



CAN FD NO SENSOR DE ÂNGULO DE DIREÇÃO DOS AUTOMÓVEIS

DIOGO MANUEL RICARDO REBELO

novembro de 2018

CAN FD NO SENSOR DE ÂNGULO DE DIREÇÃO DOS AUTOMÓVEIS

Diogo Manuel Ricardo Rebelo
Outubro de 2018

Departamento de Engenharia Eletrotécnica
Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores
Área de Especialização em Automação e Sistemas

Relatório elaborado para satisfação parcial dos requisitos da Unidade Curricular de
Tese/Dissertação do Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Candidato: Diogo Manuel Ricardo Rebelo, Nº 1100411, 1100411@isep.ipp.pt

Orientação científica: Prof. Carlos Felgueiras, mcf@isep.ipp.pt

Empresa: Bosch Car Multimédia Portugal, S.A

Supervisão: José Azevedo, JoseAzevedo.Goncalves@pt.bosch.com

Hernani Correia, Hernani.Correia@pt.bosch.com



Departamento de Engenharia Eletrotécnica
Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores
Área de Especialização em Automação e sistemas

2018

Agradecimentos

Em primeiro lugar queria deixar um agradecimento à Bosch, em especial ao Eng. Hernani Correia e ao Eng. José Azevedo por me terem ajudado na concretização deste trabalho e contribuindo para o meu desenvolvimento pessoal e profissional. Foram pessoas sempre prontas a ajudar em tudo que fosse necessário nunca esquecendo a motivação.

Um grande agradecimento à equipa de desenvolvimento da Bosch de Braga, em especial aos engenheiros Filipe Arantes (*HW developer*), Rui Faria (*Safety Expert*), Pedro Marques (*HW developer*), Filipa Ferreira (*HW developer*), João Santos (*SW developer*), Helder Vilas Boas (*SW developer*) e Elisabeth Oliveira (*DFMEA moderator*). É um orgulho poder trabalhar diariamente com todos eles, e durante o desenvolvimento deste projeto foram muito importantes para o sucesso do mesmo. Gostaria de estender os meus agradecimentos aos colegas da Bosch que não estão em Braga que são os engenheiros Andreas Kurz (*Component Manager*), Jens Otterbach (*Project leader*) e Cengiz Nizamettin (*EMC expert*).

Quero agradecer ao Prof. Carlos Felgueiras, por todo o apoio, disponibilidade e interesse demonstrado durante a elaboração desta tese. Em cada reunião que tive com ele sempre me transmitiu os seus conhecimentos e experiências. Contribuindo durante todo o processo para que o resultado final fosse de encontro às minhas expectativas.

Gostaria de agradecer em especial aos meus pais António Rebelo e Maria Irene Rebelo, que sempre me incentivaram durante o mestrado, e são um grande apoio na minha vida. Queria também agradecer ao Sr. Fernando Durães, D^a. Arminda Santos, Hugo Durães, Mafalda Queiroz e á minha futura sobrinha Inês Durães.

Por fim queria agradecer à Joana, que sempre me apoiou em particular na fase final da escritura da tese, por estar sempre ao meu lado nos bons e maus momentos, com ela aprendi a nunca desistir dos meus sonhos.

Resumo

A indústria automóvel está em constante mudança. A cada dia são desenvolvidos mais automóveis, com maior inteligência artificial e mais funcionalidades. As comunicações utilizadas são cada vez mais variadas e, por sua vez, exigem maior velocidade e segurança.

A segurança do automóvel constitui-se uma prioridade e a Bosch sempre demonstrou ter um papel fundamental em fornecer soluções seguras, como é o caso do *Electronic Stability Program (ESP)*. Trata-se de um sistema de segurança que ajuda o condutor a não perder o controlo do veículo, através da introdução de vários sensores no automóvel. Um destes sensores é o *Steering Angle Sensor (SAS)*, que tem como função fornecer o ângulo da viragem do volante. A comunicação entre o SAS e o ESP tipicamente é feita através do protocolo de comunicação *Controller Area Network (CAN)*, protocolo desenvolvido pela Bosch bastante robusto. Com a evolução das tecnologias, os fabricantes irão alterar as suas comunicações nos seus veículos, de modo a terem uma maior velocidade de transmissão. Surge assim o *Flexible Data rate Controller Area Network (CAN FD)*, que é uma evolução do CAN, mas que torna possível o envio de dados mais rapidamente. Este protocolo de comunicação já está a ser implementado nalgumas aplicações pelos fabricantes de automóveis, sendo que num futuro próximo, será a única versão.

Perante esta situação, foi proposto pela Bosch uma prova de conceito ao nível do Hardware (HW), uma nova versão de um sensor SAS mas com CAN FD.

Palavras-Chave

CAN, CAN FD, SAS, SPI, *safety*, *Hardware*, *Software*, *ESP*, requisitos e *Bosch*.

Abstract

The automotive industry is always changing. Each day are developed vehicles with more artificial intelligence and with more features. The communications that are being used, have more variety, more speed and more safety.

The safety in a vehicle is a high priority and Bosch always have a fundamental concern to develop safety solutions, like Electronic Stability Program (ESP). This is a system which helps the driver to not lose the control of the vehicle, with the introduction of some sensors in the car. One of this sensors is the *Steering Angle Sensor (SAS)*, which has the purpose of give the angle of the steering wheel. The communication between the SAS and ESP typically is made by Controller Area Network (CAN), which was developed by Bosch and it is very robust. With the evolution of technologies, the manufacturers will change the communication inside their vehicle, to have more transmission speed. Then appears the Flexible Data rate Controller Area Network (CAN FD), which is an evolution of CAN, but allow to send data faster. This communication protocol is already implemented in some applications by automotive manufacturers, and in a near future the CAN FD will be the only versions.

Because of this, Bosch propose a concept proof in Hardware (HW) level, a new versions of SAS but with CAN FD.

Keywords

CAN, CAN FD, SAS, SPI, *safety, Hardware, Software, ESP, requirements and Bosch.*

Nota ao leitor

Grande parte da literatura referente a esta dissertação utiliza bastante termos da língua inglesa para definir termos e significados. Como consequência desta utilização, decidiu-se utilizar o estilo itálico para distinguir termos e significados que a sua tradução de língua portuguesa para a língua inglesa não era a mais adequada. Este estilo será também utilizado para destacar uma determinada palavra ou expressão.

Os acrónimos são apresentados em maiúsculos e em estilo normal, sendo que a palavra que é utilizada para o acrónimo está a negrito de modo a aumentar a clareza do leitor.

Índice

Agradecimentos	i
Resumo	iii
Abstract	v
Nota ao leitor	vii
Índice	ix
Índice de figuras	xi
Índice de tabelas	xv
Acrónimos	xvii
1. Introdução	1
<i>A empresa Bosch</i>	1
<i>Contextualização do trabalho</i>	2
<i>Objetivos</i>	4
<i>Calendarização</i>	5
<i>Organização do relatório</i>	6
2. Conceitos fundamentais	7
2.1 <i>Electronic Stability Program</i>	7
2.2 <i>Steering Angle Sensor</i>	9
2.3 <i>Controller Area Network</i>	11
2.4 <i>Flexible Data-rate Controller Area Network</i>	14
2.5 <i>Serial Peripheral Interface</i>	18
3. Estado da arte	21
3.1 <i>Sensores de angulo de direção</i>	21
3.2 <i>Sistemas de ângulo de direção integrados</i>	28
3.3 <i>Análise comparativa</i>	29
4. Proposta de solução	33

4.1.	<i>Análise do design atual</i>	33
4.2.	<i>Análise de requisitos</i>	39
4.3.	<i>Proposta da solução</i>	41
4.4.	<i>Requisitos adicionais</i>	42
5.	Implementação	43
5.1.	<i>Soluções tecnológicas</i>	43
5.2.	<i>Análise comparativa das soluções</i>	48
5.3.	<i>Justificação da solução</i>	50
5.4.	<i>Tecnologias disponíveis</i>	52
5.5.	<i>Análise comparativa e decisão do HW</i>	54
5.6.	<i>Análise detalhada do HW escolhido</i>	56
5.7.	<i>Requisito e análise da solução</i>	63
5.8.	<i>Análise design do sistema</i>	64
6.	Teste e validação	73
6.1	<i>Ferramentas de SW utilizadas</i>	74
6.2	<i>Equipamentos utilizados</i>	78
6.3	<i>Adaptações necessárias</i>	82
6.4	<i>Planos de teste</i>	83
6.5	<i>Resultados do teste</i>	87
6.6	<i>Dificuldades e imprevistos</i>	91
6.7	<i>Resumo do esforço do trabalho</i>	92
7.	Conclusões	95
7.1.	<i>Resumo do trabalho realizado</i>	95
7.2.	<i>Melhorias futuras</i>	96
7.3.	<i>Apreciação pessoal</i>	97
	<i>Referências documentais</i>	99

Índice de figuras

Figura 1 – Composição de um sistema ESP de base da Bosch [10].	8
Figura 2 – Exemplo do funcionamento com um sensor magnético[11].	10
Figura 3 – Exemplo do funcionamento com dois sensores magnéticos[11].	11
Figura 4 – Topologia básica de um barramento CAN.	12
Figura 5 – Valores de tensão na comunicação CAN [14].	12
Figura 6 – Organização de uma trama CAN [15].	13
Figura 7 – Diferença na transmissão de dados entre CAN e CAN FD [17].	15
Figura 8 – Diferença na trama entre CAN e CAN FD [17].	16
Figura 9 – Esquema de um barramento SPI [21].	18
Figura 10 – Exemplo de SAS da Bosch [23].	23
Figura 11 – Exemplo de SAS Type 6000 da Bourns [24].	23
Figura 12 – Exemplo de Type 6002 da Bourns [25].	24
Figura 13 – Exemplo de SAS SX-4429 TT Electronic [26].	25
Figura 14 – Exemplo de SAS da Methode electronics [27].	25
Figura 15 – Exemplo de SAS da Furukawa [28].	26
Figura 16 – Exemplo de TAS da Valeo [29].	28
Figura 17 – Exemplo de TAS da Bourns [30].	29
Figura 18 – Princípio de funcionamento do SAS.	34
Figura 19 – Diagrama funcional do SAS.	35

Figura 20 – Diagrama da interligação do microcontrolador.	36
Figura 21 – Diagrama da interligação dos sensores de ângulo.	36
Figura 22 – Diagrama da interligação do regulador de tensão.	37
Figura 23 – Diagrama da interligação do CAN <i>transceiver</i>.	38
Figura 24 – Diagrama da interligação do conector do SAS.	38
Figura 25 – Diagrama de proposta de solução.	41
Figura 26 – Diagrama de solução tecnológicas.	44
Figura 27 – Diagrama de solução 1.	45
Figura 28 – Diagrama de solução 2.	46
Figura 29 – Diagrama de solução 3.	47
Figura 30 – Diagrama de soluções final.	51
Figura 31 – Diagrama de solução com MCP2517FD.	52
Figura 32 – Diagrama de solução com TCAN4550.	53
Figura 33 – <i>Footprint</i> do TCAN4550.	56
Figura 34 – Frequência gerada por oscilador externo.	59
Figura 35 – Frequência gerada pelo microcontrolador.	59
Figura 36 – Modo de teste do <i>transceiver</i>.	61
Figura 37 – Esquema utilizado como base para o esquema[32].	64
Figura 38 – Diagrama de consumos.	70
Figura 39 – Diagrama de tempo de descarga.	72

Figura 40 – Ambiente gráfico do CR8000.	74
Figura 41 – Ambiente gráfico do DOORS[36].	75
Figura 42 – Ambiente gráfico do IAR <i>Embedded Workbench</i>.	75
Figura 43 – Ambiente gráfico do Applilet3.	76
Figura 44 – Ambiente gráfico do Renesas <i>Flash Programmer</i>.	76
Figura 45 – Ambiente gráfico do <i>CANalyzer</i>.	77
Figura 46 – Ambiente gráfico do <i>Picoscope 6</i>[37].	78
Figura 47 – Fonte de alimentação e osciloscópio utilizados [38][39].	79
Figura 48 – Ambiente gráfico do <i>Picoscope 6</i>[37].	79
Figura 49 – FMEA <i>board</i> do SAS.	80
Figura 50 – Placa de desenvolvimento do <i>TCAN4550</i>.	80
Figura 51 – <i>PicoScope 2000 series</i>.	81
Figura 52 – <i>Renesas Programmer</i> [40].	81
Figura 53 – Adaptação de HW.	82
Figura 54 – Diagrama do teste do LED.	84
Figura 55 – Configuração do <i>Data Timing</i>.	84
Figura 56 – Diagrama do teste do SPI.	85
Figura 57 – Diagrama do teste do CAN FD.	86
Figura 58 – Setup de teste do SPI.	87
Figura 59 – Resposta do <i>TCAN4550</i> ao pedido do ID.	88

Figura 60 – Resposta do TCAN4550 visto do Picoscope.	88
Figura 61 – Setup de teste para o teste do CAN FD.	89
Figura 62 – Resultados do teste do CAN FD no CANalyzer.	89
Figura 63 – Resultados do teste do CAN FD no Picoscope.	90

Índice de tabelas

Tabela 1 - Calendarização do projeto.	5
Tabela 2 – Especificações técnicas de alguns sensores.	27
Tabela 3 – Comparação dos vários tipos de sensores.	30
Tabela 4 – Matriz de requisitos do SAS.	39
Tabela 5 – Matriz de requisito adicional.	42
Tabela 6 – Comparação das soluções.	48
Tabela 7 – Análise comparativa MCP2517FD vs. TCAN4550.	54
Tabela 8 – Funções dos pinos do TCAN4550.	57
Tabela 9 – Requisitos da solução.	63
Tabela 10 – WCA do regulador de tensão.	65
Tabela 11 – WCA do regulador do microcontrolador.	66
Tabela 12 – WCA do regulador dos sensores magnéticos.	67
Tabela 13 – WCA do regulador do TCAN4550.	68
Tabela 14 – Resumo do esforço do trabalho.	93

Acrónimos

- ABS – *Anti-lock Braking System*
- ACK – *Acknowledgement*
- ADC – *Analog to Digital Converter*
- AEC – *Automotive Electronics Council*
- ASIL – *Automotive Safety Integrity Level*
- BRS – *Bit Rate Switch*
- CAN – *Controller Area Network*
- CAN FD – *Flexible Data-rate Controller Area Network*
- CANH – *CAN High*
- CANL – *CAN Low*
- CC – *Chassis Control*
- CRC – *Cyclic Redundancy Check*
- DEL – *Delimiter*
- DFMEA – *Design Failure Mode and Effect Analysis*
- DI – *Digital Input*
- DIO – *Digital Input/Output*
- DLC – *Data Length Code*
- DO – *Digital Output*

- DSC – *Dynamic Stability Control*
- EMC – *Electromagnetic Compatibility*
- EOF – *End-Of-Frame*
- ESI – *Error State Indicator*
- ESP – *Electronic Stability Program*
- FDF – *FD Format*
- FMEA – *Failure Mode Effects Analysis*
- FTA – *Fault Tree Analysis*
- GND – *Ground*
- GPIO – *General Purpose Input Output*
- HW – *Hardware*
- I/O – *Input/Output*
- IDE – *Identifier Extension Bit*
- LED – *Light-Emitting Diode*
- LIN – *Local Interconnet Network*
- LSB – *Less Significant Bit*
- MCU – *Microcontroller Unit*
- MISO – *Master Input Slave output*
- MOSI – *Master Output Slave Input*

- NAT – **Number Based Document Administration Tool**
- OBD – ***On-Board Diagnostics***
- PCB – ***Printed Circuit Board***
- PWM – ***Pulse With Modulation***
- RRS – ***Remote Request Substitution***
- RTR – ***Remote Transmission Request***
- SAS – ***Steering Angle Sensor***
- SCLK – ***Serial Clock***
- SENT – ***Single Edge Nibble Transmission***
- SOF – ***Start-Of-Frame***
- SPC – ***Short PWM Code***
- SPI – ***Serial Peripheral Interface***
- SS – ***Slave Select***
- SW – ***Software***
- TAS – ***Torque Angle Sensor***
- UART – ***Universal Asynchronous Receiver-Transmitter***
- VIH – ***Voltage Input High***
- VIL – ***Voltage Input Low***
- VOH – ***Voltage Output High***

VOL – **Voltage Output Low**

VSC – **Vehicle Stability Control**

WCA – **Worst Case Analysis**

1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo é feita uma pequena apresentação da empresa na qual o projeto foi desenvolvido que é, neste caso, a Bosch. Também é feito um enquadramento do tema onde se irá desenrolar este projeto. Apresenta também os principais objetivos do trabalho e a calendarização.

A EMPRESA BOSCH

A empresa Robert Bosch, frequentemente denominada por Bosch, é uma empresa multinacional, cuja sua atividade se destina principalmente ao desenvolvimento de produtos eletrónicos. Fundada em 1886 na cidade alemã de Estugarda por Robert Bosch, esta empresa sempre foi conhecida pelas suas soluções de elevada qualidade e fiabilidade nas mais diversas áreas, embora seja no ramo automóvel onde apresenta maior número

de soluções e investe mais no desenvolvimento de novas tecnologias. Presentemente, pode-se afirmar que quase todas as marcas de automóveis utilizam pelo menos um componente Bosch nos seus veículos.

Além da boa qualidade que apresenta nos seus produtos, a Bosch ao longo da sua história foi sempre uma empresa que se destacou no que diz respeito a novas tecnologias para o mercado automóvel. Algumas destas tecnologias são usadas em todos os veículos de um modo obrigatório, em particular aquelas que apresentam funções de segurança e assim contribuam para diminuir os acidentes nas estradas. É precisamente o caso do *Electronic Stability Program (ESP)* que foi um sucesso, e foi um produto desenvolvido pela Bosch em parceria com a Mercedes-Benz [1] [2]. Outro exemplo é o *Anti-lock Braking System (ABS)* um produto que foi desenvolvido pela Bosch em parceria com a Mercedes-Benz [3] [4].

Outro papel de destaque da Bosch é no que diz respeito à comunicação entre os diferentes equipamentos eletrónicos dos veículos, como por exemplo o *Controller Area Network (CAN)* que foi desenvolvida pela Bosch em 1983 [5].

Atualmente, a Bosch está presente em Portugal, nomeadamente em três localizações:

- Braga - *Car Multimédia e Chassis Control*
- Ovar - *Security systems*
- Aveiro – Termotecnologia

Atualmente a Bosch tem cerca de 402.000 colaboradores distribuídos por 125 países[6].

CONTEXTUALIZAÇÃO DO TRABALHO

Desde da criação do primeiro automóvel [7] que esta industria tem estado em constante evolução. Nos ultimos anos tem-se assistido a um aumento exponencial na

evolução dos automóveis em aspetos altamente críticos e complexos na condução, como por exemplo, a segurança, estabilidade, conforto e interatividade carro-condutor. Foram desenvolvidas novas tecnologias, que têm como principal função garantir ao máximo a segurança do condutor e dos passageiros, quando deparados com situações adversas durante a condução. Os fabricantes de automóveis procuram tornar os seus automóveis cada vez mais apelativos, do ponto de vista de preço e interatividade mas que, ao mesmo tempo, sejam cada vez mais seguros e fiáveis. Uma das empresas que mais soluções oferece neste domínio é a Bosch. Esta, como é do conhecimento geral, apresenta uma vasta gama de produtos das mais diferentes áreas, que são especialmente conhecidos pela sua excelente qualidade de desenvolvimento, construção e durabilidade. Desde sempre, que o maior foco da Bosch foi a indústria automóvel, na qual os seus produtos são utilizados pela maioria dos fabricantes a nível mundial. Como empresa de grande dimensão, a Bosch tem várias divisões espalhadas pelo mundo inteiro com o objetivo de continuar a ser inovadora, e a oferecer soluções de qualidade. A divisão *Chassis Control* (CC), tem um papel bastante importante no que diz respeito às soluções que oferece para o mercado, uma vez que, desenvolve produtos de auxílio à condução, como é exemplo o *Electronic Stability Program* (ESP). Este utiliza a informação em vários sensores para funcionar na sua plenitude, i.e., evitar que o condutor perca o controlo do carro acionando o sistema de travagem. Uma das informações que o ESP utiliza é proveniente do *Steering Angle Sensor* (SAS) ou sensor de ângulo de direção, que também é desenvolvido pela divisão de CC. Este sensor é responsável por fornecer a informação do ângulo de direção do volante a cada instante durante e todo o ciclo de condução. Deste modo, caso o veículo não siga a trajetória pretendida pelo condutor, o ESP auxilia a correção da trajetória com base na informação do ângulo. Este sensor já é utilizado há vários anos e tem sido um dos produtos de maior sucesso. Na medida em que passou a ser obrigatório, todos os carros a partir de 2012 implementaram o ESP, visto que, diminuía em grande percentagem o número de acidentes nas estradas [8]. Nesse sentido o SAS tornou-se num excelente produto.

A nível de comunicação, o único meio utilizado entre SAS e o ESP, é o protocolo de comunicação *Controller Area Network* (CAN). Contudo, e por força da evolução das

tecnologias, torna-se cada vez mais necessário desenvolver sistemas mais rápidos e complexos de apoio à condução, pelo que, será necessário fazer uma atualização no modo como o sensor comunica com a unidade central. É precisamente com este objetivo que surge o Flexible *Data-rate Controller Area Network* (CAN FD), que permite enviar um maior número de dados e numa velocidade superior. Este protocolo de comunicação visa substituir a longo prazo o CAN. Os fabricantes já estão a preparar as próximas gerações de automóveis com esta tecnologia, como substituição do CAN.

A competitividade exige que a Bosch desenvolva novas soluções de mobilidade que tenham tecnologia CAN FD implementado. Nesse sentido foi proposto pela Bosch como tema para dissertação do Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e Computadores, ramo de Automação e Sistemas, o desenvolvimento e prova de conceito de um SAS, que seja capaz de comunicar, usando o protocolo CAN FD. Esta alteração constitui um grande desafio, na medida em que, não há sistemas semelhantes no mercado que comuniquem por CAN FD, pelo que, irá implicar um estudo profundo a vários níveis tais como *Hardware* (HW), *Software* (SW), *Safety*, teste e validação.

O presente trabalho tem então como objetivo, analisar e comprovar a viabilidade da utilização do protocolo CAN FD nos produtos SAS desenvolvidos pela Bosch, ou seja, conseguir provar o conceito de que mantendo os principais componentes do SAS, é possível comunicar CAN FD.

OBJETIVOS

O principal objetivo deste trabalho, consiste em verificar a viabilidade, do ponto de vista de conceito, em implementar o protocolo de comunicação CAN FD num SAS, sem descurar os requisitos referidos, e.g Qualidade, preço e segurança. O estudo baseia-se interatividade em duas áreas, HW e SW.

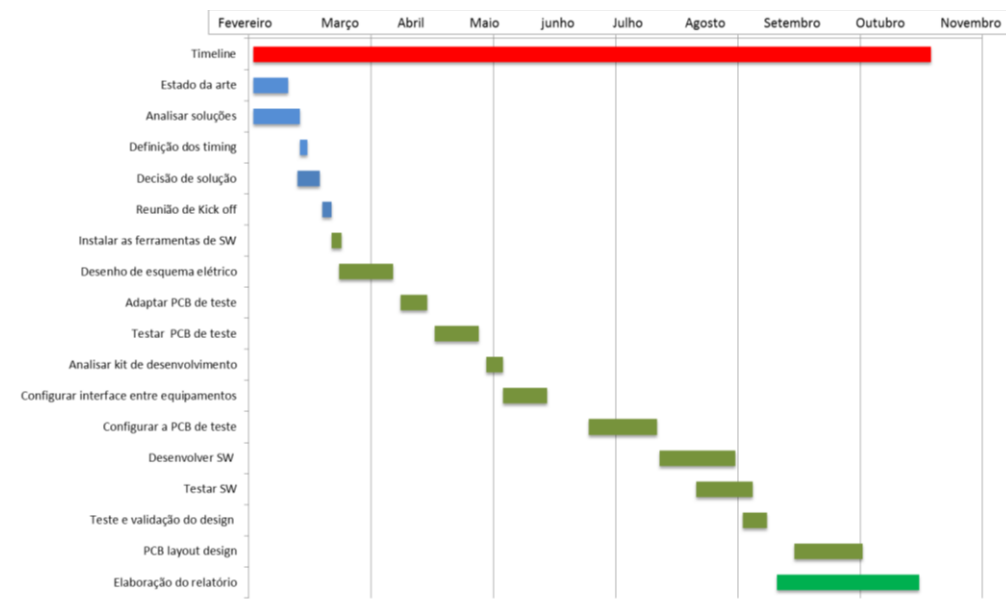
Como este protocolo de comunicação é bastante recente e o mercado ainda se encontra em desenvolvimento para estes tipo de soluções, será também um objetivo do

trabalho verificar as soluções disponíveis para iniciar produção em série para grandes quantidades num espaço de 1-2 anos.

CALENDARIZAÇÃO

O desenvolvimento do projeto foi estruturado conforme se pode observar a Tabela 1, onde se pode visualizar o tempo dedicado a cada processo do projeto.

Tabela 1 - Calendarização do projeto.



O traço com a cor vermelha representa o *timeline* o projeto na íntegra, desde a sua proposta até à finalização total. A azul representa-se a primeira fase do projeto, que consistiu na definição do projeto e do conceito e onde tiveram lugar vários estudos e discussões de modo a verificar qual a solução mais adequada.

A segunda fase, que está representada a verde, trata-se do *design* do conceito propriamente dito. Esta fase é toda referente ao desenvolvimento da solução encontrada na primeira fase, desde instalação de ferramentas até ao teste e validação final do *design*.

