

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE NAVEGAÇÃO AUTOMÁTICO APLICADO A UMA EMBARCAÇÃO MOVIDA A ENERGIA SOLAR

RESUMO

Este trabalho versa sobre o desenvolvimento e implementação de um sistema de navegação automático aplicado a uma embarcação movida a energia solar e foi desenvolvido como um TCC para o curso de Engenharia Eletrônica do Instituto Federal de Santa Catarina - IFSC. O objetivo deste projeto é controlar a embarcação de maneira completamente autônoma, de modo que o piloto possa ativá-lo e desativá-lo a qualquer momento, para que possa se concentrar em realizar outras tarefas durante a prova. O sistema vai controlar a velocidade do motor, bem como a direção, desse modo é possível implementar três modos de controle: controle de velocidade, controle de direção e controle de rota. O resultado desse projeto vai ser demonstrado durante as próximas etapas do Desafio Solar Brasil, na embarcação da equipe Zênite Solar.

Palavras Chaves: Painéis Fotovoltaicos, Energia Solar, Veículos Elétricos.

DEVELOPMENT OF AN AUTOMATIC NAVIGATION SYSTEM FOR A SOLAR POWERED SHIP

ABSTRACT

This project aims to develop and implement an automatic navigation system for a solar powered ship and has been developed as a Final Paper for the Electronic Engineering course of the Instituto Federal de Santa Catarina - IFSC. The project's objective is to control the ship completely autonomously, in a way that the pilot can focus on other tasks during the challenges. The system will control the motor's speed, as well as its direction, thus it is possible to implement three control modes: Speed Control, Direction Control and Route Control. The results of this project will be shown in the next editions of the Desafio Solar Brasil, benefiting the Zênite Solar Team.

Keywords: Photovoltaic Panels, Solar Energy, Electric Vehicles.

I. INTRODUÇÃO

Durante as competições que a equipe participa existem diversos tipos de provas que variam em modalidade, objetivo e tempo. As provas podem durar de 1 a 5 horas, em que o piloto terá de ficar na embarcação, por isso as provas com durações mais longas sempre são mais desgastantes para os pilotos.

Reconhecendo a importância vital de um desempenho melhor, propõe-se o desenvolvimento de um sistema de navegação automático, que, de forma autônoma, controle a velocidade e direção da embarcação. Proporcionando um apoio inestimável aos pilotos e à equipe durante as provas, principalmente em momentos críticos, onde o piloto enfrenta a necessidade de realizar diversas tarefas simultaneamente e se encontra sozinho. É fundamental contar com um sistema confiável e avançado para auxiliá-lo. O projeto de navegação automática visa preencher essa lacuna, oferecendo uma solução abrangente para os desafios enfrentados durante as provas de longa duração.

Além disso, é importante ressaltar que a implementação desse projeto foi possível graças a projetos anteriores de destaque, como a rede de comunicação por protocolo CAN e a direção elétrica, já integradas à rede CAN. Aproveitaremos também os periféricos já existentes no barco, como giroscópio, acelerômetro e bússola, para alcançar um sistema de comunicação, controle e sensoriamento de qualidade.

O sistema de navegação autônomo apresentará três modos de condução distintos: Controle de Direção, o sistema irá fixar a embarcação em uma direção específica. Controle de Rota, o sistema irá guiar a embarcação para seguir uma rota previamente descrita. Controle de velocidade, o sistema irá manter o motor em uma velocidade fixa, esse modo pode ou não ser usado em conjunto com os outros dois. Esses modos podem ser combinados de forma inteligente e estratégica, garantindo um desempenho excepcional em todas as etapas da competição.

Este projeto não apenas representará um avanço significativo na navegação, mas também será um divisor de águas para a equipe e seus pilotos. Ao oferecer um suporte sem precedentes, nosso sistema proporcionará um ambiente

mais seguro, eficiente e confiável durante as provas desafiadoras. Com a implementação desse sistema inovador, estamos confiantes de que a equipe estará preparada para superar qualquer obstáculo e alcançar novas conquistas nos cenários competitivos.

Inicialmente foram considerados também sistemas de uso comercial, no que existem inúmeras fabricantes como a Simrad, Raymarine, Garmin, Navico e B&G, as quais disponibilizam sistemas para navegação automática, que incluem desde *tillers* até sistemas sofisticados que oferecem a melhor rota por meio do mapeamento da topografia atual (BURDEN, 2023; GARMIN, 2023; SVB GMBH, 2023). Por outro lado, o custo desses produtos é elevado, da ordem de milhares de reais (GARMIN, 2023; SVB GMBH, 2023), subtraindo de eventuais taxas de importação e de adequação ao equipamento da embarcação atual. Logo, o sistema desenvolvido internamente foi o mais apto para a resolução dos problemas previamente mencionados.

