

Uso de unidades de medidas inerciais para obtenção dos parâmetros de atitude e azimute

Ítalo Rodrigues Braga¹, Iális Cavalcante de Paula Júnior² e Rejane Cavalcante Sá³

Resumo—Este artigo aplica métodos de calibrações nas Unidades de Medidas Inerciais tipo MEMS da placa sensorial 9DOF MinIMU, acelerômetro e magnetômetro no módulo LSM303DLM e giroscópio no módulo L3G4200D, adquirindo medições com maiores precisões das de fábrica. Obtendo assim, resultados com exatidão das aplicações e fusão sensorial, parâmetros de orientação angular (atitude) e azimute.

Palavras-Chave—Atitude, Azimute, Calibração, Filtro complementar, SNI-IMU-MEMS, I2C.

Abstract—This article applies calibration methods of Inertial Measurement Units type MEMS of the sensing board 9DOF MinIMU, accelerometer and magnetometer in LSM303DLM module and gyroscope in L3G4200D module, acquiring measurement with greater precision from factory. So obtaining results with application accuracy and sensory fusion, angular orientation (attitude) and azimuth parameters.

Keywords—Attitude, Azimuth, Calibration, Complementary Filter, SNI-IMU-MEMS, I2C.

I. INTRODUÇÃO

A navegação é definida como a determinação da posição, velocidade angular e atitude (orientação angular) de um objeto em relação a um sistema de coordenadas [1]. Existe diversos sistemas de navegação por diferentes meios, como na navegação por sinais de rádio e de satélites, onde carecem de referências externas dadas por bases terrestres e estações de transmissão no espaço, respectivamente [2]. Há ainda sistemas que não necessitam de uma referência externa para obter estes parâmetros, chamado de Sistema de Navegação Inercial (SNI) que emprega Unidade de Medida Inercial (IMU) para gerar medidas de aceleração linear, velocidade angular [1] ou orientação magnética (azimute), que pode ser acessada através de uma unidade de processamento. Os eixos de sensibilidade (eixos de orientações X, Y e Z) de sensores de um SNI, podem ter sua orientação estabilizada no espaço por uma plataforma servo-controlada, chamada de *Gimballed* ou ser fixado à estrutura do objeto que o transporta, chamada de *Strapdown*, que foi a utilizada neste trabalho. Plataformas *Strapdown* exigem um esforço computacional relativamente elevado para determinar a orientação no espaço em tempo real, quando comparada com plataforma *Gimballed*.

Os SNI-IMU de alto desempenho, geralmente são do tipo *Gimballed*, possuem três atributos principais que normalmente comprometem a sua utilização, como o alto custo (superior a US\$ 300.000), dimensões, massa, e uma regulamentação rígida que restringe aplicações desses sistemas para fins militares [3]. A utilização de SNI de baixo custo é apresentada como opção para contornar estas restrições. IMUs que utilizam princípio de

estado sólido e que podem ser integrados ao corpo, são baseados na tecnologia Sistema Micro-Eleto-Mecânicos (MEMS), que custam no máximo algumas dezenas de dólares. O baixo custo nestas opções tem estimulado o desenvolvimento de SNI, graças a vasta aplicabilidade e as pequenas dimensões. Dentre as aplicações, há estudos voltados para: mobilidade humana; robótica; controle de antenas e dispositivos móveis; automação de máquinas; balísticas; e principalmente em engenharia militar e aeroespacial [4].

Sensores inerciais que são comumente utilizados em SNI-IMU-MEMS são o acelerômetro, o magnetômetro e giroscópio. Contudo, Larrat e Rafael (2010) afirmam que as medidas desses sensores são corrompidas por diferentes fontes de erro, tornando necessário aplicação de técnicas de calibração e correção de erros para compensar esta característica para então, utiliza-las na obtenção dos parâmetros de navegação. Embora os fabricantes afirmarem que seus dispositivos possuem calibração obtida na fábrica, dispensando novos métodos para a maioria das aplicações, os mesmos dispõem formas específica para calibrar os seus sensores [5]. Segundo Cucu (2012), é necessário ter cuidado com essas afirmações, pois como as IMUs são submetidas a processos de montagens, é provável que a maioria das configurações de fábrica mencionadas não sejam mais válidas, se as mesmas ainda forem, algumas características podem ter variações consideráveis de um dispositivo para outro, onde em seu caso, afirma que o seu giroscópio apresenta medidas inaceitáveis para seu tipo de aplicação, o que concluiu que, por estas razões, os dispositivos têm de ser calibrados [6].

