

ALGORITMO DE CÁLCULO DO NÚMERO DE FÓTONS DETECTADOS POR UMA CÂMERA DEDICADA A OBSERVAÇÕES ASTRONÔMICAS FOTOMÉTRICAS EM SATÉLITES: APLICAÇÃO A UM SENSOR ESTELAR

THIAGO M. DI GENNARO, FÁBIO DE O. FIALHO

Laboratório de Automação e Controle (LAC), Departamento de Telecomunicações e Controle (PTC), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP)

AV. PROF. LUCIANO GUALBERTO, TRAVESSA 3, Nº 380, CIDADE UNIVERSITÁRIA – CEP05508-010 – SÃO PAULO - SP

E-MAILS: THIAGO.GENNARO@USP.BR, FABIO.FIALHO@USP.BR

Abstract— Many satellites have an Attitude and Orbit Control System (AOCS) whose main function is to control, respectively, satellite orientation and position, which is done in the presence of internal and external disturbances. The SCAO depends on sensors to operate. However, three-axis high performance control can only be achieved by means of star trackers, which require many computational tools for their designing and developing. Some of them depend on the precise knowledge of the relationship between stellar brightness and the number of photons acquired by the photoelectric detector presented in the star tracker. This article presents the algorithm for calculating the number of photons taking into account physical characteristics of the observed stars and constructive aspects of the star tracker. The results are validated using on-orbit data from the French-led satellite with European and Brazilian participation CoRoT (Convection, Rotation and planetary Transits), French Space Agency (CNES).

Keywords— Attitude and Orbit Control System (AOCS), star tracker, Atlas9 models, stellar photometry, number of photons estimation.

Resumo— Muitos satélites possuem um sistema de controle de atitude e órbita (SCAO) que tem por principais funções controlar, respectivamente, a orientação e a posição dos mesmos em presença de distúrbios internos e externos. O SCAO depende, entre outros, de sensores para operar. Entretanto, o controle com alto desempenho dos 3 eixos de rotação de satélites só pode ser efetuado com a utilização de sensores estelares. Para que estes últimos possam ser projetados e desenvolvidos são necessárias diversas ferramentas computacionais. Algumas delas dependem do conhecimento preciso da relação entre luminosidade estelar e quantidade de fótons adquiridos pelo detector fotoelétrico presente no sensor estelar. Este artigo apresenta o algoritmo de cálculo do número de fótons levando-se em conta aspectos físicos das estrelas observadas e construtivos do sensor estelar utilizado. Os resultados são validados com os dados de voo do satélite franco-europeu com participação brasileira CoRoT (Convection, Rotation and planetary Transits) da Agência Espacial Francesa (CNES).

Palavras-chave— sistema de controle de atitude e órbita (SCAO), sensor estelar, modelos de fluxos estelares do Atlas9, fotometria estelar, cálculo do número de fótons.

1 Introdução

Em maio de 2012, o governo federal aprovou pela portaria Nº224/GC3 o Programa Estratégico de Sistemas Espaciais (PESE), elaborado pelo Ministério da Defesa, através do Comando da Aeronáutica. Seu conteúdo versa sobre os anseios das três forças para as próximas décadas em termos de satélites e suas funcionalidades aplicados à defesa do território nacional.

De modo a cobrir as diferentes demandas, o País precisará desenvolver diferentes tecnologias críticas. Uma das tecnologias ainda não dominadas pelo Brasil é o Sistema de Controle de Atitude e Órbita (SCAO), que tem por principal função controlar, respectivamente, a orientação e a posição do satélite em presença de distúrbios internos e externos, para que possa executar a missão para a qual foi projetado.

O controle de atitude é executado em malha fechada, através de um conjunto de sensores e atuadores, que são acionados por diferentes configurações de malhas de controle em função da precisão de apontamento exigida e da etapa de operação da missão.

