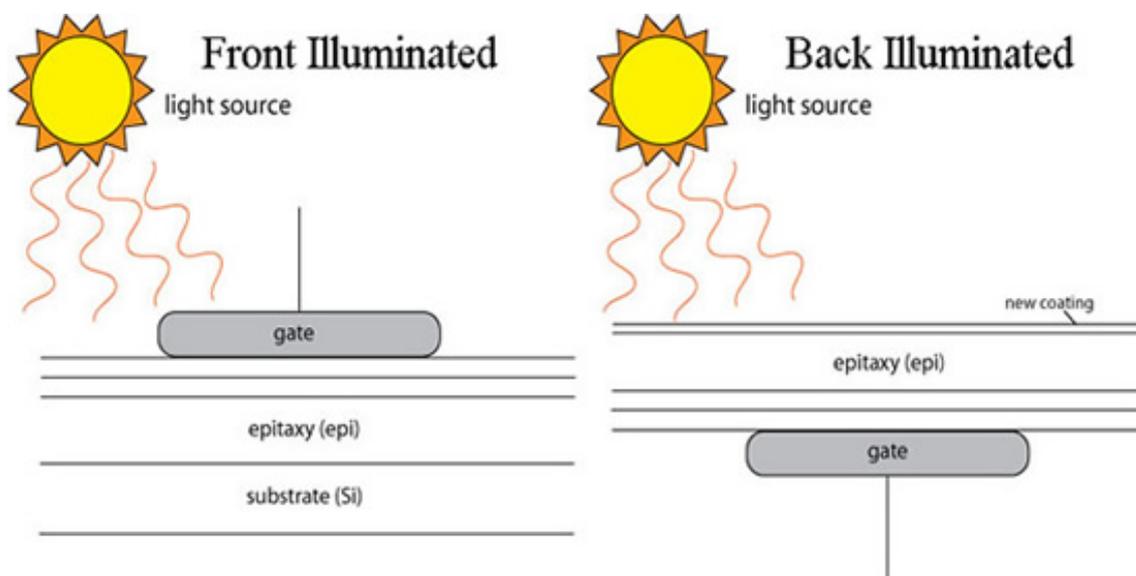
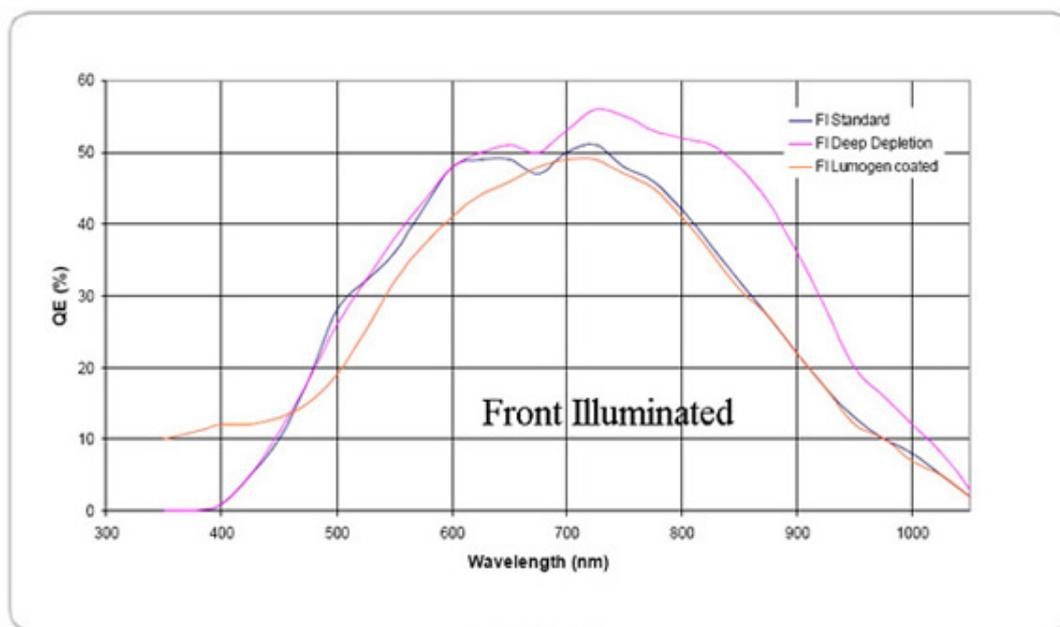


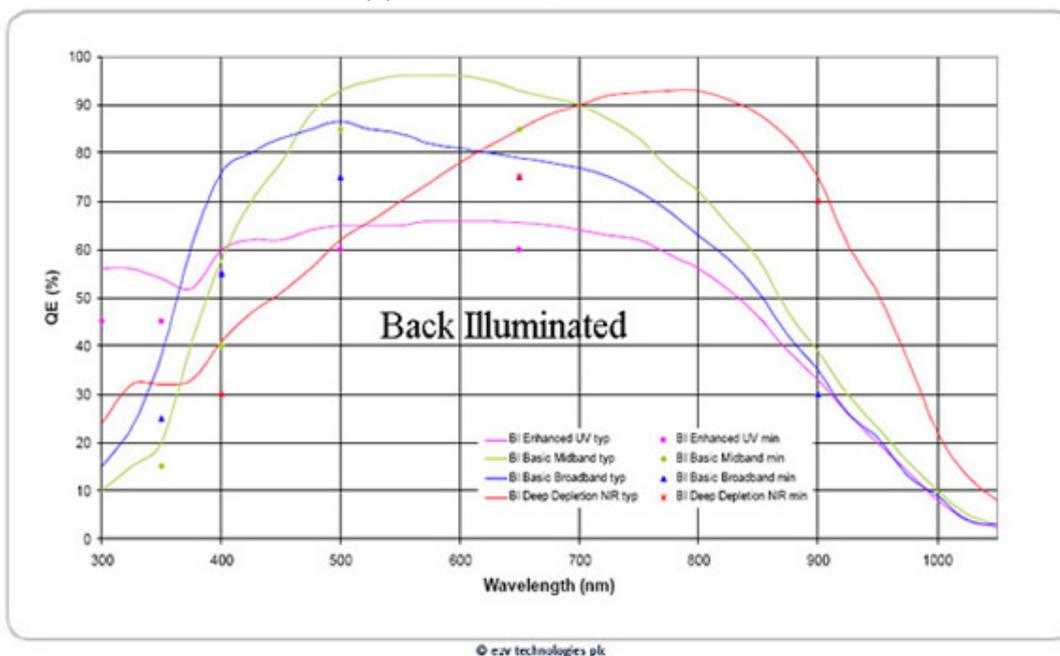
Fig. 8: Esquemático das construções de porta do CCD. Fonte: Spectral Instruments, Inc, 2001-2013, disponível em: http://www.specinst.com/What_Is_A_CCD.html

Um CCD com a porta na superfície ativa é denominado *Front Illuminated* e um com a porta fora da superfície ativa é denominado *Back Illuminated*.

As curvas da Fig. 9 representam diferentes modelos de CCDs de um determinado fabricante, mas de maneira geral, representam a diferença de eficiência esperada entre as duas posições do *gate* de um CCD.



(a) Gate na superfície ativa.



(b) Gate fora da superfície ativa.

Fig. 9: Eficiência quântica com iluminação frontal (a) e traseira (b). Fonte: Spectral Instruments, Inc, 2001-2013, disponível em: www.specinst.com/What_Is_A_CCD.html

3.6 Detector CMOS

CMOS significa "*Complementary Metal Oxide Silicon*", é uma nomenclatura geral para tecnologia de transistores em semicondutor. Não sendo um nome específico para o sensor em questão, o nome foi apenas utilizado para diferenciá-lo do CCD. Como

podemos observar na Fig. 10, a construção do sensor em wafer de silício permite a integração de toda lógica e circuitos de controle no próprio chip. Isso não só permite que o sensor seja de menor dimensão física que o CCD, como também diminui o consumo de energia por não precisar de circuitos periféricos e sua fabricação é de menor custo. Por esses motivos o CMOS é mais utilizado do que o CCD em *Smartphones*.

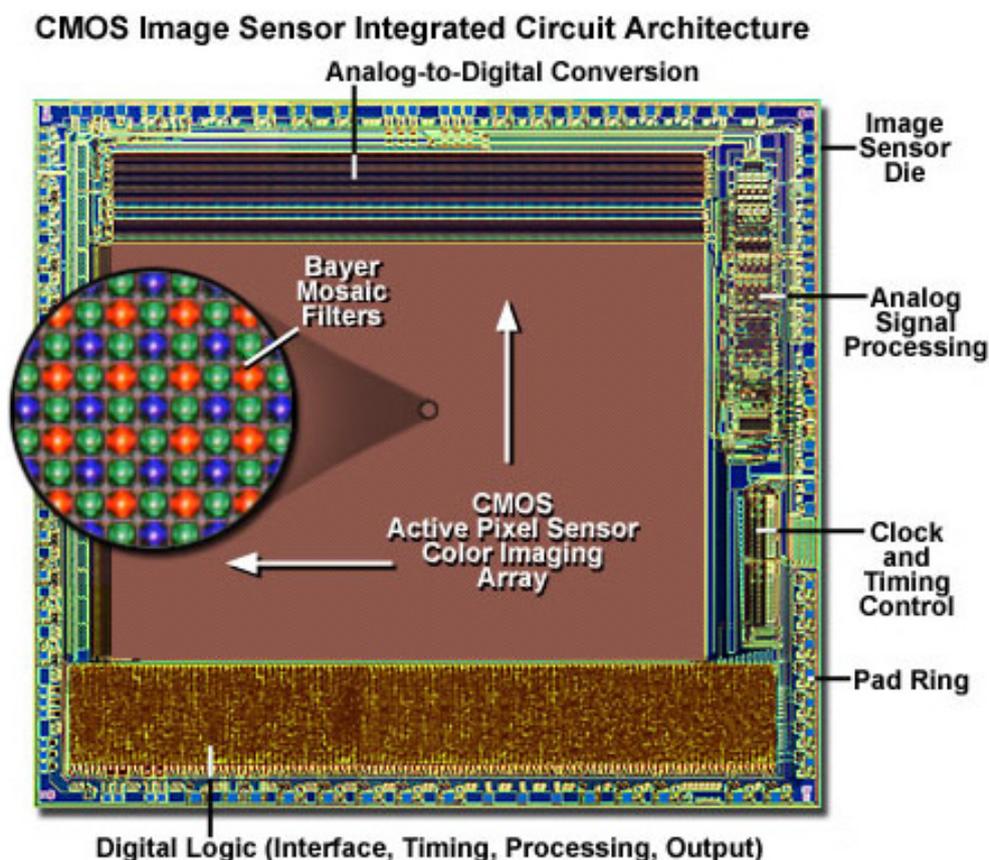


Fig. 10: Arquitetura de sensor CMOS. Fonte: Olympus America Inc, 2012, disponível em: www.olympusmicro.com/primer/digitalimaging/emosimagesensors.html

A sua operação é muito semelhante a do CCD, utilizando fotodiodos para coletar a luz de cada pixel. Os fotodiodos são uma junção p-n. Quando um fóton incide sobre a zona de depleção da junção, um par elétron-lacuna é gerado. Diferentemente do CCD que prende os elétrons via potencial elétrico para posterior leitura, no CMOS eles são acelerados pelo próprio campo elétrico da zona de depleção, gerando uma corrente entre os terminais. A detecção é dada então de maneira direta. O arranjo dos pixels e uso de filtros para obtenção de imagens em cores é idêntico ao CCD, com a diferença que os pixels podem ser lidos em paralelo, aumentando a velocidade de leitura. A conversão analógico-digital assim como efeitos de *blooming* também são análogos.