Portanto, este artigo aplica as técnicas de calibrações dos mínimos quadrados para acelerômetro, compensação de efeitos ferrosos para magnetômetro e a taxa zero e acúmulo de desvio para giroscópio para adquirir medidas com exatidão a fim de desenvolver os parâmetros de atitude e azimute com precisão, que são essenciais para as aplicações citadas de forma prática.

II. TOPOLOGIA DO TRABALHO

A topologia do sistema utilizado neste trabalho é apresentada pela Figura 1, onde é possível analisar todo o fluxo de informação, desde os módulos sensoriais ao computador.

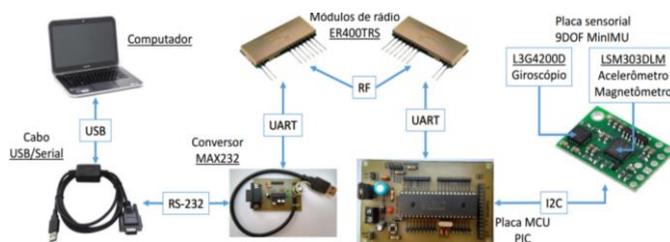


Fig. 1. Topologia: fluxo de informações do trabalho.

Ítalo Rodrigues Braga¹, Iális Cavalcante de Paula Júnior² e Rejane Cavalcante Sá³, Universidade Federal do Ceará¹² (UFC), Instituto Federal do Ceará³ (IFCE), Sobral-CE¹², Fortaleza-CE³, Brasil, E-mails: italorodriguesb@gmail.com, ialis@sobral.ufc.br, rejanecea@gmail.com.

Utiliza um microcontrolador (MCU) do tipo *Programmable Interface Controller* (PIC), modelo PIC18F4520, para coletar medidas proveniente da placa sensorial 9DOF MinIMU através do protocolo de comunicação *Inter-Integrated Circuit* (I2C). Essas medidas correspondem aos dados brutos que são submetidos as técnicas de calibrações para se tornarem medidas compreensivas. O MCU transmite as medições usando a comunicação *Universal Asynchronous Receiver/Transmitter* (UART), Serial RS-232 TTL, por meio de radiofrequência (RF) entre os módulos de rádios ER400TRS ou por ligação direta (fios) ao circuito do *driver* conversor MAX232. Transmissão por meio de ligação direta é mais rápida e segura quando comparada a indireta (sem fio). Dependendo da aplicação, uma das duas possibilidades se sobressai tanto para vias práticas quanto para fins de teste. O circuito do *driver* conversor irá transformar todos os *bytes* de informações para níveis de serial RS-232. O cabo USB/Serial baseia-se neste protocolo utilizando níveis de tensões de $\pm 7,5$ V, com finalidade converter para padrão *Universal Serial Bus* (USB) ao computador. Utilizando um *software* terminal, o *Docklight* V2.0, foi possível o monitoramento das informações transmitidas ao computador para fins de teste e obtenção de resultados.

A placa sensorial 9DOF MinIMU da empresa *Pololu Robotics & Electronics*, possui duas IMUs: acelerômetro e magnetômetro no módulo LSM303DLM e giroscópio no módulo L3G4200D. Ambos os módulos são tri-axiais que somente podem ser acessados através do barramento I2C, disponibilizado no *layout* da placa.

III. METODOLOGIA

A. Ambiente de Teste

A condição de ensaio abordado, seja para aquisição de dados, uso das técnicas de calibração ou aplicações das medidas, foram efetuadas com a placa sensorial inserida em uma *protoboard* sob uma superfície plana.

B. Processamento de Sinais e Configurações dos Sensores

Cada sensor possui características distintas quanto a sua interface, tal como as possíveis configurações, como por exemplo o valor da taxa de saída de dados (ODR – *Output Data Rate*), os modos de operação, a seleção da escala e o padrão de velocidade no barramento I2C. Essas configurações e outros parâmetros como a leitura de cada eixo de sensibilidade, são denominadas por registros. Cada registro possui um endereçamento fixo de 8 *bits*, onde geralmente cada *bit* habilita/desabilita uma determinada configuração. Para configuração dos sensores, é feito uma análise dos endereços dos registros e das possíveis configurações e então, implementa uma sequência de comandos de escrita para se ter uma configuração desejável. É possível ver como exemplo na Tabela I, do registrador CTRL_REG1_A de endereço 0x20 do sensor acelerômetro, onde cada *bit* ou conjunto de *bits* representa uma configuração específica [7].

TABELA I. REGISTRO CTRL_REG1_A.