Em virtude da implantação desse sistema, a seguinte revisão literária acerca dos termos de geolocalização e sensoriamento é fornecida: toma-se conhecimento de que por meio de grupos de satélites artificiais, denominados constelações, e receptores de suas mensagens, tanto o mapeamento geológico quanto a identificação e posicionamento de objetos é possibilitado pelo *Global Navigation Satellite System* (GNSS), exemplificado por constelações como o *Global Positioning System* (GPS), o *GLOBAL NAVIGATION SATELLITE SYSTEM* (GLONASS), o sistema Galileo, e o *BeiDou Navigation Satellite System* (BDS ou BeiDou) respectivamente criados pelas entidades governamentais NASA dos Estados Unidos, IAC da Comunidade dos Estados Independentes (CEI), a ESA da União Europeia e a CNSA da China (SEEBER, 2003; GREWAL; ANDREWS; BARTONE, 2020).

Devido à expectativa de uso por civis, existem manipulações sobre os dados transmitidos aos receptores, em que a precisão é severamente reduzida afim de desencorajar aplicações militares não autorizadas (KRUEGER, 1997). E apesar das limitações técnicas impostas sobre o sistema, ainda se pode ter precisão centimétrica localmente e em

tempo real com tecnologias como o *Real Time Kinematic* (RTK), por intermédio de estações base e satélites que permitem a triangulação de receptores (KRUEGER, 1997; UENO, 2002), e de outras tecnologias como a *Precise Point Positioning* (PPP), que se dispõe de múltiplas constelações e de análises orbitais dos satélites (ALKAN, 2017).

É inegável a importância do GNSS para a navegação, entretanto durante a sua operação ele pode ser ofuscado pela estrutura topológica ao seu redor e por intempéries climáticas. Nisso, foi empregado o *Dead Reckoning*, que envolve qualquer método utilizado para deduzir matematicamente o trajeto de um receptor móvel a partir das últimas coordenadas obtidas e estimativas de dados de navegação (KRUEGER, 1997).

Dessa maneira, *Inertial Navigation Systems* (INS) são subsistemas de grupos de sensores capazes de prover, temporariamente, dados de trajetória enquanto não há disponibilidade de acesso à informação do GNSS. Eles são compostos por acelerômetros, giroscópios e magnetômetros (bússolas digitais), que auxiliam na extração de estimativas da dinâmica sobre o barco (BAR-SHALOM; LI; KIRUBARAJAN, 2001, p. 524).

Contudo, os resultados do INS são ruidosos e não compensados, portanto, é indispensável que seja feita a filtragem de seus sinais. Logo, na literatura o filtro Kalman é o mais adequado para esse intuito, por ser um algoritmo capaz de realizar a fusão de sensores e fornecer estimativas próximas aos valores reais (GREWAL; ANDREWS, 2014, p. 2).

E por questões de conveniência, o projeto incorpora uma Interface Homem-Máquina (IHM), que permite a ativação e desativação da navegação automática e provem o estado atual dos componentes.

II. METODOLOGIA

Por consequência da implantação prévia dos projetos da *Controller Area Network* (CAN) para comunicação entre módulos, da direção elétrica (PARENTE, 2019), e do controle preciso da direção da rabeta da embarcação (RODRIGUES, 2023), o desenvolvimento do sistema de

navegação automática pode ser contemplado. Em seu planejamento foram estudados os seguintes passos:

- Soluções de navegação auxiliada por satélites propostas na literatura;
- Seleção de componentes, conhecimento e preparo às suas particularidades;
- Elaboração de algoritmos *Dead Reckoning* e Filtro Kalman;
- Criação de uma Interface Homem-Máquina (IHM);
- Integração aos módulos existentes na embarcação;
- Testes do protótipo.

Primeiramente, alguns artigos diferem-se pelo modo em que a topologia entre receptores e satélites é concretizada. Na maior parte, as soluções envolvem o uso de ao menos uma estação base; que possui coordenadas conhecidas e com GNSS integrado, um receptor GNSS móvel com acesso à internet, e uma ou mais constelações de satélites disponíveis. Essa configuração permite a operação do sistema de alta precisão RTK. Já para soluções baseadas em PPP, somente é necessário um receptor GNSS, porém requer acesso constante à internet e é de convergência lenta.

No entanto, tais arranjos tornam-se proibitivos devido às suas complexidades e custos elevados, em que se optou por um sistema de apenas um receptor GNSS, no que a precisão está na faixa de metros, porém é satisfatória para a demanda necessária das funcionalidades. Ademais, um elemento complementar ao receptor GNSS e comum a todas propostas é o INS, necessário para o *Dead Reckoning* e redução dos efeitos da dinâmica do corpo hídrico sobre a embarcação.

E dentre outras características de implementação distintas, destacam-se os aprimoramentos feitos ao algoritmo Kalman, que incluem aprendizado de máquina, interpretação *Fuzzy* e redes neurais para determinar compensações adequadas ao sistema de navegação. Novamente, em função da complexidade e custos, apenas o filtro Kalman e suas variantes são implementadas.

Logo, munido dos componentes GNSS e INS, dá-se continuidade a composição do sistema de navegação automática e do seu protótipo.

