

Nathália Gobira Galvão

Confecção de um Pré-protótipo de Magnetômetro Unidimensional

Alegre - ES, Brasil

2019

Nathália Gobira Galvão

Confecção de um Pré-protótipo de Magnetômetro Unidimensional

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a Universidade Federal do Espírito Santo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Licenciado em Física.

Universidade Federal do Espírito Santo - UFES

Centro de Ciências Exatas, Naturais e da Saúde

Orientador: Prof. Dr. Roberto Colistete Júnior

Alegre - ES, Brasil

2019

Nathália Gobira Galvão

Confecção de um Pré-protótipo de Magnetômetro Unidimensional

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a Universidade Federal do Espírito Santo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Licenciado em Física.

Aprovado em:

Comissão Examinadora:

Prof. Dr. Roberto Colistete Júnior
Orientador

Professor Dr. Guilherme Rodrigues Lima

Professora Msc. Jenesca Florencio Vicente Lima

Alegre - ES, Brasil

Dedicatória

Dedico este trabalho à minha tia avó Raquel, ou melhor, à minha Vó Rex, a primeira pessoa que eu contei quando passei na UFES. Só eu vi o tamanho da emoção em seus olhos quando te dei a “grande notícia”. Portanto, mesmo não estando mais entre nós, não poderia dedicar à outra pessoa essa conquista da minha vida, o fim de uma jornada cujo primeiro passo foi dado ao seu lado.

Agradecimentos

Quero agradecer primeiramente à minha família de Vitória da Conquista: minha mãe Ana Paula por respirar fundo durante meus chiques; ao meu avô Agostinho e à minha avó Maria por seus carinhos imensos e, principalmente, pelo aipim com carne do sol e farinha todas as vezes que voltava para casa. Agradeço aos meus irmãos e ao meu tio Teófilo, que é quase um irmão pra mim, por sempre fazerem o melhor possível para que eu não me sentisse excluída das coisas que aconteciam na minha ausência e também por conseguirem, mesmo a distância, me tirar do sério. Vocês estão de parabéns, mesmo! Agradeço também à minha família de Vitória-ES que fizeram com o que suas casas fossem minha segunda casa, agradeço especialmente as minhas tias Izabel e Justina pelos almoços de domingo em família, pelo apoio financeiro e por fazer por muitas vezes o papel das minhas avós. Saibam que todos vocês contribuíram, e muito, para a conclusão dessa etapa da minha vida.

Agradeço também ao meu namorado, Igor, que se tornou a parte da família que faltava e eu nem sabia. Você foi fundamental para o meu amadurecimento no curso e pela força para continuar, que ora era força de vontade, ora era força do ódio, agradeço imensamente à sua paciência para os meus dramas e crises de ansiedade. Tudo teria sido muito mais difícil sem você.

Ao meu orientador Roberto Colistete Júnior, foi uma honra ter sido orientada por uma mente tão brilhante. Obrigada pela paciência ao me ensinar tanto os conceitos deste trabalho quanto a sempre andar com um casaco, caso haja uma reunião contigo. Agradeço também o Eduardo Stefanato por sua colaboração supimpa ao longo deste projeto. E por último, mas não menos importante, agradeço a mim, pois sem mim nada disso teria acontecido! Ah, não posso deixar de agradecer a minha gatinha, Brigitte, por todas as vezes que sentou no teclado do meu computador enquanto escrevia meu TCC, era hora de parar para te dar carinho, eu sei!

Resumo

Desde 1936 sabemos de que a Terra é formada por crosta, manto e núcleo, sendo este último subdividido em externo e interno. O núcleo externo possui maior dimensão, está no estado líquido e é formado, principalmente, por ferro e níquel, possuindo também alguns elementos mais leves como: oxigênio, sódio, magnésio e enxofre. Por sua vez, o núcleo interno é menor, sólido e composto somente por ferro e níquel. Devido ao fato de o núcleo da Terra ser formado principalmente por metais em estado líquido e estarem em altas temperaturas, o movimento de rotação e de convecção deste material faz com que o nosso planeta funcione como um grande ímã, e é este campo magnético que nos protege de objetos externos. Esta camada é conhecida por magnetosfera e, devido à sua grande relevância para a vida terrestre, estudar o seu comportamento nos fornece, para além do conhecimento puro (produto da ciência básica), *expertise* teórica e prática para elaboração de mecanismos de prevenção de desastres naturais, por exemplo. Neste contexto, este projeto visa a confecção de um pré-protótipo de um magnetômetro unidimensional com leitor digital, utilizando um sensor *fluxgate* FLC 100 conectado a um microcomputador BBC Micro:Bit. A escolha dos equipamentos foi balizada principalmente pelo critério qualitativo da medição experimental (*i.e.*, precisão da medida) e pelo custo financeiro para confecção do equipamento.

Palavras-chave: Grandezas geomagnéticas, Magnetômetro, Fluxgate, BBC micro:bit

Abstract

Since 1936 we have known that the Earth is made up of crust, mantle and the core, being the core subdivided into outer and inner. The outer core has a larger dimension, is liquid and is mainly composed of iron and nickel, besides of lighter elements, such as oxygen, sodium, magnesium and sulfur. In its turn, the inner core is smaller, solid and is composed solely of iron and nickel. Given the fact that the core of the Earth is mainly composed by liquid metals at high temperatures, the natural rotation and convection movement of this material leads the Earth to behave like a giant magnet, and is this naturally created magnetic field that protect us from outside (space) objects. Such magnetic layer is nowadays known as magnetosphere, and given its big relevance to life on Earth, studying its behavior provide us theoretical and practical *expertise* to design and develop mechanisms intended for natural disaster prevention, besides pure knowledge (which is the main product of basic science). In this context, the present project proposes the production of a pre-prototype of a one-dimensional magnetometer using a fluxgate FLC 100 sensor connected to a microcomputer BBC micro:bit. The choice for these equipments was mainly guided by the qualitative aspect of the experimental measuring (*i.e.* the accuracy) by the financial cost to build the magnetometer prototype.

Keywords: Geomagnetic quantities, magnetometer, fluxgate, BBC micro:bit.

Lista de ilustrações

Figura 1	– Incidência da radiação solar na Terra.	13
Figura 2	– Magnetosfera terrestre.	13
Figura 3	– Representação gráfica do campo magnético terrestre.	15
Figura 4	– Componentes vetoriais do campo geomagnético.	16
Figura 5	– Representação do funcionamento de um magnetômetro de bombeamento ótico.	18
Figura 6	– Imagem de um experimento realizado em uma magnetômetro de força de Faraday.	19
Figura 7	– Representação gráfica do magnetômetro <i>fluxgate</i>	21
Figura 8	– Magnetômetro Fluxgate Fluxmaster.	27
Figura 9	– Imagem do <i>fluxgate</i> FLC 100.	28
Figura 10	– Magnetômetro <i>fluxgate</i> FLC 100.	29
Figura 11	– Diagrama do circuito do divisor de tensão.	30
Figura 12	– Divisor de tensão utilizado no demonstrador.	31
Figura 13	– Fotografia da frente e do verso do BBC Micro:Bit.	31
Figura 14	– Demonstração do processo de amostragem	32
Figura 15	– ADS1115 de 16 bits.	34
Figura 16	– ADS1219 de 24 bits.	34
Figura 17	– Placa de extensão Kittenbot IObit.	36
Figura 18	– Fotografia do pré-protótipo pronto.	40
Figura 19	– Teste 1 utilizando imã de geladeira e papel milimetrado.	43
Figura 20	– Gráfico dos resultados do teste 1	43
Figura 21	– Gráfico das medições do teste 3	46

Lista de tabelas

Tabela 1	– Simulação da resolução em nano Tesla (nT) do FLC 100 com diferentes conversores ADC.	35
Tabela 2	– Medição da resistência dos divisores de tensão do FLC 100 (V_{plus})	37
Tabela 3	– Medição da resistência dos divisores de tensão do FLC 100 (V_{ref})	37
Tabela 4	– Medição da tensão de saída dos dispositivos	38
Tabela 5	– Análise da resolução em nT do FLC 100 via uso de ADC com diferentes resoluções	38

Sumário

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	Estudo do Geomagnetismo	13
1.1.1	Teoria Geomagnética	14
1.1.2	Vetor campo geomagnético	14
1.2	Magnetômetros	16
1.2.1	Magnetômetro escalar (ou campo total)	17
1.2.2	Magnetômetros Vetoriais	17
1.3	<i>Fluxgate</i>	20
1.3.1	Utilização do <i>fluxgate</i>	23
2	JUSTIFICATIVA E OBJETIVOS	24
2.1	Justificativa	24
2.2	Objetivos	25
2.2.1	Objetivo Geral	25
2.2.2	Objetivos Específicos	25
3	ARQUITETURA	26
3.1	<i>Fluxgate</i> FLC 100	26
3.2	BBC Micro:Bit	29
3.2.1	ADC (<i>Analogic-to-Digital Converter</i>)	31
3.2.2	Kittenbot IO:bit	35
4	IMPLEMENTAÇÃO	37
4.1	Processamento da informação	39
4.2	Testes	41
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	42
5.1	Teste 1	42
5.2	Teste 2	43
5.3	Teste 3	45

6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	47
6.1	Projetos futuros	48
	REFERÊNCIAS	49
	ANEXO A – CÓDIGO MICRO:PYTHON	53

1 Introdução

O planeta Terra possui um núcleo que pode ser dividido em duas partes, “externo” e “interno”. O núcleo interno é composto majoritariamente por ferro metálico (ou ferro elementar, Fe) e níquel, ambos em estado sólido devido às altas pressões no núcleo interno. De acordo com os modelos teóricos da hipótese planetesimal de Chamberlin-Moulton, ([LANKFORD, 2011](#)), e do modelo de acreção ([PAPALOI-ZOU; TERQUEM, 2006](#); [WYATT, 2008](#)), o núcleo da Terra e os outros corpos do sistema solar formaram-se a partir da aglomeração de poeira do disco de acreção presente ao redor da estrela central, o Sol. Mais especificamente, após a aglomeração de poeira do disco de acreção ocorreu a formação de objetos maciços com diâmetro da ordem de quilômetros (de 0,1km a 1km), cujo processo ainda é objeto de debate na comunidade científica, ([PAPALOI-ZOU; TERQUEM, 2006](#)).

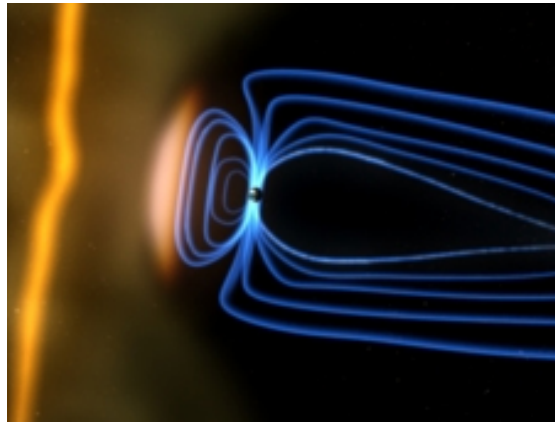
No que diz respeito a corpos de dimensões maiores, o acúmulo de energia dos impactos entre outros corpos, decaimento radioativo e contração gravitacional, levou ao aumento da temperatura do planeta e, conseqüentemente, à fusão parcial e reorganização de seus materiais. Materiais menos densos se reorganizaram em manto e crosta, enquanto que os materiais com maior densidade, como ferro e níquel, migraram para o núcleo do planeta. Neste estágio a Terra estava em um estado de convecção turbulenta constante. Em resumo, ela funciona como um grande gerador elétrico, onde a energia cinética convectiva é (parcialmente) convertida em energia eletromagnética. Ou seja, o efeito do movimento do ferro no núcleo terrestre induz o surgimento de correntes elétricas, que, por sua vez, geram campo magnético ([USGS, 2015](#)). Este comportamento é descrito através da teoria do Dínamo, proposto por Elsasser em meados do século XX ([ELSASSER, 1958](#)). Por se estender por centenas de milhares de quilômetros, esta camada de campo magnético foi denominada magnetosfera e serve para proteger o planeta dos ventos solares. É importante ressaltar que o campo magnético originado no interior do planeta é responsável pela maior parte da magnetosfera. Contudo, esta ainda sofre influência das atividades da ionosfera, que é a região logo acima da atmosfera ionizada pelas radiações solares, ([JR et al., 2011](#)),([WALKER; RUSSELL, 1996](#)). Nas figuras 1 e 2 encontra-se,

respectivamente, uma representação gráfica das linhas de campo magnético da magnetosfera e a imagem de uma simulação gráfica da deformação dessas linhas de campo devido à incidência de ventos solares.

