

## SISTEMAS AEROGRAVIMÉTRICOS GRADIOMÉTRICOS 3D-FTG E FALCON NA EXPLORAÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO

Henry Galbiatti<sup>1</sup>, Marco Antonio Braga<sup>2</sup>,  
Dionísio Uendro Carlos<sup>2</sup> e Rodrigo Rocha de Sousa<sup>2</sup>

Recebido em 13 abril, 2011 / Aceito em 20 dezembro, 2011  
Received on April 13, 2011 / Accepted on December 20, 2011

**ABSTRACT.** The current research shows a description of 3D-FTG (Full Tensor Gravity Gradiometer) and Falcon (Airborne Gravity Gradiometer) systems characteristics and also the planning and the quality control of surveys with these systems. The 3D-FTG nowadays is the unique airborne technology that can provide five independent gravity gradient tensor components. The Falcon system measure one component and curvature (e.g. degree of distortion of the gravitational equipotential surface from a spherical shape), both systems can be use to either regional or detailed surveys. The 3D-FTG and Falcon acquisitions that will be shown were measured over Carajás iron ore formation, Serra Leste deposit at Pará State in Brazil. Iron ore mineralization oxides are largely controlled by crustal and *in situ* structures like shear zones, fault zones and lithological contacts. A precise cartographical mapping, to use gravity gradiometric surveys, is very important to find economical concentrations of these mineral deposits.

**Keywords:** 3D-FTG, Falcon, signal-to-noise ratio, iron ore, Carajás (PA).

**RESUMO.** O presente trabalho de pesquisa apresenta uma descrição das características dos sistemas 3D-FTG (*Full Tensor Gravity Gradiometer*) e AGG Falcon (*Airborne Gravity Gradiometer*), assim como as fases do planejamento e controle de qualidade dos dados levantados com esses dois sistemas. O 3D-FTG é atualmente a única tecnologia aérea existente capaz de medir as cinco componentes independentes do tensor do gradiente de gravidade. O sistema Falcon mede uma das componentes do tensor e também a curvatura (composição de duas componentes será mostrada a frente), os dois sistemas podem ser utilizados tanto para levantamentos detalhados como regionais. As aquisições de dados com os sistemas 3D-FTG e Falcon, que serão apresentadas, foram realizadas sobre um dos depósitos de minério de ferro de Carajás, Serra Leste, no estado do Pará, Brasil. Mineralizações de óxido de ferro são largamente controladas por estruturas crustais e locais, como zonas de cisalhamento, zonas de falha e contatos litológicos. Um controle cartográfico preciso destas estruturas, para a utilização de aerolevantamentos gravimétricos gradiométricos é muito importante para se encontrar concentrações consideráveis e econômicas destes tipos de depósitos.

**Palavras-chave:** 3D-FTG, Falcon, razão sinal-ruído, minério de ferro, Carajás (PA).

---

<sup>1</sup>VALE – Gerência Geral de Exploração Mineral e Gestão Integrada de Ferrosos – GEEGF, Av. de Ligação, 3580, Águas Claras, Centro de Tecnologia de Ferrosos, 34000-000 Nova Lima, MG, Brasil. Tel.: +55(31) 3215-4278 – E-mail: henry.galbiatti@vale.com

<sup>2</sup>VALE – Gerência de Exploração Mineral de Ferrosos – GAEMF, Av. de Ligação, 3580, Águas Claras, Centro de Tecnologia de Ferrosos, 34000-000 Nova Lima, MG, Brasil. Tel.: +55(31) 3215-4200 – E-mails: marco.antonio.braga@vale.com; dionisio.carlos@vale.com; rodrigo.rocha.sousa@vale.com

## INTRODUÇÃO

No ano de 2010 a VALE contratou um levantamento aerogeofísico com o sistema Falcon e para efeito comparativo fez a aquisição de dados na área de Serra Leste em Carajás (PA), mesma área em que no ano de 2005 foi realizado um levantamento com o sistema 3D-FTG. Para o levantamento geofísico com o sistema Falcon foram utilizados os mesmos parâmetros da aquisição de dados do sistema 3D-FTG tais como espaçamentos das linhas de voo de 100 metros e altura de voo de aproximadamente 80 metros. Esses voos foram realizados com o mesmo *drape*, que consiste no acompanhamento, pelo piloto da aeronave, de uma superfície teórica calculada com base no desempenho de subida e descida de cada tipo de aeronave, procurando manter uma altura constante em relação ao perfil topográfico.

Como exemplos serão apresentados os dados dos sistemas Falcon e 3D-FTG adquiridos em Carajás, na região de Serra Leste, sudoeste do estado do Pará. A Província Mineral de Carajás (PMC) está situada no extremo sudeste do estado do Pará e também do Cráton Amazônico. A região é inserida na Província Amazônica Central, sendo limitada a norte pela sinéclise do Amazonas e a leste pelo Cinturão Araguaia.

## ÁREA DO LEVANTAMENTO GEOFÍSICO

### Localização

Os levantamentos aerogeofísicos 3D-FTG e Falcon foram realizados em Carajás, na região de Serra Leste, sudoeste do estado do Pará. A área do estudo está situada a aproximadamente a 60 quilômetros a nordeste da cidade de Parauapebas. A Figura 1 apresenta o polígono dos aerolevantamentos de aerogravimetria gravimétrica.