2.1 Módulo GNSS

Na Figura 1, o módulo GNSS escolhido é o u-blox NEO-M8N, já integrado com uma bússola digital HMC5883L desenvolvido para um controlador de voo ArduPilot (ARDUPILOT, 2023).



Figura 1 – Módulo GNSS u-blox NEO-M8N com integração à bússola digital HMC5883L
Fonte: (FLIGHTMANIA, 2023)

O módulo NEO-M8N possui a suas especificações detalhadas na Tabela I. Esse dispositivo satisfaz as condições necessárias de funcionamento para a embarcação, em que as dinâmicas de aceleração, velocidade, altitude, e erros de velocidade e direção são direcionadas para aplicações aéreas.

TABELA I – ESPECIFICAÇÕES DO MÓDULO GNSS U-BLOX NEO-M8N

GNSS suportados	GPS/QZSS, GLONASS, Galileo, BeiDou
GNSS simultâneos	3
Interfaces	UART/SPI, USB, DDC
Dinâmica máxima	Menor ou igual a 4g
Altitude máxima	50.000 m
Velocidade máxima	500 m/s
Erro velocidade	0,05 m/s (0,1 m/s acima de 30 m/s)
Erro direção	0,3° (0,6° acima de 30 m/s)

Erro de posição horizontal (estático por 24 horas)	GPS e GLONASS	GPS	GLO NAS S	BeiD ou	Galileo
	2,5 m	2,5 m	4 m	3 m	3 m
Frequência máxima de atualização	5 Hz	10 Hz	10 Hz	10 Hz	10 Hz
Tempo de início frio	26 s	29 s	30 s	34 s	45 s
Tempo de início quente	1 s	1 s	1 s	1 s	1 s

Fonte: (UBLOX, 2022)

Porém, como o projeto considera uma embarcação móvel e não ideal, o erro de posição horizontal não deve ser considerado como representativo do erro real. Em testes localizados em ambientes urbanos, o erro estático horizontal alcançou 12 metros na constelação GLONASS. E o tempo necessário para determinar a posição por latitude e longitude do receptor foram necessários cerca de 2 minutos até uma estimativa inicial com o mínimo de 3 satélites para triangulação.

Felizmente, essas características podem ser reduzidas em seu efeito por meio de uma calibração antes da inicialização do sistema, levando em conta o tempo necessário para a obtenção de coordenadas, e a utilização de 2 ou mais constelações simultaneamente também diminui a influência topográfica da região sobre a recepção de sinal.

Entretanto, como mencionado anteriormente, a perda de sinal das constelações é recorrente e se faz necessária ter a presença do INS para guiar temporariamente a embarcação até novamente obter o sinal GNSS.

Ademais, o módulo é compatível com os protocolos UBX e NMEA 0183. O protocolo UBX é um formato de mensagens proprietário da ublox para configurar e comunicar com o receptor, e o protocolo NMEA 0183 é proprietário da *National Marine Electronics Association* (NMEA), frequentemente usado em sistemas náuticos para enviar e receber frases NMEA contendo informações de localização,

hora em formato UTC, número de satélites disponíveis, velocidade e validade de dados (UBLOX, 2023).

2.2 Bússola Digital

A bússola digital é do modelo HMC5883L e é integrado ao módulo GNSS, encapsulado na Figura 2.

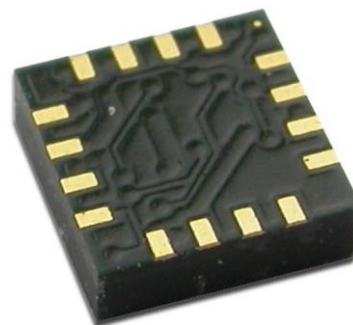


Figura 2 – Circuito integrado (CI) do módulo da bússola digital HMC5883L

Fonte: (HONEYWELL INTERNATIONAL INC., 2013)

O sensor realiza medidas de campos magnéticos por meio de um sistema microeletromecânico (MEMS), composto por sensores magneto-resistivos em ponte de Wien, alinhados em direções ortogonais para permitir o cálculo do campo magnéticos em qualquer orientação (HONEYWELL INTERNATIONAL INC., 2013). A suas especificações relevantes estão na Tabela 2.

TABELA 2 – ESPECIFICAÇÕES DA BÚSSOLA DIGITAL HMC5883L

Full Scale (FS)	±8 gauss
Faixa dinâmica de ganho	±1 até ±8 gauss
Interface	I ² C
Ruído residual (desvio padrão de 100 amostras)	2 miligauss
Resolução digital	0,73 até 4,35 miligauss
Linearidade (dentro da faixa de ±2 gauss)	0,1 ±%FS
Tolerância do ganho	±5%

Fonte: (HONEYWELL INTERNATIONAL INC., 2013)

Como a o campo magnético da terra está na faixa de cerca de 0,23 até 0,66 gauss em regiões não polares. (NATIONAL CENTERS FOR ENVIRONMENTAL INFORMATION, 2023), a escala do sensor é adequada, da mesma forma que o

seu ruído e resolução digital estão 2 ordens de magnitude abaixo do menor valor medido possível da terra.