Ventos solares são fluxos de partículas ionizadas pela radiação do sol provenientes da diferença de pressão entre o espaço interestelar e a coroa solar. Períodos de maior incidência de explosões na superfície do Sol tendem a produzir fluxos mais intensos de plasma solar, o que causa uma deformidade na magnetosfera e, conseqüentemente, uma alteração súbita no campo magnético terrestre. Uma intensa atividade solar pode significar o anúncio do que chamamos tempestade geomagnética, ([SPACE WEATHER CANADA, s.d.](#)). Esses eventos podem causar uma série de danos à infraestrutura de telecomunicação no nosso planeta, devido a interferências no circuito elétrico deste sistema, além de um belo espetáculo de cores no céu das regiões polares do planeta Terra conhecido por auroras boreal (quando no polo norte) e austral (quando no polo sul). Um exemplo de consequências dessas tempestades geomagnéticas aconteceu em 1859 e ficou conhecido como evento Carrington. Neste dia, aparelhos telégrafos do mundo inteiro apresentaram problemas, como interrupções no funcionamento e descargas elétricas que provocaram incêndio em torres de comunicação. Foi possível observar auroras no céu de diversos países, como Cuba, Bahamas, Jamaica, El Salvador e Havaí. Outras tempestades aconteceram com o passar dos anos, mas, apesar de terem sido mais brandas, foram suficientes para interromper linhas telefônicas e a transmissão de energia elétrica, ([NASA, 2008](#)). Com base em dados de consumo de energia elétrica de 2001 a 2013, estima-se que uma tempestade solar de magnitude equivalente à atingida durante evento Carrington causaria um prejuízo entre 0,6 e 2,6 trilhões de dólares, ([LLOYD'S, 2013](#)) e ([BROWN, 2009](#)). Para que a sociedade não sofra com este tipo de evento faz-se necessário um monitoramento constante do clima espacial e do campo geomagnético, que se dá a partir do uso de instrumentos de medição (da intensidade e direção) dos campos magnéticos denominados magnetômetros. Com este instrumento é possível identificar pequenas variações no campo magnético terrestre, que podem ser provenientes de ventos solares, turbulências no manto terrestre ou formações rochosas, por exemplo, possibilitando a detecção de alguns materiais ou até mesmo a previsão de fenômenos geomagnéticos viabilizando uma

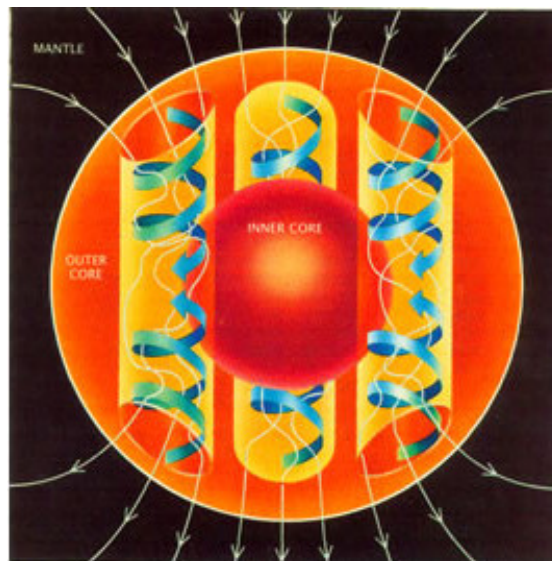
medida preventiva antecipada, afim de diminuir possíveis danos causados pelas tempestades solares.

Figura 1 – Incidência da radiação solar na Terra.



Fonte: (NASA, 2016).

Figura 2 – Magnetosfera terrestre.



Fonte: (USGS, 2015).

1.1 Estudo do Geomagnetismo

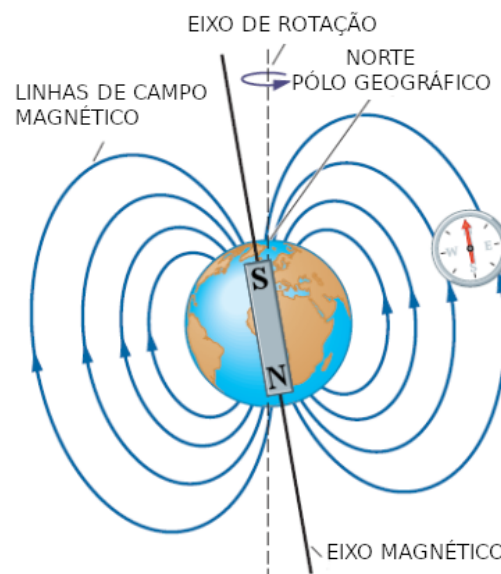
O primeiro passo para o desenvolvimento da ideia que temos hoje sobre o campo magnético veio de milhares de anos atrás, com Tales de Mileto na Grécia, ao descobrir o efeito atrativo que tinha uma pedra de âmbar após ser friccionada em um pedaço de couro. Mas foi da China, em 120 a.C. o primeiro relato da propriedade diretiva deste “fenômeno” para fins diretivos e, em 83 d.C., Wang Chung descreve uma espécie de objeto bastante parecido com o que conhecemos hoje por bússola. Era uma agulha de pedra-ímã flutuando na água. Na época este objeto era utilizado em rituais proféticos (JUNIOR, 2010). Esse foi o pontapé inicial para a criação de bússolas mais precisas, utilizadas na navegação marítima, que ganhou força no século XIV.

E foi entre os séculos XVII e XVIII que surgiram os primeiros mapas geográficos, elaborados com base nas observações feitas durante este período das navegações. Outro fato importante a ser listado é que, mais ou menos nessa mesma época, o físico William Gilbert publicou seu famoso livro “De Magnete”, sendo pioneiro na ideia de que o planeta Terra funcionaria como um grande ímã e por este motivo as bússolas estariam sempre apontando para o norte geomagnético. Com a publicação deste livro abre-se as portas para o estudo mais aprofundado dos campos magnéticos e, portanto, do geomagnetismo. Mas foi em meados do século XIX que o físico alemão Friederich Gauss revolucionou os estudos que se tinha na época sobre o tema, com a comprovação matemática de que a propriedade magnética da Terra é oriunda de seu interior e com a criação do primeiro instrumento capaz de medir campos magnéticos (BAYLOR; HAZARD, 1900).

1.1.1 Teoria Geomagnética

Podemos dizer que o campo geomagnético terrestre, gerado majoritariamente no interior da Terra, funciona como um imenso dipolo magnético, localizado no interior do globo, com linhas de forças que ligam um polo (norte) ao outro (sul). O eixo do dipolo magnético terrestre possui inclinação de aproximadamente $11,5^\circ$ em relação ao eixo de rotação da Terra, (ZHAO; ZONG, 2012). Na figura 3 temos uma representação gráfica dos eixos geomagnético e de rotação do globo.

Figura 3 – Representação gráfica do campo magnético terrestre.



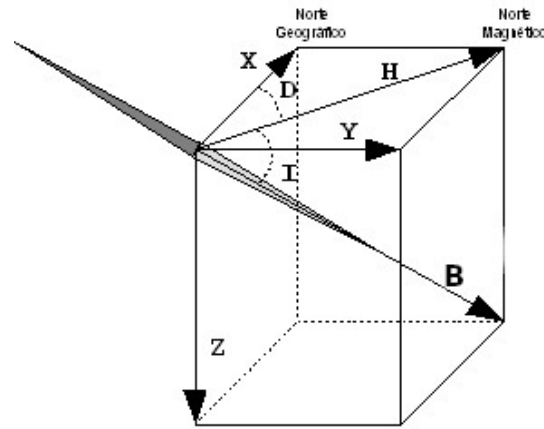
Fonte: Adaptado de ([SCIENITIES, 2015](#)).

1.1.2 Vetor campo geomagnético

O campo magnético terrestre é uma grandeza vetorial, possuindo módulo, direção e sentido. As componentes vetoriais do campo geomagnético são retratadas conforme mostra a figura 4:

- X é a componente Norte-Sul do campo magnético;
- Y é a componente Leste-Oeste do campo magnético;
- Z é a componente vertical do vetor campo magnético;
- H é a componente horizontal do vetor;
- B é o vetor campo magnético total;
- D representa o ângulo de declinação, ângulo entre o Norte geográfico e o Norte magnético (H);

Figura 4 – Componentes vetoriais do campo geomagnético.



Fonte: Adaptado de (IPMA, s.d.).

- I representa o ângulo de inclinação, ângulo entre o plano horizontal e o campo magnético total (B).

O módulo das componentes vetoriais do campo geomagnético pode ser definido matematicamente conforme descrito abaixo. As componentes X , Y , Z , H e B são grandezas medidas em Tesla (T) de acordo com o sistema internacional de unidades (SI). Por se tratar de angulações, as grandezas D e I são medidas em graus.

$$|X| = |H| \cos(D) \quad (1.1)$$

$$|Y| = |H| \sin(D) \quad (1.2)$$

$$|H| = \sqrt{X^2 + Y^2} \quad (1.3)$$

$$|B| = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2} \quad (1.4)$$

$$D = \arctg\left(\frac{Y}{X}\right) \quad (1.5)$$

$$I = \arctg\left(\frac{Z}{H}\right) . \quad (1.6)$$

1.2 Magnetômetros

Magnetômetros são instrumentos cuja função é medir o campo magnético, ou a intensidade deste, induzido em um determinado ponto do espaço. Este tipo de sensor pode ser utilizado para uma infinidade de funções, desde comunicação por ondas magnéticas, passando pela detecção de minas subaquáticas, e também no monitoramento de atividades solares, (YOU, 2018). Existe atualmente no mercado uma enorme variedade de magnetômetros, cada um com a sua especificidade e que podem ser aplicados em diferente propósitos. Nesta seção faremos uma classificação destes sensores em dois grandes grupos, de acordo com (EDELSTEIN, 2007): os magnetômetros escalares (ou campo total), que serão expostos na subseção 1.2.1; e os vetoriais, que serão discutidos na subseção 1.2.2.

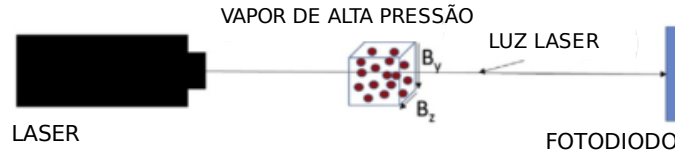
1.2.1 Magnetômetro escalar (ou campo total)

Estes equipamentos são sensíveis somente a intensidade do campo magnético, ignorando a direção e o sentido deste, e por isso também são conhecidos por magnetômetros de campo total. Como por exemplo:

- **Magnetômetro de bombeamento ótico**

Este tipo de magnetômetro consiste em uma célula (uma unidade) preenchida com vapor de metal alcalino sob alta pressão, cujo spin de cada átomo encontra-se inicialmente com orientação aleatória. A orientação dos spins pode ser ordenada com a aplicação de luz *laser*, de forma que os os átomos deste metal terão seus spins com a mesma orientação da luz *laser*. Quando essa célula é submetida a um campo magnético, o spin do elétron sofre uma deflexão de sua posição original orientada pelo feixe de luz *laser*. Este processo reduz a intensidade da luz transmitida. Este tipo de equipamento mede de forma indireta o campo magnético, a partir da diferença entre a intensidade da luz incidida e da luz transmitida, (TIERNEY et al., 2019). Podemos observar na figura 5 a esquematização do funcionamento deste magnetômetro, onde um *laser* é incidido em uma célula de vidro contendo um vapor de metal alcalino. A quantidade de luz detectada no fotodiodo é uma função do campo magnético onde a célula está inserida, (TIERNEY et al., 2019).

