

Avaliação do ruído em sensores eletroópticos: abordagem da imagem escura no HSS

Ruy Morgado de Castro^{1,2}
Romero da Costa Moreira^{1,3}
Enio Salvatore C. Esposito¹
Eduardo Viegas Dalle Lucca^{1,3}

¹Instituto de Estudos Avançados - IEAv/CTA
Caixa Postal 6044 – 12.231-970 – São José dos Campos - SP, Brasil
{rmcastro, moreira, enio, lucca}@ieav.cta.br

²Universidade de Taubaté - UNITAU
Caixa Postal 515 - 12201-970 - Taubaté - SP, Brasil
rmcastro@unitau.br

³Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Caixa Postal 515 - 12201-970 - São José dos Campos - SP, Brasil
{romero, lucca}@ltd.inpe.br

Abstract. This paper describes a methodology to assess the noise at eletro-optical airborne sensors, based on dark current images. The procedure takes into account the randomness of the data and includes the study of the fast Fourier transform and the correlations. The methodology has been applied to measurements made with HSS sensor, acquired by SIVAM. These first results show a good performance and stability of the sensor.

Palavras-chave: remote sensing, noise assessment, electro-optical airborne sensor, airborne optical scanner, sensoriamento remoto, avaliação do ruído, sensor eletroóptico aerotransportado, HSS.

1. Introdução

Atualmente, a grande maioria dos sensores remotos imageadores que operam na região dos espectros refletido e emitido são sistemas eletroópticos que, ao longo do tempo, vêm tomando espaço frente aos sistemas fotográficos. Os dispositivos eletroópticos, resumidamente, captam o fluxo de energia radiante da cena através de um sistema óptico e a transformam, por meio de detectores, em sinal elétrico que, por sua vez, é digitalizado e organizado na forma de imagem digital.

Um dos parâmetros que indicam a qualidade dos sensores eletroópticos, uma vez que influencia diretamente na qualidade da imagem, é a razão Sinal-Ruído (S/N), que expressa o quanto o sinal do alvo sobressai em relação ao sinal do ruído interno do sensor. Nessa relação, o sinal é proveniente da cena, independentemente do sensor. Já o ruído é resultante das características de funcionamento interno do sensor.

Como os sensores são sistemas complexos, o ruído não tem origem única. Ao contrário é o resultado final de uma série de componentes, de maior ou menor influência, com origens diversas, como motores, condutores, dispositivos eletrônicos, contatos e o próprio detector, entre outros. A avaliação do ruído pode, portanto, ser voltada para um único componente, ou para um conjunto deles, através de uma abordagem sistêmica, objetivando avaliar o resultado final do conjunto.

Neste contexto, o objetivo deste trabalho é apresentar uma metodologia para avaliar o ruído final em sensores imageadores eletroópticos, através da análise estatística de imagens escuras obtidas em ambiente controlado.

Com a aplicação desta metodologia na avaliação do sensor HSS (*Hyperspectral Scanner System*), Souza Filho (2004), adquirido para o SIVAM (Sistema de Vigilância da Amazônia), espera-se contribuir para o melhor conhecimento do sensor.

2. Abordagem da imagem escura

A metodologia para a análise do ruído, proposta nesse trabalho, emprega medições de imagens escuras obtidas com o sensor HSS, ou seja, imagens obtidas com o funcionamento regular, com todos os sistemas ligados, porém com o sensor velado, em bancada de teste e em ambiente escuro. Tal procedimento justifica-se pela intenção de avaliar o ruído no produto final, a imagem, gerada nas condições normais de funcionamento do sensor, com a influência de todos os sistemas internos, porém livre da influência do ambiente externo. Dessa forma, a imagem obtida deve corresponder apenas ao ruído gerado pelo sensor.

Nessa abordagem a avaliação do ruído é voltada para dois aspectos principais das imagens escuras: um referente à verificação da aleatoriedade das medições e o outro relacionado com a dispersão destas medições.

