

**Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto**



**Sistema de Sensorização e Telemetria de um  
VEC (Veículo Eléctrico de Competição)**

João Miguel Ribeiro Queirós

Dissertação de Projecto realizada(o) no âmbito do  
Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores  
Major Automação

Orientador: Prof. Dr. Armando Luís Sousa Araújo

2011-07-29

© João Queirós, 2011

# Resumo

Esta tese apresenta, o projecto, dimensionamento, implementação e teste de um sistema de telemetria para veículos eléctricos de competição.

Esta tecnologia é fundamental no mundo da competição, sendo um meio indispensável para se obter a afinação perfeita do veículo.

Ao longo desta tese faz-se uma análise do estado actual das tecnologias a implementar assim como do que já existe implementado nesta temática da telemetria para veículos eléctricos de competição.

Aborda-se o projecto, dimensionamento e construção do sistema orientado à aplicação no veículo eléctrico de competição, construído na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto em simultâneo com a elaboração desta tese.

Por fim, efectua-se a validação do sistema efectuando-se testes ao funcionamento do mesmo.



# Abstract

This master thesis presents a telemetry system for an electrical racing vehicle. This technology is important in electrical car racing, being a fundamental mean to obtain the perfect tuning of the vehicle.

The thesis starts presenting the current state of the art of the used technologies, as well as, what is currently available in this theme of electrical car racing telemetry systems.

It addresses the project and construction of the whole system, oriented to the application on the VEC vehicle, an electrical racing car made in Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, in simultaneous with the elaboration of this thesis.

Lastly, comprehensive and exhaustive tests are made to validate and check all the functionalities of this system.



# Agradecimentos

Quero agradecer a todos os que me ajudaram na elaboração desta tese, nomeadamente aos meus amigos que sempre me apoiaram ao longo de todo o curso.

Deixo também um agradecimento especial à Cátia Vieira que me ajudou na escrita deste documento efectuando diversas revisões e pressionando-me para eu trabalhar arduamente.

Agradeço também aos meus pais por todo o apoio que me deram e pela paciência que têm tido nestes últimos dias de desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço ainda a todos os directamente envolvidos no desenrolar do mesmo, nomeadamente à equipa de trabalho responsável pelo projecto VEC assim como a todos os que, de uma maneira ou doutra, permitiram que este projecto chegasse a bom porto.

Por fim, quero agradecer ao meu orientador, pela ajuda dada ao longo de toda a tese, principalmente durante a escrita final deste documento.



# Índice

Resumo .....	iii
Abstract.....	v
Agradecimentos .....	vii
Índice.....	ix
Lista de Figuras .....	xi
Lista de Tabelas .....	xiii
Lista de Esquemas .....	xv
Abreviaturas e Símbolos .....	xvii
Capítulo 1 .....	1
Enquadramento .....	1
Motivação.....	1
Objectivos do trabalho.....	2
Capítulo 2 .....	3
Estado da Arte.....	3
2.1 - História da Telemetria.....	3
2.2 - Telemetria em Veículos Eléctricos de Competição.....	4
2.3 - Barramentos de dados .....	4
2.3.1 - CAN - Controller Area Network .....	5
2.3.2 - LIN - Local Interconnect Network .....	5
2.3.3 - FlexRay .....	5
2.4 - Medições das grandezas físicas .....	6
2.4.1 - Medição de acelerações lineares e angulares.....	6
2.4.1.1 - Acelerómetros MEMS .....	7
2.4.1.2 - Giroscópios MEMS .....	8
2.4.2 - Medição de temperaturas.....	9
2.4.2.1 - Termistor .....	9
2.4.2.2 - Termopar .....	10
2.4.2.3 - RTD - <i>Resistance Temperature Detector</i> .....	10
2.4.2.4 - Sensor de temperatura por Infravermelhos .....	11
2.5 - Medição de grandezas eléctricas.....	12
2.5.1 - Corrente.....	12
2.5.1.1 - Resistência <i>Shunt</i> .....	12
2.5.1.2 - Bobina de Rogowski .....	13
2.5.1.3 - Sensor Efeito Hall.....	14
2.5.2 - Diferença de tensão .....	15
2.5.2.1 - Divisor Resistivo.....	15
2.5.2.2 - Sensor Efeito Hall.....	15
2.6 - Conclusão.....	16
Capítulo 3 .....	17
Aquisição e recepção de dados no veículo.....	17
3.1 - Grandezas Monitorizadas .....	17

3.2 - Módulo Acelerómetros.....	18
3.3 - Módulo Energia Eléctrica.....	21
3.4 - Registo de dados localmente.....	25
3.5 - Estrutura do sistema.....	28
3.6 - Comunicação CAN-bus.....	30
3.7 - Ligação Wireless .....	31
3.8 - Alimentação do Sistema .....	33
3.9 - Receptor Xbee-Pro® 868MHz.....	35
3.10 - Conclusão.....	35
<b>Capítulo 4.....</b>	<b>37</b>
<b>Testes ao sistema.....</b>	<b>37</b>
4.1 - Testes laboratoriais.....	37
4.2 - O veículo .....	42
4.3 - Testes no veículo.....	46
4.3.1 - Testes efectuados .....	46
4.4 - Conclusão .....	49
<b>Capítulo 5.....</b>	<b>51</b>
<b>Conclusão e trabalhos futuros .....</b>	<b>51</b>
<b>Referências.....</b>	<b>i</b>
<b>Anexos .....</b>	<b>i</b>
<b>Anexo 1.....</b>	<b>iii</b>
<b>Anexo 2.....</b>	<b>v</b>
<b>Anexo 3.....</b>	<b>vii</b>
<b>Anexo 4.....</b>	<b>ix</b>
<b>Anexo 5.....</b>	<b>xiii</b>
<b>Anexo 6.....</b>	<b>xxv</b>
<b>Anexo 7.....</b>	<b>xxxvii</b>

# Lista de Figuras

Figura 2.1 - Fórmula Eléctrico 'Smokin' Buckeye' .....	4
Figura 2.2 - Utilização de protocolos em automóveis .....	6
Figura 2.3 - Vista ao microscópio de um Acelerómetro MEMS .....	7
Figura 2.4 - Utilizações de Acelerómetros MEMS .....	8
Figura 2.5 - Vista ao microscópio de um Giroscópio MEMS .....	9
Figura 2.6 - Termístores NTC .....	10
Figura 2.7 - Termopar .....	10
Figura 2.8 - Exemplo de RTD.....	11
Figura 2.9 - Sensor de temperatura Infravermelhos .....	11
Figura 2.10 - Esquema de uma cadeia de medição [19] .....	12
Figura 2.11 - Resistência <i>Shunt</i> .....	13
Figura 2.12 - Bobina de Rogowski [20] .....	13
Figura 2.13 - Efeito de Hall sem campo magnético.....	14
Figura 2.14 - Efeito de Hall com campo magnético .....	14
Figura 2.15 - Medição de diferença de tensão com divisor resistivo .....	15
Figura 2.16 - Transdutor de tensão por efeito de Hall [22] .....	15
Figura 3.1 - Direcção da sensibilidade do acelerómetro XY - MMA3202.....	19
Figura 3.2 - Direcção da sensibilidade do acelerómetro Z - MMA1260 .....	20
Figura 3.3 - Versão final módulo acelerómetros .....	21
Figura 3.4 - Transdutor tensão LV 25-P.....	21
Figura 3.5 - Esquema de ligação do transdutor LV 25-P .....	22
Figura 3.6 - Ripple da tensão -12V.....	23
Figura 3.7 - Transdutor de corrente CSLA2EL da Honeywell .....	24
Figura 3.8 - Módulo energia eléctrica .....	25
Figura 3.9 - Diferentes tipos de cartões SD .....	26
Figura 3.10 - <i>Data Logger</i> .....	28
Figura 3.11 - Interligação entre os módulos .....	30