Dentre os sensores de orientação, por possuir elevada precisão, destaca-se o sensor estelar autônomo, único

sensor que possibilita alcançar os requisitos estabelecidos pelo PESE, para diversos tipos de satélites. Trata-se, então, de tecnologia necessária ao desenvolvimento de um sistema de controle de atitude nacional.

Um sensor estelar autônomo é um dispositivo optoeletrônico que determina de forma autônoma a orientação de um satélite. Para tanto, executa observações estelares e as registra em forma de imagens, comparando-as, em seguida, a um catálogo estelar embarcado, permitindo assim, a determinação da posição angular do engenho nos seus três eixos de rotação. As imagens das estrelas observadas no campo de visada ("Field of View" - FoV) do telescópio do sensor são provenientes de uma matriz fotossensível, o detector. Um sistema eletrônico as digitaliza e a partir delas realiza o cálculo dos baricentros das estrelas para a determinação da linha de visada do sensor.

É fundamental modelar, então, a quantidade de fótons que o detector recebe de cada estrela observada para o adequado dimensionamento dos sistemas óptico e de detecção e de diversos outros simuladores e algoritmos do sensor estelar.

Este artigo descreve o método desenvolvido para o cálculo do número de fótons adquiridos por um sensor

estelar em função de seus parâmetros construtivos e tipos de estrelas observadas. Ele se baseia em método utilizado na missão espacial franco-europeu com participação brasileira CoRoT (Convexion, Rotation and planetary Transits) da Agência Espacial Francesa (CNES) (M. Auvergne, 2008).

O método independe da aplicação da câmera e pode ser utilizado por diferentes cargas úteis de missões espaciais de observação astronômica sem nenhuma relação com determinação de atitude.

A seção 2 apresenta o processo de formação da imagem no detector do sensor estelar. A seção 3 apresenta o método de cálculo do número de fótons. A seção 4 apresenta os resultados de simulação baseados nos parâmetros de construção da câmera fotométrica do satélite CoRoT. A seção 5 apresenta a estimativa do desvio padrão do método do cálculo do número de fótons. A seção 6 mostra a validação com dados de voo da missão CoRoT. E, por fim, a seção 7 apresenta as conclusões.

2 O processo de formação da mancha imagem sobre o detector

Esta seção descreve o processo de formação de uma mancha imagem, nome que dá-se à imagem formada pela função de espalhamento de ponto (PSF ou "Point Spread Function") discretizada sobre o detector, e os subsistemas de uma câmera envolvidos nesse processo.

Para a estimativa da quantidade de fótons recebidos é necessário levar em conta alguns mecanismos envolvidos no processo, como por exemplo, efeitos ligados às características físico-químicas das estrelas, ao sistema ótico do sensor, e à eficiência quântica do detector.

A luz emitida por uma estrela apresenta uma distribuição de energia que varia com o comprimento de onda. Esta distribuição de energia pode ser modelada através de parâmetros dependentes de sua constituição. Integrando-se esta energia em todo o espectro, pode-se determinar a quantidade de fótons que a estrela emite.

A imagem formada no plano focal do sensor estelar é dependente de sua ótica, que pode ser modelada pela área coletora de fótons (a abertura do instrumento), e seu coeficiente de transmissão ótica, sendo este último uma curva da relação da quantidade de luz incidente na ótica $I_0(\lambda)$ pela quantidade de luz $I(\lambda)$ que atinge o detector (Lipson, S. G.; Lipson, H. and Tannhauser, D. S., 1995). Ela indica o quanto do feixe de luz de uma estrela irá passar sem que este seja refletido em função do comprimento de onda.

O detector apresenta uma sensibilidade de detecção: a eficiência quântica (Janesick, R. J., 2001), que é a relação de conversão da quantidade de fótons detectados em elétrons e dependente do comprimento de onda da luz. Ele determina a porcentagem da luz observada pelo detector que será lida (em elétrons).