A análise da aleatoriedade visa verificar a ausência de interferência no dado experimental, ou seja, partindo-se do princípio que o ruído é aleatório e independente por definição, qualquer comportamento sistemático que venha a ser identificado é uma interferência. Essa pode ter origem no próprio sistema e, sendo significativa, deve ser eliminada pelo fabricante. A interferência também pode ser proveniente do ambiente externo, seja intencional ou não, indicando uma vulnerabilidade do sistema, como por exemplo, a emissões eletromagnéticas ou a vibrações. Constatado o comportamento aleatório pode-se avaliar a incerteza do sistema por meio da dispersão das medições.

O tratamento dos dados foi dividido em duas etapas. Na primeira etapa, de caráter qualitativo, foi verificada a homogeneidade das imagens, investigando visualmente a existência de variações grosseiras de brilho. Muito embora esta análise qualitativa pareça simplória, ela é de fundamental importância na avaliação das medições, pois com uma inspeção rápida pode-se determinar o estado geral das imagens escuras. Na segunda etapa, foi avaliada a existência de componentes sistemáticas por meio de uma análise de Fourier e da Correlação (ρ) dos dados, permitindo a identificação de “sinais” periódicos de frequência característica e da existência de interferências no sistema.

3. Arranjo experimental

Para exemplificar a metodologia de análise, e avaliar o sensor HSS, foram realizadas medições da imagem escura foi utilizado o sensor e sua bancada de calibração e testes.

O HSS, Sensytech Inc (2002a) e Moreira *et al* (2005), é um sistema imageador eletroóptico aerotransportado que possui 50 bandas divididas em 5 portais, cobrindo as faixas espectrais do visível ao infravermelho termal, conforme pode ser observado na **Tabela 1**. Para cada conjunto de bandas é possível efetuar ajustes, em valores discretos (pré-estabelecidos pelo fabricante), de ganho e *offset*.

O campo de visada (FOV) do Sensor é de 86°, com a possibilidade de utilização de dois campos de visadas instantâneos (IFOV), 1,25 e 2,5 mrad. Com uma taxa de sobreposição de 20% dos pixels, obtêm-se 1440 e 720 pixels em cada linha de varredura para os IFOV de 1,25 e 2,5 mrad, respectivamente. O Sistema pode realizar medições em cinco frequências de varredura: 6,25, 12,5, 25, 50 e 100 Hz. O Sensor possui ainda dois corpos negros de referência, posicionados no limite anterior e posterior do campo de visada, que são utilizados para a calibração de temperatura dos canais termais e para informação do nível de ruído para os canais do espectro refletido. Também estão Integrados ao Sensor os equipamentos de GPS e Giroscópio.

Tabela 1 – Características espectrais do Sensor HSS.

Portal	Conjunto	Bandas	$\lambda_{\text{central}} (\mu\text{m})^*$			
1	1	1 – 4	0,457	0,485	0,513	0,542
	2	5 – 8	0,571	0,600	0,628	0,659
	3	9 – 12	0,687	0,715	0,745	0,773
	4	13 – 16	0,802	0,832	0,860	0,889
	5	17 – 20	0,917	0,944	0,973	1,002
2A	1	21	1,661			
2	1	22 – 25	2,006	2,033	2,058	2,084
	2	26 – 29	2,109	2,135	2,159	2,183
	3	30 – 33	2,208	2,232	2,255	2,278
	4	34 – 37	2,301	2,324	2,346	2,368
3	1	38 – 41	3,24	3,53	3,91	4,17
	2	42 – 44	4,63	4,98	5,31	
4	1	45 – 47	8,18	8,63	9,10	
	2	48 – 50	9,67	10,54	11,50	

* Comprimento de onda central de cada banda.

Os dados de radiância, medidos pelo sensor, são convertidos em números digitais por meio de conversores analógico-digitais (ADC) de 12 bits, fornecendo valores entre 0 e 4095. Com isto, os dados da imagem, dos corpos de referência e os parâmetros de voo (obtidos pelos instrumentos integrados ao sensor) são gravados, pelo sistema de controle do sensor, em um arquivo em uma unidade de armazenamento.

Para a coleta de dados com o sensor foi utilizada a bancada, Sensytech Inc (2002b), que possui dois sistemas de calibração. Um deles permite a calibração radiométrica para comprimentos de onda entre 0,4 e 2,5 μm , abrangendo a região do espectro visível refletido (bandas de 1 a 37 do HSS), por meio de lâmpadas calibradas que iluminam um painel difusor branco. O segundo permite a calibração na região termal, ou seja de 2,5 à 14 μm , por meio de uma placa metálica com aquecimento controlado. A bancada também fornece a tensão necessária para o funcionamento do sensor.