Todavia, as condições de operação do sensor requerem alguns ajustes:

- Cálculo da declinação magnética e da intensidade de campo local (NATIONAL CENTERS FOR ENVIRONMENTAL INFORMATION, 2023);
- Calibração de *bias*, fator de escala, desalinhamentos e efeitos de distúrbios magnéticos dentro e fora da embarcação;
- Alinhamento de direção e sentido ao módulo do giroscópio e acelerômetro;
- Compensação de temperatura de calibração em relação a de operação.

2.3 Giroscópio e Acelerômetro

O módulo que incorpora o giroscópio e acelerômetro é o GY-521, que contém um CI MPU6050 (INVENSENSE INC., 2013), localizado na Figura 3.

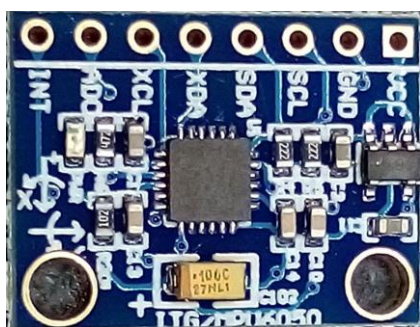


Figura 3 – CI do módulo do giroscópio e acelerômetro GY-521

No sensor, o giroscópio permite observar a taxa de variação em graus por segundo em 3 eixos ortogonais e o acelerômetro, a aceleração na mesma orientação dos 3 eixos do giroscópio. Tanto o giroscópio quanto o acelerômetro são implementações de MEMSs, utilizando-se de variação de capacitância, porém com diferentes princípios físicos, em que são, respectivamente, a pseudoforça inercial de Coriolis e uma massa suspensa em molas (força elástica) (SHILLEH, 2023). As especificações relevantes do módulo estão na Tabela 3.

TABELA 3 – ESPECIFICAÇÕES DO GIROSCÓPIO E ACELERÔMETRO DO CI MPU6050

Faixas FS	Giroscópio	Acelerômetro
		$\pm 250, \pm 500, \pm 1000, \pm 2000$ [°/s]
Tolerância (25°C)	$\pm 3\%$	$\pm 3\%$
Varição por °C	$\pm 2\%$	$\pm 0,02\%$
Não linearidade	0,2%	0,5%
Interface	I ² C	

Fonte: (INVENSENSE INC., 2013)

De mesmo modo que o módulo GNSS, esse sensor foi desenvolvido para aplicações aeronáuticas, suportando grandes acelerações. Ele também acompanha um sensor de temperatura no encapsulamento para compensar a variação térmica.

Como mencionado previamente, esse módulo e a bússola digital requer alinhamento entre eles. Além de ser necessário calcular as compensações para o giroscópio e acelerômetro em repouso. No entanto, devido ao *bias* presente no cálculo do ângulo do giroscópio e da alta sensibilidade a vibrações do acelerômetro, um modelo físico-matemático simplificado não é capaz de prever esses comportamentos, e por consequência apenas estimativas podem ser obtidas a partir dele.

2.4 Plataforma de Desenvolvimento

Na escolha da plataforma de desenvolvimento, foram contabilizados as portas e protocolos necessários para a comunicação de sensores e da rede CAN, o baixo consumo de energia, a velocidade de processamento, a compatibilidade com as bibliotecas já disponíveis pelo grupo de trabalho da embarcação, e a rápida prototipagem. Por isso, foi selecionado o microcontrolador ATmega328P como principal componente de comunicação e processamento, que possui as suas especificações da Tabela 4. E por intermédio da plataforma Arduino, inúmeras bibliotecas e exemplos estão disponíveis para desenvolvimento de protótipos e aplicações.

Atualmente, a maior parte dos módulos comunicam-se utilizando a rede CAN na embarcação, na Figura 4 pode-se observá-los, incluindo o futuro módulo de navegação automática.

TABELA 4 – ESPECIFICAÇÕES DO MICROCONTROLADOR ATMEGA328P

Frequência da CPU	16 MHz
Memória <i>flash</i>	32KB
SRAM	2KB
Timers	2 de 8-bit e 1 de 16-bit
RTC	Sim
PWM	6 canais
Interfaces	USART, SPI, I ² C
Interrupções externas e internas	Sim
<i>Sleep mode</i>	Sim

Fonte: (ATMEL, 2015)

Não somente a adição do módulo será feita como também, futuramente, a alteração da alimentação da rabeta, em que utilizará o banco de baterias do barco. Com o intuito de facilitar o controle de posição da rabeta, que atualmente deve ser feito rapidamente para evitar o esgotamento de carga da bateria.

2.5 Interface Homem-Máquina

O projeto inicial prevê uma interface que usa um LED para

aviso da inicialização e funcionamento do piloto automático, um segundo LED para aviso de que as coordenadas foram obtidas pelo receptor GNSS, e outro para o funcionamento do INS. Já para a interação utiliza 4 botões, 1 para ligar e desligar o sistema, 2 para selecionar a rota predefinida e 1 para selecionar a rota. Durante a execução da rota, os 2 botões de seleção estão disponibilizados para a mudança de velocidade. E quando não obtiver novas coordenadas durante o trajeto, e certo tempo ter passado, um bipe tocará e desativará o sistema de navegação automática devido ao acúmulo de erros do INS.