## MATERIAIS E MÉTODOS

### Planejamento da aquisição de dados

A Figura 2 apresenta as linhas de voo dos levantamentos com os sistemas 3D-FTG e Falcon. As mesmas foram orientadas na direção N-S. A altura do voo foi de aproximadamente 80 metros, com espaçamento entre linhas de aproximadamente 100 metros na parte oeste e 150 metros na parte leste da área, visando mapear a formação ferrífera, em um total de noventa linhas levantadas que recobriram 996 km lineares em uma área de aproximadamente 133 km<sup>2</sup>. Foram empregadas em ambos os levantamentos aeronaves Cessna Grand Caravan, com velocidade de cruzeiro de 300 km/h e velocidade em operação geofísica de 260 km/h.

## O sistema 3D-FTG

O sistema 3D-FTG é uma tecnologia de plataforma móvel com múltiplos acelerômetros que medem as 5 componentes independentes do gradiente da gravidade (Fig. 3). As componentes  $G_x$ ,  $G_y$ , e  $G_z$  representam a aceleração de gravidade nas três direções das coordenadas cartesianas. As componentes  $T_{xx}$ ,  $T_{yx}$ ,  $T_{yy}$ ,  $T_{xz}$ ,  $T_{yz}$  e  $T_{zz}$  representam as taxas de variação de cada componente da gravidade, em cada uma das coordenadas cartesianas.

O sistema 3D-FTG é composto por uma cápsula aeronáutica (Fig. 4) de aproximadamente um metro cúbico e possui massa de aproximadamente 227 quilogramas, com três Instrumentos de Gradiente da Gravidade (IGG) e doze acelerômetros. A Figura 5 mostra um dos três IGGs que compõem o sistema 3D-FTG. O *rack* eletrônico tem aproximadamente as mesmas dimensões do sistema 3D-FTG e massa de 160 quilogramas. A cápsula aeronáutica fornece um ambiente de temperatura, pressão e umidade controlado para o sistema 3D-FTG, durante toda a aquisição de dados.

O sistema 3D-FTG é um instrumento altamente sensível que requer um ambiente livre de ruídos e ao mesmo tempo estável, para obter o máximo de eficiência. Como essas duas condições não podem ser alcançadas em sua totalidade, as vibrações e acelerações que contribuem de forma espúria devem ser administradas e/ou controladas. Além disso, o sistema 3D-FTG deve ser instalado próximo ao centro de gravidade da aeronave para reduzir os ruídos. A Figura 6 apresenta o equipamento montado numa aeronave Cessna Grand Caravan.

