



# ESCOLA NAVAL

*ta sante e bi e faire*



**José Diogo Furtado Raimundo Vieira Duque**

**Desenho de Filtros de Kalman aplicados a  
sistemas de navegação de baixo custo**

**Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em  
Ciências Militares Navais, na especialidade de Marinha**



**Alfeite**

**2018**





# ESCOLA NAVAL

ta sante de bi faire



**José Diogo Furtado Raimundo Vieira Duque**

*Desenho de Filtros de Kalman aplicados a sistemas de  
navegação de baixo custo*

**Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Ciências  
Militares Navais, na especialidade Marinha**

**Orientação de:** Capitão-de-fragata Vítor Fernando Plácido da Conceição

**Co-orientação de:** Professora Doutora Maria Filomena Teodoro

O Aluno Mestrando

---

José Diogo Vieira Duque

Orientador

---

Vítor Fernando Plácido Da Conceição

**Alfeite**

**2018**

*Desenho de Filtros de Kalman aplicados a sistemas de navegação de baixo custo*

**Epígrafe**

*“Far better is it to dare mighty things, to win glorious triumphs, even though checkered by failure... than to rank with those poor spirits who neither enjoy nor suffer much, because they live in a grey twilight that knows not victory nor defeat”*

Theodore Roosevelt

*Desenho de Filtros de Kalman aplicados a sistemas de navegação de baixo custo*

## **Dedicatória**

Dedico este trabalho a quatro dos meus exemplos de vida que muito me ajudaram a ser quem sou e que, quis Deus, que não me acompanhassem até ao fim do curso, o meu avô José, o meu avô Francisco, o meu primo Luís e o meu tio Francisco.



## **AGRADECIMENTOS**

Em primeiro lugar quero agradecer profundamente aos meus pais, aos meus irmãos e à Rita, que sempre me apoiaram ao longo desta longa e difícil caminhada.

Agradeço também a todos os meus amigos que dentro e fora da Escola Naval me acompanharam em momentos de diversão e que me apoiaram quando eu mais precisei deles.

Agradeço de forma muito especial às duas pessoas que tornaram isto possível. Foram elas que me ajudaram, que me puseram problemas, que me chamaram à razão, que discutiram comigo ideias e sugestões e que, acima de tudo, nunca me deixaram desistir, o meu orientador Capitão-de-fragata Plácido da Conceição, e a minha coorientadora Senhora Professora Filomena Teodoro. Sr. Comandante e Sra. Professora o meu muitíssimo obrigado!

Quero agradecer de forma muito especial, a todas as pessoas que me apoiaram na realização deste trabalho, ao Professor Doutor Vítor Lobo, ao Professor Bruno Damas, à 1TEN M Ana Nunes e à sua equipa da Brigada Hidrográfica.

Quero também agradecer meu curso, CMG Henrique Quirino da Fonseca, que me acompanhou ao longo destes últimos cinco anos.

Não posso deixar de agradecer à guarnição do NRP *Almirante Gago Coutinho*, especialmente aos Oficiais com quem tive o privilégio de aprender e de dividir a câmara.

Por fim, agradeço de forma muito especial a uma das pessoas que me acompanhou quase sempre nos últimos seis anos, Filipe, muito obrigado



## **RESUMO E PALAVRAS-CHAVE**

O desenvolvimento da tecnologia tem sido uma constante nos tempos modernos. Os sistemas de navegação e posicionamento não foram exceção à regra. Com o surgimento dos MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) tornou-se possível reduzir o tamanho e o custo destes sistemas. A integração de sistemas inerciais MEMS e GPS (INS/GPS) tem permitido criar soluções de posicionamento e navegação *low-cost*. Esta tecnologia tornou-se tão acessível que, se há alguns anos atrás, apenas faziam parte de sistemas de ponta, hoje em dia estão presentes, por exemplo, em quase todos os smartphones existentes. Este trabalho pretende utilizar um Filtro de Kalman (FK) capaz de fundir dados provenientes de um sensor inercial MEMS para criar uma solução de medição de atitude *low-cost*, de modo a que possa ser aplicada em embarcações à vela de pequenas dimensões. Devido às suas dimensões e custos, torna-se pouco viável instalar sistemas de navegação convencionais em embarcações de pequenas dimensões como tal, este trabalho pretende dar uma resposta a este problema. Conclui-se que os valores da aceleração registados pelo acelerómetro nos eixos XX e YY tinham bastante ruído, mas o FK conseguiu suavizar estes valores e ainda estimar os valores da velocidade e deslocamento ao longo deste eixo. Conclui-se ainda, que a MPU 6050, por não possuir magnetómetro, não é a escolha mais indicada para integrar um sistema de medição de atitude.