Uma vez que a luz atinja o sensor, sua energia será espalhada seguindo um padrão que depende da PSF (Lipson, S. G.; Lipson, H. and Tannhauser, D. S.,

1995), que é a resposta ótica do instrumento. A imagem formada, em consequência deste espalhamento, pode ser entendida como a convolução entre a imagem do objeto observado e a PSF. Um exemplo de PSF pode ser observado na Figura 1 abaixo:

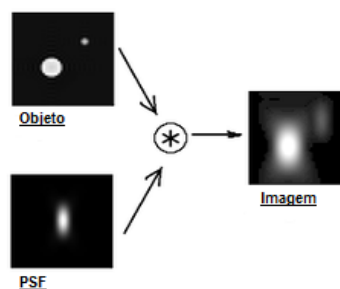


Figura 1. Exemplo de modelo de PSF.

Após atingir o detector, esta função de espalhamento passa por um processo de discretização bidimensional, sendo agora composta por um conjunto de pixels. A Figura 2 mostra a PSF já discretizada, sendo rebatizada neste ponto como mancha imagem, e convertida em elétrons.

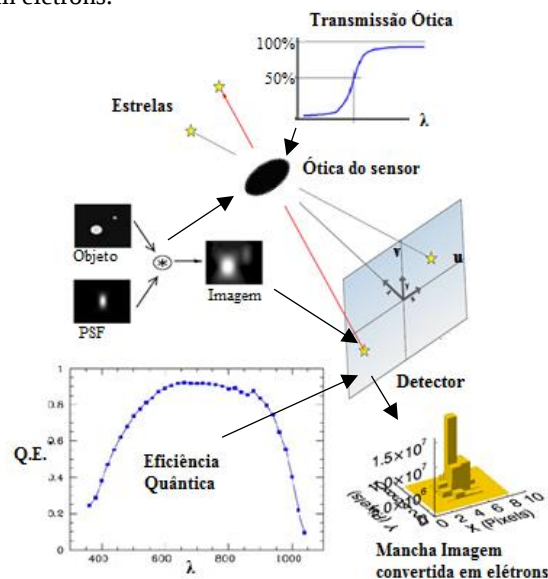


Figura 2. Mancha imagem formada no detector do sensor.

A partir da mancha imagem formada no detector do sensor, é possível de se realizar o cálculo do baricentro da estrela (Liebe, C. C., 1995), e conhecendo-se a distância focal e a posição dos baricentros das estrelas no detector, pode-se determinar a linha de visada do sensor, e consequentemente a atitude do satélite nos seus três eixos de rotação.

3 Cálculo do número de fótons

Esta seção trata do método de estimativa do número de fótons detectados pelo instrumento fotométrico a partir de qualquer estrela observada sobre a esfera celeste.

3.1 Fluxos estelares

O catálogo Atlas 9 (Castelli & Kurucz, 2004), “THE 2004 Kurucz Stellar Atmosphere”, gera modelos atmosféricos estelares levando-se em conta a temperatura efetiva da estrela, a gravidade em sua superfície, a sua metalicidade, o transporte convectivo em sua superfície e sua velocidade de microturbulência. O Atlas 9 contém cerca de 4300 modelos de atmosferas estelares para uma ampla gama de temperaturas efetivas, metalicidades e gravidades na superfície de uma estrela. Estes modelos são calculados com ajustes finos de resolução de comprimento de onda e da temperatura efetiva.

Os parâmetros adotados para o modelo de fluxo estelar utilizados para este trabalho são:

- A temperatura efetiva variará de 3500K a 9000K, ou seja, uma variação espectral dos tipos estelares de **A1V** a **M0V**, todas encontradas na sequência principal do diagrama H-R. O Atlas 9 fornece estes fluxos com uma variação de 250K entre 3500K e 13000K, conforme a Tabela 1;

Tabela 1. Variação de temperatura para os intervalos considerados.