Em termos de qualidade de imagem, o CCD tem maior eficiência quântica que

o CMOS, sendo que o CMOS vem diminuindo essa diferença. Outra desvantagem do CMOS vem do chamado ruído de padrão fixo, um ruído fixo de operação gerado pelos circuitos em operação no chip. O ruído é cerca de dez vezes maior que o do CCD. Ou seja, mesmo se atingisse a mesma eficiência quântica, o CMOS ainda teria uma qualidade de imagem pior devido ao ruído maior.

3.6.1 Óptica

As câmeras de *Smartphones* possuem uma grande quantidade de lentes, como ilustrado na Fig. 11. As lentes são necessárias não só para reduzir a imagem e focar no sensor, como também para diminuir as aberrações causadas pelas outras lentes. Pequenos motores também movimentam as lentes para se obter o ajuste da distância focal. Os ajustes são controláveis por *software*, com o sistema operacional definindo os comandos de comunicação.

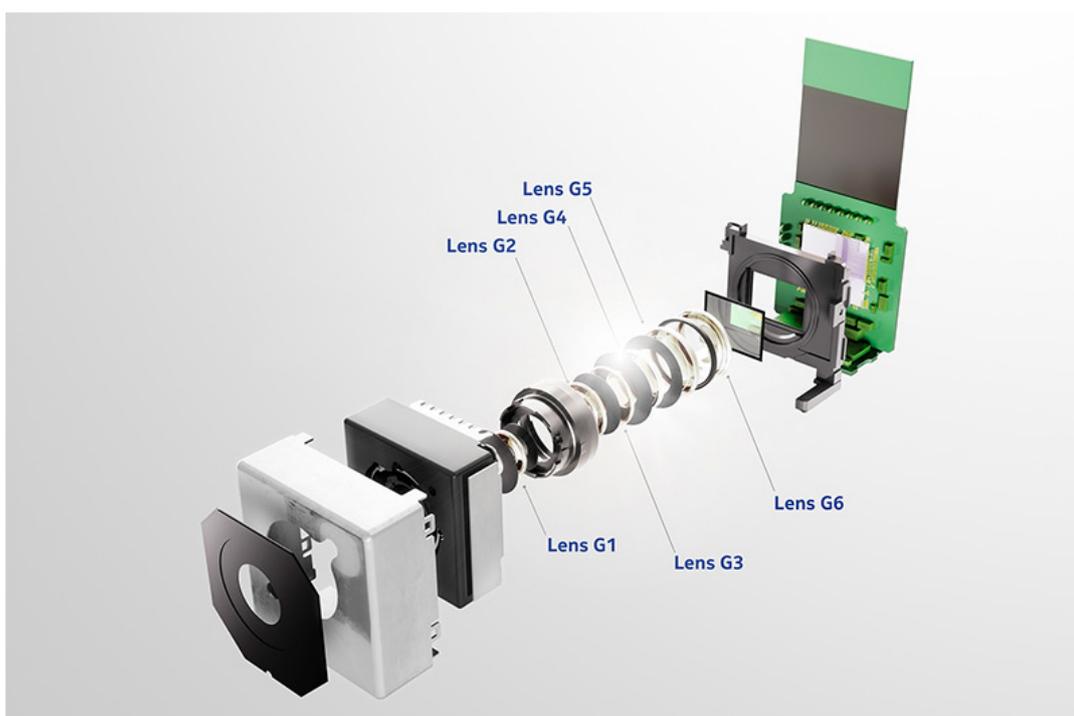


Fig. 11: Montagem das lentes da câmera *PureView* da Nokia. Fonte: Nokia Inc, 2012

3.7 Lentes Ópticas

Uma lente é um objeto transparente que desvia o caminho ótico dos raios de luz por refração, podendo divergir os raios incidentes ou convergi-los para um foco. As

propriedades de interesse nas lentes são o índice de refração e o raio de curvatura. Para a faixa do visível são tipicamente fabricadas de vidro polido e moldado, e em alguns casos são fabricadas com difusão de dopantes para alterações no índice de refração.

3.7.1 Lentes de Lüneburg

Esta nomenclatura se refere a lentes cujo índice de refração é esféricamente simétrico. Tipicamente com o maior índice de refração no centro, diminuindo radialmente para as bordas. Um caso específico são as lentes de Maxwell (*Fish-eye*), que são lentes de Lüneburg cujo índice de refração radial varia conforme a equação (13):

$$n = \sqrt{\epsilon_r} = \frac{n_0}{1 + (r/R)^2},$$

de forma que o foco de qualquer ponto sobre a superfície esférica de raio R fica no ponto oposto da mesma superfície. Por causa dessa propriedade, as lentes de Maxwell permitem grandes aberturas angulares, podendo passar de 180° de abertura. Um esquemático da lente é apresentado na Fig. 12, onde a coloração azul representa o índice de refração e as linhas vermelhas dão uma ideia da distorção causada na trajetória da luz.

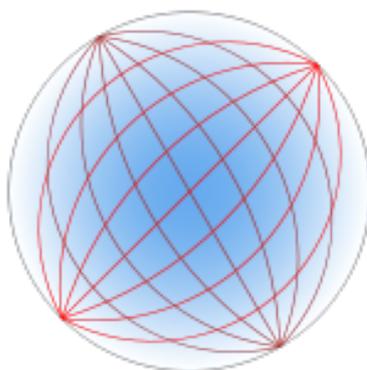
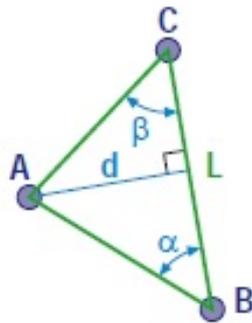


Fig. 12: Diagrama do índice de refração radial das lentes de Maxwell. Seção transversal. Fonte: Wikipedia, disponível em: https://en.wikipedia.org/wiki/Luneburg_lens

3.8 Triangulação

A determinação da posição de um evento dentro da atmosfera pode ser feita trigonometricamente pela técnica de triangulação. Nesta técnica, são utilizadas duas estações de observação B e C, separadas por uma distância L conhecida. A distância d do evento A em relação à linha de base \overline{BC} pode ser determinada pela equação abaixo, a partir dos ângulos α e β , medidos a partir das estações B e C, respectivamente:



$$d = L \frac{\text{sen}(\alpha) \text{sen}(\beta)}{\text{sen}(\alpha + \beta)},$$

onde d é a distância até o ponto ou objeto alvo, L a distância entre os pontos de referência e α e β os ângulos.

Os ângulos α e β podem ser determinados com base nas coordenadas astronômicas do evento (12).

3.8.1 Determinação da posição

Utilizando esta técnica, é possível gerar um volume de probabilidade de ocupação, delimitado pelos ângulos observados em cada ponto de referência e considerando os seus respectivos erros de medida, de maneira a estabelecer a posição mais provável do evento observado.

O número de medidas de distância N_L , em função do número total de estações N é dado pela relação $N_L = N(N - 1)/2$, ou seja, a medida que o número de estações aumenta, o erro na determinação da posição do evento decresce sensivelmente, pois o número de medidas aumenta de maneira quadrática.

3.9 Recursos de um *Smartphone*

Este trabalho também visa gerar inspiração para que futuros projetos também abracem a ciência cidadã em seus conceitos, aproveitando recursos já existentes que dependem apenas da cooperação e interesse dos usuários. No caso de *Smartphones*, além de serem dispositivos extremamente populares, são compactos, resistentes e incluem diversos componentes integrados com uso facilitado e complexidade reduzida tanto na comunicação com os sensores quanto no processamento de seus sinais. Para ilustrar a variedade e quantidade de componentes presentes, alguns deles são listados a seguir.

Recursos de *Hardware*:

- Processador integrado;
- Unidade de processamento gráfico (GPU);
- Arquitetura inclui memória RAM, memória interna e externa (expansível);
- Câmera digital – em geral, com alta resolução. Gera imagens e vídeos;
- Bateria recarregável (normalmente de íon-Lítio), com dezenas de horas de autonomia e com a possibilidade de uso de alimentação permanente;

Sensores:

- Acelerômetros;
- Sensor de proximidade;
- Giroscópio;
- Bússula;

Recursos de conectividade:

- GSM (Global System for Mobile Communications) – Recursos de telefonia digital, usando diferentes sistemas de transmissão de dados (GPRS, EDGE, UMTS, HSDPA, HSUPA, LTE, ...), incluindo acesso à internet.
- Wi-Fi – acesso à internet por meio de redes sem fio.

- Bluetooth.
- GPS (*Global Positional System*) – sistema de posicionamento global, baseado no uso de sinais de satélites.
- IrDA (*Infrared Data Association*) – para transmissão de dados em infravermelho.
- Porta Micro-USB – para conexão via cabo com computadores.

