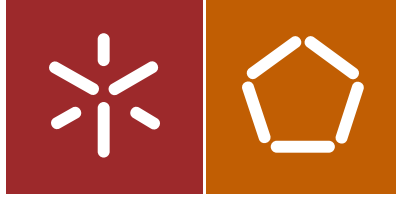




Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Andreia Raquel Sampaio Faria

Solução para sensores de posição angular
imunes a campos magnéticos externos



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Andreia Raquel Sampaio Faria

Solução para sensores de posição angular
imunes a campos magnéticos externos

Dissertação de Mestrado
Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao Grau de
Mestre em Engenharia Eletrónica Industrial e Computadores

Trabalho efectuado sob a orientação do
Professor Doutor Luís Alexandre Rocha

e coorientação do
Professor Doutor Jorge Cabral

É AUTORIZADA A REPRODUÇÃO INTEGRAL DESTA DISSERTAÇÃO APENAS PARA EFEITOS DE INVESTIGAÇÃO, MEDIANTE AUTORIZAÇÃO ESCRITA DO INTERESSADO, QUE A TAL SE COMPROMETE.

Universidade do Minho, ____/____/____

Everything should be made as simple as possible, but not simpler
— Albert Einstein[1]

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar queria agradecer aos meus pais, Orlando Faria e Balbina Sampaio, e ao meu irmão, Rafael Faria por todo o apoio e carinho que me deram ao longo da minha vida académica, em especial nestes últimos cinco anos. Nem sempre foi fácil, mas vocês sempre estiveram lá, obrigado.

Ao meu orientador, o professor doutor Luís Alexandre Rocha, e co-orientador, o professor doutor Jorge Cabral pelo apoio incansável e pela confiança em mim depositada durante a realização deste trabalho. Queria também agradecer à empresa Bosch Car Multimedia, pela oportunidade de estudar uma problemática, inserida na linha III do projeto em co-promoção nº 36265/2013 (HMIExcel - 2013 – 2015), tão promissora e importante para a sociedade. Este trabalho foi financiado pelo Sistema de Incentivos Portugal para Investigação e Desenvolvimento Tecnológico.

Aos meus colegas de laboratório, que me acolheram e ajudaram nas diversas dificuldades com que me deparei ao longo do desenvolvimento desta dissertação. Um obrigado especial ao Vasco Lima, Filipe Loureiro, Daniel Dias e Eurico Moreira que, apesar de muitas vezes estarem atarefados, sempre se mostraram disponíveis para ajudar e partilhar conhecimentos. Obrigado por todas as críticas construtivas, por todas as sugestões, por todas as correções, sem a vossa contribuição o trabalho seria muito mais árduo.

Aos meus colegas de curso e amigos com quem partilhei o meu percurso académico, em especial ao Emanuel Ribeiro, Diogo Emanuel Lima, Raphael Gonçalves e Fábio Fernandes, com quem trabalhei em vários projetos de grupo ao longo do curso e partilhei momentos de boa disposição. Queria também estender este obrigado especial à Luisa Barros, João Fernandes e Nelson Pinto que, apesar de não ter trabalhado com eles diretamente, sempre me deram o "empurrãozinho" que precisava nas horas mais difíceis.

Por fim, mas não menos importante, ao meu namorado, José Carlos Neiva, pela presença, compreensão, apoio e alegria mesmo nos momentos de maior frustração. Obrigado por sempre me dares a energia que precisei e por sempre me fazeres sentir que sou capaz.

A todos o meu mais sincero obrigado.

RESUMO

Com o aumento da utilização automóvel e da preocupação do impacto ambiental que estes causam, surgiu a necessidade de criar veículos mais ecológicos, encontrando-se neste momento a produção de carros híbridos e elétricos em expansão. Durante o desenvolvimento de carros elétricos, novos problemas surgem, assim como a necessidade de os resolver. Devido ao aumento da quantidade de cabos elétricos neste tipo de automóveis, novos campos magnéticos são gerados, causando novas interferências nos SPA (Sensor Posição Angular) magnéticos. Esta dissertação tem como objetivo estudar e implementar uma solução para um sensor de posição angular magnético, que seja imune a campos magnéticos externos de 3.2mT.

Atualmente, este tipo de sensores não pode ser aplicado diretamente em carros elétricos, devido às dimensões dos campos magnéticos gerados pelos diferentes cabos, que excedem a perturbação mínima suportada por estes. A resolução deste problema tem bastante importância para a indústria automóvel, não só para a aplicação direta destes sensores em carros elétricos, mas também pelo facto de serem magnéticos e de não apresentarem, por isso, desgastes como os mecânicos, sendo uma vantagem notória a sua aplicação em mais partes do veículo.

Nesta dissertação, de forma a resolver este problema, simulam-se e verificam-se várias possíveis soluções, com o recurso a ferramentas como o ANSYS e o Rhinoceros. Foram considerados parâmetros como a permeabilidade magnética e novas arquiteturas, usando princípios diferenciais e campos magnéticos gerados por bobines de Helmholtz.

De momento já existem duas implementações que tornam os SPA magnéticos imunes a campos magnéticos externos. Uma delas incide na blindagem da região de interesse com um material de maior permeabilidade, sendo este responsável por atenuar os campos parasitas; a outra tem como base o princípio diferencial, onde o próprio sensor magnético anula os campos magnéticos externos homogêneos. Ambas as soluções são estudadas, sendo a primeira testada ao nível da simulação magnética, de forma a verificar a viabilidade da aplicação no caso em estudo.

ABSTRACT

Nowadays, the main focus on the population's mind is the environment, and how reduce the impact on it. Because of this and the electronic evolution, the number of sales of electric vehicles is increasing daily. Every day new ideas arise and new problems need to be solved. One of the topics targeted on research is the angular position sensors, based on magnetic effects. These kind of sensors present advantages, being the more profitable, the non mechanical wear, result of non contact between sensor's parts. This characteristic makes them favourites when compared with other types of sensors. They can be applied in different parts of the vehicles, like pedals, to measure the pressure angle, and steering wheels, to measure the direction angle. On fuel vehicles magnetic angular sensors work seamless, but on electric vehicles this doesn't happen, because the number and amplitude of magnetic fields increase substantially, induced by the higher number of electric cables. The electromagnetic interference is, in this case, superior than these type of sensor can handle, so they can't be applied directly, on electric cars.

The resolution of this problem has a huge importance to the automotive industry, since it can increase the range of applications. This sensor would be able to be applied in a larger range of measures, so the costs of the production's vehicle would decrease, because they would have just one sensor doing the job of many.

This dissertation has as main goal the study and development of a solution to the problem described. In order to do that, several simulations must be performed and different possible solution checked, using tools like ANSYS and Rhinoceros, managing parameters like magnetic permeability and methods like Helmholtz coil and differential principle.

ÍNDICE

Agradecimentos	v
Resumo	vii
Abstract	ix
Lista de Figuras	xiii
Lista de Tabelas	xvi
Abreviações	xvii
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Motivação e Enquadramento	1
1.2 Objetivos e Metodologias	3
1.3 Estrutura da Dissertação	4
2 ESTADO DA ARTE	7
2.1 Blindagem Magnética	7
2.2 Sensor com Arquitetura Baseada no Princípio Diferencial	10
2.3 Sensor de Posição Ironless	11
2.4 Aplicações de Bobines de Helmholtz	12
3 FUNDAMENTOS TEÓRICOS	15
3.1 Campo Magnético e Elétrico	15
3.1.1 Lei da Força de Lorentz	16
3.1.2 Campo Magnético da Corrente	16
3.1.3 Campo Magnético num Solenóide	17
3.1.4 Campo Magnético numa Barra Magnética	18
3.1.5 Permeabilidade Magnética	19
3.1.6 Permeabilidade Magnética Relativa	19
3.2 Sensores de Posição Angular Magnéticos	20
3.2.1 Princípios de Funcionamento dos Sensores de Posição Angular Magnéticos	20
3.3 Bobines de Helmholtz	22
3.4 Arquitetura Baseada em Medições Diferenciais de Campo Magnético	24
3.4.1 Princípio de Funcionamento	24
3.4.2 Modelo Analítico para Cálculo do Campo Magnético Gerado	26
3.5 Ponte H	29
3.6 Modulação da Largura de Impulso	30
3.7 PIC 18F2523	31

3.8	Arduino	33
4	FASE DE IMPLEMENTAÇÃO	35
4.1	Blindagem Magnética	35
4.1.1	Modelo do Sensor de Posição Angular	35
4.1.2	Simulação 2D do Sensor de Posição Angular	36
4.1.3	Simulação 3D do Sensor de Posição Angular	40
4.2	Arquitetura Diferencial	42
4.2.1	Diagrama de Blocos	43
4.2.2	Requisitos e Especificações	43
4.2.3	Componentes Mecânicos	44
4.2.4	Componentes de Hardware	45
4.2.5	Componentes de Software	47
5	RESULTADOS OBTIDOS	53
5.1	Blindagem Magnética	53
5.1.1	Simulação 2D do Sensor de Posição Angular	53
5.1.2	Simulação 3D do Sensor de Posição Angular	57
5.2	Arquitetura Diferencial	60
5.2.1	Linearidade	60
5.2.2	Ruído vs Largura de Banda	62
5.2.3	Resolução	67
5.2.4	Influência dos Campos Magnéticos Externos	70
6	CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO	73
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	77

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Veículos elétricos vendidos nos Estados Unidos.	1
Figura 2	Previsão do crescimento das vendas de veículos híbridos e elétricos até 2020.	2
Figura 3	Aplicações de sensores de posição angular em automóveis	2
Figura 4	Concentração superior das linhas de campo em materiais magnéticos.	8
Figura 5	Exemplo de caixa magnética utilizada como blindagem magnética.	9
Figura 6	<i>Layout</i> da blindagem usada na MRAM.	9
Figura 7	Princípio diferencial patenteado pela AMS.	10
Figura 8	Princípio de funcionamento de um LVDT.	11
Figura 9	Estrutura do sensor de posição sem ferro.	12
Figura 10	Teste experimental para determinar o campo magnético da Terra.	13
Figura 11	Fontes de campo magnético.	15
Figura 12	Direção da força elétrica e magnética.	16
Figura 13	Campo magnético da corrente.	17
Figura 14	Campo magnético num solenóide.	17
Figura 15	Relação do campo magnético de um íman com a agulha de uma bússola.	18
Figura 16	Princípio de funcionamento do efeito de Hall.	21
Figura 17	Direção das linhas do campo magnético gerado pelas bobinas de Helmholtz. B- campo magnético (T); I – corrente (A).	22
Figura 18	Plano médio entre as duas bobinas, que incluiu os pontos de campo de interesse.	23
Figura 19	Campo magnético no plano médio em função de d. A: muito perto ($d = 0.8a$); B: coincidente ($d = a$); C: muito longe ($d = 1.2a$).	24
Figura 20	Arquitetura do sensor angular de posição.	25
Figura 21	Ciclos de medição do campo magnético.	25
Figura 22	Cálculo do campo magnético fora do eixo de simetria do circuito de corrente.	27

Figura 23	Bobines de Helmholtz.	28
Figura 24	Campo magnético como função de z/R	29
Figura 25	Diagrama de Ponte H	30
Figura 26	Sinal de PWM para 25% de duty-cycle.	30
Figura 27	Kit de desenvolvimento e programação.	32
Figura 28	PIC18F2523.	33
Figura 29	Arduino Uno	34
Figura 30	Modelo 3D simplificado do sensor de posição angular. . .	35
Figura 31	Modelo 2D simplificado do sensor de posição angular. . .	36
Figura 32	Materiais do sensor de posição angular.	36
Figura 33	Visualização das áreas do sensor de posição angular com base no seu material.	37
Figura 34	A- Íman Hard Ferrite; B- Íman NdFeB.	38
Figura 35	Malha obtida no modelo 2D do sensor de posição angular simplificado.	38
Figura 36	Visualização do modelo do sensor com íman de perturbação externo com base nos materiais.	39
Figura 37	Fluxo magnético que atinge o sensor na presença de um íman externo.	39
Figura 38	Modelo 3D do sensor de posição angular no ANSYS. . . .	40
Figura 39	Modelo do sensor angular 3D simplificado no ANSYS. . .	41
Figura 40	Malha do modelo 3D do sensor angular simplificado no ANSYS.	41
Figura 41	Magnetização do íman NdFeB.	42
Figura 42	Diagrama de blocos do sensor diferencial.	43
Figura 43	Desenho mecânico do sensor angular de posição.	44
Figura 44	MLX91205 <i>Low magnetic field</i>	45
Figura 45	PCB final do microcontrolador.	46
Figura 46	Geometria das bobines.	47
Figura 47	Fluxograma com a implementação do <i>firmware</i>	48
Figura 48	Fluxograma da aquisição de dados.	49
Figura 49	Fluxograma do tratamento de dados.	50
Figura 50	Visualização do modelo do sensor com íman de perturbação externo e encapsulamento, com base nos materiais. . .	53
Figura 51	Fluxo magnético que atinge o sensor com o íman NdFeB. .	54
Figura 52	Fluxo magnético que atinge o sensor com o íman Hard Ferrite.	54

Figura 53	Solução da simulação do sensor angular com íman Nd-FeB, perturbação externa e encapsulamento com permeabilidade 100.	57
Figura 54	Solução magnética 3D do sensor de posição angular com íman NdFeB.	58
Figura 55	Fluxo magnético no sensor magnético, sem blindagem e sem perturbação magnética.	58
Figura 56	Fluxo magnético no sensor magnético, sem blindagem e com perturbação magnética.	59
Figura 57	Sensor angular diferencial e sistema de leitura.	60
Figura 58	Plataforma de testes.	61
Figura 59	Linearidade do sensor angular diferencial.	61
Figura 60	Ruído do sensor angular diferencial com 8 amostras por eixo sem filtro aplicado.	62
Figura 61	Ruído do sensor angular diferencial com 16 amostras por eixo sem filtro aplicado.	63
Figura 62	Ruído do sensor angular diferencial com 32 amostras por eixo sem filtro aplicado.	64
Figura 63	Ruído do sensor angular diferencial com 64 amostras por eixo sem filtro aplicado.	64
Figura 64	Ruído do sensor angular diferencial com 8 amostras por eixo com filtro aplicado.	65
Figura 65	Ruído do sensor angular diferencial com 16 amostras por eixo com filtro aplicado.	66
Figura 66	Ruído do sensor angular diferencial com 32 amostras por eixo com filtro aplicado.	66
Figura 67	Ruído do sensor angular diferencial com 64 amostras por eixo com filtro aplicado.	67
Figura 68	Sinal de saída do sensor MLX91205LB.	68
Figura 69	Resolução do sensor angular diferencial e resolução do sistema de leitura.	69
Figura 70	Campo imposto pelo íman no seu espaço envolvente. . . .	70
Figura 71	Interferência magnética no sensor angular diferencial. . . .	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Permeabilidade magnética para vários tipos de materiais. .	19
Tabela 2	Permeabilidades magnéticas relativas atribuídas aos materiais do sensor de posição angular.	37
Tabela 3	Simulações do modelo do sensor com íman de perturbação.	55
Tabela 4	Simulações do modelo do sensor com íman de perturbação e aplicação de blindagem.	56
Tabela 5	Simulações do modelo do sensor com cabo elétrico 400A e com/sem aplicação de blindagem.	60
Tabela 6	Resultados das simulações sobre o sensor angular diferencial.	75

ABREVIACOES

AC	Alternate Current
ACC	Adaptive Cruise Control
ADC	Analog to Digital Converter
AGC	Automatic Gain Control
AMR	Anisotropic MagnetoResistance
ARM	Advanced RISC Machine
AVR	Advanced Virtual RISC
CCP	Capture Compare PWM
CORDIC	COordinate Rotation DIgital Computer
CRT	Cathode Ray Tube
DC	Direct Current
DEI	Departamento de Eletronica Industrial
DIP	Dual In-Line Package
ECCP	Enhanced CCP
EV	Electrical Vehicles
EMI	ElectroMagnetic Interference
ESP	Electronic Stability Program
GMR	Geometrical MagnetoResistance
IDE	Integrated Development Environment
I ² C	Inter-Integrated Circuit
LVDT	Linear Variable Differential Transformer
MRI	Magnetic Resonance Imaging

NdFeB Neodymium Ferro Boro

OEM Original Equipment Manufacturer

PCB Printed Circuit Board

PIC Peripheral Interface Controller

PLC Programmable Logic Controller

PWM Pulse Width Modulation

RISC Reduced Instruction Set Computer

SI Sistema Internacional de unidades

SPA Sensor Posição Angular

SPI Serial Peripheral Interface

USART Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter

USB Universal Serial Bus

INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO E ENQUADRAMENTO

Nos dias de hoje a venda de veículos elétricos encontra-se em ascensão. Com base no estudo realizado pela Energy Policy Information Center, o número de EVs (*Electrical Vehicles*) vendidos desde 2010 já ultrapassou a marca de meio milhão [3].

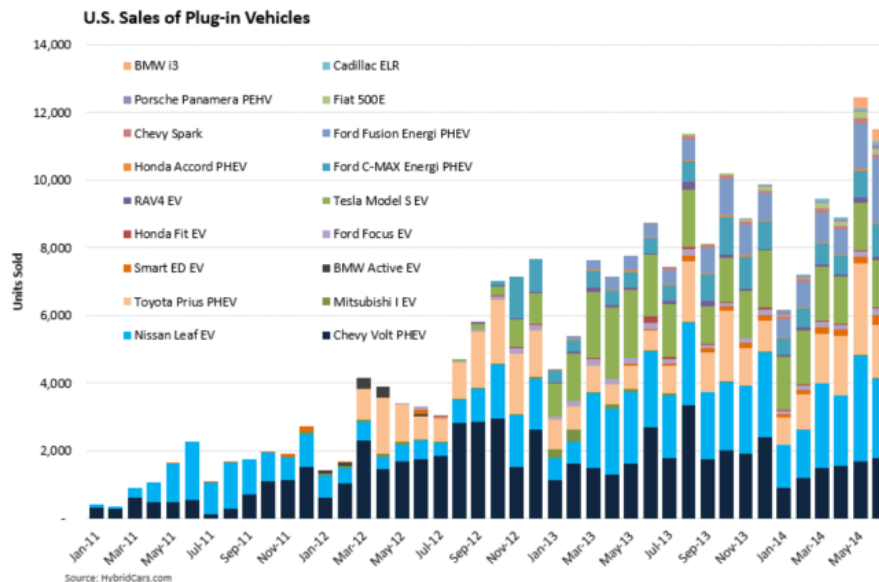


Figura 1: Veículos elétricos vendidos nos Estados Unidos [3].

De acordo com a empresa PwC Autofacts prevê-se que a venda de veículos híbridos e elétricos possa atingir 6,3% do mercado em 2020, muito acima dos cerca de 1,7% registados em 2011 [4].

Com o aumento da produção de carros híbridos e elétricos, novos problemas surgem, assim como a necessidade de os resolver. Devido ao aumento da quantidade de cabos elétricos neste tipo de automóveis, novos campos magnéticos são gerados, causando novas interferências nos SPA (Sensor Posição Angular) magnéticos utilizados.

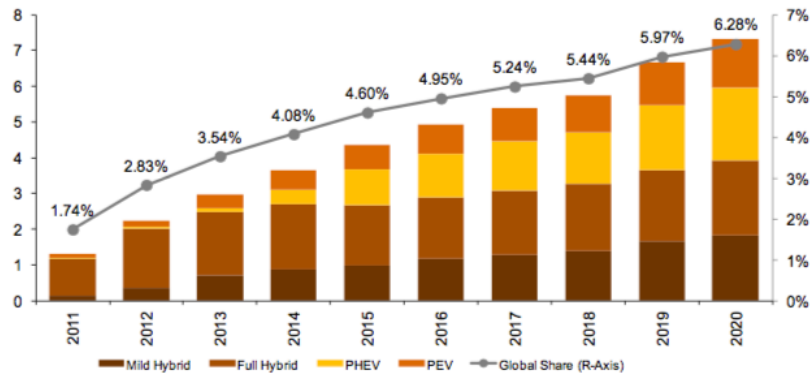


Figura 2: Previsão do crescimento das vendas de veículos híbridos e elétricos até 2020 [4].

Atualmente estes sensores não podem ser aplicados diretamente em carros elétricos, devido às dimensões dos campos magnéticos gerados pelos diferentes cabos, que excedem a perturbação mínima suportada pelos sensores. A resolução deste problema tem bastante importância para a indústria automóvel, não só para a aplicação direta destes sensores em carros elétricos, mas também pelo facto de utilizarem um mecanismo de transdução magnético. Assim, estes não apresentam desgastes como os mecânicos, sendo uma vantagem notória a sua aplicação em mais partes do veículo.

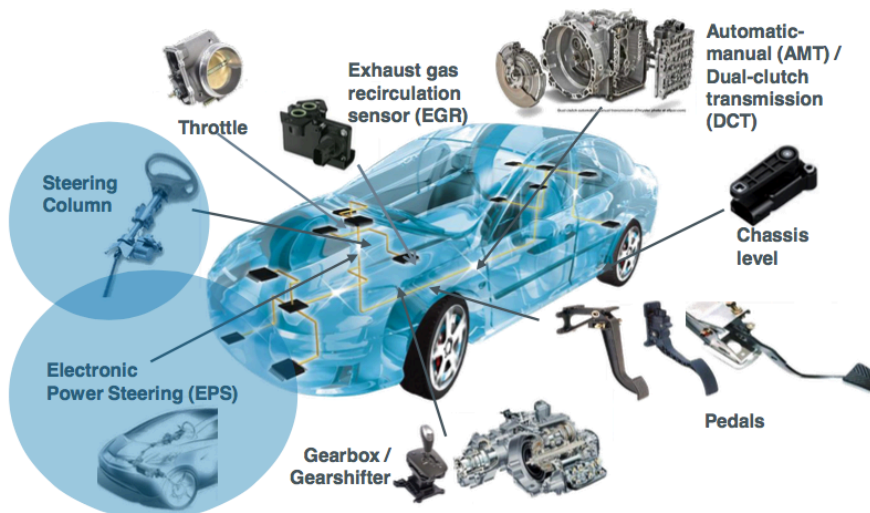


Figura 3: Aplicações de sensores de posição angular em automóveis[5].

Confirmando a importância do tema para a indústria, no âmbito de um protocolo de cooperação assinado em 2012 entre a Universidade do Minho e a Bosch Car Multimedia Portugal, foi aprovado um projeto de Investigação e

Desenvolvimento Tecnológico (ID&T) conjunto, intitulado “HMIExcel - I&D crítica em torno do ciclo de desenvolvimento e produção de soluções multimídia avançadas para automóvel”. Este projeto encontra-se dividido em várias linhas de investigação, estando o caso de estudo desta dissertação integrado numa delas, nomeadamente na linha III. Considerado de interesse estratégico nacional, o acordo prevê um investimento de 19 milhões de euros até 2015, incluindo 14 novos projetos em diferentes áreas e o registo de pelo menos 10 patentes [6].

1.2 OBJETIVOS E METODOLOGIAS

Esta dissertação tem como principal objetivo o desenvolvimento de uma solução para um sensor de posição angular magnético, para que este seja imune a campos magnéticos externos até 3.2mT. De forma a estudar esta imunidade magnética, estudaram-se e testaram-se várias abordagens, uma baseada em blindagem magnética e a outra numa nova arquitetura, para a solução do problema em estudo.