ORGANIZAÇÃO DO RELATÓRIO

No primeiro capítulo é feita uma pequena apresentação da empresa no qual este trabalho foi realizado, um enquadramento do problema onde se irá realizar o projeto, apresentados os objetivos e calendarização.

O segundo capítulo aborda alguns conceitos fundamentais de modo a que seja mais fácil a compreensão do tema por parte do leitor.

No terceiro capítulo está descrito o estado da arte, e aborda um estudo de mercado que foi efetuado de modo a verificar os equipamentos que neste momento estão no mercado com funções semelhantes.

O quarto capítulo está a proposta de solução em que apresenta o funcionamento do sistema atual, os requisitos atuais e a proposta de solução do projeto.

No quinto capítulo é apresentada a implementação, que descreve o desenvolvimento do da solução ao longo do projeto.

O sexto capítulo diz respeito ao teste e validação, onde são apresentados os resultados obtidos, e as dificuldades ao longo do projeto.

No sétimo e último capítulo são apresentadas as conclusões e algumas direções de trabalhos futuros.

2. CONCEITOS FUNDAMENTAIS

Este capítulo tem como objetivo explicar um conjunto de conceitos importantes tanto para uma fácil compreensão do trabalho como de algumas das decisões que foram tomadas durante o desenvolvimento do projeto.

2.1 *ELECTRONIC STABILITY PROGRAM*

O Electronic Stability Program (ESP) é um sistema eletrónico de controlo de chassis que tem como objetivo melhorar a estabilidade do veículo quando se deteta perda ou redução de tração no veículo [9]. O sistema ESP, ao detetar que a direção que o veículo está a tomar é diferente da direção do volante, irá automaticamente acionar o sistema de

travagem de modo a aumentar o nível de tração de modo a que o condutor tenha maior controlo sobre o veículo [9]. Alguns sistemas ESP podem não só iniciar ações no sistema de travagem como adicionalmente podem intervir diretamente no controlo do motor (e.g. acelerar), e procurar assim, retomar a direção original do automóvel. A Figura 1 permite identificar alguns dos componentes de um sistema ESP da Bosch num automóvel.

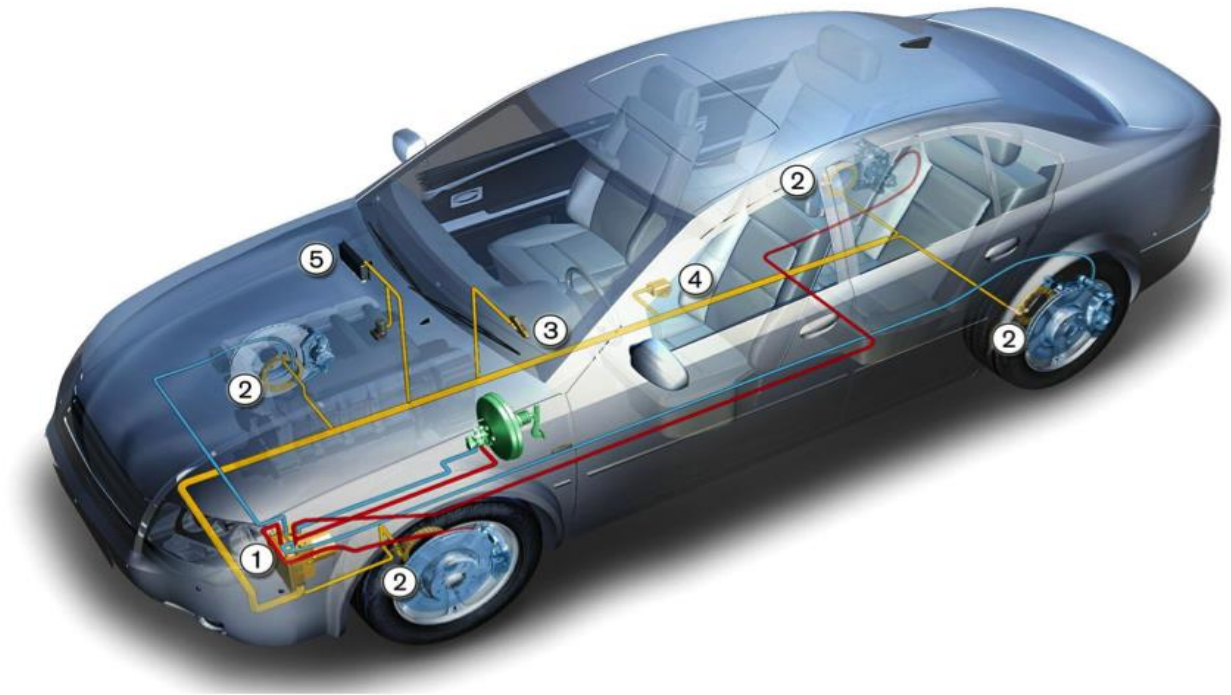


Figura 1 – Composição de um sistema ESP de base da Bosch [10].

Como se pode observar na Figura 1, os principais componentes que constituem um sistema típico ESP são os seguintes [10]:

1. Unidade hidráulica de ESP integrado com controlo de motor – este componente controla o sistema de travões das rodas.
2. Sensor de velocidade da roda – Este sensor é usado para medir a velocidade de cada roda, possibilitando saber se uma roda tem tração quando comparado com as restantes.
3. Sensores de ângulo de direção (SAS) – O objetivo deste sensor é fornecer a informação posição do volante.

4. *Yaw-rate* e sensor de aceleração lateral – Estes dois sensores acabam por se complementar mutuamente. Enquanto o *yaw-rate* regista os movimentos no eixo do Y, o sensor lateral mede a aceleração lateral do veículo. Combinando estes sensores é possível determinar e comparar a intenção do condutor e o estado do veículo.
5. Comunicação com a gestão do motor – O sistema ESP permite comunicar com a unidade de controlo do motor. Deste modo, e a título de exemplo, o torque motor pode ser reduzido se o condutor acelerar demais.

Atualmente os sistemas em cima referidos fazem parte da base para o ESP, pelo que é previsível que haverá cada vez mais *inputs* de outros sensores que ajudam a uma atuação mais eficaz.

Como este sistema apresentou uma taxa de sucesso muito significativo, no que diz respeito à prevenção de acidentes, o Parlamento Europeu em 2009 determinou que este sistema seria obrigatório para todos os veículos fabricados a partir de 2011 [8]. Esta regulação começou na Europa e esperar-se que seja alargada, dentro em breve, para o resto do mundo.

Existem várias designações para este tipo de sistema dependendo do fabricante. A BMW por exemplo o designa-o por *Dynamic Stability Control* (DSC), enquanto a Toyota utiliza o *Vehicle Stability Control* (VSC), De facto o princípio de funcionamento desta sistema é muito semelhante.

2.2 STEERING ANGLE SENSOR

O *Steering Angle Sensor* (SAS) é um dos componentes eletrónicos que estão presentes na indústria automóvel. Este sensor em particular tem como principal função fornecer a informação do ângulo da direção do veículo. O princípio de funcionamento deste sensor não é uniforme para todos os fabricantes. Alguns utilizam sensores magnéticos, outros utilizam sensores óticos, existindo cada vez mais tipologias diferentes e mais soluções. Atualmente o SAS que a Bosch desenvolve utiliza como os sensores

magnéticos (*hall sensors*). A Figura 3 permite visualizar o princípio de funcionamento com um duas rodas dentadas e um sensor magnético.

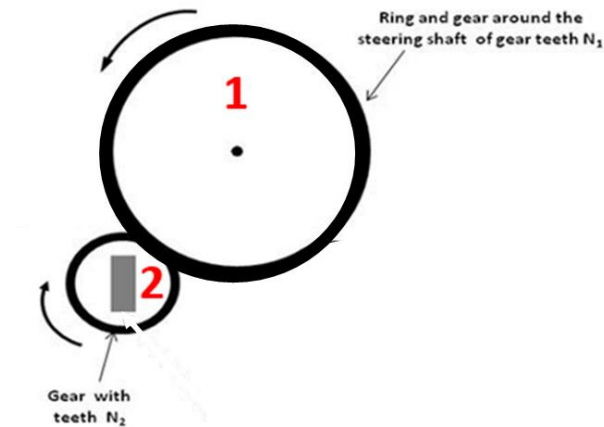


Figura 2 – Exemplo do funcionamento com um sensor magnético[11].

O funcionamento deste tipo de SAS consiste em colocar uma roda dentada de diâmetro (roda 1) igual á coluna de direção, e outra roda dentada mais pequena (roda 2) que tem propriedades magnéticas, vai estar em contacto com a roda dentada maior. O sensor magnético colocado em baixo da roda dentada mais pequena (roda 2) vai detetar a variação do campo magnético sempre que este se move por força do movimento do volante. Os dados recolhidos são enviados para um microcontrolador que os irá processar e enviar através do CAN.

Com a configuração com apenas uma de uma roda dentada (roda 2) e um sensor magnético, só é possível obter um valor de ângulo de 360°, o que não corresponde à realidade de uma condução normal em que o volante vira bastante mais que 360°. Por este motivo é adicionado uma segunda roda dentada de diferente dimensão (roda 3) e um segundo sensor magnético de modo a que seja possível obter um maior número de voltas. A Figura 3 permite visualizar como é o princípio de funcionamento com um três rodas dentadas e dois sensores magnéticos.

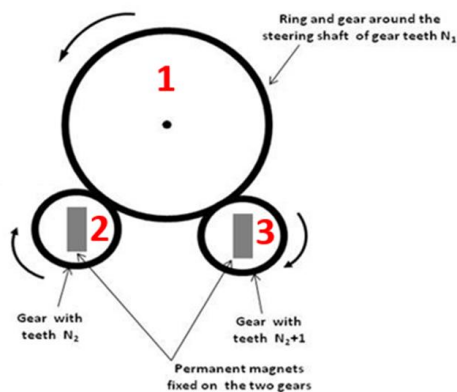


Figura 3 – Exemplo do funcionamento com dois sensores magnéticos[11].

O número de voltas irá ser determinado com a correlação da dimensão e do número de dentes de cada umas das três rodas. As rodas 2 e 3 têm diferentes diâmetros e permitem aumentar a precisão de informação recolhida, um princípio de funcionamento semelhante ao nónios.

2.3 CONTROLLER AREA NETWORK

O *Controller Área Network* (CAN) é um protocolo de comunicação que é utilizado principalmente pela industrial automóvel devido à sua robustez e alta performance. Na comunicação CAN, ao contrário do SPI, não existe um *master* que faz a gestão da comunicação, mas sim um barramento dados no qual todos os seus intervenientes podem enviar e receber dados desde, que a disponibilidade no barramento assim o permita. A típica trama de CAN permite velocidades até 1Mbit/s e dados até 8bytes por trama [12]. De salientar que a comunicação CAN apresenta uma elevada complexidade na transmissão de dados. O protocolo CAN funciona por prioridades, i.e., é possível priorizar e hierarquizar a mensagem que se pretende enviar primeiro, através do *Identifier* (ID). O ID é uma característica da trama do CAN que permite ao barramento, reconhecer o dispositivo e identificar que as mensagens que por ele irão ser enviadas terão prioridade sobre outros dispositivos. Quanto mais baixo for valor definido no ID do dispositivo maior é a sua prioridade. A Figura 4 permite visualizar a tipologia de básica de um barramento CAN.

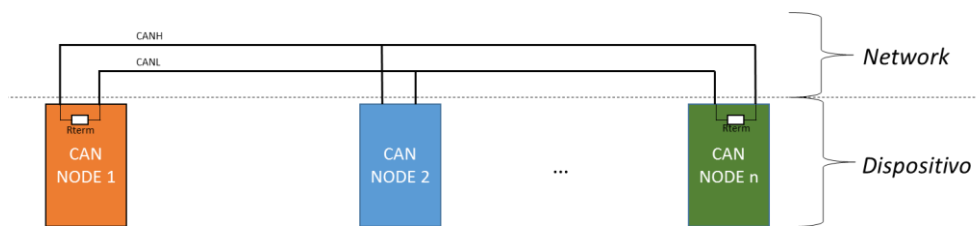


Figura 4 – Topologia básica de um barramento CAN.

Ao nível de camada física de um barramento CAN, com 1Mbit/s de velocidade é possível ter um comprimento de 40m no barramento, o que para um automóvel é um valor aceitável. Contudo, quando mais pequena for a velocidade maior é o comprimento físico [13]. É recomendado, utilizar resistências entre o CANH e o CANL de 120Ω , que devem de ser inseridas nas terminações do barramento.

Na Figura 4 é possível visualizar as resistências de terminação designadas por R_{term} , em que são inseridas no primeiro e último *node* (dispositivos). De salientar que estas resistências são usadas com o propósito de manter a mesma impedância no cabo para evitar flutuações nos sinais[14].

Do ponto de vista elétrico, o CAN comunica através de um par diferencial CAN *high* (CANH) e CAN *Low* (CANL), e durante a sua comunicação apresenta apenas dois estados designados por *dominante* e *recessivos*. O estado *dominante* representa o nível lógico 0 que corresponde ao valor de 3.5V na linha de CANH e 1,5V na linha de CANL O estado *recessivo*, representa o nível lógico 1 que corresponde o valor de 2,5V em ambas as linhas de CANH e CANL [12]. A Figura 5 mostra os valores de tensão dos sinais CANH e CANL.

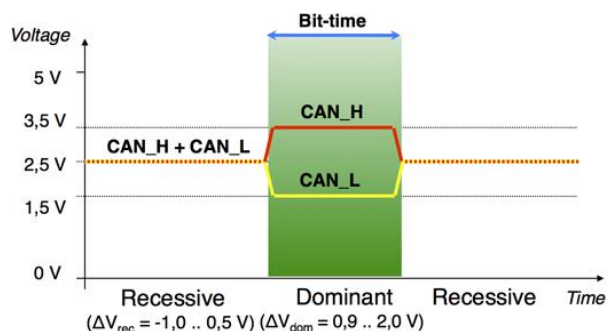


Figura 5 – Valores de tensão na comunicação CAN [14].

Ao nível de trama, o CAN está organizado por diferentes partes:

- Arbitração que onde se encontra o ID e o pedido de transmissão da trama,
- Controlo
- Dados
- Detecção de erros
- *Acknowledgement*.

O comprimento da trama varia entre os 108 bits e os 128 bits. Na Figura 6 representa-se a trama CAN[13].

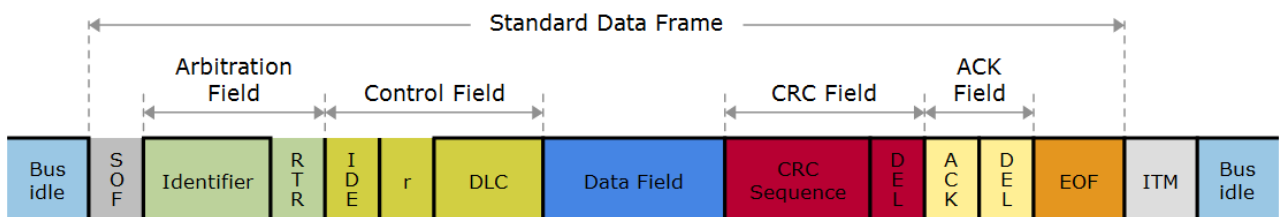


Figura 6 – Organização de uma trama CAN [15].

Na Figura 6, pode-se identificar as seguintes partes da trama CAN[15]:

- *Start-of-frame* (SOF) – Início da transmissão (1 bit).
- *Identifier* (ID) – Corresponde ao identificador único do equipamento no barramento (11 bits)
- *Remote transmission request* (RTR) – Este bit fica em estado dominante quando a informação é requerida por outro node. Basicamente com este bit é possível, é como se houvesse um pedido específico de dados de forma remota e não apenas enviar e receber dados (1 bit).

- *Identifier B (IDE)* – Corresponde ao *ID* quando em modo de *extended ID*, este valor pode ir de 1 a 29 bits de identificadores. Quando usar a versão sem *extended ID*, este bit deve de esta a (0 a 18 bits).
- *r* – Reservado (2 bits)
- *Data length code (DLC)* – Número de bytes de dados a enviar, em CAN (4 bits).
- *Data filed* – Dados a enviar. No protocolo CAN, é possível enviar até 8 bytes de dados (0 a 8 bytes).
- *Cyclic redundancy check (CRC)* – Este parâmetro vai verificar se houve erros no envio de dados (15 bits).
- *Cyclic redundancy check Delimiter (DEL)* - Quando não há erro no CRC este bit fica recessivo (1 bit)
- *Acknowledgment (ACK)* - Quando dominante representa ACK positivo quando recessivo representa ACK negativo, ou seja, a mensagem falhou (1 bit).
- *Acknowledgment delimiter (DEL)* – *Flag* de erro do ACK. Tem que ser recessivo para ser entregue corretamente (1 bit).
- *End of frame (EOF)* – Fim de envio da trama (7 bits).

2.4 FLEXIBLE *DATA-RATE CONTROLLER AREA NETWORK*

O *Flexible Data-Rate Controller Area Network* (CAN FD) é uma atualização do protocolo CAN, em que partilham a mesma camada física e apresentam algumas semelhanças. No entanto, a nível de trama, há diferenças significativas. Há dois novos bits de controlo na trama de CAN FD:

- A primeira para habilitar o novo formato de trama com diferente comprimento de dados

- A segunda para mudar a velocidade de transmissão [16].

Resumidamente, a grande diferença entre o CAN e o CAN FD é a de que este último consegue enviar os dados a uma velocidade diferente do resto da trama. A grande vantagem consiste em que se consegue enviar informação muito mais rapidamente (até 5 Mbit/s) comparado com o CAN (até 1Mbit/s). Além desta vantagem, o CAN FD consegue enviar um maior número de dados. A Figura 7 apresenta um exemplo uma mensagem de CAN de 8 bytes de dados, uma mensagem CAN FD com os mesmo 8 Bytes de dados e uma mensagem o CAN FD com 64 bytes de dados.

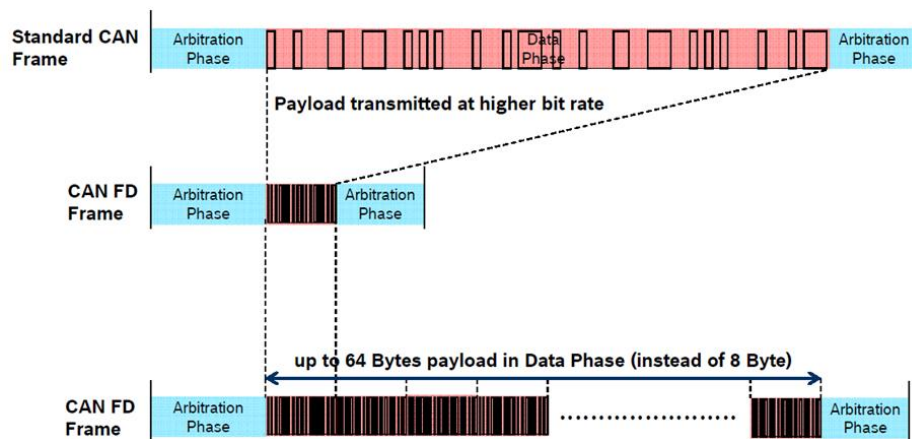


Figura 7 – Diferença na transmissão de dados entre CAN e CAN FD [17].

É importante salientar que apenas o campo de dados da trama que sofre essa alteração da velocidade, ou seja, enquanto o CAN envia uma mensagem com uma velocidade de 500Kbits/s, o CAN FD envia uma mensagem em 500Kbits/s na parte de arbitragem (ID, CRC DLC, etc.) e no campo dos dados (*data field*) envia a 2Mbit/s. Na Figura 8, apresenta as diferenças entre a trama de CAN e CAN FD.

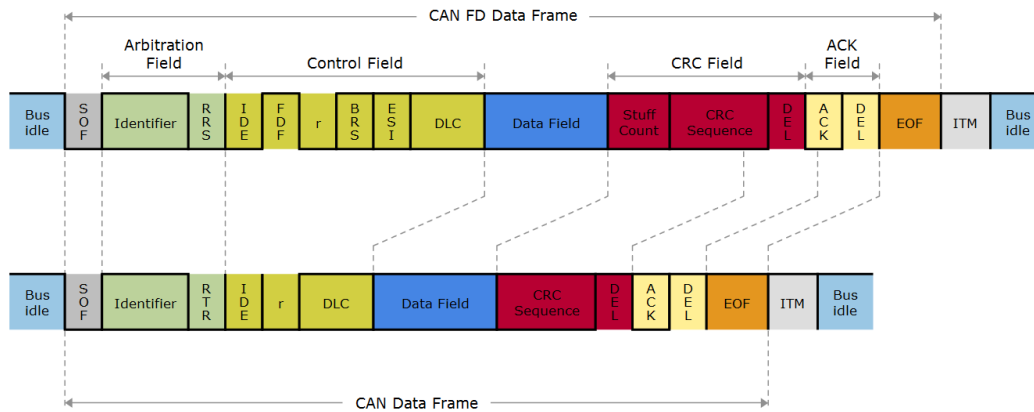


Figura 8 – Diferença na trama entre CAN e CAN FD [17].

Como se pode visualizar na Figura 8, as principais diferenças são os seguintes:

- *Remote request substitution* (RRS) – O CAN FD não suporta pedidos remotos de dados (RTR) [18] (1 bit).
- *FD format* (FDF) – Quando este bit ativo indica que vai ser utilizado o formato CAN FD em vez do formato CAN (1 bit)
- *Bit rate switching* (BRS) – Este bit ativo significa que vai os dados vão ser enviados com diferente velocidade do resto da trama (1 bit).
- *Data length code* (DLC) – Número de bytes de dados a enviar, em CAN FD. Enquanto em CAN termina em 1000 = 8 Bytes, em CAN FD termina em 1111= 64 bytes (4 bits).
- *Data field* – Dados a enviar. No protocolo CAN FD, é possível enviar até 8bytes de dados (0 a 64 bytes).
- *Error state indicator* (ESI) – Este indicador foi adiciona para maior controlo de errors (1 bit).
- *Stuff count* - É o bit paridade [19] (1 bit).

De forma resumida, a substituição do CAN pelo CAN FD apresenta as seguintes vantagens:

- Maior velocidade na transferência de dados.
- Maior pacote de dados a enviar.
- Maior disponibilidade na troca de informação uma vez que a informação passa mais rápido.
- Compatibilidade

Este novo barramento apresenta, no entanto, algumas desvantagens, e que se enumera de seguida:

- A compatibilidade neste barramento só é possível a nível físico, se os *transceivers* suportarem CAN FD em modo de filtro, ou seja, reconhecerem e filtrarem as tramas CAN FD de modo a não ter tramas de erro (*error frames*)
- A tecnologia ainda é recente (2012), pelo que só nos últimos anos é que as empresas de semicondutores e circuitos integrado têm oferecido soluções que apresentem esta tecnologia (como por exemplo microcontroladores, CAN FD *transceivers*).
- Pelo facto do desenvolvimento de componentes ser ainda é muito de recente, leva a que ainda seja um preço elevado.
- Como o CAN FD apresenta velocidade mais elevada de comunicação, também é necessário ter cuidado adicional na parte eletrónica, visto que apresentam transições mais rápidas onde as capacidades parasita aparecem com maior frequência. Por este motivo é necessário ter bastante cuidado do projeto de esquemático e principalmente no desenho de *Printed Circuit Board* (PCB)

2.5 SERIAL PERIPHERAL INTERFACE

Desenvolvido pela Motorola, o *serial peripheral interface* (SPI) é uma interface de comunicação série e síncrona que permite que dois ou mais dispositivos comuniquem entre si de maneira bidirecional ao mesmo tempo, ou seja, *full duplex*[20]. O protocolo SPI é constituído por um *Master* e um ou mais *slaves*. A Figura 9 mostra como se encontra organizada uma comunicação SPI.

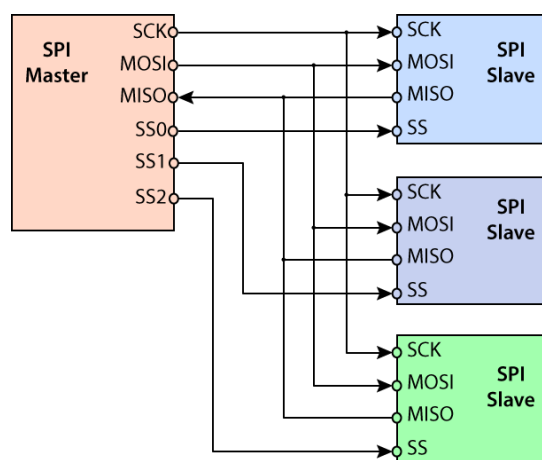


Figura 9 – Esquema de um barramento SPI [21].

A partir da Figura 9 é possível verificar que a interface entre o *master* e os *slaves* que são os seguintes:

- *Master output slave input* (MOSI) – Transmite dados do *master* para o *slave*
- *Master input slave output* (MISO) – Transmite dados *slave* para o *master*
- *Serial clock* (SCLK) – Linha de control realizado pelo *master*, que regula o fluxo dos dados é o que define a velocidade da comunicação)
- *Slave Select* (SS) – Linha de controlo que permite ao *master* endereçar o *slave* ao qual pretende enviar informação

O princípio de funcionamento de uma comunicação SPI começa pelo o *master* a definir a frequência do *clock* (SCLK), que deverá ser sempre igual ou inferior à frequência máxima permitida pelo *slave*. Caso contrário não será possível haver sincronização e, por consequência, não haverá comunicação (os valores mais comuns nesta comunicação vão de 1MHz até 20MHz). Após esta configuração, o *master* irá selecionar o *slave* através do SS, forçando no neste pino o valor lógico 0 (poderá haver casos excepcionais em que o valor lógico para ativar o sinal SS seja 1 mas não é muito habitual. Após o sinal SS estar selecionado, o *master* irá enviar informação para *slave*, ao que este irá responder (e.g., verificar qual é o valor que está num endereço), ou irá despoletar uma ação, (e.g. alterar um registo ou enviar um output para outro equipamento). Quando não há mais dados para transmitir o master desativa o sinal de *clock* e, caso haja mais *slaves* no barramento, desativa o SS [22]. De salientar que no SPI é possível ligar múltiplos *slaves's* ao mesmo tempo, mas, só é possível comunicar com um de cada vez.