Figura 3.12 - Módulo XBee PRO 868MHz .....	32
Figura 3.13 - Placa de desenvolvimento dsPICDEM MC1 .....	32
Figura 4.1 - Rotação sobre o eixo Z .....	38
Figura 4.2 - Vibração no eixo X .....	38
Figura 4.3 - Vibração no eixo Z .....	39
Figura 4.4 - CANH (Laranja) e CANL (Azul) do barramento CAN .....	40
Figura 4.5 - Reenvios sucessivos em caso de erro de transmissão .....	40
Figura 4.6 - Organização de ficheiros do cartão .....	41
Figura 4.7 - Representação dos dados no cartão SD .....	41
Figura 4.8 - Amostra de dados convertidos em mG .....	42
Figura 4.9 - Exemplo dos valores adquiridos de um acelerómetro .....	42
Figura 4.10 - Fiat Uno do ano 1990.....	43
Figura 4.11 - Estado exterior inicial (esquerda) e final (direita) .....	43
Figura 4.12 - Cofre do motor do VEC .....	44
Figura 4.13 - Interior do VEC .....	44
Figura 4.14 - Peças usadas na fixação e acoplamento do motor.....	45
Figura 4.15 - Equipa: Tiago Ramos, João Queirós, Rui Santos e Tiago da Rocha.....	46
Figura 4.16 - Módulo acelerómetros acondicionado.....	46
Figura 4.17 - Gráfico da tensão entre duas fases.....	47
Figura 4.18 - Corrente numa fase de alimentação do motor .....	47
Figura 4.19 - <i>Software</i> de análise de dados .....	48

# Lista de Tabelas

Tabela 3.1 - Grandezas medidas pelo sistema.....	18
Tabela 3.2 - Cores do cabo de dados.....	30



# Lista de Esquemas

Esquema 3.1 - Representação da rede CAN implementada .....	29
Esquema 3.2 - Funcionamento dos endereços CAN .....	31



# Abreviaturas e Símbolos

ABS - Antiblockier-Bremssystem (Sistema de travões anti-bloqueio)

ADC - Analog to Digital Converter (Conversor de Analógico para Digital)

CAN - Controller Area Network

CEIIA - Centro para a Excelência e Inovação na Indústria Automóvel

ECU - Electronic Control Unit

ESP - Elektronisches Stabilitätsprogramm (Controlo Electrónico de Estabilidade)

EVCUP - Electric Vehicle Cup

*hardware* - Conjunto de componentes electrónicos

PTC - Positive Temperature Coefficient (Coeficiente Positivo de Temperatura)

*software* - Programa de computador

TCS - Traction Control System (Sistema de Controlo de Tracção)

*wireless* - Rede sem fios



# Capítulo 1

## Enquadramento

Nos últimos anos tem-se assistido a um crescente aumento de tecnologias associadas aos veículos puramente eléctricos.

Estes veículos diferem dos demais a nível da sua motorização, substituindo-se o motor de combustão interna por um ou vários motores eléctricos. Desta alteração derivam outras, que se tornam necessárias, nomeadamente ao nível da fonte de energia, passando-se de combustível armazenado em depósitos, para energia eléctrica armazenada, quimicamente, em baterias. Outras alterações tornam-se obrigatórias nos veículos convencionais ao nível do sistema de travões, já que, a inexistência de vácuo (provocado pelo motor de combustão) leva a que o servo-freio, tenha de usar uma bomba de vácuo eléctrica. Devido ao sistema eléctrico de tracção, é necessária ainda a inclusão de um controlador, de maneira a conseguir-se um comportamento dinâmico de acelerações semelhante aos obtidos em veículos movidos a combustível fóssil.

## Motivação

A recente introdução dos veículos eléctricos no nosso quotidiano introduz também a ideia de veículos eléctricos vocacionados para a competição. De facto existem já diversas competições internacionais orientadas a este tipo de veículos como, por exemplo, a EVCUP (*Electric Vehicle Cup*), competição de origem britânica com provas na Europa e Estados Unidos da América ([www.evcup.com](http://www.evcup.com)).

Com base na ideia de veículo eléctrico de competição, e atendendo à sua diferente motorização, tem-se sentido uma crescente necessidade de se criarem sistemas de

telemetria, uma vez que existem diferentes tipos de grandezas que necessitam ser monitorizadas.

A motivação para a execução deste trabalho surge do défice de sistemas telemáticos orientados a este tipo particular de veículo: o veículo eléctrico de competição.

Surge ainda da motivação acrescida que advém da importância de se monitorizar remotamente e em tempo real, para além de grandezas mecânicas, o funcionamento dos sistemas de tracção e alimentação. Este facto torna este sistema importante em projectos actualmente em desenvolvimento na área da mobilidade eléctrica.

## Objectivos do trabalho

Este trabalho visa criar um sistema modular baseado numa rede de sensores, de maneira a poder-se monitorizar, em tempo real e remotamente, o comportamento do veículo durante a sua presença em pista.

No final do trabalho pretende-se obter medidas relativas ao *powertrain* do veículo, nomeadamente tensão e corrente das baterias e do motor, entre outras grandezas eléctricas associadas a estes subsistemas. Outro objectivo passa pela avaliação das forças dinâmicas associadas ao comportamento do automóvel em pista que, sem a utilização de telemetria, seria impossível determinar.

No desenvolvimento deste trabalho espera-se conseguir um sistema de telemetria dotado de acelerómetros, para medida de vibrações em 3 eixos, sensores de temperatura (baseados em termístores e infravermelhos) e sensores de corrente e tensão baseados em efeito de Hall.

Estes sensores terão interface para ligação CAN através de micro controladores. Haverá também um controlador central responsável pela compilação dos dados de todos os sensores e que gravará esta informação em memória não volátil.