A blindagem magnética é uma das metodologias já desenvolvida para combater as perturbações dos campos magnéticos parasitas, sendo um dos objetivos a simulação desta abordagem aplicada num sensor angular já existente no mercado e não imune a campos magnéticos externos por natureza. Para que seja possível realizar as simulações magnéticas será necessário recorrer a programas de simulação magnética e de modelagem 2D e 3D, utilizando-se respetivamente o ANSYS e o Rhinoceros.

Uma vez que esta dissertação se encontra integrada numa das linhas de investigação do projeto HMIExcel, uma nova arquitetura diferencial foi desenvolvida por parte da equipa integrante. Esta tem como base a arquitetura das bobines de Helmholtz, sendo por isso outro dos objetivos desta dissertação o estudo de ambas as arquiteturas. De forma a potencializar a futura comercialização do sensor diferencial, este deve cumprir os seguintes requisitos: uma resolução de 0.1° , uma gama dinâmica mínima de 0° a 90° , uma saída em PWM, uma tensão de alimentação de 5V e uma imunidade mínima, a campos magnéticos externos, de 3.2mT.

Por sua vez, a implementação do software necessário para o SPA desenvolvido, com base na abordagem diferencial, e a realização dos testes físicos necessários para comprovar a imunidade do sistema e a caracterização do sensor

são também tarefas a desenvolver no decorrer da dissertação. Para o desenvolvimento do software utilizar-se-á como ambiente de desenvolvimento o CCS C Compiler e como programador e *debugger* o PICkit 2. De forma a auxiliar na interpretação dos resultados e na caracterização do sensor serão usadas as funcionalidades do MATLAB.

Durante as várias simulações e testes ter-se-ão em atenção parâmetros como a permeabilidade magnética, princípios como o diferencial e tecnologias como a das bobines de Helmholtz.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está dividida em cinco capítulos, encontrando-se cada parte subdividida em várias secções. Cada capítulo corresponde a uma fase específica do desenvolvimento da dissertação, facilitando desta forma a leitura e compreensão de todos os procedimentos e decisões adotadas em cada uma das metodologias.

O primeiro capítulo é de carácter introdutório. Este encontra-se subdividido em duas secções, abordando estas a motivação e enquadramento, os objetivos e metodologias do estudo em causa.

O segundo capítulo integra o estado da arte relativo a métodos de compensação magnética já existentes e implementados, dentro e fora da área de sensorização angular.

Por sua vez, após o conhecimento do tipo de estruturas utilizado nesta problemática, segue-se a apresentação, no terceiro capítulo, dos fundamentos teóricos envolvidos. Neste capítulo encontram-se detalhados, na Secção 3.1, os conceitos teóricos relativos aos campos magnético e elétrico, desde como os gerar até como calcular a sua magnitude e direcção; na Secção 3.2 o funcionamento dos sensores de posição angular magnéticos; na Secção 3.3 a técnica das bobines de Helmholtz e na Secção 3.4 toda a teoria associada à nova arquitetura diferencial desenvolvida. As restantes secções associadas (Secções 3.5, 3.6, 3.7 e 3.8) documentam algumas técnicas adotadas durante a fase de implementação e as plataformas de desenvolvimento utilizadas.

Depois de todos os conceitos clarificados, segue-se o quarto capítulo que visa a documentação da fase de implementação. Este encontra-se dividido em duas grandes secções, fruto da concentração da dissertação em duas abordagens. Desta forma, a Secção 4.1, "Blindagem Magnética", explica todos os procedimentos adotados para a criação dos modelos de simulação 2D e 3D, e dos respetivos casos de simulação, nomeadamente com e sem perturbação magnética e blindagem. Por sua vez, a Secção 4.2 faz referência à implementação da arquitetura diferencial desenvolvida, contendo o diagrama de blocos da sua estrutura, os respetivos requisitos e especificações, e a explicação das escolhas tomadas nas várias componentes envolvidas (mecânica, *hardware*, e *software*).

O quinto capítulo é dedicado aos resultados obtidos durante o processo de desenvolvimento desta dissertação. Estes encontram-se, como na fase de implementação, concentrados em duas secções (Secções 5.1 e 5.2). Em cada secção são apresentados e comentados os respetivos resultados obtidos, tanto através de simulações como por meios experimentais, demonstrando assim o comportamento dos sistemas.

Por último, o sexto capítulo apresenta as conclusões obtidas a partir dos resultados provenientes dos testes e simulações de ambas as metodologias, sendo também apresentadas recomendações para trabalho futuro, de forma a melhorar os resultados obtidos.

ESTADO DA ARTE

Uma vez que o propósito da dissertação é apresentar uma solução para sensores de posição angular imunes a campos magnéticos até 3.2mT, é necessário estudar as soluções que já se encontram aplicadas e as suas limitações, de forma a desenvolver uma solução mais eficiente.

De momento já existem algumas implementações que tornam sistemas imunes a campos magnéticos externos. Uma delas incide na blindagem da região de interesse com um material de maior permeabilidade, sendo este responsável por atenuar os campos parasitas; outra tem como base um princípio diferencial, onde o próprio sensor magnético anula os campos magnéticos externos homogêneos.

Atualmente encontra-se também desenvolvido um sistema de deteção inovador para medição de posição linear. A novidade do conceito encontra-se na imunidade intrínseca do sensor proposto para DC, para uma variação lenta dos campos magnéticos externos. Por sua vez, a imunidade obtém-se através da não utilização de materiais magnéticos na construção do sensor. Este sistema baseia-se no acoplamento indutivo variável entre as diferentes bobines, como nos LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*) [7].

No entanto, tecnologias como a das bobines de Helmholtz, conhecidas por criar campos magnéticos muito uniformes, também são usadas em aparelhos científicos para cancelar campos magnéticos externos [8].

2.1 BLINDAGEM MAGNÉTICA

O método de blindagem magnética tem como base a utilização de materiais que protejam os dispositivos eletrónicos de interferências causadas por campos magnéticos ou eletromagnéticos parasitas¹.

¹ Não há nenhum material conhecido que seja capaz de bloquear um campo magnético, sem que seja atraído para o campo propriamente dito.

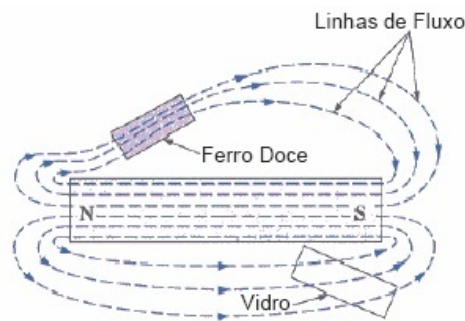


Figura 4: Concentração superior das linhas de campo em materiais magnéticos [10].

Pelo facto de os campos magnéticos só poderem ser redirecionados, os escudos magnéticos servem apenas para bloquear ou absorver a interferência eletromagnética (EMI), e não para remover ou destruir essas ondas [9].

Desta forma, os campos magnéticos externos podem ser eficazmente atenuados envolvendo-se a região de interesse com um material de alta permeabilidade. Os materiais de alta permeabilidade são materiais ferromagnéticos que respondem de forma a cancelar campos magnéticos externos, ajustando a sua magnetização interna. Ou seja, estes materiais oferecem um caminho de baixa relutância² que tanto pode orientar o campo magnético para fora do dispositivo eletrónico, como o redirecionar em redor deste.

No entanto, esta metodologia pode ter várias abordagens. No caso, por exemplo, dos filtros magnéticos, estes são fabricados a partir de materiais magnéticos, tendo como função bloquear os sinais de EMI que passam pelas linhas de alta tensão isoladas. Ao bloquear a EMI, os filtros reduzem o campo eletromagnético entre os vários dispositivos elétricos que funcionam fora da fonte de alimentação.

Outro exemplo são as caixas magnéticas, geralmente feitas de alumínio, aço inoxidável, cobre ou ligas de níquel. Este é um dos tipos mais comuns de escudos magnéticos, pois para além de protegerem o sistema (através do seu encapsulamento), redirecionam os sinais de EMI parasitas.

Contudo a blindagem magnética também é aplicada ao nível dos próprios componentes eletrónicos, exemplo disso são os dispositivos MRAM que já pos-

² Relutância corresponde ao quociente da força magnetomotriz de um circuito magnético pelo fluxo de indução que atravessa.

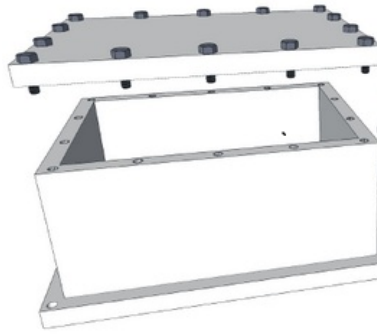


Figura 5: Exemplo de caixa magnética utilizada como blindagem magnética [10].

suem uma camada, denominada mu-metal, que atenua eficazmente campos externos por um fator de 10. Em ambientes magnéticos extremos, camadas adicionais de blindagem podem ser utilizadas para proporcionar um isolamento substancialmente superior [11].

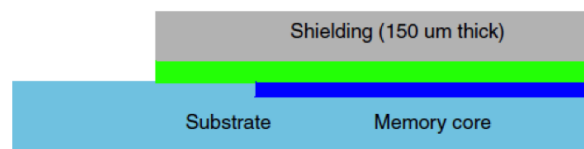


Figura 6: Layout da blindagem usada na MRAM [11].

No entanto, a aplicação desta metodologia abrange inúmeras áreas para além da eletrónica. É exemplo disso a indústria médica, que muitas vezes, utiliza as blindagens magnéticas para os seus equipamentos de ressonância magnética (MRI). Também o é a indústria do entretenimento, que usa os escudos para os tubos de raios catódicos (CRT) usados na geração de imagem da televisão. Outra indústria é claramente a aeroespacial, usando esta os escudos magnéticos para peças de aeronaves destinadas às viagens espaciais e para a proteção contra a radiação cósmica [12].

Torna-se então evidente, que garantir a imunidade magnética a campos externos é crucial para diversas áreas, pois ao não existir um escudo magnético, inúmeros dispositivos teriam que ser concebidos de forma diferente. Isto acarretaria diversas consequências, como a redução drástica da sua eficiência ou até mesmo a total incapacidade de funcionamento, devido às diferentes interferências produzidas, quer a partir de outros dispositivos eletrónicos, quer do próprio campo magnético da Terra.

2.2 SENSOR COM ARQUITETURA BASEADA NO PRINCÍPIO DIFERENCIAL

O princípio diferencial, patenteado pela empresa AMS, consiste num grupo de sensores de efeito de Hall organizado numa matriz circular *on-chip* ($\sim 2\text{mm } \varnothing$).

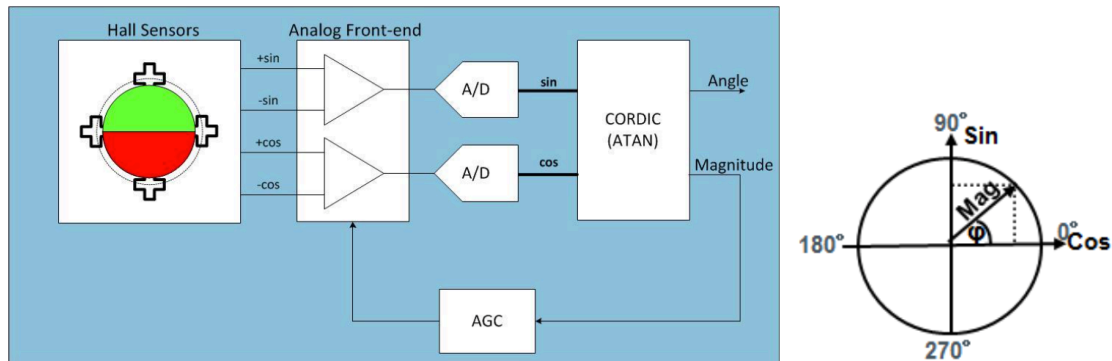


Figura 7: Princípio diferencial patenteado pela AMS [5].

Tal como evidenciado na Figura 7 os sensores de Hall opostos encontram-se combinados por amplificação diferencial. Desta forma, os sinais de seno e cosseno, provenientes da saída dos amplificadores diferenciais, são digitalizados por dois ADCs paralelos. De seguida, segue-se a filtragem digital, que tem como funcionalidade reduzir o ruído. Por fim, é aplicado o algoritmo do CORDIC (COordinate Rotation DIgital Computer), de forma a converter os sinais de seno e cosseno em ângulo e magnitude. No entanto, os dados da magnitude são utilizados num sistema de circuito fechado para compensar a temperatura, a força do íman e as variações ambientais, sendo estas compensações efetuadas através do AGC (*Automatic Gain Control*).

Este princípio proporciona imunidade ao campo de dispersão contra os campos magnéticos externos parasitas homogéneos. No entanto, outras fontes de perturbação elétrica podem suscitar problemas, tal como impulsos de alta tensão ou micro interrupções de fornecimento de energia.

Todos os sensores magnéticos AMS de posição podem ficar expostos a um campo de dispersão magnético externo acima dos limites exigidos pelos mais rigorosos OEMs. As medições efetuadas pela empresa mostram que a 1000A/m , que corresponde ao limite de stress máximo, os AMS não apresentam qualquer desvio de tensão para uma gama de saída de 360° [5].

2.3 SENSOR DE POSIÇÃO IRONLESS

Num sensor LVDT, a utilização de um núcleo ferromagnético é essencial para fazer com que o fluxo magnético, em conjunto com as bobines secundárias (e também as suas tensões), seja em função da posição. No entanto, a utilização de materiais ferromagnéticos não lineares torna o sensor sensível a campos magnéticos externos, sendo desta forma as leituras do sensor afetadas na presença de campos parasitas.

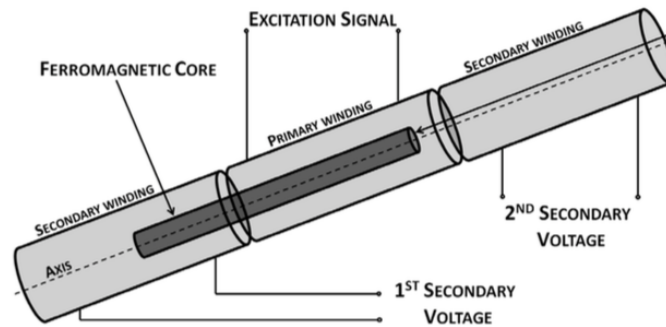


Figura 8: Princípio de funcionamento de um LVDT (a estrutura é normalmente alojada num invólucro cilíndrico de aço ferromagnético) [7].

Consequentemente, um fluxo magnético que varie de acordo com a posição e, ao mesmo tempo, apresente sempre uma relação linear entre o campo magnético e a densidade de fluxo magnético, leva a uma imunidade intrínseca a campos externos.

Um sensor que segue a arquitetura anteriormente idealizada é o ilustrado na Figura 9. Trata-se de uma estrutura de 5 enrolamentos constituída por bobines coaxiais cilíndricas com núcleo de ar. As duas bobines de abastecimento, de igual indutância, são alimentadas por um sinal sinusoidal, gerando dois fluxos magnéticos de igual amplitude e frequência, porém desfasados 180° . Em particular, quando a bobine móvel está no centro, a corrente induzida resultante é zero, devido à soma das correntes induzidas pelos dois fluxos magnéticos. Comparando esta estrutura com a de uma ponte Wheatstone, esta corresponde à condição de equilíbrio.

À medida que a bobine móvel se afasta do centro, o equilíbrio é quebrado e a corrente resultante induzida nesta bobine não é nula, uma vez que agora a indutância de uma das bobines de abastecimento é mais elevada do que a da outra. A corrente induzida não nula faz com que haja um fluxo oposto, que se

acrescenta (com o seu sinal) ao fluxo secundário. A posição da bobine móvel pode ser extraída como nos LVDT.

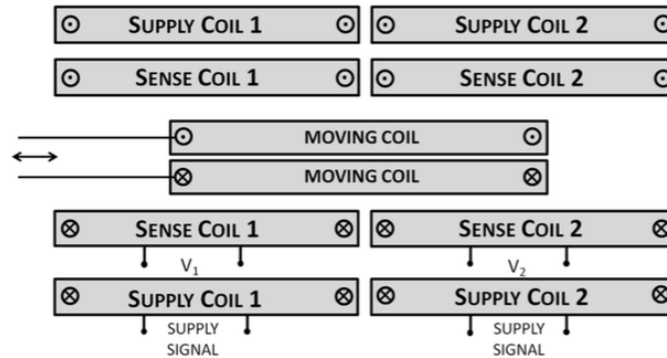


Figura 9: Estrutura do sensor de posição sem ferro (secção longitudinal) [7].

Comparando esta estrutura com a dos sensores LVDT habituais, é evidente que nos LVDT o núcleo aumenta o acoplamento entre os enrolamentos primário e secundário, enquanto que neste caso, a bobine que se desloca atua como um distúrbio controlado no acoplamento indutivo entre o abastecimento e o sentido das bobinas. O objetivo é o mesmo, ou seja, produzir um fluxo magnético variável. Como a Figura 9 sugere, as propriedades de um sensor de contacto, como a robustez, a resolução infinita e a possibilidade de ter tolerância à radiação, que são vantagens típicas das estruturas LVDT, estão intrinsecamente satisfeitas no sensor proposto sem ferro. Além disso, algoritmos de condicionamento adequados e outras otimizações de projeto trazem muito boa precisão e linearidade.

2.4 APLICAÇÕES DE BOBINES DE HELMHOLTZ

Bobines de Helmholtz são utilizadas numa grande variedade de aplicações e a sua principal vantagem reside no facto destas criarem campos magnéticos muito uniformes, no volume entre o seu centro [13]. A geração de campo Helmholtz pode ser estático ou variável no tempo, dependendo da aplicação em causa [8]. O utilizador ao poder determinar a uniformidade do campo em relação ao volume em torno do ponto central do conjunto das bobines, e determinar assim as características da bobine, consegue reunir as condições necessárias, por exemplo, para calibrar uma sonda ou um sensor específico [14]. Estas podem também ser utilizadas para medir a força e os campos de ímanes permanentes [15].



Figura 10: Teste experimental para determinar o campo magnético da Terra [16].

Outra aplicação desta tecnologia é no cancelamento tanto de campos magnéticos externos em aparelhos científicos, como do próprio campo magnético da Terra (Figura 10). Para implementar este último é produzida uma região com uma intensidade de campo magnético muito próxima de zero. Isto pode ser usado para ver como as cargas elétricas e os campos magnéticos operam quando não se encontram sujeitos à força gravitacional da Terra ou de outros corpos celestes [8].

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Uma base sólida de Fundamentos Teóricos é indispensável numa elaboração consciente de qualquer trabalho. Neste capítulo encontram-se documentados todos os conceitos chave que estão na base da investigação realizada.

3.1 CAMPO MAGNÉTICO E ELÉTRICO

O campo magnético é um efeito que pode ser causado por materiais magnéticos ou por correntes elétricas. Estas por sua vez, tanto podem ser correntes macroscópicas em fios, como correntes microscópicas relacionadas com eletrões em órbitas atómicas. Este tipo de campo, B , é definido, em termos de força, em mover carga com base na lei da força de Lorentz, fazendo esta interação com que haja muitas aplicações práticas. As fontes de campo magnético, encontradas na natureza, são essencialmente bipolares, contendo desta forma dois polos magnéticos, um norte e um sul.

A unidade SI (Sistema Internacional de unidades) do campo magnético é o Tesla, que pode ser visto a partir da parte magnética da lei de Lorentz, $F_{\text{magnética}} = q \times v \times B$, sendo esta composta por (Newton segundo)/(coulomb metros). Uma unidade de campo magnético menor é o Gauss, correspondendo $1 \text{ Tesla} = 10000 \text{ Gauss}$ [17].

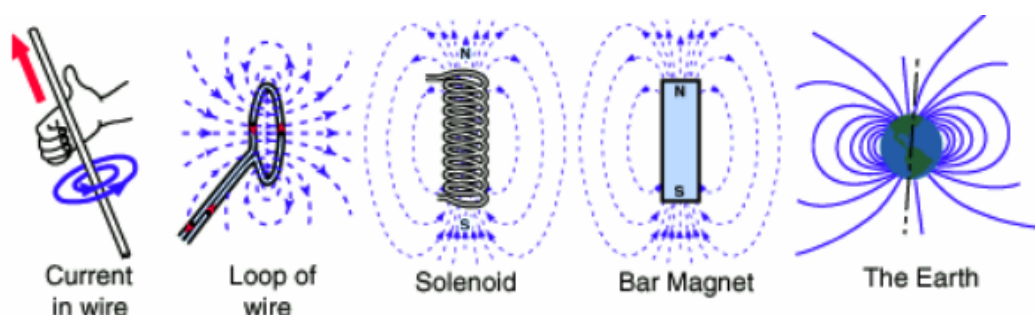


Figura 11: Fontes de campo magnético [17].

A quantidade magnética B (campo magnético) pode também ser denominada por densidade de fluxo magnético. Uma designação mais antiga para a unidade Tesla é Webers por metro quadrado, sendo o Weber a unidade de fluxo magnético.

3.1.1 Lei da Força de Lorentz

Uma carga elétrica com velocidade na presença de um campo elétrico e campo magnético originam uma força (força de Lorentz):

$$\vec{F} = q\vec{E} + q\vec{v} \times \vec{B} \tag{1}$$

A força elétrica é simples de se obter, tendo esta a direção do campo elétrico, se a carga q for positiva. No entanto a direção da força causada pelo campo magnético é dada pela regra da mão direita. Segundo esta, coloca-se os dedos indicador, anelar, médio e mindinho simultaneamente no eixo da velocidade v. Varrendo-se estes dedos, em direção ao campo magnético B, tendo o polegar perpendicular ao plano formado pelos vetores v e B, este vai indicar a direção de F [18].

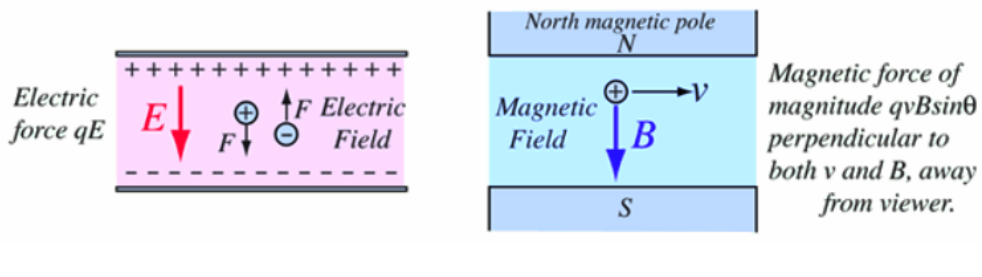


Figura 12: Direção da força elétrica e magnética [17].

3.1.2 Campo Magnético da Corrente

As linhas do campo magnético em torno de um fio que transporta uma corrente elétrica, formam círculos concêntricos em torno deste. A direção do campo magnético é perpendicular ao fio e está na direção dos dedos da mão direita, caso os envolva em redor do fio com o polegar na direção da corrente [18].