Intervalo de temperatura (K)	Grid (K)
3500 a 13000	250

- A gravidade na superfície da estrela (dada em escala logarítmica) variará de $\log g = +4.5$ a $\log g = +4$ para as anãs brancas e $\log g = +2$ para as gigantes;
- As metalicidades dos modelos estão em escala logarítmica ($\log Z$) para a comparação com a metalicidade do Sol;
- Transporte convectivo de energia já intrínseco ao modelo gerado pelo Atlas 9; e
- A velocidade de microturbulência (2 a 4 Km/s), sendo esse um parâmetro de importância menor.

Os fluxos fornecidos são multiplicados por $(R/d)^2$, onde R é o raio da estrela e d é a distância à estrela, para que o fluxo seja transformado em fluxo observável na Terra. Assim,

$$flux_* = \left(\frac{R}{d}\right)^2 \int_0^\infty flux(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

Onde $flux(\lambda)$ é o fluxo dado pelo Atlas 9 em função do comprimento de onda e da temperatura efetiva. Os fluxos obtidos são conforme a Figura 3 abaixo.

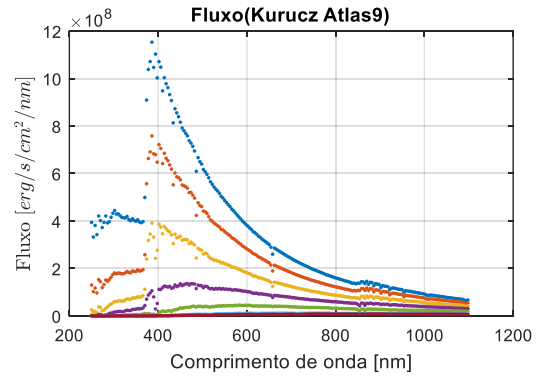


Figura 3. Fluxos estelares do Atlas 9 para uma faixa de temperatura de 3750K a 9000K.

2.2 Método de obtenção da equação do cálculo do número de fótons

Uma primeira abordagem do cálculo do número de fótons é baseada no método utilizado em Liebe (2002), onde o fluxo na pupila ($flux_{pupil}$) durante o tempo de integração é dado por:

$$flux_{pupil} = t_i A_0 \frac{1}{(2,512)^{\# \Delta mag}} \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} flux(\lambda) d\lambda \quad (2)$$

Onde $\# \Delta mag$ representa a diferença de magnitudes entre a estrela desejada e a estrela de referência, $flux(\lambda)$ é o fluxo da estrela por comprimento de onda, t_i é o tempo de integração ou aquisição da imagem e A_0 é a área da pupila do sensor, λ_{min} e λ_{max} são os limites inferior e superior em comprimento de onda da resposta espectral do sensor.

Ainda em Liebe (2002), este fluxo é utilizado na equação (3) abaixo para o cálculo do número de fótons detectados de uma estrela (nf_*).

$$nf_* = flux_{pupil} \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} Q_e(\lambda) \tau_a(\lambda) \frac{\lambda}{hc} d\lambda \quad (3)$$

Onde $Q_e(\lambda)$ é a eficiência quântica, $\tau_a(\lambda)$ é o coeficiente de transmissão ótica e λ/hc é o inverso da energia do fóton.

Assim, nesta equação são levados em conta os aspectos construtivos do sensor, porém apenas uma aproximação de primeira ordem da física dos objetos observados é utilizada, através de $flux_{pupil}$.

A equação (3) é uma razoável aproximação da quantidade de fótons que uma estrela emite, porém, dependendo da aplicação, deve-se obter uma equação mais precisa para o termo da razão de brilho $\frac{1}{(2,512)^{\# \Delta mag}}$. Para isso é necessário considerar aspectos astrofísicos de magnitude, fluxo e luminosidade estelar.