A partir de um uso criativo desses recursos é possível desenvolver diversas ferramentas científicas, especialmente com o auxílio de acessórios. Como um exemplo, podemos citar um sistema portátil que realize a espectroscopia no visível utilizando a câmera digital de um *Smartphone* com o auxílio de um acessório que constitui uma grade de difração, com a possibilidade de realizar o processamento dos dados obtidos imediatamente. Tal sistema tem como vantagens a praticidade, portabilidade e custo. Tendo como grande desvantagem, a necessidade de um método confiável de calibração para diferentes modelos de câmera integrada.

4 METODOLOGIA

A programação para o sistema operacional Android difere da programação em outras linguagens como C, pois possui inúmeras funções e pacotes especializados para diferentes operações e comunicações entre os componentes do dispositivo, e por isso se torna necessário o uso de uma plataforma de desenvolvimento que auxilie no uso desses pacotes. Para este trabalho foi utilizada a plataforma Android Studio (7), usando para o desenvolvimento do aplicativo, um API compatível com grande parte dos dispositivos pessoais em uso atualmente, para que o aplicativo também seja utilizável por dispositivos mais antigos. Com uma quantidade maior de dispositivos capazes de executar o aplicativo, se espera que uma maior quantidade de estações de monitoramento em operação.

Em termos gerais, o funcionamento do aplicativo envolve a captura sequencial de imagens, com cada nova imagem sendo comparada com as imagens anteriores, a fim de definir quando uma imagem se destaca frente às outras. No caso do monitoramento de meteoros, quando um desses eventos ocorre e é detectado pela câmera, a imagem gerada do evento pode ser separada por diferenças em relação às imagens anteriores. Dessa forma, é possível capturar imagens durante longos períodos e manter apenas as imagens que se destacam, reduzindo o volume de dados gerado.

4.1 Parâmetros do sistema

Para que o aplicativo atinja seus objetivos, primeiramente é necessário que a câmera do *Smartphone* tenha sensibilidade suficiente para detectar e registrar os fenômenos luminosos, em especial para este trabalho, meteoros. E para determinar a eficiência de monitoramento, é necessário determinar o tempo de exposição da câmera e a frequência máxima de obtenção de imagens pelo aplicativo. A comparação desses parâmetros identifica se o dispositivo é capaz de realizar um monitoramento contínuo.

4.1.1 Determinação e controle de parâmetros da câmera

Os parâmetros de configuração das câmeras de *Smartphone* incluem ISO, abertura, tempo de exposição, compensação de exposição e resolução, entre outros. O controle desses parâmetros é crucial para o melhor funcionamento e adaptação às condições

do ambiente de onde se deseja registrar uma imagem.

4.1.2 Determinação da sensibilidade da câmera

Com o controle dos parâmetros da câmera, podemos aumentar a sua sensibilidade. E para determinar o que essa sensibilidade representa, um possível teste seria através do registro de estrelas e outros corpos celestes. Esses objetos tem sua magnitude bem conhecida, e comparando as magnitudes dos objetos menos brilhantes da imagem com as magnitudes conhecidas de meteoros, podemos estimar o quão eficiente a câmera seria em registrar meteoros.

4.1.3 Determinação do tempo de exposição

São poucos os modelos de *Smartphone* presentes no mercado que oferecem controle deste parâmetro, e naqueles dispositivos que não se oferece tal controle, também não é divulgado o tempo de exposição padrão. Para determinar o tempo de exposição nesses casos, pode-se obter uma imagem de um desenho parcialmente escuro em rotação, cuja frequência de rotação seja ajustável, variando essa frequência até que a parte escura da imagem obtida do desenho desapareça. O fato da parte escura desaparecer indica que o tempo de exposição da câmera teve a duração do período de rotação.

4.2 Análise estatística de imagens

Para realizar a comparação de imagens sucessivas é feita uma análise estatística, obtendo a distribuição que representa as contagens dos pixels para cada imagem. Essas distribuições são caracterizadas pelos seus momentos estatísticos. Nessa análise são considerados os dois primeiros momentos: a média e o desvio padrão. E então dividimos em dois tipos de distribuições: de imagens que contenham eventos e de imagens do "fundo", que contém o conjunto de todos elementos persistentes na imagem (céu, estrelas e outros objetos no campo da imagem).

4.2.1 Análise das médias das distribuições

Para uma melhor comparação, as distribuições são comparadas com a média das últimas N distribuições geradas. Na prática para melhor performance é calculada a média das médias e seu erro associado, conforme ilustra o fluxograma da Fig. 13. Como o aplicativo foi pensado para monitoramento do céu noturno que está em lenta mas constante mudança, é utilizado um conjunto de 25 imagens para determinar a média das médias, de forma a ser pequeno o suficiente para considerar apenas o "fundo" recente na comparação, e grande o suficiente para gerar uma boa estimativa da média e erro padrão.

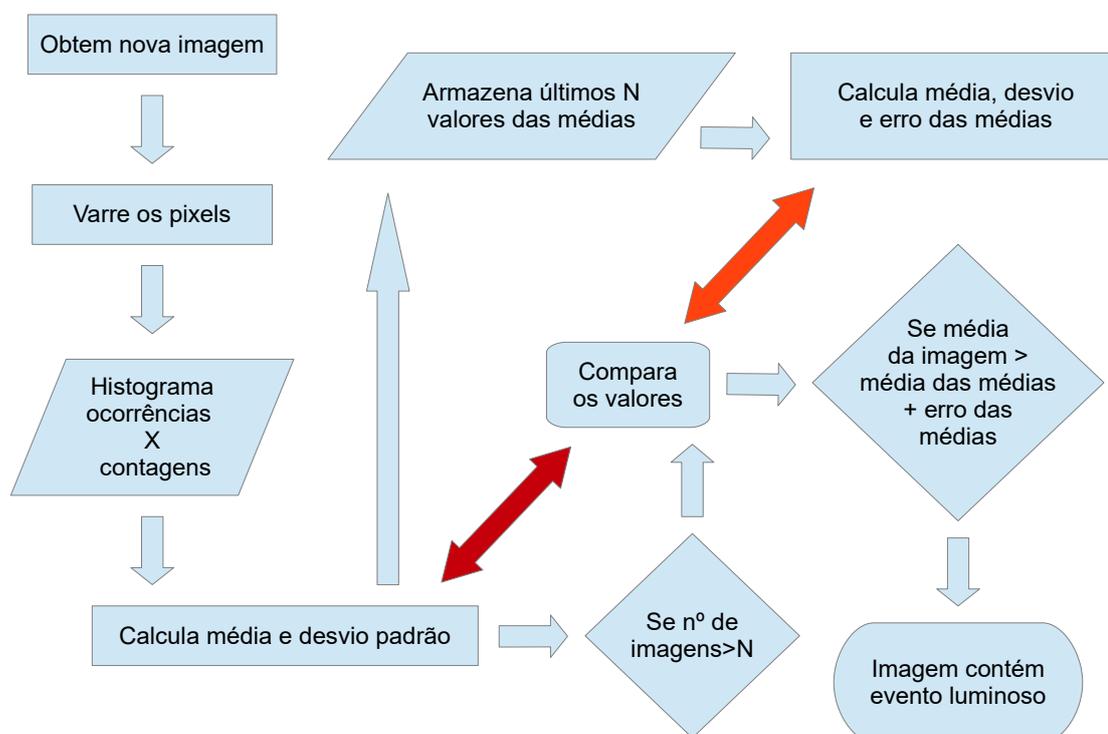


Fig. 13: Fluxograma da lógica do aplicativo. Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

4.2.2 Análise de desvio padrão

Em alguns casos, para eventos de baixa luminosidade ou ambiente muito iluminado, pode ser interessante também analisar as diferenças no desvio padrão das distribuições, podendo assim identificar eventos que diferem menos em relação ao controle.

4.2.3 Aceleração do cálculo por histogramas

Ao invéz de se calcular o somatório da média pixel a pixel, a montagem de um histograma do número de ocorrências em função do número de contagens pode oferecer uma redução no tempo de cálculo, uma vez que o número total de operações é reduzido. Desconsiderando operações que são comuns aos dois métodos, temos o somatório pixel a pixel:

$$\sum_{i,j=0}^{i=N,j=M} (x - \mu)^2,$$

onde i e j são os índices do pixel, N e M a resolução em pixels e x o valor do pixel. A operação requer tres operações para cada pixel varrido. Uma resolução de 3 MP necessitaria de nove milhões de operações, lembrando que cada operação representa mais de um ciclo (ou *clock*) do processador. O cálculo pode ser substituído por duas etapas: a montagem do histograma, que necessita de uma operação por pixel, seguida do cálculo varrendo o histograma:

$$\sum_{k=0}^{255} C_k (k - \mu)^2,$$

com k sendo o índice do histograma representando o número de contagens e C_k o número de ocorrências desse valor de contagens. O cálculo necessita de um número fixo de 1020 operações. Para os mesmos 3 MP de resolução o número total de operações é reduzido para pouco mais de tres milhões.

Operações de subtração geralmente usam um ciclo do processador, enquanto multiplicações de 32 bits necessitam de aproximadamente 5 ciclos para processadores comuns de *Smartphones*. Desconsiderando as operações em comum, teríamos para o primeiro caso cerca de 63 milhões de ciclos para completar o cálculo, enquanto que o segundo caso necessitaria de aproximadamente 1 012 000 ciclos. Uma diferença de quase 62 milhões de ciclos, que em um processador de 1 GHz isso representaria um redução de 62 ms no cálculo.

4.3 Obtenção das coordenadas astronômicas

As coordenadas astronômicas dos eventos detectados podem ser determinadas utilizando os sensores de posicionamento e localização dos dispositivos.

4.3.1 Orientação espacial do dispositivo

A orientação é determinada com o uso de acelerômetros (para determinar a direção da gravidade) e sensor magnético (para determinar a direção do norte magnético). As informações são geradas em relação ao sistema de coordenadas interno do dispositivo, que devem ser convertidas para um sistema de coordenadas do planeta. Os sistemas de coordenadas são ilustrados na Fig. 14.