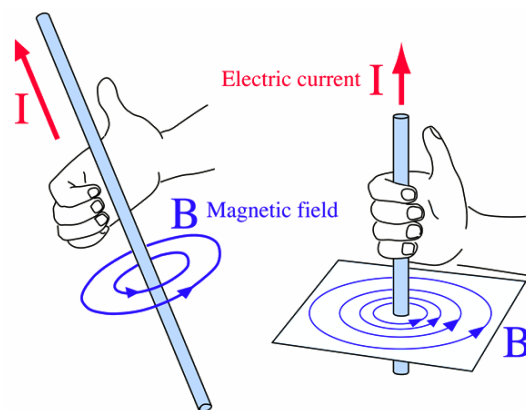


Figura 13: Campo magnético da corrente [17].

3.1.3 Campo Magnético num Solenóide

Uma bobine de fio, longa e reta, pode ser utilizada para gerar um campo magnético uniforme quase semelhante ao de uma barra magnética. Este tipo de bobines, chamadas de solenóides, têm um enorme número de aplicações práticas.

O campo pode ser grandemente fortalecido através da adição de um núcleo de ferro. Estes núcleos são típicos em eletroímans.

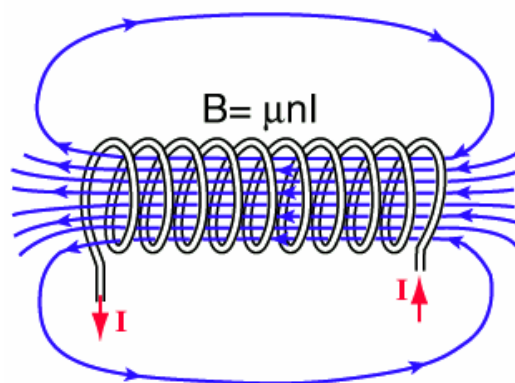


Figura 14: Campo magnético num solenóide [17].

Como se pode visualizar na Figura 14, o campo magnético interior encontra-se de tal forma concentrado no centro do solenóide que se aproxima de um campo quase uniforme. Esta aproximação é maior, à medida que o comprimento do solenóide aumenta. No entanto, o campo exterior é fraco e divergente.

Na equação apresentada na Figura 14 para o campo magnético B , n representa o número de voltas por unidade de comprimento, também denominado por "voltas de densidade". A equação é uma idealização para um solenóide de comprimento infinito, no entanto proporciona uma boa aproximação para o campo de um solenóide longo [17].

3.1.4 Campo Magnético numa Barra Magnética

As linhas do campo magnético de uma barra magnética (ímã) formam linhas fechadas. Por convenção, a direção do campo é considerada do polo norte para o polo sul do ímã. Os ímãs permanentes podem ser feitos de materiais ferromagnéticos.

As linhas do campo magnético de um ímã de barra podem ser traçadas com o uso de uma bússola. A agulha de uma bússola é por si só um ímã permanente, sendo o indicador do norte da bússola um polo norte magnético. O polo norte de um ímã irá tender a se alinhar com o campo magnético, desta forma a agulha da bússola irá girar até se alinhar com o campo magnético. Assim o indicador do norte da bússola fica a apontar para o polo sul do ímã [17].

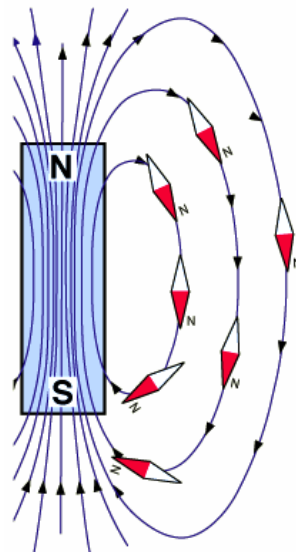


Figura 15: Relação do campo magnético de um ímã com a agulha de uma bússola [17].

3.1.5 Permeabilidade Magnética

A permeabilidade magnética mede o campo magnético no interior de um material - devido ao campo magnetizante \vec{H} preexistente na região onde o material é colocado e à magnetização por este induzida no material - em relação ao próprio campo magnetizante \vec{H} em questão. Por outras palavras, a permeabilidade magnética, cujo símbolo é μ , é uma constante de proporcionalidade que depende do material e da sua preparação, relacionando a indução magnética deste num determinado ponto, em função do campo magnético existente.

Ao se colocar o material no local considerado, no interior deste verificar-se-á a presença de um campo magnético \vec{B} cujo valor deve-se tanto ao campo magnetizante como à magnetização induzida no material.

A permeabilidade magnética absoluta é calculada pela razão entre a densidade de fluxo magnético, B , numa substância, e a intensidade do campo magnético exterior, H , sendo dada pela seguinte expressão matemática:

$$\mu = \frac{B}{H} \quad (2)$$

onde: B é o valor do campo magnético \vec{B} realmente presente no interior do material (também conhecido como indução magnética ou densidade de fluxo magnético) e o H é o módulo do campo magnetizante \vec{H} [19, 20].

Tabela 1: Permeabilidade magnética para vários tipos de materiais.

Materiais	Permeabilidade Magnética
Paramagnéticos	>1
Dimagnéticos	<1
Ferromagnéticos	$\gg 1$
Vazio	1 (magnetismo)

3.1.6 Permeabilidade Magnética Relativa

A permeabilidade magnética relativa, cujo símbolo é π_r , consiste na relação que resulta entre a permeabilidade magnética no meio considerado e a permeabilidade no vazio, sendo calculada pela seguinte equação matemática:

$$\pi_r = \frac{\pi}{\pi_0} \quad (3)$$

onde π_0 é a permeabilidade no vazio.

Esta grandeza é adimensional, isto é, não tem unidades. A permeabilidade do vazio é a designação atribuída à constante de proporcionalidade, também designada por constante magnética, introduzida no chamado teorema de circulação e cujo valor é de $4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$ (henry/metro) [19, 20].

3.2 SENSORES DE POSIÇÃO ANGULAR MAGNÉTICOS

Um número crescente de veículos está equipado com sistemas que necessitam de informações de direção angular. Além da ESP, *Electronic Stability Program*, existe a direção ativa, a direção assistida eletro-hidráulica, a iluminação frontal avançada e o Adaptive Cruise Control (ACC), que requerem o uso de um ângulo de direção e/ou o sinal de velocidade da direção angular.

Um sensor de posição angular acoplado, por exemplo, no volante, proporciona o ângulo de direção do veículo através da medição da posição angular do volante, sendo a partir desta que a intenção do condutor é calculada.

Este tipo de aplicações/sistemas são implementados, tipicamente, utilizando sensores Magnéticos (efeito de Hall ou magnetorresistências), codificadores óticos angulares ou até mesmo potenciômetros [21].

3.2.1 Princípios de Funcionamento dos Sensores de Posição Angular Magnéticos

Os sensores de campo magnético podem ser usados para medir a velocidade de rotação e posicionamento linear ou angular, não sendo necessário contacto físico para efetuar essas medições.

Neste tipo de sensores verifica-se uma variação da sua tensão de saída em função da variação do campo magnético a que estão sujeitos. Deste modo, permitem detetar a direção, rotação, presença e movimento do componente do sistema em questão. De forma a ser possível interpretar a variação da tensão em dados úteis para utilização, são necessários circuitos elétricos que detetem,

amplifiquem e convertam os sinais relevantes.

Na Figura 16 está ilustrado o princípio de funcionamento do efeito de Hall. Quando se aplica uma tensão a uma placa condutora (ou semicondutora), representada a azul, esta conduz uma corrente elétrica (que no exemplo se desloca de cima para baixo). Sujeitando a placa condutora a um campo magnético B , perpendicular ao fluxo da corrente, uma tensão V_H aparece e esse é o efeito de Hall. Se a direção de B for invertida, a polaridade de V_H também o será.

Portanto, o sistema pode ser definido como a combinação do circuito magnético, que se vai deslocar com o volante, com o sensor de efeito de Hall. Este último vai ser responsável por ler os eixos xx e yy do campo magnético e calcular o ângulo. Por sua vez, o ângulo poderá ser convertido num sinal PWM (Pulse Width Modulation) ou analógico¹.

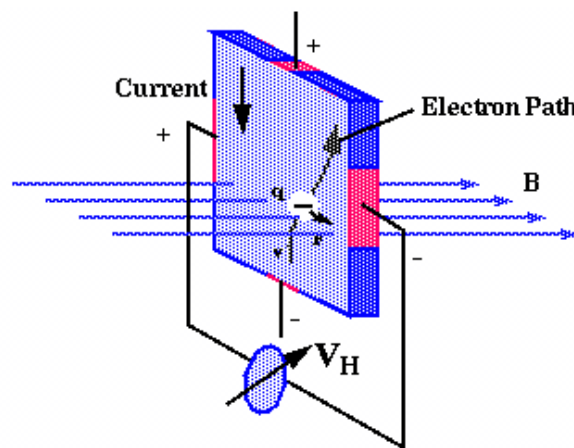


Figura 16: Princípio de funcionamento do efeito de Hall [22].

Num circuito magnético a tensão V_H vai variar com o $\sin(\alpha)$, onde α é o ângulo entre o fluxo magnético, sob o qual o sensor está exposto, e a corrente elétrica aplicada ao elemento (semi)condutor. Em aplicações reais, normalmente dois sensores são colocados no mesmo plano, porém orientados perpendicularmente (para medir os eixos xx e yy do campo magnético), de modo a que um deles forneça uma tensão definida pelo $\sin(\alpha)$ e o outro pelo $\cos(\alpha)$. De forma simples, a posição angular α do sensor em relação ao fluxo magnético é então definida como:

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{\sin(\alpha)}{\cos(\alpha)} \right) \quad (4)$$

¹ O *duty-cycle* do PWM altera-se com o movimento angular do volante.

No caso dos sensores magnetorresistivos, se estes estiverem fixos e sob influência de um campo magnético B permanente (como no caso dos ímanes normalmente utilizados nestas aplicações), o ângulo entre o sensor e as linhas do campo B vão determinar o valor da resistência elétrica do material magnetorresistivo utilizado em cada instante (ou posição). A variação da resistência vai ser então utilizada para indicar o deslocamento angular entre estes dois componentes.

Os sensores magnetorresistivos encontram-se divididos em dois grupos:

- **GMR (Giant magnetoresistance)**

A resistência elétrica apresenta uma variação significativa no caso em que a magnetização adjacente às camadas ferromagnéticas está alinhada em paralelo ou antiparalelo.

- **AMR (Anisotropic magnetoresistance)**

A resistência elétrica do material depende do ângulo entre as direções da corrente elétrica e da magnetização.

3.3 BOBINES DE HELMHOLTZ

As bobines de Helmholtz são uma técnica de laboratório útil para obter um campo magnético relativamente uniforme.

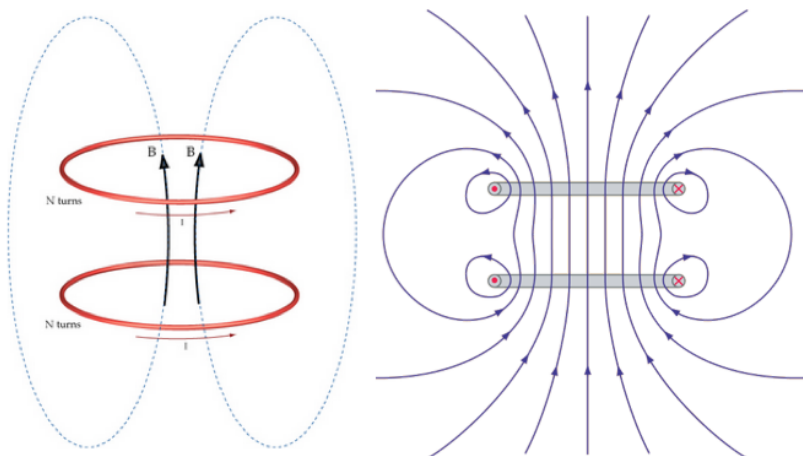


Figura 17: Direção das linhas do campo magnético gerado pelas bobines de Helmholtz. B - campo magnético (T); I – corrente (A) [24].

Estas consistem num par de bobines de condução circular, sobre um eixo comum, tendo cada uma N voltas, transportando cada volta uma corrente I . As

bobines encontram-se a uma distância equivalente ao raio das espiras circulares, produzindo um campo magnético B homogêneo no plano médio entre as duas bobines circulares [23].

A força do campo magnético é medida num ponto no espaço (também conhecido por ponto de campo). No caso das bobines de Helmholtz, os pontos do campo de interesse estão localizados no plano médio entre as duas bobines. Esta força é dependente de três grandezas: a corrente I , o número de voltas em cada bobine de N e o raio a de uma bobine.

$$B = \frac{32\pi NI}{5\sqrt{5}a} \times 10^{-7} \quad (5)$$

Onde:

- > a = raio das bobines = distância entre as bobines;
- > B = campo magnético no plano médio.

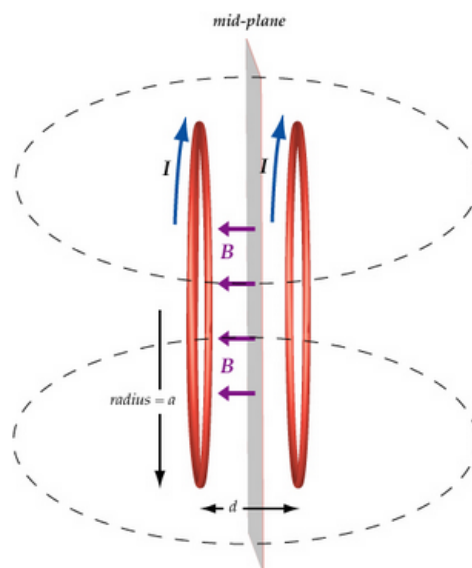


Figura 18: Plano médio entre as duas bobines, que inclui os pontos de campo de interesse [24].

O que torna as bobines de Helmholtz populares é o facto do campo magnético gerado ser muito uniforme. Para determinar a uniformidade do campo magnético é necessário para além da equação 5, incluir o cálculo de integrais complexos. No entanto, com base no integral da equação 6, pode-se aproximar a variação do campo magnético de acordo com o plano médio.

$$B_2(r) = NI \times 10^{-7} \int_0^2 \frac{2a(a - r\cos(\theta))}{(a^2 + b^2 + r^2 - 2a\cos(\theta))^{3/2}} d\theta \quad (6)$$

Onde:

- > fator de 2 no numerador indica que se tem em conta as duas bobines;
- > r é a distância a partir do eixo de simetria passando entre os centros das duas bobines;
- > b = d/2 é a distância de cada bobine para o plano médio².

Na Figura 19, pode-se ver quão uniforme é o campo magnético no plano médio, quando a distância entre as bobines, d, é muito pequena, coincidente com o raio a, e muito grande. Os cálculos efetuados foram sobre bobines com um raio de 20cm (ou seja, a = 0.20m).

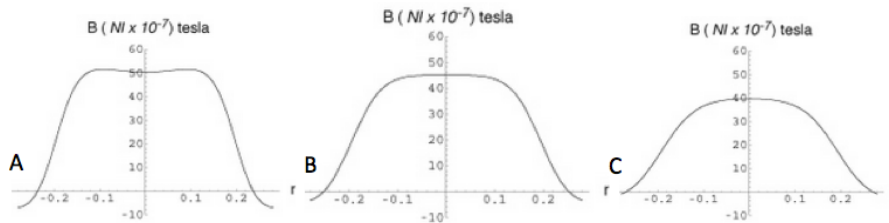


Figura 19: Campo magnético no plano médio em função de d. A: muito perto ($d = 0.8a$); B: coincidente ($d = a$); C: muito longe ($d = 1.2a$) [24].

3.4 ARQUITETURA BASEADA EM MEDIÇÕES DIFERENCIAIS DE CAMPO MAGNÉTICO

3.4.1 Princípio de Funcionamento

No âmbito da linha III do projeto HMIExcel, na qual esta dissertação se enquadra, foi desenvolvida uma arquitetura para um sensor de posição angular, tendo como base o funcionamento magnético. A solução proposta consiste na utilização de duas bobines idênticas, alinhadas ao longo do seu eixo de simetria a uma distância semelhante ao seu raio, nas quais a indução de uma corrente, com o mesmo sentido e magnitude, permite criar um campo magnético uniforme no centro (entre as bobines). A Figura 20 apresenta um esquema de alto nível da solução proposta.

² d é a distância entre as duas bobines.

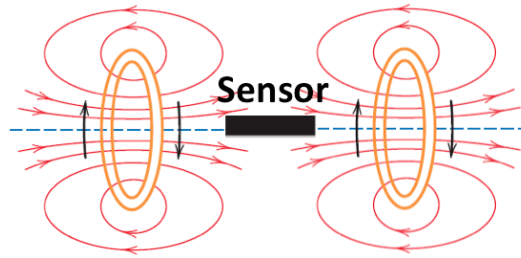


Figura 20: Arquitetura do sensor angular de posição.

Um sensor será colocado no centro das bobinas (alinhado com o eixo de simetria) com dois eixos de medição, xx e yy , cuja direção varia em função da rotação das bobinas ou do próprio sensor. Deste modo, o deslocamento angular para uma gama de medida de 180° ($\pm 90^\circ$) pode ser obtido através da equação:

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{\text{Sinal}_x}{\text{Sinal}_y} \right) \quad (7)$$

Esta arquitetura permite uma abordagem diferencial para a medição do campo magnético, eliminando assim os problemas de compatibilidade eletromagnética, nomeadamente perturbações provenientes de campos magnéticos externos. Para tal, são criados dois campos magnéticos com direções opostas, através da inversão do sentido da corrente induzida nas bobinas, medindo-se cada campo magnético em ciclos distintos, como se demonstra na Figura 21. A subtração dos campos, medidos nos dois ciclos, eliminará as perturbações magnéticas que poderão existir, tal como é demonstrado a seguir.

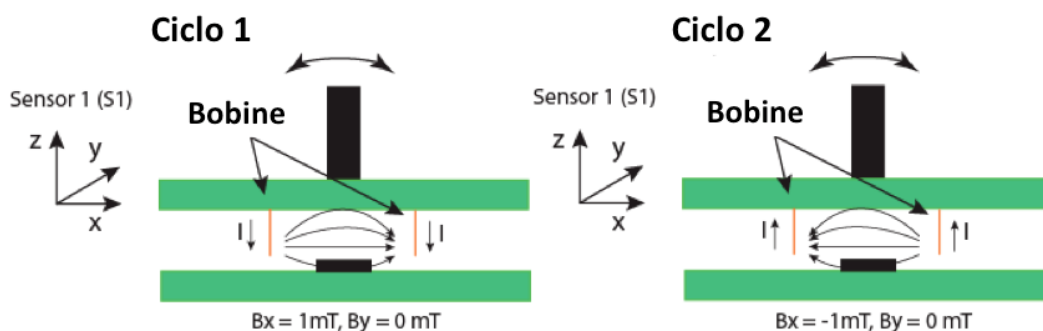


Figura 21: Ciclos de medição do campo magnético.

Considerando em primeiro lugar a inexistência de perturbações, de acordo com o exemplo da Figura 21, obtém-se:

$$1^{\circ} \text{ Ciclo: } S1_{x_I} = 1\text{mT e } S1_{y_I} = 0\text{mT}$$

$$2^{\circ} \text{ Ciclo: } S1_{x_II} = -1\text{mT e } S1_{y_II} = 0\text{mT}$$

Aplicando o princípio diferencial, $\text{signal} = S1_I - S1_II$:

$$\text{signal}_x = 2\text{mT}$$

$$\text{signal}_y = 0\text{mT}$$

Considerando a existência de perturbação, $P_x = 0.1\text{mT}$ e $P_y = 0.1\text{mT}$, obtém-se:

$$1^{\circ} \text{ Ciclo: } S1_{x_I} = 1.1\text{mT e } S1_{y_I} = 0.1\text{mT}$$

$$2^{\circ} \text{ Ciclo: } S1_{x_II} = -0.9\text{mT e } S1_{y_II} = 0.1\text{mT}$$

Aplicando o princípio diferencial, $\text{signal} = S1_I - S1_II$:

$$\text{signal}_x = 2\text{mT}$$

$$\text{signal}_y = 0\text{mT}$$

Como se pode verificar, aplicando o princípio de medição diferencial do campo magnético, signal_x e signal_y , utilizados para o cálculo do ângulo de rotação (equação 7), apresentam o mesmo valor com a presença ou ausência de perturbações. Como tal, a presença de campos magnéticos externos não tem qualquer influência na obtenção do ângulo de rotação do sensor.

Para além da inexistência de problemas de compatibilidade eletromagnética, esta solução apresenta como vantagens o facto de apenas ser necessário um sensor magnético e o campo magnético a gerar ser relativamente pequeno. Por outro lado, o tempo necessário para obter o ângulo de rotação poderá ser crítico para a aplicação em questão, visto que é necessário realizar dois ciclos de medida. A existência de partes móveis com alimentação e o consumo apresentam-se como os maiores desafios para que esta arquitetura seja competitiva.

3.4.2 *Modelo Analítico para Cálculo do Campo Magnético Gerado*

O campo magnético em qualquer ponto em volta das bobinas pode ser determinado somando o campo magnético individual de cada uma das bobinas, através do princípio da sobreposição [25]. Com base na simetria de rotação e na simetria em relação ao plano xy , o conhecimento do campo magnético num

ponto arbitrário P presente no primeiro quadrante do plano yz é suficiente para determinar o campo magnético em qualquer outro ponto [26].

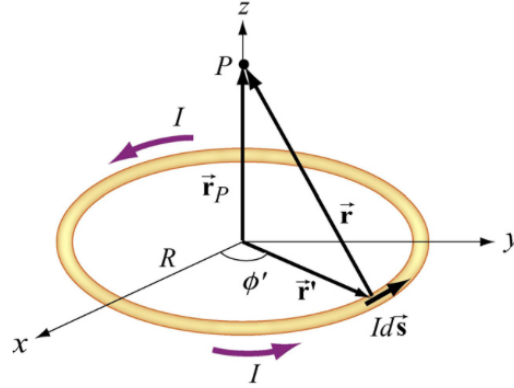


Figura 22: Cálculo do campo magnético fora do eixo de simetria do circuito de corrente [27].

Assim, considerando uma única espira circular com corrente a fluir através dela (Figura 22), de acordo com a lei de Biot-Savart [25] e após algumas manipulações matemáticas, as componentes do campo magnético no plano yz são obtidas pelas equações 8, 9 e 10 [27].

$$B_x(y, z) = \frac{\mu_0 IRz}{4\pi} \int_0^{2\pi} \frac{\cos \phi' d\phi'}{(R^2 + y^2 + z^2 - 2yR \sin \phi')^{\frac{3}{2}}} = 0 \quad (8)$$

$$B_y(y, z) = \frac{\mu_0 IRz}{4\pi} \int_0^{2\pi} \frac{\sin \phi' d\phi'}{(R^2 + y^2 + z^2 - 2yR \sin \phi')^{\frac{3}{2}}} \quad (9)$$

$$B_z(y, z) = \frac{\mu_0 IR}{4\pi} \int_0^{2\pi} \frac{(R - y \sin \phi') d\phi'}{(R^2 + y^2 + z^2 - 2yR \sin \phi')^{\frac{3}{2}}} \quad (10)$$

Uma vez que o campo é simétrico e a sua análise foi efetuada no plano yz, a componente $B_x(y, z)$ tende a ser 0 para qualquer ponto y e z. Por outro lado, o ponto P encontrar-se-á localizado ao longo do eixo z no limite $y = 0$. Nesse caso obtém-se:

$$B_y(0, z) = 0 \quad (11)$$

e,

$$B_z(0, z) = \frac{\mu_0 I R^2}{2(R^2 + z^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (12)$$

Por fim, considerou-se então duas bobines de N espiras e raio R , cada uma perpendicular ao eixo de simetria, com os seus centros localizados em $z = \pm l/2$ e a existência de uma corrente constante a fluir no mesmo sentido em ambas as bobines, como ilustra a Figura 23.