# Capítulo 2

## Estado da Arte

Este capítulo aborda a história da telemetria (que começou, na Rússia, com um sistema cablado de transmissão de dados). De seguida fala-se desta tecnologia associada aos veículos eléctricos de competição. Prossegue-se com, uma breve descrição dos tipos de barramentos existentes para a transmissão de dados em ambiente veicular. Por fim, introduzem-se os sensores usados para a medição de grandezas físicas e eléctricas nomeadamente, acelerómetros, giroscópios e sensores de efeito de Hall, entre outros.

### 2.1 - História da Telemetria

A telemetria surgiu no ano de 1845 com o aparecimento do primeiro sistema de transmissão de dados entre o *Winter Palace* e o quartel da armada russa [1]. Em 1874 foi construída uma rede de sensores atmosféricos em *Mont Blanc*, França, com transmissão em tempo real para Paris. Mais tarde, em 1906 foram montadas uma série de estações sísmicas na Rússia, com telemetria dos dados para o *Pulkovo Observatory* [1]. A telemetria está também presente no canal do Panamá, completado em 1913, para monitorização dos níveis de água e do estado das comportas.

A telemetria *wireless* surgiu nas sondas atmosféricas simultaneamente na França, por Robert Bureau, e na Rússia, por Pavel Molchanov (1893-1941). O sistema de Molchanov convertia as medições dos sensores para código morse. Outro sistema rudimentar estava presente no foguete bélico V-2 de fabrico alemão. Este era porém tão pouco funcional que havia quem achasse maior utilidade na monitorização da trajectória através de binóculos [1].

O código morse foi rapidamente substituído pela Modulação por Posição de Pulso, tendo mais tarde surgido a Modulação por Largura de Impulso e, em 1964, pela mão da NASA (*National Aeronautics and Space Administration*), surgiu a Modulação por Código de Pulsos usado para monitorização da sonda *Mars Mariner 4*.

## 2.2 - Telemetria em Veículos Eléctricos de Competição

No âmbito da telemetria de veículos eléctricos de competição, muito pouco se encontra desenvolvido neste momento. Actualmente apenas alguns sistemas foram trabalhados pontualmente para determinados veículos, como é o caso do fórmula eléctrico *Smokin' Buckeye* [2], para o qual existe uma telemetria desenvolvida por estudantes da *Ohio State University*. Esta recorre a uma ligação analógica entre os sensores e o microprocessador central. Este processador é ainda responsável por tratar os dados e disponibilizá-los nos *displays* bem como por enviar os mesmos, via *wireless*, para as boxes.

A Figura 2.1 ilustra o veículo acima introduzido.



Figura 2.1 - Fórmula Eléctrico 'Smokin' Buckeye'

Quanto aos grandes fabricantes de sistemas de telemetria, como a *Bosch Motorsport* [3] ou a *Cosworth* [4], ainda não existem soluções comerciais de sistemas de telemática para veículos de competição com motorização eléctrica.

Os sistemas de telemetria para veículos são responsáveis pelo armazenamento e transmissão, via *wireless*, dos dados adquiridos por sensores colocados no automóvel. Estes sensores podem ser interligados directamente ao sistema central ou utilizarem um barramento (*bus*) para transmissão de dados. Usando um barramento de dados, consegue-se obter uma maior modularidade do projecto, sendo possível, de modo simples, interligar outros sensores sem necessidade de adaptações a nível de *hardware*.

## 2.3 - Barramentos de dados

Um barramento consiste num subsistema responsável pela transferência de informação de um local para outro a uma determinada distância.

Na área dos barramentos de dados veiculares existe uma grande panóplia de diferentes tecnologias.

Estes protocolos de comunicação surgiram com a crescente necessidade de interligação dos variadíssimos sistemas que se podem encontrar num veículo automóvel, desde a ECU de controlo do motor, suspensão, direcção assistida, travões (ABS), estabilidade (ESP) e controlo de tracção (TCS), entre outras. Todos estes sistemas necessitam de ser interligados de maneira a trocaram informações vitais ao seu bom funcionamento [5]. Estas interligações introduzem uma grande quantidade de cabos na instalação eléctrica do veículo. Desta maneira, surgiram protocolos de comunicações que tornaram possível a interligação de todos os sistemas com apenas um barramento de dados, reduzindo assim toda esta complexidade. [6]

De seguida apresenta-se uma resenha dos tipos de barramentos existentes para este fim.

### 2.3.1 - CAN - Controller Area Network

O protocolo CAN surgiu nos anos 80 pelas mãos da Bosch e da Intel, implementando este *on-chip* para a sua inclusão em *hardware* [5].

Este protocolo é maioritariamente usado para troca de informações entre as *Electronic Control Unit* (ECU) presentes num veículo. Em 1990 o CAN foi, pela primeira vez, introduzido em automóveis de produção em massa pela mão da Mercedes. Desde então, tem sido bastante utilizado e provou ser uma solução robusta e de baixo custo para utilização em redes associadas a automóveis.

Existem actualmente técnicas que permitem aumentar substancialmente a robustez do protocolo CAN, nomeadamente a nível da protecção da camada física, utilizando soluções que contemplam barramentos múltiplos para redundância. [7]

### 2.3.2 - LIN - Local Interconnect Network

Este meio de transporte de dados surgiu posteriormente ao CAN, sendo um método mais simples mas também mais limitado. A sua camada física é baseada em apenas um fio, simplificando a sua implementação, mas limitando a velocidade de transmissão de dados a cerca de 20Kbps com limite de 40 metros. [8]

Ao contrário do CAN, o LIN utiliza uma topologia de *master* para, até, 16 *slaves*, em que todas as comunicações são iniciadas pelo mestre do barramento.

### 2.3.3 - FlexRay

Este é o protocolo mais recente desenvolvido para a indústria automóvel. Surgiu de uma parceria entre a BMW, Bosch, DaimlerChrysler e a Philips em 2000.

O FlexRay permite a utilização do mesmo *bus* para dados temporais e para dados orientados a eventos juntando assim os benefícios de ambas as tecnologias.

Espera-se que a tecnologia presente no *FlexRay* seja o futuro das redes veiculares presentes nos automóveis de produção em série, devido ao seu elevado rácio benefício/custo. [9]