4. Aquisição dos dados

Para a obtenção das imagens escuras, o sensor HSS foi colocado sobre a bancada de calibração, com todas as lâmpadas de calibração desligadas. Além disso, para evitar uma possível influência nas medições, as lâmpadas de iluminação da sala foram apagadas e, para que qualquer contribuição de luz proveniente do monitor de controle do sensor interferisse nas medições, o sistema foi “selado”.

O IFOV utilizado foi de 2,5 mrad, para todas frequências de varredura. O arquivo de dados resultante possuía 723 colunas (para cada linha de varredura), sendo 720 referentes à imagem e outras 3 colunas de dados do sistema: uma coluna corresponde ao controle de sincronização do espelho de varredura e as outras duas referentes aos valores digitais dos corpos de referência.

Para cada uma das frequências de varredura disponíveis no HSS foram realizadas seis medições da imagem escura, sendo cinco medições de um minuto e uma de 3 minutos, com intervalo de um minuto entre cada medição e, para facilitar as comparações entre as medições, foram selecionados os mesmos ganhos e *offsets*, em todas as bandas. Isto permitiu que os valores da dispersão da imagem escura, nas diversas bandas, pudessem ser comparados diretamente.

5. Análise dos dados

A partir dos dados brutos foram extraídas e analisadas as informações das imagens escuras. Na **Figura 1** pode ser observado um exemplo típico de imagem escura obtida com o Sensor HSS. As imagens foram avaliadas quanto ao comportamento dos dados ao longo das linhas e das colunas da imagem (correspondendo respectivamente a linhas de varredura do sistema e a linha de “vôo”) por meio dos perfis horizontais e verticais da imagem. Na **Figura 2** é mostrado o perfil, de uma linha desta imagem.

Desta análise foi possível verificar que os dados, tanto para as linhas quanto para as colunas, apresentam uma flutuação em torno de um valor médio, não sendo evidente (dentro da precisão estatística obtida nas medições) nenhum comportamento não aleatório.

Observou-se, também, que em determinadas imagens houve extrapolação dos limites na conversão dos dados para números digitais, devido à seleção dos ganhos e *offsets*. Quando o número destes eventos era significativo, a análise dos dados para uma determinada banda e frequência de varredura ficava comprometida, implicando na exclusão da imagem nas análises posteriores. Com isto, o conjunto de dados para análise ficou restrito a 20, 22, 19, 13 e 9 bandas para as frequências de varredura de 6,25, 12,5, 25, 50 e 100 Hz, respectivamente.



Figura 1: Imagem escura obtida com o sensor HSS, para a banda 7, com uma frequência de varredura de 6,25 Hz, para o IFOV de 2,5 mrad. Na vertical são mostradas as 150 linhas e na horizontal 720 colunas correspondentes ao FOV de 86° do sensor. Os tons de cinza representam os valores digitais da imagem escura.