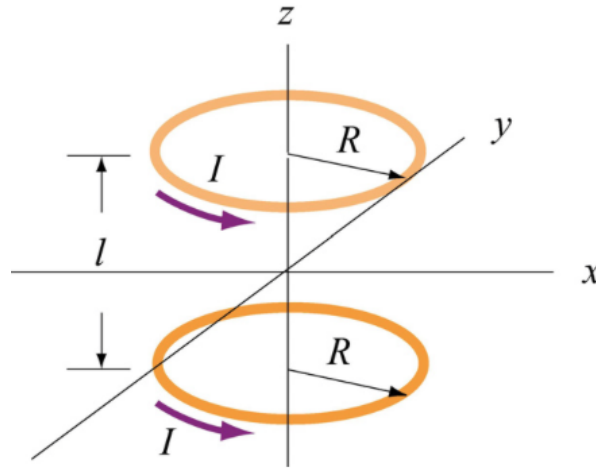


Figura 23: Bobines de Helmholtz [27].

De acordo com a equação 12 e aplicando o princípio da sobreposição, o campo magnético em $P(0, z)$ (ponto localizado no eixo de simetria das bobines, a uma distancia $z - l/2$ de uma bobine e $z + l/2$ de outra), pode ser obtido pela equação 13 [27]:

$$B_z = B_{\text{top}} + B_{\text{Bottom}} = \frac{\mu_0 N I R^2}{2} \left[\frac{1}{\left[\left(z - \frac{l}{2} \right)^2 + R^2 \right]^{\frac{3}{2}}} + \frac{1}{\left[\left(z + \frac{l}{2} \right)^2 + R^2 \right]^{\frac{3}{2}}} \right] \quad (13)$$

O gráfico da Figura 24 apresenta o campo magnético criado pelas bobines ao longo do seu eixo de simetria (z), em função da distância das bobines em relação ao seu raio, sendo B_0 a intensidade do campo no ponto $z = 0$ e $l = R$.

$$B_0 = \frac{\mu_0 N I}{\left(\frac{5}{4} \right)^{\frac{3}{2}} R} \quad (14)$$

Analisando o gráfico é possível verificar que o campo magnético se mantém constante em qualquer ponto presente no eixo z quando as bobines estão colocadas na configuração de “Helmholtz coils”, ou seja, quando $l = R$.

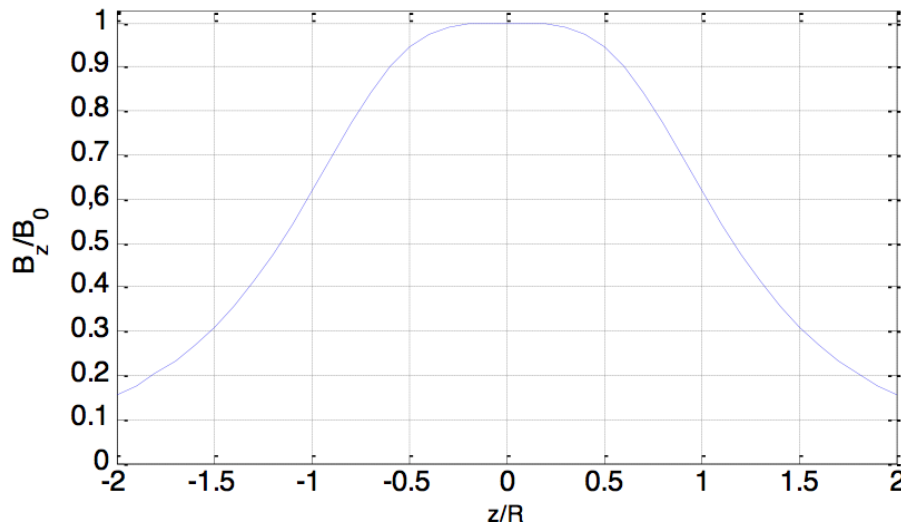


Figura 24: Campo magnético como função de z/R .

3.5 PONTE H

O sentido de um campo magnético, gerado por exemplo através uma bobine, depende do sentido da corrente que a percorre e conseqüentemente da polaridade de tensão aos seus terminais. Logo, para se mudar o sentido do campo apenas se tem que inverter a polaridade da bobine. A melhor forma de o fazer é através da utilização de um circuito ponte H.

Uma ponte H básica é composta por 4 comutadores mecânicos ou eletrônicos posicionados em forma de “H”. Deste modo, cada um está localizado num extremo, encontrando-se a bobine posicionada no meio (Figura 25).

Para alimentar a bobine, basta acionar um par de comutadores diagonalmente opostos, o que faz com que a corrente flua do polo positivo para o negativo, permitindo que atravesse a bobine e conseqüentemente esta crie um campo magnético. Para inverter o campo, é necessário desligar estes contactos e acionar o outro par, de forma a que a corrente siga na direção contrária e se altere assim o sentido do campo magnético gerado.

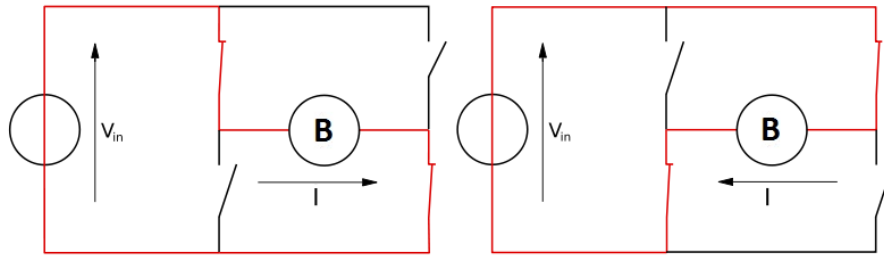


Figura 25: Diagrama de Ponte H

No entanto, a ponte H permite manipular outras variáveis. Para além do controlo do sentido, por exemplo, do campo gerado pela bobine ou de rotação de um motor, este sistema também permite controlar a potência e a velocidade de rotação, para o caso do motor. Pode-se então, a partir do uso de PWM nos contactos, controlar a tensão média aplicada sobre o motor, e assim, controlar a sua velocidade.

De notar que se deve sempre garantir que em nenhum caso os comutadores do mesmo braço fiquem simultaneamente ligados, pois assim a alimentação ficaria em curto-circuito com a massa [28].

3.6 MODULAÇÃO DA LARGURA DE IMPULSO

As leituras efetuadas por um sensor de posição angular são convertidas, regra geral, numa variação do valor médio de tensão. Quanto maior a tensão (dentro de um certo limite nominal inferior à saturação), maior o ângulo lido. Uma forma eficiente de controlar este valor de tensão é através da técnica de PWM.

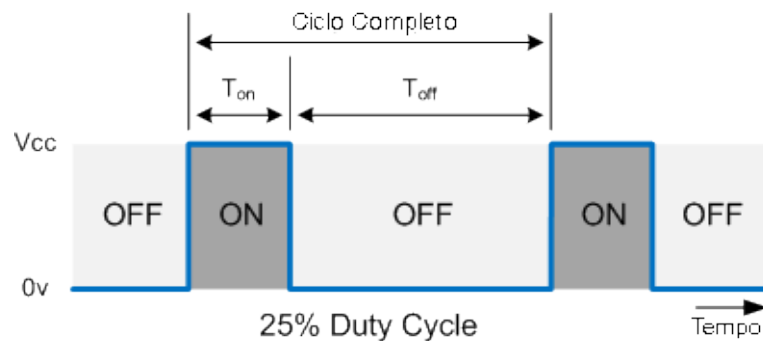


Figura 26: Sinal de PWM para 25% de duty-cycle.

Esta técnica consiste no controlo do valor médio do sinal, através da modulação da largura de impulso, variando a largura do impulso ou *duty-cycle*, mas mantendo o período e a amplitude do sinal constantes.

Em telecomunicações e eletrónica, o termo *duty-cycle* (ciclo de trabalho, em português), é utilizado para descrever a fração de tempo em que um sistema está no estado "ativo". Desta forma, um ciclo de trabalho corresponde à percentagem de um período no qual um componente, dispositivo ou sistema está em operação. Este período equivale ao tempo necessário para que um sinal complete um ciclo "ligado e desligado". O *duty-cycle* pode ser calculado através:

$$D = \frac{T}{P} \times 100\% \quad (15)$$

onde:

- > D: *duty-cycle*;
- > T: tempo que o sinal está ativo;
- > P: período total do sinal.

Pode-se então concluir que um *duty-cycle* de 60% significa que o sinal está ativo 60% do tempo e desligado 40%, deste mesmo tempo. A duração do ciclo ativo pode ser de uma fração de um segundo, um dia, ou até mesmo uma semana, dependendo do tempo do ciclo de trabalho, ou seja, do período do sinal de PWM.

Devido a estas características, a PWM é muito utilizada para o controlo da velocidade de motores, para o controlo da intensidade do brilho de LEDs ou lâmpadas, sendo estas apenas algumas das aplicações desta técnica [29, 30].

3.7 PIC 18F2523

PIC (Peripheral Interface Controller) é uma família de microcontroladores com arquitetura Harvard³ modificada pela Microchip Technology, derivado do PIC1650 originalmente desenvolvido pela General Instrument's Microelectronics Division. Esta família de microcontroladores apresenta inúmeras vantagens frente a outras ofertas do mercado, como:

³ Arquitetura Harvard tem como principal objetivo otimizar a velocidade de funcionamento do microcontrolador, sendo para tal o acesso à memória de dados independente do à memória de programa [31].

- Arquitetura RISC (Reduced Instruction Set Computer), logo tem um pequeno conjunto de instruções para aprender;
- Oscilador interno com velocidade selecionável;
- Kits de desenvolvimentos disponíveis para iniciantes;
- Microcontroladores a preço reduzido;
- Grande disponibilidade de interfaces, como USB, I2C, SPI, Ethernet, entre outros;
- Disponibilidade de microcontroladores com empacotamento DIP (Dual In-line Package) tornando-os fáceis de manusear [31].



Figura 27: Kit de desenvolvimento e programação [32].

Em 2000, a Microchip introduziu a arquitetura PIC18. Em contraste com as séries anteriormente desenvolvidas, nesta o C tornou-se a linguagem de desenvolvimento predominante.

A família PIC18F2423/2523/4423/4523 oferece as vantagens de todos os microcontroladores PIC18 - ou seja, o desempenho computacional elevado a um preço económico - com a adição da alta resistência e reforço da memória de programa *flash*. Para além destas características, esta família introduz melhorias de design que fazem destes microcontroladores uma escolha sensata para muitas aplicações de alta performance e sensibilidade [33].

Dentro desta família existem diferenças entre os vários dispositivos, tendo o PIC18F2523 as seguintes especificações:

- **Memória de programa *flash*:** 32 Kbytes;
- **Canais Analógico/Digital:** 10 para dispositivos de 28 pinos, 13 para dispositivos de 40/44 pinos;
- **Portos Entrada/Saída:** 3 portos bidirecionais para dispositivos de 28 pinos, 5 portos bidirecionais para dispositivos de 40/44 pinos;
- **Módulo CCP (*Capture Compare PWM*) e ECCP (CCP melhorado):** dispositivos de 28 pinos têm 2 módulos CCP *standard*, os de 40/44 pinos contêm 1 módulo CCP *standard* e 1 módulo ECCP;
- **Porta paralela:** presente apenas nos dispositivos de 40/44 pinos [33].



Figura 28: PIC18F2523 [33].

3.8 ARDUINO

O Arduino é um projeto iniciado em Itália, em 2005, com vista a desenvolver a “prototipagem eletrônica *open-source*, baseada em *hardware* e *software* simples e flexível” [34].

Este projeto é constituído por um microprocessador Atmel AVR ou ARM com um IDE de *software* multiplataforma próprio - o Arduino IDE - com a possibilidade de escrita em C++ [35]. Este IDE incorpora várias facilidades, como a escrita de aplicações apenas com duas funções: a *setup()* executada no *reset* do microcontrolador e a *loop()* executada infinitamente. O sucesso do projeto ditou que este fosse base de trabalho para vários outros semelhantes, mantendo estes normalmente a terminação “ino”.

Os seus microcontroladores apresentam possibilidade de conexão a diversos dispositivos (por USART, SPI, I2C, etc), saídas PWM e conversores analógico-

digital, sendo que as versões mais recentes já possuem mais recursos, como processadores de 32bits.

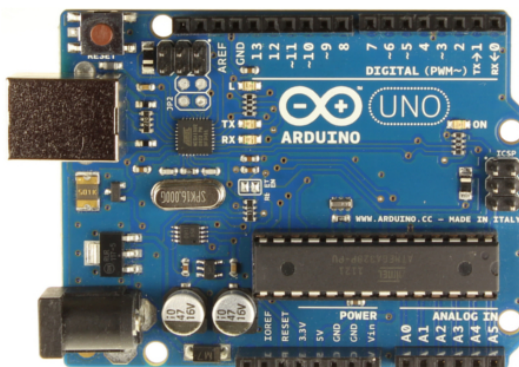


Figura 29: Arduino Uno [34].

A principal finalidade do Arduino num sistema é facilitar a prototipagem, implementação ou emulação do controle de sistemas interativos, a nível doméstico, comercial ou móvel, da mesma forma que o PLC (*Programmable Logic Controller*) controla sistemas de funcionamento industriais. Com ele é possível enviar ou receber informações de basicamente qualquer sistema eletrônico, como identificar a aproximação de uma pessoa e variar a intensidade da luz do ambiente conforme a sua chegada. Ou abrir as janelas de um escritório de acordo com a intensidade da luz do sol e temperatura ambiente.

Devido à sua versatilidade de emparelhamento e comunicação com outros dispositivos e *softwares*, neste estudo o Arduino vai estar integrado no sistema de monitorização do sensor de posição angular desenvolvido.

FASE DE IMPLEMENTAÇÃO

Este capítulo encontra-se dividido em duas grandes secções. A primeira documenta todos os passos executados para criar um modelo de simulação capaz de quantificar as perturbações causadas nas leituras de um sensor de posição angular. Deste modo, a compreensão da influência dos campos magnéticos parasitas e a forma de os compensar fica facilitada. A segunda descreve todos os passos e decisões tomadas para a implementação de um sensor de posição angular com a arquitetura diferencial desenvolvida, desde as componentes mecânicas, às de *hardware* e *software*.

4.1 BLINDAGEM MAGNÉTICA

4.1.1 Modelo do Sensor de Posição Angular

De forma a melhor compreender a influência dos campos magnéticos e a quantificar a perturbação realizada por estes nas leituras do sensor magnético¹ foram realizadas várias simulações no ANSYS. Tendo em conta o objetivo do estudo, optou-se por utilizar um modelo simplificado do sensor de posição angular, focando-se desta forma apenas na zona de maior interesse.

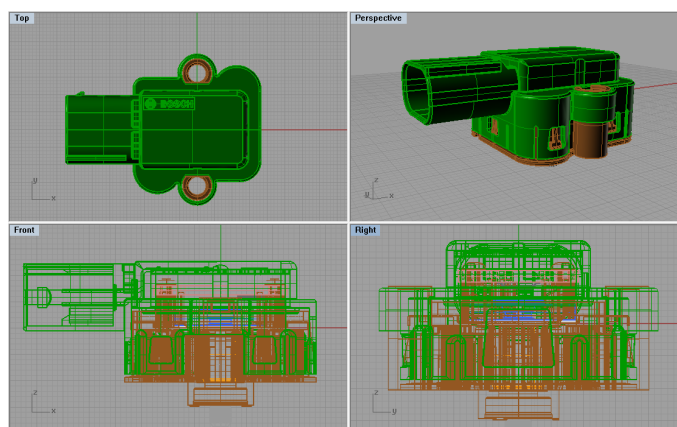


Figura 30: Modelo 3D simplificado do sensor de posição angular.

¹ Foi selecionado um sensor de posição angular magnético, sem imunidade a perturbações magnéticas, existente no mercado

4.1.2 Simulação 2D do Sensor de Posição Angular

Para se realizar simulações do sensor angular em 2D (2 Dimensões) foi necessário interseccionar um plano com o modelo da Figura 30.

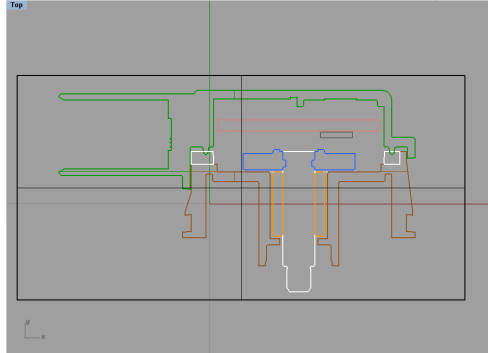


Figura 31: Modelo 2D simplificado do sensor de posição angular.

Devido às potencialidades do Rhinoceros, este foi utilizado para efetuar todas as manipulações geométricas necessárias para se converter o modelo para apenas duas dimensões. Obtendo-se o resultado presente na Figura 31.

De forma a se executar as simulações magnéticas, esta geometria foi importada em formato IGES no ANSYS Multiphysics, pelo facto do ANSYS Workbench não suportar simulações magnéticas 2D.

Implementação do Modelo 2D do Sensor de Posição Angular no ANSYS

Na simulação do modelo 2D do sensor simplificado, algumas aproximações foram feitas ao nível da permeabilidade magnética dos materiais das várias peças que o compõem, como se pode consultar na Tabela 2.

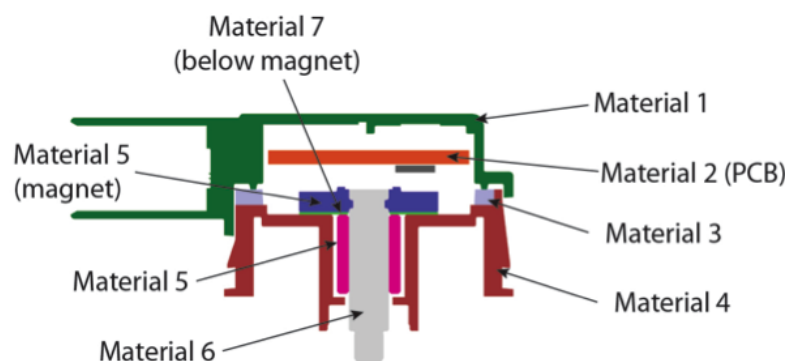


Figura 32: Materiais do sensor de posição angular.

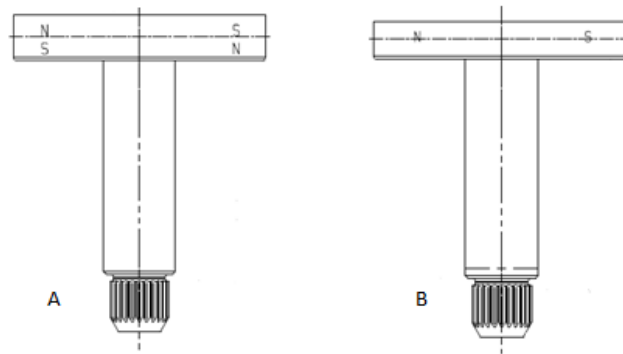


Figura 34: A- Ímã Hard Ferrite; B- Ímã NdFeB.

Ao se concluir a definição das características da geometria necessárias para a simulação, seguiu-se a definição dos parâmetros para gerar a malha do modelo.

Após vários testes, e de forma a obter um compromisso entre rapidez de simulação e precisão dos resultados (com erro inferior a 1%), concluiu-se que a malha deveria de ser de mais apertada na zona perto do sensor, 0.1mm, e mais larga nas zonas mais afastadas, 0.5mm.

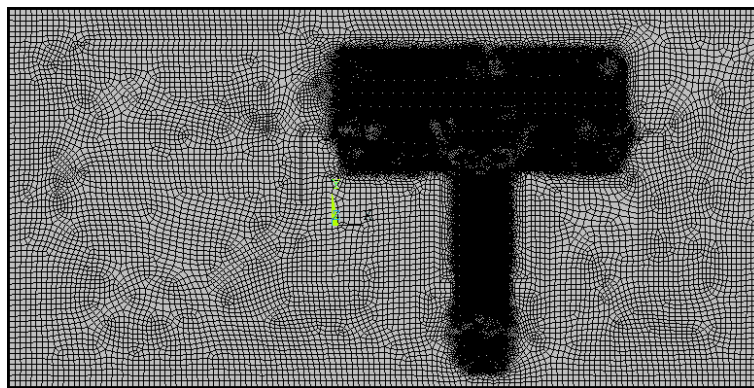


Figura 35: Malha obtida no modelo 2D do sensor de posição angular simplificado.

Implementação do Modelo 2D do Sensor de Posição Angular com Ímã de Perturbação no ANSYS

De forma a simular e quantificar as interferências causadas por campos magnéticos externos no sensor angular, adicionou-se um ímã ao modelo do sensor (Figura 36).

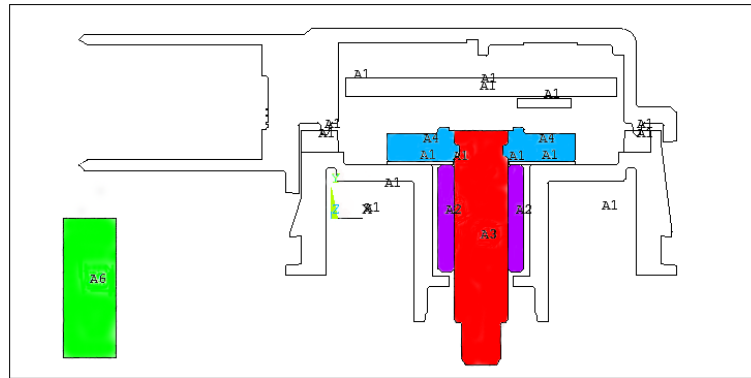


Figura 36: Visualização do modelo do sensor com ímã de perturbação externo com base nos materiais.

O ímã externo acrescentado faz com que o campo magnético criado por si atinja a posição do sensor com o valor de 3.2mT, como ilustrado na Figura 37.

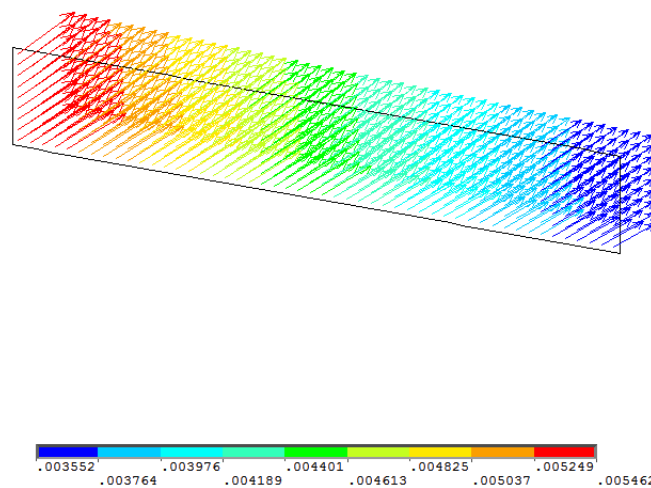


Figura 37: Fluxo magnético que atinge o sensor na presença de um ímã externo (sem ímã do sensor de posição angular).