PM2	PM1	PM0	DR1	DR0	Zen	Yen	Xen
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

Os *bits* PM2, PM1 e PM0 representam o modo de operação do dispositivo ligado. Os *bits* DR1 e DR0 representam a taxa de dados de saída e os *bits* Zen, Yen e Xen habilitam/desabilitam a aquisição de dados de cada eixo. Por padrão, cada *bit* possui um valor para operação definido pelo fabricante.

Havendo conhecimento das funcionalidades de cada registro, se inicia a configuração desejada após 5 a 10 ms da

energização dos mesmos, tempo este para os módulos se iniciarem. Por motivos de prudência, aplica-se os *bits* de configuração desejados e os demais são atribuídos valores padrão. Visto as práticas, é realmente importante a atenção nestes procedimentos, sendo assim, o acelerômetro opera de modo normal, com uma taxa de dados de saída em 400 Hz e com os três eixos habilitados. Aplicando uma atualização automática dos dados e com um fundo de escala ± 2 g. O magnetômetro está configurado com uma taxa de saída de dados em 200 Hz com medições normais de seus valores. Operando com fundo de escala de $\pm 5,6$ Gauss e de modo contínuo de conversão. Já o giroscópio opera de modo normal, com uma taxa de dados de saída em 100 Hz e com os três eixos habilitados. Aplicando uma atualização contínua de dados e com fundo de escala 2000 dps. Para os demais registradores, assume-se valores padrões, 0x00.

C. Métodos de Calibração

Como já mencionado a necessidade da aplicação de técnicas de calibração em IMUs, mas entanto aplicar técnicas que corrige os mais diversos erros inerentes aos mesmo, exigiria por si só todo um outro trabalho dedicado, o que incluiria correção de: *bias*: fator de erro constante; erros de escalas: erro que depende da magnitude do valor atual; desalinhamento: fator de erro do cruzamento entre os eixos, devido a um desalinhamento entre o corpo e o sensor. Além disso, também incluiria os mais sutis erros [6]. Como a influência da temperatura, comportamento dinâmico, não-linearidade e a histerese. Os últimos são negligenciados, pois são bastante difíceis de medir e o seus impactos são consideravelmente inferiores aos dos três primeiros descritos [8]. Cucu (2012) afirma que a maioria destes parâmetros são intrínsecos à natureza dos MEMS, onde não podem ser corrigidos e também não mudam muito com os valores indicados nas folhas de dados. Em seu trabalho, cada método se mostrou eficiente sobre as condições padrões fornecidos pelos fabricantes, o que concluiu que nenhuma IMU pode ser utilizada sem ter um mínimo de calibração, por mais simples que o método seja. Entretanto, o sensor giroscópio apresenta uma dificuldade ainda maior porque não há uma maneira fácil de calcular os fatores de escala, pois necessitaria girar o sensor em uma placa/mesa horizontal com velocidade angular conhecida e precisa.

Para o sensor acelerômetro, aplica-se o método dos mínimos quadrados, que tem finalidade de determinar o deslocamento (*offset*), o fator de escala (*scale factor*) e a matriz de desalinhamento (*misalignment matrix*) em relação aos eixos. Para normalizar a medição em ± 1 g e fazer a compensação, a relação entre os valores normalizados e os dados brutos do acelerômetro podem ser expressos pela Equação 1.

$$\begin{bmatrix} A_x \\ A_y \\ A_z \end{bmatrix} = [A_m]_{3 \times 3} \cdot \begin{bmatrix} 1/A_{SC_X} & 0 & 0 \\ 0 & 1/A_{SC_Y} & 0 \\ 0 & 0 & 1/A_{SC_Z} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} A_x - A_{OS_X} \\ A_y - A_{OS_Y} \\ A_z - A_{OS_Z} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$= \begin{bmatrix} ACC_{11} & ACC_{12} & ACC_{13} \\ ACC_{21} & ACC_{22} & ACC_{23} \\ ACC_{31} & ACC_{32} & ACC_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} A_{xr} \\ A_{yr} \\ A_{zr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} ACC_{10} \\ ACC_{20} \\ ACC_{30} \end{bmatrix}$$

Onde a matriz $[A_m]_{3 \times 3}$ concebe o desalinhamento entre os eixos do sensor e a base de teste. Os valores de A_{SC_i} , A_{OS_i} , A_{ir} e A_i , onde i representa X, Y e Z, são os fatores de escala, deslocamento, dados brutos e dados normalizados, respectivamente. Tal equação pode ser reescrita na Equação 2, pois assume-se o objetivo da calibração de determinar 12 parâmetros (ACC_{10} à ACC_{33} representado pela matriz X) de modo que quaisquer medições brutas em posição arbitrária do

sensor sejam normalizadas. Assim, são necessárias obter medições de 6 posições estacionárias como base, uma para cada face da placa sensorial, referenciado a ± 1 g, dado pela matriz Y . Sendo obtido os valores máximos e mínimos das medições brutas de cada eixo de orientação, dado pela matriz w , na Equação 2.