3. ESTADO DA ARTE

Este capítulo apresenta um estudo de mercado de modo a analisar equipamentos semelhantes ao atual SAS comercializado pela Bosch, mas também para verificar a existência de equipamentos com a nova função que se pretende implementar, i.e., um SAS com CAN FD.

3.1. SENSORES DE ANGULO DE DIREÇÃO

Neste subcapítulo irão ser apresentados alguns sensores de ângulo de direção que fornecem única e exclusivamente o ângulo de direção, e que estão a ser disponibilizados

aos fabricantes de automóveis. Inicialmente irá ser apresentado o sensor de ângulo de direção da Bosch, após o que se apresentam os restantes sensores.

3.2.1. *Steering Angle Sensor* da Bosch

O sensor de ângulo de direção da Bosch é um sensor que é colocado na volante, e mede o ângulo ao longo do tempo. O seu princípio de funcionamento, como já foi explicado no capítulo de “Conceitos Fundamentais”, baseia-se numa roda dentada no qual o volante está fisicamente ligada, e a duas rodas dentadas mais pequenas, mas com número de dentes diferentes. Estas duas rodas dentadas em particular apresentam propriedades magnéticas. Por baixo de cada roda dentadas, localiza-se um sensor que deteta variação de campo magnético da roda dentada, o que corresponde à informação do ângulo da coluna de direção. Os valores destes sensores são convertido e enviados para um microcontrolador, que irá recolher os dados, realizar os cálculos, e enviar a informação para o exterior do sensor via CAN. De salientar que este sensor fornece o ângulo absoluto do sensor, i.e., que mesmo que se desligue o veículo, se rode o volante e se ligue novamente, o ângulo apresenta sempre o valor real, e não o valor que presente quando foi desligado[23]. Além do sistema ESP, este sensor apresenta uma larga variedade de sistemas em é utilizado tais como:

- *Adaptive cruise control*
- *Driver drowsiness detecion*
- *Parkin aid*
- *Parking assistant*

Na Figura 10 observa-se um exemplo de um SAS da Bosch.



Figura 10 – Exemplo de SAS da Bosch [23].

3.2.2. Non-Contacting Multiturn Angle Sensor Type 6000 Bourns

O sensor de ângulo de direção da Bourns apresenta um princípio de funcionamento semelhante ao da Bosch, funciona pelo princípio de rodas dentadas magnéticas e sensores que detetam variação do fluxo magnético. Na Figura 11 permite visualizar um exemplo deste sensor.

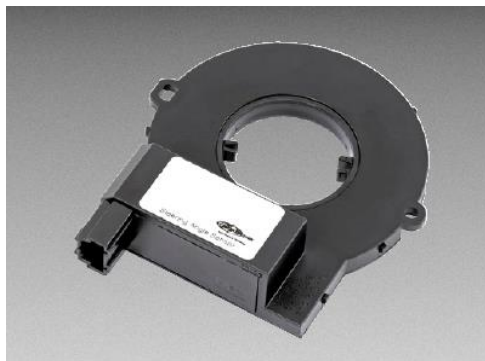


Figura 11 – Exemplo de SAS Type 6000 da Bourns [24].

3.2.3. Non-Contacting Multiturn Angle Sensor Type 6002 Bourns

Este sensor é muito semelhante ao *Type 6000*, mas apresenta algumas melhorias no que diz respeito à velocidade do ângulo, um *range* de alimentação maior, e também apresenta uma nova funcionalidade que o sensor da Bosch não tem disponível: que possibilita realizar *upgrade* a partir do *on-board diagnostics (OBD)*. A Figura 12 permite visualizar um exemplo deste sensor.

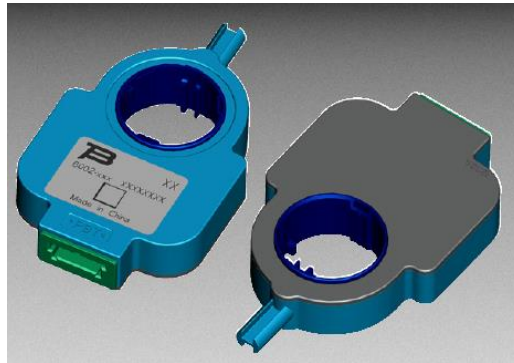


Figura 12 – Exemplo de Type 6002 da Bourns [25].

3.2.4. SX-4429 TT Electronic

Este sensor apresenta uma série de características diferentes dos sensores anteriores. O seu princípio de funcionamento baseia-se na presença de potenciômetro que medem a rotação do ângulo e irá fornecer esse valor em resistência. Neste sensor em particular, é desconhecido se existe processamento de dados no seu interior na medida em que não é possível visualizar o seu diagrama no *datasheets*. No entanto, a sua saída é em valores analógicos ao contrário dos outros sensores que é por CAN. A Figura 13 permite visualizar um exemplo deste sensor.

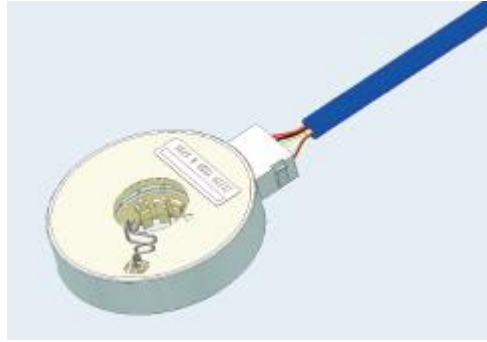


Figura 13 – Exemplo de SAS SX-4429 TT Electronic [26].

3.2.5. SAS da Methode Electronics

Este sensor apresenta uma particularidade diferente no que diz respeito ao tipo de tecnologia que usa para identificar o ângulo de viragem. Utiliza sensores óticos para determinar o ângulo, além dos sensores magnéticos. Internamente a roda dentada que está ligada ao volante apresenta diferentes irregularidades para que o sensor ótico possa ler diferentes valores. A Figura 14 permite visualizar um exemplo deste sensor.



Figura 14 – Exemplo de SAS da Methode electronics [27].

3.2.6. SAS da Furukawa

O sensor da Furukawa apresenta uma particularidade especial e que é de medição do ângulo ser feita através da indução eletromagnética. Quando o material condutor é inserido na região do fluxo magnético pela bobina, a corrente irá fluir entre o material condutor e as bobinas, o que irá provocar uma alteração no valor da indutância. Este valor de indutância calculado irá fornecer o ângulo [28]. A Figura 14 permite visualizar um exemplo deste sensor.



Figura 15 – Exemplo de SAS da Furukawa [28].

3.2.7. Comparação dos produtos

A maioria dos sensores apresentam várias semelhanças no que diz respeito à tecnologia utilizada, diferindo apenas em alguns pormenores, enquanto os restantes utilizam outra tecnologia de medição de ângulo. Para que seja possível analisar de forma mais detalhada, utilizou-se uma tabela de forma a fazer uma comparação de característica. A Tabela 2 permitia visualizar a comparação das características entre sensores.

Tabela 2 – Especificações técnicas de alguns sensores.

Características	SAS Bosch	Bourns 6000	Bourns 6002	SX-4429	Method Electronics	Furukawa
Tecnologia de sensores	Magnético	Magnético	Magnético	Contacto	Ótico e magnético	Indução
Range ângulo	+/- 1080 °	+/- 780 °	+/- 780 °	+/- 900 °	+/- 1080 °	+/- 750 ° (relativa) +/- 225° (absoluta)
Resolução	0,1°	0,1°	0,1° (opcional <0,1°)	-	0,1°	1°
Range velocidade ângulo	+/- 1016 %/s	+/- 1016 %/s	+/- 2000 %/s	-	2500 %/s	+/- 1080 %/s
Interface	CAN	CAN	CAN	Analógico (raw data)	CAN, LIN, PWM	-
Reprogramável	Não	Não	Sim	Não	Não	Não
Alimentação	7V a 18V	8V a 16V	8V a 18V	-	-	-
Consumo	<50mA	50mA	50mA	-	-	<40mA
Temperatura	-40°C a +85 °C	-40°C a +85 °C	-40°C a +85 °C	40°C a +85 °C	40°C a +85 °C	40°C a +85 °C

Como é possível verificar na Tabela 2, existem vários tipos de sensores no mercado, com diferentes tecnologias e diferentes especificações. Há mais fabricantes no mercado que fornecem mais soluções mas, o objetivo desta comparação foi essencialmente para verificar diferentes funcionalidades e tecnologias distintas aquelas que são praticadas

pela Bosch. Um exemplo que se poderá acrescentar, está em sensores que além dos interfaces em cima, utilizam o protocolo SENT para enviar valores de ângulo.

3.2. SISTEMAS DE ÂNGULO DE DIREÇÃO INTEGRADOS

Ultimamente, tem-se verificado que existem marcas que estão a optar por não utilizar este sensor sozinho (*Standalone*), mas sim numa solução integrada com outra funcionalidade, como por exemplo o sensor de torque (TAS). Este subcapítulo tem como objetivo, apresentar algumas soluções que estão disponíveis no mercado.

3.2.1. TAS da Valeo

O sensor da Valeo fornece o valor do torque e do ângulo, sendo a informação do ângulo um valor absoluto. Os *interfaces* que este sistema disponibiliza são os seguintes:

- CAN
- Flexray
- *Pulse With Modulation*(PWM)
- Analógico

A Figura 16 permite visualizar um exemplo deste sensor.



Figura 16 – Exemplo de TAS da Valeo [29].

3.2.2. TAS da Bourns

O sensor da Bourns apresenta características semelhantes às da Valeo, as principais diferenças estão nas interfaces que são as seguintes:

- Analógico
- PWM
- *Single Edge Nibble Transmission (SENT)*
- *Short PWM Code (SPC)*

A Figura 17 permite visualizar um exemplo deste sensor.

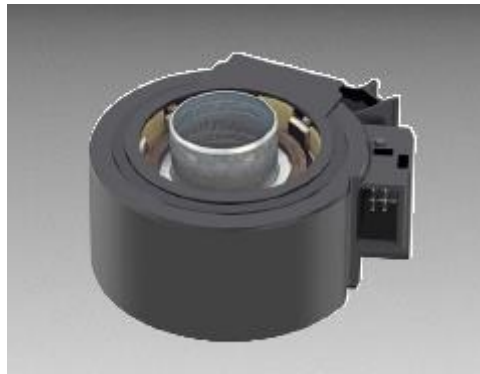


Figura 17 – Exemplo de TAS da Bourns [30].

E resumo, é possível verificar que este tipo de soluções integradas apresenta várias vantagens, visto que é possível incluir dois sensores num só equipamento, sendo neste momento a preferência de muitos fabricantes de automóveis.

3.3. ANÁLISE COMPARATIVA

Através da informação dos subtítulos 3.1 e 3.2, é possível concluir, que existe muita oferta para o mercado automóvel no que diz respeito a este tipo de sensores. Os fabricantes de automóveis têm a liberdade de escolher o tipo de interface que mais

convém para um dado veículo, o tipo de tecnologia de sensores, e ainda as características mais interessantes. Contudo, até ao momento, não existe nenhum sensor *standalone*, em que esteja disponível a interface com protocolo de comunicação CAN FD. O mercado está cada vez mais competitivo e cada vez há mais necessidade de evoluir no que diz respeito às tecnologias. O CAN FD irá certamente ser cada vez mais utilizado, sendo apenas uma questão de tempo até que os fabricantes deixem de utilizar SAS com CAN para passar a utilizar CAN FD. Nesse aspeto, e por estratégia, o objetivo da Bosch será implementar um produto com esta característica no mercado de modo a atrair um maior número de clientes, ao mesmo tempo que se mantém atualizada em termos tecnológicos. A Tabela 3 permite observar as diferenças entre os vários tipos de sensores.

Tabela 3 – Comparação dos vários tipos de sensores.

Características	SAS Bosch	Bourns 6002	TAS da Bourns
Tipo de medição	Ângulo	Ângulo	Torque e Ângulo
Range ângulo	+/- 1080 °	+/- 780 °	+/- 720 °
Range torque			+/- 4º
Interface	CAN	CAN	Analog, PWM, SENT, SPC
Reprogramável	Não	Sim	-
Alimentação	7V a 18V	8V a 18V	5V
Consumo	<50mA	50mA	40mA
CAN FD disponível	Não	Não	Não
Temperatura	-40°C a +85 °C	-40°C a +85 °C	-40°C a +85 °C

Como é possível verificar na Tabela 3, não existe neste momento sensores de direção que tenham o CAN FD disponível, pelo que seria bastante vantajoso ter uma solução com este tipo de comunicação. A tendência dos fabricantes de automóveis será

aumentar a velocidade de comunicação entre os diferentes dispositivos dos seus carros. Dependendo da aplicação, há protocolos que são mais adequados do que outros, e neste momento, para sistemas críticos, o CAN é bastante importante devido à sua robustez. Com a evolução da tecnologia, CAN FD será o substituto natural do CAN, porque de uma consegue assegurar as mesmas condições que o CAN em quase todos os níveis, permitindo aumentar a quantidade e velocidade da informação. Por este motivo torna-se particularmente importante apresentar desenvolver soluções para este tipo de comunicação.

4. PROPOSTA DE SOLUÇÃO

Este capítulo tem como objetivo, apresentar as soluções que foram propostas para a implementação do CAN FD nos sensores de direção. Irão ser apresentadas diversas soluções com diferentes tipos de tecnologias e diferentes tipos de conceitos. Irá ser apresentada uma matriz de requisitos de modo a que seja possível realizar uma análise mais cuidada no que toca à decisão da solução

4.1. ANÁLISE DO *DESIGN* ATUAL

Este subcapítulo tem como base a demonstração do funcionamento atual do SAS da Bosch do ponto de vista geral, sem a inclusão da funcionalidade do CAN FD. O objetivo é

o de apresentar o funcionamento do sensor do ponto de vista de *hardware* e os principais constituintes do sistema.

4.1.1. Funcionamento do sistema

Este ponto tem como objetivo uma explicação do funcionamento do SAS da Bosch, desde do movimento do volante, até à saída do sinal em CAN com a informação do ângulo. Na Figura 18 observa-se através de diagrama de bloco qual o princípio de funcionamento geral do SAS.

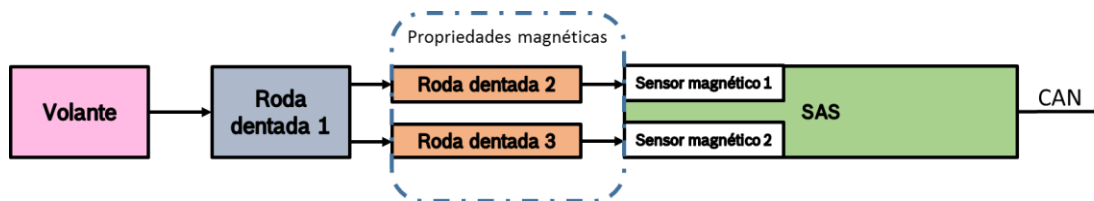


Figura 18 – Princípio de funcionamento do SAS.

O SAS só começa a fornecer a informação do ângulo após ser dada a ignição do veículo, que é quando existe alimentação da bateria. A partir do momento em que há alimentação e sincronização com o sistema ESP, o SAS começa a enviar o ângulo mesmo que não exista movimento no volante. Esta informação é sempre absoluta, i.e., não depende de outros fatores. O movimento do volante como se pode observar na Figura 18, irá causa uma deslocação no mesmo sentido da roda dentada 1, que por consequência irá deslocar igualmente as rodas dentadas 2 e 3, que possuem propriedades magnéticas. Esta deslocação irá provocar uma alteração do campo magnético que será detetado pelo SAS e que irá calcular o ângulo e enviar o seu valor por CAN.

4.1.2. Constituição base do sistema

Este ponto tem como objetivo a demonstração do funcionamento de cada componente do SAS da Bosch do ponto de vista de *hardware*. Nas figuras seguintes apresenta-se esquemas de blocos, não são apresentados esquemas detalhados por

motivos de confidencialidade. Na Figura 19 observa-se a constituição dos principais componentes que constituem o *hardware* do SAS. Pode visualizar-se como os sensores magnéticos enviam a informação para o microcontrolador e como este envia o resultado para a exterior via CAN.

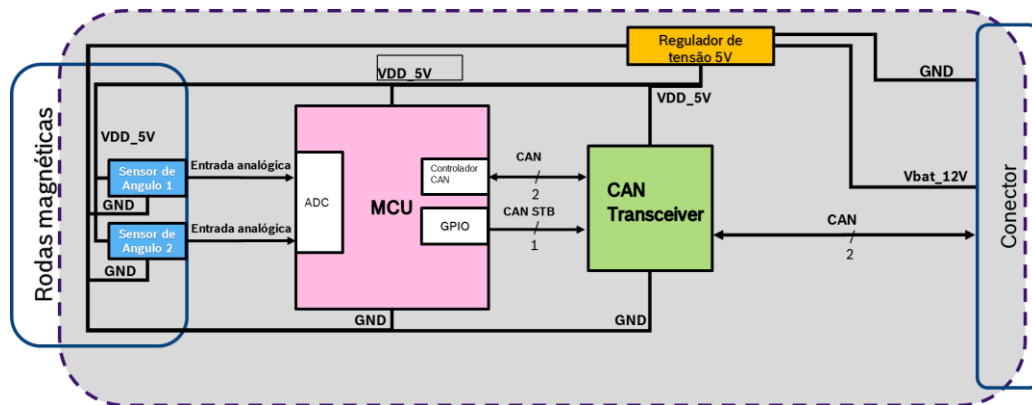


Figura 19 – Diagrama funcional do SAS.

Com base na Figura 19 é possível visualizar que os principais constituintes do SAS são os seguintes: *Microcontroller Unit*, os sensores de ângulo, o regulador de tensão, o *CAN transceiver* e o conector.

O *Microcontroller Unit* (MCU) é dos componentes mais importantes no SAS, na medida em que irá receber a informação relativa ao ângulo dos sensores, vai processar e efetuar os cálculos. Além disso, também irá criar a mensagem CAN de modo a que a informação do ângulo seja entregue corretamente. O microcontrolador além de processar os dados dos sensores também tem autonomia de desligar o sistema caso sejam detetado alguma anomalia, quer termos elétricos quer em termos de *software*. Na Figura 20, observa-se o diagrama da interligação do microcontrolador.

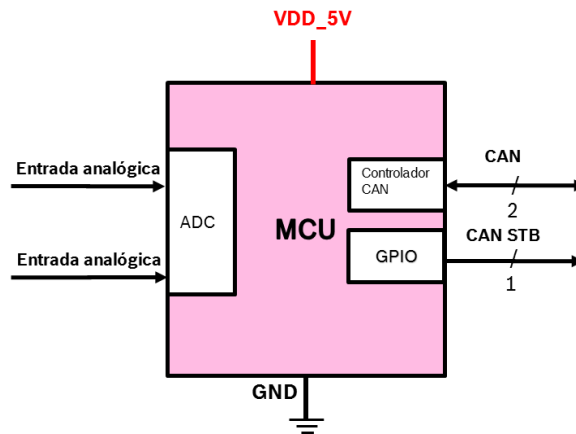


Figura 20 – Diagrama da interligação do microcontrolador.

Na Figura 20, observa-se os valores do ângulo que são recebidos utilizando um *Analog to Digital Converter* (ADC) interno, que irá converter os sinais analógicos para digitais. Também é possível visualizar que o microcontrolador tem um controlador CAN interno, o que significa que a mensagem CAN é criada dentro do microcontrolador, sendo necessário apenas adaptar os valores de tensão para valores CAN. Por fim, o microcontrolador utiliza uma saída digital *General Purpose Input Output* (GPIO) para poder desligar a comunicação CAN por *hardware*.

Os sensores de ângulo são essencialmente sensores magnéticos que estão fisicamente localizadas em baixo das rodas magnéticas. Sempre que há um movimento das rodas magnéticas, os sensores irão detetar uma variação do campo magnético e enviar o valor analógico do ângulo para o microcontrolador de modo a que este os possa processar. Na Figura 21, observa-se o diagrama da interligação dos sensores de ângulo.

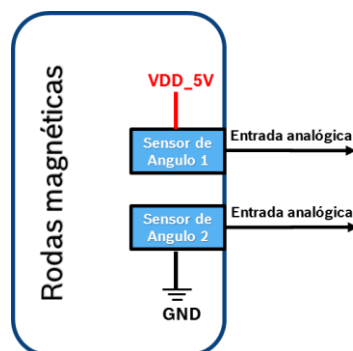


Figura 21 – Diagrama da interligação dos sensores de ângulo.

O regulador de tensão tem a função de garantir que numa gama de valores de tensão de entrada (7 a 18V), apresenta uma saída estável de 5V para o funcionamento do circuito. O regulador de tensão tem também como característica, assegurar proteção contra curto-circuito na sua saída de modo a que os restantes componentes não se danifiquem. Na Figura 22, observa-se o diagrama da interligação do regulador de tensão.

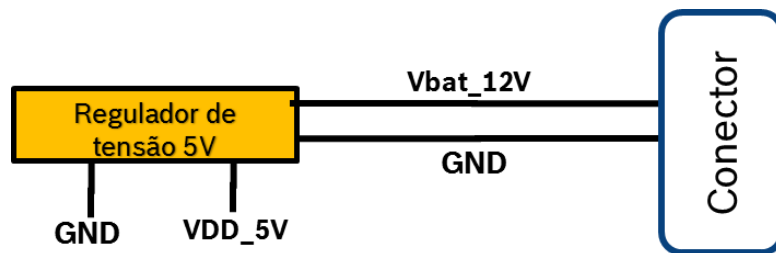


Figura 22 – Diagrama da interligação do regulador de tensão.

A alimentação da bateria chega ao sensor através do conector. Existem duas linhas no conector do sensor que ligam a alimentação da bateria (+12V) e a massa (GND). Estas linhas vão ligar diretamente ao regulador de tensão que irá regular para 5V.

O CAN *transceiver* é o componente que tem a função de adaptar os níveis de tensão das linhas de comunicação que vêm do MCU para níveis de tensão CAN, ou seja, duas saídas em par diferenciado, CANH e CANL. O CAN *transceiver* após adaptação de sinal vai enviar a trama CAN para o barramento CAN a que o sensor está ligado. O CAN *transceiver* tem uma segunda função se desligar quando recebe um *input* do microcontrolador. Esta função ocorre quando é detetado algum problema no sensor, ou não estão reunidas as condições para o envio de informação. Na Figura 23 observa-se a interface entre o conector e o CAN *transceiver*.

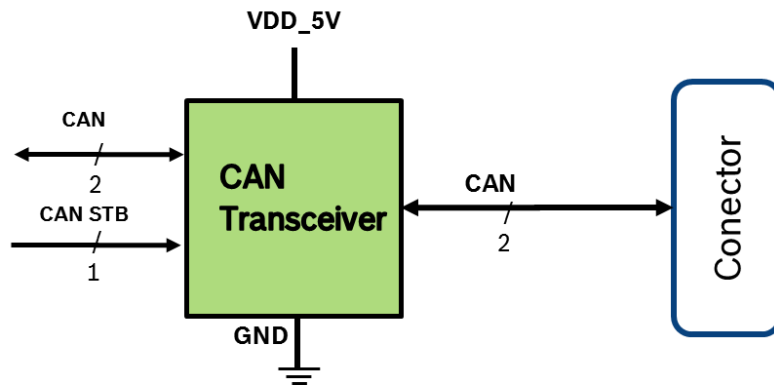


Figura 23 – Diagrama da interligação do CAN *transceiver*.

As linhas de CANH e CANL estão diretamente ligadas entre o sensor e o restante barramento CAN ao qual está inserido através do conector do sensor.

O conector é o componente ao qual permite que chegue a alimentação ao circuito do SAS, e que permite também a ligação física entre o barramento CAN e o sensor. O conector é concebido para respeitar os requisitos de qualidade da Bosch, no que diz respeito a durabilidade e robustez. Na Figura 24, observa-se o diagrama de interligação do conector do SAS.

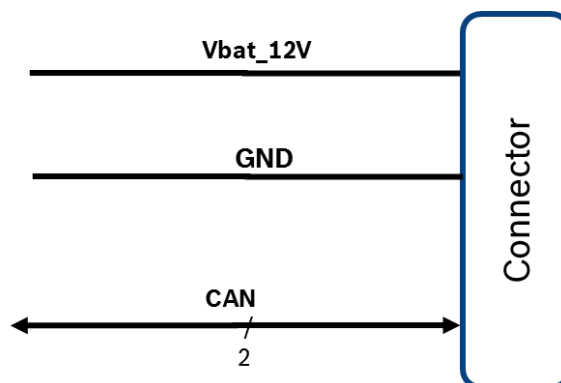


Figura 24 – Diagrama da interligação do conector do SAS.

4.2. ANÁLISE DE REQUISITOS

Como o sensor é um componente que está inserido em sistemas críticos para a indústria automóvel é necessário ter uma matriz de requisitos do sistema a nível geral bem definida. Os requisitos são agrupados do seguinte modo: *hardware*, mecânicos, *software* e sistema. A Tabela 4 resume os principais requisitos dos sistemas de uma forma geral.

Tabela 4 – Matriz de requisitos do SAS.