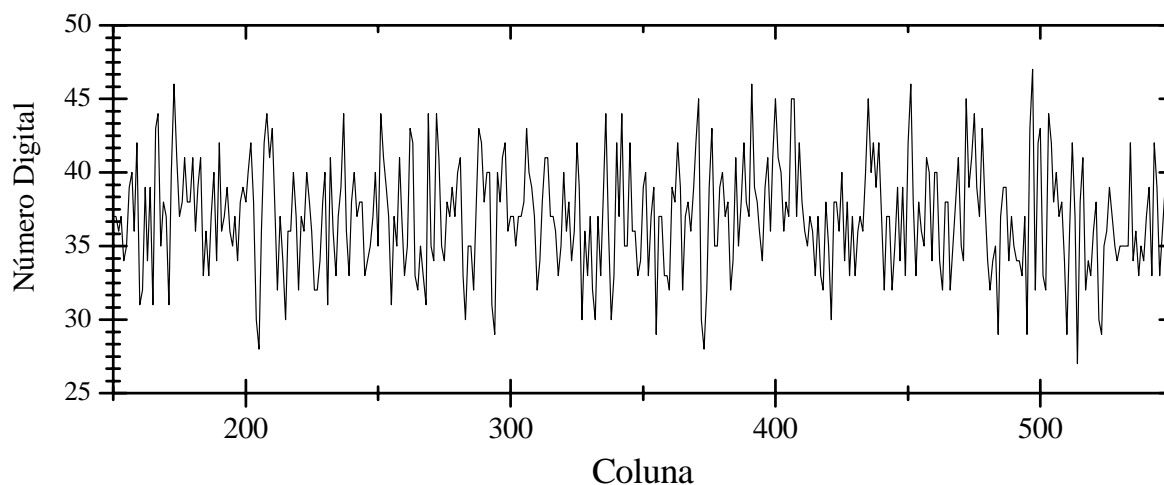


Figura 2: Perfil característico de uma linha da imagem escura. Na figura são mostradas as 400 colunas centrais de uma linha de varredura obtida com a banda 7 do sensor HSS, com uma frequência de varredura de 6,25 Hz e IFOV de 2,5 mrad.

A análise temporal dos dados foi realizada por meio do procedimento de FFT (*Fast Fourier Transform*), que utiliza amostras de 2^n dados, fornecendo uma resposta em frequência entre 0 e a metade da frequência de amostragem. Vale lembrar que a tomada de dados é realizada em linhas e, portanto, a sua apresentação em uma coluna da imagem ocorre com a frequência de varredura da aquisição, ou seja, 1 pixel a cada varredura. No entanto, a apresentação dos dados em uma linha ocorre com uma frequência bem maior, visto que os pixels em uma linha são obtidos sequencialmente, neste caso, 720 pixels a cada varredura. Por isso a análise foi efetuada separadamente para linhas e colunas da imagem.

No caso da Transformada de Fourier das linhas de varredura, foi necessário limitar a análise às 512 colunas centrais de cada linha para facilitar o tratamento dos dados. Na **Figura 3** pode ser observado um resultado característico desta análise. A partir dos resultados, de uma dezena de linhas aleatórias por imagem, não foi identificada a contribuição de sinal periódico evidente.

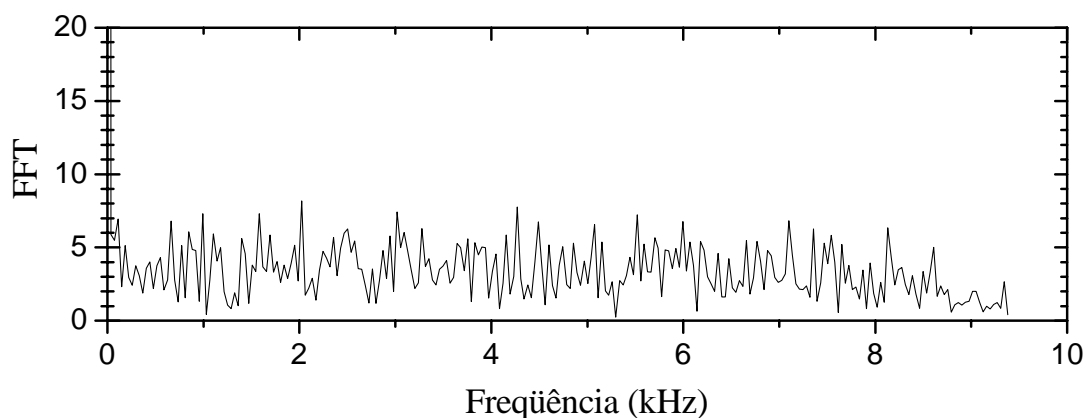


Figura 3: Transformada de Fourier de uma linha da imagem escura, da banda 7, obtida com o sensor HSS, com uma frequência de varredura de 6,5 Hz e IFOV de 2,5 mrad. Nesta análise foram utilizadas 512 colunas centrais da imagem.

