

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE FÍSICA
BACHARELADO EM ENGENHARIA FÍSICA

Guilherme Martins Soares

**Tecnologias Quânticas na Análise Gravimétrica:
Prospecção e Estudo de Viabilidade**

Porto Alegre

2024

GUILHERME MARTINS SOARES

**Tecnologias Quânticas na Análise Gravimétrica:
Prospecção e Estudo de Viabilidade**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Faculdade de Engenharia Física da Universidade
Federal do Rio Grande do Sul, como exigência
para aprovação em TCC II.

Orientadora: Profa. Sandra Denise Prado

Porto Alegre

2024

Sumário

RESUMO.....	5
ABSTRACT.....	6
1 INTRODUÇÃO.....	7
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO.....	7
1.2 GRAVIMETRIA.....	9
1.2.1 Gravímetros Absolutos.....	10
1.2.2 Gravímetros Relativos.....	12
2 REFERENCIAL TEÓRICO:.....	13
2.1 PROBLEMA DE QUEDA LIVRE.....	13
2.2 INTERFEROMETRIA ATÔMICA.....	14
2.2.1 Transição Estimulada de Raman.....	15
2.2.2 Oscilações de Bloch.....	17
2.3 LASERS E GEOMETRIA PIRAMIDAL DO MOT.....	18
2.4 CARACTERIZAÇÃO DE PERFORMANCE DE GRAVÍMETROS.....	21
2.4.1 Sensibilidade (Precisão).....	21
2.4.2 Repetibilidade.....	21
2.4.3 Estabilidade.....	22
2.4.4 Acurácia.....	22
2.4.5 Desvio de Allan.....	23
3 METODOLOGIA:.....	24
5 CRONOGRAMA:.....	25
6 RESULTADOS.....	26
6.1 PROTÓTIPO DE BERKELEY.....	26
6.2 GRAVÍMETRO AQG(A01).....	29
6.3 GRAVÍMETRO AQG(B01).....	33
6.3.1 Experimento em Larzac.....	33
6.3.2 No Escopo do Projeto NEWTON-g.....	40
7 DISCUSSÃO DE RESULTADOS.....	47
8 BIBLIOGRAFIA.....	53

RESUMO

Este trabalho visa analisar a viabilidade econômica do uso de gravímetros quânticos na análise quantitativa do solo brasileiro. Para isso são analisados os mecanismos de funcionamento do aparelho conhecido como gravímetro quântico, bem como a teoria por trás destes mecanismos, além de comparar o seu desempenho com as tecnologias de gravímetros já aplicadas no território brasileiro. Outra coisa que é analisada são quais os possíveis escopos de uso, e se essa nova tecnologia permite um uso mais abrangente ou não. A partir disso, espera-se obter um estudo que seja capaz de embasar ou rejeitar a possibilidade de compra de determinado equipamento por entidades governamentais ou privadas, e que seja de fácil compreensão não apenas ao engenheiro físico, mas também a outros engenheiros e outras áreas que possam vir a se beneficiar de tal estudo.

Palavras-chave: Gravimetria Quântica, Interferometria Atômica, Metrologia Quântica, Espectroscopia de Raman.

ABSTRACT

This work aims to analyze the economic feasibility of using quantum gravimeters in the quantitative analysis of Brazilian soil. To do this, we examine the functioning mechanisms of the device known as a quantum gravimeter, as well as the theory behind these mechanisms, in addition to comparing its performance with the gravimeter technologies already applied in Brazilian territory. Another aspect under scrutiny is the possible scopes of use and whether this new technology allows for a more extensive application or not. From this, we hope to obtain a study that can either support or reject the possibility of procurement by governmental or private entities, and that is easily understandable not only to physicists but also to other engineers and professionals in various fields that may benefit from such a study.

Keywords: Quantum Gravimetry, Atomic Interferometry, Quantum Metrology, Raman Spectroscopy.

1 INTRODUÇÃO

Este trabalho visa mapear as primeiras iniciativas brasileiras que visam a inserção do Brasil no mercado de uso e/ou produção de tecnologias quânticas, relacionadas com a chamada Segunda Revolução Quântica. O Brasil tem produção acadêmica relevante em áreas correlatas, mas ainda está bastante distante tanto da produção quanto do uso dessas tecnologias. Além da necessidade de se fomentar a formação de engenheiros com conhecimento sólido em tecnologias que usam a Física Quântica dessa segunda revolução tecnológica será também necessário estabelecer prioridades, visto que essa tecnologia requer grandes investimentos a longo prazo.

Tendo feito um mapeamento preliminar de eventos brasileiros envolvendo empresas e meio acadêmico, faremos uma compilação das principais propostas que darão norte a investimentos e aberturas de *startups*. Faremos um estudo da viabilidade do uso do gravímetro quântico na agricultura, levantando-se também possíveis benefícios para outras áreas, visto que há uma escassez de dados gravimétricos no Rio Grande do Sul, para exemplificar. Para um mapeamento do RS, seria necessário cerca de um ano de trabalho com um gravímetro absoluto convencional. A medida gravitacional mais próxima que temos é em Santa Maria, e quanto mais longe estamos do ponto de medida absoluta, mais imprecisos os resultados das medidas obtidas com gravímetros relativos. O problema é que não há gravímetros absolutos suficientes tanto no Brasil quanto na América do Sul (FLORÊNCIO, 2023).

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

No dia três de maio de 2021, aconteceu o 3º Ciclo ILP-FAPESP de Ciência e Inovação com o título Tecnologias Quânticas Emergentes. Dentre outros participantes, destacam-se as palestras do Professor Luiz Davidovich da Universidade Federal do Rio de Janeiro e do Professor Paulo Nussenzeig da Universidade de São Paulo.

Para os propósitos do presente projeto, convém destacar das falas do Professor Davidovich que “Cerca de 30% do PIB norte-americano são baseados em invenções tornadas possíveis pela Mecânica Quântica, de semicondutores em chips de computadores a lasers em

reprodutores de CD's e DVD's, aparelhos de ressonância magnética em hospitais, e muito mais.”

A questão é que no final do século XX surge uma segunda onda das tecnologias quânticas, também chamada de Segunda Revolução Quântica baseada nos fenômenos quânticos de partículas únicas ou algumas poucas partículas como átomos e íons aprisionados, eletrodinâmica quântica em cavidades e fontes de fótons únicos. A promessa dessa manipulação bem sucedida de entes quânticos individuais poderá revolucionar os setores de comunicação (criptografia quântica), computação (computadores quânticos), simulação (softwares quânticos) e metrologia quântica.

Na metrologia quântica, convém destacar o uso de um único átomo para mapear a estrutura de uma biomolécula ou o acelerômetro que dispensa GPS para navegação, além do gravímetro quântico, que pode mapear lençóis de água e de óleo, por exemplo. O Brasil tem uma pesquisa bastante forte na área de Óptica Quântica que tem promovido a formação de pesquisadores com trabalhos relevantes na área de informação quântica (criptografia quântica, em especial), mas se discute no encontro o potencial que os grupos de pesquisa brasileiros têm para promover a inserção do país nessa revolução tecnológica, em especial, no campo da metrologia quântica com aplicações na agricultura, saúde, energia, transporte e infraestrutura.

É o Professor Paulo Nussenzveig que melhor defende a ideia de que o Brasil concentre seus esforços na área de sensoriamento quântico, pois esse seria um caminho de uma iniciativa em tecnologias quânticas na qual o Brasil pode ainda entrar em uma competição com algum sucesso. Ele menciona a importância do agronegócio no Brasil e como o Brasil poderia se beneficiar de certas de tecnologias quânticas como o gravímetro quântico no setor agrícola.

O Brasil já tem uma patente de um gravímetro baseado em interferometria atômica (3º Ciclo ILP-FAPESP) e como ressalta Nussenzveig, o Brasil precisa fomentar a interação e parcerias do setor acadêmico com o setor privado para fomentar o interesse e investimento nas tecnologias quânticas, quer seja como comprador, quer seja como produtor dessas tecnologias.

Tendo São Paulo na liderança acadêmica e a FAPESP como uma dentre as possíveis agências fomentadoras de parcerias universidades – setor-privado, pesquisadores brasileiros, americanos e holandeses organizaram o evento internacional “Tecnologias Quânticas para São Paulo, Brasil e América Latina”(TERRA, 2023)(MOREIRA, 2023), realizado pelo Instituto Principia e o ICTP-SAIFR, que é um instituto de física teórica associado ao IFT-

Unesp. O evento que ocorreu entre 30/01/23 a 16/02/2023, reuniu membros da academia e da indústria para debater o estado da arte do desenvolvimento de tecnologias quânticas na região, além de delimitar metas e estratégias para estimular o avanço na área.

Nesse evento, novamente, discute-se as perspectivas do uso de tecnologias quânticas para a agricultura e saúde. Na agricultura, destaca-se o uso de sensores quânticos, dentro eles, o gravímetro, que permite, por exemplo, a identificação dos tipos de solo e sedimentos sem necessidade de escavação, ou ainda, encontrar objetos enterrados ou submersos a uma certa profundidade. Em comunicação pessoal com os Prof. Marcelo Terra Cunha e Phillippe Courteille, soubemos do envolvimento da EMBRAPA através da pesquisadora Débora Milori, em projetos que visam estudar a viabilidade do uso de gravímetros quânticos no estudo de compactação do solo, questão importante para o efeito estufa, porque cerca de 75% do carbono que não está nos oceanos, está no solo [6].

1.2 GRAVIMETRIA

A gravimetria pode ser definida como um conjunto de métodos e procedimentos no estudo da aceleração da gravidade. O valor da aceleração da gravidade varia dependendo da distância da medição ao centro da Terra, ainda que a densidade de massas situadas no interior e no exterior da crosta terrestre também afetam este valor. Este método é de primordial importância em diversas áreas: na Geodésia (estudo da forma do geóide e dimensões da Terra), na geologia (investigação de estruturas geológicas) e na geofísica (prospecção mineral) (AQUINO, 2017). Em homenagem à Galileu, a Unidade de Gravidade no c.g.s é chamada gal ($1 \text{ gal} = \text{m/s}^2$). A gravidade média da Terra é 980 gals.

Comparado com os primitivos dispositivos pendulares que foram usados nos primórdios da gravimetria, os equipamentos que temos agora, os gravímetros, são capazes de uma precisão muito maior e continuam evoluindo, trazendo consigo novas possibilidades de uso. Porém, o que se mantém é um consenso de que há duas grandes modalidades de mensuração da gravidade terrestre: Mensuração absoluta e mensuração relativa.

No Brasil, a falta de uma política gravimétrica nacional tem gerado alguns inconvenientes correlacionados à duplicidade de esforços e à designação de diretrizes concatenadas (CASTRO JUNIOR; GUIMARÃES; FERREIRA, 2018)

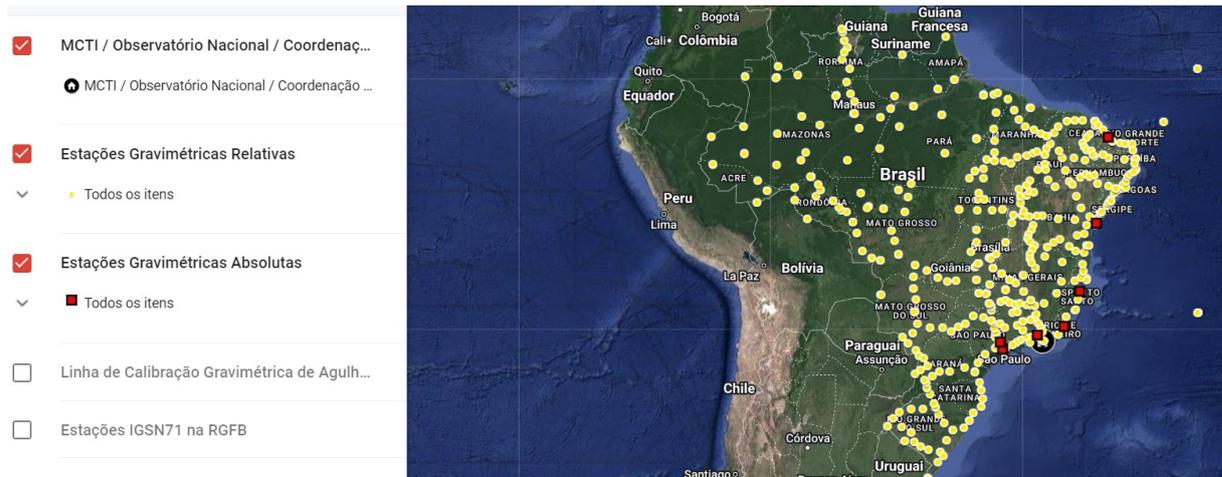


Figura 1: Rede Gravimétrica Fundamental Brasileira
 Fonte: <https://www.gov.br/observatorio/pt-br>

Outras organizações brasileiras que podem ser mencionadas devido ao seu trabalho na obtenção de medidas gravimétricas são: a Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural, e Biocombustíveis (ANP), que herdou o acervo gravimétrico da Petrobrás e que em 2009 criou o Banco Nacional de Dados Gravimétricos (BNDG), a Universidade do Paraná, a Universidade de São Paulo, e o próprio IBGE, que muito contribuíram para a densificação da malha gravimétrica em diversas regiões.

Hoje o Brasil exerce um papel de destaque no continente Sul-Americano. Nos últimos quinze anos, equipes brasileiras têm atuado junto à maior parte dos países vizinhos, ajudando no estabelecimento dos respectivos sistemas gravimétricos nacionais e repassando orientações metodológicas de trabalho. Profissionais ilustres como Camil Gemael, recém-falecido, e Denizar Blitzkow, exemplos de devoção às lides gravimétricas, levaram ao país e ao mundo contribuições pioneiras e significativas, permitindo que jovens valores doravante assumam, em condições mais propícias, as rédeas técnico-científicas reivindicadas pela gravimetria (CASTRO JUNIOR; GUIMARÃES; FERREIRA, 2018).

1.2.1 Gravímetros Absolutos

Os gravímetros absolutos (Fig. 2) normalmente são baseados no princípio de queda livre, para permitir a determinação da aceleração de gravidade com alta precisão e reprodutibilidade. A observação do corpo de prova em queda livre é feita utilizando interferometria para a medida das distâncias e relógios atômicos ou de quartzo como contadores de tempo.

Os gravímetros absolutos atualmente disponíveis não são adequados para monitoramento contínuo devido ao número de peças mecânicas com um tempo de vida limitado.(COOKE; CHAMPOLLION; LE MOIGNE, 2021) Isso faz com que necessitem de reparos constantes, além de operadores especialistas com um alto nível de habilidade técnica. Porém, seu uso é fundamental para estabelecer uma rede mundial de estações de valores absolutos, para calibração e padronização dos valores obtidos com gravímetros relativos. As medições são normalmente realizadas sob condições controladas de temperatura e umidade, e repetidas diversas vezes (tipicamente de 50 a milhares de vezes, dependendo do equipamento).

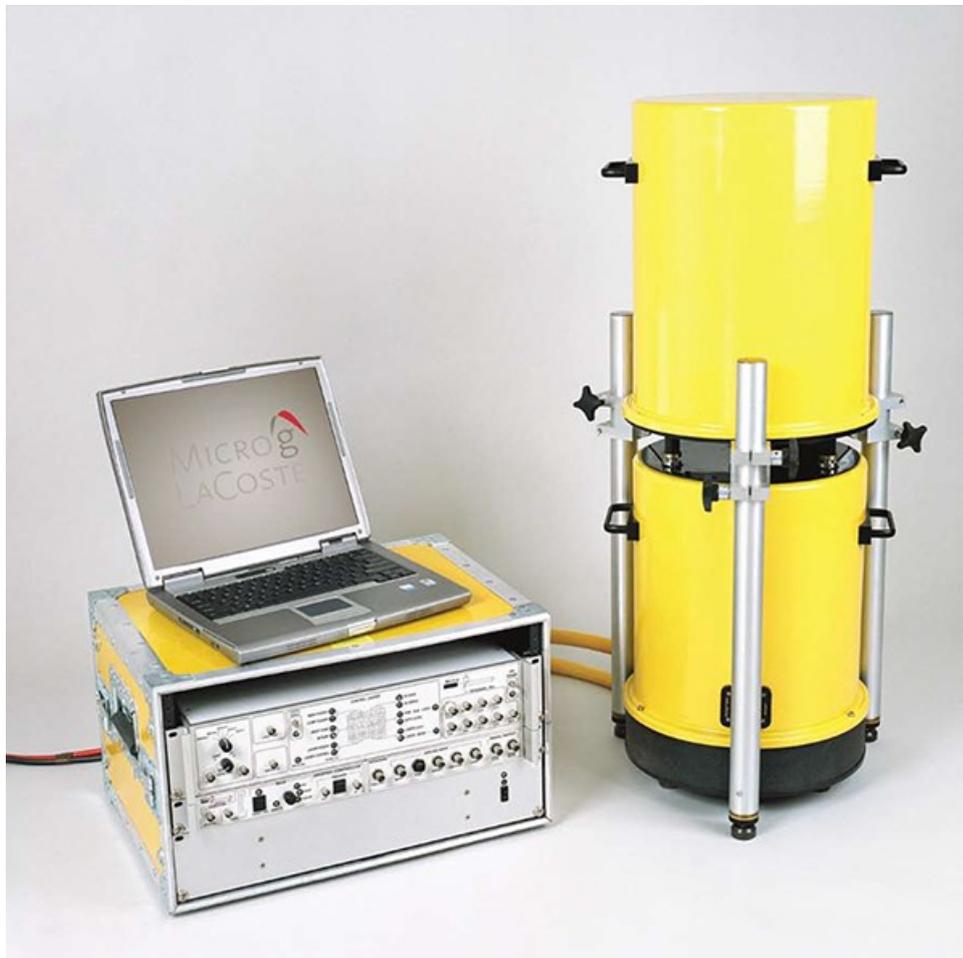


Figura 2: Gravímetro Absoluto da marca Microg Lacoste, modelo A10
Fonte: <https://geoteknik.com.pe/producto/gravimetro-absoluto/>

1.2.2 Gravímetros Relativos

Como a própria denominação sugere, nas determinações relativas são medidas diferenças de “g” ao invés de grandezas absolutas. O princípio de funcionamento da maior parte desses instrumentos pressupõe que o peso de um corpo, sustentado por um sistema elástico, seja contraposto à força de gravidade. Assim que o sistema entra em equilíbrio, as observações podem ser realizadas. Desta forma, medições empreendidas entre dois ou mais sítios permitem que as correspondentes diferenças de gravidade sejam deduzidas.