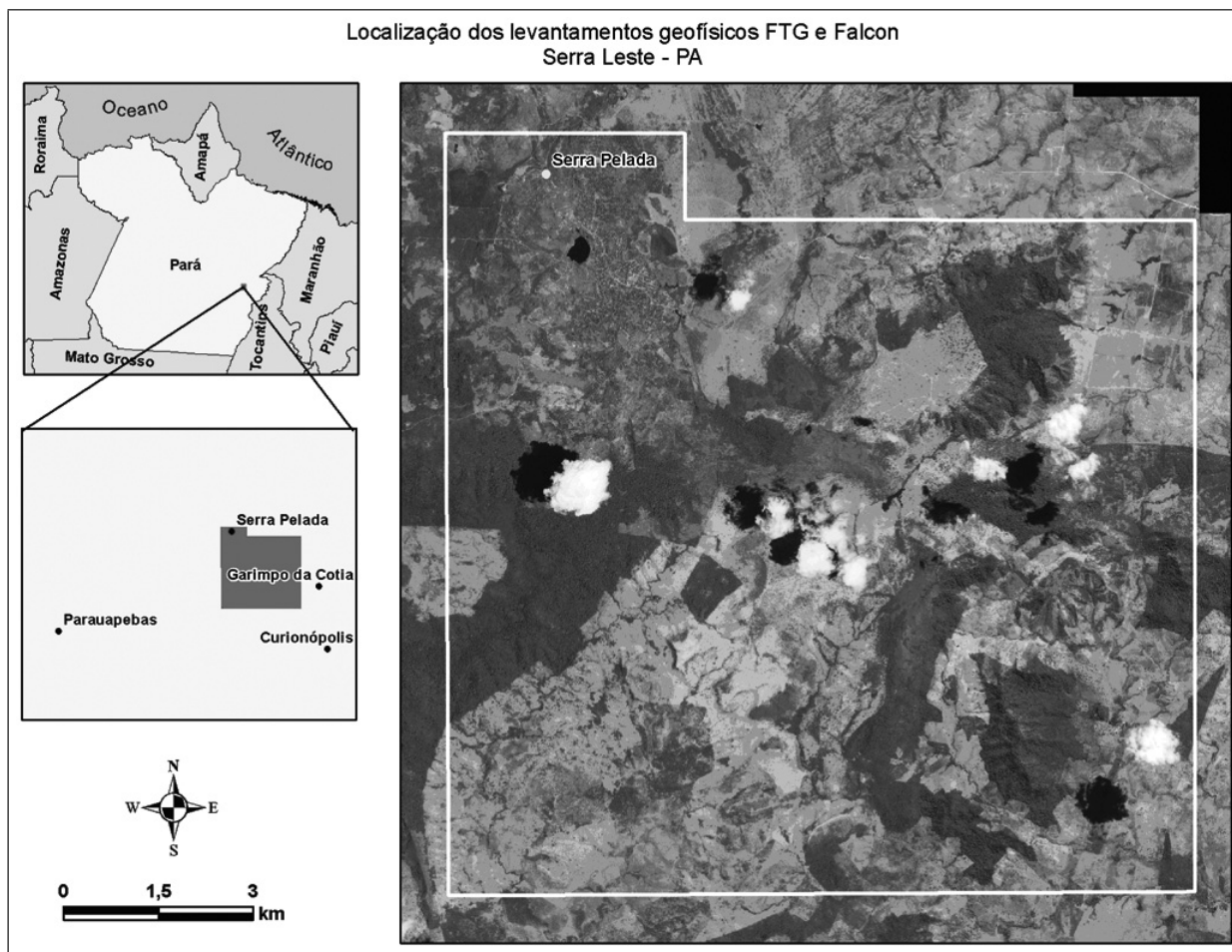
## O sistema Falcon

O sistema Falcon foi desenvolvido entre 1975 e 1990 tendo como base o Instrumento de Gradiente da Gravidade da *Bell Aerospace* (agora *Lockheed Martin*).

O sistema Falcon é uma tecnologia de plataforma móvel com múltiplos acelerômetros que mede os gradientes da gravidade. A componente  $G_{NN}$  é o gradiente de  $G_N$  na direção norte,  $G_{EE}$  é o gradiente de  $G_E$  na direção leste. A componente  $G_{DD}$  é o gradiente vertical e as componentes  $G_{ND}$  e  $G_{ED}$  são os gradientes horizontais da componente vertical da gravidade ( $G_D$ ) (Fig. 7). As componentes  $G_{NE}$  e  $G_{UV}^1$  representam as curvaturas de uma superfície equipotencial. As componentes efetivamente medidas pelo sistema Falcon são  $G_{NE}$  e  $G_{UV}$ , as outras componentes são calculadas matematicamente.

O sistema Falcon é composto por uma cápsula aeronáutica semelhante a do sistema 3D-FTG (Fig. 8) de aproximadamente

<sup>1</sup>  $G_{UV} = \frac{G_{NN} - G_{EE}}{2}$



**Figura 1** – Mapa da localização da área dos levantamentos aerogeofísicos 3D-FTG e Falcon.

um metro cúbico e possui massa de aproximadamente 227 quilogramas. Internamente, a diferença é que o sistema Falcon possui apenas um Instrumento de Gradiente de Gravidade que contém oito acelerômetros. A Figura 9 mostra o IGG que compõem o sistema Falcon e a Figura 10 compara os IGGs dos dois sistemas. O *rack* eletrônico do sistema Falcon tem aproximadamente as mesmas dimensões do sistema 3D-FTG e massa de 160 quilogramas.

A aeronave Cessna Grand Caravan apresenta dimensões próprias para abrigar cada um dos sistemas e atualmente é a aeronave mais utilizada nesse tipo de aquisição de dados. Os ruídos e vibrações sofridas pela aeronave, tais como: rolagem, arfagem e derrapagem (*roll*, *pitch* e *yaw*, veja Fig. 11) que atuam no sistema ao longo de cada voo, são monitoradas por dois acelerômetros externos e os dados são compensados destes ruídos espúrios.

Como os sinais dos sistemas Falcon e 3D-FTG são atenuados com o cubo da distância a fonte, é importante voar o mais próximo possível do terreno para detectar as pequenas ampli-

tudes associadas aos corpos mineralizados. Para cumprir esse requisito é utilizada a técnica do voo *drape* a uma altitude de 80 metros do solo. Esta é uma altura mínima de voo que é considerada segura de acordo com os níveis de desempenho e segurança da aeronave (Braga et al., 2009).

Alguns critérios técnicos como a escolha do espaçamento entre as linhas de voo, orientação das linhas e altura de voo, são escolhas fundamentais para uma boa coleta de dados. Devem ainda, ser considerados: dimensões dos corpos mineralizados, orientação, topografia, contraste de densidade e profundidade dos alvos.