No caso das colunas, além da análise individual, de uma dezena de colunas individuais aleatórias, foi calculada a transformada de Fourier para o valor médio de 12 colunas centrais da imagem (as quais são utilizadas na calibração do sensor). Na **Figura 4** pode ser observado o resultado da transformada de Fourier no sentido de uma coluna da imagem. A exemplo da análise anterior, não foi encontrada nenhuma contribuição de frequência característica na imagem escura. Em alguns casos, houve uma pequena elevação das componentes de frequências mais baixas, que está relacionado ao pequeno número de amostras. No entanto, utilizando um número maior de pixels na amostra, este comportamento diminui.

A independência dos dados foi verificada por meio do cálculo da correlação dos dados, pela expressão:

$$\rho = \frac{\langle (X - \langle X \rangle) \cdot (Y - \langle Y \rangle) \rangle}{\sigma_X \cdot \sigma_Y} , \quad (1)$$

onde: X e Y são os vetores com os valores das grandezas X e Y , que correspondem, por exemplo, às linhas ou às colunas da imagem; $\langle X \rangle$ e $\langle Y \rangle$ aos seus valores médios e σ_X e σ_Y aos seus desvios padrões, respectivamente. A correlação pode variar entre -1 e 1 , sendo os dados considerados independentes quando a correlação for próxima de zero e dependentes

quando ela estiver próxima dos extremos. Portanto, pode-se dizer que existe uma grande “influência” do sistema nos dois conjuntos de dados analisados quanto maior for a dependência dos dados.

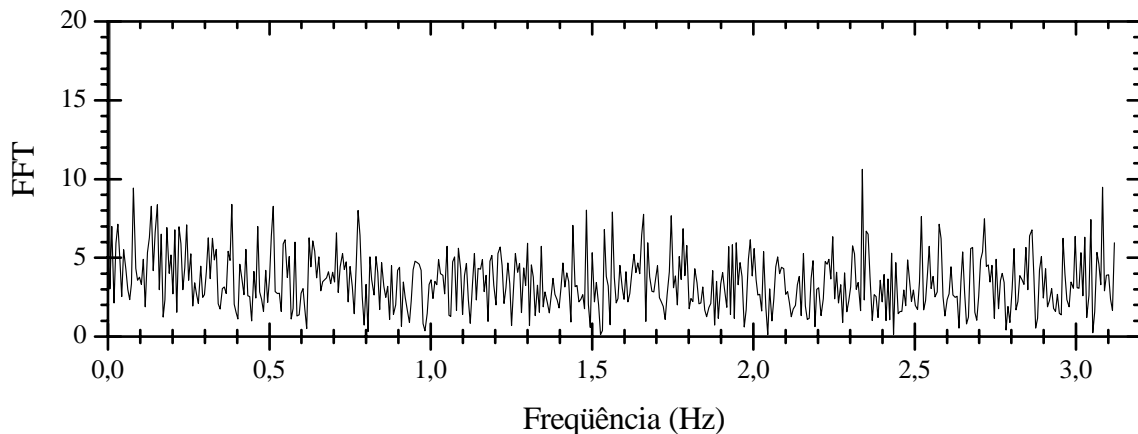


Figura 4: Transformada de Fourier de uma coluna, com 1024 pixels, da imagem escura, da banda 7, obtida com o sensor HSS, com uma frequência de varredura de 6,5 Hz e IFOV de 2,5 mrad.

Como nas análises anteriores, o estudo da correlação foi separado em duas partes: uma para as linhas e outra para as colunas das imagens. Nesse caso, além da análise dos dados em uma mesma banda, foi estudada a correlação entre os dados da imagem escura nas diversas bandas. Também foi estudada a correlação das colunas com os valores obtidos a partir das referências 1 e 2 do sensor.

Calculando a correlação para as linhas vizinhas de uma mesma banda, verificou-se que a correlação é praticamente inexistente. O mesmo resultado foi obtido quando calculou-se a correlação da mesma linha nas diferentes bandas e para os valores médios das linhas nas várias bandas.

Utilizando o mesmo tratamento para os dados distribuídos ao longo das colunas, verificou-se, que as colunas vizinhas são levemente correlacionadas ($\rho = 0,25$), diminuindo à medida que o intervalo entre as colunas aumenta, ficando a correlação estabilizada em torno de $\rho = 0,1$. Para as bandas de 34 a 37 percebe-se o mesmo efeito com correções ligeiramente superiores ($\rho = 0,35$ para colunas vizinhas e 0,2 para as colunas mais distantes).