Embora menos precisos do que os absolutos, via de regra são mais leves, portáteis e consideravelmente mais baratos.

Para que essas medições diferenciais ou relativas façam sentido no contexto geodésico, torna-se imprescindível que haja, ao menos, uma estação de referência com o valor de “g” conhecido, inserida nos circuitos gravimétricos. Tais estações fazem parte das redes de referência de gravidade. As redes de referência ditas relativas, menos acuradas do que as redes absolutas, são determinadas a partir de gravímetros relativos.



Figura 3: Gravímetro relativo da marca Scintrex modelo CG-5
Fonte: <https://georeva.eu/en/produit/cg-5-autograv-gravity-meter/>

2 REFERENCIAL TEÓRICO:

Aqui serão colocadas as fórmulas utilizadas no cálculo da gravidade no caso convencional e no caso quântico.

2.1 PROBLEMA DE QUEDA LIVRE

A Primeira Lei de Newton utilizada para calcular o módulo da atração gravitacional existente entre dois corpos diz que esses corpos se atraem com uma força de intensidade diretamente proporcional ao produto das massas e inversamente proporcional ao quadrado da distância que os separa (“Gravitação Universal”, [s.d.]

$$F = G \frac{Mm}{r^2} \quad (2.1)$$

Onde r é a distância entre os centros de massa das duas partículas (o raio do planeta Terra no caso de uma partícula em sua superfície), M é a massa da Terra, m a massa de outra partícula, e G a constante da gravitação universal de valor $6,67428 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 \text{ kg}^{-2}$. Como o método gravimétrico se baseia na aceleração da gravidade e não na força gravitacional, precisamos obter a aceleração com que m é atraído por M . Isso é calculado utilizando a Segunda Lei de Newton

$$F = m \cdot a = m \cdot g = G \frac{Mm}{r^2}, \quad (2.2)$$

portanto

$$g = G \frac{M}{r^2} \quad (2.3)$$

O problema desta equação é que ela pressupõe que o planeta é uma esfera perfeita e homogênea, porém a Terra tem a forma de uma esfera achatada devido a sua rotação. Isso faz com que regiões mais próximas do Equador estejam mais distantes do centro da Terra, causando uma diferença no valor da gravidade (AQUINO, 2017). Portanto reescrevemos a equação acima da seguinte forma:

$$g = G \int_V \frac{dM}{r^2} \quad (2.4)$$

Outro problema que precisa ser levado em conta é que a distribuição de materiais na superfície e na crosta não é feita de maneira homogênea, isso torna o campo gravitacional da Terra irregular.

O geóide é tido como a superfície real que leva em conta essas distribuições, e a relação entre esse formato da Terra e a variação gravitacional é definida matematicamente pela Fórmula Internacional da Gravidade:

$$g = 978,031846 (1 + 0,05278895 \sin^2 \Phi + 0,000023462 \sin^4 \Phi) \text{ gals} \quad (2.5)$$

Onde Φ é a latitude, 978,031846 é o valor da gravidade no equador (ou seja elevação = 0) em gals (“Normal Gravity Formula”, [s.d.]).

2.2 INTERFEROMETRIA ATÔMICA

O princípio básico de funcionamento de um gravímetro absoluto quântico é o mesmo de um gravímetro absoluto de queda livre, ou seja, um raio laser de referência vertical realiza uma sondagem da aceleração de um corpo de prova em queda livre no vácuo. A diferença aqui é que o corpo de prova utilizado são átomos resfriados por laser. Essa mudança reduz o número de peças mecânicas se movendo no vácuo durante o uso do equipamento, o que leva à um maior tempo de operação contínua, além de que átomos são objetos fundamentais com propriedades bem entendidas (CARBONE et al., 2020).

De acordo com (MÉNORET et al., 2018) em seu relato de operabilidade do gravímetro quântico AQG A01, o aparelho realiza medidas de gravidade a partir da interferometria de onda-matéria utilizando transições estimuladas de Raman de 2 fótons em uma nuvem de 10^7 átomos de Rubídio (^{87}Rb). Essa nuvem é carregada em uma *magneto-optical trap* (MOT) onde ela é resfriada até uma temperatura abaixo de $2\mu\text{K}$ via laser, após isso são selecionados via microondas os átomos no estado $|5^2\text{S}_{1/2}, F = 1, m_F = 0\rangle$ e colocados em um estado de queda-livre.

2.2.1 Transição Estimulada de Raman

No período de queda-livre é aplicada uma sequência de 3 pulsos Raman ($\pi/2 - \pi - \pi/2$) contrapropagantes em uma geometria similar à Mach-Zender por um período de 10, 20 e 10 μ s, e entre esses períodos temos um período de interrogação de 60ms. A diferença que temos na configuração utilizada nos gravímetros quânticos em geral é que os raios laser não são perpendiculares ao movimento dos átomos, mas sim paralelos, pois é isso que permite medir a aceleração do átomo pela gravidade. (Fig. 4)

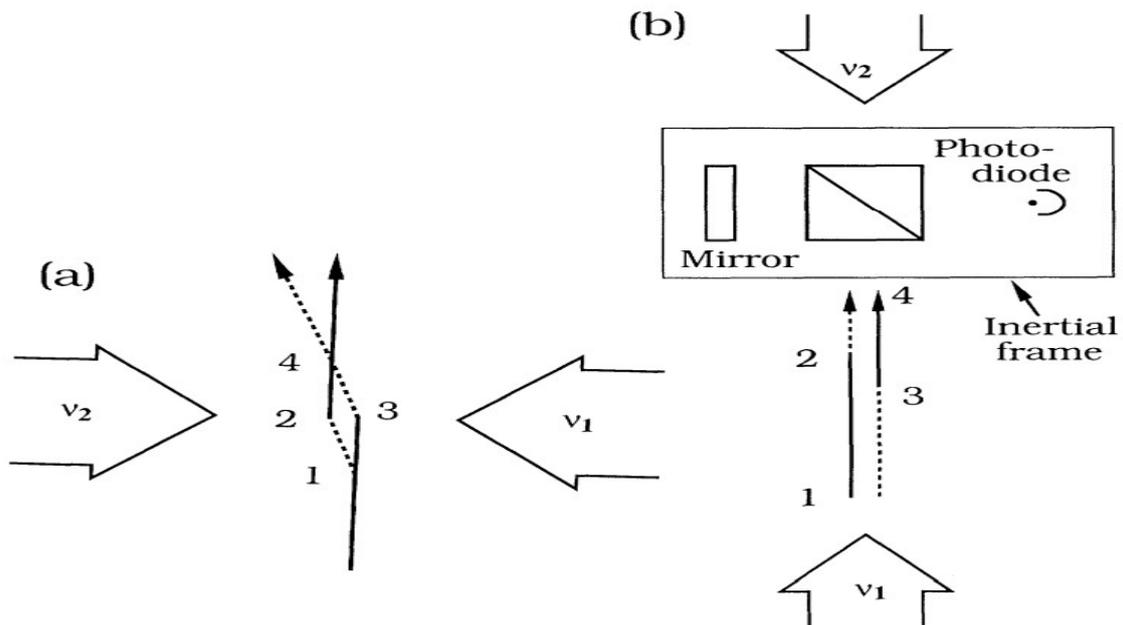


Figura 4: Diagrama com as duas configurações de laser, perpendicular (a) e paralela (b)
Fonte: (KASEVICH; CHU, 1991)

Nos interferômetros de pulso $\pi/2 - \pi - \pi/2$ (Fig. 5), o primeiro pulso ($\pi/2$) leva os átomos de um estado inicial $|g, p\rangle$ para uma superposição de estados $|g, p\rangle$ e $|e, p + \hbar k_{\text{Eff}}\rangle$ onde k_{Eff} é o valor do vetor de onda da transição de Raman, e é definido como:

$$k_{\text{Eff}} = k_1 - k_2 \quad (2.6)$$

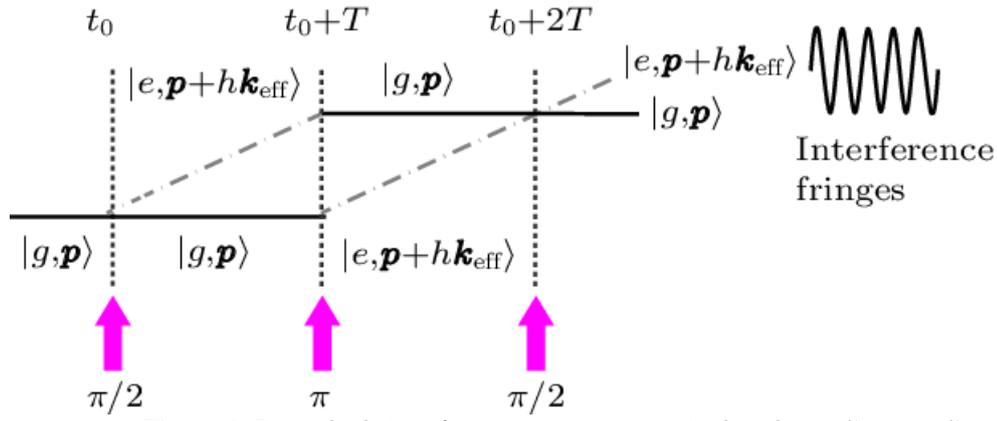


Figura 5: Exemplo de interferômetro com seqüência de pulsos $\pi/2 - \pi - \pi/2$.

Fonte: (周林, Zhou & (熊宗元, Xiong & (杨威, Yang & Tang, Biao & (彭文翠, Peng & (王一波, Wang & (许鹏, Xu & (王谨, Wang & (詹明生, Zhan. (2011). *Measurement of Local Gravity via a Cold Atom Interferometer*. *Chinese Physics Letters*. 28. 013701. 10.1088/0256-307X/28/1/013701.

Já o 2º pulso (π) é aplicado para fazer com que os átomos no estado inicial $|g, p\rangle$ sejam excitados para o estado $|e, p + \hbar k_{\text{eff}}\rangle$ enquanto os que se encontram no estado excitado são transferidos para o estado inicial $|g, p\rangle$, por fim no 3º pulso ($\pi/2$) o pacote de ondas dos átomos são recombinados.

A propagação do estado de entrada de um interferômetro pode ser avaliada utilizando uma multiplicação de matrizes que representem a geometria Mach-Zender e o tempo de interrogação T (TACKMANN, 2013). Assim a saída é calculada:

$$\begin{pmatrix} a_e(2T+4\tau_{\frac{\pi}{2}}) \\ a_g(2T+4\tau_{\frac{\pi}{2}}) \end{pmatrix} = M_{\frac{\pi}{2}} \cdot M_T \cdot M_{\pi} \cdot M_{\frac{\pi}{2}} \cdot \begin{pmatrix} a_e(0) \\ a_g(0) \end{pmatrix} \quad (2.7)$$

Onde $a_g(t)$ e $a_e(t)$ são as amplitudes da probabilidade de encontrar o átomo no estado fundamental ou no estado excitado, respectivamente. A medida do interferômetro é feita a partir de um estado de entrada $a_g(0)=1$ e $a_e(0)=0$. A proporção de átomos no estado excitado é dado por

$$P_e = |a_e(2T+4\tau_{\frac{\pi}{2}})| \quad (2.8)$$

Para o caso do gravímetro quântico AQG o estado excitado é $|5^2S_{1/2}, F = 2, m_F = 0\rangle$, e a proporção de átomos nesse estado fica

$$P_e = \frac{1}{2} \times (1 - C \cos(\Phi)) \quad (2.9)$$

onde C é o contraste das franjas e Φ o deslocamento de fase interferométrica. O contraste é um valor menor que 1 por conta de efeitos de seleção de velocidade que ocorrem durante os pulsos de Raman. Já o deslocamento de fase fica

$$\Phi = (k_{eff} g - 2 \pi \alpha) T^2 \quad (2.10)$$

onde $k_{eff} = 4 \pi / \lambda \approx 16 \times 10^6 \text{m}^{-1}$ é o vetor de onda efetivo da transição de dois fótons, T é o tempo de interrogação e $\alpha \approx 25 \text{MHz.s}^{-1}$ é um *chirp* de frequência utilizado nos lasers Raman para compensar o efeito Doppler, de maneira a garantir que o instrumento opera com um deslocamento de fase quase nulo e manter-se na franja central do interferômetro. Com isso obtemos

$$g = 2 \pi \frac{\alpha}{k_{eff}} \quad (2.11)$$

São definidos um contraste de 40% (0.4) e uma razão sinal-ruído de detecção de 150. Assim obtemos uma razão sinal-ruído efetiva (SNR) de 60. Com esses valores podemos calcular a sensibilidade do dispositivo

$$\frac{\delta g}{g} = \frac{1}{k_{eff} g T^2 SNR} \quad (2.12)$$

2.2.2 Oscilações de Bloch

Outra forma de calcular a aceleração da gravidade a partir de uma nuvem de átomos é utilizando o método de Oscilações de Bloch. Na verdade, qualquer outro método que, assim como a transição estimulada de Raman, consegue dividir uma população de átomos em dois níveis de energia diferentes, pode ser usado para realizar o cálculo da aceleração gravitacional.

Oscilações de Bloch são um fenômeno inicialmente observado em elétrons situados em redes cristalinas periódicas e sob a influência de um campo elétrico externo. Essa interação entre o campo e o potencial periódico da rede gera um movimento oscilatório do elétron à medida que ele acelera e desacelera pela rede cristalina, fazendo com que sua função de onda se espalhe por todo o sistema.

Acontece que tal fenômeno também é possível de ocorrer em nuvens de átomos ultrafrios, que passam a apresentar um comportamento oscilatório. Elas são conhecidas como ondas de matéria, e as primeiras observações deste fenômeno foram em 1996 quando o grupo de C. Salomon conseguiu utilizar a oscilação de Bloch para acelerar átomos de Césio (CLADÉ, 2015).

Existem duas maneiras de se medir a gravidade utilizando oscilações de Bloch. A primeira consiste em utilizar um *optical lattice* onde se encontram os átomos que queremos medir submetidos a uma força constante F (nesse caso a gravidade). Quando a profundidade desse *lattice* é grande o bastante, a função de onda atômica passa a ter um comportamento periódico com um período T_{Bloch} dado por:

$$T_{Bloch} = \frac{2\hbar k}{F} \quad (2.13)$$

A medida deste período permite portanto, medir a força aplicada nos átomos.

A outra maneira é utilizar as oscilações de Bloch para compensar a queda livre dos átomos em um gravímetro que mede a aceleração dos mesmos. Sabe-se que cada oscilação de Bloch transfere um momentum conhecido de $2\hbar k$ aos átomos, assim é possível utilizar um maior tempo de integração sem precisar de uma trajetória mais longa.

Um dos experimentos citados em (CLADÉ, 2015) utiliza este método com 50 oscilações de átomos de rubídio. A velocidade dos átomos após aplicadas as oscilações de Bloch é dada pela fórmula:

$$v(t) = gt - 2N \frac{\hbar k}{m} = g(t - NT_{Bloch}) \quad (2.14)$$

Assim, utilizando um sensor de velocidade para medir a velocidade dos átomos, e tendo o número de oscilações é possível obter o valor da gravidade.

2.3 LASERS E GEOMETRIA PIRAMIDAL DO MOT

Uma das características mais importantes dos gravímetros quânticos mais portáteis, é a existência de um MOT (Magneto Optical Trap) utilizando uma geometria piramidal. Tal geometria permite que um único laser realize o que tipicamente precisa de 9 raios laser

independentes, o que implica em uma drástica redução de sua complexidade, e tamanho (BODART et al., 2010).