### CONTROLE DE QUALIDADE

Para um controle de qualidade mais apurado as linhas de voo executadas nos levantamentos aerogeofísicos de gradiometria gravimétrica são submetidas à VALE, que mediante emprego de *software* próprio, realiza a avaliação da relação sinal-ruído (*Signal-to-Noise Ratio* – SNR) e uma vez que os dados apresentem um

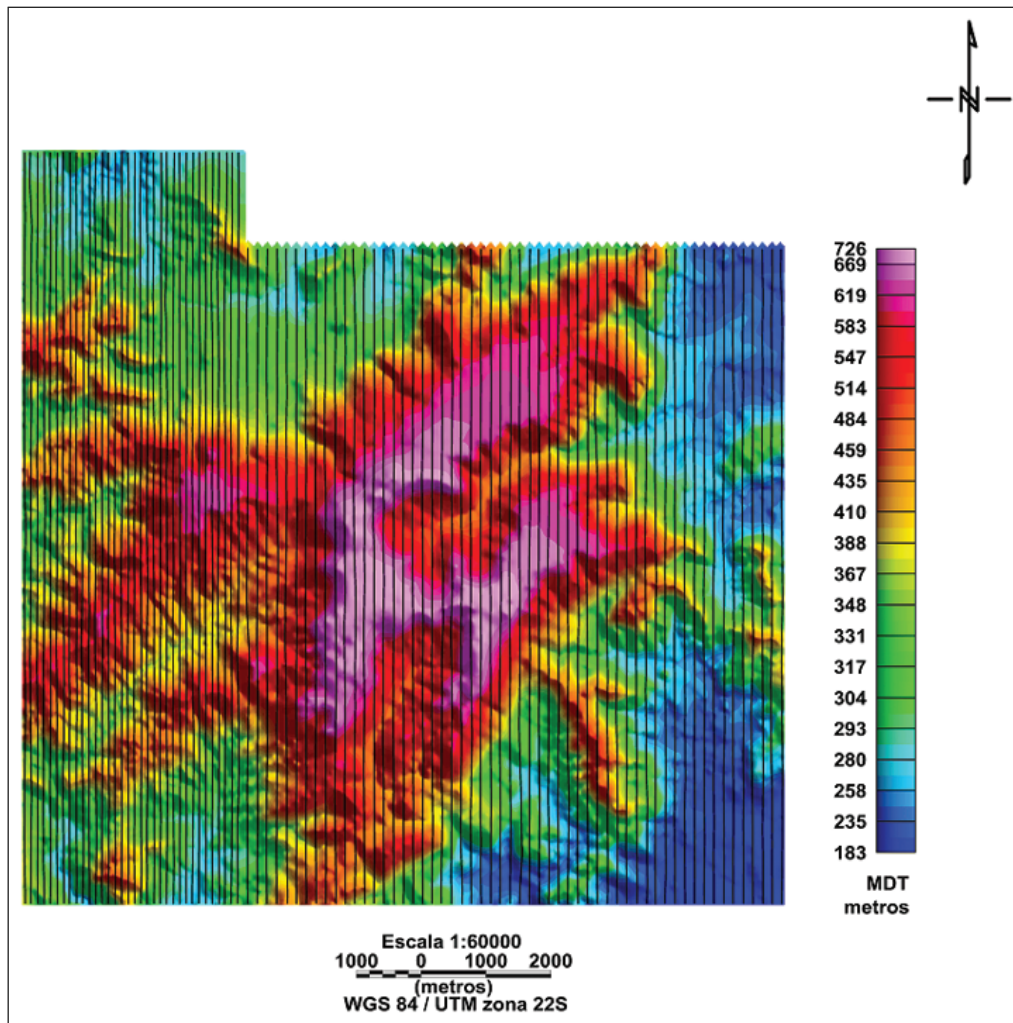


Figura 2 – Mapa do modelo digital do terreno, sobrepostas estão as linhas de voo dos levantamentos aerogeofísicos 3D-FTG e Falcon.

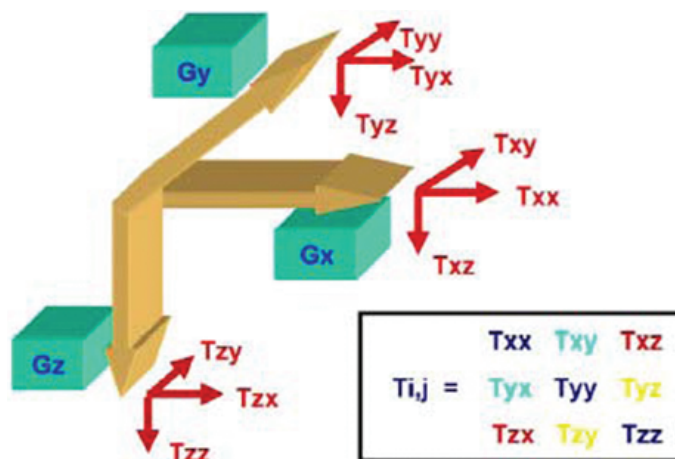
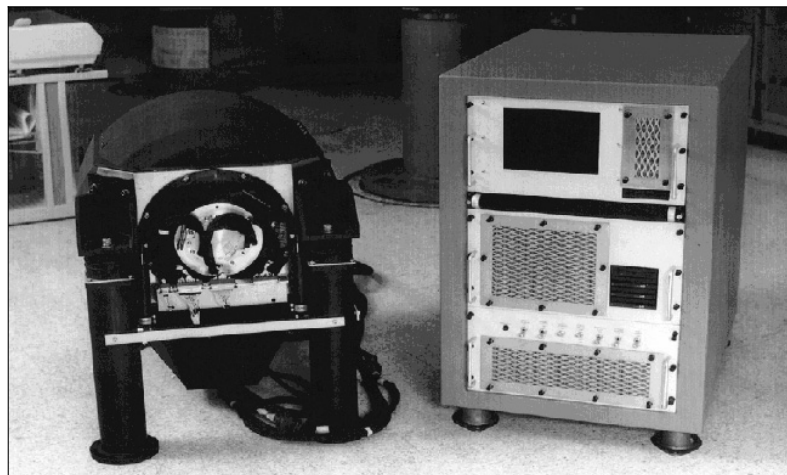