Da análise, entre a média das 12 colunas centrais das diversas bandas, verificou-se a existência de uma pequena correlação entre as bandas 34, 35, 36 e 37, as quais pertencem a um mesmo conjunto de detectores (**Tabela 1**). Mesmo assim, no pior caso, a correlação obtida foi moderada, apresentando valores em torno de $\rho = 0,25$.

Os resultados obtidos para a correlação entre as referências 1 e 2, em cada uma das bandas, foram próximos a zero, sendo (em geral) menores que 0,1. O mesmo resultado foi obtido quando foram calculadas as correlações entre as referências 1 e 2 e os valores médios das colunas centrais da imagem. As correlações entre os valores das referências nas diversas bandas também foram inferiores a 0,1.

Como as análises anteriores (inspeção visual, a análise temporal e os testes de correlação) não indicaram nenhum comportamento não aleatório significativo nas medições realizadas, pode-se tratar a imagem como um único conjunto de dados. Assim, para avaliar a dispersão dos dados, foi calculado o desvio padrão de cada imagem. Como os ganhos e *offsets*

selecionados foram os mesmos em todas as medições, a comparação dos desvios padrões pode ser realizada diretamente. Na **Figura 5** pode ser observado o gráfico do desvio padrão em várias bandas para as medições na frequência de varredura de 6,25 Hz. O resultado típico da dispersão obtida para uma mesma banda nas diversas frequências de varreduras pode ser observado na **Figura 6** e indicam que a menor dispersão das medições é obtida com a frequência de varredura de 12,5 Hz.

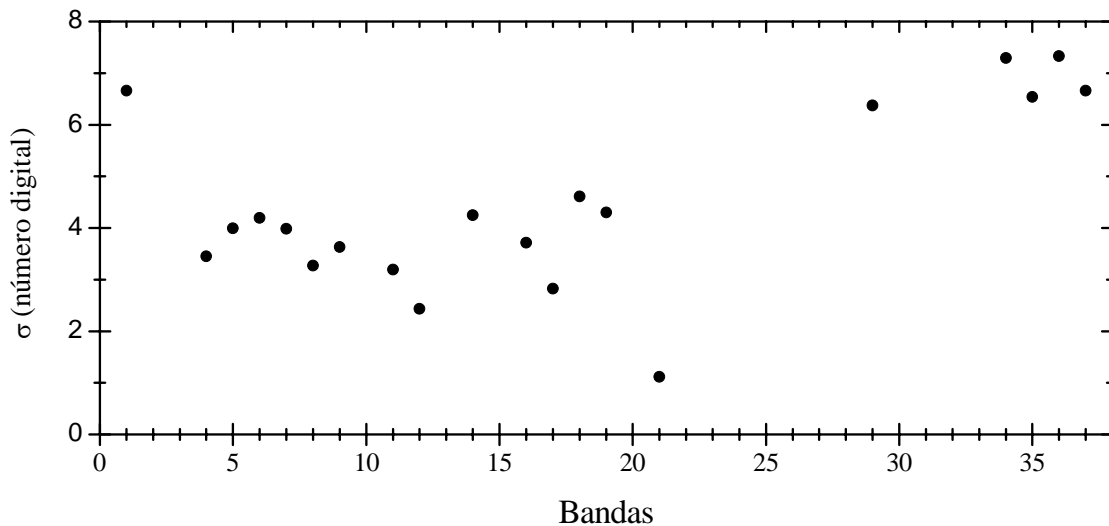


Figura 5: Gráfico do desvio padrão em função da banda para a medição da imagem escura na frequência de varredura de 6,25 Hz. Para o cálculo dos desvios padrões foram utilizados os dados correspondentes a 720 colunas e 300 linhas. Os resultados obtidos para algumas bandas não são apresentados devido à alta extrapolação na conversão dos dados.