Para entender melhor esses ganhos é necessário explicar como o MOT funciona. O MOT é uma armadilha óptica de força espontânea consistida de um campo magnético espacialmente não-uniforme e três pares ortogonais de raios laser contrapropagantes com momentos angulares opostos (LEE et al., 1996). No MOT, as orientações das respectivas polarizações são determinadas pela orientação das bobinas do gradiente do campo magnético. O feixe longitudinal que se propaga através da célula ao longo do eixo da bobina deve ter polarização circular oposta, enquanto os dois feixes transversais que se propagam perpendicularmente ao eixo devem ter a mesma polarização circular;

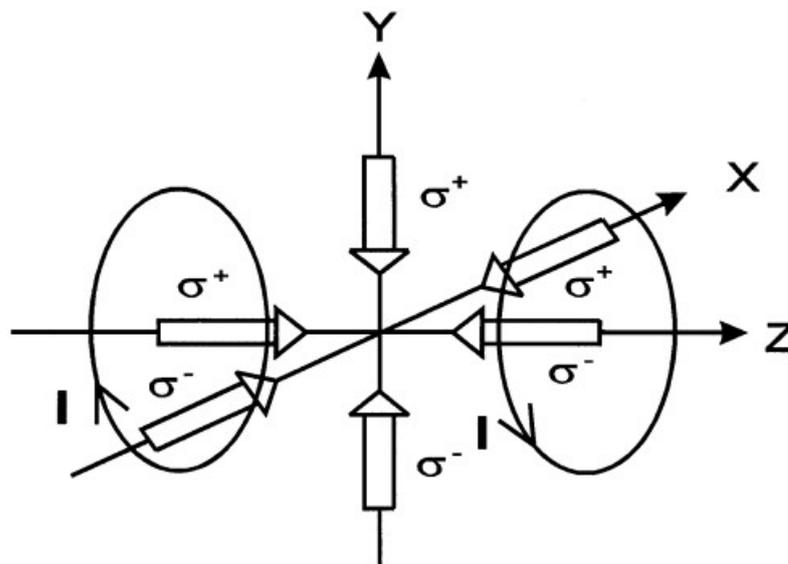


Figura 6: Configuração de polarização para um MOT convencional de 6 feixes

Fonte: Lee et al., 1996

No experimento realizado por Lee et al, foi proposto substituir três lâminas de quarto de onda por 3 espelhos retrorefletores de ângulo reto. Fazendo isso torna-se possível utilizar um único feixe laser largo o bastante para incidir completamente sobre a área piramidal oca, gerando automaticamente os três pares de feixes contrapropagantes em seu interior, bem como as polarizações e direções necessárias para os feixes refletidos funcionarem como em um MOT convencional. Durante este experimento estima-se que foi possível prender aproximadamente 1.2×10^7 átomos comparado aos 3×10^7 átomos presos em um MOT convencional. Mais detalhes sobre o experimento, laser utilizado, preparações extras no

espelho retrorefletor e condições experimentais se encontram no material fonte devidamente referenciado na bibliografia deste trabalho.

Já no experimento realizado por Bodart et al., este que serviu de base para tudo o que foi utilizado nos gravímetros da AQG, o feixe laser além de ser usado no aprisionamento de átomos, também serve para causar as transições de Raman, e a detecção de população ao final do processo interferométrico.

O feixe laser utilizado neste experimento possui uma configuração específica para que funcione da maneira correta, e neste parágrafo algumas de suas características são rapidamente apresentadas. Ele é composto por duas frequências, cuja diferença corresponde à transição de micro-ondas dos níveis fundamentais do Rubídio (ou seja, 6,8 GHz). Dois lasers de diodo de cavidade estendida são ajustados, respectivamente, próximos às transições $|5S_{1/2}, F = 1\rangle \rightarrow |5P_{3/2}\rangle$ e $|5S_{1/2}, F = 2\rangle \rightarrow |5P_{3/2}\rangle$ a 780nm. As frequências dos lasers são controladas independentemente graças à um sistema eletrônico versátil, baseado em medições de *beat-note* e conversão de frequência para tensão. Este sistema permite mudanças rápidas nas frequências do laser, desde muito próximas à ressonância para a fase de resfriamento até uma dessintonia de 151MHz com relação a $|5P_{3/2}, F' = 1\rangle$ para o interferômetro. Esses dois feixes de laser são sobrepostos em um cubo divisor de feixes polarizante e finalmente injetados na mesma fibra mantenedora de polarização com uma proporção de 1:4. Na saída da fibra, o feixe possui uma potência total de 50 mW e é polarizado circularmente. Ele é colimado com uma cintura de 14 mm (raio $1/e^2$) antes de entrar na câmara de vácuo pela parte inferior.

A pirâmide invertida foi fabricada a partir de dois cubos de canto de vidro e dois prismas retangulares isósceles de vidro colados juntos, sobre um pedestal. Os cubos de canto são colados nas quatro arestas para obter ângulos retos entre as faces opostas dentro da pirâmide. Controlamos o ângulo para ser de 90° com precisão de um minuto de arco. A base da pirâmide é um quadrado de área $20 \times 20 \text{ mm}^2$. A pirâmide é fixada à flange superior apontando para cima. As faces internas são revestidas dielétricamente para máxima reflexão a 45° e para um deslocamento de fase igual entre as duas polarizações ortogonais. Assim, da mesma maneira que no experimento de Lee, foi possível obter a configuração de polarização necessária com apenas um laser. Além disso, fora da pirâmide, a configuração do campo a laser permite acionar transições Raman de seleção de velocidade vertical σ^+/σ^+ ou σ^-/σ^- necessárias para realizar o interferômetro e a detecção.

2.4 CARACTERIZAÇÃO DE PERFORMANCE DE GRAVÍMETROS

Para que a confiabilidade de um instrumento de medição como o gravímetro seja confirmada, é necessário que sua performance seja medida a partir de sua sensibilidade, repetibilidade, estabilidade e acurácia. Aplicando esse mesmo padrão de performance para diferentes tipos de gravímetros também é possível compará-los.

2.4.1 Sensibilidade (Precisão)

Sensibilidade se refere a habilidade de um instrumento de detectar e medir mudanças mínimas na aceleração gravitacional de uma determinada localização. É uma quantificação do quão responsivo é um gravímetro frente à variações gravitacionais. Normalmente expressada em termos da capacidade do instrumento de medir mudanças da aceleração da gravidade (normalmente em μgals) por unidade de mudança em alguma outra variável como tempo ou distância.

A sensibilidade é dependente destes quatro elementos: a qualidade do instrumento, o ruído no local onde a gravidade está sendo medida, a quantidade de tempo pelo qual essas medidas são feitas, e a frequência de banda do sinal e/ou ruído (NIEBAUER, 2015).

Um gravímetro com alta sensibilidade consegue detectar mudanças sutis na força gravitacional, tornando-o capaz de capturar maiores detalhes do perfil gravitacional de uma determinada localização. A sensibilidade de um gravímetro determina sua habilidade de detectar anomalias gravitacionais que podem indicar estruturas subterrâneas, depósitos minerais, etc.

2.4.2 Repetibilidade

No contexto de instrumentos de mensuração, a repetibilidade se refere à habilidade de um instrumento produzir medidas consistentes e altamente similares umas às outras quando essas medidas são obtidas sob as mesmas condições, ou seja repetibilidade mostra o quanto os resultados de medidas repetidas casam uns com os outros.

Para um dispositivo como o gravímetro que é utilizado para medir a aceleração da gravidade em um local específico, a repetibilidade indica o quão bem um gravímetro produz medidas idênticas quando feitas no mesmo local sob as mesmas condições ambientais.

Um gravímetro com alta repetibilidade significa que as medidas obtidas com ele serão confiáveis. Essa confiabilidade na consistência das medições é essencial para pesquisas científicas, estudos geofísicos entre outras aplicações.

2.4.3 Estabilidade

Estabilidade refere-se à capacidade do instrumento de produzir medições consistentes e confiáveis ao longo do tempo e sob diversas condições ambientais. Um gravímetro estável manterá seu desempenho e precisão sem variações significativas ou flutuações em suas leituras.

A estabilidade é uma característica crucial para gravímetros, pois garante a confiabilidade a longo prazo das medições de gravidade. Se um gravímetro não for estável, suas leituras podem variar ou sofrer desvios ao longo do tempo, tornando difícil confiar nos dados que ele produz.

Vários fatores podem influenciar a estabilidade de um gravímetro, incluindo mudanças de temperatura, vibrações mecânicas e outros fatores ambientais. Os gravímetros frequentemente passam por procedimentos de calibração e manutenção para ajudar a manter sua estabilidade e garantir que forneçam medições precisas e consistentes.

2.4.4 Acurácia

A acurácia de uma medição gravitacional descreve o quanto ela pode ser considerada correta em termos absolutos, e se refere à incerteza de uma medida em relação à um padrão absoluto. Um gravímetro absoluto mede diretamente a aceleração gravitacional em termos de unidades fundamentais de tempo(segundos) e espaço(metros), valores esses definidos e atualizados por laboratórios de metrologia ao redor do mundo.

A dificuldade da acurácia se encontra no fato de que para determinar a acurácia absoluta de um instrumento, é necessária uma versão ainda melhor ou equivalente deste instrumento (NIEBAUER, 2015). Ocasionalmente acontecem eventos onde vários

gravímetros absolutos são trazidos à um mesmo local para comparar seus valores e garantir suas acurácias. Para gravímetros absolutos do mesmo tipo tais medidas tendem a ser próximas, porém há uma discrepância na variância de mais de $10\mu\text{gals}$ em comparações entre gravímetros absolutos de diferentes tipos.

Deve-se notar também que gravímetros relativos só passam a ter uma acurácia intrínseca após serem calibrados por um gravímetro absoluto devido ao fato de não medirem unidades fundamentais ligadas à padrões metrológicos.

2.4.5 Desvio de Allan

O desvio de Allan, também conhecido como variância de Allan, é uma medida estatística usada para avaliar a estabilidade ou características de ruído de um sinal contínuo ou série de dados ao longo do tempo. O desvio de Allan é calculado extraindo a raiz quadrada da variância de Allan, que é definida como a média das diferenças quadradas entre pontos de dados obtidos em diferentes intervalos de tempo.

$$\sigma_y(\tau) = \sqrt{\sigma_y^2(\tau)}, \quad (2.15)$$

$$\sigma_y^2(\tau) = \frac{1}{2} \langle (\bar{y}_{n+1} - \bar{y}_n)^2 \rangle \quad (2.16)$$

Ele fornece *insights* sobre como o erro de medição ou ruído em um dispositivo muda em função do tempo de integração, permitindo a identificação de tempos de integração ideais para alcançar a melhor sensibilidade e precisão nas medições.

Em termos práticos, você pode usar o desvio de Allan para avaliar a estabilidade a longo prazo e as características de ruído de um gravímetro. Ao analisar como o desvio de Allan muda com diferentes tempos de integração, você pode determinar o tempo de integração ideal para alcançar o melhor equilíbrio entre sensibilidade e precisão nas medições de gravidade. Tempos de integração mais longos podem reduzir o ruído, mas também podem diminuir a capacidade do instrumento de capturar mudanças rápidas na gravidade, enquanto tempos de integração mais curtos podem ser mais ruidosos, mas mais responsivos a variações de curto prazo.

3 METODOLOGIA:

De acordo com o cronograma que será apresentado posteriormente, seguiremos os seguintes passos neste trabalho:

- Faremos um mapeamento do número de gravímetros absolutos no Brasil e as dificuldades de obtenção de dados precisos para estudos da maré terrestre, por exemplo.
- Mostraremos as diferenças entre gravímetros absolutos e gravímetros relativos e os custos de aquisição de um gravímetro absoluto clássico. Mostraremos o princípio físico envolvido nos gravímetros quânticos mais comuns, que operam usando interferometria de átomos frios em queda livre e como esse gravímetro permite mapear a densidade do solo de maneira precisa e rápida.
- Faremos um levantamento das áreas beneficiadas com a aquisição de mais gravímetros absolutos e faremos uma relação de custos/benefícios no caso de se adquirir gravímetros quânticos. Ao longo da discussão desse projeto, vimos explodir o número de empresas europeias anunciando gravímetros quânticos portáteis.
- Investigaremos a real possibilidade do Brasil vir a produzir seus próprios gravímetros quânticos e quais parcerias podem beneficiar o Brasil.

5 CRONOGRAMA:

Boa parte do trabalho envolvido no projeto foi feita ao longo da discussão da proposta do projeto em si. Conforme já mencionado, a área de tecnologias quânticas da segunda revolução quântica ainda é tema de discussão no Brasil e tivemos um longo trabalho de pesquisa para descobrir eventos e pesquisadores com propostas que envolvessem a interação da academia com o mercado/indústria. Com os contatos já feitos, esperamos desenvolver o projeto dentro do seguinte cronograma:

Período	Etapa	Situação
15/04/2023 –15/06/2023	Estudo sobre desenvolvimento de Trabalhos de Conclusão de Engenharia	Concluído
15/06/2023 –15/09/2023	Pesquisa bibliográfica sobre gravimetria quântica	Concluído
15/06/2023 –15/08/2023	Sondagem e tentativa de contato inicial com empresas que vendem gravímetros quânticos	Concluído
05/07/2023 –15/08/2023	Conversas com professores e técnicos do Instituto de Geociências da UFRGS	Concluído
17/09/2023 –09/10/2023	Recesso Escolar	-
10/10/2023 –15/11/2023	Saída de campo para medidas com gravímetro relativo do Instituto de Geociências da UFRGS	Concluído
15/11/2023 –30/11/2023	Ajustes e apresentação do TDEF1 para a banca de avaliação	Concluído
30/11/2023 –30/01/2023	Revisão bibliográfica sobre características dos gravímetros quânticos	Concluído
30/11/2023 –30/01/2023	Levantamento de áreas que se beneficiariam do uso de gravímetros quânticos absolutos	Concluído
30/01/2023 –15/02/2023	Ajustes finais e apresentação do TDEF2 para a banca de avaliação	Em Andamento

6 RESULTADOS

Mesmo em protótipos de gravímetros quânticos de campo já se podia observar a performance superior destes dispositivos e sua alta precisão tanto em Berkeley (WU et al., 2019) quanto pela Ixblue com seu AQG (MÉNORET et al., 2018).

6.1 PROTÓTIPO DE BERKELEY

O protótipo apresentado em Berkeley passou 12 dias realizando medidas da variação gravimétrica causada pela maré terrestre em um laboratório localizado a 4.5km da Baía de São Francisco. No gráfico abaixo pode-se observar a comparação entre as medidas e o modelo de maré terrestre (Fig. 7A) e o efeito da mudança do nível do mar nos valores gravimétricos residuais (Fig. 7B):

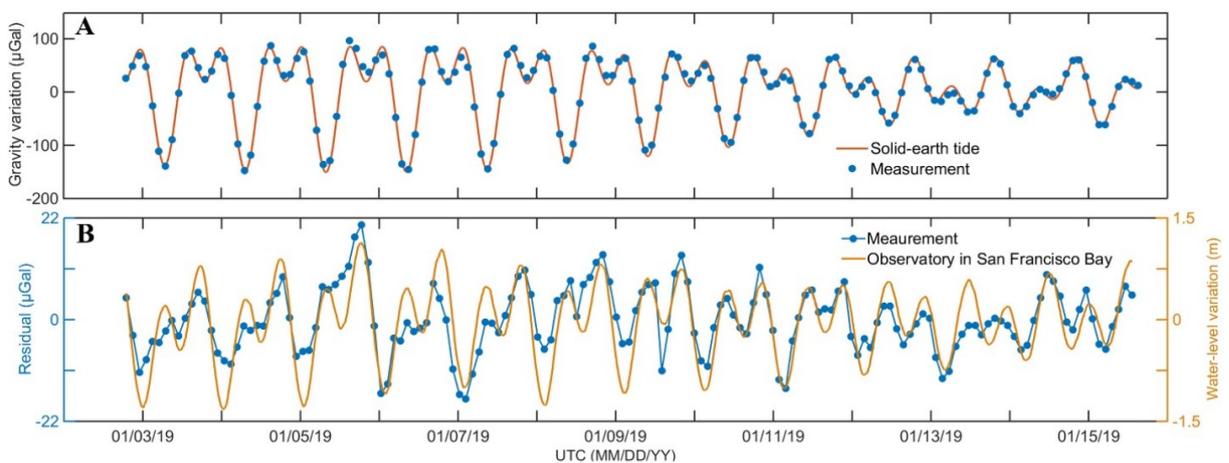


Figura 7: A) Comparação das medidas do gravímetro com o modelo de maré terrestre e B) Comparação do residual gravitacional e o nível da água na Baía de São Francisco.