ID	Descrição do requisito	Tipo de requisito	OK ou NOK	Notas
REQ 1	O microcontrolador tem de calcular o ângulo	SW	OK	Testado
REQ 2	O microcontrolador tem de gerar uma mensagem CAN	HW/SW	OK	Testado
REQ 3	A alimentação do sensor tem de ser compatível com os níveis de alimentação da bateria	HW	OK	Testado
REQ 4	A tensão de alimentação dos componentes do sensor que tem ser monitorizada	HW/SW	OK	Testado
REQ 5	A interface CAN tem que ser compatível com a ISO11898	HW/SW	OK	Testado
REQ 6	A comunicação CAN tem de ter a possibilidade de ser interrompida por <i>hardware</i>	HW	OK	Testado
REQ 7	Todos os componentes têm de ser qualificados para automóveis (ex.AEC Q100)	Sistema	OK	Testado
REQ 8	A temperatura de funcionamento do sensor tem de ser pelo menos entre -45°C e +85°C	Sistema	OK	Testado

REQ 9	Microcontrolador tem que ter memória interna	HW	OK	Testado
REQ 10	O SAS tem que respeitar os requisitos da norma ISO26262	Sistema	OK	Testado
REQ 11	O SAS tem que fornecer o ângulo do volante	Sistema	OK	Testado
REQ 12	O SAS tem que consumir menos de 150mA	HW	OK	Testado
REQ 13	O SAS não pode deixar de funcionar caso haja um microcorte na alimentação	HW	OK	Testado
REQ 14	O SAS não pode enviar um ângulo errado	HW	OK	Testado
REQ 15	O SAS tem que ter proteção contra salpicos e poeiras			
REQ 16	O SAS tem que ter um range mínimo de +/-780º	Mec	OK	Testado
REQ 17	O SAS tem que ser retardante de chama	Mec	OK	Testado
REQ 18	O SAS não pode incendiar	HW	OK	Testado

De salientar que para um projeto desta dimensão existe um número de requisitos significativamente superiores aos apresentados sobre o SAS. A Tabela 4 apenas inúmera alguns dos requisitos das diferentes áreas de ação, com principal foco no HW, visto que o principal objetivo deste trabalho está relacionado com o HW e como a informação é confidencial. Todos os requisitos enunciados na Tabela 4 foram testados e validados, e neste momento estão instalados em milhões de veículos nas mais variadas localizações globais.

4.3. PROPOSTA DA SOLUÇÃO

A proposta que é feita este projeto passa por uma substituição da *interface* existente (CAN), por um novo protocolo de comunicação, mais rápido e mais atualizado (CAN FD) em termos de tecnologia, mas fazendo as menores alterações possíveis no SAS, no que diz respeito ao preço e qualidade do produto. A Figura 25 observa-se o diagrama da proposta de solução.

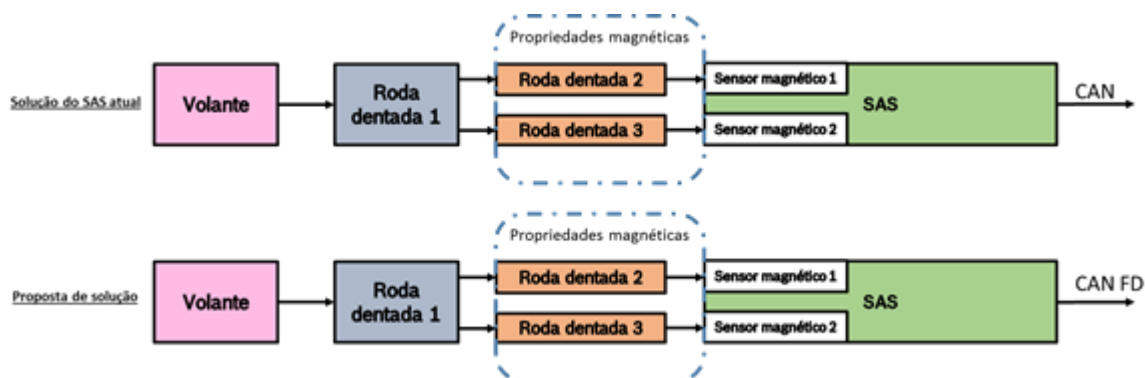


Figura 25 – Diagrama de proposta de solução.

A principal diferença de funcionamento entre a solução atual e a proposta de solução, é a *interface* para o exterior, em que o CAN será substituído pelo CAN FD. Esta medida irá contemplar uma reavaliação de todo o produto, no que diz respeito a componentes, a processos e a análise a efetuar, visto que, apesar de aparentemente parecer uma mudança simples, há que considerar vários fatores. Repare-se que este é um produto de segurança automóvel, que tem que cumprir critérios de segurança muito rígidos, e cujos critérios de aceitação por parte dos fabricantes de automóveis mais rígidos.

4.4. REQUISITOS ADICIONAIS

De modo esta proposta ser bem-sucedida será necessário verificar novos requisitos que anteriormente não eram necessários mas que neste momento são necessários. Na Tabela 5, observa-se a matriz de requisitos adicionais.

Tabela 5 – Matriz de requisito adicional.

ID	Descrição do requisito	Tipo de requisito	OK ou NOK	Notas
NEW REQ 1	O SAS tem que comunicar por CAN FD	Sistema	-	Novo requisito
NEW REQ 2	A interface CAN FD tem que ser compatível com a ISO11898	HW/SW	-	Novo requisito
NEW REQ 3	A velocidade de transmissão deve de ser entre 2Mbps e os 5Mbps	HW	-	Novo requisito
NEW REQ 4	Reaproveitar a parte mecânica	HW	-	Novo requisito
NEW REQ 5	Apresentar mais que uma alternativa de solução	HW	-	Novo requisito

Como é possível observar Tabela 5, existem alguns requisitos que foram adicionados. De salientar que os requisitos NEW REQ 4 e NEW REQ 5 são bastante importantes. É necessário que o *design* de HW tenha em consideração que a parte mecânica não altere, sob consequência de não poder ser possível substituir o SAS com FD junto do fornecedor para o qual já se vende a solução atual. Também é importante haver uma pesquisa de tecnologias disponíveis no mercado e encontrar mais que uma solução, para posteriormente, haver uma comparação sobre qual será a melhor alternativa para o momento atual.

5. IMPLEMENTAÇÃO

Este capítulo aborda todo o processo de implementação da solução, no qual apresenta a explicação detalhada das soluções encontradas, qual foi a solução escolhida com a devida justificação, as análises que foram feitas da solução escolhida e a implementação da solução.

5.1. SOLUÇÕES TECNOLÓGICAS

Após a análise dos principais requisitos do SAS, foi feito um estudo de modo a ser possível comparar e analisar os diferentes tipos de tecnologias que estão, ou virão a estar disponíveis, para assim, implementar no SAS a tecnologia CAN FD, respeitando os

requisitos e especificações. Após a análise verificou-se que existem três soluções tecnológicas disponíveis. Na Figura 27 observa-se de uma forma geral as soluções tecnológicas que estão disponíveis até à data.

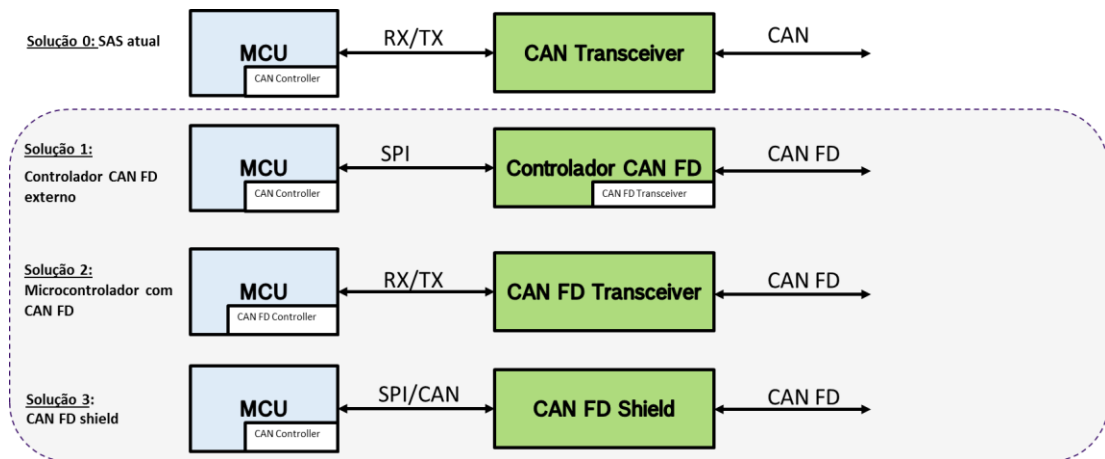


Figura 26 – Diagrama de solução tecnológica.

Partindo da solução 0, que corresponde à solução atual do SAS com CAN, as soluções encontradas foram as seguintes que se descrevem de seguida.

Solução 1: Controlador CAN FD externo

Esta solução consiste em adicionar um controlador de CAN FD externo, substituindo o atual CAN *transceiver*. O controlador externo será ligado ao microcontrolador via SPI, que enviará os dados relativos ao ângulo por esta via. Por sua vez, o controlador CAN FD receberá esta informação será enviada por CAN FD, dado que, este tem um CAN FD *transceiver* interno.

Esta solução permite, de um modo geral, manter grande parte da arquitetura de HW, sendo necessário fazer ajustes na *interface* do CAN FD, nomeadamente entre o controlador CAN FD e o microcontrolador. Será necessário a nível de SW desenvolver um *drive* de SPI. Repare-se que os controladores de CAN FD disponíveis no mercado utilizam o SPI para comunicar entre o microcontrolador e não as linhas de *Universal Asynchronous Receiver-Transmitter* (UART) como é utilizado nos CAN *transceivers* habituais. Na Figura

27 observa-se as alterações a nível de arquitetura de HW, de um controlador CAN FD externo.

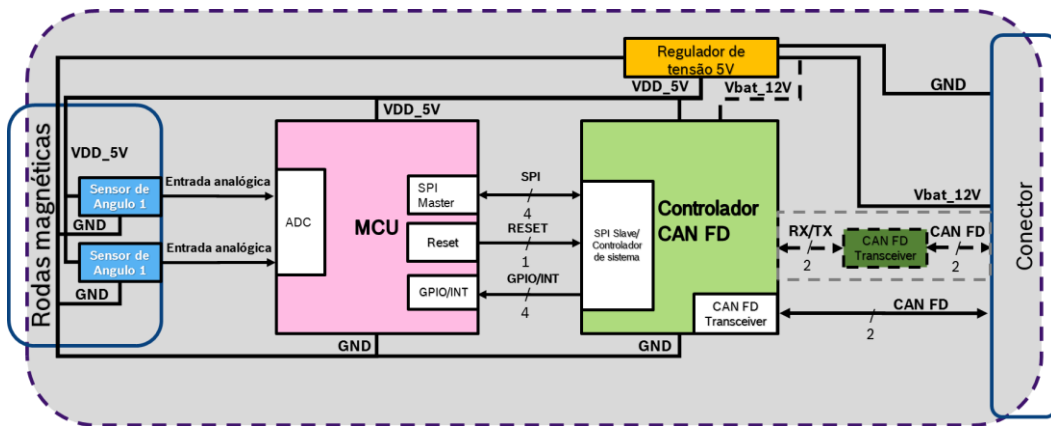


Figura 27 – Diagrama de solução 1.

Com esta solução a comunicação entre o microcontrolador e a *interface* CAN/ CAN FD deixaria de ser através de UART e passaria a ser realizada via SPI. Como se pode verificar na Figura 27 *existem* dois tipos de abordagens para esta solução. Uma passa por ter um controlador externo com CAN FD *transceiver*; a outra pelo uso de um controlador CAN FD externo mais um CAN FD *transceiver* externo. Esta alteração leva a que sejam definidos novos requisitos, quer a nível de HW e SW. No HW será necessário redefinir quais os requisitos necessários. No SW será necessário uma análise e a uma redefinição de requisitos também. Repare-se que importa verificar se as alterações introduzidas se afetam negativamente ao nível *safety*. Para esta solução será também necessário averiguar, se os fornecedores desta tecnologia são capazes de cumprir os requisitos Bosch, no que diz respeito à qualidade, quantidade e tempo de entrega. Repare-se que este sensor é produzido em grandes quantidades por ano, na ordem dos milhões. Por fim, é também necessário considerar em termos de produção em série até que ponto será possível utilizar este componente, e se todos os processos internos são respeitados.

Solução 2: Microcontrolador com CAN FD

Esta solução consiste em adicionar um microcontrolador que já inclua o controlador de CAN FD, ligando diretamente a um novo CAN FD *transceiver*, que irá substituir o CAN *transceiver* a solução atual. Nesta situação, a informação do ângulo passaria pelo cálculo do microcontrolador e o mesmo gerava a mensagem CAN FD a enviar para o exterior. O CAN FD *transceiver*, à semelhança do CAN *transceiver*, receberá a trama CAN FD e adotará os níveis de tensão de acordo com os *standards* da ISO11898. NA Figura 28 observa-se as alterações a nível de arquitetura de HW, de um microcontrolador com controlador CAN FD integrado.

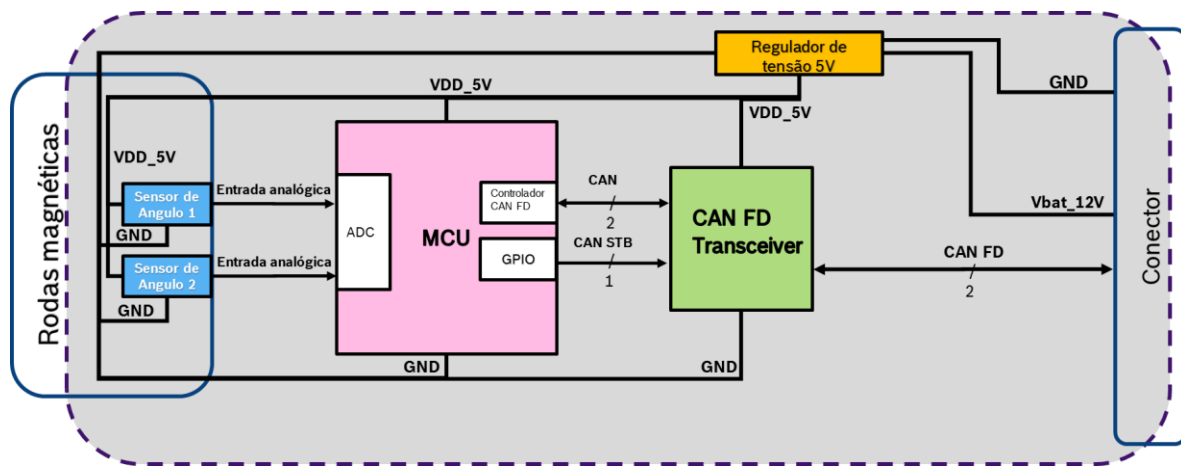


Figura 28 – Diagrama de solução 2.

Esta solução é a mais cara, mais complexa, e a que mais alterações acarreta para o sistema. Será necessário reorganizar todo o HW, visto que, o microcontrolador é o componente mais importante do sistema e, por isso, vai levar a profundas alterações a nível de HW. Deste modo, será necessário refazer quase todo o circuito do sistema. Também levará a grandes alterações do ponto de vista de desenvolvimento de SW, quase na sua totalidade. Do ponto de vista de *safety*, também terá grande impacto na medida em que será necessário fazer análises para se seja possível verificar se o SAS cumpre a norma ISO26262. Em relação à questão dos fornecedores, produção e processos, terá quer ser avaliado da mesma forma que a solução 1.

Solução 3: CAN FD shield

Esta solução consiste na implementação de uma recente tecnologia no mercado das *interfaces* para o CAN, dado que, permite manter o SAS com CAN num barramento CAN FD. O *CAN shield* possui internamente um decodificador CAN FD que consegue detetar que estão a passar mensagens CAN FD, permitindo ignorá-las. O dispositivo estará em *standby* ou em *sleep*, enquanto está a ignorar as mensagens CAN FD, aguardando um comando de *wake up* para que se possa enviar e receber tramas CAN. Esta solução é particularmente interessante na medida em que no mesmo barramento é possível ter os dois tipos de comunicação. A nível de arquitetura HW e SW, a alteração será o muito semelhante ao da solução 1, visto que, se mantém o microcontrolador, tendo apenas que se alterar o HW na *interface* CAN. Na Figura 29 observa-se as alterações a nível de arquitetura de HW, de um CAN FD shield.

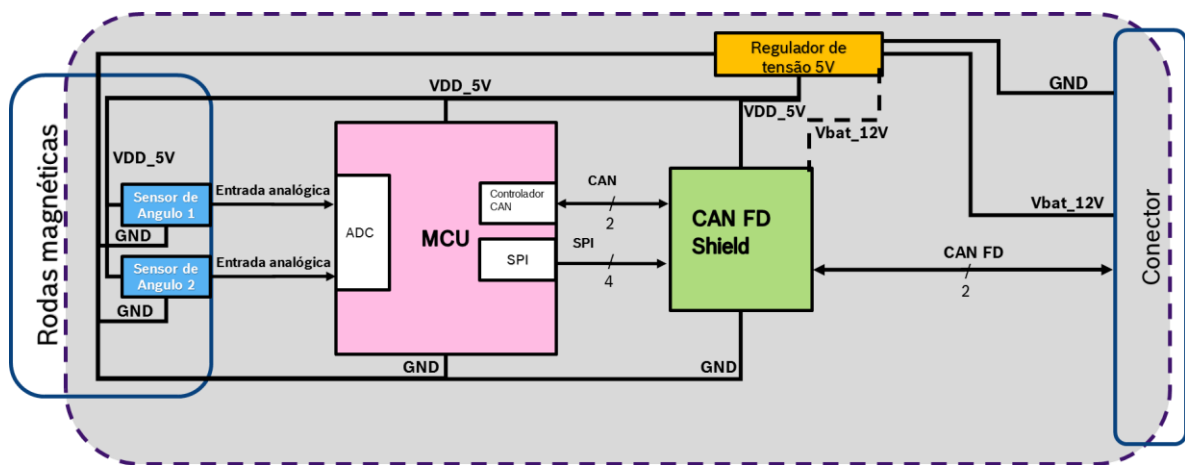


Figura 29 – Diagrama de solução 3.

A nível de validações necessárias, será bastante semelhante à solução 1, com a diferença que a nível de HW tem que haver mecanismos que não provoquem erros no barramento durante a fase em que está a enviar tramas CAN.

5.2. ANÁLISE COMPARATIVA DAS SOLUÇÕES

Após verificar as tecnologias existentes no mercado, torna-se agora necessário fazer uma análise comparativa das soluções. Para esta comparação, foram considerados vários requisitos tais como: o preço, a complexidade, o impacto das alterações no desenvolvimento e os riscos, bem assim como o tempo de desenvolvimento. Como se está a lidar com tecnologias bastante recentes, os componentes dos fabricantes estão numa fase muito embrionária, sendo que praticamente nenhuma solução está em produção em série. Isto representa ainda mais um desafio para o projeto, na medida em que há pouca informação sobre o histórico do produto, mais concretamente, o *feedback* na ótica do utilizador. Na Tabela 6, observa-se as comparações que foram entre as diferentes tecnologias.

Tabela 6 – Comparação das soluções.

	<i>Solução 0</i>	<i>Solução 1</i>	<i>Solução 2</i>	<i>Solução 3</i>
<i>Novo layout PCB</i>	Não	Sim	Sim	Sim
<i>Desenvolvimento de HW</i>	Não	Sim	Sim	Sim
<i>Desenvolvimento de SW</i>	Não	Sim	Sim	Sim
<i>Desenvolvimento de MEC</i>	Não	Pouco provável	Pouco provável	Pouco provável
<i>Componentes a substituir</i>	Nenhum	CAN transceiver	Microcontrolador CAN Transceiver Regulador de tensão	CAN Transceiver
<i>Tamanho do componente</i>	-	Controlador externo CAN FD = 14/20 pinos	Microcontrolador = 48/64 pinos CAN FD Transceiver = 8 pinos	CAN shield = 14 pinos

Complexidade de desenvolvimento	Já desenvolvido	Media	Alta	Média
Disponibilidade	Imediata	2018	2019/2020 (em qualificação para Q100)	Desconhecido
Tempo estimado de desenvolvimento	Imediato	1-2 Anos	2-3 Anos	1-2 Anos
Preço	-	Médio	Alto	Desconhecido
Riscos	Não ter CAN FD	Novo conceito sem <i>know-how</i>	Desenvolvimento com grande complexidade e esforço Custos elevados	Possibilidade de não passar um conceito

Dos pontos que foram considerados na Tabela 6, há que realçar 4 principais que são os seguintes: *complexidade, disponibilidade, tempo estimado de desenvolvimento e o preço.*

- A *complexidade* é uma questão bastante importante a ter em consideração, na medida em que é considerado qual das soluções são mais complexas do ponto de vista de desenvolvimento. Tecnicamente quanto mais complexa for a solução maior é o esforço que a equipa vai ter de dedicar durante o desenvolvimento do projeto, e isso significa que serão necessárias mais considerações a ter em conta e mais análises. Por outro lado, uma solução mais complexa pode significar uma produção acima das especificações necessárias, e eventualmente, com mais funcionalidades. A decisão com base na complexidade vai depender da estratégia a ter em conta para o projeto.
- A *disponibilidade* é uma questão que irá ter impacto direto na duração do projeto, uma vez que, é importante saber quando é que o componente irá

estar em produção em série, caso contrário corre-se o risco de se estar a desenvolver um produto ao qual o fornecedor não tem capacidade de produção de grandes quantidades, e conseqüentemente significa um atraso no projeto e na produção do SAS.

- O *tempo estimado de desenvolvimento* vai ter um impacto direto no projeto, e é uma consequência da complexidade, com efeito, quanto mais complexo, maior será o esforço da equipa e maior será o tempo de desenvolvimento. Dependendo da prioridade e das necessidades da empresa, a solução escolhida terá certamente este ponto como um dos principais aspetos em consideração.
- O *preço* é uma questão fulcral no desenvolvimento de todos os projetos. Com o mercado cada vez mais competitivo, é importante apresentar soluções igualmente competitivas, porque de outro modo, os clientes irão considerar outras soluções. Uma solução mais cara e mais complexa pode trazer desvantagens do ponto de vista de tempo e custo, mas pode trazer igualmente vantagens, do ponto de vista das funcionalidades e dos novos projetos em que possa ser inserido, dependendo de fatores do lado do cliente.

5.3. JUSTIFICAÇÃO DA SOLUÇÃO

Após fazer um levantamento das soluções encontradas, e fazer uma comparação preliminar das mesmas foi possível encontrar a solução que mais se adequa ao projeto. Na Figura 30, observa-se o diagrama de soluções, no qual é possível verificar o processo de proposta de solução e as soluções.

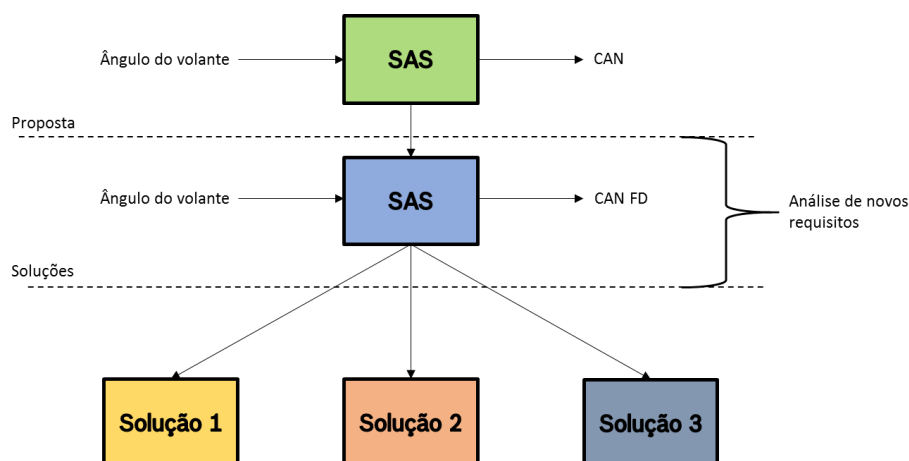


Figura 30 – Diagrama de soluções final.

Com base nas informações recolhidas, a solução decidida foi a *Solução 1*. Esta decisão foi tomada em equipa e após um conjunto de reuniões realizadas, nas quais se discutiu as vantagens relativas de cada solução. A presente solução apresentou vantagens em relação aos restantes nos quatro principais pontos referidos no ponto 5.2.

Do ponto de vista de necessidade do projeto atual, é necessário uma solução que já esteja muito próximo da sua produção em série, e que do ponto de vista de complexidade não seja muito elevado. Nesta medida a solução que, vai permitir à equipa poupar tempo e esforço no seu desenvolvimento, tendo-se como uma solução mais económica, é a *Solução 1*. Uma solução que seria mais adequada caso houvesse mais tempo, seria a *Solução 2*, visto que, seria possível aumentar ainda mais a qualidade do produto, oferecer mais *features*, e a possibilidade de oferecer o produto a outras áreas de negócio para outras aplicações. Provavelmente a próxima geração do SAS com CAN FD, terá a *Solução 2* implementada. Em relação à solução 3, entendeu-se que tem muitos riscos dentro dos quais o conceito não estar muito bem definido em termos de viabilidade para o futuro.

5.4. TECNOLOGIAS DISPONÍVEIS

Após a decisão, é necessário procurar componentes que cumpram as funções desejadas. Após várias pesquisas, foi possível verificar que existem dois componentes que cumprem os requisitos: o MCP2517FD da Microchip e o TCAN4550 da Texas Instruments. Ambos apesar de terem a mesma função, apresentam arquiteturas diferentes do ponto de vista de *interface*. Os componentes são analisados agora em detalhe.