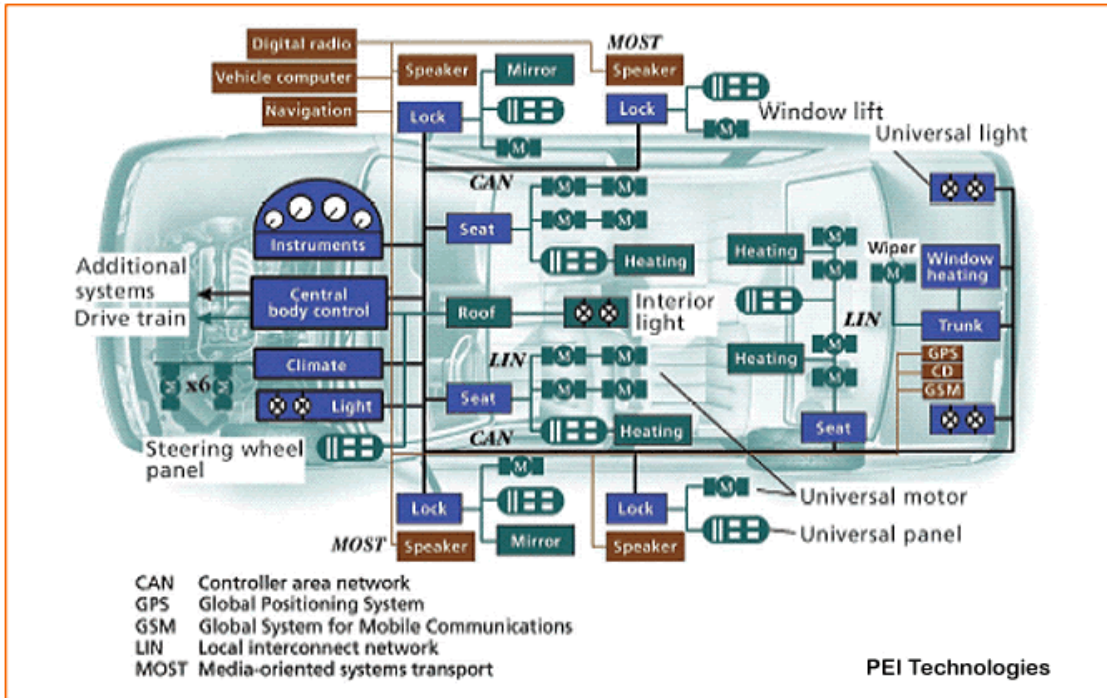


Figura 2.2 - Utilização de protocolos em automóveis

A Figura 2.2 representa a distribuição de protocolos actualmente existente num normal veículo cidadão. É possível observar a enorme complexidade de um sistema destes. Pode-se visualizar também que o protocolo CAN é o *backbone* de toda a comunicação existente no veículo. [10]

## 2.4 - Medições das grandezas físicas

Para medição das diferentes grandezas eléctricas e não eléctricas, são necessários diversos tipos de sensores. Assim, esta parte apresenta o princípio de funcionamento de alguns dos sensores necessários neste projecto.

### 2.4.1 - Medição de acelerações lineares e angulares

### 2.4.1.1 - Acelerómetros MEMS

Este tipo de sensor é utilizado para medir alterações de aceleração do corpo no qual está embutido. Estas variações de aceleração podem ser criadas por vibração ou por deslocações ao qual o corpo é sujeito [11].

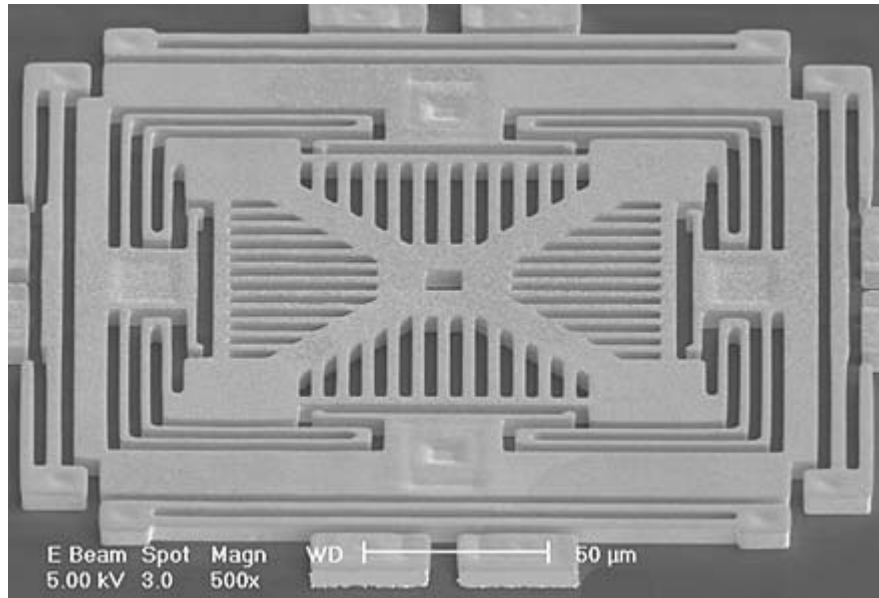


Figura 2.3 - Vista ao microscópio de um Acelerómetro MEMS

Na

Figura 2.3 apresenta-se uma imagem ao microscópio de um acelerómetro MEMS. Na mesma pode-se observar o sistema de molas que sustentam o centro do sensor. Estas molas são criadas por espirais de um material elástico, de forma a comprimirem e distenderem conforme a força aplicada. Desta forma, a massa move-se de modo directamente proporcional à aceleração do corpo do sensor e inversamente proporcional à constante das molas.

Na

Figura 2.4 mostram-se as utilizações dadas a este tipo de sensores, assim como a largura de banda necessária para esses fins.

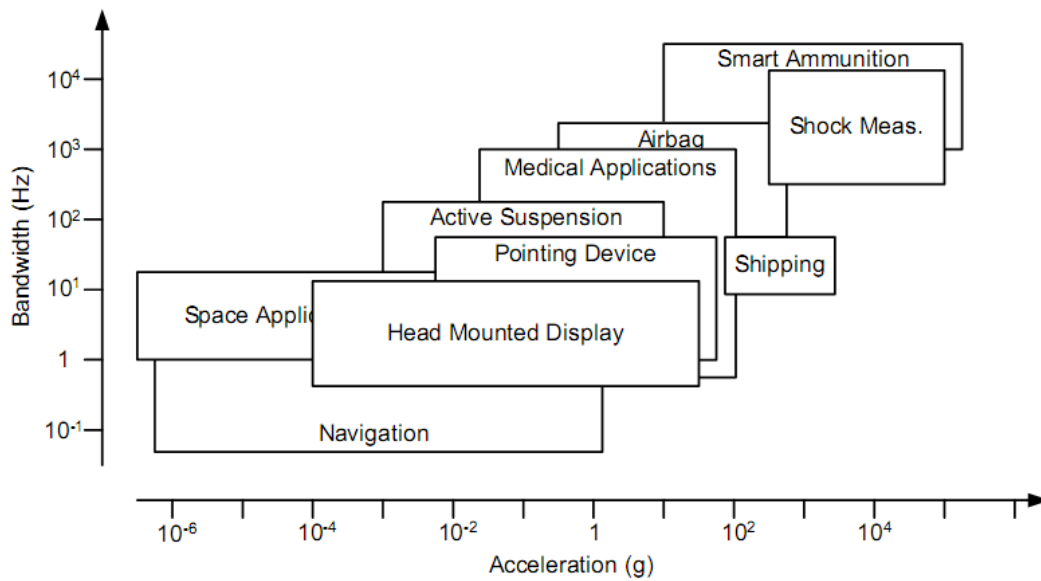


Figura 2.4 - Utilizações de Acelerómetros MEMS

No âmbito deste trabalho, a utilização pretendida para este tipo de sensores será a medição da força G aplicada ao veículo, assim como verificar o seu alinhamento vertical e horizontal. [12]

#### 2.4.1.2 - Giroscópios MEMS

O princípio de funcionamento dos giroscópios MEMS é semelhante ao dos acelerómetros. Assim, trata-se de uma massa suspensa de molas de maneira a ser sensível a alterações na aceleração. A diferença entre estes e os anteriores prende-se no grau de liberdade dado à massa, assim como no efeito que faz a massa deslocar-se, que, neste caso, se deve ao efeito de *Coriolis*. Este último caracteriza-se pelo afastamento da massa, suspensa no interior do sensor, do centro para as extremidades devido ao movimento angular. A distância deste movimento é directamente proporcional à velocidade de rotação do sensor [13].