Figura 5 – Representação do funcionamento de um magnetômetro de bombeamento ótico.



Fonte: Adaptado de (TIERNEY et al., 2019).

1.2.2 Magnetômetros Vetoriais

Nesta classe estão os equipamentos que são capazes de medir a intensidade, a direção e o sentido do campo magnético. Porém, isso não significa, necessariamente, que todos os magnetômetros vetoriais são capazes de medir as três componentes do vetor campo magnético. Como ficará claro mais adiante, neste trabalho utilizaremos um magnetômetro capaz de medir somente uma das três componentes, porém não a intensidade total do vetor.

Em seguida serão expostos dois exemplos desta classe de equipamentos:

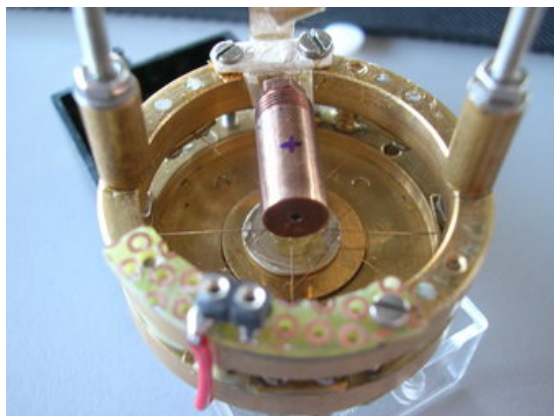
- **Magnetômetro de indução ou magnetômetro de força de Faraday (tradução livre do inglês *Faraday force magnetometer*).**

Este tipo de sensor funciona de acordo com o princípio da lei de Faraday, segundo o qual o gradiente de um campo magnético produz uma força que age sobre um objeto magnetizado. Essa força pode ser expressa por

$$\mathbf{F} = (\mathbf{M} \cdot \nabla)\mathbf{B} \quad (1.7)$$

sendo que \mathbf{M} representa o vetor magnetização do material e \mathbf{B} o vetor campo magnético. Na figura 6 temos um exemplo de magnetômetro de força de Faraday em um experimento no qual foi feita uma medição de uma pequena célula de cobre-berílio, suspensa por fios de bronze fosforoso, (BRANDO; WOSNITZA, s.d.).

Figura 6 – Imagem de um experimento realizado em uma magnetômetro de força de Faraday.



Fonte: (BRANDO; WOSNITZA, s.d.).

Este tipo de sensor possui uma alta precisão na medição da magnetização em ambientes de baixas temperaturas (da ordem de mK) e campos magnéticos de alta intensidade (da ordem de 20T), (SAKAKIBARA et al., 1994).

- **Magnetômetro do tipo MEMS**

Os sistemas micro-eleto-mecânicos (tradução livre do inglês *Micro-Electro-Mechanical Systems*), ou como são mais conhecidos, MEMS, podem ser definidos como uma tecnologia de sensores cujos elementos funcionais possuem escala microscópica e são acionados por uma movimentação do sensor. Os sensores do tipo MEMS são capazes de detectar uma série de medidas, tais como, temperatura, pressão, forças inerciais, radiação e campos magnéticos, (MEMS AND NANOTECHNOLOGY EXCHANGE, s.d.), sendo comumente encontrado em *smartphones*, *tablets* e microcomputadores com as funções de acelerômetro, giroscópio e magnetômetro, no caso de dispositivos com bússola.

Os sensores magnetômetro do tipo MEMS dependem diretamente do movimento mecânico realizado pelo dispositivo, pois estes, em sua maioria, possuem ressonadores que trabalham segundo o princípio da força de Lorentz, que é gerada a partir da interação entre um campo magnético externo e uma

corrente elétrica, (HERRERA-MAY et al., 2016), conforme a equação

$$\mathbf{F} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad (1.8)$$

Na equação (1.8) q representa a carga elétrica; \mathbf{E} representa o campo elétrico; \mathbf{v} é a velocidade da partícula; e \mathbf{B} é o vetor campo magnético.

Outro exemplo de magnetômetro vetorial é o magnetômetro do tipo *fluxgate*. Como este magnetômetro será particularmente importante para este trabalho ele será abordado com maior profundidade na próxima seção.

1.3 *Fluxgate*

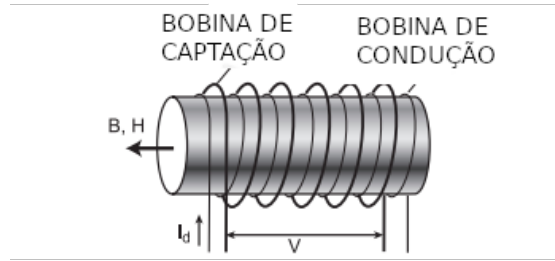
Os magnetômetros *fluxgate* são sensores que medem a componente vetorial do campo magnético, assim como o magnetômetro de Faraday e os magnetômetros MEMS, porém com uma maior sensibilidade a campos magnéticos de baixa intensidade. Estes dispositivos podem ter uma resolução de até 10 pT, (PRIMDAHL, 2003). Os magnetômetros do tipo *fluxgate* foram criados na década de 1930 pelo grupo do geofísico Victor Vacquier, (VACQUIER, 1938), nos Laboratórios de Pesquisa do Golfo, (tradução livre do Inglês *Gulf Research Laboratories*), (LANGLEY, 2003), que ficava localizado na Pensilvânia, EUA. Alguns anos mais tarde, mais precisamente em 1942, o Comitê Nacional de Pesquisa em Defesa, (tradução livre do Inglês *National Defense Research Committee*), ou NDRC, no início da Segunda Guerra Mundial, notou um potencial uso desses dispositivos para fins militares. Estes sensores passaram a ser estudados pela Universidade de Columbia, e testes mostraram que o dispositivo era capaz de detectar, com êxito, submarinos submersos, (FYE; SEARS; MERRIMAN, 1980).

Apesar de ter sido criado há cerca de 80 anos atrás e já existirem magnetômetros mais modernos, como o SQUID que é capaz de realizar medições com precisão de até 10^{-15}T , os magnetômetros *fluxgate* ainda são muito utilizados devido a sua relativa acessibilidade e praticidade (em comparação ao SQUID). Além disso, são sensores que possuem sensibilidade a uma ampla faixa de medição, possuem uma precisão consideravelmente alta, de até 60.000nT e um nível de captação de

interferência a partir de 1Hz e 1T, (PRIMDAHL, 1979). Em contra partida, apesar da alta resolução, os magnetômetros do tipo SQUID necessitam de hélio para o seu funcionamento tornando seu uso viável apenas para trabalhos mais específicos¹. Por esses motivos os magnetômetros do tipo *fluxgate* ainda são amplamente utilizados, tanto em solo terrestre quanto em experimentos espaciais.

Os magnetômetros *fluxgate* funcionam basicamente a partir de um núcleo composto por materiais ferromagnéticos envolto por duas bobinas, uma de condução e outra de captação, conforme explica (MATSUOKA et al., 2013). A junção destes três elementos é feita conforme ilustrado na imagem 7.

Figura 7 – Representação gráfica do magnetômetro *fluxgate*.



Fonte: Adaptado de (MATSUOKA et al., 2013).

De acordo com o trabalho (PRIMDAHL, 1979) e com (GRIFFITHS, 2010), ao submeter o *fluxgate* a um campo magnético externo, induzindo nele uma corrente elétrica, o sensor vai medir uma diferença de potencial V nos terminais da bobina dada pela expressão

$$V = nA \left(\frac{dB}{dt} \right). \quad (1.9)$$

Na equação (1.9) n representa o número de voltas da bobina e a intensidade do campo magnético B (na direção paralela ao eixo do núcleo) será proporcional à intensidade campo magnético qual o *fluxgate* foi submetido (campo geomagnético)

¹ O autor, (EDELSTEIN, 2007), traz na página 4 mais detalhes sobre este tipo de magnetômetro e seu funcionamento, bem como o trabalho de (PIZZELLA et al., 2001), que se dedica a revisar o método de funcionamento dos sensores SQUID no processo de geração de imagens biomagnéticas.

B_{ext} . Ou seja,

$$B = \mu_a B_{ext}, \quad (1.10)$$

sendo μ_a um fator de proporcionalidade chamado de “permeabilidade magnética aparente”.

Para calcular a intensidade do campo magnético na direção paralela ao eixo do núcleo, devemos levar em consideração a magnetização (M) do material que compõe o núcleo devido a sua susceptibilidade magnética χ , de forma que

$$M = \chi H. \quad (1.11)$$

Por sua vez, o campo magnético pode ser dado em termos do campo magnético auxiliar (H) pela relação

$$B = \mu_0(H + M). \quad (1.12)$$

Portanto,

$$B = \mu_0(H + \chi H). \quad (1.13)$$

Além disso, podemos relacionar este campo magnético auxiliar total com o campo auxiliar devido ao campo geomagnético (campo externo) B_{ext} . A saber, esta relação é dada por

$$H = \frac{B_{ext}}{\mu_0} - DM, \quad (1.14)$$

onde D representa um fator de “desmagnetização” (inerente ao material do núcleo). Finalmente, podemos obter a seguinte relação para o campo magnético,

$$B = \frac{(1 + \chi)}{1 + D\chi} B_{ext}. \quad (1.15)$$

Ou seja, da expressão (1.15) podemos ler a permeabilidade magnética aparente,

$$\mu_a = \frac{(1 + \chi)}{1 + D\chi}. \quad (1.16)$$

Voltando à expressão da diferença de potencial entre os terminais da bobina, (1.9), e em posse da expressão final do campo magnético (1.15) obtemos a equação final

que nos possibilitará calcular o valor da intensidade do campo geomagnético (B_{ext}) paralelo ao eixo do núcleo. A saber,

$$V = nAB_{ext}(1 - D) \left(\frac{d}{dt} \frac{(1 + \chi)}{1 + D\chi} \right). \quad (1.17)$$

Ou seja, uma vez que o sensor do magnetômetro mede a diferença de potencial V entre os terminais da bobina e que conhecemos todas as características magnéticas do material, podemos então determinar a intensidade B_{ext} . Na prática utilizamos uma relação linear, e portanto mais simples, entre a diferença de potencial V e o campo magnético B_{ext} . Essa relação linear é válida, dentro de uma margem de erro, quando o sistema opera em condições específicas de temperatura e quando trabalha em um determinado intervalo de potencial V . No capítulo 3, destinado à discussão da arquitetura do protótipo proposto neste trabalho, detalharemos o funcionamento prático do magnetômetro específico que utilizaremos neste trabalho.

1.3.1 Utilização do *fluxgate*

Devido ao seu relativo baixo custo e ampla faixa de sensibilidade, os magnetômetros do tipo *fluxgate* frequentemente aparecem como uma interessante opção para diversas aplicações. Nesta subseção faremos uma breve exposição de alguns dos trabalhos que se utilizam deste sensor.

O trabalho de Ludwiga et al., (2006)², investiga a magneto-relaxação de amostras de nanopartículas de magnetita (Fe_3O_4), quando submetidas a campos magnéticos de 0,2 mT até 2,0 mT. Para isso, os autores optaram por utilizar dois magnetômetros *fluxgate*, ao invés dos magnetômetros do tipo SQUID que são usualmente utilizados neste tipo de análise. Outro exemplo é o trabalho de Brew e Holzinger, (2018), que faz uma análise sobre a viabilidade do uso do *fluxgate* para detecção de objetos espaciais³ baseado em dados do magnetômetro utilizado na missão THEMIS da Nasa, em 2007. E por último, mas não menos importante, temos um protótipo de uma estação geomagnética que foi implementada na cidade de Venda Nova

² DOI: 10.1063/1.2171121, (LUDWIGA et al., 2006)

³ (BREW; HOLZINGER, 2018), <<https://doi-org.ez43.periodicos.capes.gov.br/10.1016/j.asr.2018.01.045>>.

do Imigrante – ES, Brasil, desenvolvido por OLiveira, (2017)⁴. Neste protótipo os autores utilizaram um computador de placa única, três sensores *fluxgate* e conversores analógico-digital. Este protótipo acumulou mais de 2100 horas de testes.