- **MCP2517FD**

Na Figura 31, observa-se qual a arquitetura que o SAS teria com este componente.

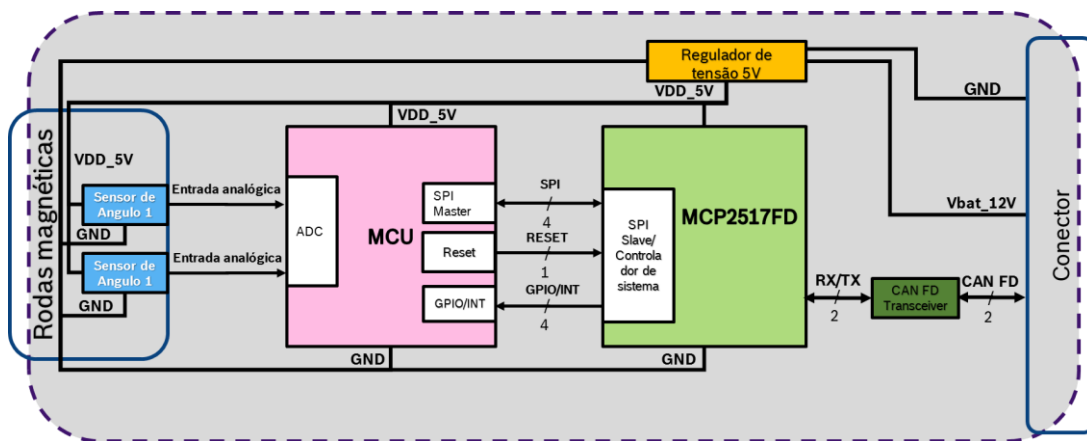


Figura 31 – Diagrama de solução com MCP2517FD.

O MCP2517FD da Microchip é um controlador CAN FD externo, que permite a um microcontrolador sem controlador CAN FD, enviar/receber mensagens CAN FD, utilizando o SPI como comunicação para o microcontrolador. Este componente é suportado tanto comunicações CAN como CAN FD, apenas alterando configurações. O MCP2517 recebe a informação e configuração CAN FD via SPI, e após o que constrói internamente a mensagem. Posteriormente a mensagem é enviada via TX/RX, sendo necessário um CAN FD *transceiver* para enviar a mensagem CAN FD com os níveis adequados.

Como é possível verificar na Figura 31, a arquitetura do SAS não seria muito diferente da arquitetura inicial, sendo apenas que teria de se adicionar o controlador externo e circuito adjacente necessário, bem assim como, substituir o *CAN transceiver* para um *CAN*

FD transceiver. A única questão que teria de ser analisada e que implicaria alteração de outro componente principal do SAS, é o regulador de tensão, que pode não permitir fornecer a corrente suficiente para o todo o circuito.

- **TCAN4550**

Na Figura 32, observa-se qual a arquitetura que o SAS teria com este componente.

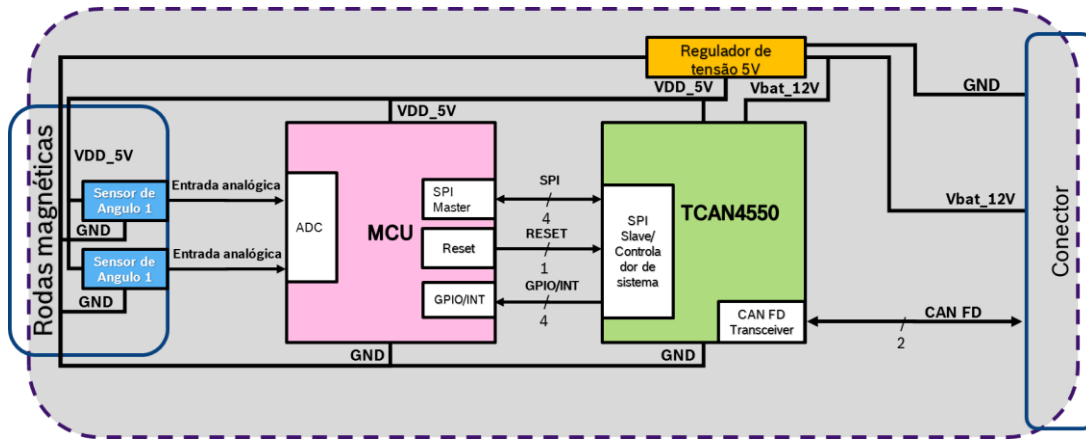


Figura 32 – Diagrama de solução com TCAN4550.

O TCAN4550 da Texas Instruments, á semelhança do MCP2517FD, é também um controlador de CAN FD externo, implementar comunicação CAN FD num sistema que não tenha esta funcionalidade. O TCAN4550 utiliza o protocolo SPI para comunicar com o microcontrolador de modo a fazer as configurações necessárias e enviar mensagens CAN FD. Uma grande diferença entre este componente e o da Microchip, é o facto de não necessitar de um CAN FD *transceiver* para adaptar os níveis de tensão CAN FD, uma vez que, o inclui internamente.

Como é possível verificar na Figura 32, a implementação desta solução, significaria apenas uma substituição do *CAN transceiver*, o que permitia basicamente manter quase a estrutura atual. Trata-se de uma grande vantagem em termos de desenvolvimento e implementação da PCB, visto que o componente tem tamanho semelhante ao *CAN transceiver*, apesar de ter mais pinos. Uma questão que seria interessante de analisar seria o regulador de tensão, na medida em que, o TCAN4550 tem duas alimentações. São

necessários 12V para o funcionamento do *core* e 5V para o funcionamento do SPI e para adaptação de níveis na comunicação para ser compatível com o SPI do microcontrolador.

Ambas as soluções apresentam vantagens relativas na sua implementação, sendo portanto, necessário fazer uma análise de modo a comparar as características mais importantes para o projeto e decidir a solução mais adequada.

5.5. ANÁLISE COMPARATIVA E DECISÃO DO HW

Após fazer uma seleção dos componentes que estão disponível para utilização, é necessário fazer uma comparação. Na Tabela 7, observa-se a comparação entre os dois componentes.

Tabela 7 – Análise comparativa MCP2517FD vs. TCAN4550.

<i>Características</i>	<i>MCP2517FD</i> [31]	<i>TCAN4550</i> [32]
<i>Tensão de entrada (V)</i>	2,7 - 5,5	5,5 – 24V
<i>Tensão de entrada digital (V)</i>	N/A	3,135 – 5,25
<i>Consumo core (mA)</i>	20	70
<i>Consumo circuito digital (mA)</i>	N/A	2
<i>Regulador de tensão interno</i>	Sim	Sim
<i>Proteção ESD (kV)</i>	+/-4	+/-4 - +/-8
<i>High-Level Input Voltage (VIH)</i>	1,89 – 5,8	2,2 – 5,25
<i>Low-Level Input Voltage (VIL)</i>	-0,3 - 1,65	0 -1,58
<i>High-Level Output Voltage (VOH)</i>	2 – 5,5	2,5 – 5,25
<i>Low-Level Output Voltage (VOL)</i>	0	0 – 1,05
<i>Frequência de entrada (MHz)</i>	4, 20 ou 40	20 ou 40

(CAN) Nominal Bit Rate (Mbps)	0,125 – 1	Até 1
(CAN) Nominal Data Rate (Mbps)	0,5- 8	0,5 - 5
SPI disponível	Sim	Sim
SPI clock (MHz)	Até 20	Até 20
Gerador de frequência	Sim	Sim
Memoria interna	Sim	Sim
Espaço da memória	2kB	2kB
Configuravel	Sim	Sim
Range de temperatura (°C)	-40 - +150	-40 - +125

Refira-se a propósito do TCAN4550 que *datasheet* que está presente no *website* não foi o utilizado para o desenvolvimento do projeto. Houve uma versão de desenvolvimento que a Texas Instruments entregou à Bosch e que é confidencial, visto que o produto ainda não está finalizado. A versão que está disponível *online* apresenta apenas sete páginas enquanto a versão que foi fornecida apresenta um total de 153 páginas.

Com a comparação feita, é possível de uma maneira fácil, verificar as vantagens entre um componente e outro. O TCAN4550 apresenta algumas vantagens uma diz respeito a incluir o *transceiver* interno, e é alimentado a 24V, ou seja, pode ser alimentado pela bateria. Esta última vantagem pode ser considerável, na medida em que, dispensa a necessidade de redimensionar o regulador de tensão para uma corrente mais elevada, com efeito, a maior parte do consumo deste componente está do lado da bateria (12V), sendo apenas necessário alimentar a parte digital do circuito, que consome apenas 2mA. No entanto, o grande fator de decisão que foi tido em consideração, e que acabou por ser eliminatório, foi a qualidade e *support* do fabricante. O *feedback* que foi recebido pelos colegas de equipa aquando desta comparação foi a de que a Texas Instruments apresenta uma qualidade e *support* superiores que tipicamente tem lugar em relação à Microchip, no que diz respeito à produção em série. Houve vários parâmetros que foram

considerados nesta questão como por exemplo, a capacidade de produção, o tempo de entrega, o *support* técnico em caso de falhas e o número de componentes com qualidade de fábrica. A Bosch utiliza uns parâmetros de qualidade extremamente rígidos quando comparados com outras empresas, e para um fornecedor poder ser elegível a entrar no restrito grupo de fornecedores da Bosch, tem que apresentar resultados excepcionais. Uma das grandes dificuldades durante a procura de soluções foi precisamente essa, dado que a maioria dos fornecedores não estão na lista Bosch, ou não são compatíveis para o mercado *automotive*. Pelos motivos anteriores citados e apresentados em reunião de equipa, foi decidido então que a solução que reúne as melhores condições de sucesso e garantia é o TCAN4550.

5.6. ANÁLISE DETALHADA DO HW ESCOLHIDO

Como foi referido no subcapítulo 5.5, a solução escolhida implementar a solução 1 foi o TCAN4550. Nesse sentido, torna-se necessário fazer uma análise detalhada do componente de modo a ser possível desenhar um esquema o mais próximo possível da versão final. Será necessário fazer uma análise à função cada pino do TCAN4550 e verificar de que modo se torna mais vantajoso de os usar para implementar no SAS. Mas primeiramente será necessário verificar a forma do componente (*footprint*), e a localização física de cada pino, dado essa tarefa, i.e., ajudar bastante na fase do *design* do esquema e posteriormente da PCB. Na Figura 33, observa-se o *footprint* do TCAN4550.

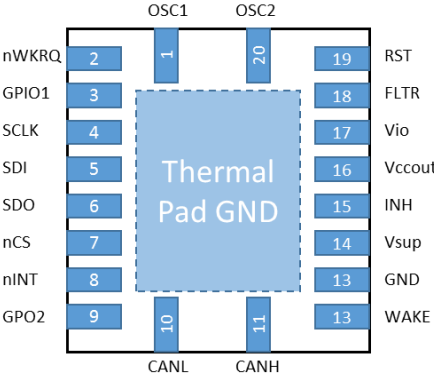


Figura 33 – Footprint do TCAN4550.

Como é possível observar na Figura 33, o TCAN4550 tem um *footprint* designado por VQFN20, possui 20 pinos, e mais um *PAD* que está na parte inferior do componente que é designado *thermal pad*, cuja sua função é o de dissipação de calor. Na Tabela 8, observa-se o funcionamento de cada pino.

Tabela 8 – Funções dos pinos do TCAN4550.

<i>Pino</i>	<i>Nome</i>	<i>Tipo</i>	<i>Descrição</i>
1	OSC1	Entrada	Entrada para o cristal de oscilação externo
2	nWKRQ	DO ¹	Pino de <i>wake up request</i> do barramento
3	GPIO1	DIO ²	Pino de entrada/saída digital configurável via SPI
4	SCLK	DI ³	<i>Clock</i> do SPI
5	SDI	DI	Saída do <i>Master</i> SPI
6	SDO	DO	Entrada do <i>Master</i> SPI
7	nCS	DI	<i>Slave select</i> do SPI (SS)
8	nINT	DO	Pino de interrupção para o MCU
9	GPO2	DO	Saída digital configurável por SPI
10	CANL	Comunicação	Pino do CANL do CAN FD
11	CANH	Comunicação	Pino do CANH do CAN FD
12	WAKE	Tensão de entrada	Terminal de entrada de tensão para função de <i>wake up</i>
13	GND	GND	Ligação a GND
14	Vsupp	Tensão alimentação	Entrada da tensão da bateria
15	INH	Tensão de	Pino de saída de tensão da bateria

		saída	
16	Vccout	Tensão de saída	Tensão de 5V de saída
17	Vio	Tensão de alimentação	Tensão de alimentação do DIO
18	FLTR	-	Filtro do regulador interno
19	RST	DI	Pino de <i>reset</i>
20	OSC2	Saída	Saída do cristal de oscilação externo

¹ DO – *Digital Output*

² DIO – *Digital Input Output*

³ DI – *Digital Input*

Após verificar a função dos pinos, torna-se mais simples fazer a seleção dos pinos que serão necessários utilizar para implementação no SAS numa primeira fase, visto que, este componente tem mais funcionalidades do que apenas ser controlador e *transceiver* CAN FD. Feita análise, os pinos a considerar prova de conceito são os seguintes: OSC1, SCLK, SDI, SDO, nCS, CANL, CANH, GND, Vsup, Vccout, Vio, FLTR, RST, e OSC2. Seguidamente fez-se uma explicação mais detalhada

- Os pinos OSC1 e OSC2 correspondem aos pinos do oscilador externo que deverá de ser de 20MHz ou 40MHz. Esta frequência é usada para gerar os *timings* e a taxa de transmissão da mensagem CAN FD. Para obter a velocidade máxima de comunicação no CAN FD (5Mbps), o fabricante recomenda a utilizar 40MHz, visto que consegue cobrir todos os cenários. De facto com a utilização dos 20MHz é possível obter apenas 2Mbps. No pino OSC1 também é possível receber a frequência criada pelo MCU ou outro integrado que consiga gerar esta gama de frequências. De uma maneira geral o TCAN4550 apresenta duas possibilidades no que diz respeito a gerar frequências de CAN FD, uma corresponde a ligar o oscilador externo diretamente ao TCAN4550; a outra corresponde a ligar o oscilador externo ao microcontrolador para que este

possa gerar internamente a frequência. Posteriormente sairá uma linha num dos pinos para ligar ao OSC1. Na Figura 34, observa-se a opção de colocar um oscilador externo.

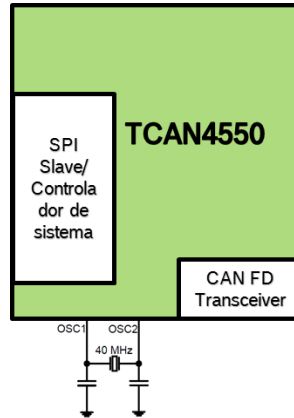


Figura 34 – Frequência gerada por oscilador externo.

Na Figura 35, pode-se observar a frequência gerada pelo microcontrolador.

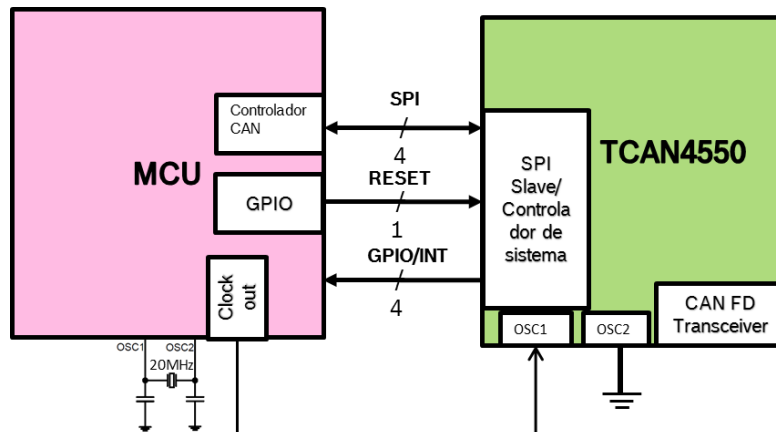


Figura 35 – Frequência gerada pelo microcontrolador.

A decisão tomada sobre a localização do oscilador, foi tomada juntamente entre a equipa de HW e a equipa de SW. Decidiu-se colocar o oscilador no TCAN4550 com o principal motivo de que, nesta opção, não seria colocada uma linha de alta frequência entre o microcontrolador e o TCAN4550. Uma linha com esta frequência poderia ser fonte interferência para os restantes sinais envolvidos, em particular aos sinais

analógicos, outro motivo prende-se com a necessidade de garantir que a frequência que era gerada não sofria de alterações desde o microcontrolador até ao TCAN4550. Outro motivo prende-se com o arranque do sistema, de facto, seria mais rápido se o oscilador estivesse no TCAN4550 comparativamente com a possibilidade de se encontrar no microcontrolador visto que a distância seria mais curta.

- Os pinos SCLK, SDI, SDO e SS correspondem aos pinos de comunicação do SPI. Sem estes pinos não possibilidade comunicação entre o microcontrolador e o TCAN4550, pelo que têm necessariamente de serem utilizados.
- Os pinos CANH e CANL correspondem às linhas de CAN FD, e deverão de ser utilizados para haver comunicação CAN FD.
- Os pinos Vsup, Vio e GND, correspondem aos pinos de alimentação. O Vsup é o pino de alimentação geral do TCAN4550, na medida em que alimenta os reguladores internos que alimenta o *core*, o CAN *transceiver* interno e o pino de Vccout. O pino de Vio permite que a tensão dos DIO seja igual à alimentação dos pinos do microcontrolador que estão ligados ao TCAN4550 a tensão de 5V. O GND corresponde à referência.
- O pino Vccout fornece 5V necessários para alimentar o CAN *transceiver*. Note-se que é necessário ter um condensador de 10uF junto a este pino.
- O pino de RST corresponde ao *reset* do TCAN4550. Internamente tem uma resistência de *pull down* para funcionar normalmente. Caso seja necessário desligar o TCAN4550 este pino precisa de estar com valor lógico alto (5V). Para retirar o estado de *reset* é apenas necessário voltar a ter valor 0.
- O pino de FLTR utilizado como filtro do regulador do interno, deverá de ter um condensador aproximadamente com 300nF.

Os pinos acima referidos foram os que foram considerados fundamentais para prova de conceito, de modo a ter-se um SAS a comunicar via CAN FD. Contudo existem alguns pinos que não sendo cruciais no momento atual, deverão de ser implementados no

futuro, devido às novas funcionalidades, permitindo acrescentar mais valor no produto. Os pinos são os seguintes: GPIO1, nINT, e o GPO2.

- O pino GPIO1 pode ser configurado por SPI para as seguintes funções:
 - Funcionar como frequência de saída gerada pelo oscilador para outro componente, como por exemplo, o microcontrolador. A frequência de saída também pode ser configurada por SPI, que usa um *prescaler* interno.
 - Em modo de teste do TCAN4550, pode ser utilizado para simular o TX do CAN FD. Internamente estará ligado ao *transceiver* interno para ter a saída em CANH ou CANL. Com esta funcionalidade é possível testar individualmente o SPI (vendo o retorno da mensagem enviada) ou testar o *transceiver*. Na Figura 36, *observa-se* um tipo de teste que é possível fazer em modo de teste, neste caso, o *transceiver*.

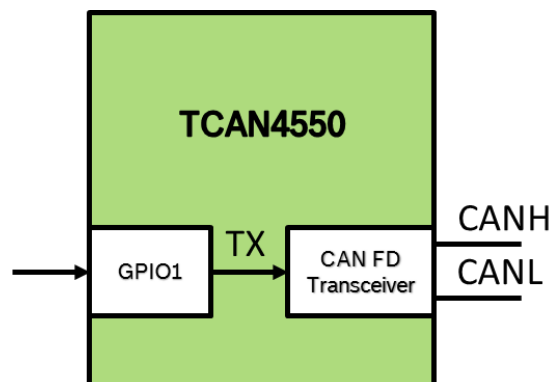


Figura 36 – Modo de teste do *transceiver*.

- Este pino também pode funcionar como interrupção, i.e., caso haja alguma falha de uma determinada lista já definida de erros possíveis que podem ocorrer, irá alterar o seu estado lógico no pino que o liga ao microcontrolador, e este irá receber a interrupção de que houve algum problema. Poderá inclusivamente, identificar o erro acedendo via SPI à

lista desejada. Os seguintes tipos de falhas que podem ocorrer são os seguintes: falhas do CAN, falhas no SPI e falhas na alimentação.

- As falhas do CAN são consideradas falhas a nível da camada física, como por exemplo um curto-circuito entre os 12V e o CANL. Através desta lista, é possível saber com detalhe qual a falha. Também nesta falha são identificadas falhas no barramento de comunicação como por exemplo, o barramento estar cheio e por isso, não permitir enviar a mensagem.
 - As falhas do SPI poderão ser por exemplo, a impossibilidade de transferir a toda informação.
 - Na falha na alimentação é possível obter a informação se tensão está abaixo do normal, ou se o TCAN4550 se desligou por excesso de temperatura (*thermal shutdown*).
- O pino GPO2, ao contrário do GPIO1, apenas funciona como saída, e neste caso, apresenta o mesmo tipo de funcionalidades. Pode ser utilizado para interrupções em caso de falha do CAN, mas em modo de teste é utilizado por RX, ao contrário do GPIO1 que é o TX.
 - O pino nINT corresponde a todas as interrupções globais que são possíveis neste componente.

Apesar do TCAN4550, ter funcionalidades bastante interessantes, que já foram referidas, existem ainda três pinos, aos quais as suas funcionalidades, se considerou, não serem adequadas para o projeto neste momento, são elas as seguintes: nWKRQ, WAKE,INH

- O pino nWKRQ, é um pino de *wake up* que pode ser definido das três seguintes modos: *wake up* do barramento, *wake up* local, ou *wake up* da alimentação. Como o SAS neste momento não possui esta funcionalidade nem está a ser considerada para futuros projetos, não foi objeto de muito estudo.

- O pino WAKE serve “acordar” o TCAN4550 por um meio externo, como por exemplo um interruptor.
- O pino INH serve para poder habilitar um pino de *enable* de um regulador de tensão em que só o vai ligar quando a tensão estiver estável.

5.7. REQUISITO E ANÁLISE DA SOLUÇÃO

Após a seleção dos principais componentes, nomeadamente o TCAN4550, é necessário reanalisar e adicionar alguns requisitos que anteriormente não foram considerados, porque não eram necessários. Na Tabela 9, observa-se os requisitos da solução encontrada.

Tabela 9 – Requisitos da solução.

<i>ID</i>	<i>Descrição do requisito</i>	<i>Tipo de requisito</i>	<i>OK ou NOK</i>	<i>Notas</i>
NEW REQ 6	O MCU tem que ter interface SPI	HW	OK	Novo requisito
NEW REQ 7	O TCAN4550 tem que ter interface SPI	HW	OK	Novo requisito
NEW REQ 8	O TCAN 4550 tem que ter <i>data timings</i> na ordem dos 5Mbps	HW	OK	Novo requisito
NEW REQ 9	O TCAN 4550 tem que ter <i>bit timings</i> na ordem dos 1Mbps	HW	OK	Novo requisito
NEW REQ 10	O TCAN 4550 tem que ser possível ser desligado por HW através do MCU e do regulador de tensão	HW	OK	Novo requisito
NEW REQ 11	O TCAN 4550 tem que passar os testes de ¹ EMC seguindo os parâmetros Bosch	HW	-	Novo requisito
NEW REQ 12	O TCAN 4550 tem que ter certificação AEC Q100	Sistema	OK	Novo requisito
NEW REQ 13	O TCAN 4550 tem que ter alimentações compatíveis com o SAS	HW	OK	Novo requisito
NEW REQ 14	O TCAN 4550 tem que ter cumprir a normal ISO26262	Sistema	-	Novo requisito

¹EMC - *Electromagnetic compatibility*

5.8. ANÁLISE *DESIGN* DO SISTEMA

Após finalizar o estudo sobre o TCAN4550 de forma mais detalhada, é necessário fazer uma seleção das funcionalidades, e reavaliar os requisitos para o sistema. É assim necessário fazer a interligação do TCAN4550 com sistema SAS, ou seja, fazer o *design* de esquema e algumas análises necessárias para verificar o funcionamento do conceito de forma teórica. Como o esquema é confidencial e não é possível de o mostrar, pelo que apenas irá ser mostrado o esquema base do TCAN4550 disponível no *datasheet*. Na *Figura 37*, observa-se o esquema elétrico base do TCAN4550.

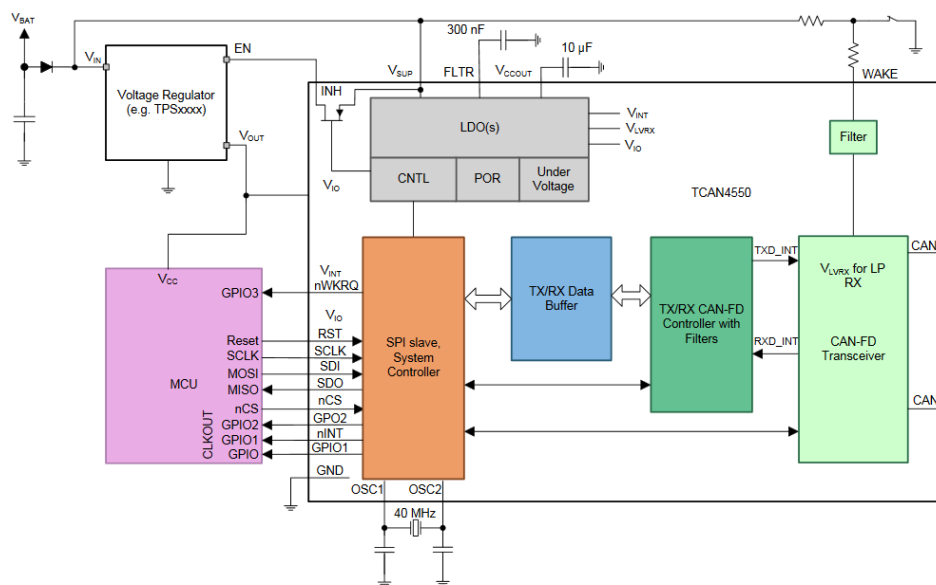


Figura 37 – Esquema utilizado como base para o esquema[32].