Implementação do Modelo 2D do Sensor de Posição Angular com Ímã de Perturbação e Aplicação de Blindagem no ANSYS

Um dos métodos passível de tornar os sensores angulares magnéticos imunes a campos magnéticos externos, incide na blindagem da região de interesse com um material de maior permeabilidade, sendo este responsável por atenuar os campos parasitas. Para que se tenha a confirmação de que esta técnica de compensação magnética é suficiente para o caso em estudo, é necessário elabo-

rar várias simulações com diferentes tipos de blindagem. Assim, foram aplicados no encapsulamento, em torno da região de interesse, materiais com permeabilidades magnéticas distintas.

Os casos de teste das simulações a efetuar assentam em duas vertentes. Numa delas pretende-se simular o modelo do sensor angular com diferentes valores de permeabilidade magnética no encapsulamento, de modo a compreender a interferência que este provoca no campo que atinge o sensor magnético. Na outra o objetivo é compreender o tipo de compensação que se verifica e a viabilidade da sua aplicação, acrescentando-se, para tal, um íman externo ao modelo de forma a causar a perturbação desejada.

4.1.3 Simulação 3D do Sensor de Posição Angular

De forma a se poder simular um cabo com corrente a causar interferências no modelo e a se aplicar a correta magnetização nos ímanes, foi necessário migrar a simulação para a terceira dimensão. O modelo 3D inclui então o sensor de posição angular, o ar envolvente e um cabo elétrico. Este é responsável por criar campos eletromagnéticos parasíticos de 3.2mT no sensor de efeito de Hall, quando atravessado por 400A. A Figura 38 mostra o CAD do modelo.

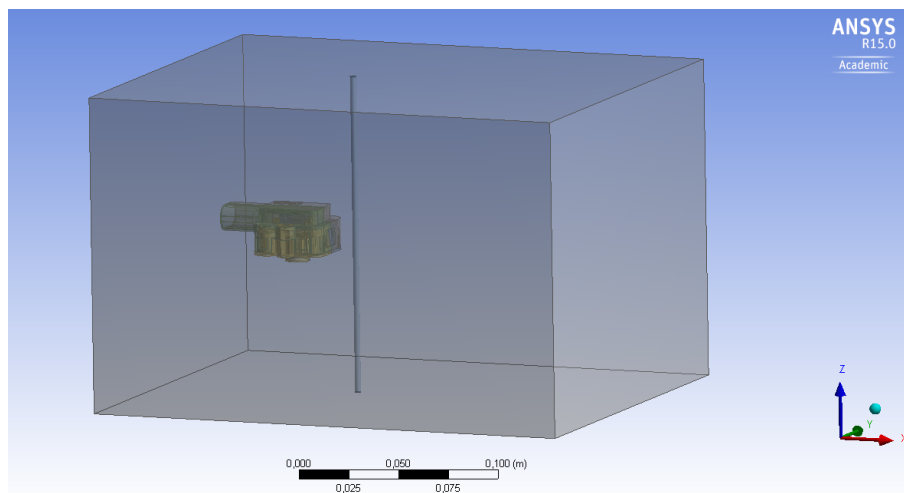


Figura 38: Modelo 3D do sensor de posição angular no ANSYS.

Implementação do Modelo 3D do Sensor de Posição Angular no ANSYS

A geometria do modelo em estudo apresenta um elevado grau de detalhe, sendo a obtenção de uma malha de boa qualidade uma tarefa desafiante. Para

que os resultados fossem mais próximos dos reais foi necessário simplificar a geometria³, tendo sido eliminados detalhes como numerações impressas na peça, pequenas curvaturas e pormenores de encaixe. Com as simplificações realizadas (Figura 39), conseguiu-se assim gerar uma malha com uma qualidade substancialmente superior.

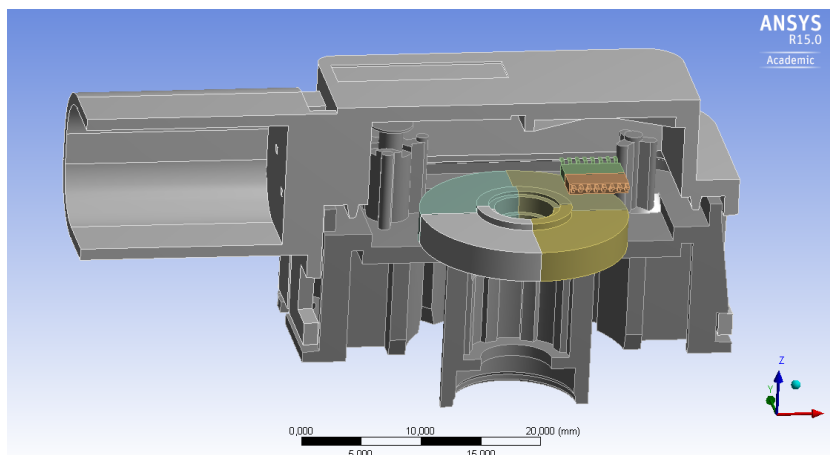


Figura 39: Modelo do sensor angular 3D simplificado no ANSYS.

De forma a aumentar a confiabilidade das leituras efetuadas, foi feito um refinamento da malha na parte interna do sensor angular, ou seja, na zona em redor do sensor magnético e no ímã, onde os resultados devem ser mais precisos.

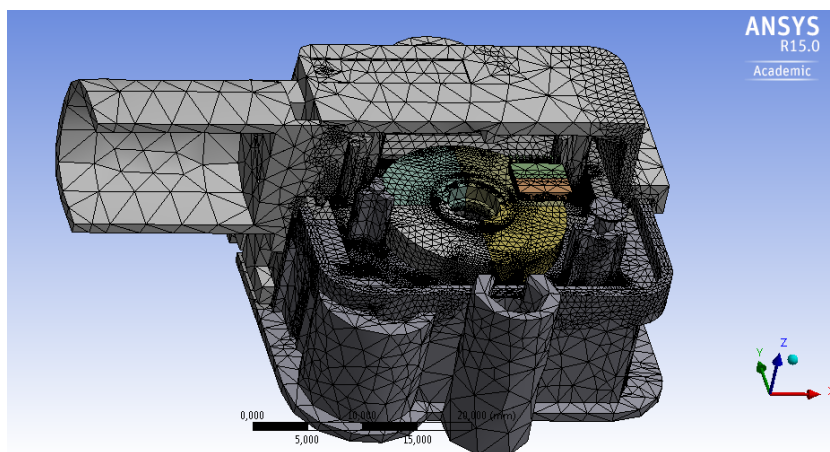


Figura 40: Malha do modelo 3D do sensor angular simplificado no ANSYS.

Tendo em conta a geometria do ímã NdFeB é necessário aplicar uma magnetização com um ângulo de 45° em cada uma das 4 partes, como evidenciado

³ Do ponto de vista magnético a simplificação geométrica realizada não tem qualquer tipo de interferência no resultado das simulações

na Figura 41, sendo esperado um campo magnético no sensor de aproximadamente 5mT.

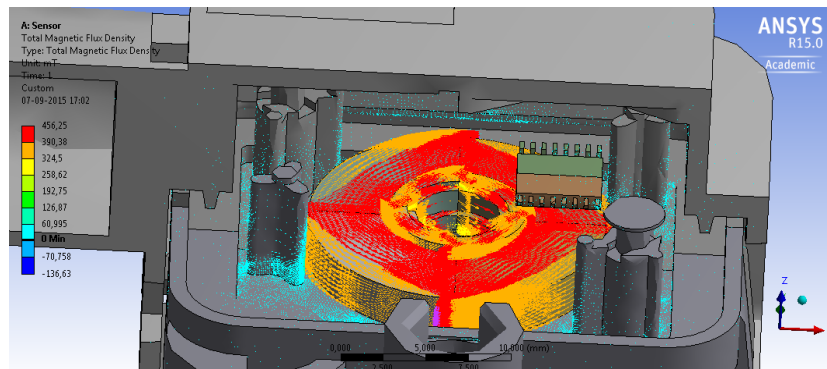


Figura 41: Magnetização do íman NdFeB.

Relativamente às condições fronteira do modelo, são incluídas as magnetizações dos ímanes (8 polos), a corrente no condutor (0A ou 400A consoante se pretenda incluir ou não perturbações), a permeabilidade do encapsulamento (inicialmente foi considerada permeabilidade de 1, testando-se posteriormente permeabilidades até 1000), e a magnetização externa na caixa que modela o ar (paralela ao plano).

Com uma malha fina gerada, as condições de fronteira definidas, as magnetizações atribuídas, assim como a atribuição dos materiais a cada parte constituinte do sensor, o próximo passo corresponde ao cálculo da solução magnética do modelo.

4.2 ARQUITETURA DIFERENCIAL

De forma a implementar um sensor de posição angular com base na arquitetura diferencial desenvolvida e apresentada anteriormente (Secção 3.4), foi necessário estudar diversos parâmetros, desde a mecânica do sensor, ao custo de produção, ao tempo de montagem e à eletrónica que este necessita para cumprir os requisitos impostos. Para tal foi necessário a intervenção de uma vasta equipa, composta por investigadores tanto da Universidade do Minho como da empresa Bosch Car Multimedia.

Nas subsecções que se seguem são explicados os desenvolvimentos relevantes efetuados pelos vários investigadores envolvidos no projeto, de forma a

facilitar a percepção do funcionamento do sensor de posição angular e de algumas vertentes adotadas para o estudo da imunidade magnética.

4.2.1 Diagrama de Blocos

Na arquitetura diferencial, como explicado na Secção 3.4, o campo magnético é gerado com recurso a duas bobinas. O sentido da corrente, aplicado nas bobinas, é definido com recurso a uma ponte H, controlada pelo microcontrolador. Este último, através do seu ADC permite efetuar a aquisição dos sinais analógicos representativos do campo magnético em dois eixos diferentes (x e y), provenientes dos sensores magnéticos. Também, todo o processamento de dados é efetuado pelo PIC, sendo gerado um sinal PWM, cuja variação de *duty-cycle* representa o deslocamento angular. O diagrama de blocos da arquitetura do sensor de posição angular é apresentado na Figura 42.

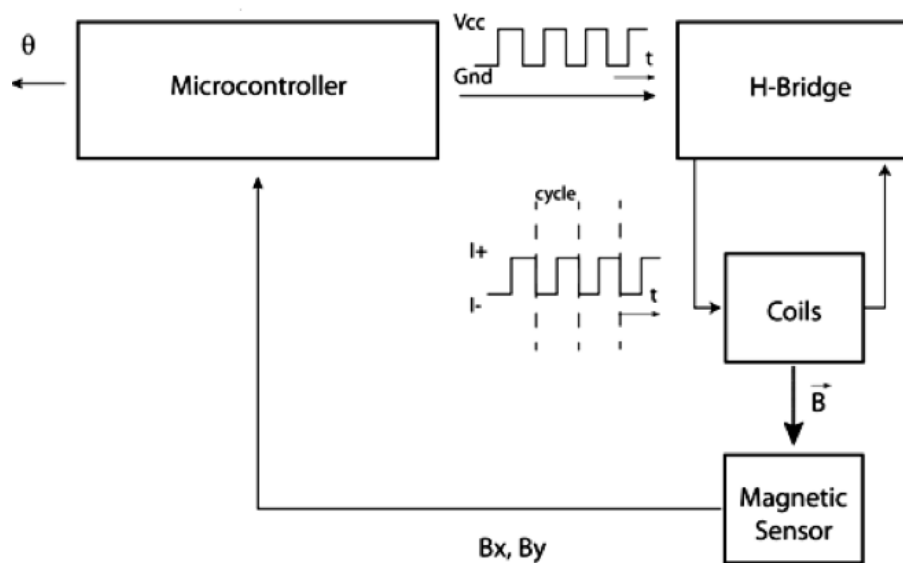


Figura 42: Diagrama de blocos do sensor diferencial.

4.2.2 Requisitos e Especificações

A implementação de todo o sistema (usando componentes discretos), e do *software* de aquisição de dados é apresentada nas subsecções que se seguem, com foco nas especificações elétricas e nos requisitos estabelecidos.

No que diz respeito às especificações elétricas do sensor angular, este tem que ter uma tensão de alimentação de 5V, um consumo de corrente inferior a 45mA e uma saída em PWM. A tensão máxima do PWM corresponde então a 5V e a mínima a 0V.

Este modelo deve então cumprir os vários requisitos propostos. Estes são: a imunidade a campos magnéticos externos de 3.2mT (mínimo), uma resolução de 0.1° e uma gama dinâmica de 0° a 90° (mínimo).

4.2.3 Componentes Mecânicos

O sensor de posição angular necessita de acomodar todo um conjunto de eletrónica e partes mecânicas. Como tal, foi necessário desenvolver um desenho mecânico que permitisse obter uma solução fiável com tamanho reduzido, fácil de implementar, simples de montar e com baixo custo de produção, com o objetivo de tornar viável o desenvolvimento deste produto.

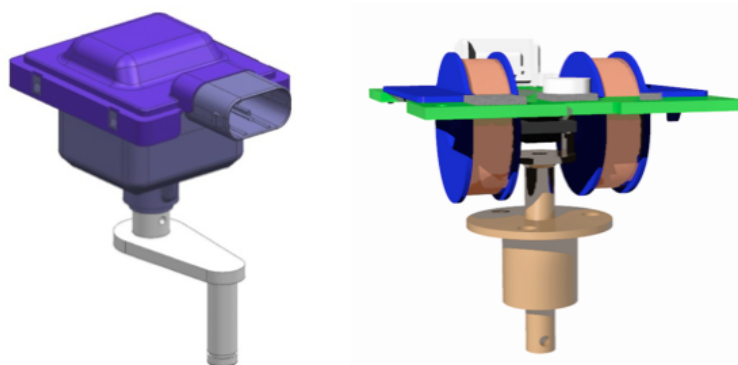


Figura 43: Desenho mecânico do sensor angular de posição (arquitetura diferencial).

Assim, de forma a simplificar o desenho mecânico decidiu-se que o sensor magnético rodaria, enquanto as bobines permanecem estáticas e acopladas ao PCB (*Printed Circuit Board*), que contém a eletrónica necessária para processamento. O PCB com o sensor magnético encontra-se por baixo da placa de circuito impresso com as bobines e alinhado com o centro das mesmas. A rotação do sensor é obtida com recurso a um *slip ring* que contém acoplado de um lado uma alavanca e do outro o sensor magnético. A Figura 43 apresenta o desenho mecânico do sensor de posição angular, cujo desenvolvimento e implementação foi elaborado por uma equipa da empresa Bosch Car multimedia, que se encontra inserida na linha do projeto em parceria com a Universidade do Minho.

4.2.4 Componentes de Hardware

De forma a se seleccionar o *hardware* mais adequado ao projeto, dando preferência aos fornecedores atuais da Bosch, para assim facilitar a possível industrialização do produto, a seleção dos componentes eletrónicos utilizados foi feita pelos colaboradores da empresa. Estas escolhas encontram-se enumeradas e explicadas ao longo desta subsecção.

Leitura do Campo Magnético – MLX91205

A leitura do campo magnético é efetuada com recurso ao sensor da Melexis MLX91205LB (Figura 44). Este integra um sensor magnético de um eixo com funcionamento baseado no efeito de Hall, produzindo uma tensão de saída analógica proporcional ao campo magnético paralelo à superfície do circuito integrado. O sensor utiliza internamente uma camada ferromagnética que amplifica o campo magnético, concentrando-o nos elementos de Hall, permitindo assim que o sensor tenha uma sensibilidade elevada e um baixo ruído.

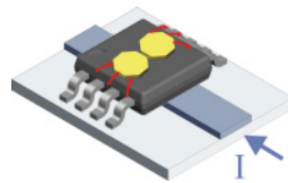


Figura 44: MLX91205 *Low magnetic field*.

As principais características do sensor são:

- Gama dinâmica linear: $\pm 9\text{mT}$;
- Sensibilidade: 280mV/mT ;
- Largura de banda máxima: 100kHz ;
- Saída analógica linear: $0 - 5\text{V}$, proporcional ao campo magnético;
- Um eixo.

A escolha recaiu neste sensor, visto que dentro das escassas soluções existentes no mercado (baixa resolução para o campo magnético gerado), este permite cumprir os requisitos do sensor angular de posição em termos de gama

dinâmica, necessária para a resolução e imunidade a campos magnéticos externos, bem como em termos de tempo de resposta. Assim, e visto que um campo magnético de 2.5mT é suficiente para obter uma resolução de 0.1° (explicado na Subsecção 5.2.3), obtém-se imunidade a campos magnéticos externos até 6.5mT, sem entrar na saturação.

PCB com Microcontrolador e Ponte H

O microcontrolador utilizado para efetuar a aquisição e processamento de dados é o PIC18F2523 da Microchip. Este possui as características necessárias para cumprir os requisitos do sensor, nomeadamente:

- ADC: 12 bits ;
- Tensão de alimentação: 5V (igual à do sensor magnético);
- Oscilador: 8MHz;
- Frequência máxima de oscilação: 32MHz;
- Saídas de PWM.

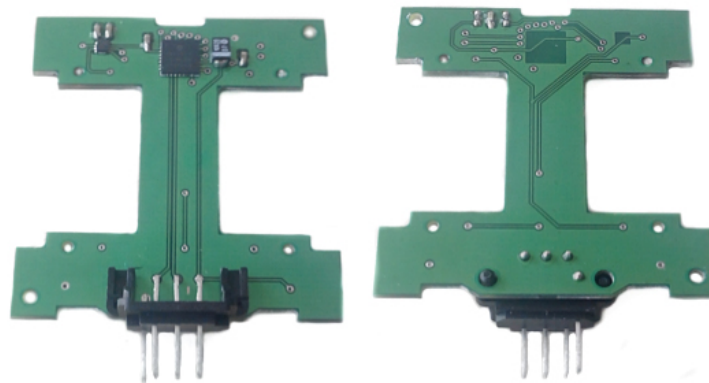


Figura 45: PCB final do microcontrolador.

Em relação à ponte H a escolha recaiu na DRV8837 da Texas Instruments (fornecedor Bosch), cuja tensão de alimentação é 5V. Esta opção elimina assim a necessidade de utilizar um regulador de tensão, uma vez que todos os componentes são alimentados a 5V.

Na Figura 45 é possível observar as duas faces da PCB com os componentes soldados e com as aberturas e encaixes necessários para acoplar as bobines.

Bobines

De acordo com a máxima resistência possível para induzir uma corrente de 10mA (500Ω para uma tensão de alimentação 5V) e em função das restrições mecânicas do sensor angular de posição, após se analisar os resultados das simulações magnéticas, definiu-se que as bobines apresentarão uma geometria similar à apresentada na Figura 46, com as seguintes dimensões:

- Diâmetro do fio = 0.1mm;
- Número de espiras = 4550 (70×65);
- Resistência = 500Ω ;
- $A = 7.5\text{mm}$ ($70 \text{ espiras} \times 0.1\text{mm}$);
- $B = 6.5\text{mm}$ ($65 \text{ espiras} \times 0.1\text{mm}$);
- $C = 8\text{mm}$;
- $D = 23\text{mm}$.

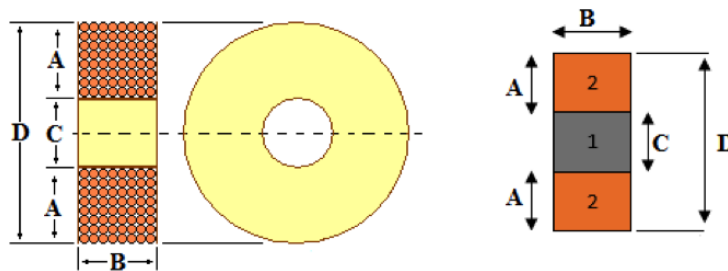


Figura 46: Geometria das bobines.

As restrições mecânicas do sensor de posição angular (tamanho da PCB com os sensores magnéticos e espaço necessário para rotação), implica que as bobines fiquem distanciadas entre si 14mm. A esta distância o campo magnético, para uma corrente de 10mA, apresenta uma magnitude de 1.73mT.

4.2.5 Componentes de Software

Para que o *software* implementado fosse capaz de produzir uma saída, sob a forma de PWM, que correspondesse ao atual deslocamento angular registrado pelo sensor, foi necessário articular a inversão dos campos magnéticos gerados

pelas bobinas, com o valor do campo lido pelos sensores magnéticos. De forma a reunir as condições necessárias para ser feito o cálculo diferencial, teve-se sempre em especial atenção os tempos de execução das tarefas, de forma a não pôr em causa o requisito de imunidade do sensor angular a campos magnéticos externos (min 3.2mT).

Overview

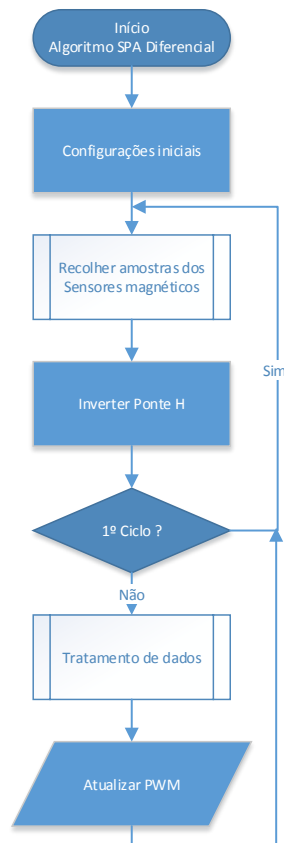


Figura 47: Fluxograma com a implementação do *firmware*.

Para se aplicar a metodologia diferencial desenvolvida foi necessário gerar dois ciclos de aquisição de dados⁴, com correntes invertidas, durante um ciclo de processamento. Ou seja, teve-se que gerar dois ciclos distintos de leitura com correntes opostas, para posteriormente se efetuar a medição diferencial.

Através do fluxograma apresentado na Figura 47, consegue-se fazer uma interpretação alto nível sobre o funcionamento do *software* elaborado. Sempre que o programa inicia, ou seja, o sensor angular diferencial é alimentado, são feitas

⁴ Os dados recolhidos provêm de dois sensores magnéticos (componente do campo magnético em x e y).

todas as configurações necessárias (ADC, PWM e ponte H). Após as inicializações segue-se a recolha de amostras dos dois sensores magnéticos, invertendo-se de seguida a polarização das bobines, através da ponte H. Caso se encontre no primeiro ciclo de aquisição de dados, ou seja, só tenha adquirido dados relativos a um sentido de corrente atribuído às bobines, volta-se a recolher novas amostras. Depois de recolhidos todos os dados necessários segue-se o seu processamento, o cálculo do deslocamento angular e conseqüentemente a atualização da saída do sensor diferencial (o *duty-cycle* do PWM).

Aquisição de Dados

Cada um dos ciclos de aquisição de dados encontra-se dividido em dois períodos, como se pode visualizar na Figura 48.