A velocidade atual estará a mostra no *display* já instalado no painel da embarcação, denotado pelo bloco de módulos IHM na Figura 4.

Futuras iterações da interface disponibilizarão as coordenadas, orientação e velocidade em diferentes unidades, com o auxílio de um *display* E-Ink.

2.6 Algoritmos

Os algoritmos envolvidos na atuação do sistema de navegação automática estão intrinsecamente conectados, em

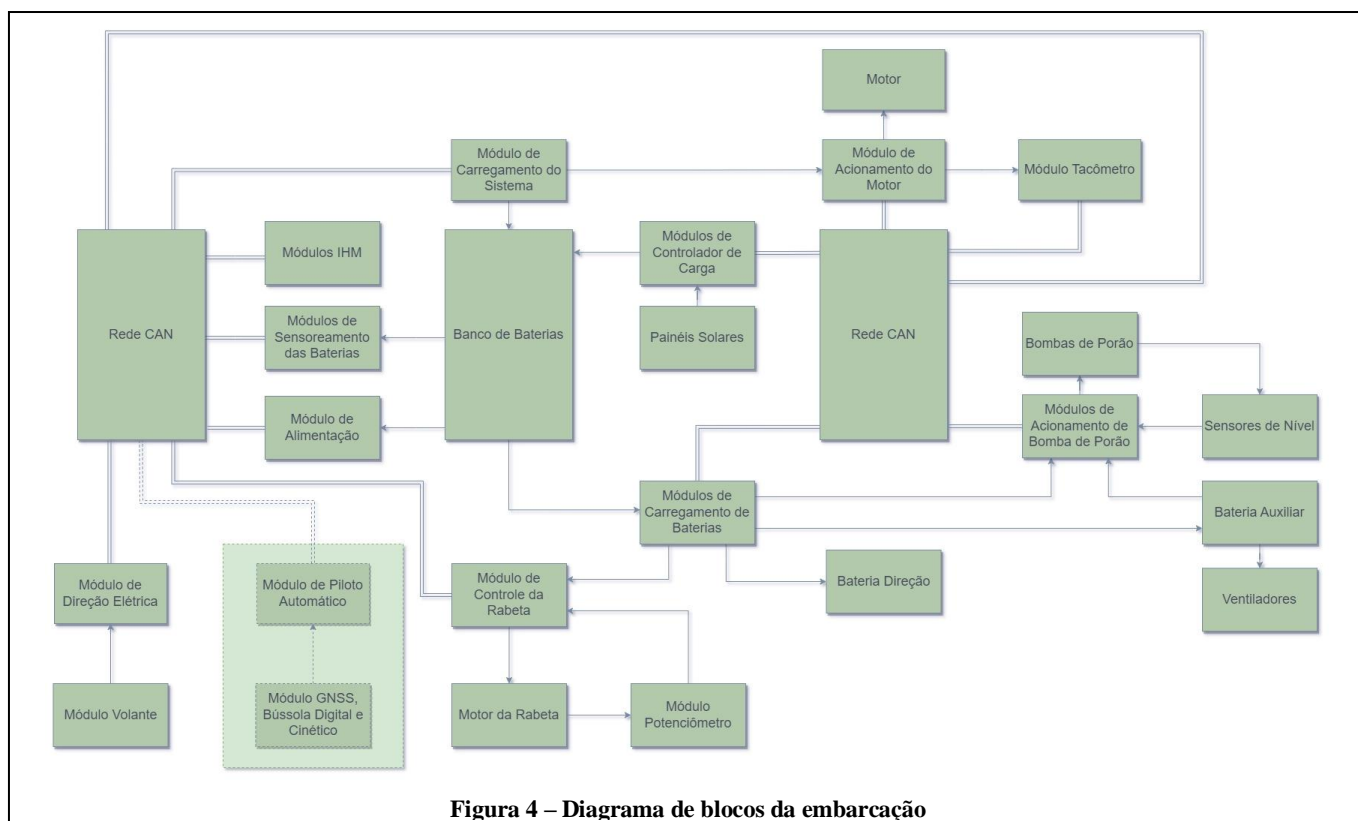


Figura 4 – Diagrama de blocos da embarcação

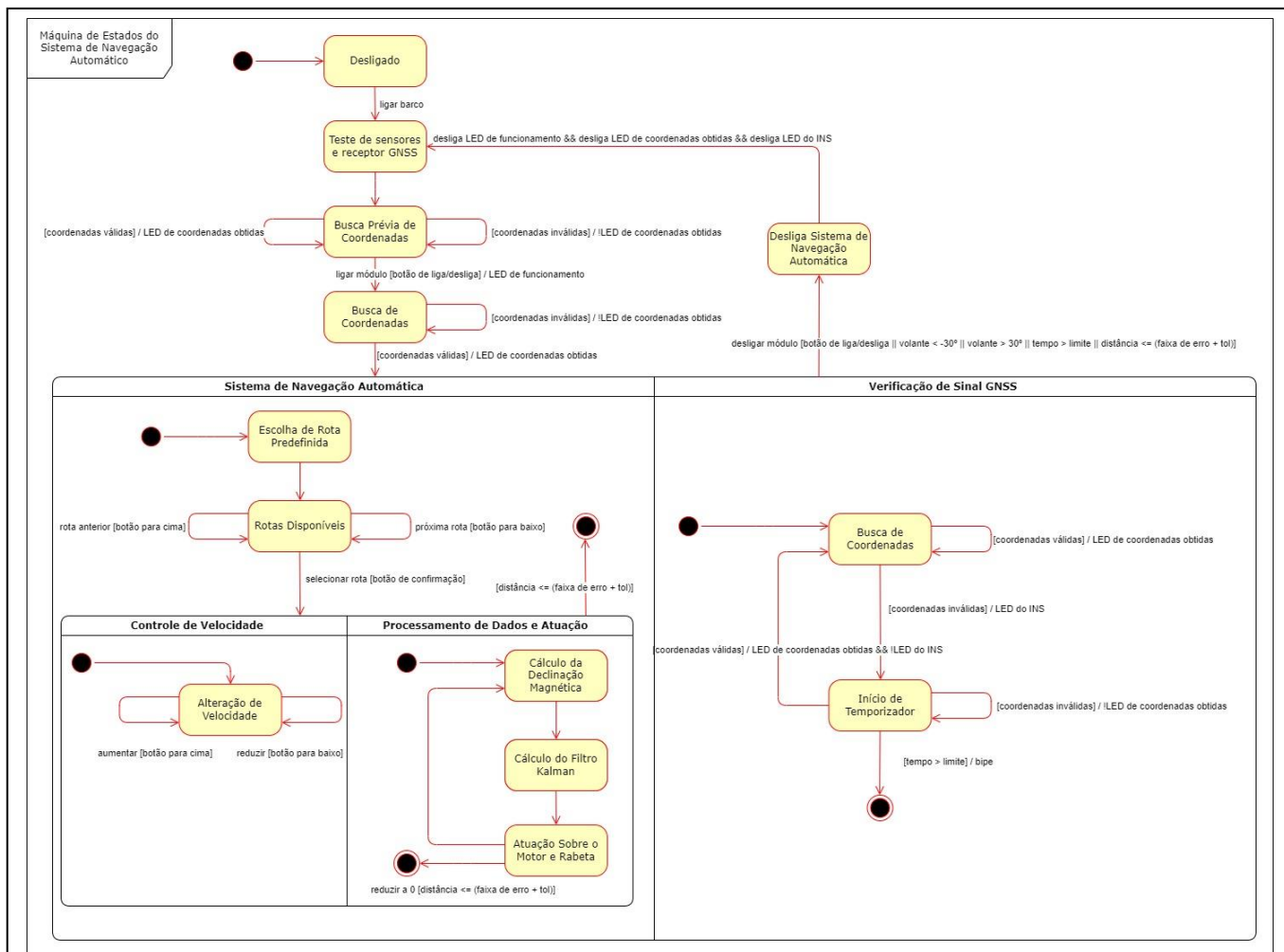


Figura 5 – Máquina de Estados do Sistema de Navegação Automática

sua maioria, com o Filtro Kalman. Na Figura 5 estão as etapas do processo realizadas para a obtenção e processamento de dados no formato de uma máquina de estados implementada em *StateChart*. Após o sistema ter sido ligado, os cálculos são iniciados a partir da seleção da rota e da aquisição dos dados de latitude, longitude, altura e horário, no que a primeira rota disponível apenas mantém o rumo, e as outras são predefinidas na programação do sistema.

Primeiramente, é calculada a declinação magnética por meio do *World Magnetic Model* (NATIONAL CENTERS FOR ENVIRONMENTAL INFORMATION, 2023), em que é utilizada para compensar a diferença entre o Norte e o Norte Magnético da Terra.

A partir daí, aproximando o formato da Terra por uma esfera é possível utilizar a lei de haversines para calcular um triângulo esférico, em que as coordenadas são usadas para

calcular a distância e orientação inicial, respectivamente nas equações 04 e 08 (MOVABLE TYPE LTD, [s.d.]).