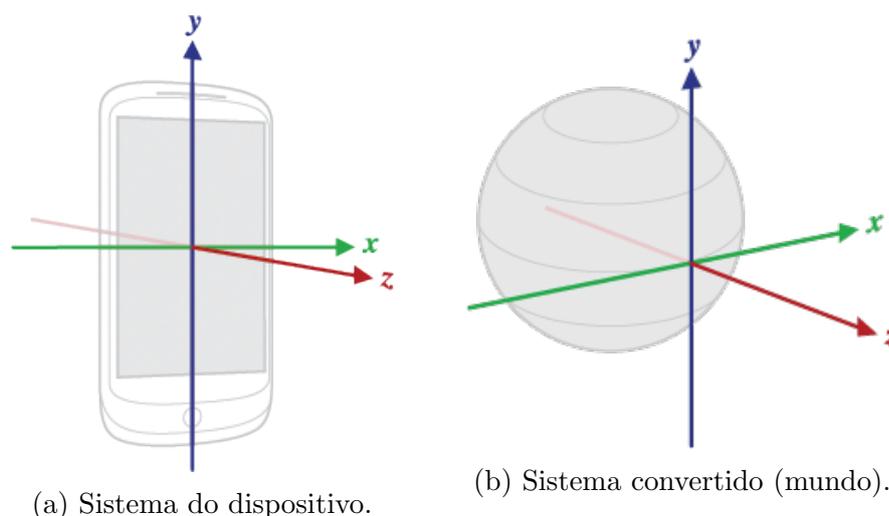


Fig. 14: Sistemas de coordenadas utilizados por dispositivos Android. Fonte: Creative Commons, disponível em: developer.android.com/guide/topics/sensors/sensors_overview.html

4.3.2 Coordenadas do pixel central

Sabendo a posição da câmera em relação ao dispositivo, e a orientação do dispositivo em relação à Terra, podemos obter as coordenadas horizontais (Azimute e Altura) para onde a câmera aponta, que se referem as coordenadas do pixel central das imagens geradas.

Para a determinação da orientação, existe função do sistema operacional que gera a orientação pela matriz de rotação gerada pelo dispositivo. Através de um remapeamento das coordenadas podemos mudar a referência da tela (eixo z do dispositivo) para a parte de trás do dispositivo (eixo -z do dispositivo), onde se encontra a câmera principal. A partir do ângulo em torno do eixo z 'mundo', se determina o azimute, considerando a declinação magnética, que é obtida com a latitude, longitude e altitude do dispositivo. Um ajuste é necessário pois o padrão do dispositivo é o intervalo $[-\pi, \pi]$ e

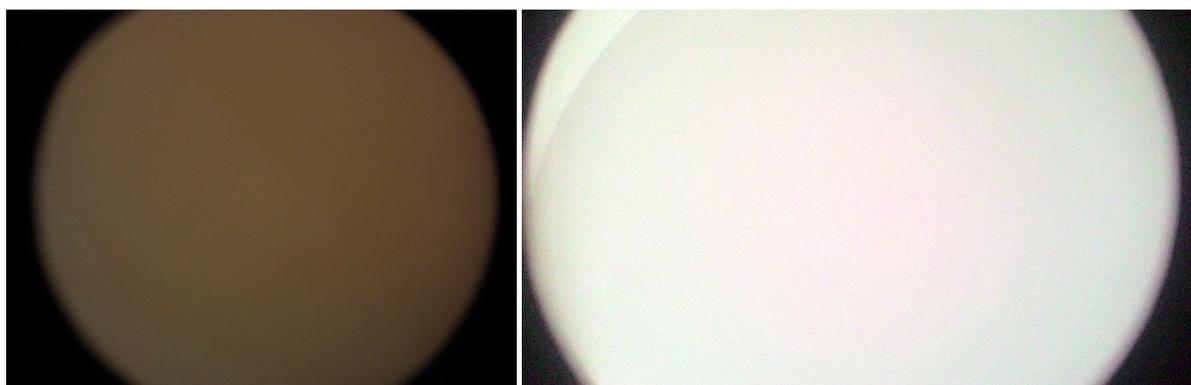
os valores de azimute são $[0, 2\pi]$. A altura é obtida diretamente da segunda componente gerada. As coordenadas equatoriais (Ascensão reta e Declinação) podem ser calculadas a partir do azimute, altura, latitude e longitude.

4.3.3 Coordenadas dos pixels da imagem

A abertura angular horizontal e vertical podem ser obtidas por funções nativas do pacote de controle da câmera. Essa informação, a resolução da imagem e o ângulo de inclinação em relação ao eixo Z do *Smartphone* é possível parametrizar uma equação que receba os índices X e Y de um dado pixel na imagem e retorne as coordenadas astronômicas correspondentes.

4.3.4 Integração de lentes

Pela ausência de padrão na fabricação de diferentes modelos, a distância que uma lente acoplada fica em relação ao detector varia, e com isso muda também o tamanho que imagem ocupa no detector, como ilustra a Fig. 15. Com isso, para se parametrizar as equações é necessário saber a posição central, o tamanho da imagem e a abertura angular da lente.



(a) Galaxy S3.

(b) Asus Zenfone 4.

Fig. 15: Efeito de uma mesma lente olho de peixe em diferentes dispositivos. Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Tempo de exposição de câmeras de *Smartphones* testados

Foram realizados testes para determinar o tempo de exposição das câmeras de tres diferentes modelos de *Smartphone*: Samsung Galaxy S3 (*GT – 19300*), Asus Zenfone 4 (*T00_J*) e Sony Xperia SP (*C300*). Em nenhum dos tres modelos testados é oferecido pelo fabricante o controle do tempo de exposição, ao invés disso o tempo de exposição é atrelado à resolução escolhida, como forma de atenuar o aumento de contagens gerado pelo *binning*. O maior tempo de exposição encontrado foi para o Sony Xperia SP com 120 ms de tempo de exposição, e para os outros dispositivos cerca de 66 ms.

5.1.1 Limitações e consequências para o monitoramento

Uma das maiores limitações encontradas no sistema foi no processo de leitura das imagens. Uma limitação que o sistema operacional Android impõe é o uso máximo de 8MB de memória *RAM* por aplicativo, e por causa deste limite, a gravação de imagens do sistema operacional foi implementada de forma que as informações do arquivo da imagem são transmitidas da câmera diretamente para a memória física do dispositivo. Ou seja, quando uma imagem é gerada, é necessário aguardar a gravação do arquivo final na memória para somente então poder abrir o arquivo gerado e obter a informação individual de cada pixel. Essa arquitetura do sistema operacional não permite obter a informação dos pixels diretamente da câmera quando ela gera uma imagem. Os desenvolvedores do sistema operacional inclusive declararam que não pretendem implementar tal possibilidade no futuro, por considerar imprático.

A consequência disso está no tempo que o dispositivo necessita para analisar uma imagem; para apenas gerar e abrir o arquivo nos dispositivos testados são necessários entre 470 ms e 503 ms. Esse valor se mostrou independente da resolução, indicativo de que o *binning* não é feito a nível de *Hardware*, não existindo portanto maneira de contornar essa limitação.

5.2 Sensibilidade de câmeras de *Smartphones*

Foram realizados testes obtendo imagens do céu noturno visto de Porto Alegre nos dias 2 e 3 de maio de 2016 com os *Smartphones* Samsung Galaxy S3 e Asus Zenfone 4. Para ambos foram utilizadas as configurações: ISO 800, *Exposure Compensation* +2.0 e modo de captura *Low Light*. As imagens foram coletadas em datas diferentes. Ambos os dispositivos foram capazes de registrar estrelas. A melhor imagem (obtida utilizando o Zenfone 4) é apresentada em negativo na Fig. 16 e com ajuste de brilho na Fig. 17. A Tabela 1 apresenta alguns dos objetos identificados na imagem de cada dispositivo e suas respectivas magnitudes aparentes, considerando a extinção atmosférica, calculadas pelo *software* Stellarium. Uma grande dependência da sensibilidade máxima configurável com o dispositivo utilizado foi observada.

O diagrama de barras mostrado na Fig. 18 representa a magnitude aparente de meteoros observados durante a chuva de meteoros dos Leonídeos de 2002. Comparando-o com as maiores magnitudes observadas utilizando cada dispositivo testado podemos estimar qual a fração de eventos do tipo meteoros que seria possível registrar nesses dispositivos. Apesar de algumas diferenças, o diagrama serve como base para diferentes chuvas de meteoros, assim como meteoros imprevisíveis. Podemos comparar também o limite de magnitude observada com o limite do olho humano, que fica entre 6 e 7, dependendo do indivíduo. A comparação mostra que a sensibilidade das câmeras está se aproximando da sensibilidade do olho humano, apesar da dimensão do dispositivo ser bem menor, e continuar diminuindo com o tempo. Isso só é possível graças a elevada eficiência quântica dos detectores em relação ao olho humano. Se os dispositivos permitissem aumentar o tempo de exposição seria possível observar objetos ainda menos brilhantes, talvez até superando a sensibilidade do olho humano.