Fonte: WU et al., 2019

Esse mesmo gravímetro também possui uma sensibilidade de $37 \mu\text{Gal}/\sqrt{\text{Hz}}$, e estabilidade de $2 \mu\text{Gal}$ em um intervalo de meia hora ao medir as alterações gravitacionais da maré terrestre no mesmo local. Nesses gráficos é possível observar o efeito da carga oceânica (deformação da crosta terrestre causada pela redistribuição da massa oceânica sobre ela) nos locais onde são encontrados picos; por volta de $3 \times 10^4 \text{ s}$ (Fig. 7A) e $1 - 3 \times 10^5 \text{ Hz}$ (Fig. 7B):

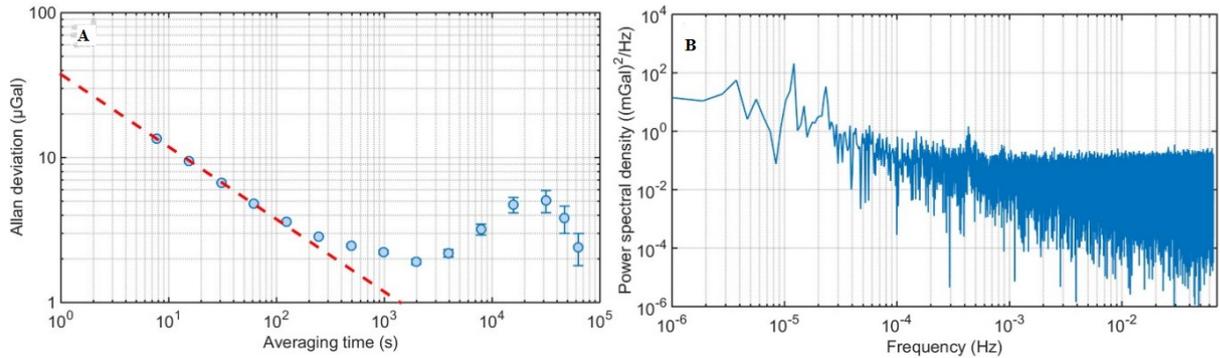


Figura 8: A) Desvio de Allan do residual, a linha pontilhada corresponde a sensibilidade de $37 \mu\text{Gal}/\sqrt{\text{Hz}}$ e B) Densidade espectral do residual

Fonte: WU et al., 2019

É interessante mencionar também que durante a realização destas medidas este gravímetro foi capaz de detectar a aceleração vertical de ondas sísmicas pertencentes à terremotos ocorridos no Brasil—6.8 de magnitude, ocorrido a 570km de profundidade—e na Indonésia—6.6 de magnitude, ocorrido a 43km de profundidade. Tais medidas foram corroboradas pela detecção simultânea de sismômetros da Rede Digital Sísmica de Berkeley:

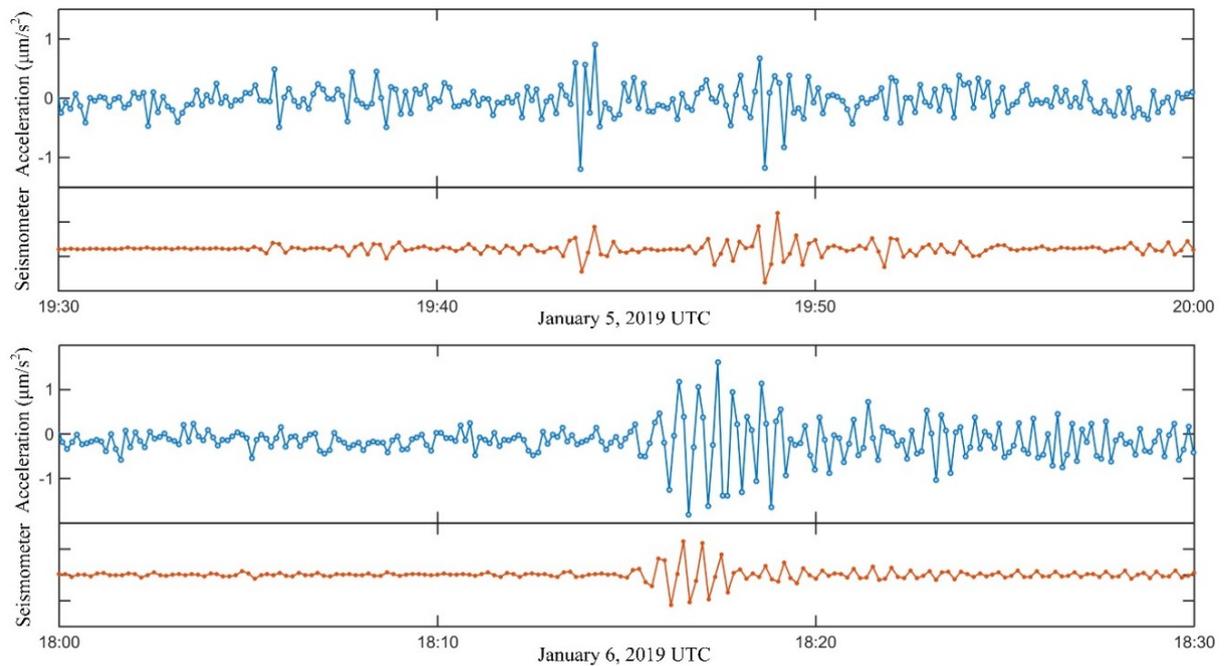


Figura 9: Comparação da detecção dos terremotos no Brasil (5 de Janeiro) e na Indonésia (6 de Janeiro) pelo gravímetro e pelo sismómetro.

Fonte: WU et al., 2019

Para verificar a repetibilidade do gravímetro, foram feitas medidas gravitacionais nos 5 andares do Salão Campbell que foram comparadas com as medidas feitas com um gravímetro relativo Scintrex CG-5 referenciando uma estação gravitacional com valor de

gravidade absoluto conhecido localizada no campus USGS no Parque Menlo também na Califórnia.

O laboratório onde haviam sido feitas as medidas até agora ficava no porão do Salão Campbell, porém nos andares acima os níveis de sensibilidade que o equipamento foi capaz de alcançar foi por volta de $0.2\text{mGal}/\sqrt{\text{Hz}}$ devido ao ruído vibracional. Este experimento levou um total de 3 horas com apenas uma pessoa operando o gravímetro quântico, e a maior parte deste tempo foi gasta no transporte e no realinhamento do eixo vertical.

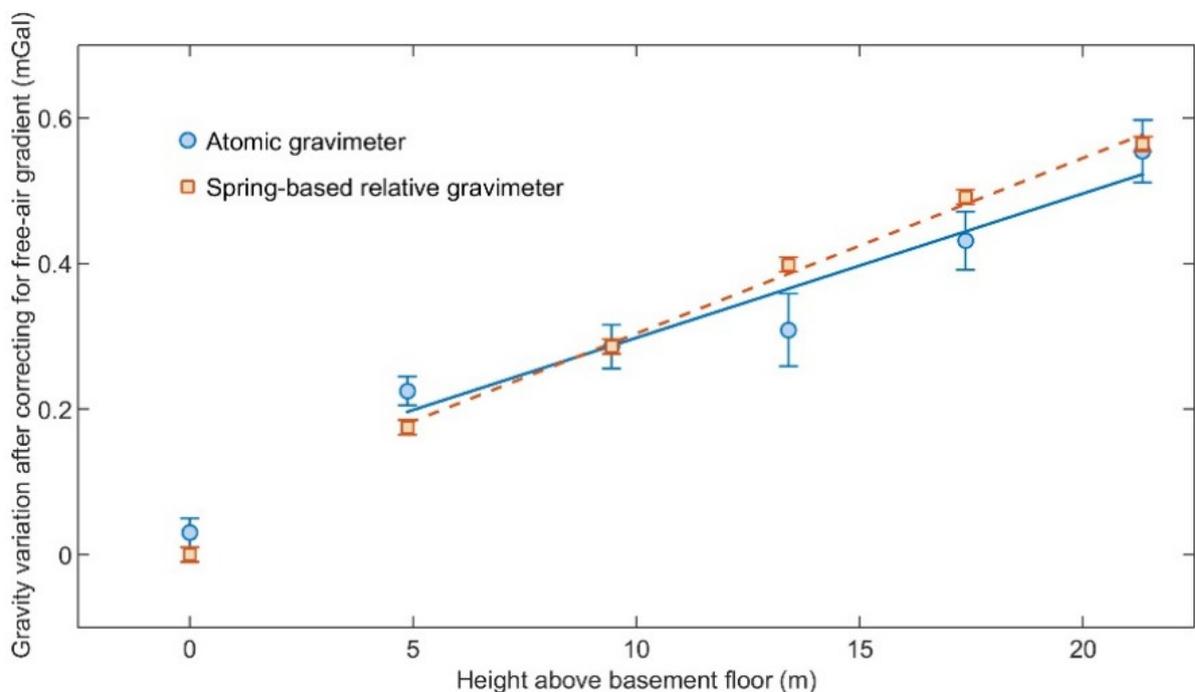


Figura 10: Variação da gravidade nos andares do Salão Campbell
Fonte: WU et al., 2019

No gráfico acima (Fig. 10) a medida em 0m representa a medida feita no porão que foi excluída do ajuste linear do gradiente gravitacional devido à grande diferença desse gradiente em medidas abaixo e acima do solo. Assim foi obtido um gradiente de gravidade vertical de $-0.289\text{mGal}/\text{m}$ para o gravímetro quântico e um valor de $-0.285\text{mGal}/\text{m}$ para o gravímetro relativo, ambos os valores menores que o gradiente de ar-livre ($0.3086\text{mGal}/\text{m}$).

Por fim, para realizar testes de campo este gravímetro foi levado para realizar medidas nas Montanhas de Berkeley por um percurso de 7.6 km passando por 6 pontos, e com uma mudança de elevação de aproximadamente 400 m. As medidas foram feitas com o equipamento sendo mantido dentro do veículo de transporte e foi observada uma mudança de temperatura de 12°C ao longo das 7 horas de duração do experimento.

Na imagem a seguir pode-se ver o percurso (Fig. 11A), ter uma melhor ideia de como é o equipamento (Fig. 11D), de como ele é transportado (Fig. 11C). Por fim há também um gráfico indicando como a gravidade varia em função da elevação (Fig. 11B), e a partir de um ajuste linear chegou-se à um gradiente vertical de gravidade de -0.225 mGal/m , valor este obtido após serem feitas correções de maré terrestre, variações de latitude, e efeitos de terreno.

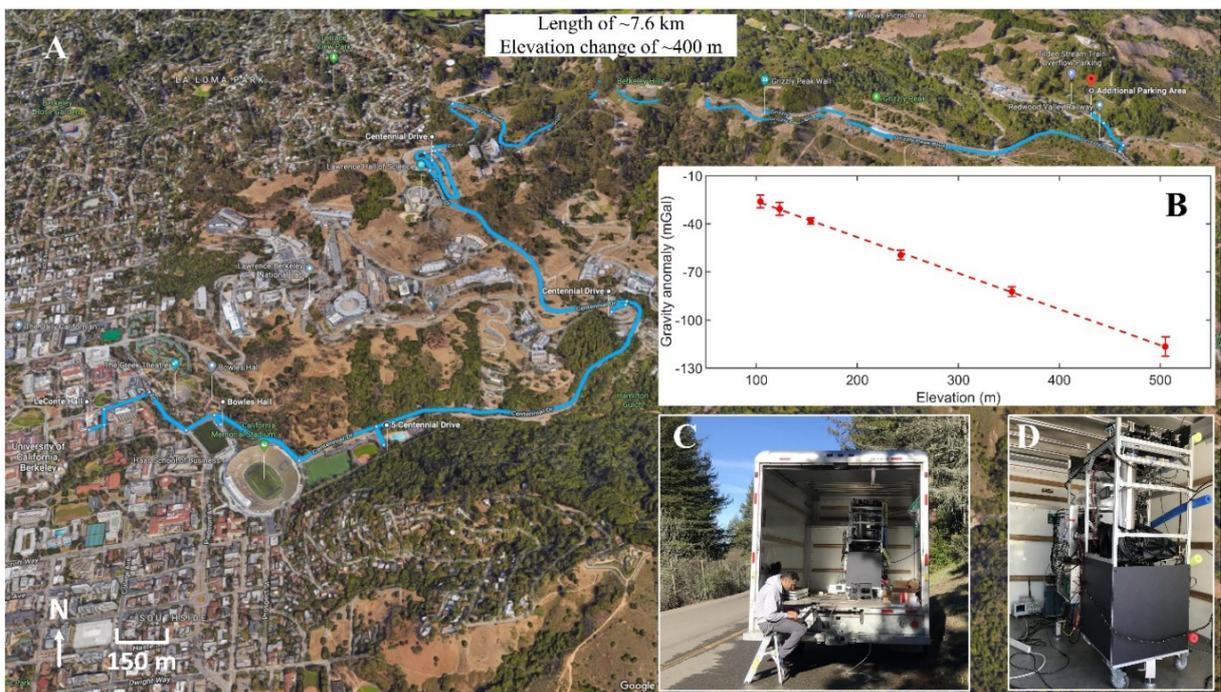


Figura 11: A) Trajeto feito pelas Montanhas de Berkeley; B) Anomalia gravitacional em função da elevação; C) Veículo de transporte do gravímetro quântico; D) Imagem do gravímetro quântico
Fonte: WU et al., 2019

É válido também comentar sobre mais algumas características deste gravímetro quântico, como o seu consumo total de 250W, bem como suas medidas de 1m x 0.8m x 1.7m e peso total de 100kg. Para sua operação em campo, foi utilizada uma *power station* de lítio de 1450Wh e um veículo para transporte. Maiores informações sobre processos de correção de medidas gravimétricas devido à latitude e terreno, procedimentos de alinhamento e outros dispositivos extras necessários a esses processos são encontradas no artigo mencionado na bibliografia deste trabalho.

6.2 GRAVÍMETRO AQG(A01)

Já o protótipo apresentado pela Ixblue (agora Exail) em 2018 obteve medidas gravimétricas em dois locais: No laboratório da Muquans em Talence por um período de 5

dias perto do Natal, e no observatório Larzac no sul da França por 1 mês no verão. Vale acrescentar que o laboratório em Talence fica no segundo andar de um prédio com certa proximidade do mar, portanto está sujeito a muitos ruídos microsísmicos, especialmente quando comparado com Larzac onde são realizados estudos hidrogeológicos e medidas gravimétricas são obtidas regularmente por gravímetros relativos e absolutos desde 2006.

O gravímetro AQG obteve dados gravitacionais a uma taxa de 2Hz durante todo o projeto. Esses dados foram corrigidos para variações de inclinação, deriva do oscilador de microondas, pressão atmosférica, bem como correções de maré sintética a partir de parâmetros obtidos da análise de 9 meses de dados de um gravímetro relativo CG-5 para Talence, e 3 anos de dados de um gravímetro supercondutor em Larzac.

Durante o período de medidas em Talence, o desvio padrão das medidas com média feita em 1 hora foi de 10.7 nm/s^2 , porém em dias mais tranquilos o desvio caía para 8.5 nm/s^2 . O valor de sensibilidade obtido para esses dias foi de $60 \mu\text{Gal}/\sqrt{\text{Hz}}$ em dias de pouco ruído, mas chegando a $70 \mu\text{Gal}/\sqrt{\text{Hz}}$ em dias de maior ruído;

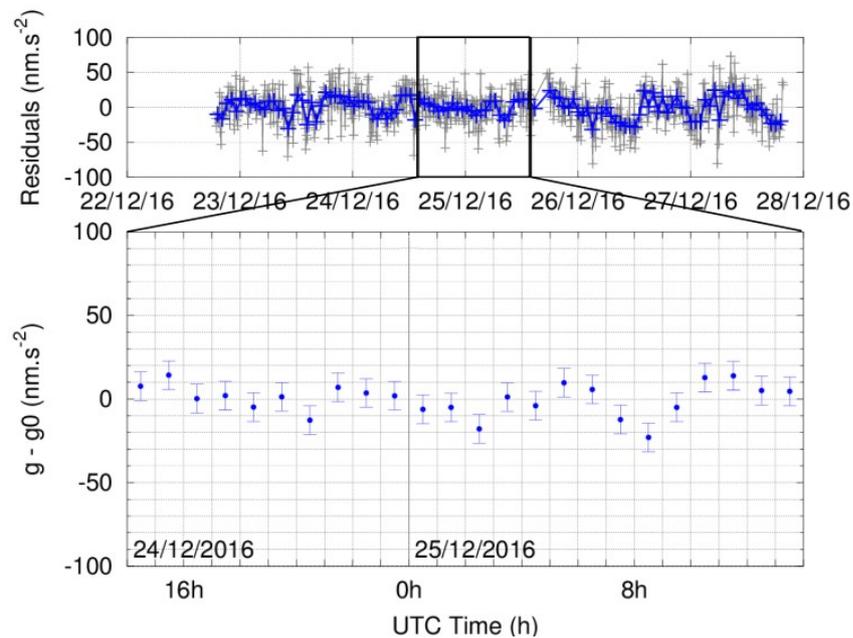


Figura 12: Residuais das medidas gravitacionais realizadas em Talence

Fonte: Ménoret et al., 2018

Em Larzac, o gravímetro permaneceu ligado por toda a duração do experimento. Ele foi instalado em um pilar de concreto dedicado, construído diretamente na base rochosa. Graças à isso foi possível obter uma sensibilidade de $50 \mu\text{Gal}/\sqrt{\text{Hz}}$. Postula-se que devido à imperfeições na compensação das vibrações, não foi possível obter uma sensibilidade menor

que essa. Calculando o desvio padrão tendo a média das medidas realizadas em um dia, chega-se à um valor de 9.4 nm/s^2 . Como foram feitas correções atmosféricas e de maré, especula-se que flutuações residuais nessa escala poderia ser por efeitos instrumentais, imperfeições na correção de pressão, ou efeitos hidrológicos ou geofísicos não previstos pelo modelo de maré;