$$Y = w \cdot X \quad (2)$$

$$w = \begin{bmatrix} 96 & -1104 & 16656 & 1 \\ -1376 & -672 & -15424 & 1 \\ -176 & 16272 & -576 & 1 \\ -48 & -17232 & -288 & 1 \\ 16432 & -176 & -1200 & 1 \\ -15680 & -576 & 1184 & 1 \end{bmatrix} Y = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

A matriz de calibração X será determinada pelo método dos mínimos quadrados, conforme a Equação 3. Onde, w^T significa a transposição da matriz e $[w^T \cdot w]^{-1}$ significa matriz inversa.

$$X = [w^T \cdot w]^{-1} \cdot w^T \cdot Y \quad (3)$$

Para o sensor magnetômetro, que sofre grandes influências do meio externo na introdução de materiais ferrosos próximos, onde suas medições tendem a sofrer um desequilíbrio como um todo, o método de calibração irá compensar este efeito. Se utiliza a Equação 4 para obter medidas compensadas, X_{comp} e Y_{comp} , de distorções que os dados brutos estão sobre influência, X_{raw} e Y_{raw} . Distorções essas sendo valores de fatores de escala dado por X_{sf} e Y_{sf} e de deslocamento dado por X_{offset} e Y_{offset} .

$$X_{comp} = X_{sf} \cdot X_{raw} + X_{offset} \quad (4)$$

$$Y_{comp} = Y_{sf} \cdot Y_{raw} + Y_{offset}$$

Tal método é baseado na rotação do eixo Z sob uma superfície plana para a obtenção dos valores máximo e mínimo dos eixos variantes. Assim é possível obter os valores correspondentes as distorções, pela Equação 5 os fatores de escala e pela Equação 6 os de deslocamentos. Se o fator de escala assumir valor menor do que 1, o mesmo deverá ser atribuído com valor igual a 1.

$$X_{sf} = (Y_{max} - Y_{min}) / (X_{max} - X_{min}) \quad (5)$$

$$Y_{sf} = (X_{max} - X_{min}) / (Y_{max} - Y_{min})$$

$$X_{offset} = \{[(X_{max} - X_{min})/2] - X_{max}\} \cdot X_{sf} \quad (6)$$

$$Y_{offset} = \{[(Y_{max} - Y_{min})/2] - Y_{max}\} \cdot Y_{sf}$$

O sensor giroscópio é capaz de fornecer medidas de velocidades angulares significativas e para aplicar um processo de calibração adequado, é necessário a utilização de uma mesa giratória servo-controlada com de velocidade angular precisa [9], o que torna este método inviável para o ambiente de teste proposto. Utilizando a Equação 7, também é possível obter resultados aceitáveis e satisfatórios ao utilizar valores típicos da sensibilidade, dado por SC que pode ser encontrado na folha de dados [10], para converter os dados brutos do giroscópio, dado por R_m , para velocidade ou deslocamento angular significativo, representado por R_T .

$$R_T = SC \cdot (R_m - R_0) \quad (7)$$

R_0 é o valor médio de uma coleção de 50 a 200 amostras de leituras dos dados brutos, assumindo que o esteja estacionário. Devido ao ruído a partir da saída do giroscópio e às oscilações de temperatura, suas leituras sofreram mudanças mesmo estando em repouso. E para amenizar ainda mais esses ruídos, aplica-se um filtro onde caso o dado bruto não alcance um

limite definido, R_{TH} , resulte em uma atribuição a 0, obtendo assim, uma compensação do acúmulo de desvio e de taxa zero no método de calibração, apresentado na Equação 8.

$$\text{Se } |(R_m - R_0)| < R_{TH} \rightarrow \Delta R = (R_m - R_0) = 0 \quad (8)$$

Para verificar a magnitude dos eixos normalizados dos sensores, dado por M e E_i respectivamente, o valor da Equação 9 deve ser igual a 1. Caso contrário, uma distribuição da intensidade da magnitude deve ser feita para todos os eixos, a fim de compensa-los, como mostra a Equação 10.

$$Mag = \sqrt{E_X^2 + E_Y^2 + E_Z^2} \quad (9)$$

$$E_i = E_i / Mag \quad (10)$$

D. Aplicações dos Sensores

O modelo de orientação angular baseado neste trabalho, faz referência ao sistema de coordenadas de Euler X, Y e Z, juntamente com a convenção de rotação angular de aeronaves que define os parâmetros de atitude em três ângulos: *roll*, *pitch* e *yaw* [11].