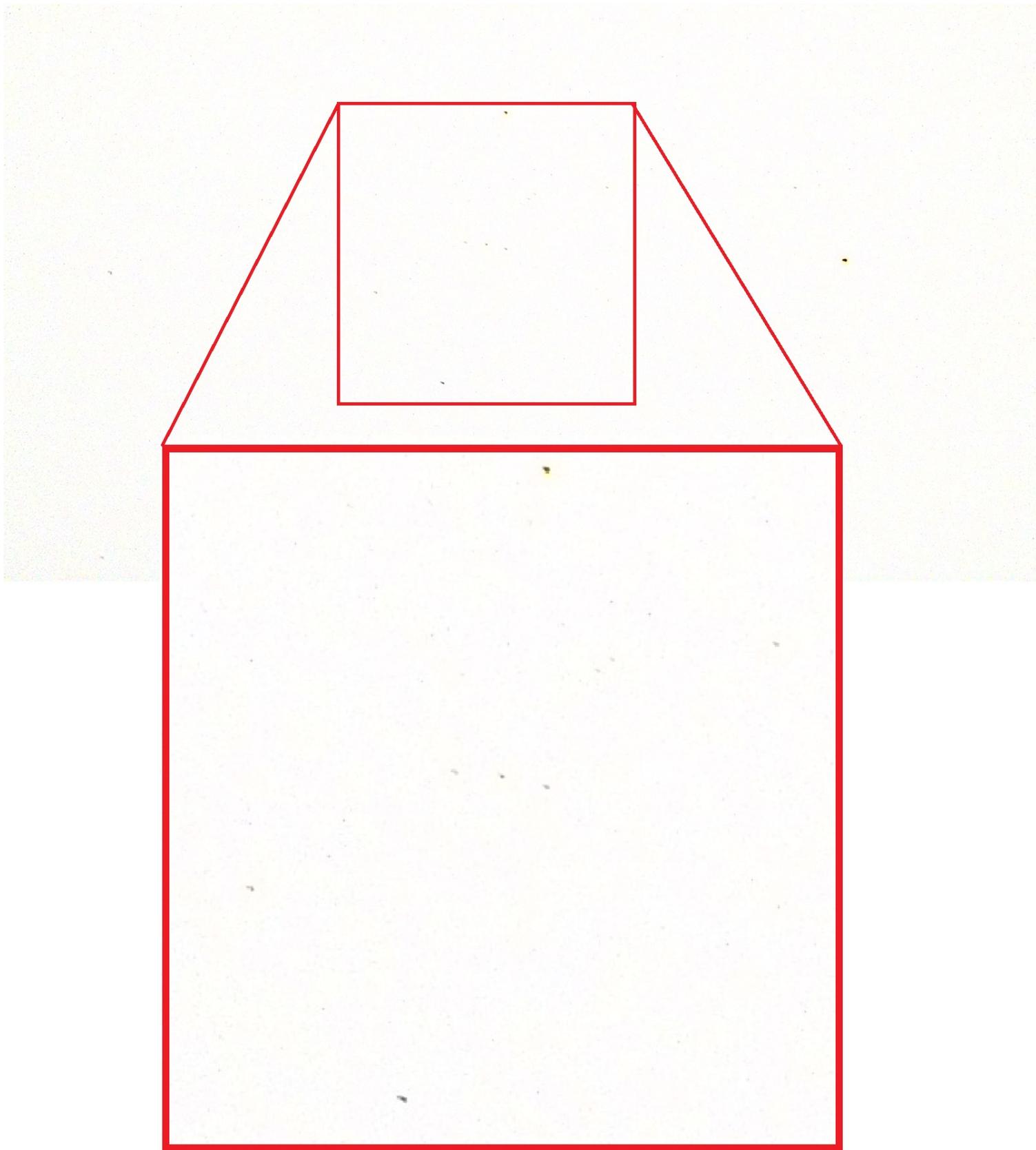


Fig. 16: Negativo da foto obtida com o Zenfone 4. Fonte: Elaborada pelo próprio autor.



Fig. 17: Foto obtida com Zenfone 4, com ajuste de brilho. Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Tabela 1: Objetos identificados e suas respectivas magnitudes.

Objeto	Magnitude Aparente (com extinção atmosférica)	Visível Samsung Galaxy S3	Magnitude Aparente (com extinção atmosférica)	Visível Asus Zenfone 4
Sirius	-1,07	X	-1,27	X
Rigel	0,37	X	0,3	X
Betelgeuse	0,86	X	0,64	X
Bellatrix	1,91	X ¹	1,78	X
Alnilam			1,82	X
Alnitak			2,02	X
Mirzam			2,11	X
Saiph			2,21	X
Mintaka			2,57	X
Hatsya			2,91	X
n5 Ori - HIP 22797			3,86	X
γ Mon - HIP 29651			4,12	X
HIP 29417			5,22	X

¹ - Apenas com pós-processamento da imagem.

Percentage magnitude distributions 2002 November 18-19

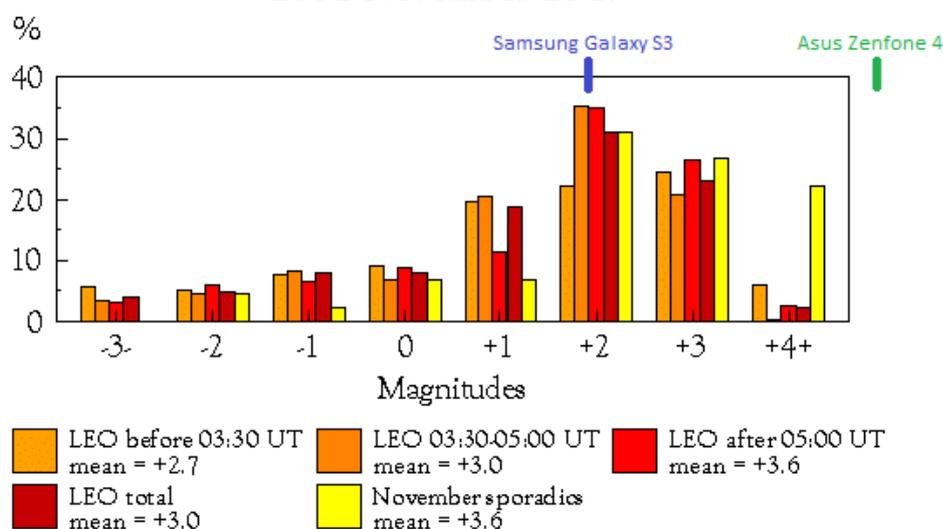


Fig. 18: Magnitude aparente de meteoros da chuva dos Leonídeos. Fonte: Society for Popular Astronomy, 2002, disponível em: www.popastro.com/meteor/reports/report.php?id_secRep=27

O teste demonstra que é possível obter imagens de estrelas e meteoros utilizando estes modelos de *Smartphones*. Alguns dispositivos, como o Asus Zenfone 4, são capazes de registrar todos os eventos listados na Fig.16.

5.3 Obtenção de coordenadas astronômicas

5.3.1 Limitações e adaptações

Idealmente se buscou um método que pudesse identificar as coordenadas dos eventos ocorridos individualmente, mas a partir de testes utilizando um método simples de comparação pixel a pixel a ideia se mostrou imprática. Análises pixel a pixel aumentam drasticamente o tempo de análise, como já comentado anteriormente. Até mesmo em baixas resoluções, a implementação de poucas operações pixel a pixel são o suficiente para aumentar para 1500 ms o tempo de aquisição e processamento das imagens, dependendo da resolução. Como alguns dispositivos, dentre aqueles que oferecem o controle, oferecem até 1 s de tempo de exposição, a implementação de tal método iria limitar ainda mais a quantidade de dispositivos capazes de realizar um monitoramento eficiente. Se optou então por um método que gerasse uma equação de conversão de pixels para coordenadas astronômicas.

O novo método se baseia na parametrização da equação para o azimute A e para a altura h :

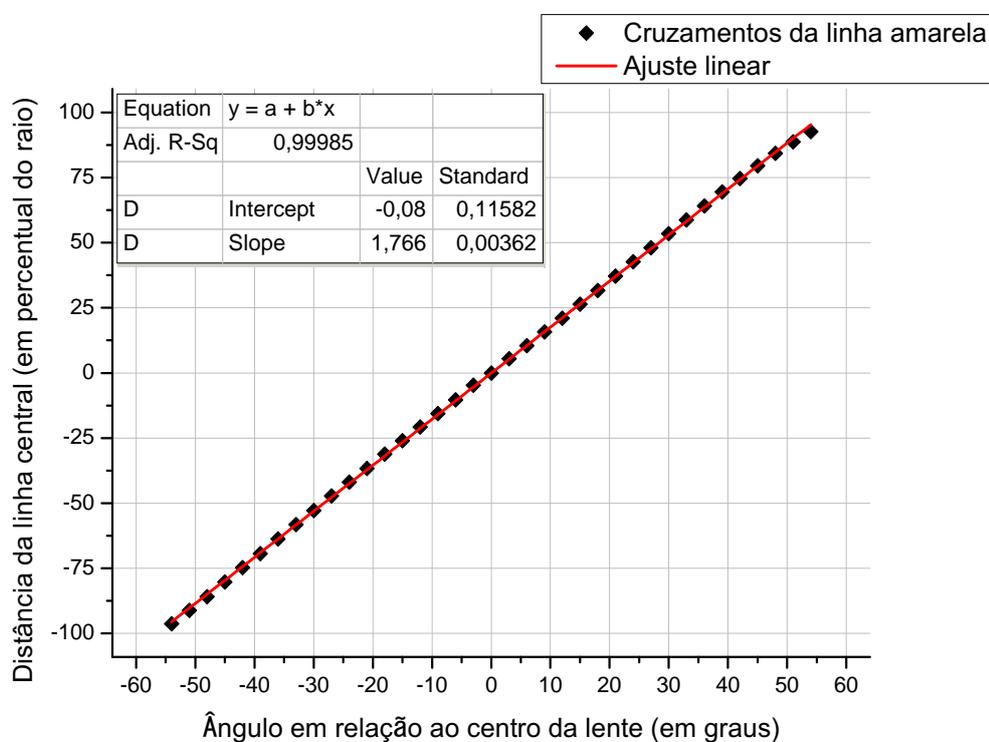
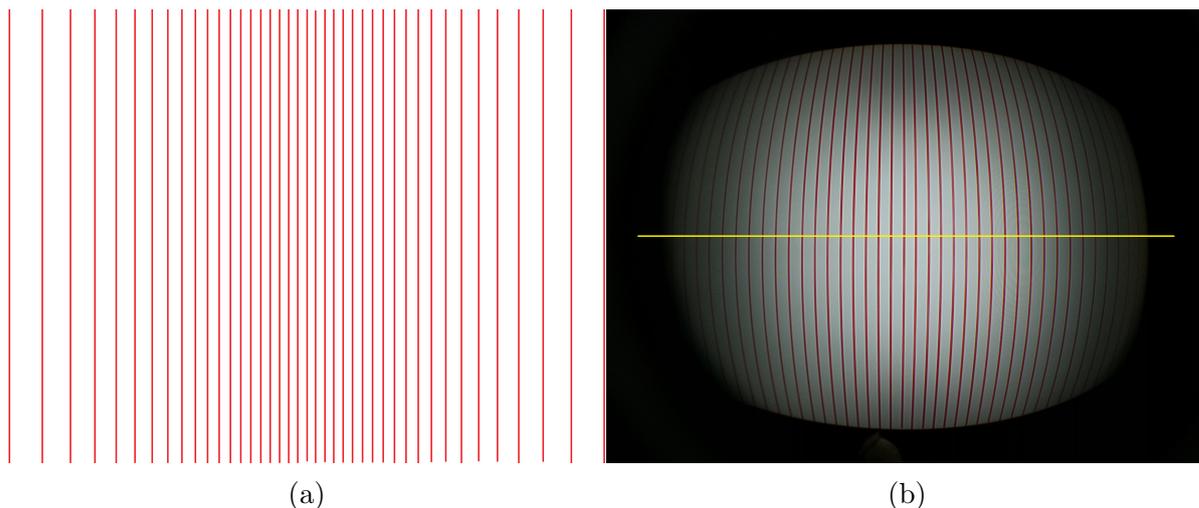
$$A = A_0 + \theta_H \cdot \cos(\phi) \left(\frac{x}{R_x} - \frac{1}{2} \right) - \theta_V \cdot \sin(\phi) \left(\frac{y}{R_y} - \frac{1}{2} \right)$$

$$h = h_0 + \theta_V \cdot \cos(\phi) \left(\frac{y}{R_y} - \frac{1}{2} \right) + \theta_H \cdot \sin(\phi) \left(\frac{x}{R_x} - \frac{1}{2} \right)$$