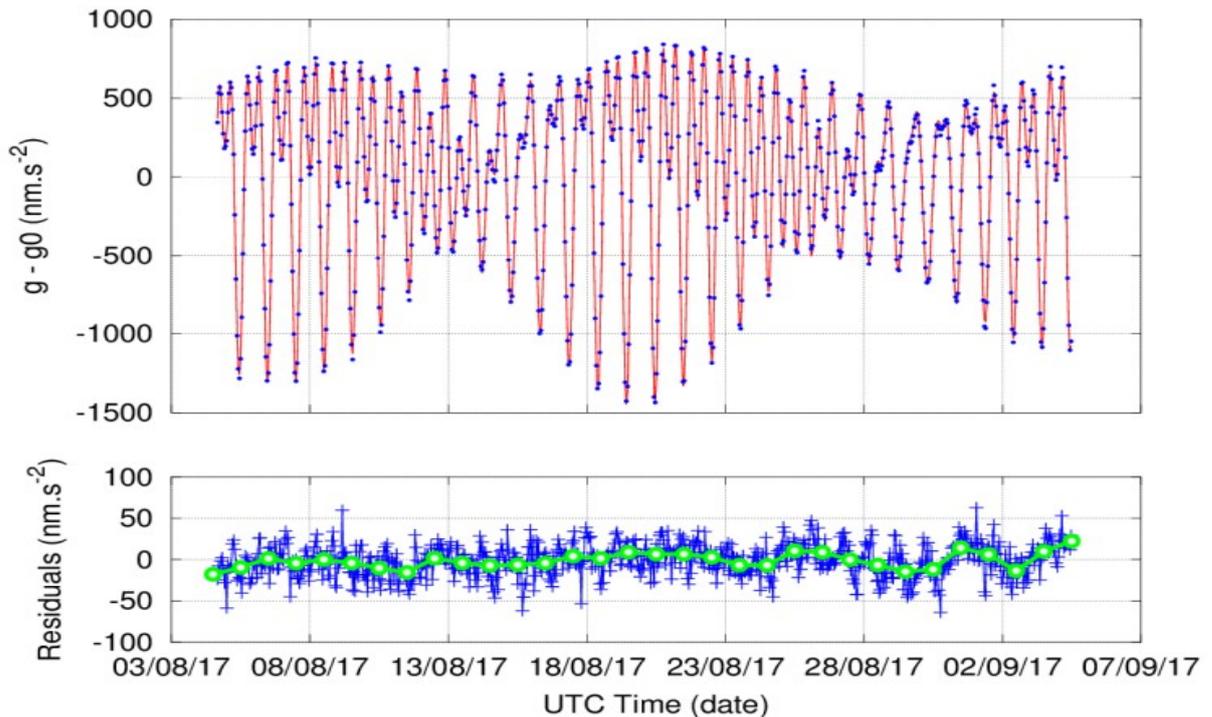


Figura 13: Residuais das medidas gravitacionais em Larzac. No gráfico superior, a linha em vermelho indica o modelo de maré, enquanto que no gráfico inferior, os pontos verdes indicam média dos dados obtidos em um dia.

Fonte: Ménoret et al., 2018

Outra forma de análise de performance que foi realizada foi o cálculo do desvio de Allan para os dois locais onde foram realizadas as medidas, e para comparação extra também são adicionadas medidas realizadas por um gravímetro FG5 em setembro de 2017. Para o FG5 foram um total de 32 grupos de 100 quedas por um período de 32 horas, e para facilitar a comparação considera-se que todas as quedas eram contínuas com uma taxa de medição efetiva de 36 segundos, um tempo bem grande considerando a capacidade do gravímetro quântico de realizar duas medidas por segundo. O que esse gráfico (Fig. 14) indica é que apesar da vantagem em sensibilidade à curto prazo do FG5, a estabilidade à longo prazo dos dois gravímetros chegam à níveis próximos, abaixo de 10 nm/s^2 ;

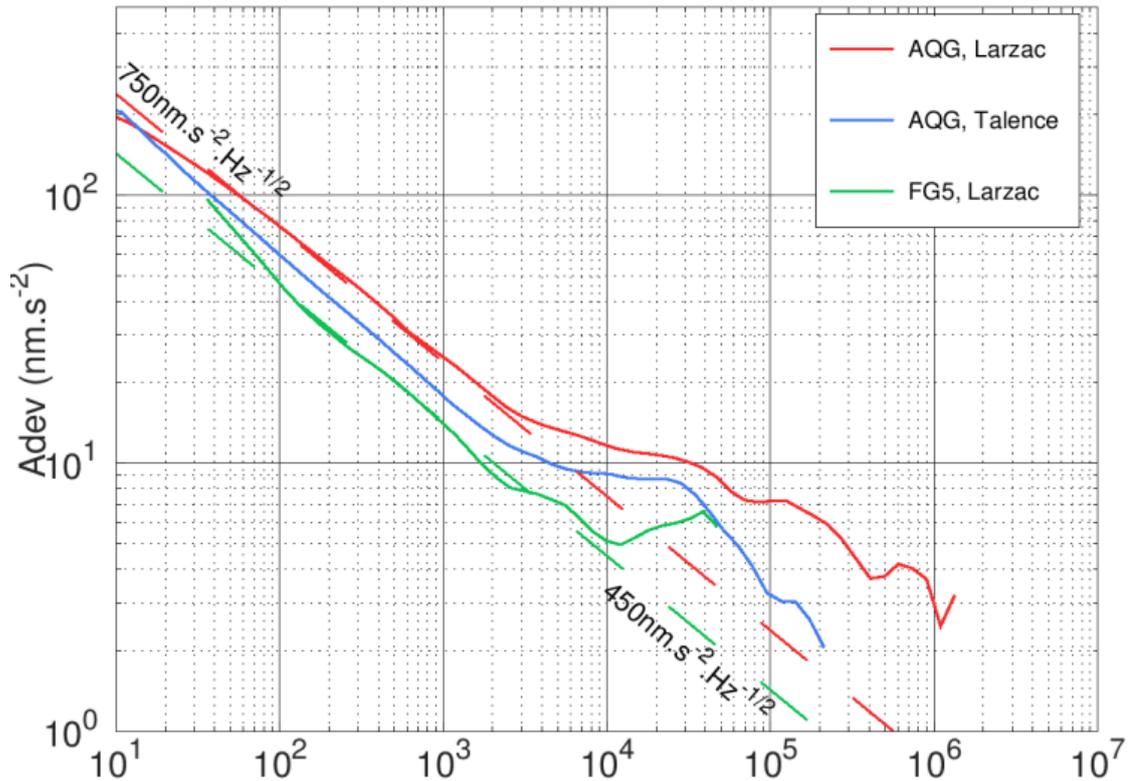


Figura 14: Desvio de Allan das medidas gravitacionais do AQQ, mais medidas feitas com o FG5 para comparação

Fonte: Ménoret et al., 2018

Para verificar a repetibilidade do instrumento, o gravímetro AQQ A01 foi transportado 6 vezes dentro do observatório Larzac para medir a gravidade em 3 pilares diferentes nomeados como *North-East (NE)*, *North-West (NW)*, e *South-East (SE)* de maneira a comparar as 2 medidas realizadas em cada pilar. A tabela abaixo (Fig. 15) mostra que a diferença entre as duas medidas está dentro da incerteza estatística. O valor g_0 da tabela é a média das 6 medidas realizadas;

Measurement	Pillar	Date	Duration (h)	$g - g_0$ (nm.s ⁻²)	Statistical uncertainty (nm.s ⁻²)
1	NE	6 Sept 2017	124	40.5	24.3
2	NW	11 Sept 2017	20	44.3	16.9
3	SE	12 Sept 2017	23.5	-76.5	15.8
4	NE	13 Sept 2017	7.5	16.9	34.5
5	SE	13 Sept 2017	18.5	-74.7	13.9
6	NW	14 Sept 2017	18	49.4	19.6

Figura 15: Medidas gravitacionais em em 3 pilares diferentes para verificar a repetibilidade do gravímetro quântico.

Fonte: Ménoret et al., 2018

Aqui é importante ressaltar mais algumas características a respeito do gravímetro AQQ A01. O *software* embutido nele foi feito para automatizar ao máximo o processo de

obtenção de dados gravimétricos portanto, esse *software* é capaz de calcular inclinação, pressão atmosférica, gradientes de gravidade verticais, movimento polar e deriva de frequência de osciladores de quartzo. Correções de maré terrestre e carga oceânica são implementadas automaticamente, bem como a própria inicialização do gravímetro. A temperatura de operação dele é de 0°C a 40°C, seu consumo é de menos de 500W e ele é dividido em 3 módulos (2 módulos da unidade de controle e 1 módulo da cabeça do sensor), cada um com menos de 40Kg. Para maiores detalhes sobre as características do gravímetro, configuração de lasers, detalhes sobre as correções realizadas pelo software são encontradas no artigo original.

6.3 GRAVÍMETRO AQG(B01)

O gravímetro B01 é o sucessor do A01. A partir dos experimentos realizados usando o A01, foi possível analisar o que poderia ser alterado para melhor operação em campo. Tais alterações foram implementadas no B01. Nesta seção serão descritos dois experimentos—um em Larzac (COOKE; CHAMPOLLION; LE MOIGNE, 2021) e outro no vulcão Etna (CARBONE et al., 2020), (ANTONI-MICOLLIER et al., 2022)—utilizando o B01 que ajudam a entender o que de fato foi melhorado e o que ainda precisa e pode ser feito para torná-lo ainda melhor.

6.3.1 Experimento em Larzac

Assim como seu predecessor, o gravímetro B01 também foi levado para Larzac para realizar medidas gravimétricas e avaliar sua performance. Os testes foram realizados a partir de dezembro de 2019 até abril de 2020. Assim como no teste anterior (MÉNORET et al., 2018), um gravímetro FG5 foi usado como referência, além de um gravímetro supercondutor iGrav que vem monitorando atividades gravitacionais do local por quase uma década. Após o período em Larzac, ambos os gravímetros foram levados para Montpellier, onde mais medidas e testes foram realizados nas instalações do laboratório Géosciences Montpellier, e em uma garagem privada em uma área residencial. Vale mencionar que, neste período, a cidade de Montpellier se encontrava em situação de lockdown devido à Covid-19, e, por isso, o ruído do ambiente foi bastante reduzido.

A sensibilidade dos gravímetros é obtida a partir do desvio de Allan nos residuais dos sinais de gravidade. Isso é feito após as devidas calibrações e correções de deriva para o

iGrav, e correções de maré terrestre e carga oceânica utilizando Tsoft, além de pressão atmosférica e movimento polar. Todas essas correções são feitas pelo *software* do AQG B01. Durante o cálculo da sensibilidade não houve chuvas e nenhum outro teste instrumental. Na montagem do gráfico a seguir (Fig. 16) foram usados 10 minutos de dados do AQG B01 e 1 minuto do iGrav. Com 1h de integração o B01 alcançou uma sensibilidade de 10 nm/s^2 , e o iGrav a curto prazo alcança valores mais baixos, porém em um período de 24h eles chegam ao mesmo nível de sensibilidade. Nota-se também um aumento gradual nos três gravímetros após um longo tempo, e supõe-se que a causa disso sejam por conta de residuais de maré e ruído do ambiente. O gravímetro FG5 possui uma frequência de amostragem irregular (100 quedas em 10s seguido de pausa de 2600s) e isso faz com que seja necessário dividir a sua linha em duas partes: uma para curto prazo ($< 1000\text{s}$ para dados de 10s) e longo prazo (para dados de 1h);

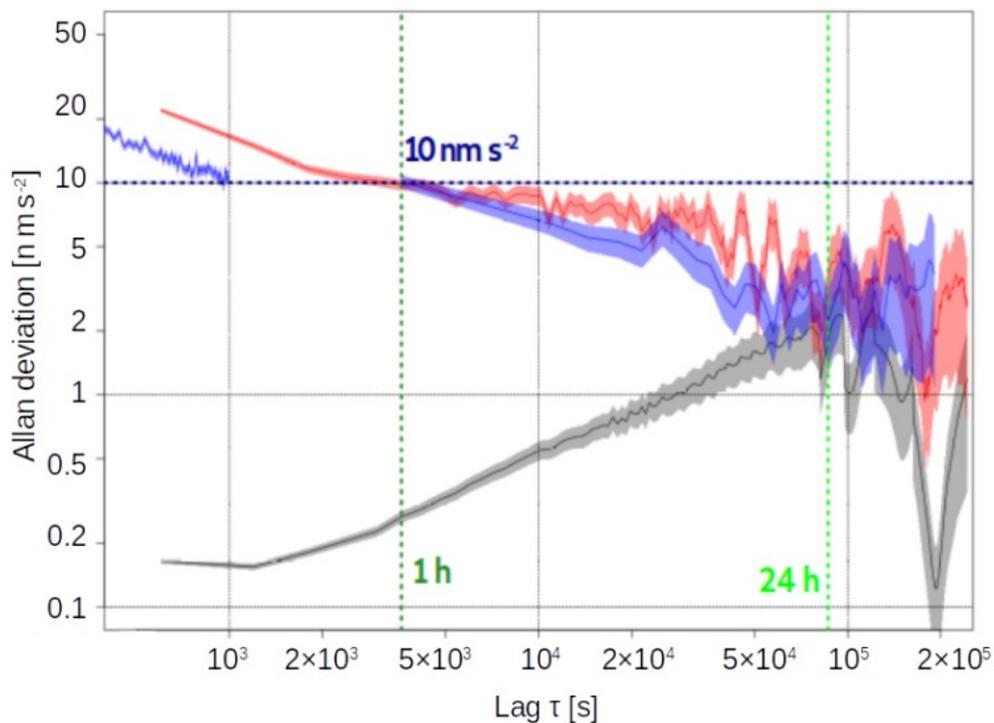


Figura 16: Desvio de Allan para cálculo de sensibilidade. Linha vermelha indica o gravímetro B01, cinza o iGrav, e azul o FG5. Linhas pontilhadas verdes indicam tempo de integração de 1h e 24h.

Fonte: Cooke et al., 2021

Medidas de sensibilidade também foram feitas em Montpellier, um ambiente mais urbano. Nesse caso foi possível perceber uma piora na sensibilidade do AQG B01, muito provavelmente devido ao ruído do ambiente que é maior comparado a Larzac. Obteve-se um valor de sensibilidade de 20 nm/s^2 após 1h e apenas depois de 24h foi alcançado um valor de sensibilidade abaixo de 10 nm/s^2 .

Durante a avaliação de sensibilidade também foi verificado o efeito que o uso de estofamentos de borracha nos pés do gravímetro teriam. O gráfico abaixo (Fig. 17) indica que para curto prazo houve um certo ganho, porém para períodos além de 1h não se observou vantagens significativas, ainda que Cooke et al., tenham comentado sobre a possibilidade de aumentar o período de análise ou realizar o teste em locais com maior ruído.

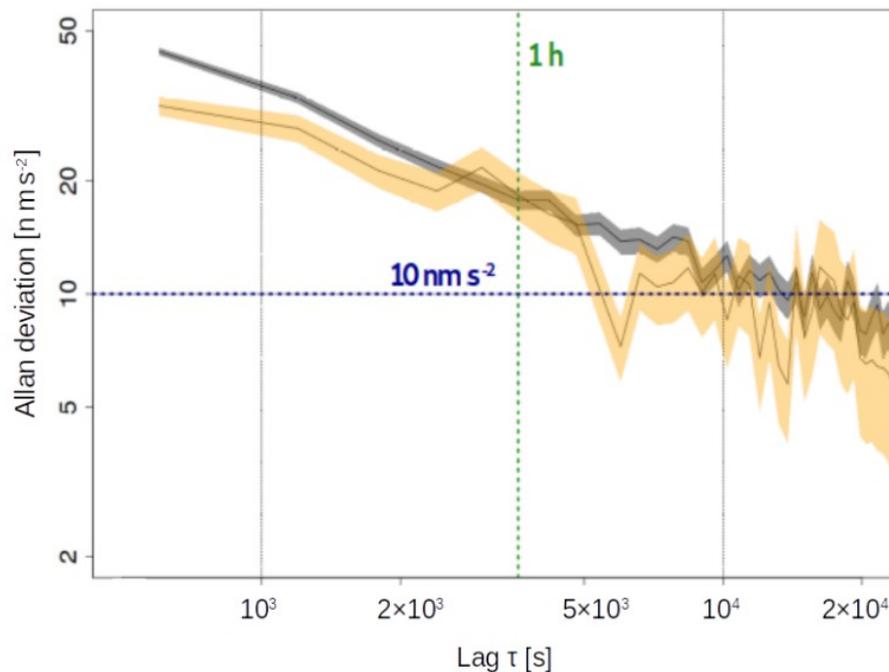


Figura 17: Comparação da sensibilidade com (laranja) e sem (cinza) estofamentos de borracha no tripé do gravímetro.

Fonte: Cooke et al., 2021

Outro efeito que pôde ser observado durante o período em Larzac foi a detecção de eventos de chuva intensa com os três gravímetros. De 13 a 27 de dezembro foi detectado um aumento de aproximadamente 80 nm/s^2 na gravidade local. Nos gráficos abaixo é possível ver perfeitamente a correlação entre o aumento dos residuais (Fig. 18A), e da quantidade de chuva (Fig. 18B) e o aumento esperado causado pela placa de Bouguer equivalente ao evento de chuva ajustado para descarga profunda (Fig. 18C).