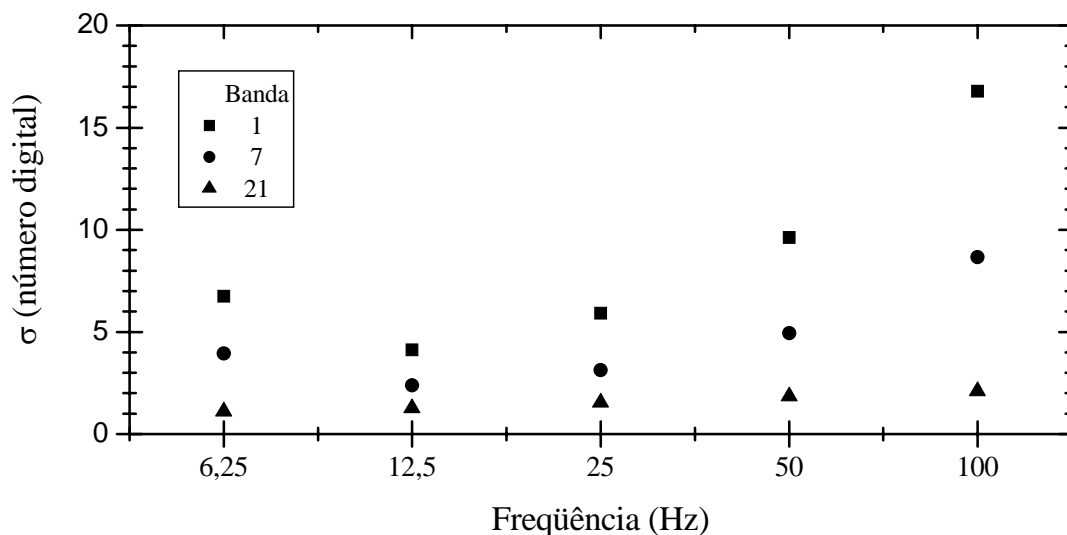


Figura 6: Gráfico do desvio padrão em função da frequência de varredura para as bandas 1, 7 e 21. No cálculo dos desvios padrões foram utilizados os dados correspondentes a 720 colunas e 300 linhas.

A repetitividade foi estudada comparando apenas os valores das médias e desvios padrões de imagens, de uma mesma banda, obtidas em seis medições consecutivas em uma mesma frequência de varredura. Os resultados da média e do desvio padrão obtidos para estas medições foram muito semelhantes, indicando uma boa estabilidade no funcionamento do sensor.

6. Conclusão

A metodologia proposta neste trabalho para avaliar o ruído em sensores eletroópticos, baseada na abordagem da imagem escura mostrou-se adequada para caracterizar a existência de efeitos não aleatórios em imagens escuras.

A partir de medições realizadas com o sensor HSS pode-se concluir que o comportamento apresentado pela imagem escura é aleatório e independente, além de serem reprodutíveis, indicando um bom funcionamento do sensor. No entanto, para as bandas 34, 35, 36 e 37, de um mesmo conjunto, foi verificada a existência de uma pequena correlação, indicando uma possibilidade de interferência entre estas bandas, que deve ser investigada com mais detalhes em trabalhos futuros. Neste estudo, verificou-se também, que a menor dispersão das imagens escuras foi obtida com a frequência de varredura de 12,5 Hz.

Com a realização de campanhas periódicas de calibração de sensores, tanto em bancada quanto em vôo na plataforma, e com o devido acompanhamento do ruído espera-se melhorar significativamente o conhecimento sobre o sensor.

Agradecimentos

Este trabalho não teria sido possível sem a colaboração do COMGAR, CTA/IEAv, III FAE, 2°/6°Gav e INPE.

Referências

Moreira, R. C.; Castro, R. M.; Esposito, E. S. C.; Lucca, E. V. D. Sensor hiperespectral HSS: sumário das características técnicas. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 12. (SBSR), 16-21 abr. 2005, Goiânia. **Anais**. São José dos Campos: INPE, 2005. Artigos. CD-ROM, On-line. ISBN 85-17-00018-8.

Sensytech Inc. AA5201 Airborne hyperspectral scanner system: operator manual. Ann Arbor, Nov 2002a. v. 1.

Sensytech Inc. AB532 Scanner System Test Bench: Operator Manual. MN. Ann Arbor, Nov 2002b. v. 1.

Souza Filho, C.R. de. Sensores Hiperespectrais a bordo do SIVAM. **Revista InfoGEO**, ed. 34, Jul/Ago., p. 32-34, 2004.