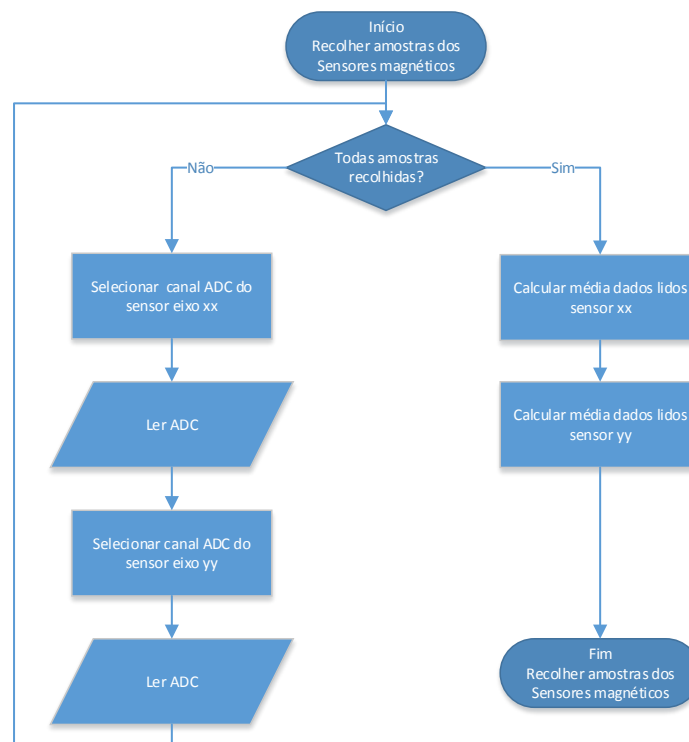


Figura 48: Fluxograma da aquisição de dados.

Um dos ciclos é utilizado para assegurar a estabilização do campo magnético após a inversão do sentido da corrente, aproveitando-se também para fazer algum processamento dos dados, de forma a rentabilizar o tempo dispendido. O segundo ciclo, por sua vez, é utilizado para adquirir as n amostras de

cada sensor⁵, através dos canais de ADC, e calcular o valor médio lido de cada componente, para assim diminuir os erros de oscilação dos próprios sensores magnéticos.

Tratamento de Dados

Após aquisição segue-se a fase do tratamento dos dados(Figura 49). Esta começa por aplicar um filtro passa-baixo de 4^a ordem, de forma a eliminar possíveis erros associados à aquisição, bem como eventuais ruídos presentes no sistema.

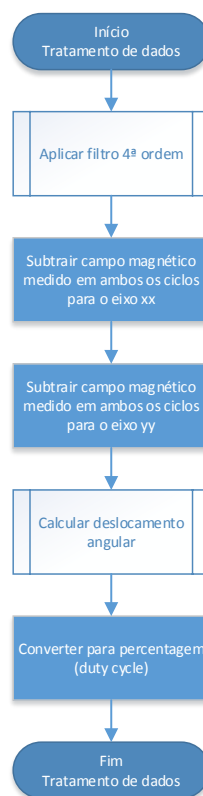


Figura 49: Fluxograma do tratamento de dados.

Para se calcular o deslocamento angular é então efetuada a diferença do campo magnético medido em ambos os ciclos para cada eixo e calculado o arco-tangente. Devido ao elevado tempo dispendido pelo PIC no cálculo do arco-tangente, foi então necessário reescrever a função de atan_2 , substituindo-se o recurso à função de atan por um acesso a uma tabela de valores de arco-tangente, que é carregada para a memória de código no arranque do programa.

⁵ O número de amostras ficará definido conforme os resultados obtidos durante os vários testes.

Como representação do deslocamento angular é gerado um sinal de PWM com uma frequência de 1kHz, cujo *duty-cycle* é atualizado no final de cada ciclo de processamento.

Para se poder atribuir o ângulo medido à PWM, foi necessário criar uma relação entre o *duty-cycle* e o deslocamento angular. Desta forma fixou-se os 0° nos 50%, tendo-se estabelecido que a percentagem máxima seria 90%, correspondendo aos 90°, e a mínima seria 10%, correspondendo aos -90°, obtendo-se então a equação 16.

$$\text{Percentagem} = \frac{80}{180} \times \text{ângulo} + 50 \quad (16)$$

Por fim, após se atribuir o *duty-cycle* volta-se à fase de aquisição de dados, estando todo este processo em *loop* infinito.

RESULTADOS OBTIDOS

Com base nos casos de teste previstos na fase de implementação, neste capítulo encontram-se interpretados e avaliados os resultados obtidos a partir destes. Quer nas simulações magnéticas quer nos testes físicos do sensor angular diferencial os resultados obtidos encontram-se relacionados entre si, sendo sempre tida em atenção a relação custo vs benefício.

5.1 BLINDAGEM MAGNÉTICA

Com base no que foi desenvolvido anteriormente, evidenciado na Secção 4.1, vários testes foram elaborados de forma a quantificar o comportamento do sensor na presença de campos magnéticos externos e do efeito de blindagem.

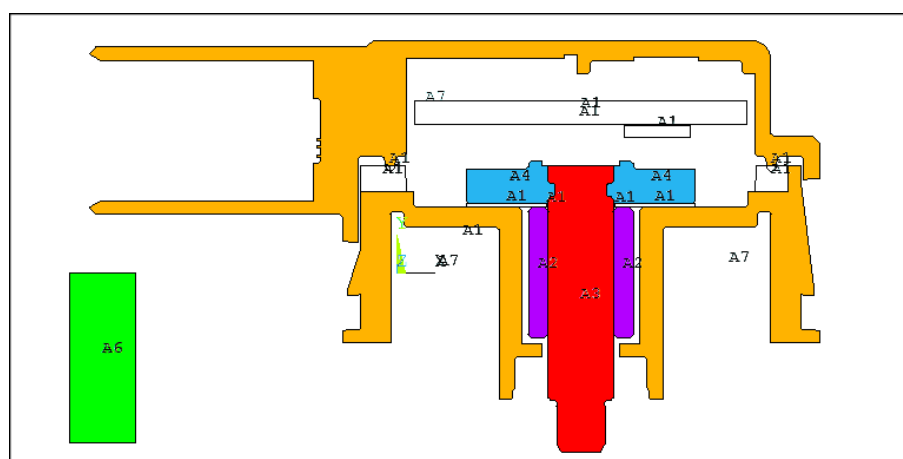


Figura 50: Visualização do modelo do sensor com íman de perturbação externa e encapsulamento, com base nos materiais.

5.1.1 Simulação 2D do Sensor de Posição Angular

Ao longo desta secção encontram-se documentadas as diversas simulações, sendo os resultados obtidos comparados entre si. Os parâmetros em estudo incidem na relação permeabilidade magnética do encapsulamento (blindagem) com campos magnéticos parasitas causados por um íman externo.

Resultados Obtidos na Simulação do Modelo 2D do Sensor de Posição Angular no ANSYS

Para se poder quantificar o efeito nocivo dos campos magnéticos externos é necessário conhecer previamente o valor do campo magnético que atinge o sensor¹.

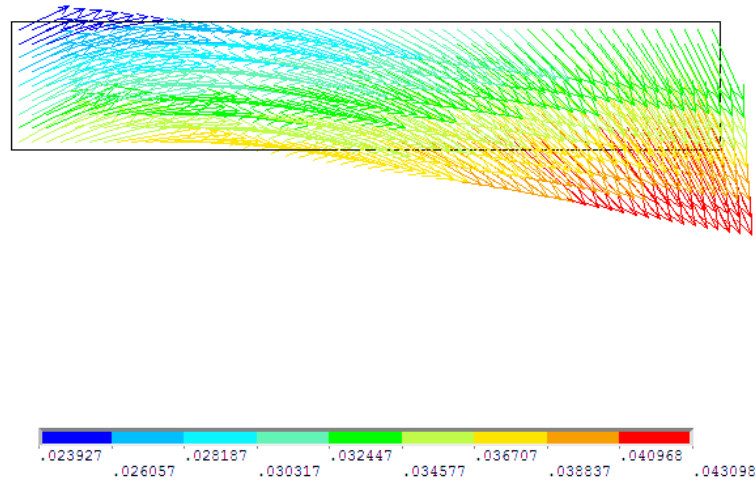


Figura 51: Fluxo magnético que atinge o sensor com o ímã NdFeB.

Tendo em atenção as características do sensor angular escolhido, dois tipos de ímãs podem ser utilizados, obtendo-se por isso diferentes valores de campo magnético no sensor.

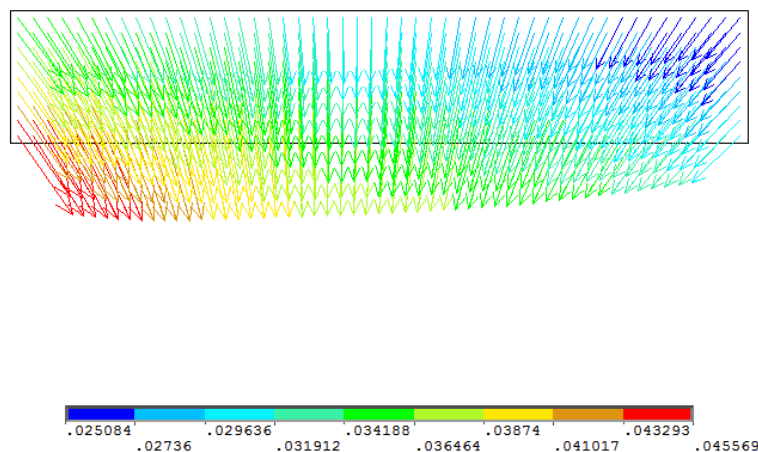


Figura 52: Fluxo magnético que atinge o sensor com o ímã Hard Ferrite.

¹ Seria de se esperar um campo de 5mT no sensor, mas como não é possível colocar os vários polos no ímã, o resultado é apenas qualitativo.

No caso do íman NdFeB o valor médio do campo que atinge o sensor é 30.0545mT, sendo os resultados visíveis na Figura 51. Quando se utiliza o íman Hard Ferrite verifica-se que no sensor há um fluxo magnético de cerca de 35.3263mT, como se pode constatar na Figura 52. Comparando os resultados de ambos os ímanes, são visíveis as diferentes magnetizações que estes possuem. No entanto, a gama de valores do campo magnético que atinge o sensor é aproximadamente a mesma.

Resultados Obtidos na Simulação do Modelo 2D do Sensor de Posição com Íman de Perturbação no ANSYS

Depois de conhecido o valor do campo no sensor, em condições ideais², seguem-se vários testes com os diferentes tipos de ímanes que o sensor de posição angular suporta, na presença de um íman de perturbação que atinge o sensor, na ausência de outros campos, com um campo de 3.2mT.

Tabela 3: Simulações do modelo do sensor com íman de perturbação (3.2mT).

Íman de perturbação	Íman		Fluxo magnético do sensor (mT)	
	NdFeB	Hard Ferrite	Min.	Máx.
-	✓	-	23.92	43.09
✓	✓	-	29.03	42.51
-	-	✓	25.08	45.56
✓	-	✓	21.54	45.14

A Tabela 3 demonstra os resultados obtidos para os diversos casos simulados, podendo-se facilmente verificar que a variação do campo magnético excede o limite exigido (0.1mT) em ambos os tipos de ímanes, sendo o desvio aproximadamente de 2mT.

Resultados Obtidos na Simulação do Modelo 2D do Sensor de Posição Angular com Íman de Perturbação e Aplicação de Blindagem no ANSYS

Segundo a pesquisa efetuada, e tal como explicado na Secção 2.1, de forma a quantificar o impacto da blindagem na compensação dos campos magnéticos parasitas foram efetuados vários testes envolvendo-se a região de interesse com

² Condições ideais: sem perturbações magnéticas externas e permeabilidade do encapsulamento 1.

diferentes permeabilidades, a fim de identificar o melhor resultado.

A Tabela 4 evidencia os resultados obtidos na área do sensor face à manipulação da permeabilidade do encapsulamento. Pode-se constatar que, mesmo sem perturbação magnética, a blindagem faz com que haja alterações no valor do fluxo magnético que atinge o sensor. Devido a este facto, a análise da compensação magnética tem que ser realizada para cada caso de permeabilidade com e sem perturbação magnética.

Tabela 4: Simulações do modelo do sensor com íman de perturbação (3.2mT) e aplicação de blindagem.

Íman	Íman de perturbação	Permeabilidade do encapsulamento	Fluxo magnético do sensor (mT)	
			Min.	Máx.
NdFeb	-	1.008	23.90	43.06
	✓	1.008	29.01	42.47
	-	10	19.26	33.80
	✓	10	24.18	35.80
	-	100	17.56	29.08
	✓	100	20.53	31.73
Hard Ferrite	-	1.008	25.11	45.57
	✓	1.008	21.56	45.15
	-	10	31.75	52.30
	✓	10	28.73	52.15
	-	100	36.64	56.97
	✓	100	35.58	58.50

Desta forma, com base nos resultados obtidos, o valor médio do campo magnético no sensor apresenta, para o caso com íman Hard Ferrite com permeabilidade do encapsulamento de 100, uma variação de 0.235mT quando sujeito à perturbação externa, correspondendo ao melhor resultado obtido. No entanto, apesar da compensação magnética registada, esta não é suficiente.

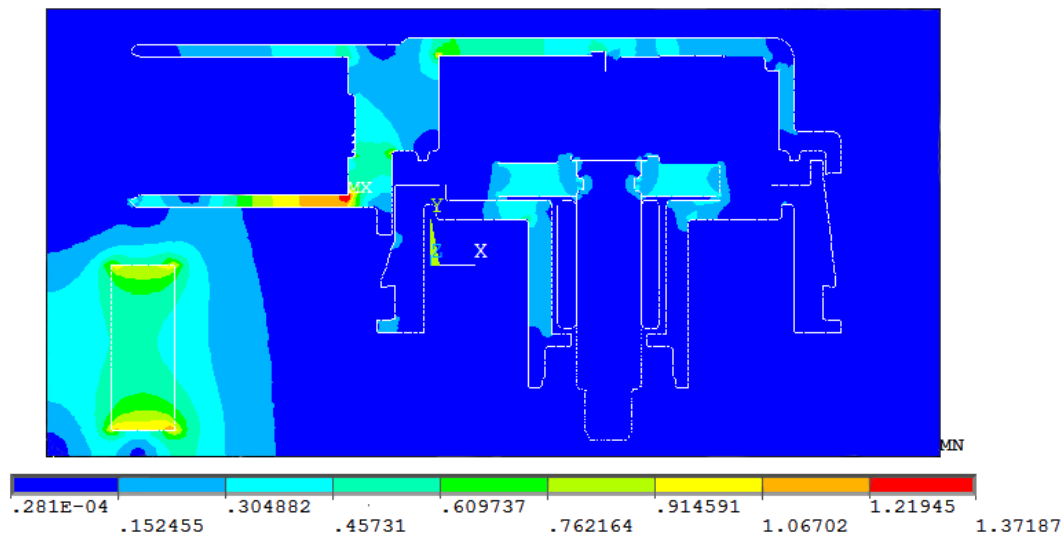


Figura 53: Solução da simulação do sensor angular com íman NdFeB, perturbação externa e encapsulamento com permeabilidade 100.

5.1.2 Simulação 3D do Sensor de Posição Angular

Devido ao elevado tempo de cálculo da solução do modelo, foram apenas simulados os casos de teste para o sensor de posição angular com íman NdFeB, com e sem perturbação magnética e para permeabilidades do encapsulamento de 1, 10, 100 e 1000. Como o caso de estudo é a capacidade de atenuação vs perturbação magnética num sensor de posição angular, não é problemático não estudar os comportamentos das várias vertentes do sensor selecionado, nomeadamente com o outro tipo de íman interno, pelo facto de se obter os mesmos resultados³.

Resultados Obtidos na Simulação do Modelo 3D do Sensor de Posição Angular no ANSYS

Para que se consiga avaliar os efeitos prejudiciais dos campos magnéticos externos, neste caso causados por um cabo elétrico, é necessário conhecer previamente, o valor do campo magnético que atinge o sensor. Procedeu-se então à simulação do modelo 3D do sensor angular sem blindagem aplicada e nas condições ideais, ou seja, sem interferências magnéticas externas. A solução obtida encontra-se evidenciada na Figura 54.

³ Se se simulasse com o íman Hard Ferrite, iria-se obter diferentes valores de campos magnéticos, no entanto a relação atenuação vs perturbação iria-se manter.

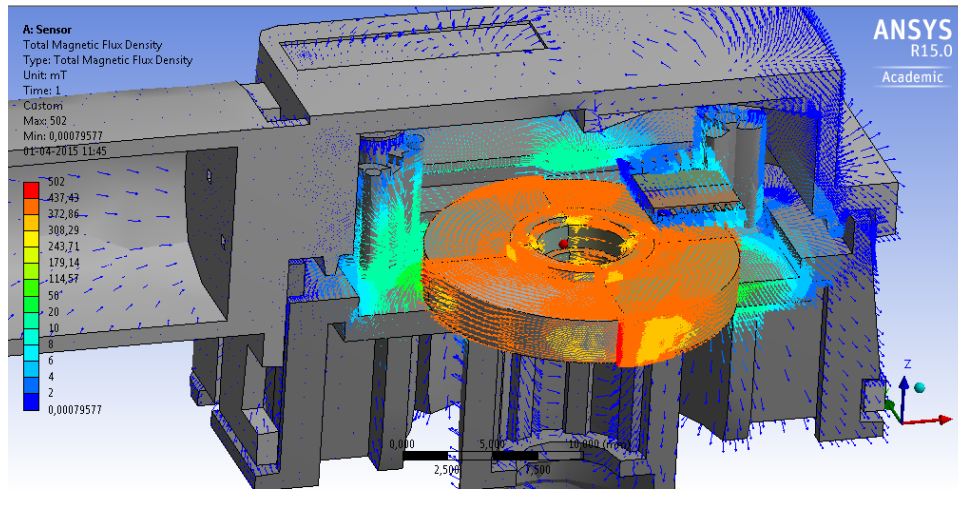


Figura 54: Solução magnética 3D do sensor de posição angular com ímã NdFeB.

Pode-se então constatar através da Figura 55, que o valor do campo magnético que atinge o sensor magnético é cerca de 4mT, muito próximo do valor esperado.

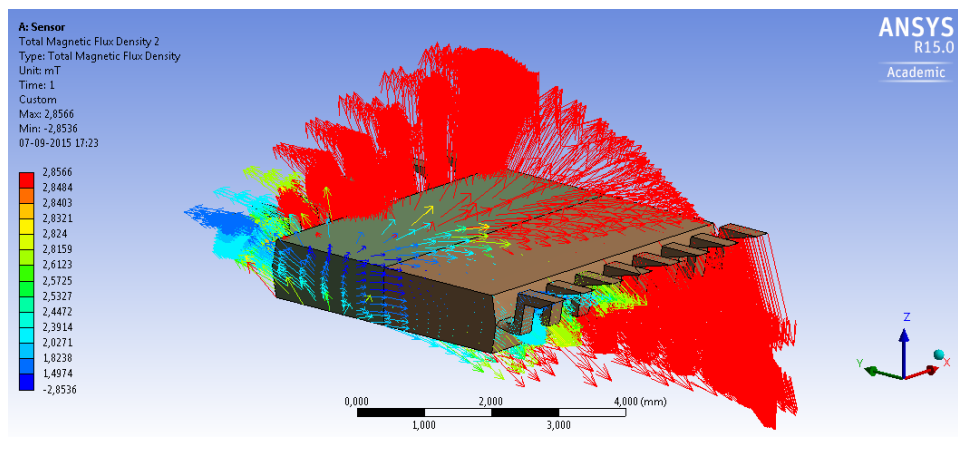


Figura 55: Fluxo magnético no sensor magnético, sem blindagem e sem perturbação magnética.

Resultados Obtidos na Simulação do Modelo 3D do Sensor de Posição Angular com Cabo Elétrico no ANSYS (Perturbação Magnética Externa)

Aplicou-se uma perturbação de magnitude equivalente à utilizada nas simulações do modelo 2D, documentadas na subsecção 5.1.1, no entanto neste caso esta é de cariz elétrico. Recorreu-se a um cabo de tensão com uma corrente de 400A, de forma a gerar uma perturbação equivalente à do ímã externo utili-

zado nas simulações 2D.

Como se pode constatar pelos resultados obtidos, e em concordância com os valores das simulações 2D, a variação do campo magnético excede o limite exigido (0.1mT), sendo o desvio registado de aproximadamente 1.5mT.

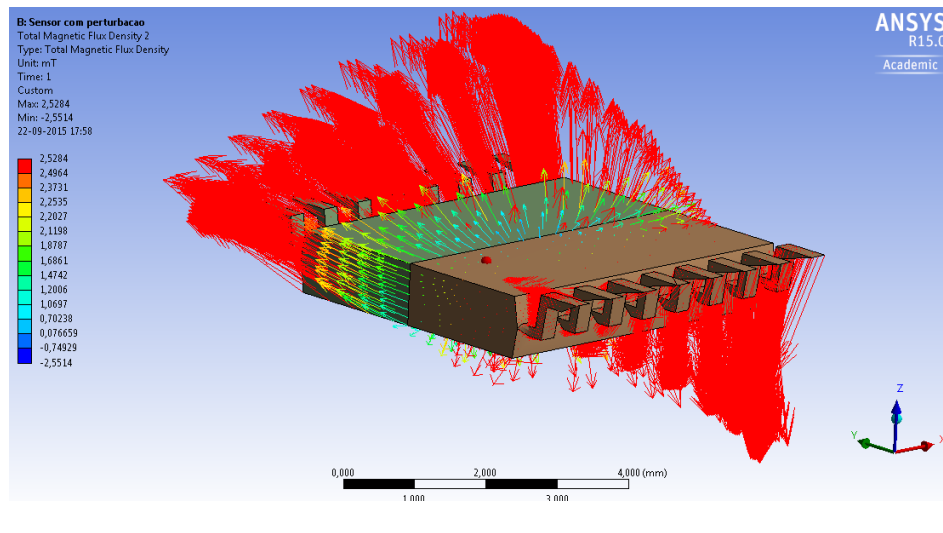


Figura 56: Fluxo magnético no sensor magnético, sem blindagem e com perturbação magnética.

Resultados Obtidos na Simulação do Modelo 3D do Sensor de Posição Angular com Cabo Elétrico (Perturbação) e Aplicação de Blindagem no ANSYS

Apesar da compensação magnética evidente que a blindagem provoca, interpretando-se os resultados exibidos na Tabela 5, pode-se concluir que esta não consegue anular por completo a perturbação a que o sensor se encontra sujeito. Nota-se que continua a existir um desvio no valor do campo magnético, sendo o mínimo de cerca de 0.045mT, mesmo no caso em que o encapsulamento tem permeabilidade 1000, e um máximo de aproximadamente 1.54mT, quando esta é de 1.

Esta técnica acaba por não se tornar muito eficiente, do ponto de vista custo/benefício, pois mesmo utilizando uma blindagem de permeabilidade 100, esta permite uma oscilação, nestas condições de teste, de aproximadamente 0.39mT, quase 4 vezes superior ao limite exigido.

Tabela 5: Simulações do modelo do sensor com cabo elétrico 400A (perturbação 3.2mT) e com/sem aplicação de blindagem.