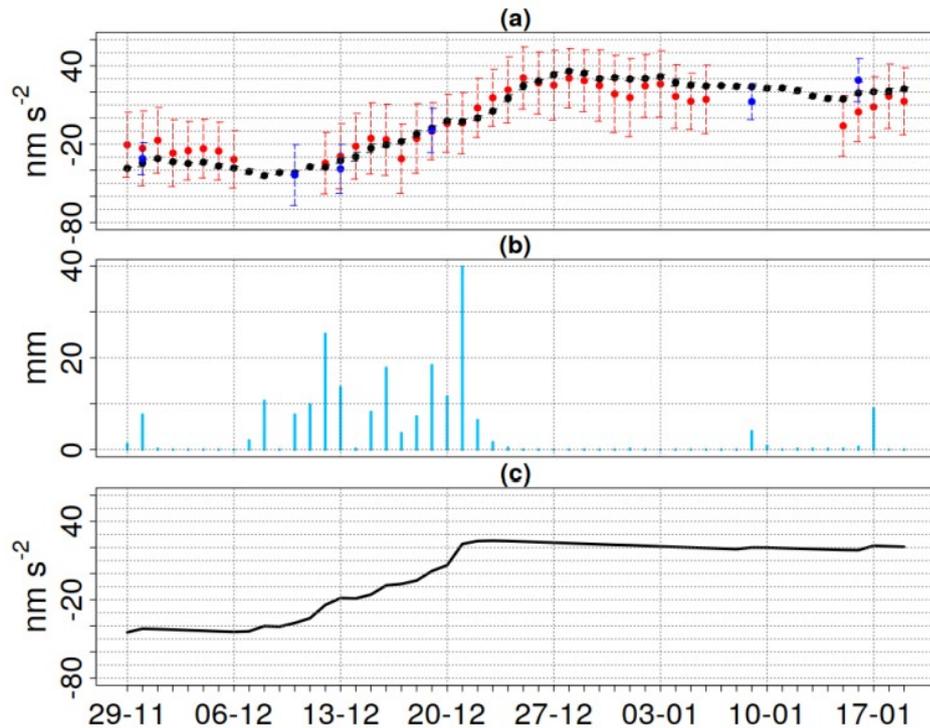


Figura 18: A) Residuais de gravidade durante período de chuvas para o AQG (vermelho), FG5 (azul) e iGrav (cinza). As barras de erro referem-se ao desvio padrão de 24h de medidas. B) Série de dados de chuvas em Larzac. C) Placa de Bouguer equivalente (em nm/s^2) da precipitação com correção para descarga profunda.

Fonte: Cooke et al., 2021

Observa-se também que a série temporal gravitacional continua aumentando mesmo depois da chuva ter parado, isso se deve à água que se infiltra no solo e se move na direção da sensibilidade espacial do gravímetro, caracterizado como dois cones abaixo e acima do instrumento. Já as diferenças entre as medidas dos gravímetros podem ser por conta do posicionamento de cada um no observatório e da heterogeneidade das pedras (COOKE; CHAMPOLLION; LE MOIGNE, 2021).

Para o cálculo de acurácia comparou-se as medidas do AQG com as do FG5, como no caso do gráfico acima (Fig. 18A). A diferença entre esses dois gravímetros em um total de 13 medidas (médias diárias) feitas no observatório de Larzac é em média 110 nm/s^2 com um desvio padrão de 31 nm/s^2 , com os valores do FG5 sendo menores que os do AQG, enquanto que em Montpellier foram feitas 10 medidas (médias diárias) do AQG e uma medida do FG5, chegando a uma diferença de 44 nm/s^2 com um desvio padrão de 66 nm/s^2 . Uma comparação absoluta entre os dois acabaram sendo muito limitadas devido às incertezas relacionadas ao gradiente vertical gravitacional, causado pela diferença de altura entre os dois gravímetros. Cooke et al., também alerta para a diferença de umidade do solo que pode mudar muito durante um período de meses ou semanas e recomenda que tais medidas sejam refeitas com os dois gravímetros.

Um teste de repetibilidade em pequena escala foi realizado em Montpellier, dando uma média de 3 nm/s^2 com um desvio padrão de 25 nm/s^2 (Fig. 19). Esse teste consiste em realizar várias medidas no mesmo ponto e orientação após retornar de outros lugares e experimentos.

Date	$\Delta g \text{ [nm s}^{-2}\text{]}$	SD $\text{[nm s}^{-2}\text{]}$
27 Apr 2020	-43	46
28 Apr 2020	-5	36
3 May 2020	19	41
8 May 2020	-8	110
13 May 2020	27	66
27 May 2020	-9	60

Figura 19: Diferenças como resíduos da média das medições listadas, com base em médias de 24 horas. O desvio padrão refere-se a 24 horas.

Fonte: Cooke et al., 2021

Foram realizados também testes de inclinação e temperatura utilizando o AQG B01. Observou-se que mesmo durante o transporte entre locais mais distantes, os valores de calibração do medidor de inclinação se mantiveram bastante próximos, indicando a robustez do aparelho, e uma independência de efeitos externos como a temperatura. O gravímetro como um todo também apresentou um bom desempenho na faixa de temperatura de 20°C a 30°C com variações nas medidas dentro da faixa de incerteza. Foram realizados 5 testes, 1 com baixa temperatura (20°C) e o restante em alta temperatura (30°C), esse valores são ajustados pelo ar condicionado do laboratório que possui uma temperatura padrão de 24°C . Maiores informações a respeito dos testes de inclinação e temperatura podem ser encontrados no artigo referenciado.

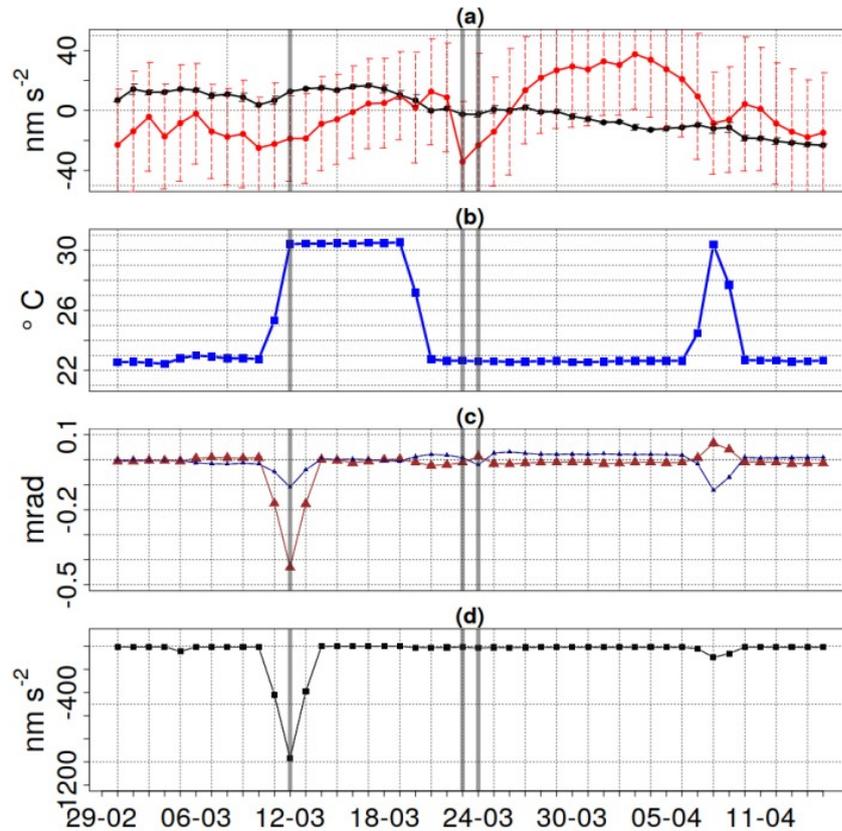


Figura 20: A) Residuais gravitacionais do iGrav (preto) e do B01 (vermelho). B) Série temporal de temperatura durante o período de testes. C) Inclinações em x (marrom) e y (azul) para os testes 3 e 4. D) Correção combinada das inclinações para x e y. Dados em cinza foram feitos mais ajustes e testes.

Fonte: Cooke et al., 2021

Os testes realizados em uma garagem em Montpellier servem como um meio termo entre um ambiente controlado e medidas ao ar livre, verificando os efeitos que mudanças bruscas de temperatura e ruídos antropogênicos podem causar. A garagem não possui ar condicionado, e para aumentar a amplitude de temperatura as portas eram abertas no fim da tarde e início da manhã. Um problema que foi notado nos últimos dias, foi a interrupção repentina das medições tornando necessário um relançamento manual delas. O problema parecia ter sido causado pelo *software*, mas desde então ele já foi atualizado. Como observado no gráfico a seguir (Fig. 21), a sensibilidade foi reduzida em comparação com Larzac. Temos uma sensibilidade de 26 nm/s^2 após 1h de cálculo de média, e 10 nm/s^2 após média de 24h;

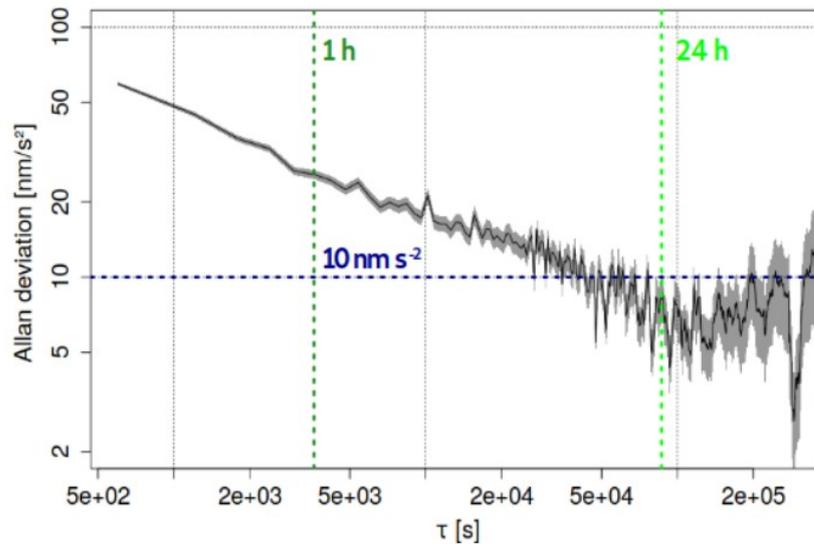


Figura 21: Desvio de Allan obtido durante período de testes em garagem em Montpellier.

Fonte: Cooke et al., 2021

Por fim foram realizados testes para verificar como o Efeito Coriolis pode alterar as leituras feitas pelo Gravímetro. A componente horizontal da velocidade atômica gera uma aceleração Coriolis adicional dependendo da direção Leste-Oeste, podendo levar a um possível *bias* na gravidade, no entanto a construção simétrica (refletor piramidal, posicionamento dos fotodiodos de detecção) deveria reduzir as velocidades atômicas horizontais tornando esse um problema trivial. A maneira de verificar este efeito é rotacionando o dispositivo em 180° , obtendo assim duas orientações possíveis, o que causa uma mudança no sinal da aceleração de Coriolis. O que se observou no entanto foi uma variação gravitacional no valor de 150 nm/s^2 entre as duas orientações comparadas com os valores medidos utilizando o FG5 (Fig. 22), um valor muito mais alto do que o esperado e que não ocorre em outros dispositivos AQQ.

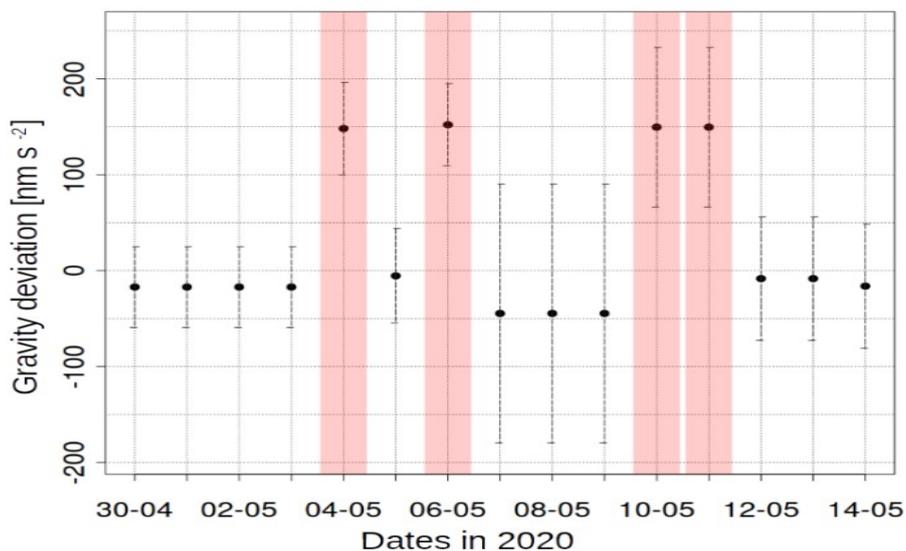


Figura 22: Valores gravitacionais residuais obtidos durante o teste do efeito Coriolis. As barras em vermelho indicam as medidas feitas com orientação de 180°.

Fonte: Cooke et al., 2021

6.3.2 No Escopo do Projeto NEWTON-g

O projeto Newton-g vem com o propósito de encontrar formas criativas de utilizar gravimetria quando não há um orçamento robusto para comprar vários gravímetros quânticos absolutos, por exemplo. O que eles tentam trazer aqui é um sistema de campo para realizar medidas de mudança de massa na subsuperfície. Isso é feito utilizando um arranjo de gravímetros relativos microeletromecânicos de baixo custo (um gerador de imagens gravitacionais), ancorados à um gravímetro quântico absoluto (CARBONE et al., 2020). O motivo de escolha do vulcão Etna se deve às flutuações gravitacionais, acessibilidade às estruturas ativas, e a presença de um sistema de monitoramento multiparâmetro (incluindo outros gravímetros).

A parte relacionada ao arranjo de gravímetros relativos não entra no escopo deste trabalho, porém caso haja interesse em saber mais sobre seu funcionamento e montagem, o material relativo a esta parte na bibliografia conterà tais informações. Já o gravímetro quântico utilizado neste projeto é o B01 da AQQ que vai ser colocado em campo nos últimos 2 anos do projeto. O local selecionado para ele foi o Observatório Volcanológico Pizzi Deneri (PDN)

devido à sua maior proximidade ao topo do vulcão, e por não ter havido até então observações gravitacionais contínuas neste local. O problema que apareceu aqui foi a necessidade de um sistema de alimentação do AQG que seja fora de rede e que permita a operação contínua do gravímetro (220V e uma potência necessária de 500W). A solução encontrada foi um sistema híbrido de 10 painéis solares de 350Wp e um gerador à diesel de 5KVA, além da inclusão de uma bateria de lítio para armazenar o que for gerado. Junto a esse sistema híbrido foi implementado um sistema de controle de carga solar e uma unidade de gerenciamento central, onde a primeira é responsável pela corrente produzida pelos painéis solares, tornando o fluxo disponível para a unidade de gerenciamento central. Já a segunda funciona como um gerenciador de rede, garantido o devido armazenamento da bateria, suprindo continuamente o gravímetro e trocando a fonte de energia (solar ou diesel) dependendo da potência solar disponível.

Em Antoni-Micollier et al., temos um relatório de como funcionou este gravímetro com uma série temporal de 4 meses comparando as medidas obtidas por ele com outros 3 gravímetros supercondutores (iGrav) instalados em diferentes pontos do vulcão. Antes somente gravímetros de mola podiam ser colocados próximos a crateras ativas, onde as maiores mudanças gravitacionais vulcânicas ocorrem, até a instalação do B01 no observatório PDN para aquisição contínua. O observatório possui dois abrigos interconectados em forma de domo, e possui um pilar de concreto feito para realizar medidas microgravimétricas sendo desacoplado do resto da estrutura para evitar a transmissão de vibrações. A cabeça do sensor foi colocada no pilar enquanto conectada por um cabo de 15 metros ao sistema de laser e de suprimento de energia. Para transmissão de dados e operação remota do gravímetro foi utilizado o próprio *link wi-fi* do observatório.

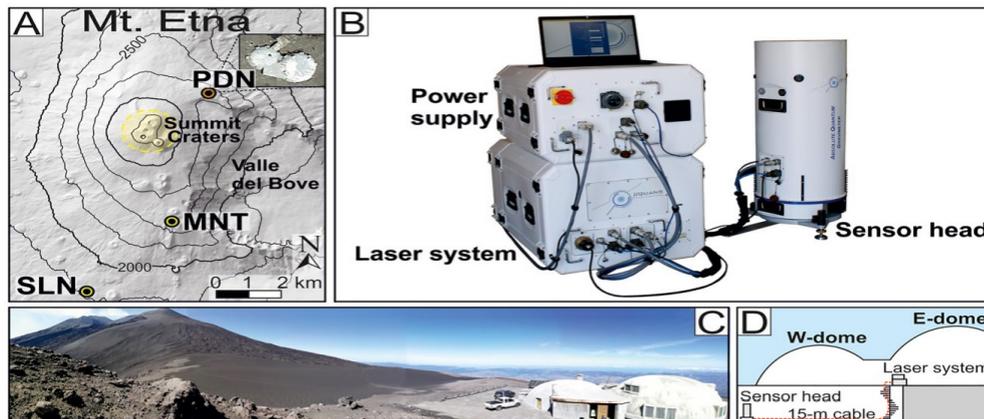


Figura 23: A) Mapa da região do Vulcão Etna. O AQG foi instalado no ponto PDN. B) Foto do AQG. C) Foto aérea do Ponto PDN e o quão próximo ele fica das crateras no pico. D) Corte transversal dos abrigos mostrando como o gravímetro foi instalado.