,onde A_0 e h_0 são as coordenadas do pixel central, θ_H e θ_V são as aberturas angulares horizontal e vertical acessíveis via código, R_x e R_y a resolução da imagem, e ϕ é o ângulo de rotação em relação ao eixo z do sistema de coordenadas do dispositivo. Para $h > \frac{\pi}{2}$ considerar $h' = \pi - h$.

5.3.2 Integração de lentes

Para obter as coordenadas considerando o uso de lentes, é necessário entender o comportamento delas. Dado o interesse do projeto foi estudada somente as lentes de Maxwell. O estudo consistiu em determinar se a linearidade na variação do ângulo em função dos pixels na imagem se mantém com a lente. Para tanto foi elaborado um teste utilizando a imagem da Figura 19 (a), que marca o ângulo em relação ao centro da imagem para uma distância fixa de 20 cm, onde cada linha representa tres graus



(c)

Fig. 19: Estudo do comportamento de lentes de Maxwell. Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

em relação a anterior. Uma foto foi obtida da imagem utilizando um *Samsung Galaxy S3* com uma lente de Maxwell de 110° de abertura, posicionado a exatamente 20 cm de distância. A figura 19 (b) mostra a foto obtida. A reta em amarelo é a referência, com os cruzamentos entre ela e as retas vermelhas representando os pontos considerados no estudo. Foi utilizada essa referência por possuir dimensão maior, e como a lente é simétrica, basta analisar em uma direção para estabelecer o comportamento radial. A

Figura 19 (c) mostra como o ângulo se comporta em relação aos pixels na imagem. Nela pode-se observar um comportamento claramente linear, salientado pelo ajuste mostrado.

Tendo em vista tal comportamento da lente, podemos portanto fazer uma parametrização linear das equações para o uso de lentes. Nesse caso temos não somente a alteração da abertura angular que a imagem representa, como também o deslocamento das coordenadas de referência, que passam do pixel central para o centro do círculo que descreve a posição da lente na imagem. Além disso, a abertura angular não é mais referente a todos os pixels da resolução, e sim referentes ao raio do círculo que representa a lente. Dessa forma temos um novo conjunto de equações para as coordenadas horizontais:

$$A = A_0 + \frac{\theta'_H}{2r} \cdot \cos(\phi) \left(\frac{L_x}{R_x} x - x_c \right) - \frac{\theta'_V}{2r} \cdot \sin(\phi) \left(\frac{L_y}{R_y} y - y_c \right)$$

$$h = h_0 + \frac{\theta'_V}{2r} \cdot \cos(\phi) \left(\frac{L_y}{R_y} y - y_c \right) + \frac{\theta'_H}{2r} \cdot \sin(\phi) \left(\frac{L_x}{R_x} x - x_c \right)$$

, onde A_0 e h_0 são as coordenadas do pixel central, θ'_H e θ'_V são as aberturas angulares horizontal e vertical da lente definidas pelo usuário, R_x e R_y a resolução da imagem, L_x e L_y as dimensões da imagem na interface do usuário, r o raio do círculo que define a lente na interface, x_c e y_c a posição na interface do centro do círculo e ϕ é o ângulo de rotação em relação ao eixo z do sistema de coordenadas do dispositivo. Para $h > \frac{\pi}{2}$ considerar $h' = \pi - h$.

As equações parametrizadas são escritas em arquivo de texto com nome idêntico a da imagem, para que o usuário possa calcular as coordenadas do pixel desejado.

A conversão das coordenadas horizontais para equatoriais envolve muitos cálculos, por isso uma equação análoga às mostradas para coordenadas equatoriais ficaria excessivamente longa e imprática de se utilizar. Além disso, as coordenadas equatoriais podem ser convertidas das coordenadas horizontais utilizando scripts facilmente encontrados na internet. Por esses motivos o aplicativo apenas guarda a latitude e longitude no arquivo de texto com as informações de cada evento. Assim, o usuário que necessitar das coordenadas equatoriais pode realizar a conversão a partir das coordenadas horizontais calculadas.

5.3.3 Teste de campo

Foi feito um teste para determinação das coordenadas astronômicas com o Galaxy S3, obtendo cinco imagens da Lua com resolução de 640x480, utilizando uma diferente orientações do dispositivo para cada. As imagens são mostradas na Fig. 19 junto às informações da Lua geradas pelo *Stellarium*. As equações geradas para cada imagem, assim como o pixel central da Lua na imagem e as coordenadas calculadas são apresentadas na Tabela 2 e Tabela 3.

Tabela 2: Azimute calculado da Lua

Imagem	Lua X	Lua Y	Equação para o Azimute	Azimute
(a)	245	245	$70,24 + 62,98*(x/640 - 1/2) - 1,21*(y/480 - 1/2)$	62°50'
(b)	141	113	$71,47 + 51,62*(x/640 - 1/2) - 28,26*(y/480 - 1/2)$	64°30'
(c)	475	152	$71,28 - 53,74*(x/640 - 1/2) - 25,73*(y/480 - 1/2)$	62°59'
(d)	124	404	$73,92 + 46,56*(x/640 - 1/2) + 33,22*(y/480 - 1/2)$	71°00'
(e)	463	370	$53,07 - 54,84*(x/640 - 1/2) - 24,27*(y/480 - 1/2)$	34°15'
Stellarium				69°47'

Tabela 3: Altura calculada da Lua

Imagem	Lua X	Lua Y	Equação para a Altura	Altura
(a)	245	245	$16,59 - 1,55*(x/640 - 1/2) - 49,28*(y/480 - 1/2)$	16°15'
(b)	141	113	$1,19 - 36,11*(x/640 - 1/2) - 40,40*(y/480 - 1/2)$	21°59'
(c)	475	152	$3,82 - 32,88*(x/640 - 1/2) + 42,05*(y/480 - 1/2)$	-11°51'
(d)	124	404	$0,29 + 42,44*(x/640 - 1/2) - 36,43*(y/480 - 1/2)$	-25°09'
(e)	463	370	$16,80 - 31,02*(x/640 - 1/2) + 42,91*(y/480 - 1/2)$	21°29'
Stellarium				23°39'

Quatro dos cinco azimutes resultaram num valor próximo ao do *Stellarium*, e tres das cinco alturas também. Os valores dissonantes são devido a grande flutuação apresentada pelos detectores do dispositivo, que mesmo com o dispositivo imóvel chegam a variar até 40° por alguns instantes. Esse comportamento é mais frequente conforme o dispositivo aquece, e já seria razão suficiente para não determinar coordenadas específicas de eventos, pois haveriam frequentes erros nas medidas. Por não ser um instrumento de precisão, o mais prudente é determinar como as coordenadas se comportam na imagem em função dos pixels. Dessa forma uma análise da imagem pode corrigir as equações, uma vez que as únicas reais variáveis das equações são os valores centrais, que podem ser determinados utilizando o pixel e as coordenadas de um objeto conhecido na imagem.

O fato dos maiores erros terem acontecido para imagens diferentes indica que o erro não vem da parametrização, ainda mais por reproduzir as características observadas em leitura direta dos sensores, que perdem a calibração facilmente. Outros dispositivos