Na

Figura 2.5 pode observar-se uma imagem aumentada de um sensor deste tipo. Na mesma é possível notar a massa suspensa no seu centro, assim como as molas que a suspendem.

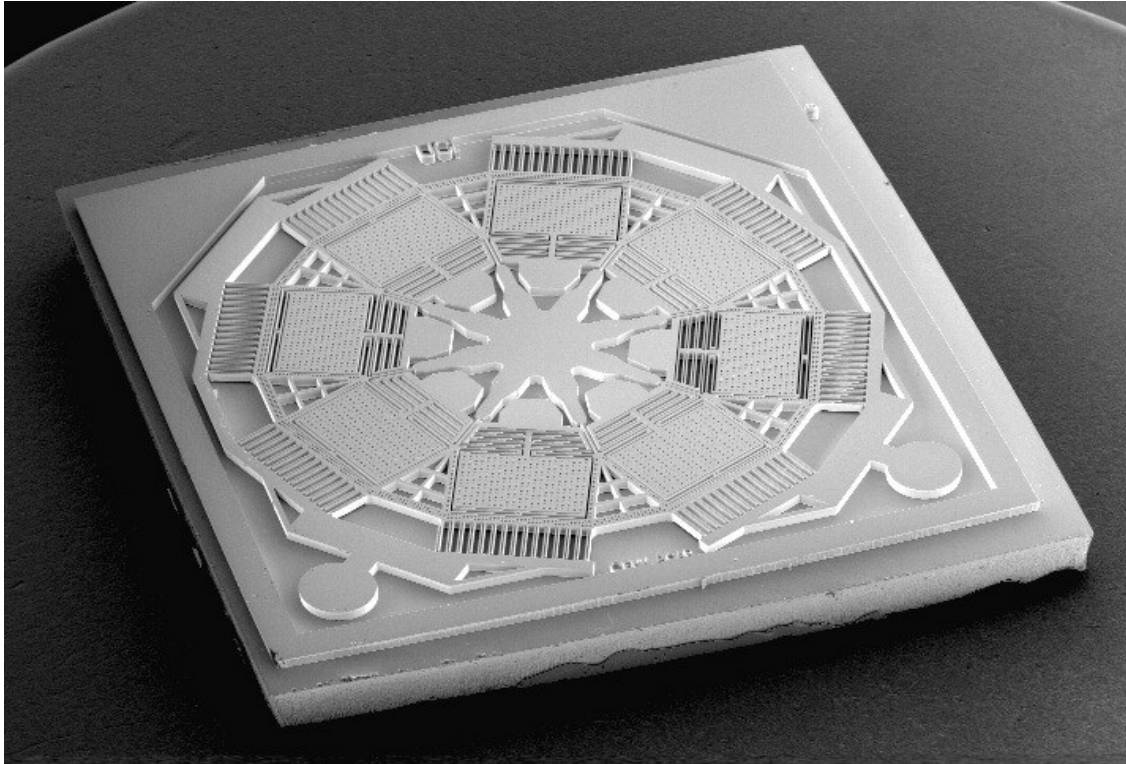


Figura 2.5 - Vista ao microscópio de um Giroscópio MEMS

Este sensor é importante de modo a saber-se qual a direcção tomada pelo veículo de modo a detectarem-se perturbações na direcção do mesmo devido a avarias ou maus funcionamentos.

## 2.4.2 - Medição de temperaturas

### 2.4.2.1 - Termístor

Um termístor é uma resistência cujo valor de resistividade se altera com a temperatura. É composto por um material semiconductor que pode ter coeficiente térmico positivo (PTC) ou negativo (NTC), mostrado na Figura 2.6. No caso dos PTC, o valor da resistência aumenta com a subida de temperatura, enquanto nos NTC este comportamento é inverso. Estes últimos são os mais comuns [14].

Este tipo de sensores possuem boa sensibilidade para uma determinada gama de temperaturas. Esta sensibilidade, porém, tem como inconveniente a não linearidade associada a este tipo de sensores.



Figura 2.6 - Termístores NTC

Outro inconveniente advém do próprio funcionamento do sensor. Como existe a necessidade de fazer passar uma corrente pelo mesmo, este sofre o fenómeno de auto-aquecimento, fazendo com que as medições que efectuem sejam afectadas por este erro..

#### 2.4.2.2 - Termopar

O termopar, representado na Figura 2.7, consiste numa ligação entre dois condutores metálicos. A junção de dois metais gera uma tensão eléctrica em função da temperatura, este efeito é conhecido por Efeito de Seebeck.

Este sensor tem a vantagem de ser auto-alimentado, não sendo necessário fornecer corrente para o funcionamento do mesmo. Tem também uma grande amplitude térmica de medição. Possui, porém, algumas desvantagens, nomeadamente a falta de precisão e sensibilidade e a sua não linearidade de funcionamento [15].



Figura 2.7 - Termopar

#### 2.4.2.3 - RTD - *Resistance Temperature Detector*

O princípio de funcionamento do RTD é semelhante ao do termistor porém, devido a aspectos construtivos e à utilização de diferentes materiais, consegue-se ter uma melhor precisão e estabilidade que os NTC ou PTC. As medidas efectuadas são ainda mais lineares quando comparado com o termopar. A sua grande desvantagem prende-se pelo facto da ligação eléctrica do sensor necessitar de 4 condutores e, tal como o termistor, necessitar de ser atravessado por uma corrente de maneira a medirem-se as variações de resistência. [16]



Figura 2.8 - Exemplo de RTD

#### 2.4.2.4 - Sensor de temperatura por Infravermelhos

Estes sensores são sensíveis às radiações infravermelhas emitidas por corpos com temperaturas superiores a 0K. A amplitude destas radiações é proporcional à temperatura irradiada pela superfície que está a ser medida. [17]

Estes sensores são bastante utilizados na medição de corpos em movimento, onde se torna complicado aplicar outro tipo de sensores que necessitem de contacto directo, como é o caso dos NTC, PTC entre outros.