Figura 3 – Tensor do gradiente de gravidade indicando em verde as componentes da gravidade ( $G_x$ ,  $G_y$ ,  $G_z$ ) e em vermelho as componentes do tensor ( $T_{xx}$ ,  $T_{xy}$ ,  $T_{xz}$ ,  $T_{yy}$ ,  $T_{yz}$ ,  $T_{yx}$ ,  $T_{zx}$ ,  $T_{zy}$ ,  $T_{zz}$ ). Retirado de Murphy (2004).



**Figura 4** – Plataforma móvel do sistema 3D-FTG, a cápsula (à esquerda) mede aproximadamente  $1 \text{ m}^3$  e tem massa de 227 kg, com os IGGs instalados. O *rack* eletrônico (à direita) tem as dimensões aproximadas da plataforma móvel do sistema FTG e massa de aproximadamente 160 kg. Retirado de Braga et al. (2009).



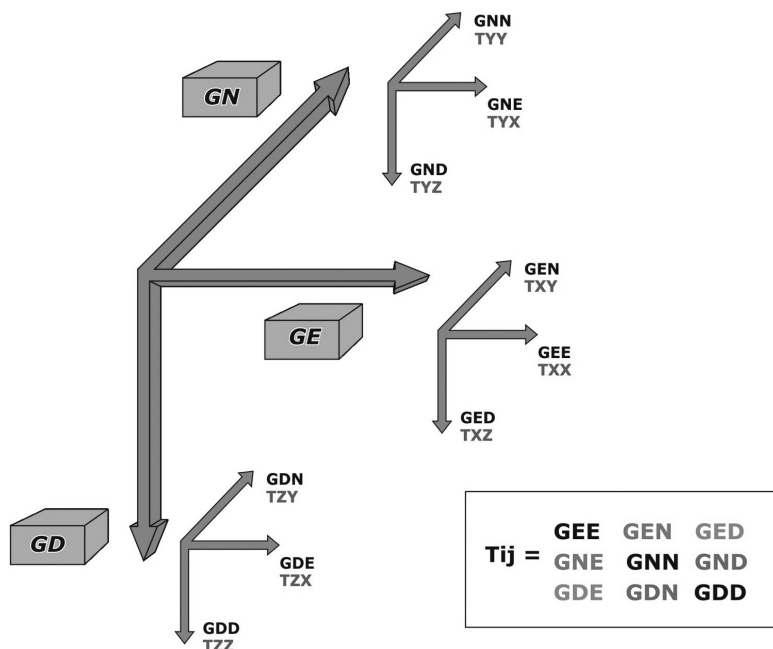
**Figura 5** – Instrumentos de Gradiente da Gravidade (IGGs). Em seu interior, um único IGG contém quatro acelerômetros.

baixo valor na razão sinal-ruído ( $<20 \text{ dB}$ ), as linhas são revoadas. Outro procedimento de controle de qualidade é o cálculo das componentes sintéticas do tensor do gradiente de gravidade para cada linha de voo, em função do modelo digital do terreno.

Os valores das componentes medidas (observadas) são comparadas com as calculadas (sintéticas) empregando-se o ajuste por mínimos quadrados observando-se o valor dos coeficientes lineares em cada uma das linhas.



**Figura 6** – Disposição dos sistemas dentro da aeronave. Em primeiro plano, a plataforma móvel do sistema 3D-FTG, ao fundo o rack. Retirado de Braga et al. (2009).



**Figura 7** – Tensor de gravidade indicando a nomenclatura das componentes do tensor nos sistemas Falcon e 3D-FTG. Adaptado de Coburn & Schneider (2002).