$$\Delta\phi = \text{lat}2 - \text{lat}1 \tag{01}$$

$$\Delta\lambda = \text{lon}2 - \text{lon}1 \tag{02}$$

$$\text{hav}(\Theta) = \text{hav}(\Delta\phi) + \cos(\text{lat}1) \times \cos(\text{lat}2) \times \text{hav}(\Delta\lambda) \tag{03}$$

$$d = R \times 2 \times \arctg\left\{\frac{[\sqrt{\text{hav}(\Theta)}]}{[\sqrt{1 - \text{hav}(\Theta)}]}\right\} \tag{04}$$

$$y = \text{sen}(\Delta\lambda) \times \cos(\text{lat}2) \tag{05}$$

$$x = \cos(\text{lat}1) \times \text{sen}(\text{lat}2) - \text{sen}(\text{lat}1) \times \cos(\text{lat}2) \times \cos(\Delta\lambda) \tag{06}$$

$$\theta = \arctg(y/x) \tag{07}$$

$$b=(\theta \times 180 / \pi + 360) \bmod 360 \quad (08)$$

$$X=X_A-[g \times \sin(\varphi_P)] \quad (13)$$

Onde R é o raio da Terra, e as latitudes e longitudes devem ser convertidas para radianos antes do início dos cálculos. Em seguida é realizado o Filtro Kalman sobre o giroscópio, acelerômetro e bússola digital. Como o MPU6050 já possui uma solução integrada para o cálculo, pode-se calcular a orientação da embarcação diretamente com as medidas filtradas nas equações 11, 12 (GONZÁLEZ; ALEJANDRA, 2017; CARUSO, 2002).

$$\varphi_P = \arctg[(-X_A) / \sqrt{Y_A^2 + Z_A^2}] \quad (09)$$

$$\theta_R = \arctg[(Y_A) / \sqrt{X_A^2 + Z_A^2}] \quad (10)$$

$$X = X_B \times \cos(\varphi_P) + Y_B \times \sin(\theta_R) \times \sin(\varphi_P) - Z_B \times \cos(\theta_R) \times \sin(\varphi_P) \quad (11)$$

$$Y = Y_B \times \cos(\varphi_P) + Z_B \times \sin(\theta_R) \quad (12)$$

Onde X_A , Y_A e Z_A são as estimativas filtradas do acelerômetro por cada eixo, X_B , e Y_B são as medidas de 2 dos eixos da bússola digital, X , e Y são as estimativas da bússola digital em uma superfície planar, φ_P é o ângulo de giro no eixo lateral, e θ_R é o ângulo de giro no eixo longitudinal.

Assim, a sua orientação pode ser calculada utilizando a equação 07 com os valores calculados nas equações 11 e 12, e compensada pela declinação magnética anteriormente computada. E no momento em que a busca de coordenadas falhar, o INS substituirá, temporariamente, os cálculos do trajeto (*Dead Reckoning*). O método para a aproximação dos valores sem a presença das coordenadas é implementado por meio do trajeto seguindo a loxodromia para manter uma orientação constante, sem necessidade de ajustes da bússola digital (MOVABLE TYPE LTD, [s.d.]).

Desse modo o deslocamento e velocidade são provenientes da integração das medidas do acelerômetro pelo tempo, onde os valores estimados de aceleração devem considerar a aceleração da gravidade como nas equações 13 e 14 (GONZÁLEZ; ALEJANDRA, 2017).

$$Y = Y_A - [g \times \sin(\theta_R)] \quad (14)$$

Mas esse método acumula erros rapidamente e durante períodos muito longos sem o retorno do sinal GNSS deve desativar o piloto automático, avisando o piloto com bipes.

2.7 Protótipo

De início, o protótipo serve para averiguar o funcionamento e calibração do receptor GNSS e da bússola digital, em uma superfície plana, onde não está sujeita ao giro nos eixos lateral e longitudinal.

Nas etapas seguintes, deverá ser levado a diferentes corpos hídricos para otimizar os ajustes do Filtro Kalman e observar a influência de movimentos nos eixos da embarcação.

E por fim, os testes envolvendo a interface em conjunto do funcionamento do piloto automático e do piloto da embarcação são as últimas etapas para a finalização do protótipo.

III. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Um sistema de navegação automático permite um avanço significativo à acessibilidade em provas de longa duração, portanto é imprescindível um minucioso levantamento da dinâmica física da embarcação e do ambiente a fim de não afetar negativamente o desempenho enquanto realiza as provas.

Há limitações no modelo utilizado para distância e direção, no qual existem erros na ordem de metros, então trajetos de curta distância não são indicados atualmente.