O presente trabalho propõe a confecção de um demonstrador de campo magnético unidimensional e, devido à precisão e versatilidade, optamos por utilizar um sensor do tipo *fluxgate*, modelo FLC 100⁵ acoplado a um microcomputado.

⁴ Destacamos também a experiência prévia obtida na utilização do *fluxgate* FLC 100 no trabalho (OLIVEIRA, 2017), também sob supervisão do Prof. Dr. R. Colistete Júnior.

⁵ <<https://www.stefan-mayer.com/en/products/magnetometers-and-sensors/magnetic-field-sensor-flc-100.html>>.

2 Justificativa e objetivos

2.1 Justificativa

Atualmente, existem no mercado uma variedade de equipamentos que utilizam magnetômetro, como por exemplo, microcomputadores, *tablets* e *smartphones*. Entretanto, como foram projetados para uso doméstico, a precisão dos sensores presentes nesses equipamentos é muito baixa (considerando as necessidades deste projeto). Quando tratamos de magnetômetros de alta precisão, capazes de detectar tempestades solares, ou variações do campo magnéticos terrestre no período de 24 horas, necessitamos de uma precisão que os sensores presentes nos equipamentos caseiros (ou residenciais) não são capazes de fornecer. Então é necessário utilizar equipamentos com sensores mais sofisticados, cujo custo financeiro pode chegar a centenas de euros, como é o caso do magnetômetro unidimensional FluxMaster¹, que oferece uma resolução de até 0,1nT, (INSTRUMENTS, s.d.), podendo custar até 1.360,00 EUR se considerarmos taxas de envio.

Tendo em vista a dificuldade de acesso a magnetômetros de maior precisão, por conta do considerável elevado custo financeiro, este trabalho propõe a confecção de um demonstrador de campo magnético de alta resolução com um custo de até 200.00 USD, utilizando um sensor *fluxgate* modelo FLC 100 que possui uma faixa de medição de $\pm 100\mu\text{T}$ acoplado a um microcomputador BBC Micro:Bit². O baixo custo na produção de um equipamento desta magnitude pode viabilizar um maior acesso a este tipo de ferramenta por parte de pequenas empresas ou até mesmo por escolas de ensino médio, auxiliando na metodologia ensino de conceitos de eletromagnetismo e demais fenômenos geofísicos.

¹ Produzido pela empresa alemã Stefan Mayer Instruments. <<https://www.stefan-mayer.com/en/products/magnetometers-and-sensors/fluxmaster.html>>.

² <<https://microbit.org/>>.

2.2 Objetivos

2.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral desse trabalho é confeccionar um demonstrador de campo magnético unidimensional utilizando um magnetômetro *fluxgate* FLC 100 e um microcomputador BBC Micro:Bit, visando a possibilidade futura de substituição do magnetômetro FluxMaster, por um modelo com tela contendo uma maior variedade de informações, código 100% aberto e com custo de produção de até 200.00 USD.

2.2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos baseiam-se na montagem do equipamento e na verificação da capacidade de medição do demonstrador de campo magnético.

- Montar o protótipo;
- Medir os valores reais da tensão de saída dos dispositivos utilizados no demonstrador (FLC 100, Micro:Bit e IObit);
- Medir os valores reais da resistência dos divisores de tensão utilizados na confecção do demonstrador;
- Realizar medições de teste utilizando o protótipo;
- Calcular a resolução do conversor de sinal ADC utilizado com base nas medições realizadas;
- Comparar os valores obtidos do campo geomagnético com os valores calculados automaticamente no endereço eletrônico <<https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/calculators/magcalc.shtml>>.

3 Arquitetura

Por conta dos altos valores de mercado de magnetômetros unidimensionais, como o modelo MF-1 da Novotest ¹ que pode chegar a custar 6,000.00 BRL, ou o modelo da empresa alemã Stefan Mayer, Fluxmaster (veja figura 8), (citado no capítulo anterior) que tem um custo de 1,360.00 EUR com taxas de envio para o Brasil, o que seria equivalente a 6,362.26 BRL², este trabalho traz a proposta de construir e analisar a viabilidade do uso de um demonstrador de campo magnético. Para tanto, além de um magnetômetro *fluxgate*, utilizaremos também um conversor ADC (sigla do termo em inglês *analogic-to-digital converter*) e um micro-processador de dados. O conversor ADC faz-se necessário como intermédio entre o equipamento de medição, *fluxgate*, e o equipamento de processamento de dados, pois o primeiro possui um mecanismo analógico de funcionamento, enquanto o segundo recebe e processa os dados de maneira digital.

Neste capítulo será apresentado e discutido os detalhes dos equipamentos utilizados neste trabalho, bem como seus detalhes técnicos de instalação. A saber, na primeira seção apresentaremos as características do magnetômetro *fluxgate* FLC 100; e na segunda seção detalharemos as características do microprocessador BBC *micro:bit* que são interessantes para este trabalho. É importante salientar que uma das vantagens do microprocessador BBC *micro:bit* é a de possuir um conversor ADC integrado. As características deste conversor analógico-digital integrado serão discutidas na seção destinada ao BBC *micro:bit*.

3.1 *Fluxgate* FLC 100

De acordo com o capítulo anterior, o sensor de campo magnético utilizado para fazer a leitura principal foi um sensor do tipo *fluxgate* do modelo FLC 100, figuras 9 e 10, fabricado pela empresa Stefan Mayer Instruments. Este sensor possui uma alta

¹ Magnetômetro da empresa brasileira NOVOTEST. <<https://www.blum-novotest.com/br.html>>.

² Conversão feita de acordo com a cotação do dia 02 de dezembro de 2019

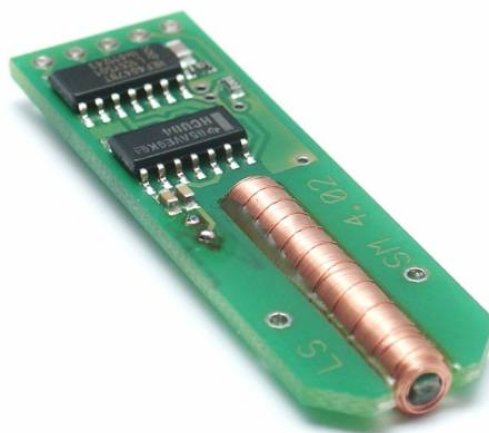
Figura 8 – Magnetômetro Fluxgate Fluxmaster.



Fonte: (INSTRUMENTS, s.d.).

resolução para campos magnéticos de baixa intensidade (até $\pm 100\mu\text{T}$), tornando-se viável seu uso para medições do campo magnético terrestre ou na localização de objetos ferrosos à longa distância, por exemplo. Uma característica importante neste tipo de sensor é a medição indireta do campo magnético. O sensor presente nos magnetômetros *fluxgate* mede a diferença de potencial (DDP) gerada nos terminais de suas bobinas de detecção (devido à existência do campo magnético). Após efetuar a medição da DDP nos terminais das bobinas, o equipamento entrega ao leitor exatamente o valor medido da DDP, de natureza analógica, sem nenhum tratamento prévio. Portanto, para conhecer o valor da intensidade do campo magnético causador desta diferença de potencial, é necessário utilizar a relação (aproximada)³ $\pm 1\text{V}/\mu 50\text{T}$. Evidentemente, esta relação linear entre DDP e intensidade do campo magnético somente é válida em um determinado regime de temperatura e para uma faixa específica de valores da intensidade do campo magnético medido. A seguir, apresentamos alguns valores e parâmetros importantes para este magnetômetro:

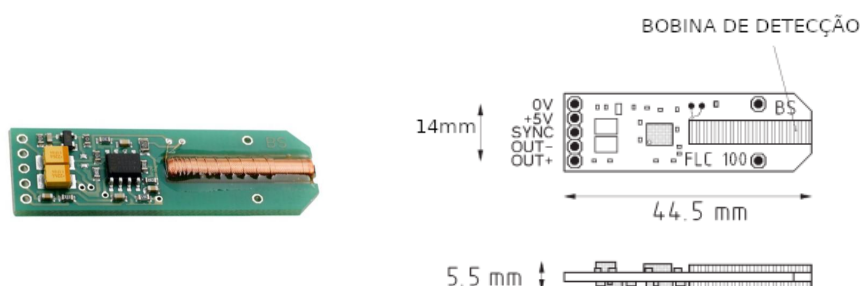
³ Os princípios de funcionamento deste tipo de sensor estão detalhados na seção 1.3, e a relação exata entre a diferença de potencial e a intensidade do campo magnético pode ser obtida pela equação (1.9).

Figura 9 – Imagem do *fluxgate* FLC 100.

Fonte: ([ENCYCLOPEDIA-MAGNETICA](#), 2019)

- Faixa de medição: $\pm 100\mu\text{T}$
- Curva de transferência (linear): $\pm 1\text{V}/50\mu\text{T}$
- Tensão de saída (máxima): $\pm 2,5\text{V}$
- Ruído: $< 3\text{nT}_{pp}(0,1 \text{ a } 10\text{Hz})$
- Temperatura de operação: $-40 \text{ a } 85^\circ\text{C}$
- Tensão de alimentação: $5\text{V} \pm 5\%$
- Consumo: $\sim 2\text{mA}$

Principalmente quando levamos em consideração o seu custo/benefício, este sensor apresenta-se como uma opção interessante para a proposta deste trabalho. Porém, por se tratar um sensor de funcionamento analógico e sendo um dos objetivos do projeto a confecção de um instrumento capaz de exibir digitalmente o valor da intensidade do campo magnético, faz-se necessário a utilização de um conversor analógico-digital, para o valor da DDP, e de um microcomputador, que irá processar os dados digitais da DDP entregando valores da intensidade do campo magnético.

Figura 10 – Magnetômetro *fluxgate* FLC 100.

Fonte: Adaptado de (INSTRUMENTS, s.d.).

3.2 BBC Micro:Bit

O BBC Micro:Bit é um computador portátil de placa única desenvolvido pela empresa britânica BBC com o intuito de ensinar programação para crianças a partir de 11 anos de idade, (MICRO:BIT, s.d.). Os processadores BBC Micro:Bit começaram a ser distribuídos gratuitamente no Reino Unido em março de 2016⁴ e pouco mais de um ano depois estes computadores passaram a ser vendidos no Brasil.

Por ter a função de despertar o interesse de crianças e jovens pela programação, este aparelho possui uma série de recursos programáveis, como por exemplo:

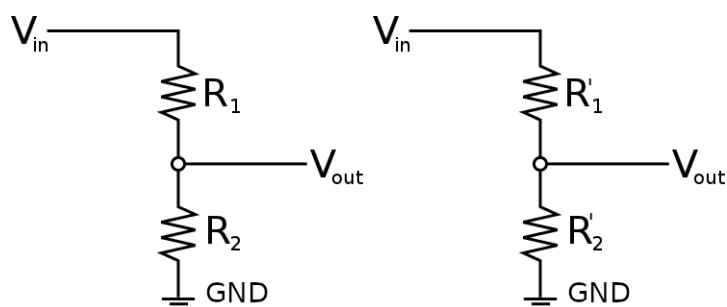
- Entrada USB;
- 25 LEDs individualmente controláveis;
- 2 botões (A e B) controláveis – pode ser atribuído funções a cada um desses botões;
- Pinos de conexão física;

⁴ Confira o endereço eletrônico para mais informações sobre a utilização do BBC Micro:Bit nas escolas britânicas, <<https://www.bbc.co.uk/mediacentre/latestnews/2016/bbc-micro-bit-schools-launch>>.

- Sensores fotoelétricos (sensor de luminosidade);
- Sensor de temperatura;
- Sensores de movimento (acelerômetro e magnetômetro de três eixos);
- Comunicação sem fio, via rádio e *Bluetooth*.