A integração das medições fornecidas pelo sensor giroscópio, velocidade angular em $^\circ/s$, a fim de obter a orientação angular, é de extrema importância. Por meios digitais, a aproximação feita tende a somar os números finitos das medições em um intervalo constante de tempo T_s , chamado de período de amostragem [12]. Com a Equação 10 a seguir, é possível obter a atitude para cada eixo [9].

$$\Delta X = \Delta X + h \cdot R_X \cdot SC_X \quad (10)$$

Onde ΔX é deslocamento angular sobre o eixo especificado em graus, h é o período de amostragem em segundos, ou seja, tempo de execução do *loop*. R_X representa as medições calibradas e SC_X os valores do fator de escala, para cada eixo.

Aplicando funções de onda senoidal nas medições calibradas do sensor acelerômetro, que são capazes de detectar a aceleração da gravidade denominada de força g em ± 1 g ($9,80665$ m/s²), é possível utiliza-lo como sensor de inclinação a fim de obter ângulos de rotação em *pitch* e *roll*. A maneira mais simples de medir ângulos de inclinação, é a utilização de apenas um eixo. Basicamente, o inverso teórico da função seno proporciona uma angulação de $\pm 90^\circ$, mostrado na Equação 11, mas somente tem boa linearidade entre $\pm 45^\circ$, excedendo isso, há redução significativa na sensibilidade [13].

$$\theta = \arcsen(A_{EIXO1}) \quad (11)$$

A utilização de dois ou três eixos melhora significativamente a faixa de valores, tornando o método ligeiramente mais confiável para a aplicação. Com apenas dois eixos é possível medir ângulos de $\pm 180^\circ$ pela Equação 12. No entanto, caso sensor sofra rotação no terceiro eixo, as medições se tornam imprecisas. Assim, valores mais eficientes são obtidos com a mesma função, mas fazendo uso dos três eixos disponíveis. Contudo, calcula-se a magnitude dos outros eixos e só então dividir pelo o eixo em questão, tendo valores na faixa de $\pm 90^\circ$, mostrado na Equação 13.

$$\theta = \arctan(A_{EIXO1} / A_{EIXO2}) \quad (12)$$

$$\theta = \arctan\left(A_{EIXO1} / \sqrt{A_{EIXO2}^2 + A_{EIXO3}^2}\right) \quad (13)$$

Contudo, a saída do eixo A_{EIXO1} não pode representar a inclinação de 45° ou 135° , pois são indicados pela mesma saída, aproximadamente 0,701 g. Esta ambiguidade é resolvida com o monitoramento do sinal do eixo A_{EIXO3} , com base na Tabela II.

TABELA II. SINAIS DE ACELERAÇÃO ATRAVÉS DE CADA QUADRANTE, ADAPTADO DE [14].

Quadrante	AEIXO1	AEIXO3
1	+	+
2	+	-
3	-	-
4	-	+

Capaz de medir a intensidade, direção e sentido do campo magnético da Terra, uma utilização do sensor magnetômetro bastante difundida é a identificação da direção de um corpo que aponta para o norte geográfico num plano horizontal, obtendo assim, o ângulo de azimute através do arco-tangente de (Y/X). Para minimização do tempo de processamento, uma sequência de condições pode ser armazenada na memória do programa, como mostra a Tabela III.

TABELA III. VALORES LIMITES DE ARCO-TANGENTE, ADAPTADO DE [15] E [16].

Condição	Valor do Azimute (Graus)
$(X = 0)E(Y < 0)$	90
$(X = 0)E(Y > 0)$	270
$(X < 0)$	$180 - \arctan(Y/X) \cdot 180/\pi$
$(X > 0)E(Y < 0)$	$-\arctan(Y/X) \cdot 180/\pi$
$(X > 0)E(Y > 0)$	$360 - \arctan(Y/X) \cdot 180/\pi$

Difícilmente o sensor estará nivelado num plano horizontal, apresentando ângulos de inclinação nulo, tornando as medições bastante influenciável quanto ao nivelamento. Usando um sensor de inclinação é um típico meio para solução. O cálculo para a compensação baseia-se nos três eixos magnéticos juntamente com os ângulos de *pitch* (ϕ) e *roll* (θ) que estão associados a Y_H e X_H , respectivamente nas Equações 14 e 15.