E apesar da atual solução INS ter alto grau de incerteza, existem soluções comerciais e militares que conseguem alcançar a faixa de 1° de desvio em 1 hora de navegação, porém requerem arranjos de sensores de alta precisão. Futuros projetos podem buscar soluções que utilizem vários sensores de baixo custo para prover os dados para o INS.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina pelo apoio financeiro para o desenvolvimento do projeto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALKAN, R. M. et al. Kinematic precise point positioning using GPS and GLONASS measurements in marine environments. **Measurement: journal of the International Measurement Confederation**, v. 109, p. 36–43, 2017.
- ARDUPILOT. **ArduPilot**. 2023. Disponível em: <<https://ardupilot.org/>>. Acesso em: 16 jun. 2023.
- ATMEL. **8-bit AVR Microcontroller with 32K Bytes In-System Programmable Flash**. San Jose, CA, USA, 2015. Disponível em: <https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmega328P_Datasheet.pdf>. Acesso em: 10 jun. 2023.
- BAR-SHALOM, Y.; LI, X. R.; KIRUBARAJAN, T. **Estimation with applications to tracking and navigation: theory algorithms and software**. Nashville, TN, USA: John Wiley & Sons, 2001.
- BURDEN, T. **Selecting an Autopilot**. Disponível em: <<https://www.westmarine.com/west-advisor/Selecting-an-Autopilot.html>>. Acesso em: 10 jun. 2023.
- CARUSO, M. J. **Applications of magnetic sensors for low cost compass systems**. IEEE 2000. Position Location and Navigation Symposium (Cat. No.00CH37062). **Anais...IEEE**, 2002.
- FLIGHTMANIA. **Peças e Acessórios para Drones**. Disponível em: <<https://www.flightmania.com.br/modulo-gps-neo-m8n-gps-para-apm-2-8-flight-controller>>. Acesso em: 10 jun. 2023.
- GARMIN. **Pilotos automáticos marítimos**. Disponível em: <<https://www.garmin.com/pt-BR/c/marine/boat-autopilots/>>. Acesso em: 15 jun. 2023.
- GONZÁLEZ, V.; ALEJANDRA, C. **Design and implementation of an inertial navigation system using Kalman filter**. 2017.
- GREWAL, M. S.; ANDREWS, A. P.; BARTONE, C. G. **Global navigation satellite systems, inertial navigation, and integration**. 4. ed. [s.l.] Standards Information Network, 2020.
- GREWAL, M. S.; ANDREWS, A. P. **Kalman filtering: theory and practice with MATLAB**. 4. ed. Nashville, TN, USA: John Wiley & Sons, 2014.
- HONEYWELL INTERNATIONAL INC. **3-Axis Digital Compass IC HMC5883L**. Plymouth, MN, USA: Honeywell. Disponível em: <https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/HMC5883L_3-Axis_Digital_Compass_IC.pdf>. Acesso em: 10 jun. 2023.
- INVENSENSE INC. **MPU-6000 and MPU-6050 Product Specification Revision 3.4**. Sunnyvale, CA, USA, 2013. Disponível em: <<https://invensense.tdk.com/wp-content/uploads/2015/02/MPU-6000-Datasheet1.pdf>>. Acesso em: 10 jun. 2023.
- KRUEGER, Cláudia Pereira. **Investigações sobre aplicações de alta precisão do GPS no âmbito marinho**. 1996. 267 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná, Paraná, 1996. Disponível em: <<https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/44184>>. Acesso em: 9 jun. 2023.
- MOVABLE TYPE LTD. **Calculate distance, bearing and more between Latitude/Longitude points**. Disponível em:

<<https://www.movable-type.co.uk/scripts/latlong.html>>.

Acesso em: 10 jun. 2023.

NATIONAL CENTERS FOR ENVIRONMENTAL INFORMATION. **World Magnetic Model**. 2023.

Disponível em:

<<https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/WMM/>>. Acesso em:

16 jun. 2023.

PARENTE, Cesar Dias. **Desenvolvimento de um sistema eletrônico para controle de direção do protótipo náutico, utilizando um atuador eletromecânico**. 2019. 84 f. TCC (Graduação) - Curso de Eletrônica Industrial, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, Florianópolis, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ifsc.edu.br/handle/123456789/430>. Acesso em: 10 jun. 2023.

RODRIGUES, G. A. **Electric Steering for Solar Boat**.

2023. Disponível em:

<<https://github.com/ZeniteSolar/MDE22>>. Acesso em: 10

jun. 2023.

SEEBER, G. **Satellite geodesy: foundations, methods, and applications**. 2. ed. Berlim, Germany: De Gruyter, p. 213, 2003.

SHILLEH, M. M. **How the MPU 6050 works**. Disponível em: <<https://www.shillehtek.com/blog/how-the-mpu-6050-works-high-level-mems-overview>>. Acesso em: 16 jun. 2023.

SVB GMBH. **Tillerpilots**. 2023. Disponível em:

<<https://www.svb24.com/en/category/tillerpilots>>. Acesso

em: 15 jun. 2023.

UBLOX. **NEO-M8: u-blox M8 concurrent GNSS modules**. [s.l.] 2022. Disponível em: <https://content.u-blox.com/sites/default/files/NEO-M8-FW3_DataSheet_UBX-15031086.pdf>. Acesso em: 10 jun. 2023.

UBLOX. **u-blox 8 / u-blox M8 Receiver description**. [s.l].

2023. Disponível em: <[https://content.u-blox.com/sites/default/files/products/documents/u-blox8-](https://content.u-blox.com/sites/default/files/products/documents/u-blox8-M8_ReceiverDescrProtSpec_UBX-13003221.pdf)

[M8_ReceiverDescrProtSpec_UBX-13003221.pdf](https://content.u-blox.com/sites/default/files/products/documents/u-blox8-M8_ReceiverDescrProtSpec_UBX-13003221.pdf)>. Acesso

em: 10 jun. 2023.

UENO, M. et al. **Evaluation of RTK-OTF positioning system for free running manoeuvrability test of a model ship**. Oceans '97. MTS/IEEE Conference Proceedings. **Anais...IEEE**, 2002.