O Micro:Bit conta também com um ADC de 10 bits, que faz conversão analógico/digital da DDP no intervalo $[0V, 3,3V]$, com resolução de 0 a 1023. Os valores de 0V e 3,3V são os valores mínimo e máximo, respectivamente, suportados pelo processador. Devido a essas características o Micro:Bit acaba sendo uma opção viável para o processamento de dados, tendo em vista que este dispositivo possibilita a conversão analógico-digital, o processamento de dados, além de ser completamente programável e possuir uma tela com 25 LEDs para mostrar os valores de medição a um custo acessível (14.00 USD). Como o *fluxgate* possui valores de tensão no intervalo $-2,5V$ a $2,5V$, faz-se necessário o uso de um divisor de tensão, como o representado no diagrama da figura 11, para equiparar as tensões do FLC 100 e do BBC Micro:Bit.

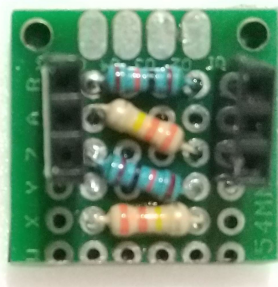
Figura 11 – Diagrama do circuito do divisor de tensão.



Fonte: Adaptado de (BR-ARDUINO, 2015).

O divisor de tensão utilizado neste trabalho foi projetado e construído por Eduardo Amorim Benincá, bolsista no CPID (Centro de Pesquisa, Inovação e Desenvolvimento) na UFES de Vitória e pode ser visto na figura 12. Na figura 13 temos uma imagem fotográfica da frente e do verso do BBC Micro:Bit.

Figura 12 – Divisor de tensão utilizado no demonstrador.



Fonte: O autor.

Figura 13 – Fotografia da frente e do verso do BBC Micro:Bit.



Fonte: O autor.

3.2.1 ADC (*Analogic-to-Digital Converter*)

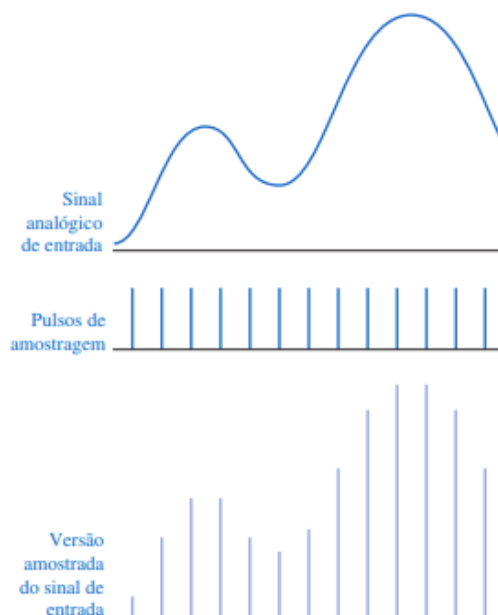
Ao trabalhar com medições de grandezas de qualquer natureza precisamos de uma representação que permita uma manipulação mais precisa e eficiente destes dados, que podem ser representados como analógico ou digital. Quando trabalhamos com a representação analógica trabalhamos com uma quantidade de variação contínua. A grande maioria dos sinais físicos passíveis de medição são de natureza analógica. Já no caso de grandezas digitais, seus valores são representados de maneira discreta,

como no caso de computadores e calculadoras, (TOCCI; WIDMER; MOS, 2014). Porém, em algumas situações precisamos que equipamentos de funcionamento digital processem dados analógicos e é aí que entra o conversor analógico-digital ADC.

O ADC tem como função converter o sinal contínuo medido pelo *fluxgate*, ou outro sensor, em um sinal digital, que é a representação em bits da entrada analógica. E, para que ocorra essa conversão é necessário que o sinal analógico de entrada passe por duas etapas:

Amostragem: nesta etapa o sinal analógico (*i.e.*, contínuo) é transformado em pulsos, como representado na figura 14, (FLOYD, 2007).

Figura 14 – Demonstração do processo de amostragem



Fonte: (FLOYD, 2007)

Quantização: é o processo da conversão onde o ADC converte cada pulso produzido na etapa de amostragem em um código binário⁵, de forma que quanto mais bits

⁵ *I.e.* uma sequência de dígitos binários. Quanto maior a quantidade de dígitos compondo esta sequência, maior a quantidade de possíveis combinações binárias, resultando em uma maior fidelidade, ou resolução, do sinal digital produzido.

tiver o ADC maior será a precisão do sinal digital produzido, (FLOYD, 2007). A saber, a resolução máxima de um ADC é dada pela relação $2^n - 1$, onde n é o número de bits do ADC.

Para a confecção deste protótipo haviam três opções de ADC a serem utilizados. A primeira possibilidade, e a mais simples e prática, seria utilizar o conversor do próprio BBC Micro:Bit que possui 10 bits; a segunda opção seria a utilização do ADC da Texas Instruments, modelo ADS1115 (figura 15)⁶ com resolução de 16 bits ($2^{16} - 1$) e com custo médio de 6.00 USD; a terceira possibilidade seria utilizar o ADC de alta resolução modelo ADS 1219 (veja figura 16)⁷, com uma de 24 bits, porém teria um custo total de cerca de 10.00 USD. É importante ressaltar que, apesar da quantidades de bits informadas de cada ADC, durante a medição, por conta de ruídos, pode-se considerar uma defasagem de 1 a 3 bits na resolução. A tabela 1 possui uma análise simulada da resolução em nano Tesla (nT) do FLC 100 para conversores ADC com diferentes resoluções (*i.e.*, quantidade de bits). Estes cálculos foram feitos utilizando os valores de tensão e de resistência informados pelo fabricante.

Estes cálculos foram feitos utilizando os valores de tensão e de resistência informados pelo fabricante e correspondem às equações descritas abaixo,

$$V_{out-max} = \frac{V_+ R_2}{R_1 + R_2}. \quad (3.1)$$

Sendo que $V_{out-max}$ é a tensão máxima de saída, que é dada pela relação entre a tensão de saída do FLC 100, de 5V, e os resistores 1 e 2 (R_1 com resistência de 330 k Ω e R_2 com resistividade de 510 k Ω). A seguir temos a relação entre a resolução do conversor analógico/digital e os parâmetros de tensão e campo magnético,

$$Res_{BnT} = \frac{B_{Max} V_{MB}}{V_{out-max} (2^n - 1)} \quad (3.2)$$

Para definir a resolução do ADC para a medição do campo magnético (Res_{BnT}) fazemos um relação entre a leitura máxima do campo magnético pelo FLC 100

⁶ Para mais detalhes sobre este modelo, verifique o endereço eletrônico <<http://www.ti.com/product/ADS1115>>.

⁷ Para mais detalhes sobre este modelo, visite o endereço eletrônico <<https://www.digikey.com/product-detail/en/texas-instruments/ADS1219IPWR/296-50884-1-ND/9743261>>.

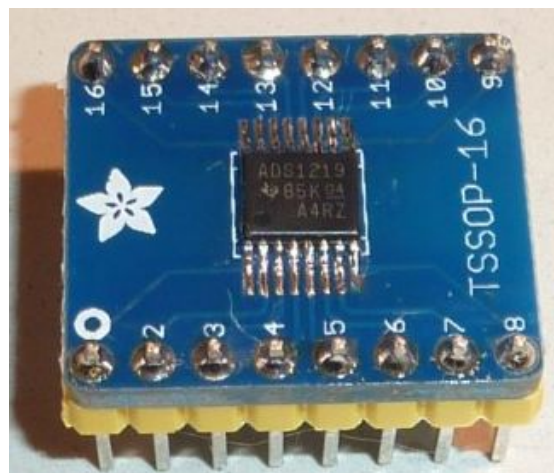
em nT (B_{Max}), ou seja, 250000 nT, a tensão máxima do Micro:Bit (V_{MB}), 3,3V, $V_{out-max}$, calculado com a equação anterior e uma relação da resolução do ADC cujo n representa o número de bits.

Figura 15 – ADS1115 de 16 bits.



Fonte: O autor.

Figura 16 – ADS1219 de 24 bits.



Fonte: (TEACHMAN, 2019).

Tabela 1 – Simulação da resolução em nano Tesla (nT) do FLC 100 com diferentes conversores ADC.

número de Bits	Resolução
10	265.654 nT
11	132.2762 nT
12	66.365 nT
13	33.178 nT
14	16.588 nT
15	8.293 nT
16	4.146 nT
17	2.073 nT
18	1.036 nT
19	0.518 nT
20	0.259 nT
21	0.129 nT
22	0.064 nT
23	0.032 nT
24	0.016 nT

Fonte: Elaborada pelo autor.

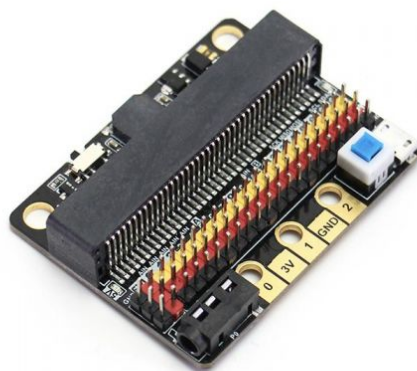
Apesar dos conversores ADS1115 e ADS1219, ambos da Texas Instrument, oferecerem uma resolução mais alta, o conversor integrado ao processador BBC Micro:Bit foi o escolhido para a confecção da primeira versão do demonstrador, visto que este apresenta maior praticidade operacional e computacional.

3.2.2 Kittenbot IO:bit

Para fazer as conexões entre o *fluxgate*, o Micro:Bit e os divisores de tensão foi utilizado uma placa de expansão (representada na figura 17) fabricada pela empresa KittenBot exclusivamente para esse tipo de processador⁸. Essa placa além de suportar todos os recursos do Micro:Bit ela possui valores nominais de tensão de saída de 3V e 5V, sendo compatível, portanto, com o Micro:Bit e com o FLC 100.

⁸ Esta pode ser encontrada à venda no endereço eletrônico <<https://www.seeedstudio.com/Kittenbot-IO-bit-Shield-for-micro-bit-p-2949.html>>.

Figura 17 – Placa de extensão Kittenbot IObit.



Fonte: ([KITTENBOT](#), s.d.).

4 Implementação

Para montar o demonstrador e ter uma garantia da acurácia das medições que ele iria fazer, primeiro foi feita uma medição das tensões de saída de cada dispositivo e das resistências do divisor de tensão. As medições foram realizadas utilizando um multímetro Minipa ET - 2042E e as incertezas foram calculadas conforme recomendadas pelo fabricante, (MINIPA, s.d.). Para a medição dos resistores dos divisores de tensão foi utilizado o ohmímetro do multímetro ajustado na escala de 600k Ω e para medir a tensão o voltímetro foi calibrado na escala de 6V. Nas tabelas 2, 3 e 4 é possível verificar os valores obtidos com as medições, bem como as incertezas de cada um.

Tabela 2 – Medição da resistência dos divisores de tensão do FLC 100 (V_{plus})

Divisor V_{plus}	Resistência	Incerteza
R_1	328,8k Ω	$\pm 2,9$ k Ω
R_2	508,7 k Ω	$\pm 4,4$ k Ω

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 3 – Medição da resistência dos divisores de tensão do FLC 100 (V_{ref})

Divisor V_{ref}	Resistência	Incerteza
R'_1	327,5 k Ω	$\pm 2,9$ k Ω
R'_2	512,3 k Ω	$\pm 4,4$ k Ω

Fonte: Elaborada pelo autor.

Como é possível notar, há uma diferença entre os valores das resistências e tensão informadas pelo fabricante, mencionadas ao longo do capítulo 3, e os valores medidos experimentalmente com o multímetro. A diferença mais significativa que podemos observar é justamente na saída de tensão do FLC 100, onde pode-se notar uma diferença de aproximadamente 0,25V em relação à tensão máxima informada pelo

Tabela 4 – Medição da tensão de saída dos dispositivos

Saída	Tensão medida	Incerteza
Micro:Bit	3,204 V	$\pm 0,018V$
IO:bit	3,280 V	$\pm 0,018V$
FLC 100	4,740 V	$\pm 0,026V$

Fonte: Elaborada pelo autor.

fabricante, que é de 5V. Com esses dados em mãos é preciso reavaliar a resolução dos conversores analógico/digital para que tenhamos valores compatíveis com os dispositivos trabalhados. Os resultados dessa reavaliação podem ser encontrados na tabela 5.