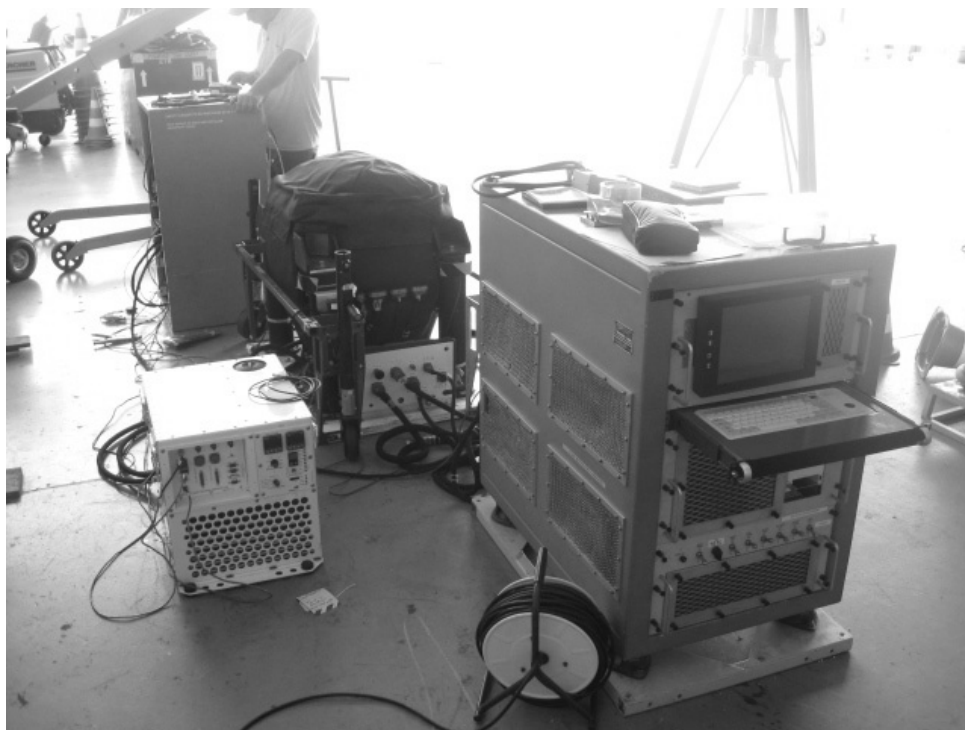
### Conceito da relação sinal-ruído

A razão sinal-ruído é um conceito relacionado a todos os campos do conhecimento que envolvam medidas de um sinal em meio ruidoso (ruído de fundo ou *background*). É definido como a razão entre a potência de um sinal e a potência do ruído sobreposto ao

sinal de interesse. A Equação (1) apresenta esse conceito:

$$SNR = \frac{P_{SINAL}}{P_{RUIDO}} = \left( \frac{A_{SINAL}}{A_{RUIDO}} \right)^2 \quad (1)$$

em que  $P$  é a potência média,  $A$  é o valor quadrático médio da amplitude. A relação sinal-ruído é medida em decibel (dB), veja



**Figura 8** – Plataforma móvel do sistema Falcon, a cápsula (à esquerda) mede aproximadamente 1 m<sup>3</sup> e tem massa de 227 kg, com os IGGs instalados. O rack eletrônico (à direita) tem as dimensões aproximadas da plataforma móvel do sistema 3D-FTG.

a Equação (2) abaixo:

$$SNR = 10 \log_{10} \left( \frac{P_{SINAL}}{P_{RUÍDO}} \right) [db]. \quad (2)$$

### Cálculo da razão sinal-ruído

A razão sinal-ruído aplicada aos dados de gradiometria gravimétrica é uma parte fundamental do controle de qualidade. Devido à dificuldade de estabelecimento de uma forma padrão de estimativa da variância de cada uma das componentes, diferentes trabalhos propõem diferentes métodos para a estimativa da razão sinal-ruído. DeGregoria (2010) apresenta a densidade espectral de ruído (DER)<sup>2</sup>, onde são definidos o nível de ruído dos instrumentos de gradiente de gravidade, assumindo-se média zero e distribuição gaussiana. Jekeli & Abt (2010) e Abt (2011) propuseram a utilização de Matched Filter que é uma técnica utilizada para identificar o sinal de uma fonte com um ruído de fundo (*background*). Essa aproximação tem aplicação imediata em sísmica como, por exemplo, na migração de Kirchhoff ou na medida da correlação cruzada da varredura de um vibroseis<sup>3</sup> e também na aerogravimétrica gravimétrica para estimativa da razão sinal-ruído inerente aos dados.

<sup>2</sup> *Noise Spectral Density.*

<sup>3</sup> *Vibroseis Sweep.*

Nesse trabalho calculamos a razão sinal-ruído utilizando a estimativa da variância sugerida por D'Errico (2007), ou seja, assumimos que todas as componentes do tensor do gradiente de gravidade são sinais contaminados por um ruído gaussiano com média zero e variância  $\sigma^2$ . Isso equivale a dizer que em qualquer ponto o sinal pode ser representado por um polinômio de baixa ordem.



**Figura 9** – Instrumento do Gradiente de Gravidade do sistema Falcon. Em seu interior, este IGG contém oito acelerômetros.



Figura 10 – Comparação (sem escala) entre o IGG do sistema 3D-FTG e o IGG do sistema Falcon.