Cabo Elétrico	Permeabilidade do encapsulamento	Fluxo magnético do sensor (mT)			
		x	y	z	total
-	1	-1.3917	-3,1486	2.3015	4.1410
✓	1	-1.2433	0.1028	2.2814	2.6002
-	10	-1.1641	-2.7188	2.0730	3.6117
✓	10	-1.0497	-0.5614	1.9812	2.3113
-	100	-1.0902	-2.4906	2.0007	3.3755
✓	100	-1.0513	-1.9979	1.9603	2.9899
-	1000	-1.0772	-2.4271	1.9879	3.3171
✓	1000	-1.0728	-2.3698	1.9845	3.2718

5.2 ARQUITETURA DIFERENCIAL

De modo a validar experimentalmente as características do sensor desenvolvido, e já documentado previamente (Secção 4.2), foram realizados testes de linearidade, ruído, resolução, largura de banda e influência dos campos magnéticos externos. Estes encontram-se, juntamente com os resultados experimentais, descritos ao longo desta secção.



Figura 57: Sensor angular diferencial e sistema de leitura.

5.2.1 Linearidade

De modo a otimizar o teste de linearidade acoplou-se o sensor de posição angular a um servo motor da ThorLabs, o CR1 – Z7 com resolução de 0.02° ,

como mostrado na Figura 58. Foram efetuadas leituras entre -90° e 90° , com incrementos de 0.5° .



Figura 58: Plataforma de testes.

Como se pode constatar, a partir dos resultados exibidos na Figura 59, o sensor diferencial apresenta um elevado grau de linearidade.

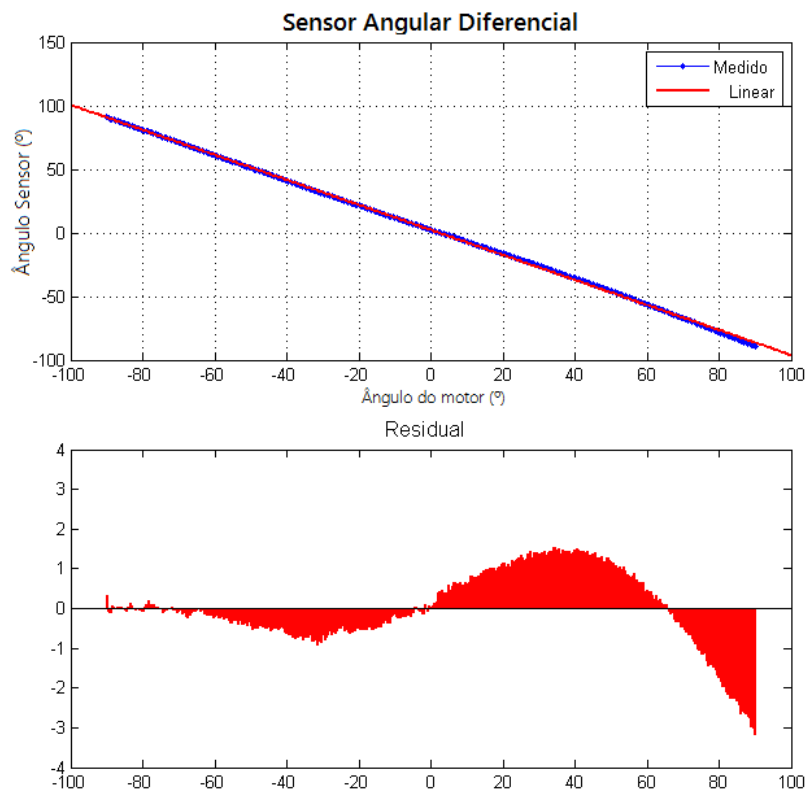


Figura 59: Linearidade do sensor angular diferencial.

No entanto, na zona dos 90° este apresenta um desvio de 3.16° , fazendo com que se verifique uma não linearidade de 1.76%. Isto acontece devido às aproximações efetuadas no cálculo do ângulo a partir do valor da tangente.

No entanto se diminuirmos a gama de medida de 180° para 90° , consegue-se obter uma não linearidade máxima de 0.62° , que equivale a 0.69% da escala dinâmica.

5.2.2 Ruído vs Largura de Banda

Para uma melhor análise da relação entre o ruído e a largura de banda foram realizados com e sem filtro passa baixo de 4ª ordem aplicado, para os casos de 8, 16, 32 e 64 amostras recolhidas por eixo.

Arquitetura Sem Filtro de 4ª Ordem

Com base na análise da Figura 60 pode-se concluir que o ruído neste caso de estudo, com 8 amostras recolhidas em cada eixo e sem filtro aplicado, é elevado, registando-se um desvio padrão de 0.2511° . Porém a largura de banda medida é de 88Hz.

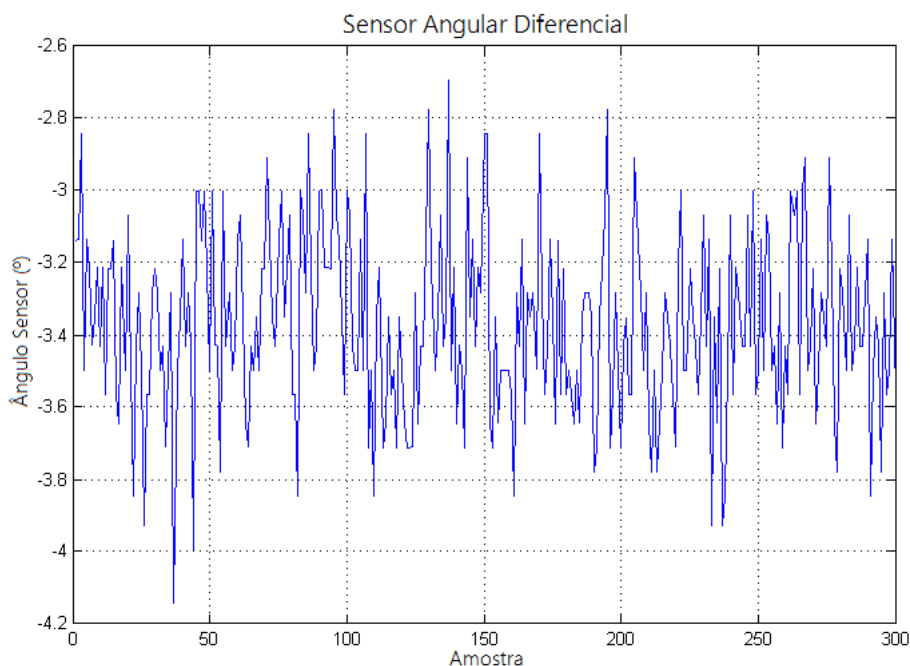


Figura 60: Ruído do sensor angular diferencial com 8 amostras por eixo sem filtro aplicado.

Apesar de neste caso se obter uma boa largura de banda, o ruído que se adquire com os dados recolhidos, é demasiado elevado para se poder adotar este tipo de tratamento de dados. Desta forma, é legítimo excluir desde já a utilização de apenas 8 amostras sem filtro de 4ª ordem aplicado.

Aumentando as amostras recolhidas por eixo de 8 para 16, verifica-se uma melhoria significativa, tendo o desvio padrão reduzido para 0.1634° (Figura 61). No entanto a largura de banda diminuiu para 63Hz. Ainda que tenha havido uma diminuição do desvio padrão de quase para metade, a quantidade de ruído acoplado às amostras continua a ser significativo. Por isso, não é viável a utilização deste caso de teste.

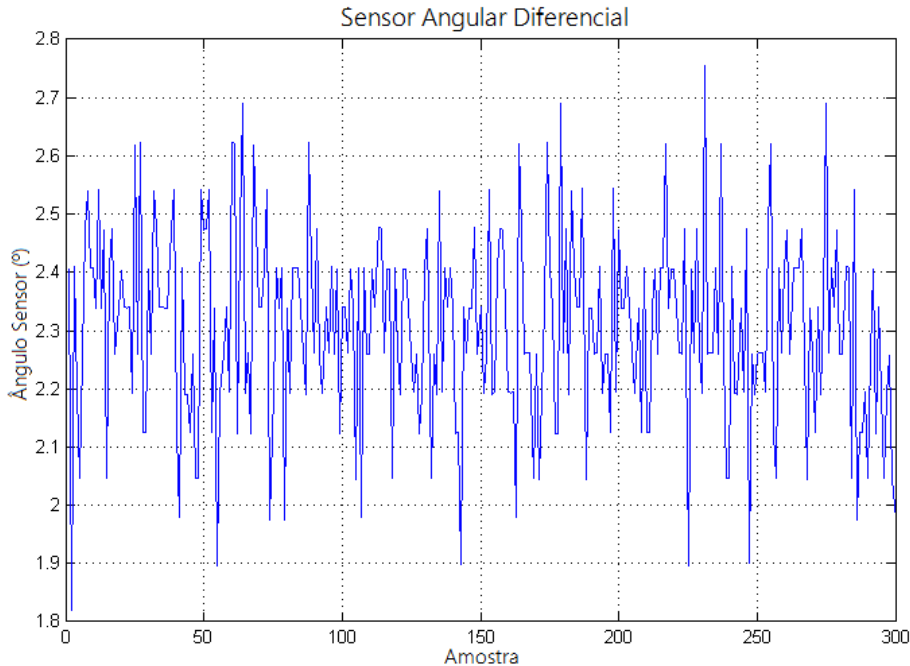


Figura 61: Ruído do sensor angular diferencial com 16 amostras por eixo sem filtro aplicado.

Na Figura 62 está ilustrado o ruído para o caso de teste de 32 amostras recolhidas por eixo e sem filtro aplicado, no qual se obtém um desvio padrão de 0.1250° e uma largura de banda de aproximadamente 40Hz. Comparando este último caso de teste com o de 16 amostras sem filtro aplicado, não se verifica uma melhoria significativa na atenuação do ruído. Avaliando a relação da perda de largura de banda com o ganho da qualidade das leituras, pode-se concluir que não é muito vantajoso optar por recolher 32 amostras sem aplicar filtro, em vez do caso com 16.

Para o caso de teste de 64 amostras sem filtro aplicado, exibido na Figura 63, o ruído que se verifica tem apenas como desvio padrão 0.0937° , obtendo-se um resultado melhor que os anteriores. Contudo, a largura de banda fica limitada a aproximadamente 23Hz.

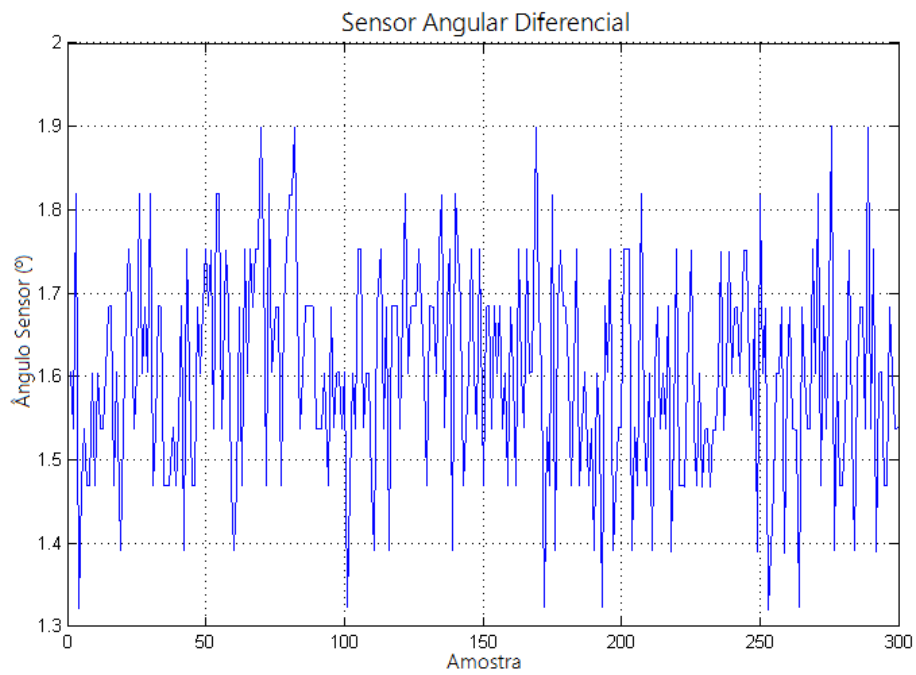


Figura 62: Ruído do sensor angular diferencial com 32 amostras por eixo sem filtro aplicado.

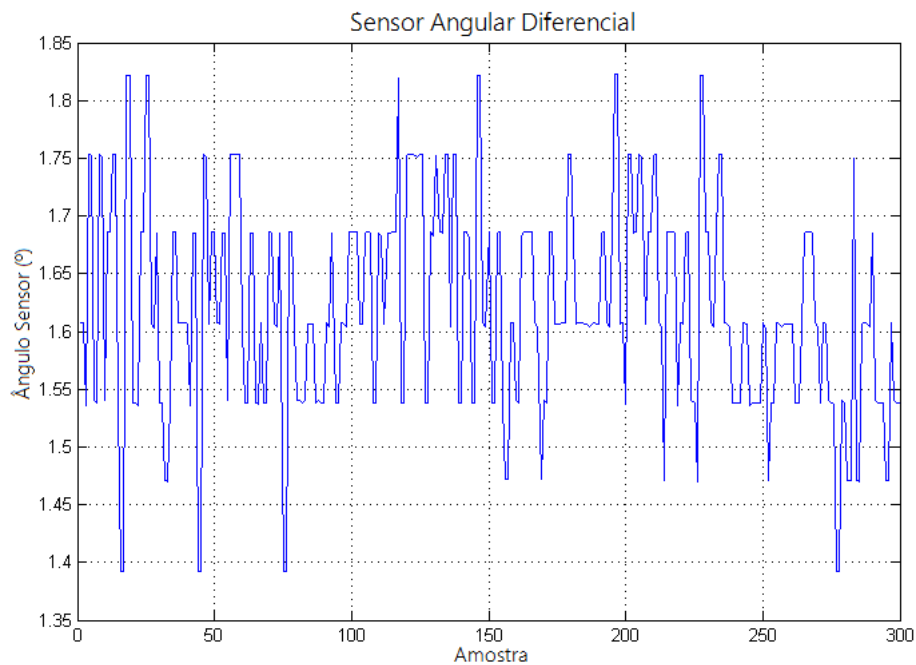


Figura 63: Ruído do sensor angular diferencial com 64 amostras por eixo sem filtro aplicado.

O valor da largura de banda, comparando com o caso de teste anterior (32 amostras), diminuiu em 17Hz, tornando-se desta forma demasiado reduzido. Note-se que o ganho na redução do desvio padrão do erro foi de apenas 0.0313° , não sendo por isso este o caso mais vantajoso.

Arquitetura com Filtro de 4ª Ordem

Aplicando-se um filtro de 4ª ordem ao caso de teste com 8 amostras por eixo de medição, comparativamente com o teste realizado anteriormente sem filtro, verifica-se uma melhoria no desvio padrão, sendo este agora de 0.1006° . No entanto, verificou-se uma diminuição de 10Hz na largura de banda, tomando esta agora o valor de aproximadamente 78Hz (Figura 64).

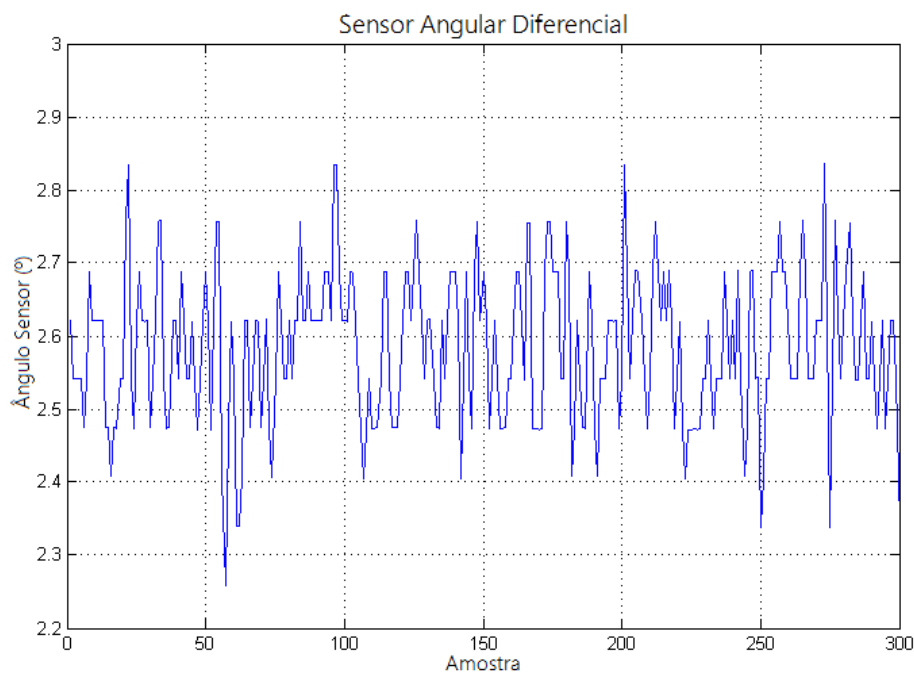


Figura 64: Ruído do sensor angular diferencial com 8 amostras por eixo com filtro aplicado.

Na Figura 65, que corresponde ao caso de teste de 16 amostras com filtro aplicado, verifica-se um ruído inferior ao do caso com 32 amostras sem filtro, obtendo-se um desvio padrão de apenas 0.0744° . De realçar o facto de a largura de banda ser de aproximadamente 58Hz, superior à do caso de teste comparado anteriormente.

Ao se gravar 32 amostras por eixo e com um filtro de 4ª ordem, o ruído adquirido apresentou um desvio padrão de 0.0596° , inferior a todos os casos anteriormente referidos. Porém, nesta situação a largura de banda é de aproximadamente 38Hz.

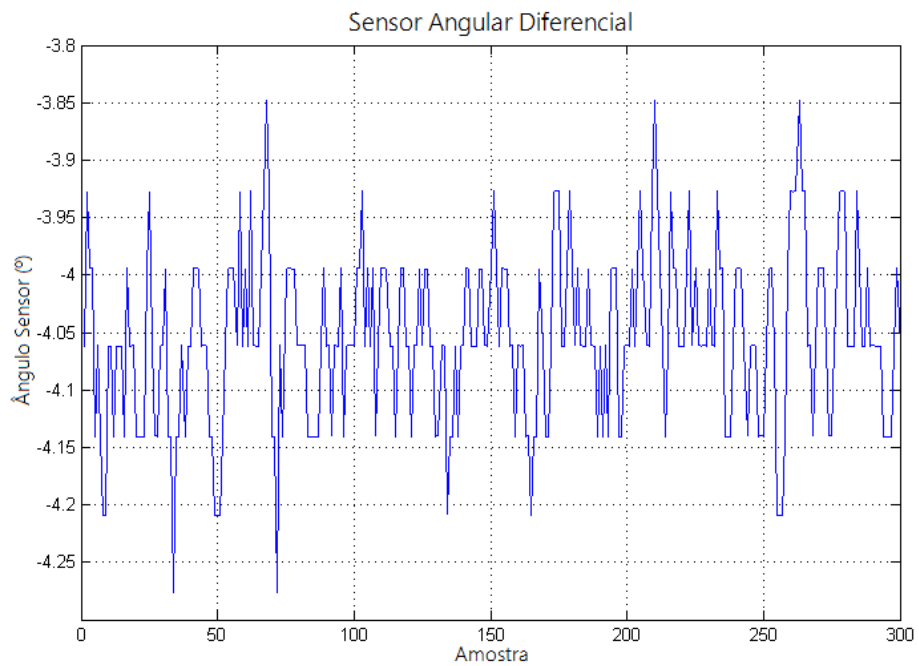


Figura 65: Ruído do sensor angular diferencial com 16 amostras por eixo com filtro aplicado.

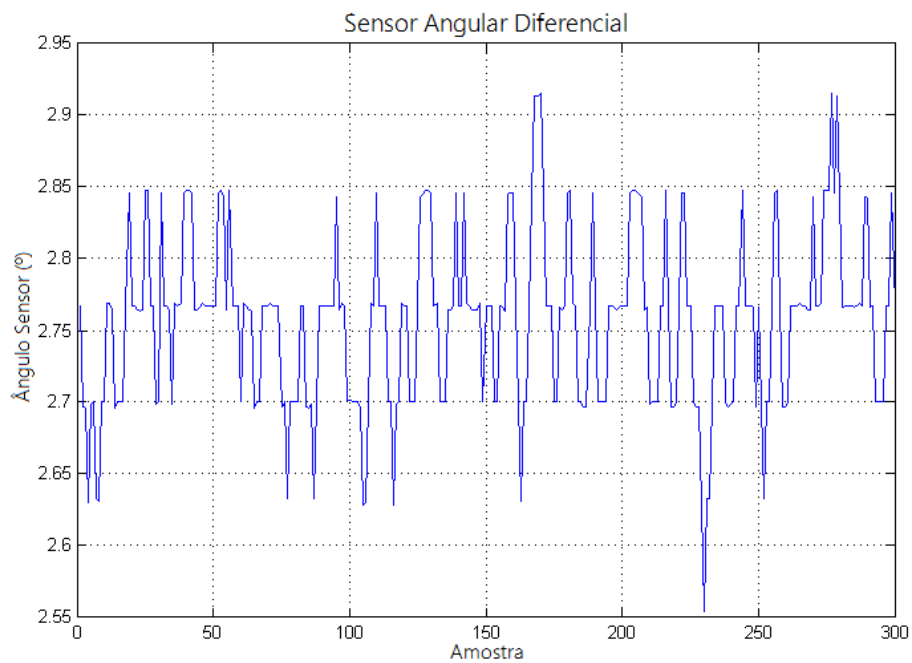


Figura 66: Ruído do sensor angular diferencial com 32 amostras por eixo com filtro aplicado.

Apesar de neste último caso de teste o ganho que se obteve na qualidade das leituras, comparativamente com o caso das 16 amostras com filtro aplicado, não ter sido muito significativo, o valor da largura de banda não é muito baixo. Por este facto, de momento este é o caso mais favorável a se adotar.

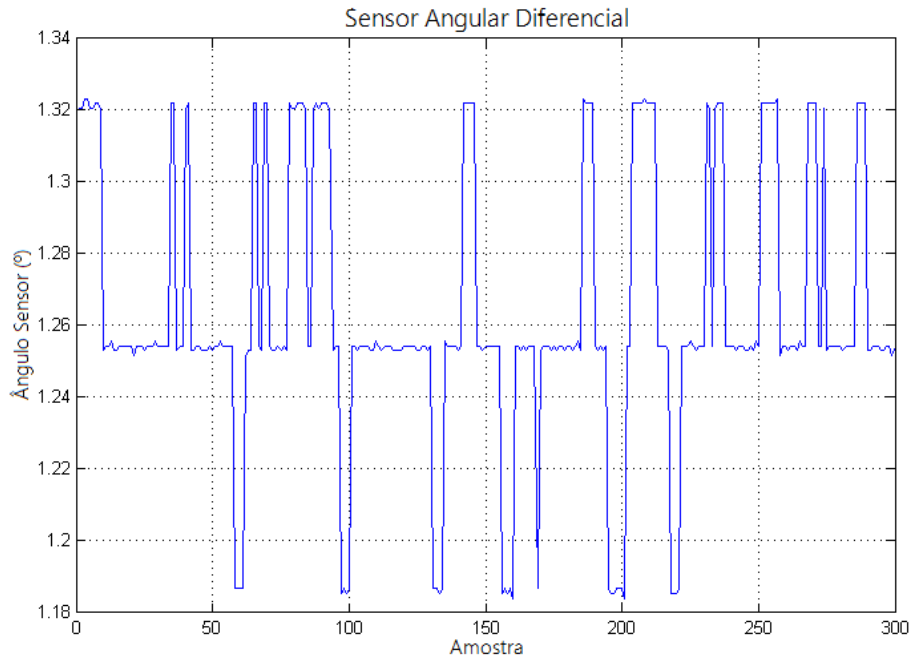


Figura 67: Ruído do sensor angular diferencial com 64 amostras por eixo com filtro aplicado.