Tabela 5 – Análise da resolução em nT do FLC 100 via uso de ADC com diferentes resoluções

número de Bits	Resolução
10	280.106 nT
11	139.984 nT
12	69.975 nT
13	35.983 nT
14	17.490 nT
15	8.745 nT
16	4.372 nT
17	2.186 nT
18	1.109 nT
19	0.546 nT
20	0.273 nT
21	0.136 nT
22	0.068 nT
23	0.034 nT
24	0.017 nT

Fonte: Elaborada pelo autor.

4.1 Processamento da informação

Como foi detalhado nos capítulos 1 e 3, o sensor magnetômetro *fluxgate* FLC 100 fornece dados (analógicos) sobre a diferença de potencial medida nos terminais de suas bobinas internas. Ou seja, a informação final sobre a intensidade (de uma das componentes) do campo geomagnético deve ser obtida por meio de tratamento dos dados fornecidos pelo *fluxgate*. Esse tratamento será feito pelo microprocessador de placa única, já mencionado anteriormente, BBC Micro:Bit. Entretanto, para que os dados fornecidos pelo FLC 100 possam ser devidamente trabalhados pelo microcomputador, é necessário que se faça um pequeno tratamento prévio desses dados. Isso devido a uma pequena incompatibilidade entre os valores nominais máximos e mínimos de tensão (DDP) fornecidos pelo FLC 100 e tratados pelo BBC Micro:Bit. Portanto, faz-se necessário um divisor de tensão.

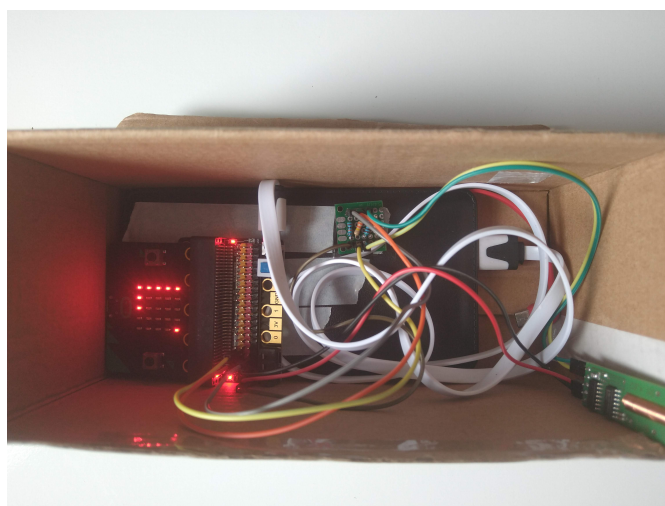
De acordo com o que foi detalhado na subseção 3.2, neste projeto utilizamos um divisor de tensão construído por E. A. Benicá que será responsável por compatibilizar os valores de tensão de saída (do FLC 100) e de entrada (no BBC Micro:Bit). Após esta etapa, já com os dados compatíveis com os valores de entrada permitidos pelo microprocessador, é necessário que os dados fornecidos pelo sensor magnetômetro sejam transformadas. Esta etapa faz-se necessária visto que o magnetômetro FLC 100 é um equipamento cujo princípio de funcionamento é de natureza analógica, enquanto que o microcomputador BBC Micro:Bit processa e entrega os dados de forma digital. Essa conversão analógico/digital será feita por um conversor ADC de 10 bits integrado ao BBC Micro:Bit. Neste processo de digitalização da informação fornecida pelo FLC 100, descrita na subseção 3.2.1, o sinal analógico passa por dois processos (amostragem e quantização) para, posteriormente, ser efetivamente processado pelo BBC Micro:Bit.

O passo seguinte consiste no processamento da informação de entrada no BBC Micro:Bit (a DDP) para gerar a informação de saída (intensidade do campo magnético). Este processamento será feito seguindo uma regra de proporcionalidade linear, como descrito da seção 3.1, levando em consideração os valores de tensão e resistência medidos. Ao final da conversão da DDP em valores do campo magnético, o resultado da conversão será impresso na tela de LED integrada ao BBC Micro:Bit.

Este processo computacional de tratamento dos dados será executado de acordo com um código de programação, que foi desenvolvido pelo aluno da Universidade Federal do Espírito Santo, campus Alegre, Eduardo Destefani Stefanato, como parte de um projeto de iniciação científica (IC) deste aluno, (STEFANATO, 2019), com orientação do Prof. Dr. R. Colistete Júnior. A elaboração do código foi feita em concomitância com o desenvolvimento deste pré-protótipo. O código foi escrito na linguagem Micro:Python e encontra-se disponível no Anexo A¹. Neste código o usuário conta com duas funções básicas e interativas: pressionar o botão “B” para visualizar na tela um texto com o valor do campo magnético, medido pelo FLC 100, em μT ; e pressionar o botão “A” para visualizar o campo magnético em forma de gráfico, onde cada LED aceso significa $1\mu\text{T}$, (??), sendo que para valores positivos o LED tem brilho máximo e para valores negativos o brilho dele é médio.

Uma imagem fotográfica do pré-protótipo pode ser vista na figura 18.

Figura 18 – Fotografia do pré-protótipo pronto.



Fonte: O autor.

¹ O código desenvolvido pelo aluno E. D. Stefanato, sob orientação do Prof. Dr. R. Colistete Júnior, é de caráter 100% aberto e, portanto, livre para ser publicamente disponibilizado.

4.2 Testes

Para testar a eficiência do pré-protótipo realizamos três diferentes de testes: o primeiro deles consistia em medir o campo magnético sob a interferência de um ímã. Para este teste foi utilizado uma folha milimetrada e um ímã comum de geladeira. A caixa com o dispositivo foi posicionada rente ao “0” da folha milimetrada e as medições eram feitas em intervalos de 1cm. O segundo teste consistia em medir o campo geomagnético. Nesta segunda etapa era necessário que a orientação do campo geomagnético tivesse sido determinada durante o primeiro teste. Para isso utilizamos o demonstrador na função gráfico para verificar em qual posição o valor seria máximo. Ou seja, para qual posicionamento do FLC 100 haveria uma maior quantidade de LED’s acesos. Feito isso pressionamos o botão “A” para que o BBC Micro:Bit imprimisse o valor do campo geomagnético, em μT , na tela, com precisão decimal. O último teste consistia em fazer as medições da variação diuturna do campo geomagnético utilizando um sensor ADC de 16 bits, o ADS1115. Este instrumento foi deixado em uma sala de laboratório com o ar-condicionado ligado durante o final de semana, para que houvesse o mínimo possível de interferência externa, seja de motores ou máquinas sendo ligadas ou desligadas.

5 Resultados e Discussões

Este capítulo apresenta os resultados obtidos durante os testes realizados com o demonstrador e uma discussão sobre os resultados de cada um destes testes.

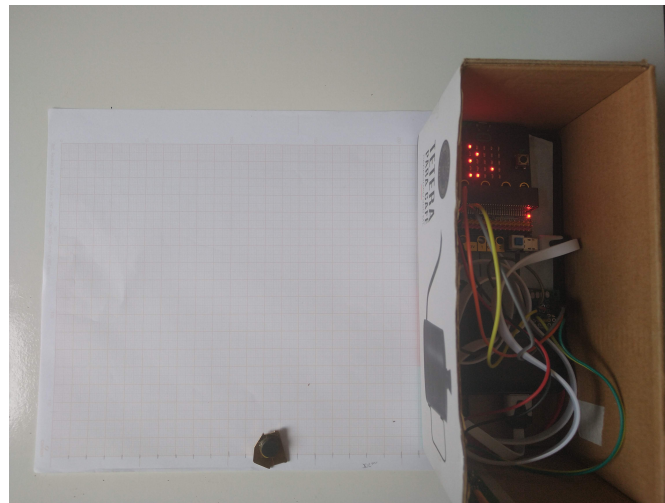
5.1 Teste 1

Conforme mencionado no capítulo anterior, o objetivo deste teste era medir a interferência do campo magnético de um ímã, montado conforme a figura 21, no campo geomagnético. Para isso, efetuamos 11 medições do campo magnético com o pré-protótipo (podemos chamar este campo de campo efetivo), sendo que a cada medida o ímã era afastado 1cm do equipamento (veja figura 21), que foi mantido estático em uma posição fixa¹. Os valores observados do campo magnético efetivo estão expostos no gráfico da figura (20). Os valores obtidos com o *fluxgates* são uma sobreposição da componente do campo geomagnético com o campo magnético do ímã utilizado. Neste gráfico podemos observar que os valores de campo magnético decrescem conforme o ímã vai se afastando, porém, a partir do 11º centímetro este valor fica constante, 14.2 μT , isso porque o ímã utilizado era muito fraco e então, a partir desta distância este não exercia mais influência sobre o campo medido pelo instrumento, o fluxgate só conseguia medir a componente do campo geomagnético.

Com este teste pudemos verificar se o demonstrador magnetômetro efetuava medições coerentes, que se refletiam em variações aproximadamente constantes (considerando a precisão do equipamento) ao passo em que o ímã se afastava do medidor.

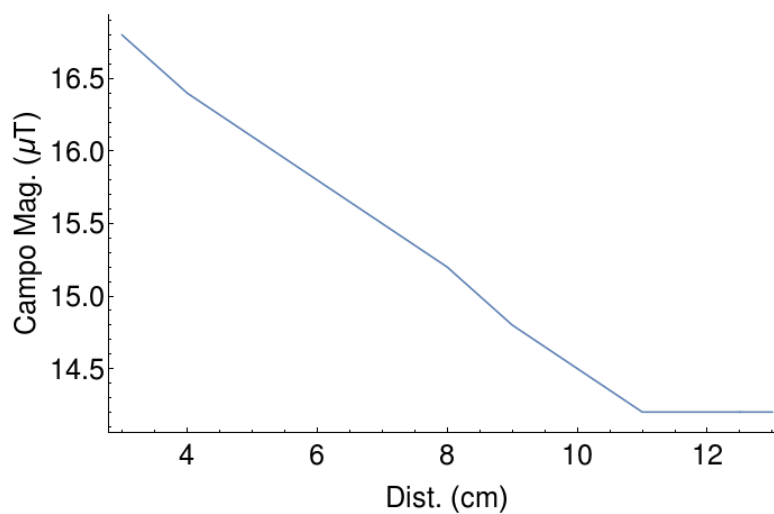
¹ Note que o importante é a observação da variação do campo magnético efetivo medido. Por tanto, não importa o valor da distância inicial (ou seja, da primeira medida) em que o ímã se encontrava do equipamento pré-protótipo.

Figura 19 – Teste 1 utilizando imã de geladeira e papel milimetrado.



Fonte: O autor.

Figura 20 – Gráfico dos resultados do teste 1



Fonte: O autor.

5.2 Teste 2

O segundo teste, diferente do primeiro, teve um caráter de verificação da acurácia do pré-protótipo. Para isso realizamos as medições do campo magnético em dois locais diferentes, comparando os valores observados com o valor obtido por meio

de um sistema que pode ser acessado *online* ² que utiliza a localização geográfica para calcular o campo geomagnético. Os locais de realização destes testes foram a área externa da Universidade Federal do Espírito Santo, campus Alegre e a feira do produtor rural, também em Alegre-ES.

O valor calculado pelo site referente à localização da UFES (-41.53639 de latitude e -20.76167 de longitude) foi de $(-21, 2575 \pm 0, 165)\mu\text{T}$, enquanto que o valor referente à localização da feira do produtor rural (-41.53083 de latitude e -20.76028 de longitude) calculado pelo site é de $(-21, 2574 \pm 0, 165)\mu\text{T}$, uma diferença de $0, 1\text{nT}$ apenas entre as duas localizações.

Os valores medidos pelo pré-protótipo referente às mesmas localizações foram: $(-22, 30 \pm 0, 15)\mu\text{T}$, quando medido na UFES (-41.53639 de latitude e -20.76167 de longitude); e $(-20, 20 \pm 0, 15)\mu\text{T}$, quando medido na feira do produtor rural de Alegre (-41.53083 de latitude e -20.76028 de longitude).