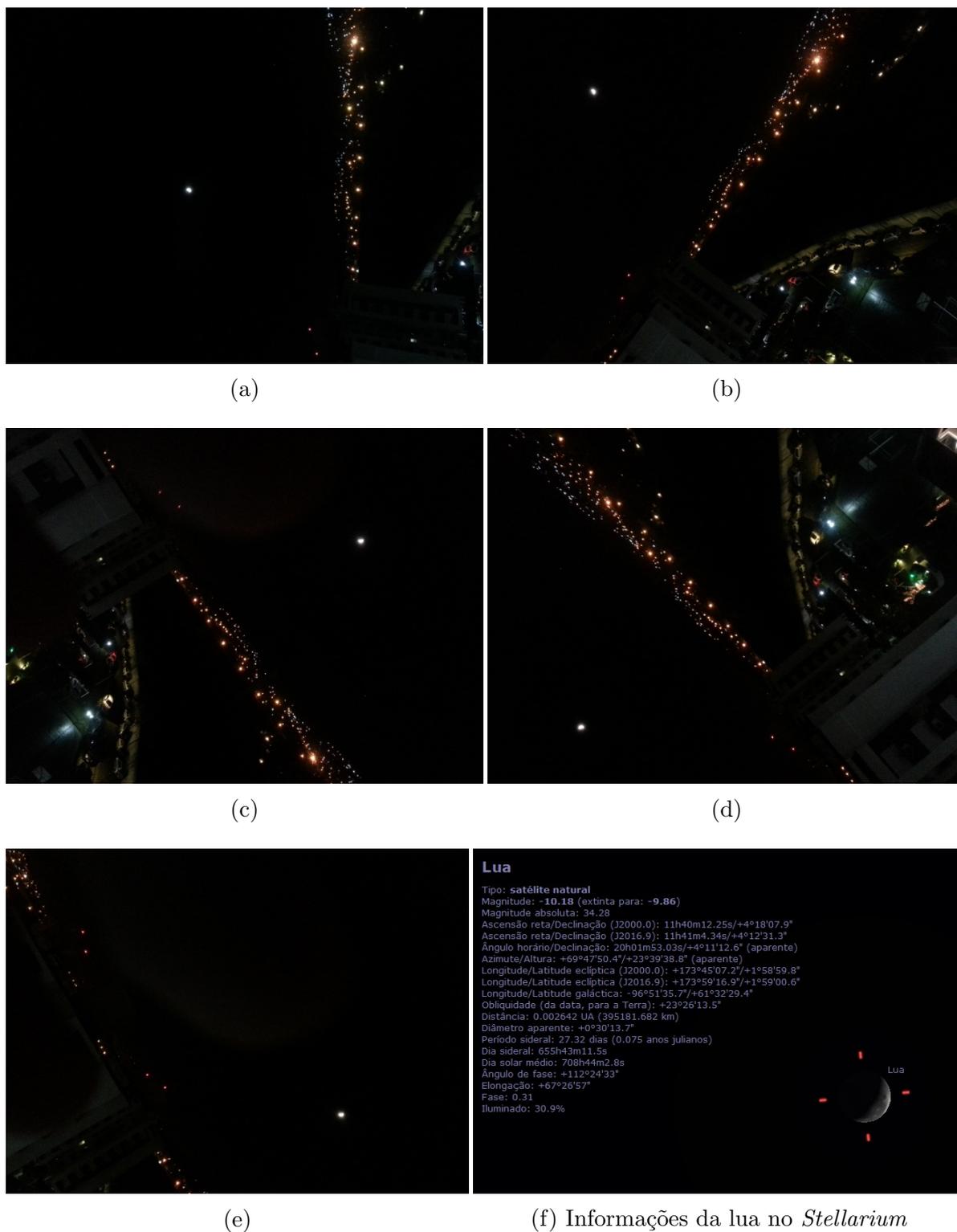


Fig. 20: Imagens obtidas para o teste, com a Lua em diferentes posições. Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

podem apresentar resultados melhores por possuir sensores melhores, e também devemos considerar a possibilidade de defeito no sensor do dispositivo testado.

Mesmo com a variabilidade, as coordenadas ficaram relativamente imprecisas, podendo ser utilizadas para primeiras aproximações apenas. Para efeitos de triangulação, o uso de várias estações diminuiria drasticamente o erro, pois a precisão na triangulação depende mais da quantidade de pontos de referência do que da precisão individual de cada um.

Considerando todos esses fatores, e comparando os valores obtidos com as coordenadas indicadas pelo programa *Stellarium*, podemos então validar as equações e o método de parametrização para obtenção das coordenadas.

5.4 Teste de seleção de eventos

Foi realizado em ambiente controlado um teste para avaliar a eficácia da análise de médias como critério de identificação de eventos. O teste foi feito em ambiente escuro com LEDs verdes acesos para simular o brilho de estrelas. O aplicativo foi configurado nas condições de maior sensibilidade. Foi selecionado 4 vezes o erro padrão como critério de seleção e o aplicativo foi iniciado com período de captura de 500 ms, permanecendo em operação sem nenhuma intervenção por cinco minutos. Após isso foi introduzido no campo da imagem um novo LED, de cor azul representando um evento luminoso. Após alguns instantes o LED foi removido. O aplicativo continuou em operação por mais cinco minutos sem nenhuma intervenção. A verificação da pasta destino das imagens selecionadas revelou que apenas duas imagens foram selecionadas, ambas mostrando o LED azul. Suas médias eram 4,4 e 5,1 erros padrão maiores do que a média do ambiente. Essas imagens são mostradas nas Fig. 20 e Fig. 21. A última imagem guardada no *Buffer* revela o ambiente de testes sem eventos e é mostrada na Fig. 22. O teste demonstra que é possível monitorar um local por longos períodos e através da comparação das médias guardar apenas imagens de interesse.

5.5 Estado atual do aplicativo

A Fig. 23 mostra a interface gráfica do aplicativo, denominado LUMENS, em sua versão mais recente. Acima está o *Preview* da câmera. As coordenadas do pixel central são indicadas no lado inferior esquerdo e são atualizadas a cada 200 ms, para auxiliar no posicionamento. Quando o usuário iniciar a operação de captura de imagens essas atualizações são paralizadas. Acima disso são mostradas a latitude e longitude obtidas pelo GPS, que são atualizadas a cada 500 ms caso os valores mudem.



Fig. 21: Imagem selecionada como evento no teste. Fonte: Elaborada pelo próprio autor.



Fig. 22: Imagem selecionada como evento no teste. Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Existem duas caixas de marcar na interface que permitem respectivamente que o usuário indique se está usando lentes, e se deseja comparar o desvio padrão das distribuições como critério de seleção de eventos.

No menu padrão que o sistema operacional oferece estão todas as opções de configuração. Caso o usuário marque o uso de lentes, deverá inserir as aberturas angulares da lente através da opção incluída no menu.

O aplicativo possui em sua interface um botão para ativar e desativar a captura periódica de imagens. Quando ativado, o aplicativo inicia a captura periódica e



Fig. 23: Imagem do local de teste sem eventos retirada do *Buffer*. Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

comparação de imagens, utilizando as configurações estabelecidas pelo usuário.

O usuário tem a possibilidade de definir o período de captura, o número de desvios padrões que a média deve exceder para a seleção, assim como o desvio, o nome da estação, abertura angular da lente, e todas as configurações de câmera permitidas pelo fabricante.

5.5.1 Consumo de energia

Durante os testes se observou também um consumo de energia relativamente grande com o uso do aplicativo, sendo estimado para os dispositivos testados um tempo de bateria quando em execução contínua menor que oito horas. Com algumas estimativas se concluiu que a alimentação da estação por painéis solares não seria prática. Se conectados à rede elétrica enquanto executam o aplicativo, os dispositivos testados carregam completamente entre tres e quatro horas.

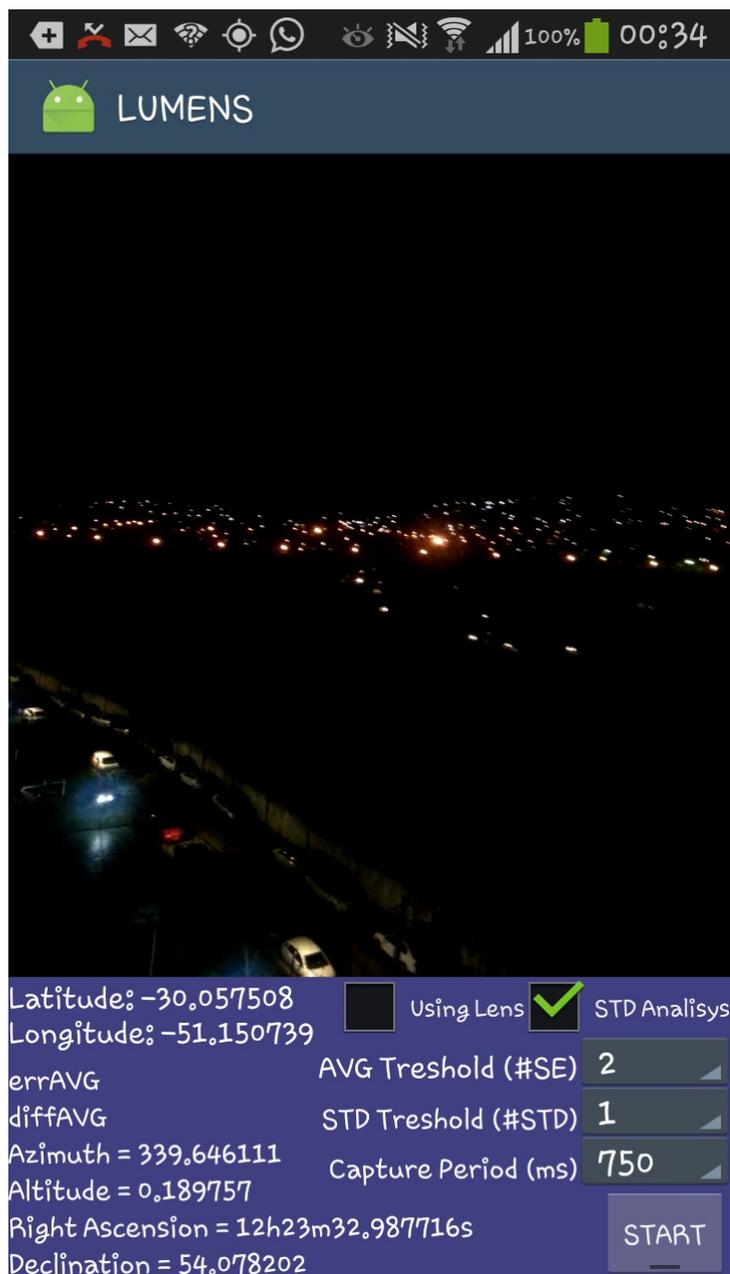


Fig. 24: *Screenshot* do aplicativo. Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

6 CONCLUSÕES

Testes de sensibilidade mostraram que as câmeras de *Smartphone* variam muito para cada dispositivo, mas que em geral seriam capazes de registrar os meteoros mais brilhantes. Alguns teriam a capacidade de registrar mesmo os eventos de menor brilho, com sensibilidade próxima a do olho humano. E com um controle do tempo de exposição, é esperado que sejam capazes de registrar eventos de baixíssimo brilho.

Em ambiente controlado foi possível demonstrar a eficácia de um algoritmo

baseado na análise de médias na filtragem de imagens. Tal resultado mostra que é possível monitorar uma região por longos períodos e manter apenas as imagens de interesse. A desvantagem do método é que sua sensibilidade depende do nível de iluminação do ambiente, uma vez que a média é menos deslocada pela presença de eventos. Para o monitoramento de meteoros é um método apropriado pois o ambiente em questão é o céu noturno, cuja média de contagens tende a ser muito baixa, mesmo com parâmetros de sensibilidade máxima, e portanto tem uma grande variação quando ocorre um evento luminoso. Essa característica de depender do ambiente requer que o usuário defina o nível de tolerância ao redor média, para que possa se adaptar a diferentes condições de iluminação. Conseqüentemente, imagens sem eventos começariam a ser selecionadas, diminuindo a eficiência do método. Outra característica do ambiente escuro é a estabilidade das médias, tornando a comparação pelo erro calculado mais confiável.