No exemplo da *Figura 37*, são utilizados os pinos todos do TCAN4550. Contudo todos os pinos que não foram utilizados referidos no subcapítulo 5.6, foram desativados através de resistências de *pull-up/pull-down*.

Com o esquema da fase preliminar já terminado, é necessário fazer análises com vista à validação, e certificar de que todos os sinais se encontram nos estudo previsto. Para esta fase de conceito foram efetuadas as seguintes análises: Worst Case Analysis (WCA), análise de consumos e análise de tempo de micro corte, que serão explicados em seguida.

Worst Case Analysis:

O WCA tem como objetivo verificar, por cada bloco principal do sistema, os valores máximos de cada componente, como exemplo tensão, corrente e temperatura, de modo a verificar que o valor máximo de cada componente, não irá danificar ou alterar o funcionamento do restante sistema ao qual está diretamente ou indiretamente ligado. Os componentes a serem verificados são os seguintes: regulador de tensão, microcontrolador, sensores magnéticos e o TCAN4550.

- Regulador de tensão

A análise que é necessária fazer ao regulador de tensão, são as seguintes:

- Verificar se a tensão de entrada cumpre a gama de tensão de entrada aceitável para a indústria automóvel.
- Verificar tensão de saída conseguirá alimentar todos os componentes do circuito.
- Se conseguirá fornecer corrente suficiente para todos os componentes.

Na Tabela 10, observa-se a análise que foi efetuada do regulador de tensão.

Tabela 10 – WCA do regulador de tensão.

<i>Condições de temperatura</i>		<i>Min</i>	<i>Max</i>	
		-40°C	+85	
<i>Parâmetro de análise:</i>	<i>Típico</i>	<i>Min</i>	<i>Max</i>	<i>Unidades</i>
<i>Tensão de alimentação</i>				
<i>Tensão de entrada (V)</i>	12,57	5,5	45	V
<i>Tensão de saída (V)</i>	5	4,9	5,1	V
<i>Corrente de saída (mA)</i>	13,5		24	mA
<i>Máximo absoluto tensão de entrada (V)</i>			45	V
<i>Tensão que entra em reset (V)</i>	4,62	4,50	4,74	V
<i>Gama de temperatura</i>	25	-40	125	°C
<i>Corrente de consumo</i>	0,00007		0,00015	A
<i>Potência dissipada (mW)</i>	382,3		0,8	mW

De um modo geral, é possível concluir que o regulador de tensão, apresenta características que satisfazem o sistema completo. De salientar que ao retirar o CAN *transceiver*, o consumo do SAS diminui bastante, de facto, o TCAN4550 tem um *transceiver* interno e a maior parte deste componente é alimentado à mesma tensão do regulador de tensão (+12V). Isto constitui uma grande vantagem, uma vez que não é necessário analisar outro regulador, tal apenas teria interesse, só no caso de se utilizar um regulador menor, o que ficaria mais barato. Se o regulador tivesse de alimentar na totalidade o TCAN4550 o valor típico seria de 50mA e o máximo absoluto de corrente seria de 322mA.

- **Microcontrolador**

Para microcontrolador neste caso específico, é necessário analisar os pinos aos quais irão sofrer alterações, e analisar se o seu consumo irá mudar com as novas implementações. No conceito inicial do SAS sem CAN FD, estes componentes foram analisados com detalhe ao pormenor. Na Tabela 11, observa-se a análise do microcontrolador

Tabela 11 – WCA do regulador do microcontrolador.

Condições de temperatura		Min	Max	
		-40°C	+85	

Parâmetro de análise: Tensão de alimentação	Típico	Min	Max	Unidades
Tensão de entrada (V)	5	4,9	5,1	V
Máximo absoluto tensão de entrada (V)			6,5	V
Tensão de entrada analógica (V)	5	4,9	5,1	V
Tensão de saída (V)	5	4,9	5,1	V
Resistência de pull-up interna (kΩ)	20	10	100	kΩ
Corrente de consumo (mA)	9,5	9	14	mA
Gama de temperatura	25	-40	105	°C

Parâmetro de análise: Interface SPI	Típico	Min	Max	Unidades
Voltage Input High (VIH) (V)	5	2	5,1	V
Voltage Input Low (VIL) (V)	1,75	1,7	1,8	V
Voltage Output High (VOH) (V)	5	2,2		
Voltage Output Low (VOL) (V)	0		0,7	V

Parâmetro de análise: Frequência	Típico	Min	Max	Unidades
Frequência de funcionamento do core (MHz)	32	1	64	MHz
Frequência de SPI (MHz)	8		16	MHz

Do ponto de vista de análise, é possível concluir que tantos os níveis de frequência *clock*, como os níveis de tensão entre o microcontrolador e o TCAN4550 destinados para o SPI estão adequados.

- **Sensores magnéticos**

Os sensores magnéticos não foram analisados detalhadamente, dado que, a alteração de CAN para CAN FD em nada influencia o esquema (note-se que poderá ter influencia na PCB), mas é importante obter alguns valores, nomeadamente ao nível do consumo de corrente, de modo a ser possível analisar o consumo do SAS.

Tabela 12 – WCA do regulador dos sensores magnéticos.

Condições de temperatura	Min	Max		
	-40°C	+85		
Parâmetro de análise: Tensão de alimentação	Típico	Min	Max	Unidades
Tensão de entrada (V)	5	2,7	5,5	V
Máximo absoluto tensão de entrada (V)			16	V
Corrente de consumo (mA)	2		4	mA
Gama de temperatura	25	-40	150	°C

De um modo geral os sensores magnéticos não irão sofrer nenhuma alteração no seu comportamento quando comparado com a versão SAS com CAN.

- **TCAN4550**

O TCAN4550, foi o bloco foi analisado mais pormenorizadamente, visto que, é o componente novo que vai ser integrado num sistema já existente. Por isso irá ter muitos mais parâmetros a ter em consideração, como é possível observar na Tabela 13.

Tabela 13 – WCA do regulador do TCAN4550.

Condições de temperatura		Min	Max		
		-40°C	+85		
Parâmetro de análise:	Típico	Min	Max	Unit	
Tensão de alimentação					
Tensão de entrada (V)	12,57	5,5	24	V	
Tensão de entrada do I/O (V)	5	3,135	5,25	V	
Tensão de saída do Vccout (V)	5	4,75	5,25	V	
Supply Current (mA)	35		100	mA	
Corrente de consumo do I/O (mA)			2	mA	
Consumo máximo absoluto de corrente (mA)			300	mA	
Under voltage protection I/O (V)	2,45	2,1	2,6	V	
Gama de temperatura (°C)	25	-40	125	°C	
Parâmetro de análise:	Típico	Min	Max	Unit	
CAN FD					
Tensão de saída do barramento (Dominante) CANH (V)	3,5	2,75	4,5	V	
Tensão de saída do barramento (Dominante) CANL (V)	1,5	0,5	2,25	V	
Tensão de saída do barramento (Recessivo) (V)	2,5	2	3	V	
Capacidade entre CANH ou CANL e GND (pF)			20	pF	
Capacidade diferencial entre CANH e CANL (pF)			10	pF	
Resistência entre CANH e CANL (kΩ)		12	100	kΩ	
Capacidade de CANH ou CANL (kΩ)		6	50	kΩ	
CAN FD taxa de transmissão (Mbps)	2		5	Mbps	
Atraso do CAN FD de acordo com a ISO11898-2 (ns)			255	ns	
Tempo do bit (Barramento) a 5 Mbit/s de acordo com a ISO11898-2 (ns) [33]		155	210	ns	
Tempo do tempo (RXD) 5 Mbit/s de acordo com a ISO11898-2 (ns) [33]		120	220	ns	
Tempo de bit (barramento) 2 Mbit/s ISO11898-2 (ns) [33]		435	530	ns	
Tempo de bit (RXD) 2 Mbit/s de acordo com a ISO11898-2 (ns) [33]		400	550	ns	
Atraso do CAN FD (ns) – Valor de datasheet			150	ns	
Tempo do tempo (Barramento) 5 Mbit/s (ns) – Valor de datasheet		155	210	ns	
Tempo do tempo (RXD) 5 Mbit/s (ns) – Valor de datasheet		120	220	ns	
Tempo do tempo (barramento) 2 Mbit/s (ns) – Valor de		435	530	ns	

datasheet

Tempo do tempo (RXD) 2 Mbit/s (ns) – Valor de datasheet	400	550	ns
--	-----	-----	----

**Parâmetro de análise:
SPI**

VIH (V)	5	3,5	5,1	V
VIL (V)	0	0	1,5	V
VOH (V)	5	4	5,1	V
VOL (V)	0	0	1	V

Parâmetro de análise: Frequência	Típico	Min	Max	Unidades
Frequência de SPI (MHz)			20	MHz
Frequência de oscilador (MHz)	40	20	40	MHz
Capacitância de carga do cristal (pF)		8	18	pF
Resistência série do oscilador (Ω)			60	Ω

Após verificar os valores mais detalhadamente do TCAN, é possível verificar que cumpre os requisitos para ser implementado no SAS sem problemas de comunicação SPI, de frequência, tensão de alimentação e de consumos. Ao nível de requisitos da norma ISO11898, é possível concluir que, cumpre os requisitos.

Análise de consumos:

Agora que os principais componentes foram analisados, é necessário verificar o consumo global, de modo a verificar os consumos parciais, isto é importante para validar o requisito do CAN. De facto o SAS com CAN FD cumpre os requisitos de consumos dado que consome menos que 150mA. Na Figura 38, observa-se o diagrama de consumos do SAS com o TCAN4550 já incorporado.

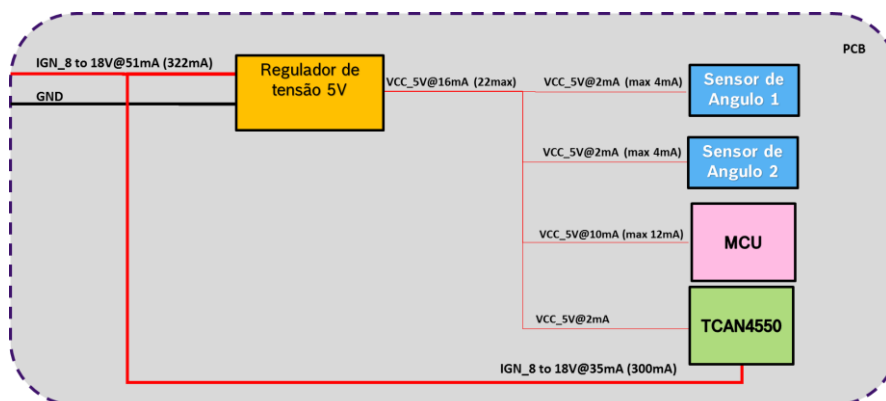


Figura 38 – Diagrama de consumos.

Com base na Figura 38, é possível concluir que em funcionamento geral, o SAS cumpre todos os requisitos necessários que forem já enunciados em cima. Contudo, quando há algum problema, como por exemplo de estar em *bus fault*, o TCAN4550 irá aumentar bastante o consumo do mesmo, visto que estará a enviar continuamente mensagens CAN FD enquanto não tiver o *acknowledge*. Neste caso, enviar bits dominantes, fará com que o consume aumente pelo que foi realizada a análise e foi considerado do valor máximo absoluto de 322mA. Este valor não cumpre os requisitos, mas se o sensor estiver em funcionamento normal, consumirá 51mA aproximadamente, que para este caso, será um valor perfeitamente aceitável.

Análise do micro corte

Após verificar todo o circuito, foi necessário analisar o safety. Após reuniões com o *safety expert* do SAS, foi acordado que um dos pontos mais importante para a segurança do produto seria reanalisar o impacto que a aplicação do CAN FD irá ter no caso de falha na alimentação durante alguns dos milissegundos (micro corte). Neste aspeto, e dependendo do cliente, o SAS tem que garantir o seu correto funcionamento funcionar com uma falha de 1ms na alimentação.

Analisando este requisito, verificou-se que o SAS necessita no mínimo absoluto de aproximadamente de 5,6V para que continue a funcionar normalmente. Para manter este requisito é utilizado um condensador com capacidade elevada evitar este efeito. Havia duas abordagens teóricas para calcular o tempo de descarregamento de um condensador. Um seria pela fórmula do método linear; e outra pelo método exponencial.

O método linear compreende que o condensador se irá descarregar de forma constante e linear ao longo do tempo e a sua fórmula é a seguinte[34]:

$$t = (C/(V-V_0))/I \quad (1)$$

Em que:

t = tempo de descarga (s)

C = capacidade do condensador (F)

V = Tensão final (V)

V₀ = Tensão inicial (V)

I = corrente (A)

Já o método exponencial considera que os condensadores não se irão descarregar por igual maneira durante o tempo, i.e., será muito grande no início e que irá descarregar mais lentamente. A sua fórmula é a seguinte[35]:

$$t = (R*C)*LN(V_0-V) \quad (2)$$

Em que:

t = tempo de descarga (s)

C = capacidade do condensador (F)

R = Resistência de carga (kΩ)

V = Tensão final (V)

V₀ = Tensão inicial (V)

Foram efetuados cálculos de ambos os métodos, mas, apenas se irá considerar a fórmula 2, uma vez que, representa o comportamento real do condensador.

Foram considerados quatro casos de análise, um com o consumo normal, outra com consumo máximo mas dentro do funcionamento normal, e as mesmas situações mas agora com uma taxa de envelhecimento do condensador de cerca de 30%. Esta corresponde a um envelhecimento de cerca de 15 anos de perda de capacidade. Na Figura 39, observa-se o tempo de descarga de um condensador para as quatro situações descritas.

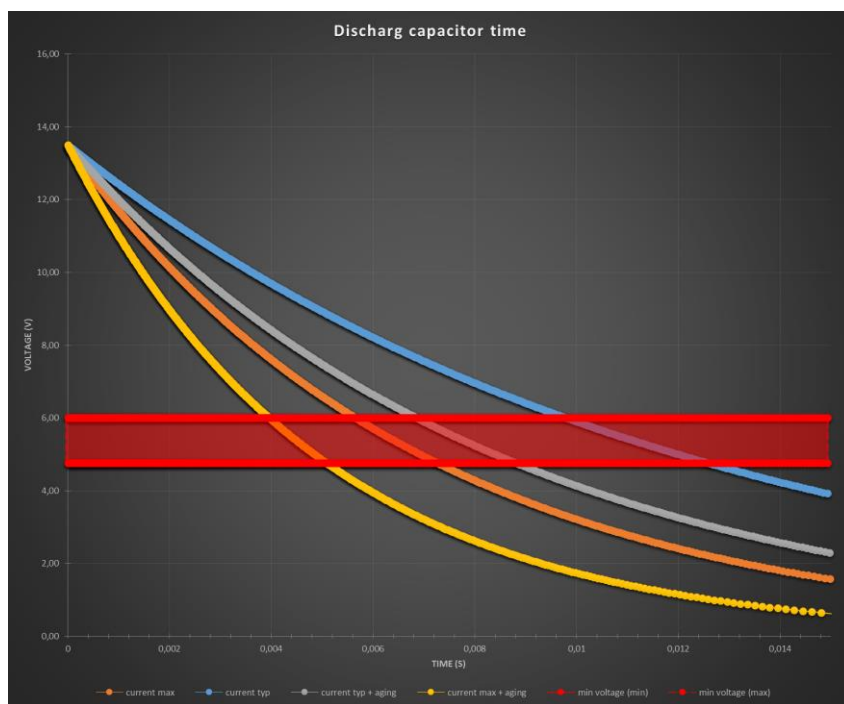


Figura 39 – Diagrama de tempo de descarga.

Com base na Figura 39, é possível concluir que o SAS em todos os casos irá cumprir com o requisito de 1ms de tempo de micro corte. A zona vermelha do gráfico representa a margem de segurança a para o mínimo de tensão que o SAS necessita para funcionar (5,6V).

De uma forma geral, conclui-se que esta implementação do CAN FD no SAS irá satisfazer os requisitos que estavam definidos anteriormente, sendo apenas necessário incluir alguns novos requisitos por adicionar funcionalidades e tecnologias novas.

6. TESTE E VALIDAÇÃO

Este capítulo aborda a implementação prática deste projeto, com o propósito de validação do conceito. Neste capítulo é discutidas as ferramentas de HW e SW que foram utilizadas, as adaptações que foram necessárias realizar, os testes efetuados e os resultados obtidos. Também neste capítulo serão enunciadas algumas dificuldades que foram sentidas durante o projeto e bem assim como alguns imprevistos.

6.1 FERRAMENTAS DE SW UTILIZADAS

No desenvolvimento do projeto, foi necessário de recorrer a algumas ferramentas SW bastantes importantes e que são já utilizados na Bosch, de modo a validar o conceito e seguir.

6.2.1. Zuken CR8000 Design Gateway

O Zuken CR8000 é uma ferramenta que é utilizada para desenhar esquemas de circuitos elétricos. Esta ferramenta foi utilizada para poder desenvolver o esquema do SAS com CAN FD. Posteriormente, quando for desenhada a PCB, esta ferramenta também será utilizada. Na Figura 40, observa-se o ambiente gráfico do Zuken CR8000.

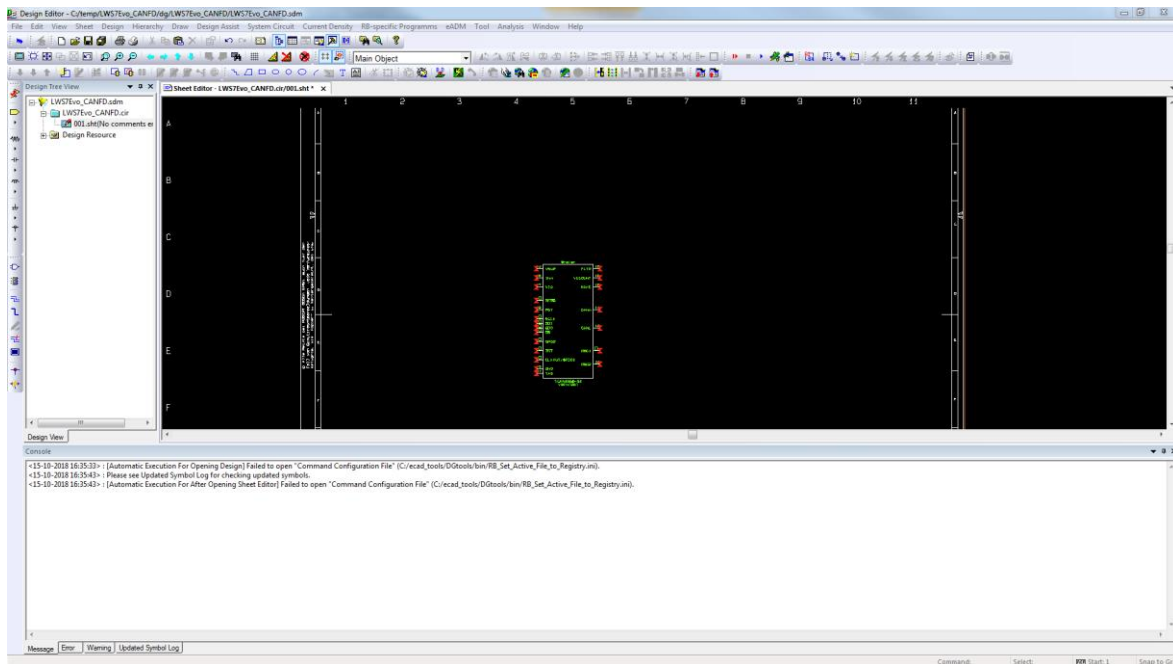


Figura 40 – Ambiente gráfico do CR8000.

6.2.2. IBM Rational DOORS

O IBM Rational DOORS é uma ferramenta criada pela IBM e que é muitas vezes utilizada pelas empresas ligadas ao ramo automóvel. É um gestor bastante avançado de requisitos, em que, todas as áreas de desenvolvimento (SW, HW, sistema, etc.) de um projeto utilizam esta plataforma de forma a ter os requisitos todos na mesma base, sendo

deste modo, ser mais fácil a visualização e a consulta. Na Figura 41, observa-se o ambiente gráfico do DOORS.

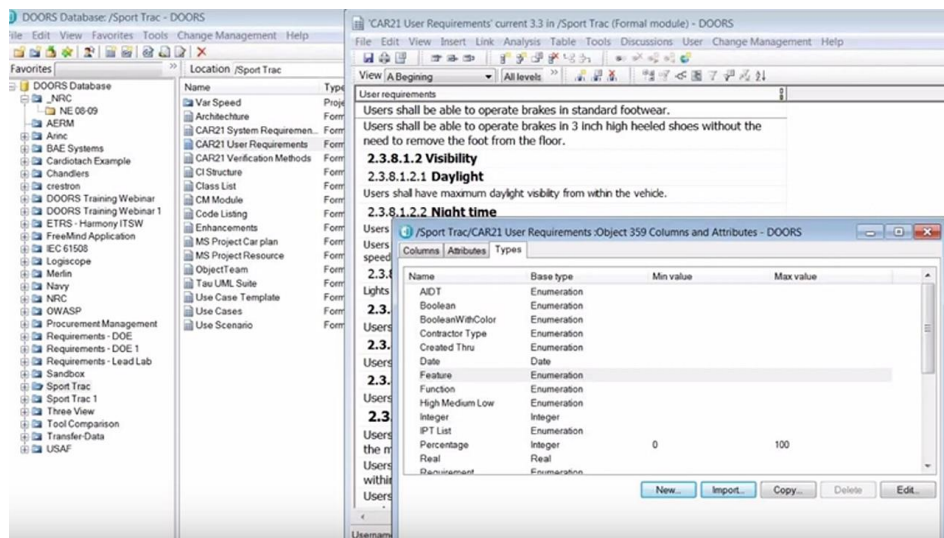


Figura 41 – Ambiente gráfico do DOORS[36].

6.2.3. IAR Embedded Workbench

O IAR Embedded Workbench é uma plataforma de desenvolvimento de sistemas embecidos utilizado para desenvolver o código para o microcontrolador e para testar em modo de *debug*. Com esta ferramenta foi possível desenvolver o código necessário para poder testar o conceito. Na Figura 42, observa-se o ambiente gráfico do IAR Embedded Workbench.

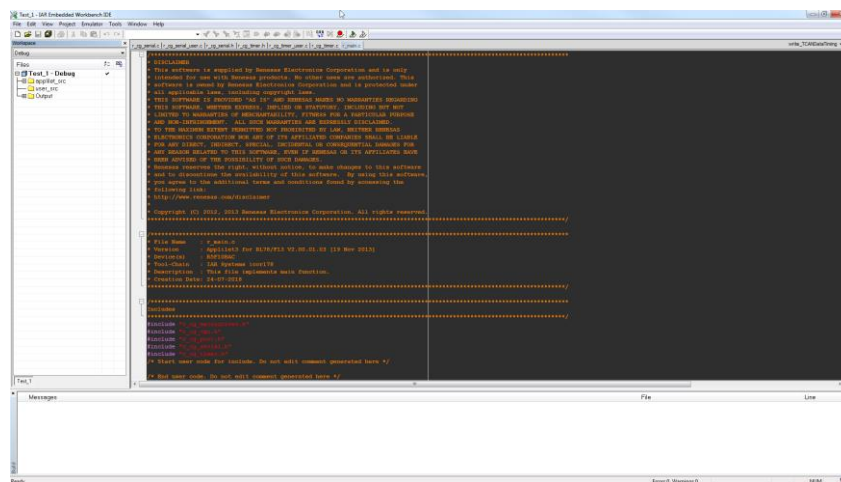


Figura 42 – Ambiente gráfico do IAR Embedded Workbench.

6.2.4. Applilet3

O Applilet3 é uma ferramenta de configuração do microcontrolador que é bastante útil quando se está a desenvolver um SW para sistemas embebidos, visto que é possível visualizar os pinos disponíveis, escolher entre outros, os mais indicados, e fazer configurações. Com esta ferramenta evita-se bastantes problemas durante o desenvolvimento. Na Figura 43, observa-se o ambiente gráfico do Applilet3.

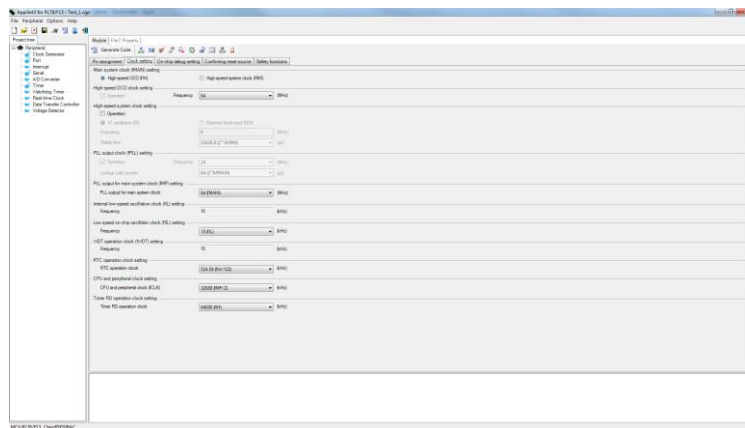


Figura 43 – Ambiente gráfico do Applilet3.