Na Figura 2.9 pode-se observar um sensor deste tipo. [18]



Figura 2.9 - Sensor de temperatura Infravermelhos

## 2.5 - Medição de grandezas eléctricas

Este ponto apresenta algumas soluções existentes no campo da medição de corrente e tensão.

### 2.5.1 - Corrente

#### 2.5.1.1 - Resistência *Shunt*

Esta técnica de medição de corrente consiste na introdução de uma resistência, de valor muito reduzido e de elevada precisão, em série com o circuito a medir. A passagem de corrente nesta resistência causa uma pequena queda de tensão que pode ser medida por um circuito diferencial, tal como se pode ver na Figura 2.10.

Este método tem a vantagem de ter um custo bastante reduzido, quando comparado com outros, sendo possível medir tanto correntes alternadas como contínuas. A sua grande desvantagem é o facto de, uma vez que se usa uma resistência, o valor de resistividade ser bastante dependente da temperatura a que esta está sujeita e, estando este *shunt* em série com a corrente a ser medida, a mesma irá aquecer, por efeito de Joule, o que poderá criar problemas na medição da corrente.

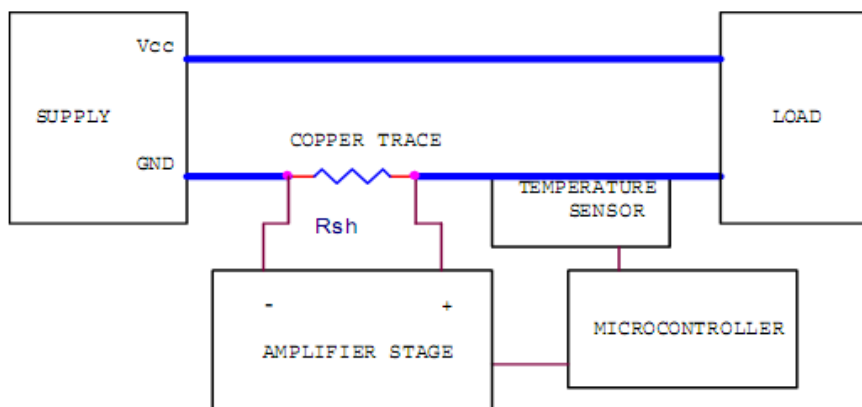


Figura 2.10 - Esquema de uma cadeia de medição [19]

Na Figura 2.11 é possível observar dois exemplos de resistências *Shunt* para utilização em intensidades elevadas. [19]

Figura 2.11 - Resistência *Shunt*

### 2.5.1.2 - Bobina de Rogowski

A bobina de Rogowski não é nada mais que um toróide com núcleo de ar que é atravessado pelo condutor no qual se pretende medir a intensidade da corrente. A saída deste sensor é proporcional à variação de corrente do condutor a ser medido e, por este motivo, apenas é possível medir correntes alternadas.

A grande vantagem face ao método anterior é o facto desta técnica garantir isolamento entre a medição e a variável medida. [20]

A Figura 2.12 apresenta o esquema representativo de uma bobina de Rogowski. Na mesma pode ver-se o toróide a envolver o condutor no qual se pretende medir a passagem de corrente.

Uma desvantagem da bobina de Rogowski é, tal como no anterior, ser necessário um circuito de condicionamento do sinal medido, de forma a poder ser interpretado analógica ou digitalmente.

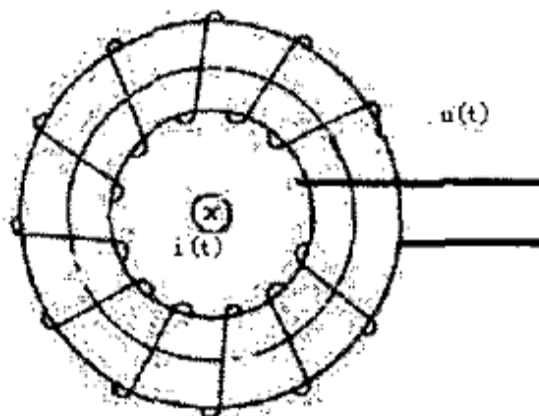


Figura 2.12 - Bobina de Rogowski [20]

### 2.5.1.3 - Sensor de Efeito de Hall

Estes sensores baseiam-se no princípio do efeito de Hall que diz que, quando um condutor, no qual está a passar uma corrente, é introduzido num campo magnético será gerada uma diferença de tensão perpendicular ao campo e à corrente.

Quando não há campo magnético presente, a distribuição de corrente é uniforme não havendo desta forma diferença de potencial (Figura 2.13).

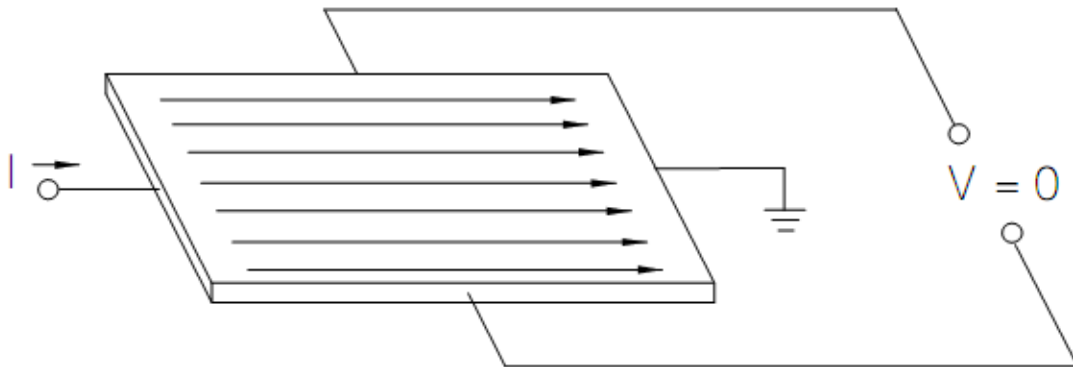


Figura 2.13 - Efeito de Hall sem campo magnético

Por outro lado, quando existe um campo magnético a atravessar o sensor, é exercida uma força de *Lorentz* na distribuição de corrente, fazendo com que o seu alinhamento seja perturbado e, assim, aparecendo uma diferença de tensão entre a zona superior e inferior do sensor (Figura 2.14).