As maiores limitações encontradas foram de performance, devido a arquitetura do sistema operacional. A limitação do uso de memória de acesso aleatório levou a um sistema indireto do processamento de imagens, que o torna lento, exigindo um maior tempo de exposição das câmeras para a aplicação. Nenhum dos dispositivos testados oferece controle desse parâmetro, e se compararmos seus tempos de exposição com o tempo mínimo de aquisição de imagens fica evidente que eles só são capazes de realizar um monitoramento intermitente e ineficiente. Só seria possível para os dispositivos gerar imagens em alta frequência em modo vídeo. Mas o monitoramento por vídeo não é viável pelo volume de dados gerado, além de possuir a mesma inabilidade de se processar os arquivos enquanto são gerados.

A diferença entre o tempo de exposição e o tempo para gerar e analisar imagens é grande o suficiente para concluir que somente os dispositivos que permitem o controle do tempo de exposição poderiam funcionar como estação de monitoramento. Por mais que existam diferenças entre modelos de *Smartphone*, a capacidade de processamento é muito semelhante entre eles, e as limitações impostas pelo sistema operacional são as mesmas. Também não é esperado que o tempo de exposição dos dispositivos sem controle seja longo, pois para aplicações do dia a dia geraria imagens borradas. Por esse motivo o aplicativo foi desenvolvido de forma a minimizar o processamento de dados, diminuindo assim o tempo de exposição mínimo necessário para monitorar continuamente.

Dentre os dispositivos no mercado que oferecem o controle do tempo de exposição, é muito comum encontrar modelos com exposição máxima de um segundo. Esses modelos podem ser considerados como capazes de realizar um monitoramento permanente, baseando-se no tempo que o aplicativo necessita para realizar todos os

processamentos nos modelos testados. Os testes demonstram que seria viável o uso de *Smartphones* como estação de monitoramento, mas não com os dispositivos testados. Atualmente são poucos os dispositivos que fariam bom uso do aplicativo, mas acredita-se que no futuro essa situação vá mudar. Pelo momento, é possível que se possa iniciar uma prática de monitoramento coletivo, mesmo com poucos usuários. Essa prática pode expandir e se desenvolver juntamente com os avanços nos dispositivos, possivelmente tornando-se popular a longo prazo.

6.1 Modelo de estação de monitoramento

Tendo em vista os resultados obtidos, uma estação de monitoramento que seja eficaz e eficiente utilizaria um *Smartphone* com controle do tempo de exposição, fisicamente estabilizado por um suporte como um tripé ou uma haste fixa. Em frente a câmera uma lente de Maxwell. O uso de um domo protetor é recomendado para os modelos de *Smartphone* que não são à prova d'água.

Com os resultados do consumo de energia, o ideal para a estação seria um sistema de carregamento intermitente, conectando na rede elétrica conforme a necessidade e desconectando da rede quando estiver completamente carregado. Fabricantes de *Smartphones* em geral não recomendam que os dispositivos se mantenham conectados na rede depois de carregados, pelo risco de danos ao dispositivo e ao desperdício de energia.

7 PERSPECTIVAS

Embora originalmente o aplicativo tenha sido projetado visando o monitoramento de meteoros aleatórios, seu uso não se restringe a este tipo de observação, nem mesmo às observações noturnas. Como o aplicativo foi distribuído em código aberto, pequenas modificações para adaptar o código às diferentes usos podem ser feitas caso necessárias.

7.1 Possibilidades de usos do aplicativo

- Observação de chuva de meteoros: Perseidas, Leônidas, Eta Aquaridas, Oriônidas e Geminidas. Estes eventos ocorrem em épocas específicas do ano, tendo diferentes pontos de origem (radiantes) no céu, sendo portanto previsíveis.
- Observação solar: A atividade solar pode ser medida em termos do número, tamanho e padrão da distribuição das manchas na superfície (fotosfera) do Sol. As manchas solares são resultantes da interação do campo magnético com a rotação diferencial do Sol, especialmente da camada convectiva mais externa. Além do monitoramento da atividade solar, a observação sistemática das manchas solares oferece um meio de observar e medir a rotação diferencial do Sol. Esta aplicação tem um grande potencial de uso em atividades de ensino de astronomia. Esse tipo de observação só é possível com o auxílio de um filtro adequado, pois devido ao alto fluxo luminoso, sem o uso de filtro, os pixels da câmera podem ser permanentemente danificados. Filtros limitam o fluxo da luz passante, tanto em intensidade, quanto em comprimento de onda.
- Observação de trânsitos de Vênus e Mercúrio (com acoplamento a um pequeno telescópio).
- Imageamento da posição de planetas brilhantes (Mercúrio, Vênus, Jupiter e Saturno) no céu, assim como a formação de “alinhamentos”.
- Imageamento de eclipses solares e de eclipses lunares.
- Imageamento da Lua.
- Uso geral em Astrofotografia.

- Produção de analemas, baseados na posição do Sol em uma dada hora de cada dia do ano.
- Observação de núvens e fenômenos meteorológicos, incluindo raios e relâmpagos.
- Registro da dinâmica de paisagens.
- Registro de auroras polares.
- Medida da poluição luminosa noturna.
- etc.

7.2 Sugestões para futuros projetos

Com a melhoria contínua da qualidade dos *Smartphones*, e com sua produção e venda deles ainda crescente, os dispositivos capazes de fazer um monitoramento contínuo se tornarão mais acessíveis. Com isso o aplicativo poderá ser utilizado em todo seu potencial. Existem modificações no código fonte que poderão ser vantajosas no futuro, como o uso do pacote de controle de câmera ”*Camera 2*”, que somente é compatível com dispositivos de última geração (*API 23*). A criação de uma versão alternativa do programa nesse caso é mais apropriada, sem substituir a versão atual. Assim os dispositivos mais antigos não são excluídos da lista de compatibilidade. O novo pacote foi criado para tornar o controle das configurações de câmera mais prático e independente de códigos e variáveis definidas por fabricantes, que costumam variar de forma, gerando alguns problemas de compatibilidade.

Como o aplicativo possibilita muitos usos diferentes possíveis, é sugerido também que se crie outras versões do aplicativo, específicas e especializadas para outros usos, uma vez que foi desenvolvido e otimizado para o monitoramento de meteoros.

Para o monitoramento de meteoros, o próximo passo seria criar um servidor central onde as imagens geradas por diferentes estações possam ser armazenadas e analisadas. Dessa forma pode-se aproveitar melhor as vantagens de se utilizar diversas estações em locais diferentes e de proprietários diferentes, além de uma melhor organização no posicionamento das estações.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 MÜLLER, M. V. W. W. *Meteor Monitor* Disponível em:
<https://github.com/matmuller/MeteorMonitor>.
- 2 CHROMEY, F. R. *To Measure the Sky: An introduction to observational astronomy*. Cambridge: Cambridge University Press. 2010.
- 3 LÉNA, P.; ROUAN, D.; LEBRUN, F.; MIGNARD, F.; PELAT, D. *Observational Astrophysics*. New York: Springer Heidelberg Dordrecht London. 2012
- 4 BROWN, P.; JONES, J.; WERYK, R. J.; BROWN, M. D. C. *The Velocity Distribution of meteoroids at the earth as measured by the canadian meteor orbit radar (CMOR)*. Ontario: University of Western Ontario. Earth, Moon and Planets. 2004
- 5 BINDI, L.; EILER, J. M.; GUAN, Y.; HOLLISTER, L. S.; MACPHERSON, G.; STEINHARDT, P. J.; YAO, N. *Evidence for the extraterrestrial origin of a natural quasicrystal*. [S. l.]: [s.n]. 2012. 1396-1401p. PNAS 2012 109.
- 6 FERROIR, T.; DUBROVINSKY, L.; GORESY, A. E.; SIMIONOVICI, A.; NAKAMURA, T.; GILLET, P. *Carbon polymorphism in shocked meteorites: Evidence for new natural ultrahard phases*. [S. l.]. Earth and Planetary Science Letters. Volume 290. Ed 1–2. 2010. 150-154p. ISSN 0012-821X.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.epsl.2009.12.015>. Disponível em:
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0012821X09007389>
- 7 ORACLE CORPORATION. *Android studio*. , 2015. Disponível em:
<http://https://developer.android.com/studio/index.html>. Acesso em: 10 oct. 2016.
- 8 LEITE¹, E. V. C.; ALVES¹, G. O.; SEIXAS¹, J. M.; MARROQUIM², F.; VIANNA², C. S.; TAKAI³, H. *Radar Meteor Detection: Concept, Data Acquisition and Online Triggering*. Rio de Janeiro: [s.n]. ¹ Federal University of Rio de Janeiro/Signal Processing Laboratory/COPPE-Poli ² Federal University of Rio de Janeiro/Physics Institute ³ Brookhaven National Laboratory. [20–?]. Disponível em:
<http://cdn.intechopen.com/pdfs-wm/14177.pdf>
- 9 MORGAN, D. *Detection & Analysis of Meteors by RADAR*. [S. l.]. British Astronomical Association - Radio Astronomy Group. [20–?]. Disponível em:
http://www.britastro.org/radio/projects/Detection_of_meteors_by_RADAR.pdf

- 10 BADADZHANOV, P. B.; KOKHIROVA, G. I. *Densities and porosities of meteoroids*. [S. l.]. A&A 495. 2009. 353–358p. DOI: 10.1051/0004-6361:200810460
- 11 ALL ABOUT CIRCUITS. *Slope (integrating) ADC*. [S. l.]: [s.n.]. Capítulo 13 (Digital-Analog Conversion). [20–]. Disponível em:
<<http://www.allaboutcircuits.com/textbook/digital/chpt-13/slope-integrating-adc/>>
- 12 HOTINE, M. *A Primer of Non-Classical Geodesy*. Veneza: Springer-Verlag Berlin Heidelberg (1991). 1959. Disponível em:
<http://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-642-76496-7_6#page-1>
- 13 THE CAMBRIDGE AND DUBLIN MATHEMATICAL JOURNAL. *Solutions of problems*. Cambridge: [s.n.]. 1854. (prob. 3, vol. VIII). 188p. (Macmillan) 9:9–11.1854.