6.2.5. Renesas Flash Programmer

Esta ferramenta é utilizada para poder programar o microcontrolador a partir dos ficheiros criados no IAR Embedded Workbench. Na Figura 44, observa-se o ambiente gráfico do Renesas Flash Programmer.

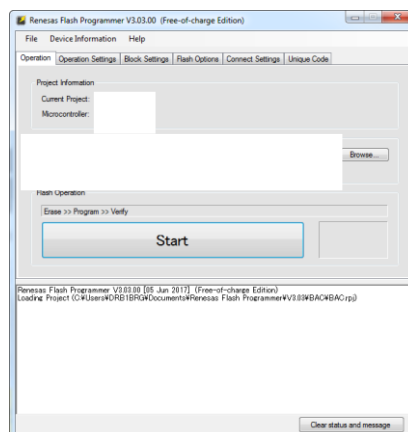


Figura 44 – Ambiente gráfico do Renesas *Flash Programmer*.

6.2.6. Vector CANalyzer

O CANalyzer é uma ferramenta criada pela Vector com o objetivo de analisar e simular a comunicação num barramento, neste caso o CAN e CAN FD. Esta ferramenta é bastante útil e complexa visto que é possível receber e enviar dados no barramento, ou seja, comporta-se como um equipamento que estivesse a comunicar no meio da rede. Na Figura 45, observa-se o ambiente gráfico do CANalyzer.

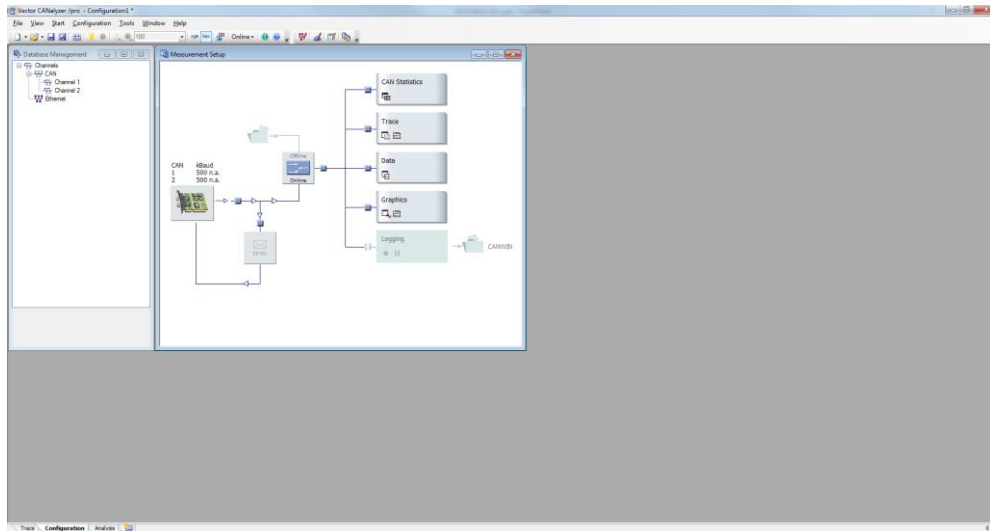


Figura 45 – Ambiente gráfico do *CANalyzer*.

6.2.7. Picoscope 6

O Picoscope 6 é uma ferramenta da Pico Technology e que tem como objetivo visualizar as medições que foram adquiridas no osciloscópio da Pico, o PicoScope. Com esta ferramenta é possível por exemplo alterar, os intervalos de visualização, descodificação da mensagem consoante o protocolo de comunicação, entre outras características interessantes. Figura 46, observa-se o ambiente gráfico do Picoscope 6.

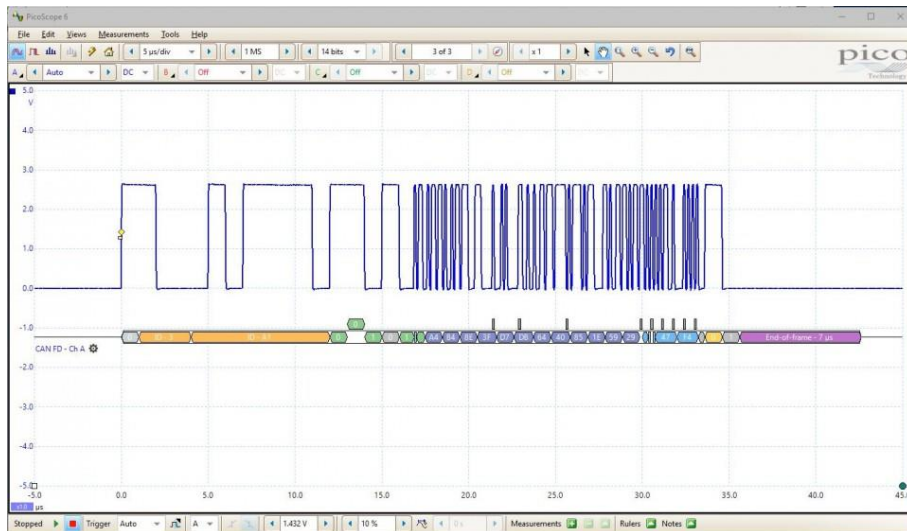


Figura 46 – Ambiente gráfico do Picoscope 6[37].

6.2.8. Number Based Document Administration Tool (NAT)

O NAT é uma ferramenta de repositório de documentos da Bosch. Nesta ferramenta foram inseridos todas as análises e apresentações deste projeto, e qualquer nova atividade que seja necessária documentação, irá ficar guardada nesta aplicação. Por questões de confidencialidade não é possível apresentar o ambiente gráfico desta ferramenta.

6.2 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

No desenvolvimento do projeto foi necessário um conjunto de equipamentos, que se demonstraram fundamentais para cumprir os objetivos. Todos estes equipamentos são utilizados pela equipa de desenvolvimento tanto no SAS como noutros projetos.

6.2.1. Material de laboratório

No material de laboratório está incluído todos os equipamentos como fontes de alimentação, e aparelhos de medida como é o caso do osciloscópio. Neste caso utilizou-se uma fonte de alimentação da Rohde and Schwarz e um osciloscópio da Tektronix. Na

Figura 47, observam-se a fonte de alimentação e o osciloscópio de quatro canais utilizado.



Figura 47 – Fonte de alimentação e osciloscópio utilizados [38][39].

6.2.2. Vector VN1610

O VN1610 é um aparelho da Vector que permite fazer a *interface* entre o computador e o barramento de CAN. Este tem a particularidade de já ter incluída a funcionalidade do CAN FD. Com este equipamento, aliado ao SW do CANalyzer, é possível comunicar com um barramento CAN FD e verificar que mensagens estão a ser enviadas e recebidas pelo SAS. Na Figura 48, observa-se o VN1610 que foi utilizado.



Figura 48 – Ambiente gráfico do *Picoscope 6*[37].

6.2.3. Placa de desenvolvimento do SAS

Foi utilizado uma placa de desenvolvimento do SAS de modo a poder fazer a interligação do SAS com o TCAN4550 sem que seja necessário implementar a PCB, o que tornaria o projeto pudesse ser mais demorado. A placa de desenvolvimento é

denominada por *Failure Mode effects Analysis (FMEA) board*, uma vez que, é utilizada para testes do desenvolvimento em que é possível fazer várias configurações e injetar falhas no sistema. Por ser tão versátil foi utilizada para provar o conceito elétrico, visto que, na realidade é um SAS que está lá inserido. Na Figura 49, observa-se o aspeto visual desta placa.

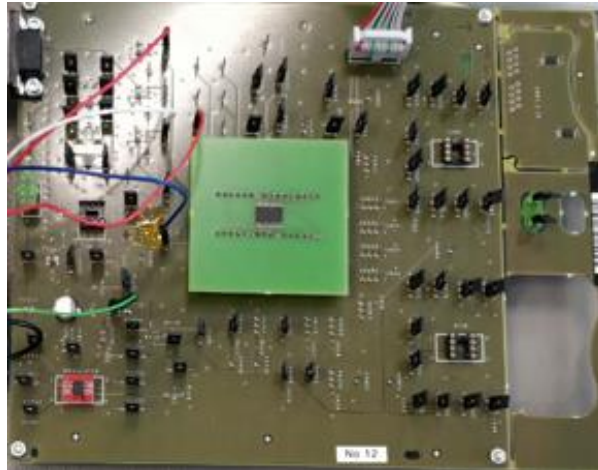


Figura 49 – FMEA board do SAS.

6.2.4. Placa de desenvolvimento do TCAN4550

Foi enviado pela parte da Texas Instruments, placas de desenvolvimento, para que seja possível testar o TCAN4550 sem ter que fazer uma PCB. Esta placa de desenvolvimento tem o circuito necessário para interligar o SAS ao TCAN4550 sem necessitar de muito esforço. Na Figura 50, observa-se o aspeto da placa de desenvolvimento do TCAN4550.

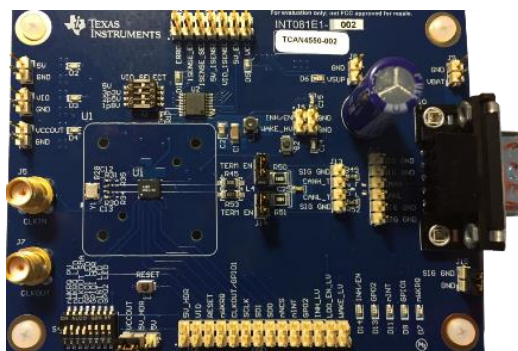


Figura 50 – Placa de desenvolvimento do TCAN4550.

6.2.5. PicoScope 2000 series

O PicoScope 2000 series, é utilizado como um complemento do osciloscópio, visto que, este equipamento juntamente com o seu SW tem a capacidade de decodificar protocolos de comunicação através das medições dos sinais, como por exemplo o CAN FD. Com este equipamento, é possível verificar no sinal, se a mensagem está a ser enviada corretamente. Na Figura 51, observa-se o PicoScope utilizado no desenvolvimento do projeto.



Figura 51 – PicoScope 2000 series.

6.2.6. Renesas Programmer

O Renesas Programmer foi utilizado para programar o microcontrolador com o novo SW, ou então para entrar em modo de *debug* e analisar o código em execução *step by step*. Na Figura 52, observa-se o equipamento utilizado para programar o microcontrolador.



Figura 52 – Renesas Programmer [40].

6.3 ADAPTAÇÕES NECESSÁRIAS

Para ser possível testar o conceito do SAS com o TCAN4550, foi necessário fazer adaptações do ponto de vista de HW e de SW, visto que o objetivo do trabalho é uma prova do conceito.

6.3.1. Adaptações de HW

As adaptações necessárias de HW baseou-se mais precisamente entre a FMEA *board* e a placa de desenvolvimento do TCAN4550. Na FMEA *board* foi necessário analisar todas as ligações internas, refazer as mesmas, de modo a que sejam compatíveis para ligar diretamente ao TCAN4550. No lado do TCAN4550, foi necessário analisar os *datasheets* da placa de desenvolvimento, e alterar as ligações internas de modo a serem compatíveis com a FMEA *board*. Na Figura 53, observa-se o diagrama de ligações entre a FMEA *board* e a placa de desenvolvimento do TCAN4550.

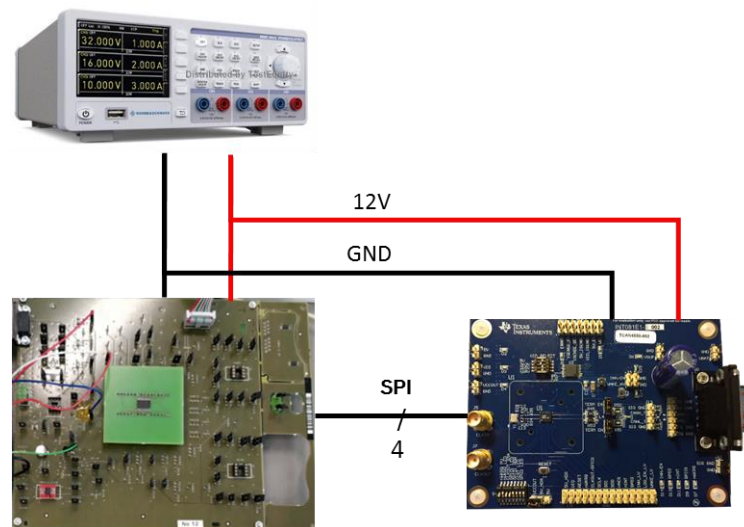


Figura 53 – Adaptação de HW.

6.3.2. Adaptações de SW

Do ponto de vista de SW, foi necessário desenvolver um programa de teste, de modo a que fosse possível configurar o microcontrolador para as definições pretendidas, e configurar o TCAN4550 para criar mensagens CAN FD. O código foi criado de raiz, e necessário analisar o *datasheets* completos do tanto do microcontrolador como do TCAN4550 do ponto de vista de SW, no qual se inclui analisar os registos e configurações. Apesar do Applilet3 ser uma ferramenta bastante interessante na medida em que é possível configurar o microcontrolador com as definições pretendidas foi necessário fazer adaptações.

6.4 PLANOS DE TESTE

Como já foi explicado anteriormente, foi necessário criar um SW de teste de modo a gerar mensagens CAN FD. Como o SW do SAS é bastante complexo e iria demorar bastante tempo a perceber o código e saber o que utilizar, foi criado um de raiz com o apoio da ferramenta Applilet3. De salientar que o SW do SAS não tem *driver* de SPI disponível, pelo que todo o código efetuado no decorrer deste projeto, irá ser utilizado como base pela equipa de SW para poder implementar com o SW do SAS. Neste código de teste estão também disponíveis todas as configurações que foram necessárias para comunicar por CAN FD. Para prova de conceito, foram planeados três testes, que são os seguintes: plano de teste do LED, plano de teste do SPI e plano de teste do CAN FD.

6.4.1. Plano de teste do LED

O teste do LED foi utilizado para validar que as configurações principais do microcontrolador foram efetuadas corretamente. Inicialmente o objetivo foi apenas ligar um LED, mas posteriormente o objetivo foi através de piscar o LED recorrendo a interrupções. Ambos os testes foram conseguidos e validados. Na Figura 54, observa-se o diagrama do teste do *Light-Emitting Diode* (LED).

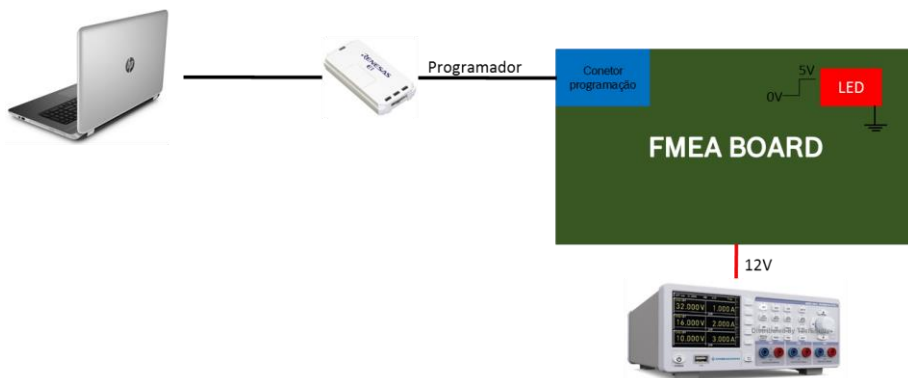


Figura 54 – Diagrama do teste do LED.

6.4.2. Plano de teste do SPI

O teste de SPI foi usado com o objetivo de verificar a comunicação entre o microcontrolador e o TCAN4550. Uma vez que este é o protocolo usado para comunicar foi definido a seguinte configuração:

- Comprimento dos dados: 8 bits
- Direção da transmissão: *Less significant bit* (LSB)
- *Data timing*: Na transição de 0 para 1 e o clock a começar com 0. Na, Figura 55, observa-se a configuração do *Data timing*.

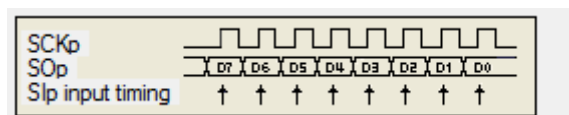


Figura 55 – Configuração do *Data Timing*.

- Tipo de *clock*: gerado internamente pelo microcontrolador (*master*)
- *Baudrate*: 8MHz

Para configurar o TCAN4550, é necessário aceder aos endereços de memória desejado e enviar os registos (32bits) com os valores pretendidos de acordo com a informação do *datasheet*. O objetivo inicial do teste passa por obter o valor do ID interno já definido no TCAN4550, validando assim o envio e receção da comunicação entre este e o microcontrolador. Depois desta validação, os próximos passos seriam de aceder aos endereços de memória, alterar os valores dos registos internos do TCAN4550, e ler o endereço de modo a verificar se a alteração foi efetuada corretamente. Na Figura 56, observa-se o diagrama de teste do SPI.

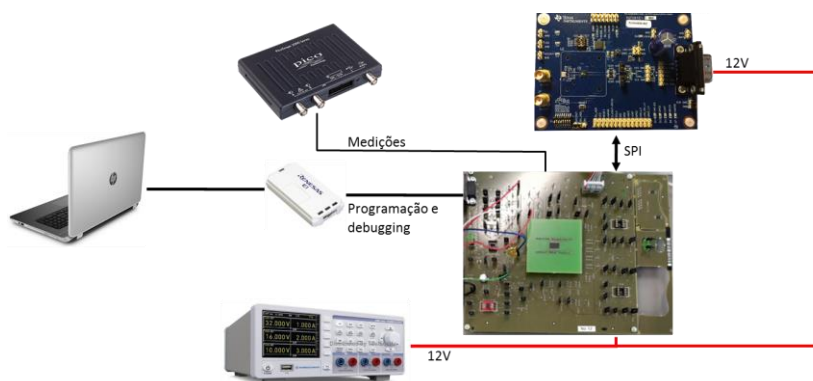


Figura 56 – Diagrama do teste do SPI.

6.4.3. Plano de teste do CAN FD

O teste do CAN FD é o mais importante, visto que é o teste final e que vai validar a prova do conceito deste projeto. O principal objetivo deste teste é validar o envio mensagens CAN FD com informação criada previamente através de configurações entre o microcontrolador e o TCAN4550. O plano para este teste consiste em identificar quais os endereços e que valores dos registos que são necessários alterar e a sequência correta de envio dos comandos via SPI, de modo a ser possível configurar e criar a mensagem CAN FD corretamente com as informações pretendidas, quer ao nível de dados, quer ao nível de taxas de transmissão. As configurações utilizadas a nível do protocolo CAN FD foram as seguintes:

- ID: 12345678 (*extended ID*)

- FDF: 1
- BRS:1
- DLC: 7
- *Data*: 11 22 33 44 55 66 77
- *Data rate*: 2Mbps
- *Bit rate*: 500Kbps

Em termos de *setup* de teste, a grande diferença entre este teste e o teste de SPI é o facto de se usar o VN1610 da Vector para monitorizar as mensagens CAN FD. Na Figura 57, observa-se o diagrama de teste do CAN FD.

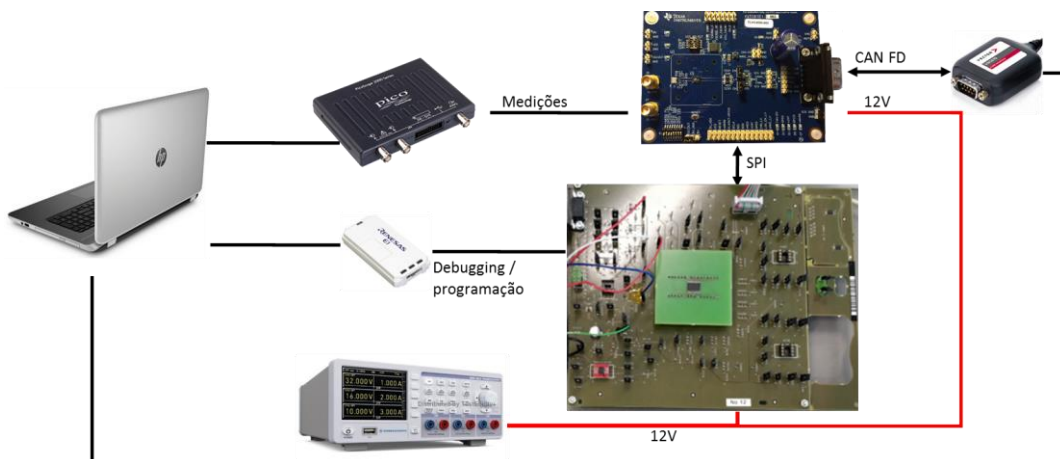


Figura 57 – Diagrama do teste do CAN FD.

Este teste é bastante complexo, uma vez que, existe pouca documentação de apoio do TCAN4550, visto ser um produto em desenvolvimento e a documentação de apoio (*datasheets* e *SW user's guide*) não está ainda numa versão final.

6.5 RESULTADOS DO TESTE

Este subcapítulo tem como objetivo, expor os resultados dos testes efetuados, tanto do SPI como do CAN FD.

6.5.1. Resultados do teste de SPI

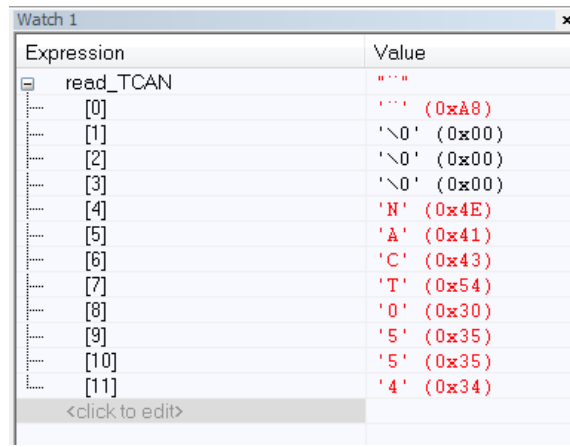
Inicialmente foi necessário montar o *setup* de teste como foi descrito no subcapítulo 6.4.2. Na Figura 58, observa-se o *setup* de teste do SPI.



Figura 58 – Setup de teste do SPI.

Em primeiro lugar, foi testado se o *drive* SPI estava bem configurado se o pino SCK estava a gerar corretamente o *clock*, mas tal não se verificou. Nesse sentido teve que se ajustar o tempo para que o *slave select* fosse ativo antes que o SCK iniciasse a geração do *clock* do SPI, caso contrário não havia comunicação. Seguidamente e após corrigir este problema o objetivo seguinte, seria de enviar um pedido do ID para o TCAN4550 de modo a que este respondesse ao pedido. Neste teste era possível observar que os pinos SCK, SS e MOSI estavam a funcionar corretamente. Contudo o TCAN4550 não respondia aos comandos pelo MISO. Após várias tentativas de corrigir o problema, verificou-se que a alimentação dos 5V da placa de desenvolvimento não estavam a funcionar corretamente. A alteração da alimentação da placa de desenvolvimento para 3,3V resolveu o problema,

que será abordado mais adiante. Com esta alteração, foi possível obter o ID do TCAN4550 através do SPI, como é possível observar Figura 59.



Expression	Value
read_TCAN	"..."
[0]	'...' (0xA8)
[1]	'\0' (0x00)
[2]	'\0' (0x00)
[3]	'\0' (0x00)
[4]	'N' (0x4E)
[5]	'A' (0x41)
[6]	'C' (0x43)
[7]	'T' (0x54)
[8]	'0' (0x30)
[9]	'5' (0x35)
[10]	'5' (0x35)
[11]	'4' (0x34)

Figura 59 – Resposta do TCAN4550 ao pedido do ID.

Segundo o *datasheet*, o ID são 2 registros de 4Bytes cada, sendo que o primeiro registro é o “TCAN” e o segundo registro é o “4550”. Com base neste resultado, é possível concluir que a comunicação entre o microcontrolador e o TCAN4550 foi efetuada com êxito. A validação da comunicação também foi efetuada com auxílio do PicoScope, onde é possível observar na Figura 60 os quatro sinais do SPI a funcionarem corretamente.

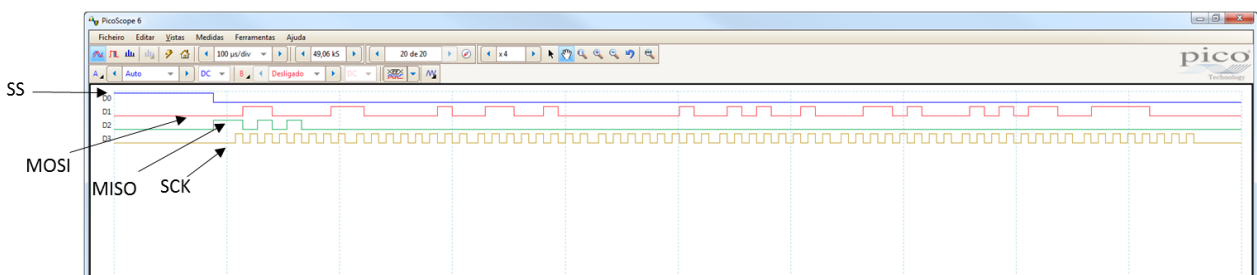


Figura 60 – Resposta do TCAN4550 visto do Picoscope.

6.5.2. Resultados do teste de CAN FD

E relação ao teste do SPI foi necessário alterar o *setup* de teste, em que se adicionou o VN1610 com o propósito de visualizar as comunicações para o CAN FD. Os pontos de medida no PicoScope, deixaram de ser as linhas de SPI e passou a ser as linhas de CAN FD, como se pode observar na Figura 61, o *setup* para o teste CAN FD.