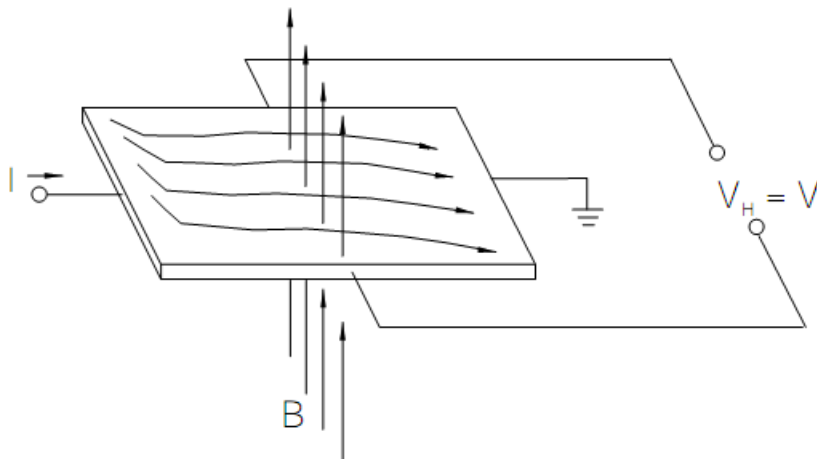


Figura 2.14 - Efeito de Hall com campo magnético

A tensão de Hall é directamente proporcional ao produto externo dos vectores do campo magnético e da corrente.

Tal como as bobinas de Rogowski, este tipo de sensores também oferecem isolamento entre a corrente a medir e a sua saída. Estes têm porém, a capacidade de medir correntes alternadas e contínuas. [21]

## 2.5.2 - Diferença de tensão

### 2.5.2.1 - Divisor Resistivo

A maneira mais simples de medir uma diferença de tensão é usar um divisor resistivo entre os pontos a medir, de maneira a medir-se uma queda numa resistência, que será proporcional à tensão que se pretende avaliar (

Figura 2.15).

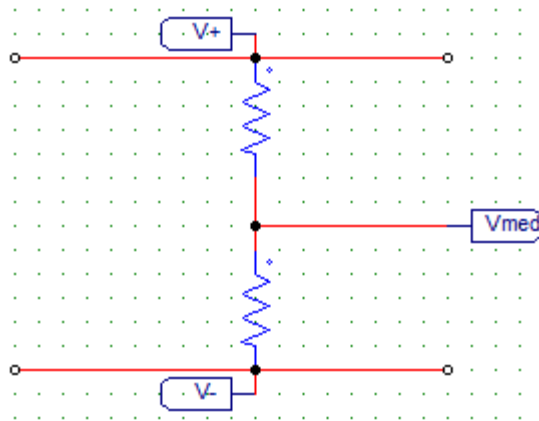


Figura 2.15 - Medição de diferença de tensão com divisor resistivo

### 2.5.2.2 - Sensor Efeito Hall

O princípio de funcionamento deste sensor de tensão é semelhante ao do sensor de corrente, a única diferença reside no facto deste dispor de uma resistência responsável por gerar uma corrente, que irá criar o campo de perturbação do sensor (Figura 2.16).

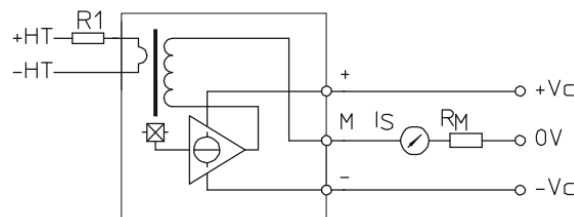


Figura 2.16 - Transdutor de tensão por efeito de Hall [22]

## **2.6 - Conclusão**

Neste capítulo fez-se uma breve exposição do que existe actualmente para as medidas necessárias no VEC. Mostraram-se vários tipos de sensores para efectuar as medições das diferentes grandezas. Fez-se ainda referência aos protocolos de comunicação mais utilizados em veículos automóveis.

## Capítulo 3

# Aquisição e recepção de dados no veículo

Este capítulo apresenta as grandezas monitorizadas pelo sistema.

Assim, introduzem-se os módulos de acelerómetros responsáveis pelas medidas das forças G aplicadas ao veículo e apresenta-se o módulo de medida da energia eléctrica, onde se inclui a medição de corrente e tensão.

Seguidamente refere-se o *data logger* onde são guardados todos os valores.

A tese continua com a explanação da estrutura definida para estes sensores e da rede CAN adoptada para este fim.

Em seguida ilustra-se a ligação *wireless*.

A tese termina com uma análise aos requisitos de alimentação eléctrica de todo o sistema.

### 3.1 - Grandezas Monitorizadas

A telemetria consiste na monitorização remota de dados de um determinado sistema. Como tal, as grandezas do sistema são medidas e convertidas para sinais eléctricos por meio de sensores e transdutores. A Tabela 3.1 apresenta as grandezas medidas. No seguimento apresenta-se uma explicação individual mais detalhada.

<b>Tipo Grandeza</b>	<b>Grandeza</b>	<b>Solução Utilizada</b>
Física	Aceleração no Centro de Massa	Acelerómetro 3-eixos MEMS
Física	Aceleração na Frente	Acelerómetro 3-eixos MEMS
Física	Aceleração na Traseira	Acelerómetro 3-eixos MEMS
Eléctrica	Corrente P/Fase Motor	Transdutor Corrente
Eléctrica	Corrente Baterias	Transdutor Corrente
Eléctrica	Tensão P/Fase Motor	Transdutor Tensão
Eléctrica	Tensão Baterias	Transdutor Tensão

Tabela 3.1 - Grandezas medidas pelo sistema

### 3.2 - Módulo Acelerómetros

Este módulo, tal como o nome indica, é responsável pela medição das acelerações gravíticas sentidas no ponto de aplicação do sensor.

A medição desta grandeza ficou a cargo dos sensores MMA3202KEG e MMA1260EGR2, que são do tipo MEMS, como descrito no estado da arte. O primeiro permite detectar as acelerações nos eixos ortogonais XY e o segundo no eixo Z. Conseguem-se, desta forma, obter as acelerações tridimensionais que estão aplicadas em determinado local do veículo.