Fonte: Antoni-Micollier et al., 2022

Um dos desafios de tal localização é lidar com a sismicidade próxima às crateras. Muito dessa energia sísmica se concentra na faixa de frequência entre 0.1 e 10Hz, e isso faz com que ela se sobreponha com a sensibilidade máxima da função de transferência de aceleração do AQG que é um filtro passa-baixo com um *cut-off* em $1/2T \approx 8$ Hz. Estimou-se que muito do ruído no sinal do AQG fosse por conta da componente vertical do movimento do solo, e para mitigar isso um sistema de compensação ativa foi implementado utilizando um acelerômetro clássico integrado à cabeça do sensor.

No entanto, simulações baseadas em (a) espectros de vibração registrados anteriormente no PDN sob diferentes níveis de tremor vulcânico e (b) as funções de resposta tanto do acelerômetro clássico quanto do interferômetro atômico mostraram que, ao usar o sistema padrão de compensação de vibração, não é possível obter uma relação sinal-ruído na gravidade compatível com as performances necessárias. Foi necessário otimizar este sistema de compensação utilizando um sismômetro de banda larga no lugar do acelerômetro. Novas simulações mostraram que o AQG alcançava sensibilidades de 1200 nm/s^2 a 2500 nm/s^2 em 1 segundo, dependendo do nível do tremor vulcânico.

Tal alteração no sistema de compensação acabou gerando um atraso na obtenção de dados do sismômetro devido a uma frequência de corte mais baixa comparada a do acelerômetro, fazendo com que se perdesse mais dados quando a correção de fase fosse aplicada ao laser de Raman. Esse efeito foi mitigado realizando uma pós-correção à proporção atômica, correspondendo à mudança de fase de vibração residual devido ao atraso não compensado.

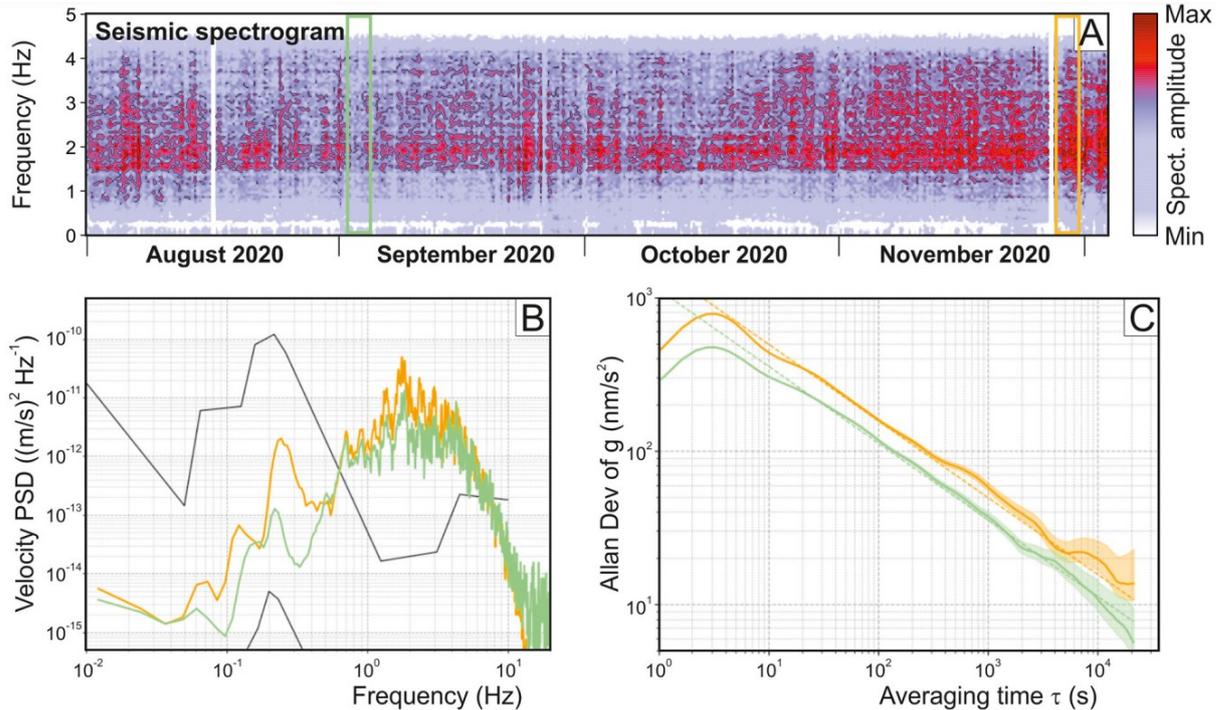


Figura 24: A) Espectrograma da componente vertical do sinal sísmico no ponto PND. Em laranja temos um período de alta amplitude de tremor vulcânico, enquanto que em verde temos um período de baixa amplitude. B) Gráfico de densidade espectral de velocidade sísmica durante fases de baixa e alta amplitude de tremor. C) Desvio de Allan dos dados gravitacionais corrigidos do AQG. As linhas pontilhadas verde e laranja indicam uma sensibilidade de 1200 e $1600 \text{ nm/s}^2 \cdot \sqrt{\text{Hz}}$ respectivamente.

Fonte: Antoni-Micollier., 2022

Uma análise cruzada é feita entre os dados residuais gravitacionais do AQG e os dados gerados pelos iGravs instalados mais ao sul do vulcão. O gráfico abaixo (Fig. 25B) mostra os dados coletados pelo iGrav localizado no ponto SLN (Fig. 23A), o observatório astrofísico Serra La Nave. Observa-se uma melhor precisão nestes dados (dentro de 10 nm/s^2), devido à maior distância deste observatório da área ativa do vulcão, e também pelas características de baixo-ruído de gravímetros supercondutores. É possível notar também algumas lacunas na série temporal do AQG (Fig. 25A). Isso se deve a momentos onde o sistema de suprimento de energia falhou, sendo necessário reiniciar remotamente os subsistemas do gravímetro. Tais falhas não danificaram o instrumento, e não houveram alterações no nível médio do sinal.

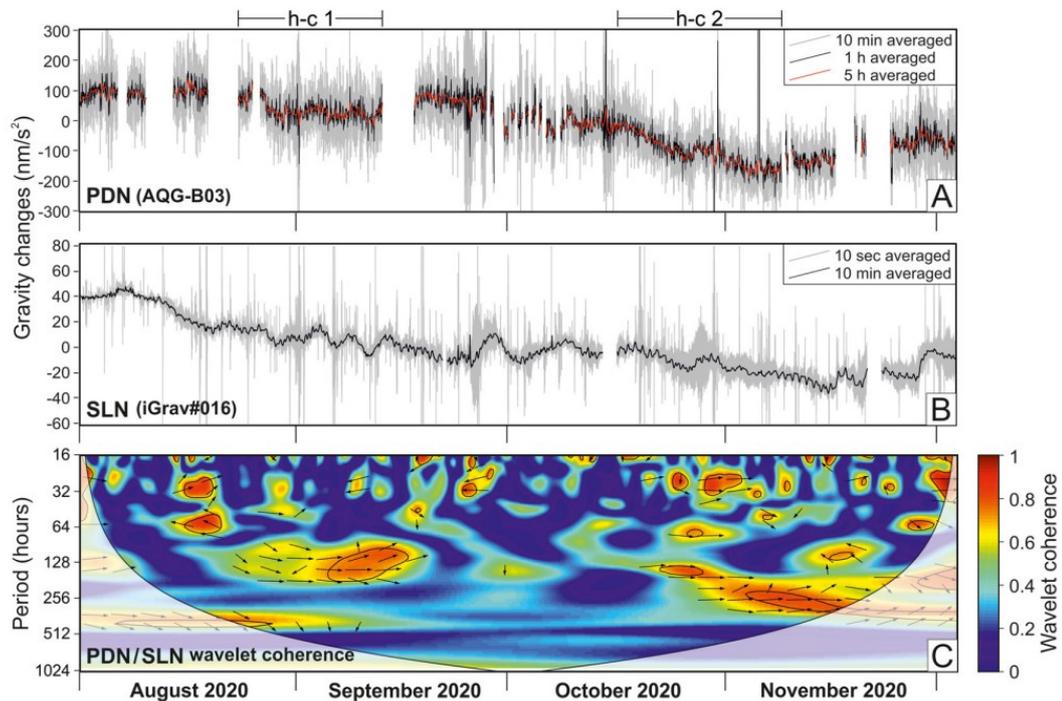


Figura 25: A) Série temporal gravitacional no ponto PDN. B) Série gravitacional no ponto SLN. C) Coerência de ondaletas entre os gráficos A) e B).

Fonte: Antoni-Micollier et al., 2022

O mapa de coerência de ondaletas foi utilizado para examinar a relação entre as duas séries temporais gravitacionais. Esse método destaca quão coerente a Transformada Cruzada em Ondaletas de duas séries temporais, e pode ser pensado como um coeficiente de correlação localizada no espaço frequência-tempo. Explicando um pouco mais a fundo, esta técnica é utilizada na análise de sinais não-estacionários, ou com bruscas variações de frequência. Entende-se como “não-estacionária” uma série temporal em que, momentos estatísticos como “médias” e “variâncias”, para diferentes intervalos de período constante, apresentam-se estatisticamente distintas (BARBOSA; BLITZKOW, 2008).

A partir da análise de coerência foi possível identificar dois intervalos de alta coerência h-c-1 e h-c-2 (Fig. 25A). Durante o primeiro subintervalo observam-se oscilações fracas em volta de um nível quase constante do sinal gravitacional em escalas de tempo de 5 dias, porém no segundo subintervalo ocorreu um decréscimo gravitacional geral. Para os dois subintervalos, a razão da amplitude entre os sinais de PDN e SLN é calculada como a inclinação do melhor ajuste linear entre as duas séries temporais. A série temporal do iGrav situado em La Montagnola (MNT) teve problemas durante a aquisição de dados, e somente a parte final do segundo subintervalo foi utilizada. Estes dados também indicam um padrão de decréscimo gravitacional.

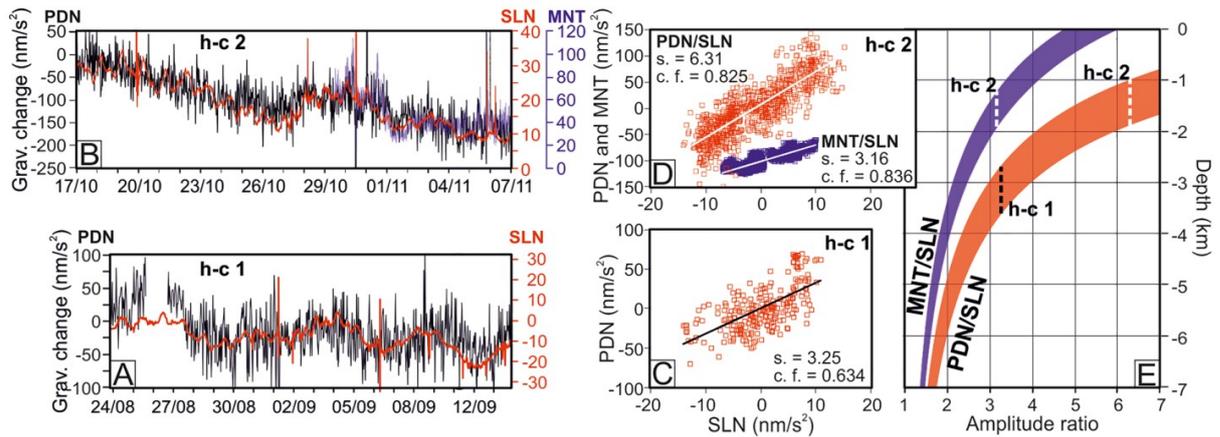


Figura 26: A) e B) Séries temporais gravitacionais nos períodos de alta coerência h-c-1 e h-c-2 respectivamente. C) e D) Gráficos de dispersão entre os pontos analisados (PDN, SLN, MNT). Observa-se uma taxa de amplitude de ~ 3 e ~ 6 para PDN/SLN em cada subintervalo, e ~ 3 para MNT/SLN. E) Taxa de amplitude gravitacional \times profundidade da massa fonte.

Fonte: Antoni-Micollier et al., 2022

No último gráfico (Fig. 26E), os cálculos foram realizados para todas as posições possíveis da massa fonte, assumindo que estão dentro da área em amarelo da Fig. 23A, utilizando o método de inversão. Desta maneira cada valor de taxa de amplitude gravitacional gerará uma faixa de profundidades possíveis para a fonte, como ilustrado no gráfico pelas faixas em azul e vermelho.

Análises extras sobre os gráficos gerados durante o período de testes, bem como acoplamentos entre os sinais do AQQ e os outros gravímetros supercondutores situados a 9(SLN) e 5(MTN) km de distância do ponto PDN indicam que as alterações gravitacionais foram causadas por redistribuições de massa em larga escala, e não por efeitos locais ou instrumentais.

As oscilações gravitacionais do subintervalo h-c-1 possivelmente refletem a movimentação transiente de massas (na ordem de $3 \times 10^{10} \text{ Kg}$) relacionadas a ascensão pulsante de fluidos ricos em gás em direção às partes intermediárias e rasas do sistema magmático. Esse efeito pode passar despercebido quando se utiliza apenas técnicas baseadas em medidas geoquímicas, e graças a capacidade do AQQ de realizar medidas contínuas de alta precisão, pode-se ter uma imagem de maior confiabilidade sobre o estado de atividade do vulcão.

Já o decréscimo da gravidade detectado no subintervalo h-c-2, correspondendo a um decréscimo de massa de $6 \times 10^{10} \text{ Kg}$ poderia indicar um aumento na proporção de gás exsolvido e magma em uma porção mais rasa do sistema de canalização. Um gravímetro de mola não seria capaz de detectar essa mudança gravitacional gradual devido ao *drift* não

linear que vai se acumulando enquanto os dias passam. Sem essa informação gravimétrica, não seria possível se o decréscimo do fluxo de gás das crateras seria por causa de um menor suprimento de áreas mais profundas, ou de uma redução da capacidade do sistema de canalização mais acima de expelir o gás disponível.

7 DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Desde o início deste trabalho até aqui, têm-se observado uma proliferação de artigos e empresas utilizando essa tecnologia. Seja nos EUA (WU et al., 2019), na China (朱栋; DONG ZHU, [s.d.]), França (MÉNORET et al., 2018), Singapura (“Atomionics”, [s.d.]), e inclusive aqui no Brasil (BORGES et al., 2023) . Muito possivelmente tenham ainda mais países fazendo suas pesquisas voltadas a sensoriamento quântico e gravimetria quântica.

Vale mencionar que não só a França, mas a União Europeia inteira está intrigada com essa nova tecnologia e o que mais ela pode oferecer (“FIQUgS”, [s.d.]) . O Projeto FIQUgS é uma parceria entre governo, universidades e empresas para incentivar o desenvolvimento de gravímetros quânticos cada vez mais adaptados para o uso em campo, permitindo assim melhorias na utilização de energias geotermiais, e diminuição no impacto ambiental ao ter um método de monitoramento geofísico que não precisa realizar perfuramentos em excesso. Um projeto desta magnitude poderia ser melhor analisado e até mesmo replicado aqui na América do Sul, levando em conta suas próprias peculiaridades.



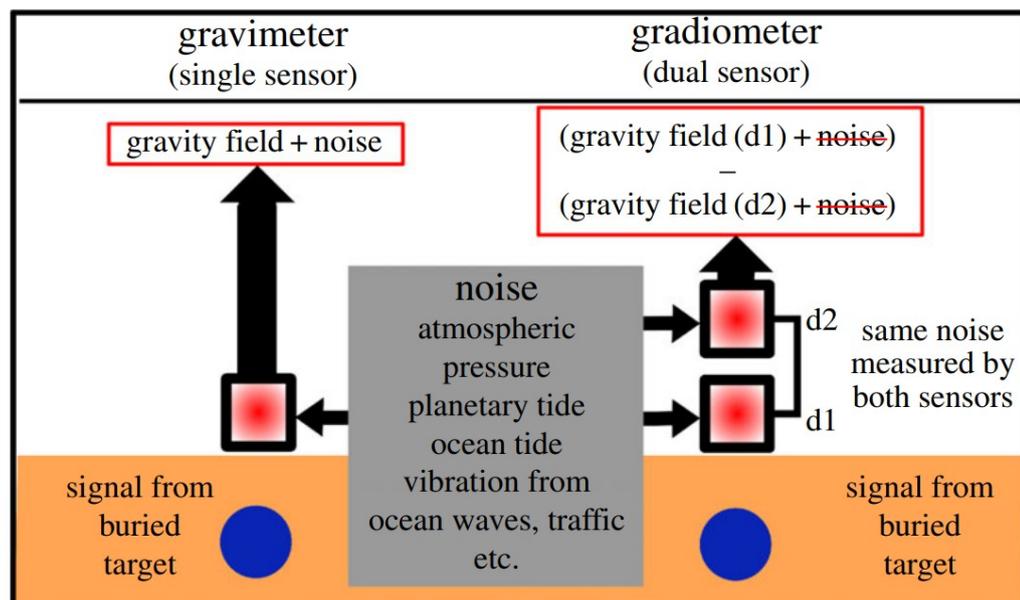
Figura 27: Países e organizações participantes do FIQUgS.