A principal equação que caracteriza o campo de radiação estelar é dada pela lei de Stephan-Boltzman (Fleish, D. and Kregenow J., 2013), onde podemos obter a luminosidade de uma estrela baseada em seu raio e sua temperatura efetiva.

$$L_* = 4\pi R^2 \sigma T_{ef}^4 \quad (4)$$

Das equações (1) e (4)

$$flux_* = \frac{1}{d^2} \frac{L_*}{4\pi\sigma T_{ef}^4} \int_0^\infty flux(\lambda) d\lambda \quad (5)$$

Transformando em fótons a equação (5), obtêm-se

$$nf_*(\lambda) = \frac{1}{d^2} \frac{L_*}{4\pi\sigma T_{ef}^4} \int_0^\infty flux(\lambda) \frac{\lambda}{hc} d\lambda \quad (6)$$

Levando-se em conta os aspectos construtivos do sensor, obtêm-se

$$nf_*(\lambda) = A_0 t_i \frac{1}{d^2} \frac{L_*}{4\pi\sigma T_{ef}^4} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} flux(\lambda) \tau_a(\lambda) QE(\lambda) \frac{\lambda}{hc} d\lambda \quad (7)$$

A luminosidade estelar será uma comparação com a luminosidade do Sol $L_\odot = 3,83 \times 10^{33}$ ergs/s e da magnitude absoluta da estrela conforme equação (8).

$$\frac{L}{L_\odot} = 10^{0.4(M_\odot - M_*)} \quad (8)$$

A equação final é obtida conforme equação (9), onde $f(m_v, f_\lambda, T_{ef})$ é uma equação em função da magnitude, fluxo, temperatura efetiva e da distância da estrela.

$$nf_*(\lambda) = A_0 t_i f(m_v, flux, T_{ef}, d) \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} flux(\lambda) \tau_a(\lambda) QE(\lambda) \frac{\lambda}{hc} d\lambda \quad (9)$$

Como um fóton produz um elétron no processo de detecção, a equação (9) pode ser vista também como a quantidade de elétrons produzidas no detector devido aos fótons. Todavia, prótons de alta energia, por exemplo, produzirão uma quantidade significativamente maior de elétrons, não sendo possível diferenciá-los dos fótons, se o impacto ocorrer próximo ao centro da mancha imagem e tiver uma energia não muito maior que a própria mancha imagem.

A magnitude da estrela pode ser encontrada utilizando-se os catálogos astrométricos Hipparcos e Tycho2, por exemplo.

4 Resultados de simulação

Para posterior validação da equação (9) com os dados reais de voo da missão CoRoT, levou-se em conta aspectos construtivos da câmera fotométrica da missão. As curvas de eficiência quântica e do coeficiente de transmissão ótica são dados pelas Figuras 4 e 5, respectivamente.

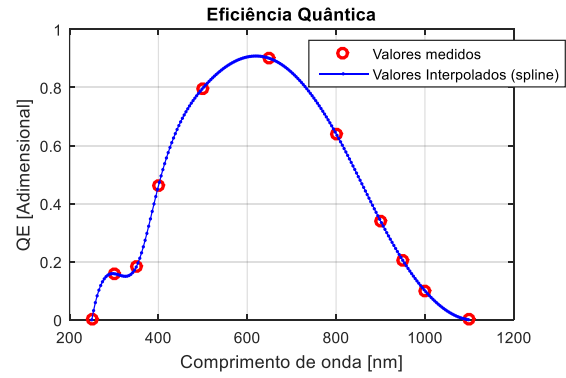


Figura 4. Eficiência quântica do CCD modelo 42-80 B1, empresa e2v, Inglaterra.

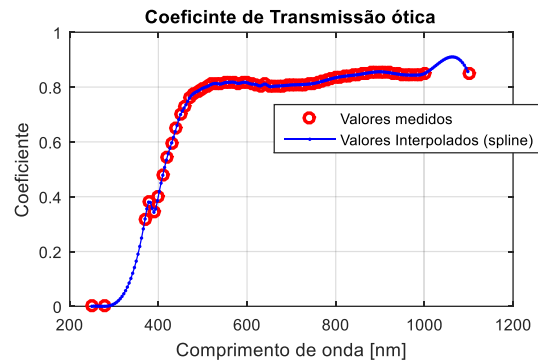


Figura 5. Transmissão ótica da objetiva da câmera do CoRoT.