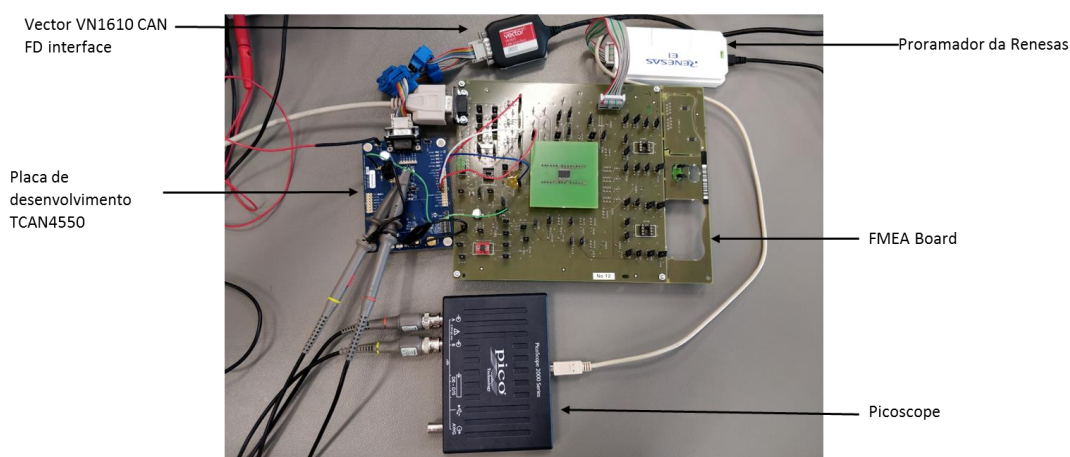


Figura 61 – Setup de teste para o teste do CAN FD.

O teste em enviar tramas CAN FD, teve bastantes complicações, visto que havia erros do *datasheet* e do *SW user's guide*, foi preciso perder bastante tempo a encontrar as falhas e corrigi-las. Após reuniões com o fabricante do TCAN4550, foi possível enviar mensagens CAN FD corretamente. Na Figura 62, observa-se o resultado do teste do CAN FD no CANalyzer.

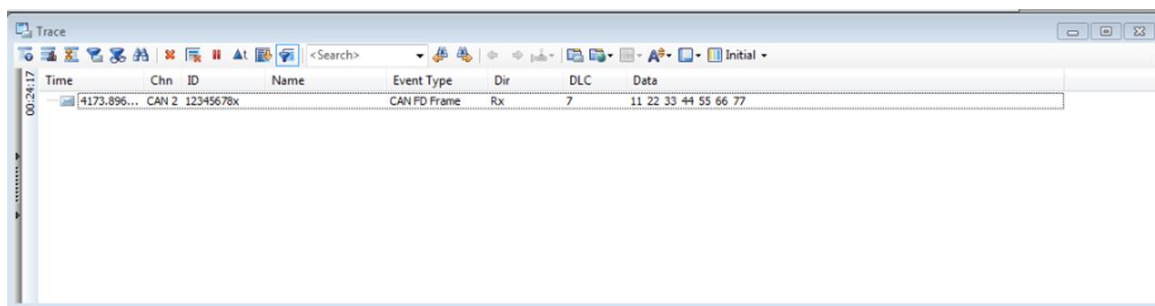


Figura 62 – Resultados do teste do CAN FD no CANalyzer.

Na Figura 62 verifica-se que as configurações que foram definidas anteriormente estão a ser enviadas corretamente, nomeadamente o ID, o DLC e os Dados. Neste teste, não foram visualizados tramas de erro, caso contrário o CANalyzer iria interpretar mal a mensagem, ou sinalizar que o protocolo não estava a ser corretamente cumprido.

Para se verificar se os níveis de tensão da trama e as taxas de transmissão estavam corretos, foram efetuadas medições no PicoScope, onde foram validados estes valores. Também se verificou se a descodificação da mensagem está coerente com o CANalyzer, com o propósito de existir uma redundância na validação do conceito. Na Figura 63, observa-se os resultados do teste de CAN FD no Picoscope.

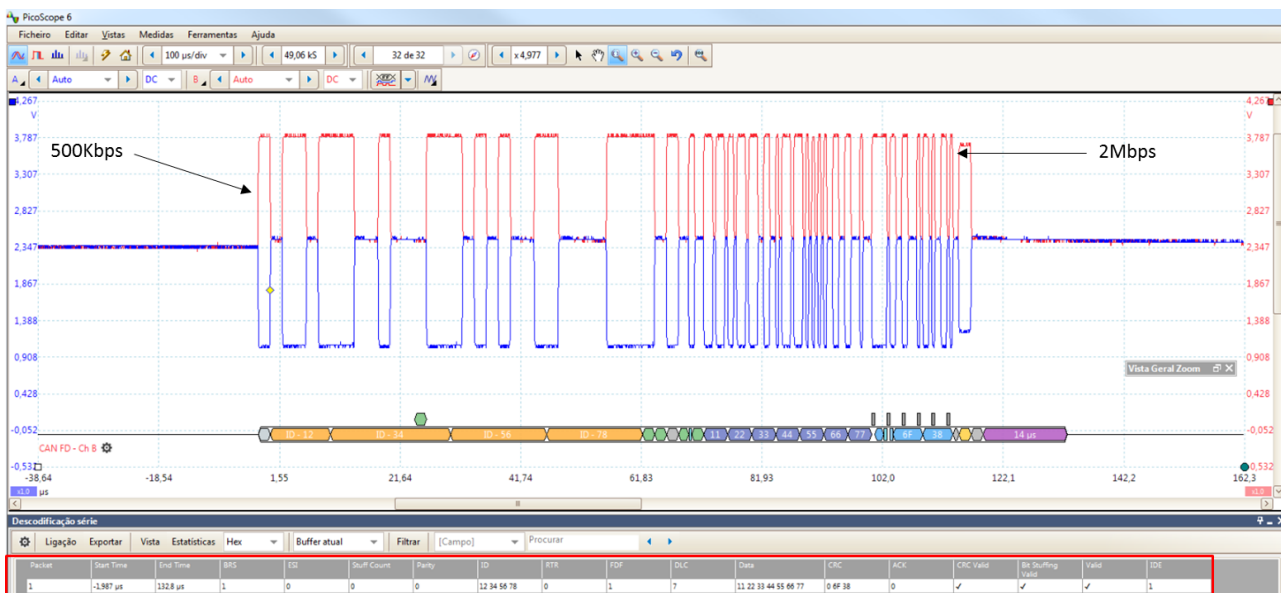


Figura 63 – Resultados do teste do CAN FD no Picoscope.

Como é possível verificar na Figura 63, é possível verificar as diferenças entre o *bit rate* (500Kbps) e o *data rate* (2Mpbps). No protocolo de comunicação CAN isto não era possível, visto que, a velocidade de dados é igual para toda a mensagem. Também é possível verificar que a descodificação da mensagem CAN FD no Picoscope está coerente com o CANalyzer, o que permite concluir que foi possível enviar mensagens CAN FD utilizando o HW do SAS, apenas utilizando um controlador CAN FD externo.

Os resultados dos testes foram recolhidos, analisados, e apresentados à equipa e posteriormente discutido internamente. Como resultado, a prova de conceito foi validada e aceite pela equipa.

6.6 DIFICULDADES E IMPREVISTOS

Apesar de os resultados dos testes terem sido positivos, houve algumas complicações, nomeadamente com a placa de desenvolvimento do TCAN4550 e com a sua documentação. Os erros foram reportados ao fabricante, que já tinha conhecimento de alguns erros, mas que outros ainda não lhe tinham sido reportados. Tal levou a que documentos como o *datasheets* e o *SW user guide* fossem atualizados com base no *feedback* deste nosso trabalho. Foram trocados *e-mails* e houveram reuniões com o fabricante que se sempre se mostrou disponível no *support* do produto. Alguns dos erros detetados são os seguintes:

6.6.1. Problema nos 5V

Como já foi referido anteriormente, houve um problema com os 5V da placa de desenvolvimento e que impossibilitava de utilizar o SPI para comunicar com o TCAN4550. Tal foi discutido com o fabricante, que reconheceu o erro, e que o mesmo se ficava a dever aos condensadores do circuito de oscilação. Para ser possível utilizar a alimentação dos 5V da placa de desenvolvimento é necessário trocar o valor por outros de diferente capacidade.

6.6.2. Erros no *datasheet*

Os erros no *datasheet* estão relacionados com o valor que os registos, e neste caso o mais crítico foi o registo do *prescaler* do *bit timing*, em que o valor a inserir não coincidia com o valor do registo, o que levava a um cálculo errado do *bit timing*. Concluiu-se que o problema era o de que a estrutura e a descrição do registo estavam trocados. Outro dos erros no *datasheet* foi o do registo do *data bit* estar classificado como leitura, mas na verdade era necessário estar classificado como escrita. Os erros descritos foram também reconhecidos pelo fabricante que prontamente atualizou o *datasheet* com estas correções.

6.6.3. Erros no *SW user's guide*

Neste documento houve algumas falhas que levou a que os testes demorassem mais que o espectável, uma vez que neste documento continha exemplos que faziam

referência à sequência necessária de configuração para poder enviar mensagens CAN FD. Uns dos erros encontrados foi relativamente ao cálculo do *bit timing*, o que levava a que o *prescaler* dividisse a frequência do oscilador para gerador a frequência da mensagem CAN FD por 260 vezes em vez de 4. Esta situação levou a que houvesse mensagens com taxas de transmissão que não estavam corretas. Outra dificuldade relacionava-se com o endereço de memória onde se escrevia os dados relativos à mensagem CAN FD a ser enviada. Este problema significava que durante o envio de mensagens para o barramento CAN FD, aparecessem erros no CANalyzer. Este problema ocorria porque a informação que estava a ser escrita nos endereços de memória a enviar a mensagem CAN FD, não correspondia à informação que estava a ser enviada, uma vez que essa informação estava a ser escrita no endereço de memória errado. Estas situações são apenas algumas das que tomaram lugar neste trabalho.

Alem dos erros reportados, houve sugestões que foram enviadas ao fabricante de modo a ter-se um documento mais completo e mais claro. É exemplo a sugestão de se adicionar um parágrafo de sequência de configuração mais transparente, para ser possível perceber de uma forma mais direta, qual o registo a ser necessário alterar. É de realçar que o fabricante sempre teve abertura para discutir e resolver os problemas, e isso possibilitou que os resultados fossem positivos no final. Pela parte do fabricante, este projeto foi benéfico, uma vez que ganhou mais experiência com o seu componente, e permitiu atualizar o seu equipamento e a sua documentação de apoio com base no feedback da Bosch.

6.7 RESUMO DO ESFORÇO DO TRABALHO

Em relação ao trabalho realizado quer do ponto de vista de implementação, quer do ponto de vista de testes e validação, foram ultrapassados com sucesso, sendo que os estudos e as análises efetuadas previamente foram particularmente úteis para garantir esse resultado. Este subcapítulo apresenta um resumo do esforço do trabalho do ponto

de vista de documentação, equipamentos, ferramentas utilizadas, Na Tabela 14, resume-se os meios envolvidos durante o trabalho

Tabela 14 – Resumo do esforço do trabalho.

Tipo	Nome	Número	Comentários
Documentação	<i>Datasheet</i> do microcontrolador	>1800 Páginas	
Documentação	<i>Datasheet</i> do TCAN4550	153 Páginas	Versão que foi fornecida à Bosch
Documentação	<i>SW user's guide</i> do TCAN4550	22 Páginas	Versão que foi fornecida à Bosch
Documentação	<i>Datasheets</i> dos restantes componentes do SAS	>1000 Páginas ¹	
Documentação	<i>Datasheet</i> do MCP2517D	97 Páginas	
Documentação	<i>Norma ISO26262</i>	86 Páginas ²	Apenas contabilizada uma parte da ISO26262
Documentação	<i>Norma ISO11898</i>	40 Páginas ³	Apenas contabilizada uma parte da ISO11898
Equipamento	Osciloscópio de bancada	1 Equipamento	Para medições
Equipamento	Fonte de alimentação	1 Equipamento	Para alimentação do circuito
Equipamento	Vector VN1610	1 Equipamento	Para comunicação com CAN FD
Equipamento	<i>FMEA board</i>	1 Equipamento	Para teste funcional
Equipamento	Placa de desenvolvimento do TCAN4550	1 Equipamento	Para teste funcional
Equipamento	PicoScope 2000 series	1 Equipamento	Para medição
Equipamento	Renesas Programmer	1 Equipamento	Para programação
Aplicação	Zuken CR8000 Design Gateway	1 Licença	Para desenho de esquema
Aplicação	IBM Rational DOORS	1 Licença	Para verificação de requisitos

Aplicação	IAR Embeded Workbench	1 Licença	Para programação/ <i>debug</i>
Aplicação	Applilet3	1 Licença	Para configuração
Aplicação	Renesas Flash Programmer	1 Licença	Para programação
Aplicação	Vector CANalyzer	1 Licença	Para comunicação CAN FD
Aplicação	Picoscope 6	1 Licença	Para medição
Aplicação	Number Based Document Administration Tool (NAT)	1 Licença	Para armazenar informação
Código	Linhas de código utilizadas	>400 Linhas de código	Não contabilizando as configurações iniciais apenas o necessário para fazer o teste
E-mail	E-mail trocados com o fornecedor do TCAN4550	16 E-mails	Contabilizando apenas e-mail de discussão técnica

¹ Por motivos de confidencialidade os materiais não foram relevados, por esse motivo, achou-se desnecessário contabilizar o número de páginas destes componentes. Este número é apenas uma aproximação.

² A norma ISO26262 está dividida em 10 partes, cada parte associada a uma área de ação específica. Nesta contagem, foi utilizada como consulta a parte cinco, referente ao HW.

³ A norma ISO11898 está dividida em cinco partes, cada parte associada a uma área de ação específica. Nesta contagem, foi utilizada como consulta a parte dois, onde estão incluídos, os *delays*, e as alimentações.

Conforme se pode observar, o desenvolvimento de um trabalho desta natureza envolve um conjunto significativo de meios. Deve-se referir que estes constituem apenas uma parte dado que o produto necessita de passar por um conjunto adicional de testes até que esteja apto para ser produzido em série.

7. CONCLUSÕES

Ao longo do relatório foram apresentados desenvolvimentos da solução com vista à resolução do problema inicialmente proposto. Nesta secção são apresentadas as principais conclusões que foram sendo retirados à medida que o trabalho foi executado, bem assim como algumas melhorias que são passíveis de ser feitas na continuidade deste projeto.

7.1. RESUMO DO TRABALHO REALIZADO

A implementação do CAN FD num sensor como o SAS é um processo bastante longo e complexo, uma vez que se está a lidar com sistemas críticos que são inseridos

num automóvel real e, por isso, a possibilidade de falha devem de ser praticamente nula. A prova do conceito que foi levada a cabo utilizando esta versão do CAN constitui um importante ponto de partida para que no futuro a Bosch possa produzir produtos com estas características. Com efeito, conhecimento resultante durante do desenvolvimento deste projeto foi adquirido, documentado e partilhado com todos os elementos da equipa desenvolvimento do SAS.

A complexidade do desenvolvimento deste projeto ficou a dever-se em larga medida à utilização de tecnologia que ainda não está disponível no mercado, não estando disponível ainda feedback disponível que teria sido bastante proveitoso na resolução de alguns problemas encontrados. Este projeto foi também particularmente abrangente, uma vez que, incluiu tarefas tanto em HW como em SW, levando à utilização de um conjunto alargado de equipamentos, ferramentas, para além do estudo de documentação algo extensa. Foi particularmente gratificante a discussão com a equipa designado ao desenvolvimento do componente. Resta-nos, finalmente, afirmar que foi integralmente realizado o trabalho proposto pela Bosch, i.e., levar a cabo a prova de conceito de um SAS utilizando CAN FD

7.2. MELHORIAS FUTURAS

As possibilidades de desenvolvimentos futuros deste trabalho podem dividir-se em desenvolvimentos de HW e de SW. Ao nível de HW, esses desenvolvimentos passariam pelo desenho duma PCB utilizando uma base de um sensor em produção, e realizar testes mais abrangentes, como por exemplo testes de EMC. Ao nível de SW, uma melhoria passaria por organizar o código de teste, e utilizar a sua base para implementar no SW do SAS, com a finalidade de encontrar erros / inconformidades. Ao nível de *safety* seria necessário fazer Fault Tree Analysis (FTA), método útil para avaliar a probabilidade da ocorrência de um modo de falha. Também a nível de *safety* é necessário fazer uma Design Failure Mode and Effect Analysis (DFMEA), que é um método que permite identificar qualitativamente, as possíveis falhas de um produto. Pensamos que com estas atividades é possível obter um protótipo funcional do ponto de vista de desenvolvimento, ficando a

faltar unicamente a validação dos processos ao nível de produção, procedimento que é necessário para a validar a produção em série.

7.3. APRECIÇÃO PESSOAL

A nível pessoal considero que este projeto foi bastante enriquecedor, do ponto de vista de aprendizagem tanto técnica como pessoal. Foram desenvolvidas *hard skills* e *soft skills* bastante importantes para a minha formação pessoal e que certamente terão impacto positivo na minha carreira, e que certamente irei aproveitar no futuro. Ter tido o privilégio de trabalhar com componentes que ainda estão em desenvolvimento foi bastante importante. Exigiu o melhor de mim em trabalho individual e em trabalho de equipa. Considero ainda que tive o privilégio de integrar uma boa equipa.

Referências documentais

- [1] Robert Bosch, “Preventing skidding - the Electronic Stability Program ESP® - Bosch History Blog,” 2018. [Online]. Available: <https://blog.bosch.com/history/en/2016/02/15/preventing-skidding-the-electronic-stability-program-esp/>. [Accessed: 05-Sep-2018].
- [2] Daimler, “Mercedes-Benz and the invention of the anti-lock braking system: ABS, ready for production in 1978 - Daimler Global Media Site,” 2008. [Online]. Available: <https://media.daimler.com/marsMediaSite/en/instance/ko/Mercedes-Benz-and-the-invention-of-the-anti-lock-braking-system-ABS-ready-for-production-in-1978.xhtml?oid=9913502>. [Accessed: 05-Sep-2018].
- [3] Robert Bosch, “Antilock braking system,” 2018. [Online]. Available: <https://www.bosch-mobility-solutions.com/en/products-and-services/passenger-cars-and-light-commercial-vehicles/driving-safety-systems/antilock-braking-system/>. [Accessed: 05-Sep-2018].
- [4] Daimler, “March 1994: Mercedes-Benz presents ESP® to the world - Daimler Global Media Site,” 2009. [Online]. Available: <https://media.daimler.com/marsMediaSite/en/instance/ko/March-1994-Mercedes-Benz-presents-ESP-to-the-world.xhtml?oid=9913113>. [Accessed: 05-Sep-2018].
- [5] CiA, “History of CAN technology,” *History of CAN technology*, 2018. [Online]. Available: <https://www.can-cia.org/can-knowledge/can/can-history/>.
- [6] “The Bosch Group at a glance,” 2018. [Online]. Available: <https://www.bosch.com/our-company/our-figures/>.
- [7] Natasha Romanzoti, “Quem inventou o carro?,” 2013. [Online]. Available: <https://hypescience.com/quem-inventou-o-carro/>. [Accessed: 05-Sep-2018].
- [8] European comission, “Electronic stability control - European Commission,” 2018. [Online]. Available: https://ec.europa.eu/transport/road_safety/specialist/knowledge/esave/esafety_measures_known_safety_effects/electronic_stability_control_en. [Accessed: 05-Sep-2018].
- [9] Y. C. Chen and L. Wang, “Research of Electronic Stability Program Based on the Mu Control Theory,” pp. 379–381.

- [10] “ESP: Electronic Stability Program,” 2012. [Online]. Available: <http://www.car-engineer.com/esp-electronic-stability-program/>. [Accessed: 06-Sep-2018].
- [11] “magnetic flux - How A Rotary Position Sensor Works - Electrical Engineering Stack Exchange,” 2015. [Online]. Available: <https://electronics.stackexchange.com/questions/249074/how-a-rotary-position-sensor-works>. [Accessed: 06-Sep-2018].
- [12] N. Docan, “INTERNATIONAL STANDARD Road vehicles — Diagnostic communication over Controller Area,” vol. 2011, 2011.
- [13] CiA, “CAN data link layers in some detail.”.
- [14] CiA, “CAN high-speed transmission.” [Online]. Available: <https://www.can-cia.org/can-knowledge/can/high-speed-transmission/>.
- [15] Vector, “Introduction to CAN.” [Online]. Available: https://elearning.vector.com/index.php?wb_t_ls_kapitel_id=490311&root=378422&seite=vl_can_introduction_en. [Accessed: 07-Sep-2018].
- [16] BOSCH, “CAN with Flexible Data-Rate : White Paper V1.1,” vol. 0, 2012.
- [17] R. Bosch Gmbh, “Thomas Lindenkreuz CAN FD-CAN with Flexible Data Rate,” 2012.
- [18] “CAN FD - The basic idea.” [Online]. Available: <https://www.can-cia.org/can-knowledge/can/can-fd/>.
- [19] a. Mutter, “CAN FD and the CRC issue,” *CAN Newsl.*, no. 1, pp. 4–10, 2015.
- [20] “What is SPI? Webopedia Definition.” [Online]. Available: <https://www.webopedia.com/TERM/S/SPI.html>. [Accessed: 05-Sep-2018].
- [21] “Connecting Multiple Slave Devices | USB-I2C/SPI/GPIO Interface Adapters,” 2016. [Online]. Available: <http://dlnware.com/dll/Connecting-multiple-slave-devices>. [Accessed: 05-Sep-2018].
- [22] Á. Székács, T. Szakálf, and Z. Hegyközi, “Realising the SPI communication in a multiprocessor system,” *5th Int. Symp. Intell. Syst. Informatics, SISY 2007*, pp. 213–216, 2007.
- [23] R. Bosch Gmbh, “Steering-angle sensor.” [Online]. Available: <https://www.bosch-mobility-solutions.com/en/products-and-services/passenger-cars-and-light-commercial-vehicles/driving-safety-systems/electronic-stability-program/steering->

- angle-sensor/. [Accessed: 09-Sep-2018].
- [24] Bourns and Inc, “Bourns® Automotive Products type 6000.” [Online]. Available: https://www.bourns.com/docs/automotive/datasheets/non-contact-multiturn-angle-sensor-type-6000.pdf?sfvrsn=6ce088f1_14. [Accessed: 09-Sep-2018].
- [25] Bourns and Inc, “Bourns® Automotive Products type 6002.” [Online]. Available: <https://www.bourns.com/docs/automotive/datasheets/non-contact-steering-angle-sensor-type-6002.pdf?sfvrsn=18>. [Accessed: 09-Sep-2018].
- [26] “The LH3 position sensor is ideally suited for steering systems.” [Online]. Available: <http://www.ttelectronics.com/themes/ttelectronics/datasheets/bit/sx4429.pdf>. [Accessed: 09-Sep-2018].
- [27] T. Dsc, “Steering angle sensor,” 2009. [Online]. Available: http://www.methode.com/Documents/TechnicalLibrary/Steering_Angle_Sensor_Data_Sheet.pdf.
- [28] “High-Resolution Steering Angle Sensor.” [Online]. Available: https://www.furukawa.co.jp/review/fr030/fr30_07.pdf. [Accessed: 09-Sep-2018].
- [29] VALEO, “Slideshow Torque Angle Sensor.” [Online]. Available: <http://www.valeo.us/page-transverses-gb/popin-diaporama-en/popin-diaporama-cda-en/slideshow-torque-angle-sensor.html>. [Accessed: 09-Sep-2018].
- [30] Bourns and Inc, “Bourns® Automotive Products.” [Online]. Available: <https://www.bourns.com/docs/automotive/datasheets/torque-and-angle-combo-sensor.pdf?sfvrsn=14>. [Accessed: 09-Sep-2018].
- [31] Microchip Technology Inc., “MCP2517FD,” 2018. [Online]. Available: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/MCP2517FD-External-CAN-FD-Controller-with-SPI-Interface-20005688B.pdf>.
- [32] Texas Instruments, “TCAN4550-Q1 CAN FD Controller with Integrated Transceiver,” 2017. [Online]. Available: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tcan4550-q1.pdf>.
- [33] ISO, “INTERNATIONAL STANDARD Road vehicles — Diagnostic communication over Controller Area,” vol. 2011, 2011.
- [34] “How do I calculate how fast a capacitor will discharge? - Electrical Engineering

- Stack Exchange.” [Online]. Available: <https://electronics.stackexchange.com/questions/4951/how-do-i-calculate-how-fast-a-capacitor-will-discharge>. [Accessed: 15-Oct-2018].
- [35] “Capacitor Discharging.” [Online]. Available: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/electric/capdis.html>. [Accessed: 15-Oct-2018].
- [36] “Rational DOORS - Overview - United States.” [Online]. Available: <https://www.ibm.com/us-en/marketplace/requirements-management>. [Accessed: 15-Oct-2018].
- [37] “CAN & CAN FD - serial protocol decoding.” [Online]. Available: <https://www.picotech.com/library/oscilloscopes/can-bus-serial-protocol-decoding>. [Accessed: 15-Oct-2018].
- [38] “R&S@HMC804x Power Supply.” [Online]. Available: https://www.rohde-schwarz.com/us/product/hmc804x-productstartpage_63493-61542.html.
- [39] “TDS2000C Digital Storage Oscilloscope | Tektronix.” [Online]. Available: <https://uk.tek.com/oscilloscope/tds2000-digital-storage-oscilloscope>. [Accessed: 15-Oct-2018].
- [40] “Renesas Flash Programmer (Programming GUI) | Renesas Electronics.” [Online]. Available: <https://www.renesas.com/eu/en/products/software-tools/tools/programmer/renesas-flash-programmer-programming-gui.html#productInfo>. [Accessed: 15-Oct-2018].