Aumentando-se o número de amostras recolhidas para 64, com um filtro de 4ª ordem aplicado, obtém-se o melhor resultado de ruído, como era esperável, sendo o valor do desvio padrão de apenas 0.0380° . A largura de banda fica limitada a aproximadamente 23Hz, muito próxima da do caso de teste de 64 amostras sem filtro (Figura 67).

O ruído que se verifica é tão reduzido, que na Figura 67 apenas se consegue visualizar a resolução do sistema de leitura. Por este facto, e devido à baixa largura de banda que se verifica neste caso de teste, o caso de recolha de 16 amostras com filtro aplicado continua a ser o método de tratamento e recolha de dados mais favorável a adotar (tendo em conta a relação custo vs benefício).

5.2.3 Resolução

Ao longo desta subsecção são descritas dois tipos de análise da resolução, teórica e experimental, de modo a assim validar a concordância da resolução

esperada com a realmente obtida.

Análise Teórica

De acordo com a resposta de saída do sensor presente na Figura 68, verifica-se que para um campo magnético de $\pm 1.73\text{mT}$, este apresenta uma tensão de saída de $\pm 484\text{mV}$.

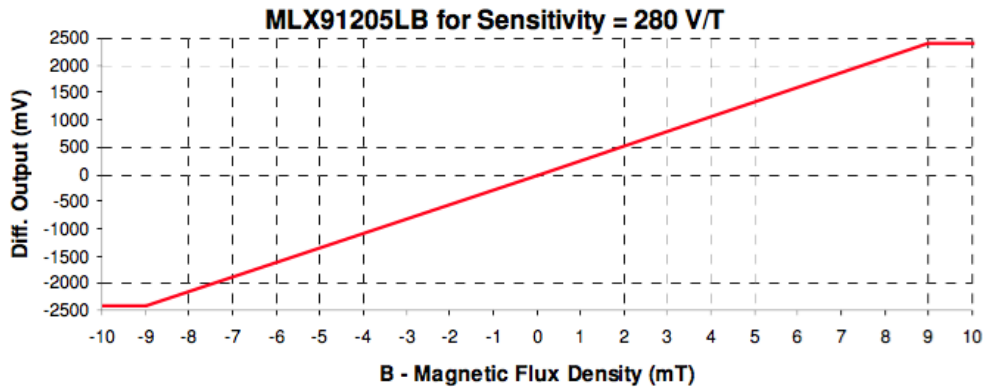


Figura 68: Sinal de saída do sensor MLX91205LB.

Com a utilização de um microcontrolador com um ADC de 12 bits e 5V como tensão de referência, possibilita a seguinte resolução:

$$\text{Resolução}_{\text{ADC}} = \frac{5\text{V}}{2^{12}} = 1.22\text{mV} \quad (17)$$

De modo a obter uma resolução de 0.1° , para um deslocamento angular de 90° , são necessárias 900 posições diferentes. Aplicando a medição diferencial ($2 \times 484 = 968\text{mV}$) e em função da resolução do ADC (1.2mV) obtém-se 793 posições diferentes:

$$\frac{968}{1.22} = 793 \text{ posições} \quad (18)$$

Assim, a resolução prevista para o sensor é 0.1135° não cumprindo neste momento a resolução de 0.1° (requisito inicial) para um deslocamento angular de 90° .

$$\text{Resolução}_{\text{SPA}} = \frac{90^\circ}{793} = 0.1135^\circ \quad (19)$$

A solução para cumprir este requisito passa pela diminuição da distância entre as bobinas, em função da diminuição da dimensão do PCB com os sensores magnéticos. Esta última poderá ser facilmente obtida a partir da integração dos dois sensores num único sensor de dois eixos. Por exemplo, para uma distância entre bobinas de 11mm, o campo magnético gerado é aproximadamente $\pm 2.25\text{mT}$, que se traduz numa tensão de saída de $\pm 630\text{mV}$, permitindo obter 1032 posições diferentes após aplicar a medição diferencial. No entanto, pode-se optar apenas por utilizar um ADC com resolução superior a 12 bits.

Análise Experimental

A resolução do sensor pode ser obtida a partir dos dados recolhidos para o cálculo do ruído presente nas leituras do sensor. Note-se que estes testes foram realizados para uma gama de leitura de -90° a 90° , esperando-se desta forma obter uma resolução de:

$$\text{Resolução}_{\text{SPA}} = \frac{180^\circ}{793} = 0.2270^\circ \quad (20)$$

Optou-se por analisar a escala de medida do ângulo de rotação para o caso de recolha de 8 amostras com filtro aplicado (Figura 64), de forma a se identificar não só a resolução do sistema de leitura, mas também a do sensor angular diferencial.

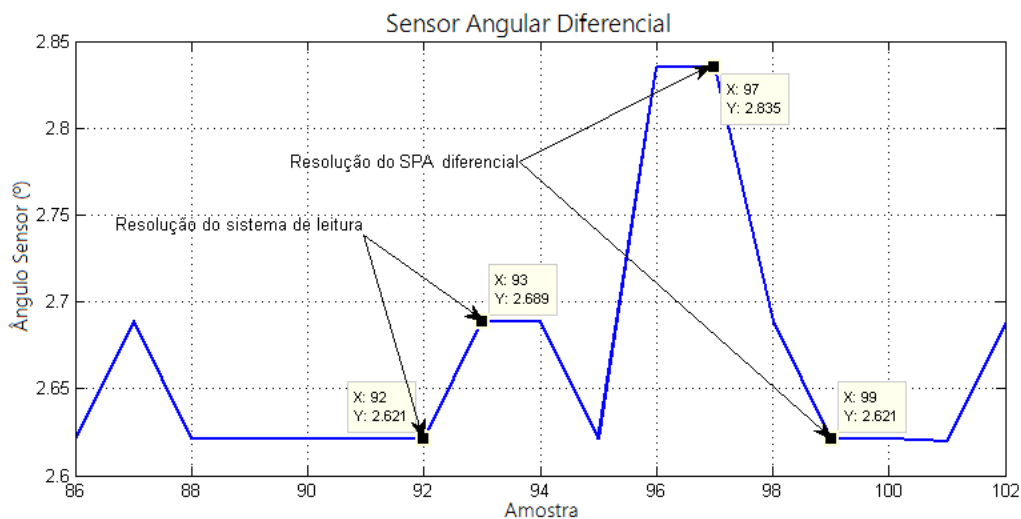


Figura 69: Resolução do sensor angular diferencial e resolução do sistema de leitura.

Interpretando-se os dados evidenciados na Figura 69, resultantes da visão em pormenor da Figura 64, pode-se concluir que o sensor apresenta uma resolução de 0.214° . Este valor difere do valor analítico devido a erros de aquisição, dado que a resolução do sistema de leitura⁴ é de 0.068° .

5.2.4 *Influência dos Campos Magnéticos Externos*

A compatibilidade eletromagnética do sensor, ao nível da influência de campos magnéticos externos, foi testada aproximando-se um íman ao protótipo desenvolvido. O objetivo do teste é validar a capacidade do sensor angular diferencial de eliminar a influência dos campos magnéticos externos, durante a obtenção do deslocamento angular.

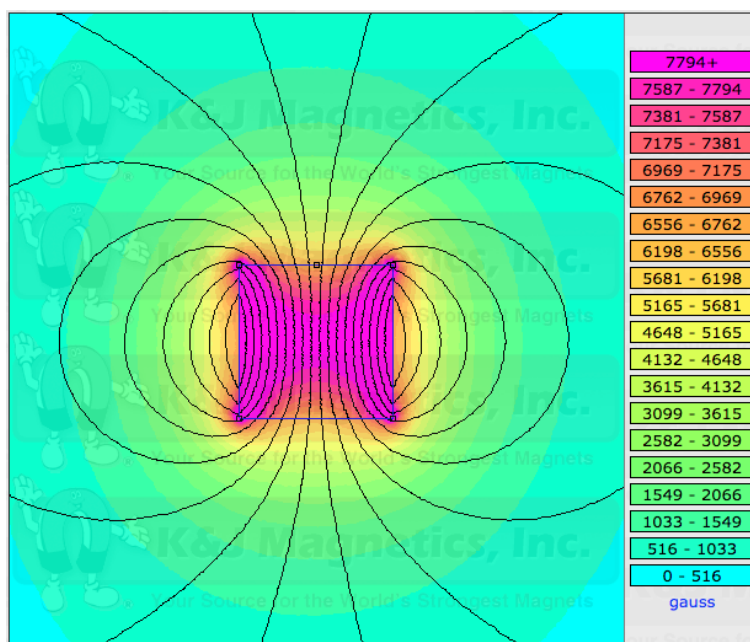


Figura 70: Campo imposto pelo íman no seu espaço envolvente [36].

No teste realizado aproximou-se do sensor (aproximadamente 1cm) um íman de NdFeB com $7 \times 7 \times 7$ mm de dimensão. Segundo o seu fabricante, a Figura 70 representa o campo magnético imposto pelo íman no espaço envolvente ao mesmo. Nesta pode concluir-se que à distância de 1cm, o campo magnético mínimo é de 51.6mT (516 gauss).

⁴ O sistema de leitura é composto pelo Arduino Uno.

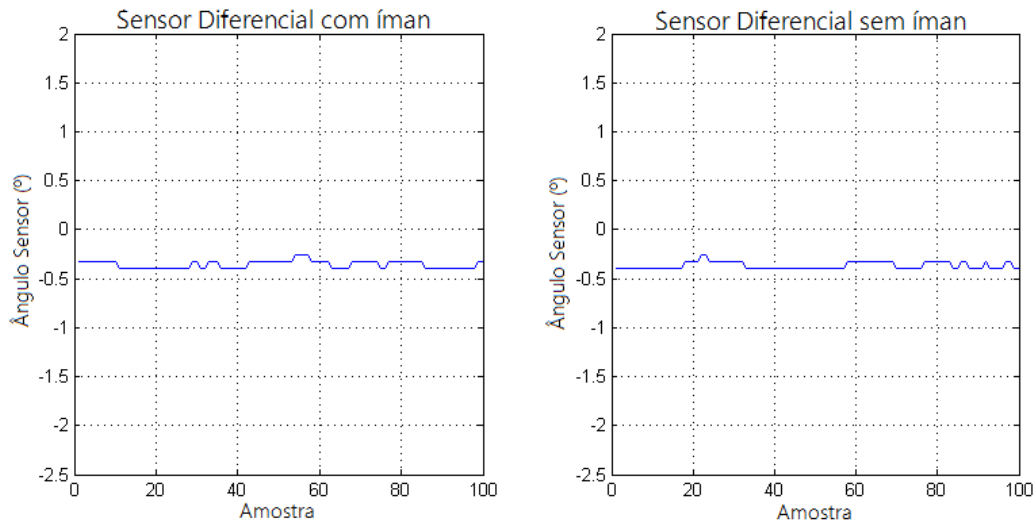


Figura 71: Interferência magnética no sensor angular diferencial.

Como se pode verificar na Figura 71, o ângulo de rotação mantém-se estável na presença do campo magnético externo superior a 3.2mT.

CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO

Ao longo da dissertação foram estudadas, mais aprofundadamente, duas abordagens para solucionar o problema das perturbações magnéticas nas leituras dos sensores de posição angular. Este destaque deveu-se ao facto de, com base no estudo prévio efetuado, estas se revelarem bastante mais promissoras, tendo em conta a relação custo vs benefício.

No que diz respeito à blindagem magnética, os resultados obtidos a partir dos modelos desenvolvidos, 2D e 3D, revelam que o encapsulamento permeável externo pode efetivamente contribuir para a atenuação dos campos externos parasíticos. Apesar da diminuição do campo magnético no interior do sensor o uso de encapsulamento permeável é uma solução a considerar no futuro.

De forma a tornar esta abordagem mais competitiva, pode-se então compensar a diminuição do campo magnético no interior do sensor através da utilização de ímanes permanentes (internos) com maior magnetização. Os desafios neste caso estão ao nível dos materiais plásticos, que necessitam da incorporação de materiais com alta permeabilidade (caso do níquel ou ferro), e que não estão facilmente disponíveis para injeção.

No âmbito do sensor angular diferencial desenvolvido, registaram-se algumas limitações, devido, essencialmente, às técnicas de prototipagem rápida usadas e às dimensões impostas ao modelo. Por exemplo, o requisito da resolução não foi cumprido devido ao elevado espaço entre as bobinas, causado pela PCB que contém os sensores magnéticos.

Com base nos testes realizados, pode-se concluir que o melhor valor de ruído é o obtido no caso de teste com 64 amostras e com filtro de 4ª ordem aplicado, porém este é o que apresenta a largura de banda mais baixa.

Apesar destas contrapartidas, ficou demonstrado que é possível ter um processo de fabrico e montagem desta solução pensada para produção em série. Ficou também provado que este é claramente um sensor inovador, pois para além

de ter os requisitos necessários em termos de especificações para o mercado automóvel, é imune a campos magnéticos externos.

Tendo em conta as limitações encontradas, medidas podem ser tomadas de forma a se obter um sensor mais apto e funcional. Para solucionar o problema da resolução¹ duas vertentes podem ser adotadas. Pode-se diminuir a distância entre as bobines, através da integração dos dois sensores magnéticos num único sensor de dois eixos, fazendo assim com que haja uma diminuição da dimensão desta PCB. Por exemplo, para uma distância entre bobines de 11mm, o campo magnético gerado é aproximadamente $\pm 2.25\text{mT}$, que se traduz numa tensão de saída de $\pm 630\text{mV}$, permitindo obter 1032 posições diferentes após aplicar a medição diferencial (como calculado na Secção 5.2.3).

$$\text{Resolução}_{\text{ADC}} = \frac{5\text{V}}{2^{12}} = 1.22\text{mV}$$

$$\frac{630 \times 2}{1.22} = 1032 \text{ posições}$$

$$\text{Resolução}_{\text{SPA}} = \frac{90^\circ}{1032} = 0.0872^\circ$$

No entanto, se não se pretender alterar a geometria do sensor angular, e devido à dificuldade atravessada para encontrar sensores magnéticos com estas propriedades, pode-se optar por utilizar outro microcontrolador com um ADC de, por exemplo, 16 bits, alcançando-se também deste modo a resolução pretendida.

$$\text{Resolução}_{\text{ADC}} = \frac{5\text{V}}{2^{16}} = 0.0763\text{mV}$$

$$\frac{968}{0.0763} = 12686 \text{ posições}$$

$$\text{Resolução}_{\text{SPA}} = \frac{90^\circ}{12686} = 0.0071^\circ$$

De forma à saída em PWM acompanhar a melhoria na resolução do sistema, seria necessário aumentar a resolução desta também para 16 bits.

No que diz respeito à largura de banda, para que esta seja superior, ter-se-á que aumentar a frequência de comutação da alimentação das bobines (ponte H) e aumentar a frequência do oscilador do microcontrolador.

¹ Resolução obtida é superior à estabelecida nos requisitos.

Tabela 6: Resultados das simulações sobre o sensor angular diferencial.

		Amostras (n)	Ruido (°)	Largura de banda (Hz)
Sensor Angular Diferencial	Com filtro	8	0.2511	88
		16	0.1634	63
		32	0.1250	40
		64	0.0937	23
	Sem filtro	8	0.1006	78
		16	0.0744	58
		32	0.0596	38
		64	0,0380	23

No que diz respeito à linearidade no sensor diferencial, melhores resultados se podem adquirir através do controlo mais rigoroso da distância entre as bobines e do alinhamento dos sensores magnéticos, verificando-se conseqüentemente uma melhoria na qualidade do sinal.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] A. Einstein. [Acedido em Julho 2015]. [Online]. Available: <http://rescomp.stanford.edu/~cheshire/EinsteinQuotes.html>
- [2] Q. Investigator. [Acedido em Julho 2015]. [Online]. Available: <http://quoteinvestigator.com/2014/10/20/dict/>
- [3] C. DeMorro. (2014, Jul.) Electric vehicle sales growing fast. [Acedido em Setembro 2014]. [Online]. Available: <http://cleantechnica.com/2014/07/14/electric-vehicle-sales-growing-exponentially/>
- [4] PWC. (2013, Nov.) Charging forward: 2012 electric vehicle survey—evs are here to stay. [Acedido em Setembro 2014]. [Online]. Available: <http://www.slideshare.net/PWC/charging-forward-2012-electric-vehicle-survey-evs-are-here-to-stay>
- [5] AMS. (2014, Jun.) New series of ams magnetic position sensors enables world's best accuracy at high rotation speeds. [Acedido em Setembro 2014]. [Online]. Available: <http://www.businesswire.com/news/home/20140622005076/en/Series-ams-Magnetic-Position-Sensors-Enables-World%E2%80%99s-Best-Accuracy-at-High-Rotation-Speeds>
- [6] U. do Minho (Escola de Engenharia). (2012) Hmiexcel - bosch car multimedia portugal. [Acedido em Julho 2015]. [Online]. Available: <http://www.eng.uminho.pt/Default.aspx?tabid=19&pageid=788&lang=pt-PT>
- [7] A. Masi, A. Danisi, R. Losito, and Y. Perriard, "Ironless position sensor with intrinsic immunity to external magnetic fields." IEEE Sensors, Oct. 2011, pp. 2018 – 2021.
- [8] E. Ramsden, *Helmholtz Coil*, 2nd ed. Newnes, 2006, ch. 10, p. 195.
- [9] M. S. Corporation. How do magnetic shields work? how_do_magnetic_shields_work.pdf. [Acedido em Outubro 2014]. [Online]. Available: <http://www.magnetic-shield.com/faqs-all-about-shielding.html>

- [10] Eletrowiki. (2012, Jan.) Permeabilidade magnética. [Acedido em Outubro 2014]. [Online]. Available: <http://eletrowiki.espbs.net/tiki-index.php?page=Permeabilidade+magnética>
- [11] J. Janesky, *Impact of External Magnetic Fields on MRAM Products*, AN3525.pdf, Nov. 2007, [Acedido em Outubro 2014]. [Online]. Available: http://www.freescale.com/files/32bit/doc/app_note/AN3525.pdf
- [12] J. D. Jackson, *Classical Electrodynamics*, 3rd ed. New York, London, Sydney: John Wiley & Sons Ltd., 1962, ch. 5.
- [13] J. L. Kirschvink, "Uniform magnetic fields and double-wrapped coil systems: Improved techniques for the design of bioelectromagnetic experiments," *Bioelectromagnetics*, no. 13, pp. 401–411, 1992.
- [14] E. Bronaugh, "Helmholtz coils for calibration of probes and sensors: limits of magnetic field accuracy and uniformity." IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Aug. 1995, pp. 72–76.
- [15] M. Williams. (2011, Feb.) Helmholtz coils. [Acedido em Novembro 2014]. [Online]. Available: <http://www.universetoday.com/84140/helmholtz-coil/>
- [16] PHYWE. Earth's magnetic field. p2430100.pdf. [Acedido em Outubro 2014]. [Online]. Available: <http://www.phywe.com/461/pid/30664/Determination-of-the-earths-magnetic-field.htm>
- [17] Hyperphysics. Magnetic field. [Acedido em Janeiro 2015]. [Online]. Available: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/magnetic/magfie.html#c1>
- [18] E. M. Purcell and D. J. Morin, *Electricity and Magnetism*, 3rd ed. Cambridge University Press, Jan. 2011.
- [19] D. Halliday, R. Resnick, and K. S. Krane, *Física 3*, 4th ed. Livros Técnicos e Científicos Editora S/A (LTC), 1996.
- [20] D. J. Griffiths, *Introduction to Electrodynamics*, 3rd ed. Prentice Hall, 1999.
- [21] M. P. N. Ribeiro, "Sensor de direção veicular sem fio para sistemas de iluminação inteligente de automóveis," Master's thesis, Universidade Federal da Bahia, Brasil, 2010.

- [22] J. W. Sutherland. Magnetic sensor. (Research Page) [Acedido em Janeiro 2015]. [Online]. Available: <http://www.mfg.mtu.edu/cyberman/machtool/machtool/sensors/magnetic.html>
- [23] Hyperphysics. Helmholtz coils. [Acedido em Outubro 2014]. [Online]. Available: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/magnetic/helmholtz.html>
- [24] D. Smith. Helmholtz coils. Department of Physics & Astronomy. College of Arts & Sciences. Embry-Riddle Aeronautical University [Acedido em Outubro 2014]. [Online]. Available: <http://physicsx.pr.erau.edu/HelmholtzCoils/>
- [25] N. Eyre, J. Patterson, and L. Holzgrafe, "Magnetic field consistency in helmholtz coils," Novembro 2012, (Unpublished) [Acedido em Fevereiro 2015]. [Online]. Available: http://jholzgrafe.com/wp-content/uploads/2012/12/Inductor_Lab.pdf
- [26] N. Stevens, L. Destrycker, and W. Verschelde, "Procedure to calculate the inductance of a circular loop near a metal plate," *Przegląd Elektrotechniczny*, no. 9, pp. 255–258, 2011.
- [27] Sources of magnetic fields. MIT Physics. [Acedido em Fevereiro 2015]. [Online]. Available: <http://web.mit.edu/8.02t/www/802TEAL3D/visualizations/coursenotes/modules/guide09.pdf>
- [28] G. Goodstal, *Inverters, Controllers and Applications*, 1st ed. Delmar Cengage Learning, 2012, ch. 9, pp. 129–131.
- [29] V. M. O. Silva, "Desenvolvimento de duas aplicações para controlo da velocidade de um motor de corrente contínua," Master's thesis, Universidade do Minho, Setembro 2008.
- [30] R. Montgomery and R. Mcdowall, *Control Modes*, 1st ed. Elsevier, 2008, pp. 20–21.
- [31] Microchip. Why buy pic microcontrollers (mcus) and dspic digital signal controllers (dscs)? [Acedido em Março 2015]. [Online]. Available: <http://www.microchip.com/pagehandler/en-us/products/picmicrocontrollers>
- [32] A. shop. Pickit 2 starter kit for pic10, pic12, pic16, pic18, pic24, dspic30, dspic33 devices. [Acedido em Março 2015]. [Online]. Available: http://www.acdcshop.gr/pickit2starterkitforpic16f69odevices-pi-4750_en.html

- [33] "PIC18F2423/2523/4423/4523 data sheet," Microchip Technology Inc., U.S.A., [Acedido em Março 2015]. [Online]. Available: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/39755B.pdf>
- [34] Arduino. Arduino main page. [Acedido em Abril 2015]. [Online]. Available: <http://www.arduino.cc>
- [35] C. Thompson, "Build it. share it. profit. can open source hardware work?" *Wired Magazine*, no. 16.11, pp. 166–176, Apr. 2008.
- [36] K. Magnetics. Magnetic field visualization single magnet in free space. [Acedido em Maio 2015]. [Online]. Available: <https://www.kjmagnetics.com/magfield.asp?pName=B444-N52>