Pode-se observar pela Figura 5 que a resposta espectral do sensor se encontra entre 250nm à 1100nm. Levando-se em conta os fluxos dados pela Figura 3 e os resultados das Figuras 4 e 5, o fluxo no detector é dado conforme a Figura 6.

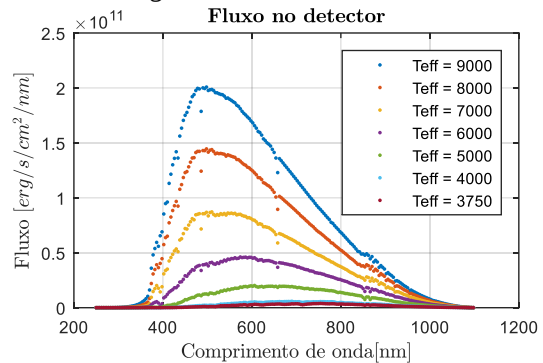


Figura 6. Fluxo estelar no detector do sensor após passar pela ótica e eficiência quântica.

O tempo de integração utilizado foi de 1 segundo e a abertura da pupila do sensor vale 590 cm² de área (parâmetros estes considerados para posterior validação). O vetor de estrelas consideradas para a aplicação do método desenvolvido será conforme abaixo.

- Magnitude aparente = [6.57; 7.52; 7.65; 6.738];
- Temperatura efetiva = [6607K; 6918K; 6310K; 6456K];
- Identificação = [HD181420; HD18155; HD181906; HD180973];

As estrelas consideradas são estrelas que foram observadas pelo satélite CoRoT. Resolvendo a equação (9) para as estrelas consideradas, o número de fótons detectados é dado conforme a Figura 7.

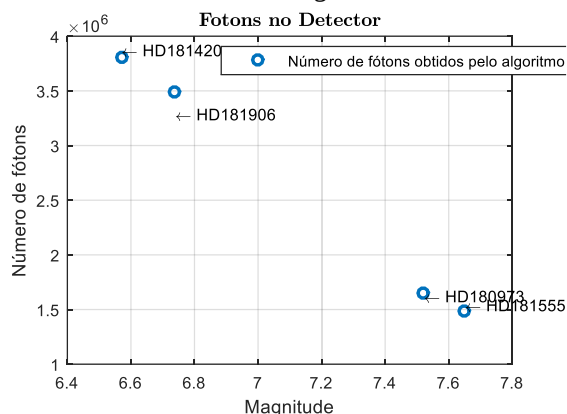


Figura 7. Número de fótons estimados para as estrelas consideradas.

A Tabela 2 abaixo resume a quantidade de fótons obtida para o vetor de estrelas considerado.

Tabela 2. Número de fótons obtidos para as estrelas observadas pelo CoRoT aplicando o método desenvolvido.

Identificação da estrela	Número de fótons obtidos com a aplicação da equação (9)
HD181420	$3,8 \cdot 10^6$
HD181555	$1,5 \cdot 10^6$
HD181906	$1,4 \cdot 10^6$
HD180973	$3,3 \cdot 10^6$

5 Estimação do desvio padrão do método do cálculo do número de fótons

Para obter o desvio padrão do método utilizado em função das incertezas dos diferentes parâmetros do modelo, considerou-se somente a variação da magnitude aparente m_v e da temperatura efetiva T_{eff} . As duas variações foram obtidas segundo uma distribuição normal. A variação considerada para a magnitude foi de ± 0.05 rms, ou seja, $1\sigma = \pm 0.05$ rms, e a temperatura efetiva variando em ± 0.01 K rms, ou seja, $1\sigma = \pm 0.01$ K rms. Para cada estrela foram geradas 10000 amostras para estas duas variáveis aleatórias.