Ao analisar as duas medidas é possível observar que há uma diferença de aproximadamente $1, 00\mu\text{T}$ entre as medidas efetuadas com o pré-protótipo e os valores obtidos pelo *site* (nas duas localidades). Note que essa diferença não é compensada pelas incertezas.

Apesar de havermos encontrado uma diferença que extrapola as margens de erro, podemos considerar que o pré-protótipo desenvolvido neste projeto apresenta uma acurácia consideravelmente satisfatória quando levamos em considerações aspectos particulares envolvendo os testes. O primeiro ponto a ser considerado é a diferença metodológica de obtenção dos valores pelo *site* e pelo pré-protótipo. Enquanto que o *site* se utiliza apenas de parâmetros teóricos e geográficos para calcular os valores, o magnetômetro desenvolvido mede um valor efetivo do campo magnético, dada a sua alta sensibilidade. Ou seja, o equipamento desenvolvido neste trabalho entrega um valor de campo magnético em que ruídos e interferências estão embutidos. Esses ruídos e interferências podem ser devido à fiação elétrica local, à presença de automóveis e demais materiais eletrônicos e metálicos.

Por fim, avaliamos satisfatoriamente a acurácia do equipamento desenvolvido,

² Para acessar esta ferramenta visite o endereço eletrônico <https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/calculators/magcalc.shtml#igrfgrid>.

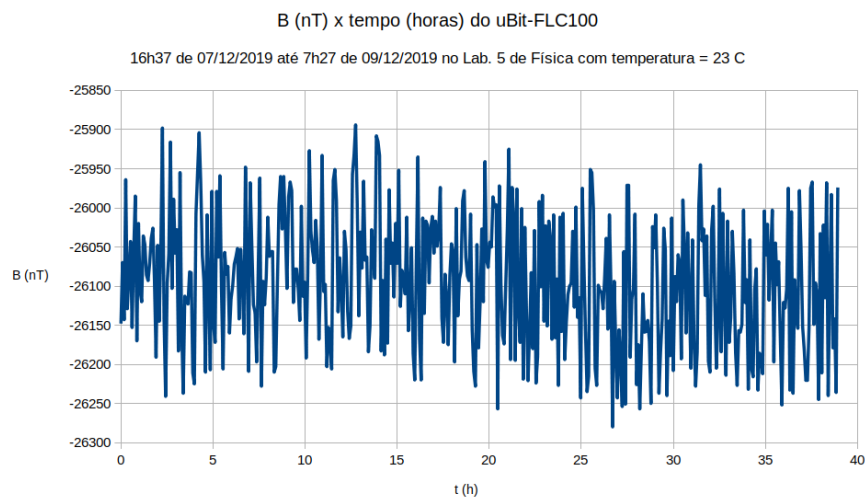
ainda que os valores obtidos possam ser verificados em situações onde os fatores de interferência possam ser controlados.

5.3 Teste 3

Conforme mencionado no capítulo anterior, o teste 3, consistia em utilizar um ADS de maior resolução a fim de detectar uma variação diuturna do campo geomagnético. Para este teste, foi feita uma nova programação para o instrumento. O Micro:Bit iria fazer a leitura do campo magnético a cada 5 minutos e salvar este valor em sua memória interna. Para que o dispositivo captasse o mínimo de interferência externa, colocamos ele para funcionar em um laboratório, com temperatura controlada, por ar-condicionado, em 23°C e em um final de semana cuja movimentação no campus é quase inexistente e, conseqüentemente, não tem equipamentos sendo ligado e desligado, por exemplo. O equipamento foi posto para funcionar às 16 horas e 27 minutos do dia 07 de dezembro de 2019 e retirado às 10 horas e 58 minutos do dia 09 de dezembro de 2019, tendo feito um total de 499 medidas. Essas medidas podem ser visualizadas no formato de gráfico, na imagem (??). Neste gráfico foram desconsideradas as primeiras medidas e as últimas, tendo em vista que nas primeiras havia computadores e telefones próximos ao equipamento, interferindo na medição e nas últimas já havia uma grande movimentação na universidade, então os valores medidos ficaram muito distantes da média, portanto este apresenta medidas desde as 16 horas e 37 minutos do dia 07 de dezembro de 2019 até as 07 horas e 27 minutos do dia 09 de dezembro de 2019.

Podemos retirar deste gráfico uma série de informações, a primeira é de que os valores obtidos possui um alto ruído que pode ter sido causado tanto pelo excesso de fiação no equipamento quanto pela influência dos equipamentos, estantes, ferramentas e experimentos presentes no laboratório, porém, ao mesmo tempo, podemos observar uma variação tímida destas medidas com o passar do tempo, que pode ser a variação do campo geomagnético que acontece ao longo do dia, com um ruído mais baixo, deveríamos ser capazes de observar esta variação mais facilmente. Em alguns pontos do gráfico conseguimos calcular um desvio padrão de cerca de 63 nT, porém este valor em outros pontos pode chegar perto de 80 nT. Com isso podemos dizer que

Figura 21 – Gráfico das medições do teste 3



Fonte: O autor.

trabalhamos com um equipamento com um forte potencial de medir pequenas variações de campo magnético, pois houve uma melhora considerável desde o ADC de 10 bits do próprio microcomputador, porém ainda é preciso encontrar maneiras para diminuir o ruído deste instrumento.

6 Considerações Finais

O objetivo principal do presente trabalho é a confecção de um pré-protótipo de magnetômetro unidimensional de baixo custo. O desenvolvimento deste projeto ocorreu em etapas. A primeira etapa consistiu na construção do embasamento teórico a respeito do magnetismo terrestre (geomagnetismo) e sobre os equipamentos de medição magnetômetro. Em seguida empreendemos uma análise dos equipamentos disponíveis no mercado que fossem mais viáveis para serem utilizados neste projeto. A escolha do microprocessador BBC Micro:Bit para tratar os dados obtidos pelo magnetômetro estava atrelada ao desenvolvimento do projeto de IC do aluno E. D. Stefanato, sob orientação do Prof. Dr. R. Colistete Júnior.

Os equipamentos escolhidos para essa primeira versão do dispositivo foram um magnetômetro do tipo *fluxgate*, modelo FLC 100, o microcomputador BBC Micro:Bit, uma placa de extensão IO:bit da Kittenbot além de um divisor de tensão.

Após a confecção do pré-protótipo iniciamos a etapa de calibração, verificação da precisão e acurácia do equipamento e análise qualitativa dos dados e avaliação do custo benefício de produção deste pré-protótipo.

Considerando as condições de realização da medida, consideramos satisfatória a acurácia do equipamento desenvolvido. Essas medidas foram realizadas em ambientes públicos e contava com a presença de possíveis fontes de interferência, como fiação da rede pública de eletricidade, carros (ainda que poucos) e outros objetos metálicos. Em todo caso, visto que o objetivo de confecção deste pré-protótipo de demonstrador do campo geomagnético é para utilização em empresas e/ou escolas (como material didático), consideramos que o equipamento construído possui uma considerável confiabilidade nos dados fornecidos, podendo ser aplicados nas situações previstas.

Além do funcionamento satisfatório, apresentando acurácia e precisão suficiente para as situações de aplicação previstas, o custo de produção deste pré-protótipo ficou limitado por 100 USD. Sendo assim, avaliamos que o pré-protótipo de um magnetômetro geomagnético desenvolvido neste projeto possui um custo benefí-

cio consideravelmente bom, quando comparado com as opções de equipamentos similares disponíveis atualmente no mercado.

6.1 Projetos futuros

O demonstrador confeccionado para este trabalho funciona bem e possui uma resolução razoavelmente boa, todavia ainda cabe a ele uma série de melhorias para ser considerado um possível substituto ao Fluxmaster (figura 8). Essas melhorias podem incluir:

- Acresção de um ADC de maior resolução, podendo ser o modelo ADS1115, de 16 bits, ou o modelo ADS1219, com 24 bits de resolução, ambos da Texas Instrument.
- Impressão de uma caixinha sob medida com impressora 3D para que os dispositivos fiquem firmemente posicionados.
- Confeção de placas de encaixe para os dispositivos, evitando uma quantidade de fiação desnecessária, ou até mesmo uma placa comercial parafusável.
- Outra possibilidade é utilizar outro microcontrolador com uma maior capacidade de processamento possibilitando incluir uma tela maior, podendo apresentar mais informações, porém essas implementações impactariam consideravelmente no custo do demonstrador.

Após a conclusão dessas melhorias e realização de testes de acurácia já seria possível configurar a versão como um protótipo de magnetômetro unidimensional, um possível concorrente aos demais que encontramos no mercado.

Estes projetos futuros descritos acima serão realizados em conjunto com o bolsista, licenciado em Física, Eduardo Amorim Benincá, que faz parte do projeto “Desenvolvimento Tecnológico Industrial” (DTI-B) da FAPES atuando na UFES, campus de Vitória, em projetos de IoT e sensores do CPID (Centro de Pesquisa, Inovação e Desenvolvimento).

Referências

BAYLOR, J. B.; HAZARD, D. L. General report on the magnetic survey of north carolina. Washington, D.C., n. 9, p. 887–938, 1900. Citado na página 14.

BR-ARDUINO. ***Voltímetro com Arduino: como montar, programar e calibrar***. 2015. Acesso em: 04-12-2019. Disponível em: <<https://br-arduino.org/2015/06/voltimetro-com-arduino-como-montar-programar-e-calibrar.html>>. Citado na página 30.

BRANDO, M.; WOSNITZA, J. ***Development of a Faraday magnetometer based on piezoresistors for very high magnetic fields***. s.d. Acesso em: 18-11-2019. Disponível em: <<https://imprs-cpqm.mpg.de/62796/development-of-a-faraday-magnetometer-based-on-piezoresistors-for-very-high-magnetic-fields>>. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 19.

BREW, J.; HOLZINGER, M. J. Probabilistic resident space object detection using archival themis fluxgate magnetometer data. *Advances in Space Research*, v.61, n. 9, p. p. 2301 – 2319, 2018. Citado na página 23.

BROWN, R. E. ***Electric Power Distribution and Reliability***. 2ª. Florida: CRC Press, 2009. 453 p. Bibliografia: p. 89-90. Citado na página 12.

EDELSTEIN, A. Advances in magnetometry. *Journal of Physics: Condensed Matter*, v. 19, n. 16, p. 165–217, 2007. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 20.

ELSASSER, W. M. The earth as a dynamo. *Scientific American*, v. 198, p. 44–48, 1958. Citado na página 11.

ENCYCLOPEDIA-MAGNETICA. ***Fluxgate magnetometer***. 2019. Acesso em: 04-12-2019. Disponível em: <http://www.encyclopedia-magnetica.com/doku.php?id=file:fluxgate_magnetometer_commercial.jpg&do=>>. Citado na página 28.

FLOYD, T. L. ***Sistemas digitais:fundamentos e aplicações***. 9ª. ed. São Paulo, SP.: Bookman, 2007. 888 p. Bibliografia: p. 628-630. Citado 2 vezes nas páginas 32 e 33.

FYE, P. M. et al. ***Oceanography: The Past***. 1ª. ed. Nova Iorque: Springer-Verlag, 1980. 812 p. Bibliografia: p. 229. Citado na página 20.

GRIFFITHS, D. J. ***Eletrodinâmica***. São Paulo: Pearson, 2010. 406 p. (3 Ed.). Bibliografia: p. 186-190. Citado na página 21.

HERRERA-MAY, A. L. et al. Recent advances of mems resonators for lorentz force based magnetic field sensors: Design, applications and challenges. *Sensors*, v. 16, n. 9, p. 1359, 2016. Citado na página 19.

INSTRUMENTS, S. M. **FLUXMASTER**. s.d. Acesso em: 01-12-2019. Disponível em: <<https://www.stefan-mayer.com/en/products/magnetometers-and-sensors/fluxmaster.html>>. Citado 3 vezes nas páginas 24, 27 e 29.

IPMA. **Componentes vetorias do campo geomagnético**. s.d. Acesso em: 04-11-2019. Disponível em: <<https://www.ipma.pt/pt/enciclopedia/geofisica/geomagnetismo/index.html>>. Citado na página 16.