**Palavras Chave:** Filtro de Kalman, Navegação Inercial, MPU, Arduino, Vela Ligeira, Medição de Atitude.



## *Desenho de Filtros de Kalman aplicados a sistemas de navegação de baixo custo*

### **ABSTRACT**

The development of technology has been a constant in modern times. Navigation and positioning systems were no exception to the rule. With the emergence of MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) it has become possible to reduce the size and cost of these systems. The integration of MEMS and GPS (INS / GPS) inertial systems has allowed the creation of low-cost navigation and positioning solutions. This technology has become so accessible that, if a few years ago, they were only part of high end systems, nowadays they are present, for example, in almost all existing smartphones. This work intends to use a Kalman Filter (FK) capable of fusing data from a MEMS inertial sensor to create a low-cost attitude measurement solution, so that it can be applied to small sailboats. Due to its dimensions and costs, it is not feasible to install conventional navigation systems in small boats as such, this work intends to give an answer to this problem. It is concluded that the acceleration values recorded by the accelerometer in the XX and YY axes had a lot of noise, but the FK managed to smooth these values and still estimate the velocity and displacement values along this axis. It is also concluded that the MPU 6050, because it does not have a magnetometer, is not the best choice to integrate an attitude measurement system.

**Key Words:** Kalman Filter, Inertial Navigation, MPU, Arduino, Small Sailboats, Attitude Reference System.



*Desenho de Filtros de Kalman aplicados a sistemas de navegação de  
baixo custo*

## ÍNDICE

AGRADECIMENTOS .....	III
RESUMO E PALAVRAS-CHAVE.....	V
ABSTRACT.....	VII
ÍNDICE .....	IX
ÍNDICE DE ILUSTRAÇÕES .....	XI
LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÓNIMOS.....	XIII
INTRODUÇÃO .....	1
1 Metodologia .....	3
1.1 Metodologia.....	37
2 . Estado da Arte .....	3
2.1 Sistemas de Navegação Inercial.....	4
2.2 Sensores.....	5
2.2.1 Acelerómetro .....	5
2.2.2 Giroscópio .....	10
2.2.3 Magnetómetro.....	16
2.2.4 Micro Electro-Mechanical System (MEMS) .....	18
2.2.5 Global Positioning System (GPS).....	21
2.3 Filtro de Kalman.....	24
2.3.1 Introdução.....	24
2.3.2 Implementação do Algoritmo .....	25
2.3.3 Algoritmo .....	28

## ***Desenho de Filtros de Kalman aplicados a sistemas de navegação de baixo custo***

2.3.4	Aplicações do Filtro de Kalman .....	30
2.4	Embarcações à Vela .....	32
3.	Análise de Sensores .....	41
3.1	IMU .....	42
3.2	GPS .....	43
3.3	Controlo .....	44
4.	Implementação do Sistema .....	49
4.1	Algoritmo do Acelerómetro .....	51
4.2	Algoritmo de Giroscópio .....	55
4.3	Sistema.....	56
4.4	Testes e recolha de dados .....	58
5.	Análise de Resultados .....	63
5.1	Tratamento de dados.....	64
5.2	Resultados.....	65
	Conclusões .....	75
	LISTA DE REFERÊNCIAS .....	79
	Anexo A – Código <i>Arduino</i> .....	A
	Anexo B – Código <i>MatLab</i> .....	D