A Figura 8 contém os valores do número de fótons obtido após uma variação na magnitude e temperatura efetiva da estrela HD181420.

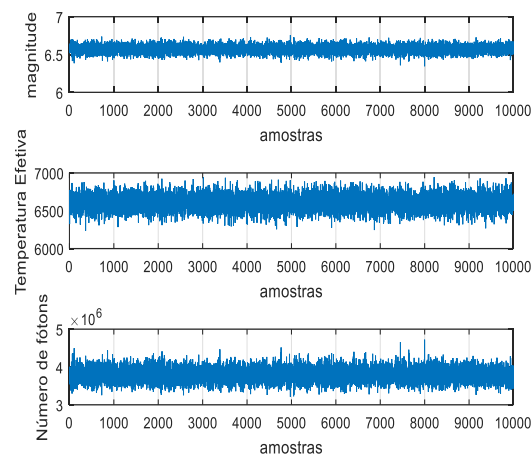


Figura 8. Evolução do número de fótons para a estrela de $m_v = 6.57$ e $T_{eff} = 6607$ K em função da variação de sua magnitude aparente e de sua temperatura efetiva. O número de fótons varia entre 3.10^6 e 5.10^6 , aproximadamente.

Repetindo-se o método nas diferentes estrelas utilizadas nestas simulações, obtém-se o desvio-padrão para todas as estrelas da Figura 7. Os resultados são apresentados na Figura 9.

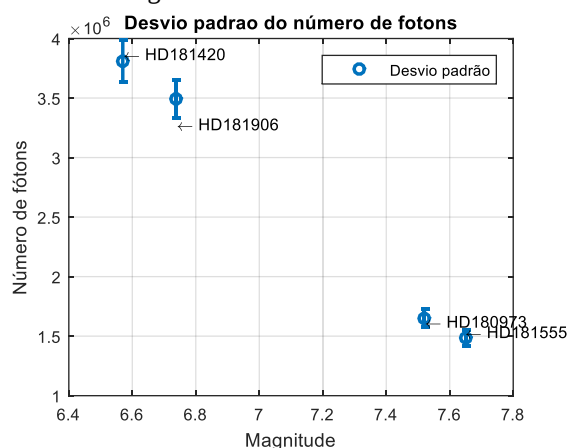


Figura 9. Número de fótons observados das estrelas consideradas com o desvio padrão associado.

6 Validação com dados de voo da missão CoRoT

O cálculo do número de fótons será validado com os dados reais de voo do satélite CoRoT. Para isso é necessário conhecer os valores do número de fótons que cada uma das estrelas consideradas no item 3 gerou durante sua observação na missão. A Figura 10 mostra a quantidade de fótons que cada uma das estrelas gerou pela observação do satélite CoRoT.

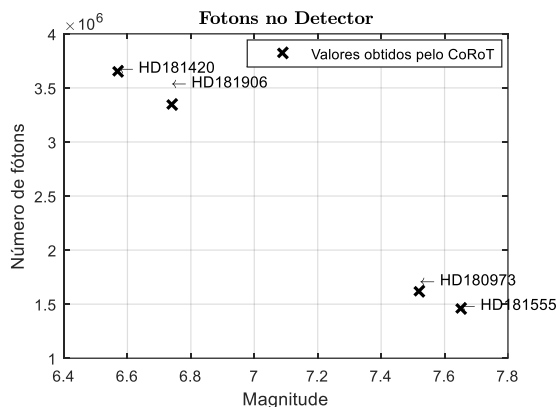


Figura 10. Número de fótons observados com o satélite CoRoT para as estrelas consideradas.

A validação então consiste da comparação da Figura 9 com a Figura 10, resultado este que é apresentado na Figura 11.