$$X_H = X_B \cdot \cos(\theta) + Z_B \cdot \sin(\theta) \tag{14}$$

$$Y_H = X_B \cdot \cos(\phi) \cdot \sin(\theta) + Y_B \cdot \cos(\phi) - Z_B \cdot \sin(\phi) \cdot \cos(\theta) \tag{15}$$

Apesar da obtenção do parâmetro de atitude por meio dos sensores giroscópio e acelerômetro, ambos possuem características que quando comparadas, umas se sobressaem sobre as outras. O giroscópio com medidas precisas, porém com acúmulo de desvio quando integradas, já o acelerômetro é o oposto, pois faz medições da força atuante nele, não apresentando acúmulo, mas com ruído. Então, em busca de obter medidas mais precisas, é necessário fundi-los. A utilização da fusão sensorial é fundamental e tem ganhos consideráveis. Existem duas maneiras bem difundidas no ramo, o filtro de Kalman e o Complementar, que será o abordado. O filtro complementar é simples e intuitivo, de fácil implementação, que se baseia na definição de pesos a cada parâmetro e soma-los depois [13], unindo o melhor dos parâmetros de ambos os sensores, como mostra a Equação 16.

$$Ang = P_1 \cdot (Ang + G_V \cdot dt) + P_2 \cdot A_A \tag{16}$$

Onde P_1 e P_2 representa a relação de importância que tem a base de dados, assumindo valor constante de 1 ao soma-los, Ang é o ângulo resultante da fusão de dados, G_V é a velocidade angular fornecido pelo giroscópio, dt é a constante de tempo para integração e A_A é o ângulo fornecido pelo acelerômetro.

IV. RESULTADOS

O uso das medições da velocidade angular dado pelo sensor giroscópio na obtenção do parâmetro de atitude por meio da integração dos mesmos é apresentado na Figura 5, exibindo a plotagem do eixo X, onde a integração é feita com e sem filtro

nas mesmas medidas obtidas. O limite para o filtro é definido com o retorno do valor absoluto da leitura de cada amostra, ou seja, adquirir o valor máximo do módulo de cada leitura, de aproximadamente 50 amostras. O ensaio é baseado na rotação do eixo em ambos os sentidos de $\pm 90^\circ$, $\pm 180^\circ$ e $\pm 360^\circ$, com um breve repouso ao atingir o ângulo desejado e no seu estado inicial. Verificou que existe um crescimento de deslocamento nas medições sem filtro, alcançando uma diferença de aproximadamente 4° . Se o tempo de repouso fosse maior, essas dispersões se tornariam cada vez mais significativas. A Figura 2 é uma ampliação do número de medição 1800 em diante.

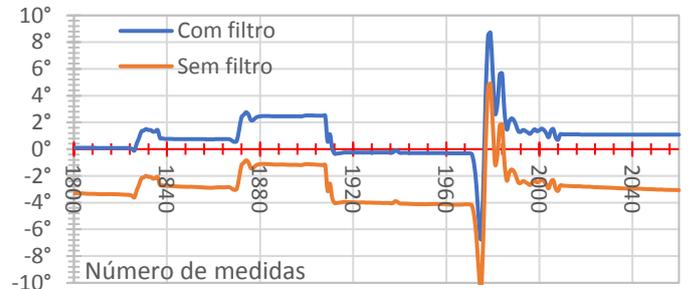


Fig. 2. Plotagem da integração da velocidade angular no eixo X com e sem filtro de acúmulo de desvio.

Sua obtenção angular é suave e precisa em curto prazo, mas com adição do erro de desvio. Um fator importante deve ser considerado, dependendo da aplicação adotada, se exigir baixíssimas rotações, o limite do filtro deve ser obtido de maneira mais precisa juntamente com os valores da velocidade angular, caso contrário, será mais seguro sua remoção.

As medições do sensor acelerômetro aplicados na Equação 12, que obtém maiores eficiências em valores de inclinação, juntamente com a resolução da ambiguidade apresentada na Tabela II, é mostrado na Figura 3 com a plotagem das medições dos eixos Y e Z ao submeter uma rotação de 360° em torno do eixo X (*roll*). Sendo possível gerar variação de $\pm 180^\circ$.

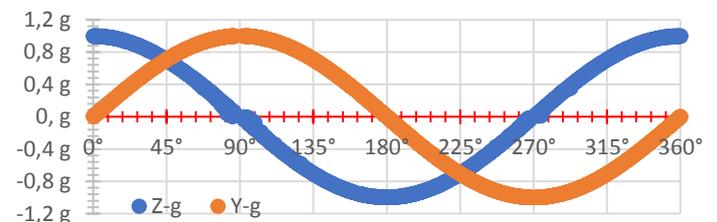


Fig. 3. Ângulo de rotação *roll* de 360° . Plotagem dos eixos Y e Z.