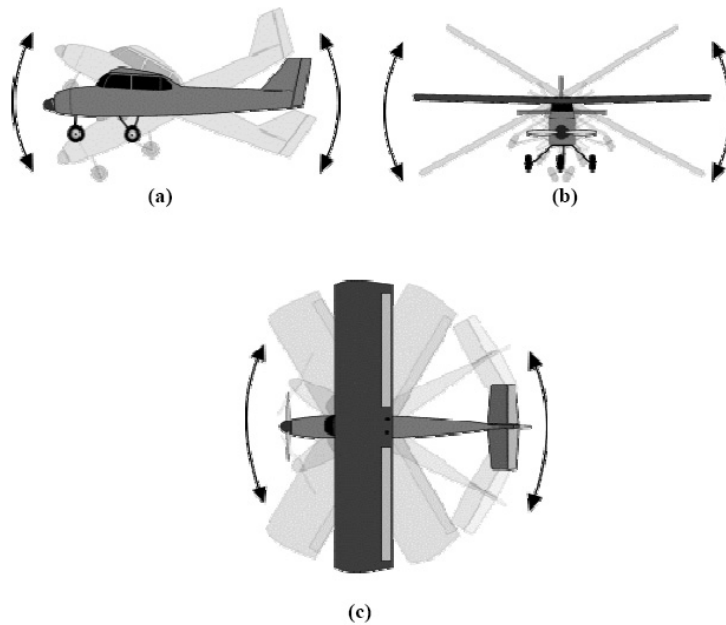


Figura 11 – Representação dos movimentos sofridos pela aeronave durante a aquisição de dados aerogeofísicos. (a) *Pitch*, (b) *Roll* e (c) *Yaw*. Retirado de LASA (2007).

### Resultados obtidos na avaliação sinal-ruído

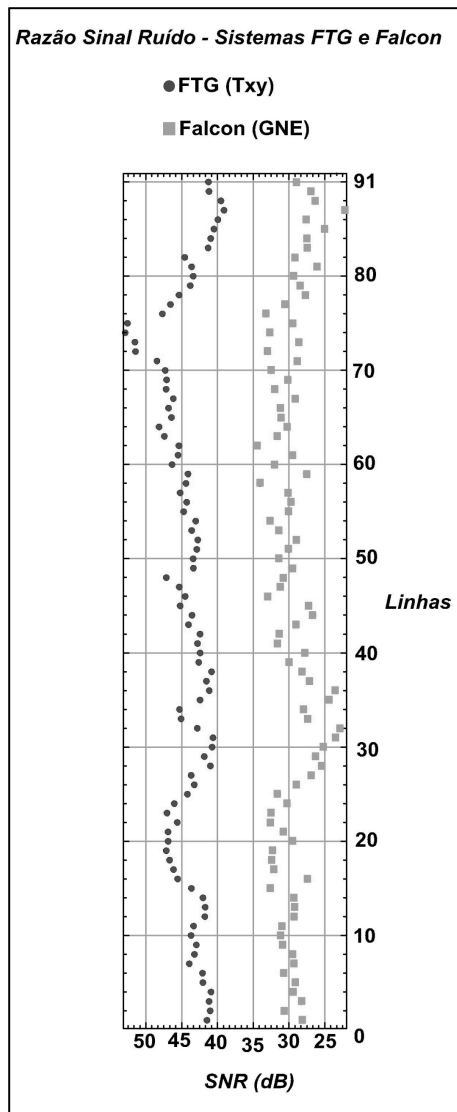
A Figura 12 apresenta o resultado do controle de qualidade das noventa linhas de voo sobre a área de Serra Leste. A avaliação da qualidade dos dados foi aplicada em cada uma dessas noventa linhas de voo da componente  $T_{xy}$  *Free-Air* do sistema 3D-FTG e da componente  $G_{NE}$  do sistema Falcon, pois a componente  $G_{NE}$  é a única que é efetivamente medida pelo sistema Falcon, logo para efeito comparativo utilizamos a componente  $T_{xy}$  *Free-Air* do sistema 3D-FTG. Além disso, estas componentes são influenciadas pelos efeitos das acelerações espúrias externas sofridas pela aeronave, ruídos e vibrações causadas por fatores relacionados ao clima, temperatura e pressão.

O resultado mostra que existe uma diferença significativa na comparação entre as componentes  $T_{xy}$  *Free-Air* e  $G_{NE}$ . A componente  $G_{NE}$  do sistema Falcon apresenta razão sinal-ruído entre 39 e 52 dB, já a componente  $T_{xy}$  do sistema 3D-FTG apresenta razão sinal-ruído entre 22 e 34 dB. Pode-se perceber que o nível de ruído e/ou sensibilidade dos sistemas 3D-FTG e Falcon são distintos.

O sistema 3D-FTG é composto por três gradiômetros e doze acelerômetros, o sistema Falcon é composto por somente um gradiômetro e oito acelerômetros dispostos horizontalmente. Esta diferença na configuração entre os dois sistemas gradiométricos pode explicar a diferença do resultado da razão sinal-



ruído, pois o sistema Falcon possui 8 acelerômetros dispostos horizontalmente em 1 único IGG, já o sistema 3D-FTG possui 12 acelerômetros dispostos em 3 IGGs com ângulo de 120° graus.



**Figura 12** – Valores da razão sinal-ruído das componentes  $T_{xy}$ ,  $Free-Air$  e  $G_{NE}$  das noventa linhas dos levantamentos aerogeofísicos da região de Serra Leste em Carajás.

Os resultados das comparações entre a razão sinal-ruído dos sistemas 3D-FTG e Falcon sugerem que o sistema 3D-FTG é sensível às altas frequências das acelerações provenientes da turbulência e das manobras *roll*, *pitch* e *yaw* da aeronave assim como dos contrastes de densidade das rochas. Os resultados sugerem também que o sistema Falcon sofre menos influência da turbulência e dos efeitos causados pelas manobras da aeronave, porém é sensível às acelerações provenientes dos contrastes de densidades das rochas.