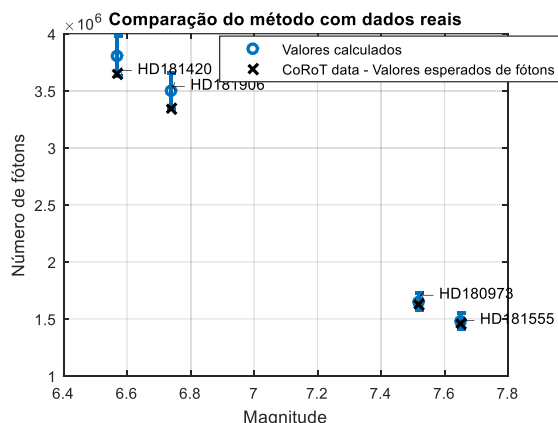


Figura 11. Comparação dos resultados do método de cálculo do número de fótons observados com os valores observados pelo satélite CoRoT em órbita.

Os valores do número de fótons obtidos na missão CoRoT estão dentro da margem de erro do cálculo do número de fótons obtidos através da equação (9), o que evidencia a precisão do método, e que esta, é limitada fortemente pela precisão das variáveis de entrada. Deste modo, melhorar a precisão dos resultados, o que pode ser uma necessidade em função da precisão de determinação de orientação desejada, exige dados de maior precisão. Neste caso, catálogos mais precisos, como os que estão sendo produzidos pela missão GAIA, da Agência Espacial Europeia (ESA), atualmente em operação, deverão ser utilizados.

7 Conclusão

Este artigo apresentou um método de cálculo do número de fótons observados por uma câmera fotométrica no contexto de sensores estelares e da missão espacial CoRoT.

Os dados obtidos pelo CoRoT ficaram dentro da barra de erro do método assumindo-se que apenas as variá-

veis de entrada magnitude aparente e temperatura efetiva possuíssem desvio padrão, por serem estes parâmetros de alta influência nos resultados do algoritmo. É possível verificar tal influência nos resultados ao se observar que foram consideradas temperaturas próximas, que mesmo assim produziram grande dispersão em número de fótons.

A utilização do catálogo Atlas 9 foi definida baseando-se na precisão dos modelos dos fluxos gerados pelas estrelas em uma variação de temperatura efetiva. Como o Atlas 9 é um modelo estelar, e assim, uma aproximação do fluxo gerado por uma estrela real, este também introduz erro na estimativa do número de fótons, o que não foi considerado na determinação da barra de erro aqui apresentada.

Por fim, o método pode ser aplicado a qualquer tipo de estrela desde que seja associada sua temperatura efetiva, tipo espectral e metalicidade ao fluxo do catálogo Atlas 9.

Referências Bibliográficas

- Auvergne, M. et al. (2008), The CoRoT satellite in flight: description and performance. A&A Volume 506, Number 1, October IV 2009, The CoRoT space mission: early results pp. 411-424 Astronomical instrumentation.
- Castelli & Kurucz (2004), Atlas9 The Stellar Atmosphere models by CASTELLI AND KURUCZ.
- Fleish, D. and Kregenow J. (2013), A Students Guide to the Mathematics of Astronomy. University Cambridge Press. Cambridge – UK.
- Janesick, R. J. (2001). Scientific Charge-Couple Devices. SPIE Press, Bellingham Washington.
- Liebe, C. C. (1993). Pattern Recognition of Star Constellation for Spacecraft Applications, IEEE Aerospace & Electronics Sys. Mag., Jan, 1993, pp. 31-39.
- Liebe, C. C. (1995). Star trackers for attitude determination. IEEE AES Systems Magazine, June 1995.
- Liebe, C. C. (2002). Accuracy performance of star trackers – a tutorial. IEEE Transaction on aerospace and electronic systems Vol. 38, No. 2 April 2002.
- Lipson, S. G.; Lipson, H. and Tannhauser, D. S. (1995). Optical Physics. University Cambridge Press. Cambridge – UK.