A aquisição do parâmetro de azimute tem grande peso na eficiência quando há uma introdução da compensação por inclinação. Foram aplicadas rotações em *pitch* e em *roll*, sob um determinado ângulo de azimute qualquer (cerca de 290°) e com auxílio do sensor acelerômetro, são obtidos dois azimutes para comparação, com e sem compensação por inclinação, como no ensaio apresentado nas Figuras 4 e 5.

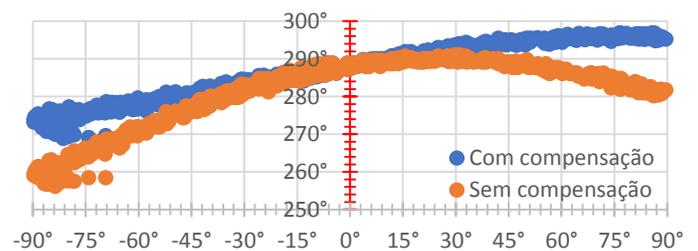


Fig. 4. Rotação em *pitch* de $\pm 90^\circ$ com azimute de aproximadamente 290° com e sem compensação.

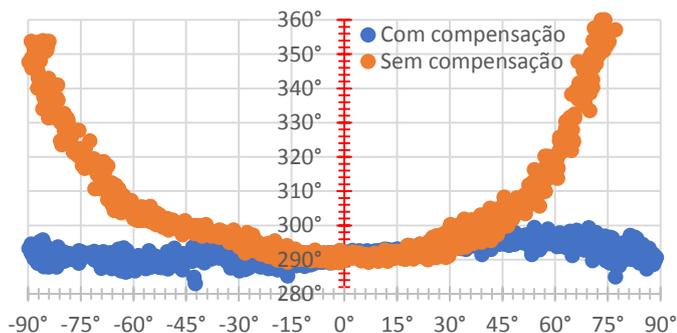


Fig. 5. Rotação em *roll* de $\pm 90^\circ$ com azimute de aproximadamente 290° com e sem compensação.

Os dados de atitude fornecidos pelo giroscópio são integrados a cada interação com o valor do ângulo atual e logo são combinados com os dados de inclinação fornecidos pelo acelerômetro. As constantes de peso podem ser ajustadas, mas o ideal é manter o maior peso para o giroscópio, cerca de 0,95 a 0,98. A razão disto é ter uma fusão dos sensores voltada para o giroscópio, já que sua orientação angular é suave. A Figura 6 demonstra a obtenção de ângulos para cada sensor e a sua fusão.

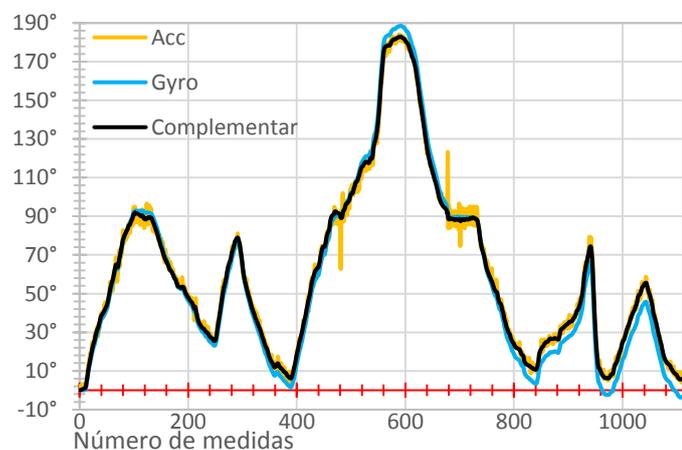


Fig. 6. Ângulo de azimute: Acelerômetro, Giroscópio e Filtro Complementar.

Analisando os resultados, o giroscópio, em azul, tem sua integração suave mas há um desvio acumulado ao longo das medições e é notório o quão dispersante fica dos demais valores. Já o acelerômetro em amarelo, não possui desvio acumulado, entretanto há bastante ruído, picos altíssimos em determinados pontos. E a aplicação do filtro complementar em preto, demonstra o meio termo dos sensores, com crescimento suave e a ausência de ruído inerente, mas um pequeno atraso em relação aos demais, devido a proporção dos pesos selecionado a taxa de integração do giroscópio.