## CONCLUSÃO

O planejamento da aquisição de dados de aerogravimetria gravimétrica 3D-FTG deve levar em consideração a topografia da região, pois o sistema 3D-FTG é muito sensível às acelerações verticais relacionadas à turbulência e às manobras *roll*, *pitch* e *yaw* da aeronave e o sistema Falcon é sensível às acelerações horizontais relacionadas à turbulência embora essas sejam continuamente gravadas e posteriormente corrigidas.

O controle de qualidade dos dados de aerogravimetria gravimétrica dos sistemas 3D-FTG e Falcon, mostrados aqui através da razão sinal-ruído se mostrou fundamental na etapa de controle de qualidade realizada pela VALE, durante a aquisição de dados, garantindo assim a melhor qualidade possível para os dados coletados. Na comparação entre as componentes  $T_{xy}$  *Free-Air* e  $G_{NE}$ , os resultados sugerem que o sistema 3D-FTG é sensível às acelerações provenientes dos contrastes de densidade das rochas assim como das manobras e turbulência associadas à aquisição de dados e o sistema Falcon é menos sensível às acelerações provenientes das manobras e turbulência associadas à aquisição de dados, porém é sensível às acelerações provenientes dos contrastes de densidades das rochas.

A diferença na configuração dos dois sistemas gravimétricos gravimétricos pode explicar a diferença do resultado da razão sinal-ruído, pois o sistema Falcon possui 8 acelerômetros dispostos horizontalmente em 1 único IGG, já o sistema 3D-FTG possui 12 acelerômetros dispostos em 3 IGGs com ângulo de 120° graus.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Vale S.A., especialmente à Diretoria de Ferrosos pela oportunidade de publicação deste trabalho.

## REFERÊNCIAS

- ABT TL. 2011. Detection of a Local Mass Anomaly in the Shallow Sub-surface by Applying a Matched Filter. Report no. 497, Geodetic Science, Ohio State University, Columbus, Ohio.
- BRAGA MA, GALBIATTI H, CARLOS DU, SOUSA RR & ALMEIDA T. 2009. Planejamento e Controle de Qualidade de Dados de Gradiometria Gravimétrica 3D-FTG. Revista Brasileira de Geofísica, 27(3): 447–457.
- COBURN GW & SCHNEIDER J. 2002. Using gravity gradiometry in seismic interpretation in pre-SDM. World Oil, 223(1): 69–72.
- DeGREGORIA A. 2010. Gravity Gradiometry and Map Matching: an Aid to Aircraft Inertial Navigation Systems. Master Thesis, Department of Aeronautics and Astronautics, Air Force Institute of Technology, Wright-Patterson AFB, Ohio. 130 p.

D'ERRICO J. 2007. Estimatenoise. Disponível em:

<[www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/16683-estimatenoise](http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/16683-estimatenoise)>.

Acesso em: 14 nov. 2011.

JEKELI C & ABT TL. 2010. The Statistical Performance of the Matched Filter for Anomaly Detection Using Gravity Gradients. Report no. 494, Geodetic Science, Ohio State University, Columbus, Ohio.

LASA. 2007. Relatório do Levantamento Aéreo de Magnetometria, Área "Cerra 9" – Minas Gerais, Volume 1.

MURPHY CA. 2004. The Air-FTG™ airborne gravity gradiometer system. In: LANE R (Ed.). Airborne Gravity. Abstracts from the ASEG-PESA Airborne Gravity 2004 Workshop, Geoscience Australia Record 2004/18, 7–8.

## NOTAS SOBRE OS AUTORES

**Henry Galbiatti.** Mestre em Geologia Estrutural e Mestre em Geotecnia pela Universidade Federal de Ouro Preto. Atualmente é Gerente-Geral de Exploração Mineral e Gestão Integrada de Ferrosos da VALE.

**Marco Antonio da Silva Braga.** Doutor e Mestre em Geologia com ênfase em Geofísica Aplicada pela Universidade Federal do Rio de Janeiro/Colorado School of Mines em 2009 e 2006, respectivamente. Possui MBA em Gerenciamento de Projetos pela Fundação Getúlio Vargas/Ohio University. Atualmente é Gerente de Área de Exploração Mineral de Ferrosos da VALE.

**Dionísio Uendro Carlos.** Bacharel e Mestre em Geofísica pelo IAG/USP. Trabalha na VALE, realizando controle de qualidade, processamento, interpretação e inversão de dados de 3D-FTG/FALCON para a exploração de minério de ferro. Desenvolve doutorado em inversão de dados de aerogravimetria gravimétrica 3D-FTG/FALCON no Observatório Nacional/Colorado School of Mines. Atualmente é coordenador de geofísica da área de Ferrosos da VALE.

**Rodrigo Rocha de Sousa.** Técnico em Geologia pelo CEFET-RN em 2003. Tendo especialização em SIG, atualmente trabalha para a VALE na Gerência de Exploração Mineral de Ferrosos.