Fonte: <https://www.fiqugs.eu/>

Outro fator extremamente interessante que pode ser observado a partir dos artigos analisados neste trabalho de conclusão é o quanto ainda há espaço para melhorias não só

dessa tecnologia, mas também dos métodos de caracterização. Nas análises de Ménoret et al., do AQG B01, somos informados de que algumas medidas precisam ser refeitas para termos valores bons de acurácia seja por conta das condições de temperatura e umidade do local, ou pela diferença de altura entre os dois gravímetros comparados. Em se tratando de melhorias do instrumento em si, Antoni-Micollier et al., traz em sua análise do tempo em que o gravímetro AQG B01 serviu como parte do projeto NEWTON-g nas proximidades das crateras do vulcão Etna, a necessidade de substituir o acelerômetro do sistema de compensação vibracional por um sismômetro para obter uma razão de sinal-ruído melhor. Ménoret et al., também nota um comportamento peculiar deste mesmo instrumento quando este é instalado com uma orientação contrária (girando-o 180°), ao testar as mudanças que o Efeito Coriolis pode causar. O protótipo de Berkeley analisado por Wu et al., apresenta valores melhores de sensibilidade do que o AQG B01, porém sua capacidade de funcionamento em campo é muito menor, por conta de ser necessário um veículo próprio para levá-lo, sua faixa de temperatura funcional também é um pouco menor, ou pelo menos não foi testada para temperaturas mais extremas.

Uma das alternativas promissoras e que também valeriam uma pesquisa por si só são os sensores de gradientes gravitacionais ou gradiômetros. A diferença deles para os gravímetros quânticos é a presença de um segundo sensor de gravidade, no caso quântico um segundo tubo de vácuo para realizar interferometria atômica, e isso faz com que ruídos ambientais sejam quase que completamente reduzidos, e por consequência o tempo de integração necessário para cada ponto também seria reduzido (HINTON et al., 2017; STRAY et al., 2022).



*Figura 28: Diferença entre gravímetro e gradiômetro.
Fonte: Hinton et al., 2017*

O que é resumido na imagem acima (Fig. 28) é que dois sensores parecidos o bastante e referem-se ao mesmo referencial gravitacional (o espelho retrorefletor em um interferômetro atômico) vão possuir ruídos em comum que serão depois cancelados. Com interferometria atômica teríamos dois sensores sem nenhuma deriva instrumental pelo qual um único feixe de medida passaria por duas nuvens de átomos e referenciando um único espelho.

O gravímetro quântico é um instrumento que almeja ser utilizável em campo, fornecendo valores absolutos da gravidade com boa precisão e sensibilidade (por volta de 10 nm/s^2), e que consiga se manter ativo por meses e até anos. Um produto com tais características não existia até muito atrás, portanto encontrar novos usos para essa tecnologia ainda é um processo em andamento. O monitoramento do sistema de canalização de um vulcão, é um desses usos, mas existem outros sistemas que se beneficiariam com essa possibilidade de monitoramento contínuo como reservatórios subterrâneos de água (aquíferos), petróleo, gás natural, depósitos de CO_2 , bem como o fluxo desses fluidos ao longo do tempo (VAN CAMP et al., 2017) . Acredito que com o súbito aumento da agressividade das tempestades aqui no sul do Brasil, poderia ser interessante utilizar um gravímetro quântico no estudo do equilíbrio de massas, taxas de infiltração e escoamento do lago Guaíba para que dessa forma possamos nos preparar e lidar melhor com as consequências deste período.

Este trabalho também permitiu aprender sobre o que está sendo feito aqui no Brasil. Em conversas com o professor Philippe Courteille do Instituto de Física da Universidade de São Paulo (USP) soubemos que a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) tem fomentado um projeto de parceria entre universidades e empresas voltado para tecnologias quânticas (BORGES et al., 2023) , e que o próprio professor Philippe tem participado na construção de um protótipo de um gravímetro quântico utilizando oscilações de Bloch (Fig. 29).



Figura 29: Gravímetro quântico em construção na USP.
Fonte: Borges et al., 2023

Durante essas mesmas conversas, fomos informados sobre alguns usos que essa tecnologia eventualmente poderia ter. Uma delas seria verificar a possibilidade de utilizar uma versão mais portátil desse gravímetro na pesagem de caminhões em pedágios, já a outra seria verificar a viabilidade de analisar a densidade do solo para avaliar sua capacidade de captura de CO₂ (COURTEILLE, [s.d.]). Nenhuma dessas duas ainda foram implementadas, mas são ideias extremamente interessantes, especialmente a segunda, pois o setor da agricultura é muito desenvolvido no Brasil, e um processo que é mais rápido que o que temos atualmente ajudaria esse setor ainda mais.

Entrando agora no escopo da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), este trabalho permitiu um maior diálogo entre diferentes departamentos (Física e Geociências) fazendo com que fosse possível enxergar necessidades de outros departamentos que podem sinergizar umas com as outras. As conversas com o professor Sérgio Florêncio do Instituto de Geociências da UFRGS foram fundamentais para entender alguns conceitos da gravimetria, além da situação gravimétrica do sul do Brasil.

Ele nos trouxe alguns dados interessantes como o fato de que a medida gravitacional absoluta mais próxima que temos é em Santa Maria, e como medidas relativas vão ficando cada vez mais incertas quanto mais distante da medida absoluta de calibração, isto não é nada bom. O gravímetro que possuímos no campus é um relativo Scintrex CG-3 (Fig. 30), ele foi adquirido nos anos 90 e deveria ter sido levado para a fábrica para ser calibrado, porém isso não aconteceu. Este modelo por ser muito antigo não realiza correções nos dados, foi necessário que os alunos criassem um software para fazer essas correções. Também devido à sua idade, só existe um computador no departamento que seja compatível com as entradas e com o sistema operacional deste gravímetro. O conserto ou adaptação de entradas em outros computadores para esse gravímetro é uma demanda que poderia ser satisfeita em forma de projeto pelos alunos da Engenharia Física, ainda que o ideal seja obter um gravímetro mais novo.

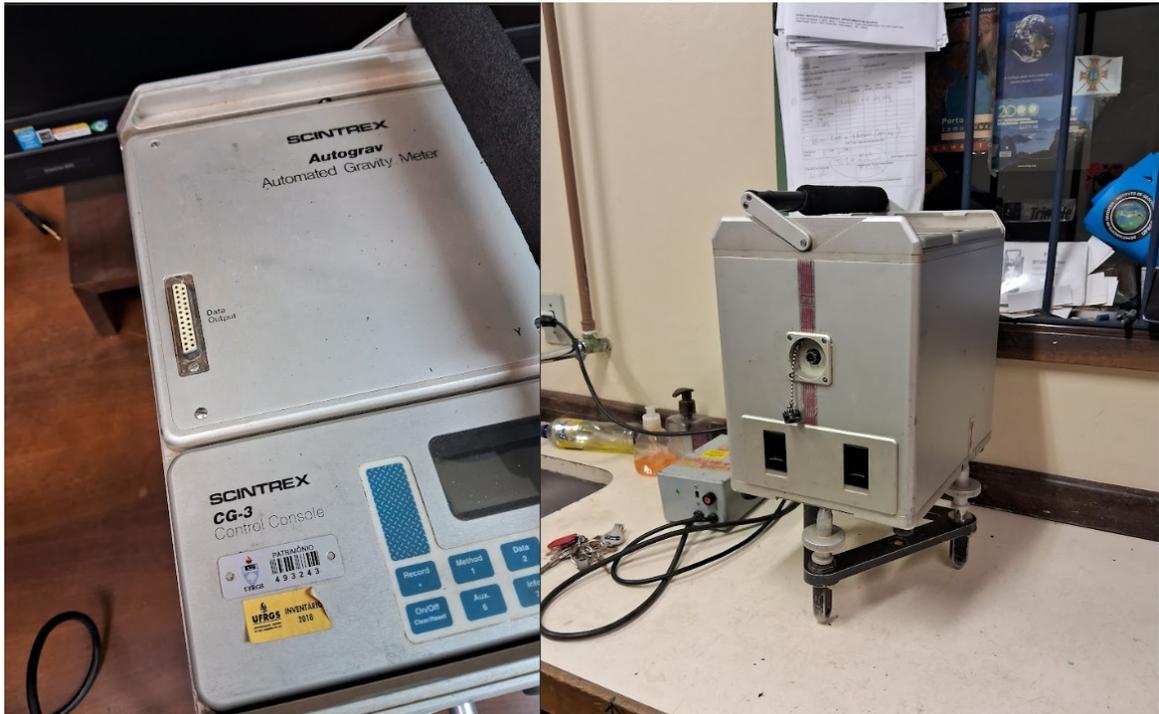


Figura 30: Gravímetro relativo Scintrex CG-3. Único disponível na UFRGS.

Durante minha participação nas aulas onde realizamos medidas utilizando este gravímetro, fiquei ciente da existência de um ponto colocado pelo IBGE (Fig. 31) onde a gravidade é conhecida. Ao realizar as medidas com um gravímetro relativo é feito um circuito onde iniciamos neste ponto de gravidade conhecida passamos pelos pontos onde queremos saber a gravidade e fechamos o circuito com mais outra medida no ponto inicial. Vale notar aqui que este ponto de gravidade conhecida já vem com um erro de 5 mGals, portanto temos aqui uma composição de erros vindos tanto da máquina não calibrada, quanto do “deslocamento” de um local com gravímetro absoluto até este ponto de valor conhecido.



Figura 31: Ponto colocado pelo IBGE onde a gravidade é conhecida.

Nessas aulas também pude conversar novamente com o professor, desta vez sobre possíveis usos comerciais de um gravímetro quântico e sobre como completar um mapa gravimétrico do Rio Grande do Sul seria mais rápido com posse de tal dispositivo (Com os instrumentos que temos hoje em dia levaria por volta de 1 ano para fazer isso, com cada local levando uma semana). Um dos usos comerciais levantados foi do uso na metrologia, visto que algumas empresas necessitam do valor exato da gravidade em uma bancada de trabalho para receber a certificação ISO9001, um gravímetro absoluto quântico conseguiria fazer isso com uma maior confiabilidade do que um gravímetro relativo.

Por fim, foi realizada também uma pesquisa de mercado sobre os valores de tais gravímetros. Com exceção do CG-5, os valores foram obtidos entrando em contato com as empresas fornecedoras. Para o gravímetro de campo absoluto A10 da Scintrex o valor era de US\$ 420.000,00, enquanto que o AQG A01 da agora Exail custava € 410.000,00, e o B01 € 460.000,00, por fim o gravímetro relativo CG-5 da Scintrex foi encontrado usado à venda em fóruns por aproximadamente US\$ 70.000,00 (“Gravity Meters for Sale : Scintrex CG5 and CG3-M - Geophysics Forum”, [s.d.]).

Analisando todas essas variáveis, sinto que há muito a se ganhar ao investir nessa tecnologia. Olhando apenas pelo preço nota-se uma grande diferença entre os gravímetros absolutos e os relativos, mas não tanto entre os absolutos quânticos e “convencionais”. O ideal seria construir um do zero, visto que várias das tecnologias utilizadas nele também podem ser aproveitadas em outros locais (Lasers, câmara de vácuo, resfriamento de átomos), e o que está sendo feito em São Paulo pelo professor Courteille entre outros certamente beneficiará o Brasil na corrida tecnológica a longo-prazo. Outro fator é o fato de que ainda há muito a ser explorado na questão de usos, no setor da agricultura notei que não consegui encontrar nenhum artigo que indicasse uma pesquisa voltada a essa área.

8 BIBLIOGRAFIA

3º Ciclo ILP-FAPESP de Ciência e Inovação: Tecnologias Quânticas Emergentes

<https://www.youtube.com/watch?v=bDITqU8uWYk>.

Antoni-Micollier, L. et al. Detecting Volcano-Related Underground Mass Changes With a Quantum Gravimeter. **Geophysical Research Letters**, v. 49, n. 13, p. e2022GL097814, 2022.

Aquino, R. D. S. Levantamento Gravimétrico Do Litoral Médio Do Estado Do Rio Grande Do Sul: Parte Central Emersa Da Bacia De Pelotas. P. 92, 2017.

Atomionics. Disponível em: <<https://www.atomionics.com/>>. Acesso em: 16 fev. 2024.

Barbosa, A. C. B.; Blitzkow, D. Ondaletas: Histórico e Aplicação. 2008.

Bodart, Q. et al. A cold atom pyramidal gravimeter with a single laser beam. **Applied Physics Letters**, v. 96, n. 13, p. 134101, 29 mar. 2010.

Borges, B.-H. et al. A roadmap towards quantum science and technologies in brazil. 4 abr. 2023.

Carbone, D. Et Al. The Newton-G Gravity Imager: Toward New Paradigms For Terrain Gravimetry. **Frontiers In Earth Science**, V. 8, P. 573396, 9 Out. 2020.

Castro Junior, C. A. C. E.; Guimarães, G. D. N.; Ferreira, N. C. Evolução Da Infraestrutura Gravimétrica No Brasil. **Geosciences = Geociências**, V. 37, N. 2, P. 361–384, 25 Jun. 2018.

Cladé, P. Bloch oscillations in atom interferometry. **La Rivista del Nuovo Cimento**, v. 38, n. 4, p. 173–207, 21 abr. 2015.

Comunicação pessoal com o Professor Sérgio Florêncio de Souza do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Professor Titular e Professor Permanente do Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto (PPGSR) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, linha de pesquisa de Geodésia por Satélite. Em pesquisa tem experiência na área de Geodésia, atuando principalmente nos seguintes temas: Determinação do Geoide, Modelos do Geopotencial e Altitudes Físicas.

Cooke, A.-K.; Champollion, C.; Le Moigne, N. First Evaluation Of An Absolute Quantum Gravimeter (Aqg#B01) For Future Field Experiments. **Geoscientific Instrumentation, Methods And Data Systems**, V. 10, N. 1, P. 65–79, 24 Mar. 2021.

Courteille, P. W. Gravimetry for soil density measurement. [s.d.]. Comunicação pessoal.

FIQUGS. Disponível em: <<https://www.fiqugs.eu/>>. Acesso em: 16 fev. 2024.

Gravitação Universal. Disponível Em: <<https://Brasilecola.Uol.Com.Br/Fisica/Gravitacao-Universal.Htm>>. Acesso Em: 13 Nov. 2023.

Gravity Meters for Sale : Scintrex CG5 and CG3-M - Geophysics Forum. Disponível em: <<https://detectation.com/forum/viewtopic.php?t=3601>>. Acesso em: 16 fev. 2024.

Hinton, A. et al. A portable magneto-optical trap with prospects for atom interferometry in civil engineering. **Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, v. 375, n. 2099, p. 20160238, 6 ago. 2017.

<https://www.ictp-saifr.org/qt2023/> Quantum Technologies for São Paulo, Brazil, and Latin America. Comunicação pessoal com o Professor Marcelo Terra Cunha da UNICAMP, um dos organizadores do evento.

Kasevich, M.; Chu, S. Atomic interferometry using stimulated Raman transitions. **Physical Review Letters**, v. 67, n. 2, p. 181–184, 8 jul. 1991.

Lee, K. I. et al. Single-beam atom trap in a pyramidal and conical hollow mirror. **Optics Letters**, v. 21, n. 15, p. 1177, 1 ago. 1996.

Ménoret, V. et al. Gravity measurements below 10^{-9} g with a transportable absolute quantum gravimeter. **Scientific Reports**, v. 8, n. 1, p. 12300, 17 ago. 2018.

Moreira, Ana Clara. A tecnologia quântica de segunda geração vai chegar ao Brasil? **Jornal Unesp**, 2023. Disponível em: <<https://jornal.unesp.br/2023/02/06/a-tecnologia-quantica-de-segunda-geracao-vai-chegar-ao-brasil/>>. Acesso em: 20 de jun. De 2023.

Niebauer, T. Gravimetric Methods – Absolute And Relative Gravity Meter: Instruments Concepts And Implementation. Em: **Treatise On Geophysics**. [S.L.] Elsevier, 2015. P. 37–57.

Normal Gravity Formula. Disponível em: <<https://encyclopedia.pub/entry/33797>>. Acesso em: 16 fev. 2024.

Stray, B. et al. Quantum sensing for gravity cartography. **Nature**, v. 602, n. 7898, p. 590–594, 24 fev. 2022.

Tackmann, G. **Raman Interferometry With Free-Falling And Trapped Atoms**. Phdthesis —[S.L.] Université Pierre Et Marie Curie - Paris Vi; Leibniz Universität Hannover, 25 Set. 2013.

Wu, X. et al. Gravity surveys using a mobile atom interferometer. **Science Advances**, v. 5, n. 9, p. eaax0800, 6 set. 2019. ch, M.; Chu, S. Atomic Interferometry Using Stimulated Raman Transitions. **Physical Review Letters**, V. 67, N. 2, P. 181–184, 8 Jul. 1991.

朱栋高世腾; DONG ZHU, S. G. 量子重力仪在地球科学中的应用进展. **地球科学进展**, v. 36, n. 5, p. 480–489, [s.d.].