V. CONCLUSÃO

As técnicas de calibrações submetidas na placa sensorial 9DOF MinIMU da empresa *Pololu*, apresentado neste trabalho, conseguem obter exatidão nas medições para as aplicações dos parâmetros de navegação atitude e azimute.

A compreensão das configurações dos sensores é de suma importância, pois dependendo das condições ambiente ou implementação, uma se adequa mais sobre a outra e atinge melhores resultados, e as utilizadas forneceram resultados satisfatórios ao ambiente de teste submetido. Um ajuste na resolução da taxa de saída pode ser viável, pois ter acesso ao processamento das medições brutas permite o controle de precisão para o qual será fundamentada.

É essencial compreender técnicas de calibração, pois diversos autores indicam, aplicam e descrevem métodos desde os mais simples aos mais complexos. Processos de soldagem de IMUs na confecção de placas por exemplo, um desalinhamento, por minúsculo que seja, atribuirá erros em suas medições. Tais técnicas tem ganhos significativos, mesmo as mais simples, conseguem minimizar as fontes de erros mais influentes. Aplicação de normalização de magnitude e filtros são excelentes meios para evitar discrepância e altas variações nas medições, respectivamente.

Aplicações dos sensores são atividades fundamentadas e específicas de cada um, onde é essencial o conhecimento das características de ambos para melhor adequar suas operações. Para as aplicações que requerem maiores precisões, a fusão sensorial tem um grande impacto na compensação de determinadas medições, como na compensação do ângulo de azimute dado pelo sensor de inclinação e a obtenção da orientação angular pelo filtro complementar.

Alguns pontos de melhorias podem ser considerados como compreender melhor cada sensor, suas características e suas fonte de erros e a introdução de novas técnicas de calibração para uma melhor avaliação; desenvolvimento/utilização de uma plataforma servo-controlada com precisão e exatidão na velocidade angular; e a aplicação de outros meios de fusão sensorial, como o filtro de Kalman.

REFERÊNCIAS

- [1] Durão, C. R. C. (2009). "Utilização de Unidades de Medidas Inerciais Baseadas em Sistemas Microeletromecânicos em Navegadores Integrados", COPPE/UFRJ;
- [2] Titterton, D. H.; Weston, J. L. (1997). "Strapdown Inertial Navigation Technology", Eastbourn, Peter Peregrinus Ltd;
- [3] França Junior C. J. A. (2009). "Simulação e Implementação em Tempo Real de Sistemas de Navegação Inercial Integrados INS/GPS", Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro;
- [4] Larrat M. R., Rafael I. "Método de análise e identificação de erros em sensores inerciais", Instituto de Estudos Superiores da Amazônia, Nazaré – Belém-PA, 2010;
- [5] STMicroelectronics. *Application note AN3192 – Using LSM303DLH for a tilt compensated electronic compass*. 2010;
- [6] Cucu L. (2012). "Applying Kalman Filtering on a Quadraped Robot", École Polytechnique Fédérale de Lausanne;
- [7] STMicroelectronics. *Datasheet LSM303DLM – Sensor module: 3-axis accelerometer and 3-axis magnetometer*, 2011;
- [8] Ferraris U. G. F., Parvis M. (1995). "Procedure for effortless in-field calibration of threeaxis rate gyros and accelerometers. *Sensor and Materials*";
- [9] STMicroelectronics. *Technical article TA0343 – Everything about STMicroelectronics' 3-axis digital MEMS gyroscopes*, 2011;
- [10] STMicroelectronics. *Datasheet L3G4200D – MEMS motion sensor: ultra-stable three-axis digital output gyroscope*, 2010;
- [11] Junior J. C. V. (2014). "Desenvolvimento de um Protótipo de Quadrotor para Aplicação em Agricultura de Precisão", Universidade Federal do Paraná, Curitiba;
- [12] Pieter Jan (2012). "Getting the angular position from gyroscope data", acessado em 12/2014, <http://www.pieter-jan.com/node/7>.
- [13] Paula. F. O. (2015). "Sensores IMU – Uma Abordagem Completa – Parte 1 e 2", acessado em 12/2014, <http://www.decom.ufop.br/imobilis/?p=4750>
- [14] Kionix. *Application note AN005 – Tilt-Sensing with Kionix MEMS Accelerometers*, 10/2007;
- [15] Caruso, M. J. – *Applications of Magnetoresistive Sensors in Navigation Systems*, Honeywell Inc, 10/2012.;
- [16] Caruso, M. J. – *Applications of Magnetic Sensors for Low Cost Compass Systems*, Honeywell Inc. 2000;