JR, E. C. et al. O vento solar e a atividade geomagnética. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v.33, n. 4, p. 4301, 2011. Citado na página 11.

JUNIOR, O. P. Modelo causal dos primórdios da ciência do magnetismo. *Scientiae Studia*, v. 8, n. 2, p. 195–212, 2010. Citado na página 14.

KITTENBOT. **KittenBot IOBIT V2.0 for micro:bit**. s.d. Acesso em: 01-12-2019. Disponível em: <<https://www.kittenbot.cc/collections/frontpage/products/kittenbot-iobit-v2-0-for-microbit>>. Citado na página 36.

LANGLEY, R. B. The magnetic compass and gps: Getting your bearings. *GPS World*, v. 14, n. 9, p. 70–80, 2003. Citado na página 20.

LANKFORD, J. **History of astronomy**. 1^a. ed. 711 Third avenue, New York, NY.: Routledge Taylor & France Group, 2011. 614 p. Bibliografia: p. 143. Citado na página 11.

LLOYD'S. **Solar Storm to the North American Eletric Grid**. 2013. Acesso em: 09-11-2019. Disponível em: <<https://www.lloyds.com/news-and-risk-insight/risk-reports/library/natural-environment/solar-storm>>. Citado na página 12.

LUDWIGA, F. et al. Investigation of superparamagnetic fe3 o4 nanoparticles by fluxgate magnetorelaxometry for use in magnetic relaxation immunoassays. *Journal of Applied Physics*, v.99, n. 8, 2006. Disponível em: <<https://doi.org/10.1063/1.2171121>>. Citado na página 23.

MATSUOKA, A. et al. Development of fluxgate magnetometers and applications to the space science missions. In: *An Introduction to Space Instrumentation*. [S.l.: s.n.], 2013. p. 217–225. Citado na página 21.

MEMS AND NANOTECHNOLOGY EXCHANGE. **What is MEMS Technology?** s.d. Acesso em: 27-11-2019. Disponível em: <<https://www.mems-exchange.org/MEMS/what-is.html>>. Citado na página 19.

MICRO:BIT. *Comece sua aventura micro:bit!* s.d. Acesso em: 01-12-2019. Disponível em: <<https://microbit.org/guide/>>. Citado na página 29.

MINIPA. *Manual ET-2042E*. s.d. Acesso em: 01-12-2019. Disponível em: <<http://www.minipa.com.br/multimetros/multimetros-digitais/349-et-2042e#manual>>. Citado na página 37.

NASA. *A Super Solar Flare*. 2008. Acesso em: 10-11-2019. Disponível em: <https://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2008/06may_carringtonflare>. Citado na página 12.

NASA. *The Moon and the Magnetotail*. 2016. Acesso em: 30-06-2019. Disponível em: <https://www.nasa.gov/topics/moonmars/features/magnetotail_080416.html>. Citado na página 13.

OLIVEIRA, F. F. *EstGeoMag: Integrando soluções de Hardware, Software e Internet das Coisas na medição de grandezas Geomagnéticas*. Dissertação (Mestrado em Informática) — Universidade Federal do Espírito Santo, 2017. Citado na página 23.

PAPALOIZOU, J. C. B.; TERQUEM, C. *Planet formation and migration. Rept. Prog. Phys.*, v. 69, p. 119–180, 2006. Citado na página 11.

PIZZELLA, V. et al. Squid systems for biomagnetic imaging. *Superconductor Science and Technology*, v. 14, p. R79–R114, jun 2001. Citado na página 20.

PRIMDAHL, F. The fluxgate magnetometer. *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, v. 12, n. 4, p. 241 – 253, 1979. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 21.

PRIMDAHL, F. Advances in fluxgate sensors. *Sensors and Actuators A: Physical*, v. 106, p. 8–14, 2003. Citado na página 20.

SAKAKIBARA, T. et al. Faraday force magnetometer for high-sensitivity magnetization measurements at very low temperatures and high fields. *Japanese Journal of Applied Physics*, v. 33, n. Part 1, No. 9A, p. 5067–5072, 1994. Citado na página 18.

SCIENITIES. *Poles Apart*. 2015. <https://scienities.com/2015/12/25/poles-apart/>. Acesso em: 04-11-2019. Citado na página 15.

SPACE WEATHER CANADA. *Space Weather Canada. Geomagnetic variations*. s.d. Acesso em: 15-10-2019. Disponível em: <<https://www.spaceweather.gc.ca/svr-en.php>>. Citado na página 12.

STEFANATO, E. D. *Protótipo de Magnetômetro Portátil de Precisão com Internet das Coisas*. 2019. Subprojeto de IC. Citado na página 40.

TEACHMAN, M. *Driver MicroPython para Texas Instruments ADS1219 Conversor analógico para digital (ADC)*. 2019. Acesso em: 04-12-2019. Disponível em: <<https://github.com/miketeachman/micropython-ads1219>>. Citado na página 34.

TIERNEY, T. M. et al. Optically pumped magnetometers: From quantum origins to multi-channel magnetoencephalography. *NeuroImage*, v. 199, p. 598 – 608, 2019. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 18.

TOCCI, R. J. et al. *Sistemas digitais: princípios e aplicações*. 11^a. ed. São Paulo, SP.: Pearson Education, 2014. 819 p. Bibliografia: p. 6. Citado na página 32.

USGS. *How does the Earth's core generate a magnetic field?* 2015. Acesso em: 30-06-2019. Disponível em: <<http://www.usgs.gov/faq/?q=categories%2F9782%2F2738>>. Citado 2 vezes nas páginas 11 e 13.

VACQUIER, V. V. *Apparatus for and method of measuring the terrestrial magnetic field*. Gulf Research and Development Co, 1938. Depósito: 28-10-1938. Consessão: 21-03-1938. Disponível em: <<https://patents.google.com/patent/US2151627>>. Citado na página 20.

WALKER, R. J.; RUSSELL, C. T. **Solar-Wind Interactions With Magnetized Planets**. In: KIVELSON, M. G.; RUSSELL, C. T. (Ed.). *Introduction to Space Physics*. Los Angeles: [s.n.], 1996. v. 1, cap. 6. Citado na página 11.

WYATT, M. C. Evolution of debris disks. *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, v. 46, p. 339–383, 2008. Citado na página 11.

YOU, Z. Magnetometer technology. In: *Space Microsystems and Micro/nano Satellites*. Butterworth-Heinemann, 2018. cap. 9, p. 341 – 360. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128126721000096>>. Citado na página 16.

ZHAO, H.; ZONG, Q.-G. Seasonal and diurnal variation of geomagnetic activity: russell-mcpherron effect during different imf polarity and/or extreme solar wind conditions. *Journal of Geophysical Research*, v.117, n. A11222, 2012. Citado na página 14.

ANEXO A – Código Micro:Python

A seguir apresentamos o código de programação em Micro:Python desenvolvido por E. D. Stefanato sob orientação do Prof. Dr. R. Colistete Júnior

```
# uBit_FLC100 v0.7.1 - 20191205
# Author : Eduardo Destefani Stefanato
from microbit import *

# From : https://github.com/rcolistete/Plots\_MicroPython\_Microbit
def plot_bar_pixels(value, pixelscale, fromtop=False):
    if value >= 0:
        ledlevel = 9
    else:
        ledlevel = 4
        value = abs(value)
    for y in range(5):
        for x in range(5):
            if fromtop:
                yl = y
            else:
                yl = 4-y
            diff = value - ((x + 1) + y*5)*pixelscale
            if diff >= 0:
                display.set_pixel(x, yl, ledlevel)
            else:
                display.set_pixel(x, yl, 0)
```

```
# From : https://github.com/rcolistete/Plots\_MicroPython\_Microbit
def plot_bars_vector_3D(vx, vy, vz, pixelscale):
    if vx >= 0:
        ledlevel = 9
    else:
        ledlevel = 4
        vx = abs(vx)
    for x in range(5):
        if vx - (x + 1)*pixelscale >= 0:
            display.set_pixel(0, 4 - x, ledlevel)
        else:
            display.set_pixel(0, 4 - x, 0)
    if vy >= 0:
        ledlevel = 9
    else:
        ledlevel = 4
        vy = abs(vy)
    for y in range(5):
        if vy - (y + 1)*pixelscale >= 0:
            display.set_pixel(1, 4 - y, ledlevel)
        else:
            display.set_pixel(1, 4 - y, 0)
    if vz >= 0:
        ledlevel = 9
    else:
        ledlevel = 4
        vz = abs(vz)
    for z in range(5):
        if vz - (z + 1)*pixelscale >= 0:
            display.set_pixel(2, 4 - z, ledlevel)
        else:
            display.set_pixel(2, 4 - z, 0)
    vm = (vx*vx + vy*vy + vz*vz)**0.5
```



```

    for y in range(5):
        for x in range(2):
            if vm - (y + x*5)*pixelscale >= 0:
                display.set_pixel(x + 3, 4 - y, 9)
            else:
                display.set_pixel(x + 3, 4 - y, 0)

flag_plot_bar = True
flag_only_FLC100 = True
R1left = 328.8 # in kOhm, voltage divider, left
R2left = 508.7 # in kOhm
R1right = 327.5 # in kOhm voltage divider, right
R2right = 512.3 # in kOhm

print("\nuBit FLC100 v0.7.1")
display.scroll("uBit FLC100 v0.7.1", delay=110, wait=True)

display.scroll("<- A to calibrate", delay=110, wait=True)
if button_a.was_pressed():
    print("\nCalibrating uBit magnetometer...")
    compass.calibrate()

while True:
    # FLC 100 using voltage divider :
    adcread1 = pin1.read_analog()
    Vplus3V3 = (3.28*adcread1)/1023
    Vplus5V = Vplus3V3*(R1left + R2left)/R2left
    adcread2 = pin2.read_analog()
    Vref3V3 = (3.28*adcread2)/1023
    Vref5V = Vref3V3*(R1right + R2right)/R2right
    B_FLC100 = ((Vplus5V - Vref5V)*50*2.50)/Vref5V # in uT
    print("FLC100 : V+ = {} V, Vref = {} V, B = {} uT ".format(
        ↪ Vplus5V, Vref5V, B_FLC100))

```

```

# Micro:bit magnetometer :
Bx_uBit = compass.get_x()/1000 # in uT
By_uBit = compass.get_y()/1000 # in uT
Bz_uBit = compass.get_z()/1000 # in uT
print("uBit magnetometer : Bx = {} uT, By = {} uT, Bz = {} uT ".
      ↪ format(Bx_uBit, By_uBit, Bz_uBit))

# FLC100 is used as Bz compensated, and other components Bx and
      ↪ Bx are scaled/compensated
if abs(B_FLC100) > 0.01:
    Bfactor = Bz_uBit/B_FLC100
else:
    Bfactor = 1 # if B of FLC100 is to small, then no
      ↪ compensation is done
Bx_comp = Bx_uBit/Bfactor # Bx compensated
By_comp = By_uBit/Bfactor # By compensated
Bz_comp = B_FLC100

Bmod_comp = (Bx_comp*Bx_comp + By_comp*By_comp + Bz_comp*Bz_comp
      ↪ )**0.5
print("Bx = {} uT, By = {} uT, Bz = {} uT, |B| = {} uT".format(
      ↪ Bx_comp,
      By_comp, Bz_comp, Bmod_comp))

if button_a.was_pressed():
    flag_plot_bar = not(flag_plot_bar)
if button_b.was_pressed():
    flag_only_FLC100 = not(flag_only_FLC100)

if flag_plot_bar:
    if flag_only_FLC100:
        plot_bar_pixels(B_FLC100, 1, fromtop=True)

```

```
        else:
            plot_bars_vector_3D(Bx_comp, By_comp, Bz_comp, 6)
    else:
        if flag_only_FLC100:
            display.scroll('FLC={}uT'.format(round(B_FLC100, 1)),
                           ↪ delay=110, wait=True)
        else:
            display.scroll('Bx={} By={} Bz={} B={}'.format(round(
                           ↪ Bx_comp, 1),
                           round(By_comp, 1), round(Bz_comp, 1), round(Bmod_comp
                           ↪ , 1)), delay=120, wait=True)
    sleep(100)
```