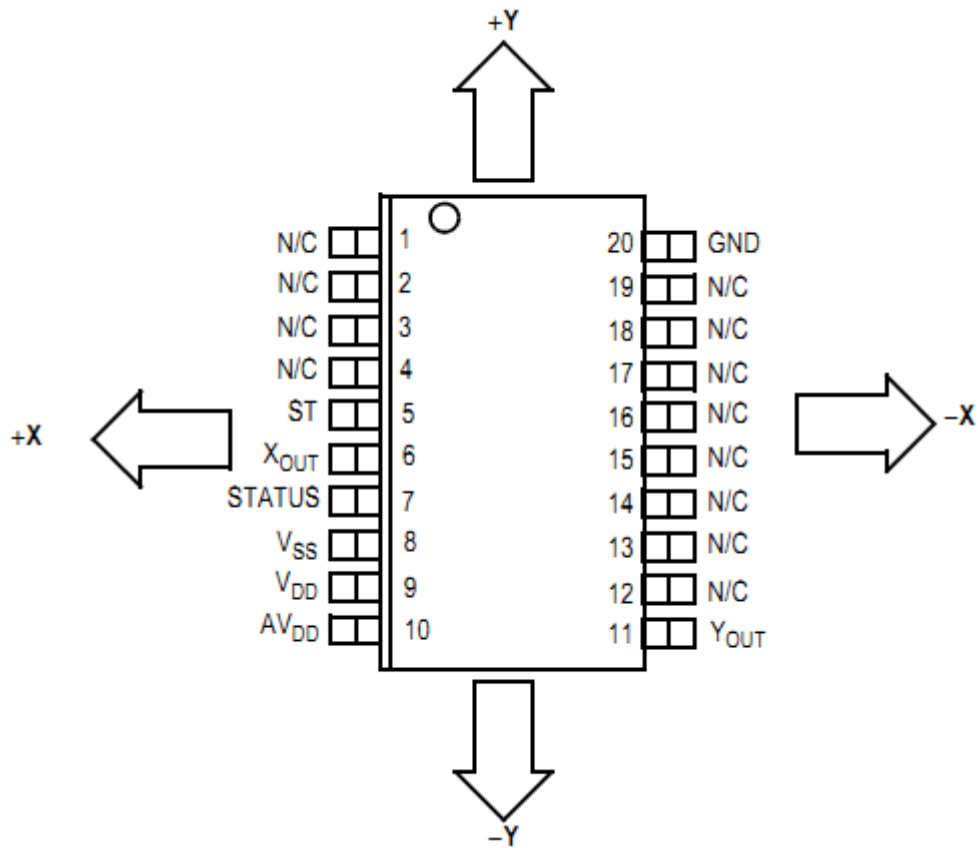


Figura 3.1 - Direcção da sensibilidade do acelerómetro XY - MMA3202

Na Figura 3.1 observamos as direcções e sentidos dos eixos medidos pelo sensor MMA3202. Este consegue medir acelerações até 100G no eixo X e 50G no eixo Y, tendo uma sensibilidade de 20mV/G no primeiro e de 40mV/G no segundo.

A aquisição destas medidas analógicas fica a cargo dos ADC (*Analog to Digital Converter*) do microprocessador dsPIC30F4012 da Microchip. Este ADC tem uma resolução de 10 bits. Assim, vem:

$$0V \leftrightarrow 5V \tag{3.1}$$

$$0 \leftrightarrow 1023 \tag{3.2}$$

$$\frac{5V}{1023} = 4,89mV \tag{3.3}$$

$$\frac{4,89mV}{20mV/G} = 0,244G \sim \frac{1}{4}G \tag{3.4}$$

$$\frac{4,89mV}{40mV/G} = 0,122G \sim \frac{1}{8}G \tag{3.5}$$

Como podemos observar pelas Equações 3.4 e 3.5, a conjugação Sensor + ADC permite obter uma resolução de 0,244G no caso do eixo X e de 0,122G para o Y.

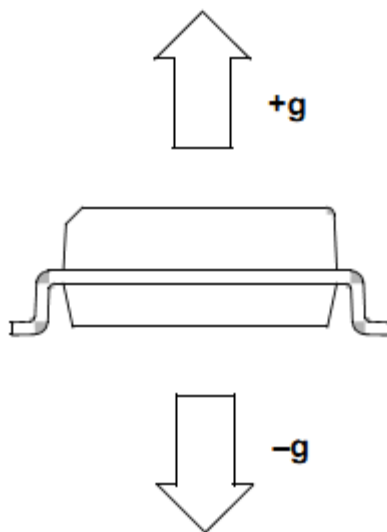


Figura 3.2 - Direcção da sensibilidade do acelerómetro Z - MMA1260

Na Figura 3.2 está representada a medida no eixo Z feita pelo acelerómetro MMA1260. Devido à aceleração da gravidade, este sensor, quando em repouso paralelamente ao solo, sente a aceleração constante de 1G.

Este sensor tem maior sensibilidade do que o anterior, tendo uma escala de medida de +/- 1,5G com uma sensibilidade de 1200mV/G. Assim, a resolução para este novo sensor:

$$\frac{5V}{1023} = 4,89mV \quad (3.6)$$

$$\frac{4,89mV}{1200mV/G} = 4,08mG \sim \frac{1}{250}G, \quad (3.7)$$

onde se pode concluir que este tem uma resolução de 4,08mG usando o mesmo ADC de 10bits. Desta forma, conseguem-se obter dados finos relativos às vibrações sentidas no eixo Z, nomeadamente quando o veículo passa uma zona de relevo da estrada.

Os valores dos acelerómetros são adquiridos a uma taxa máxima de 50Hz que corresponde à menor das largura de banda dos mesmos, imposta pelo acelerómetro Z.

Entre as saídas do acelerómetros e as entradas dos ADC dos microprocessadores existe um filtro passa baixo, com frequência de corte de 10kHz, no caso do acelerómetro Z, e de 100kHz para o XY. Estes filtros pretendem minimizar a influência dos ruídos criados pelo relógio interno dos acelerómetros.

Como se pode observar, pela Figura 3.3, foi criada uma placa de circuito impresso, de reduzidas medidas, possibilitando a instalação deste módulo em locais de pequena dimensão. Esta funcionalidade permite obter dados de vibrações em zonas de difícil acesso como, por exemplo, os braços de suspensão dianteira, ou no eixo traseiro, conseguindo-se detectar vibrações anormais nestes pontos, que podem ser causadas por deficiências mecânicas.

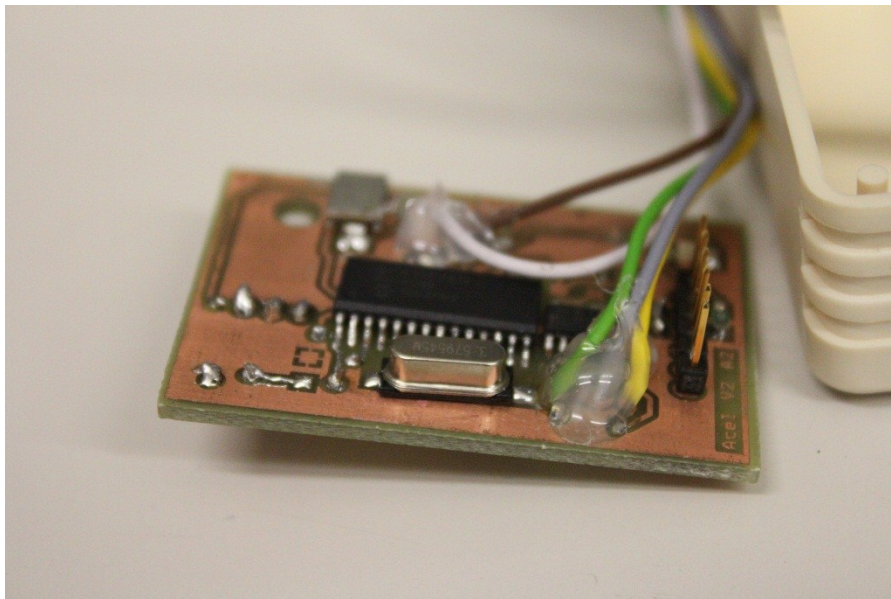


Figura 3.3 - Versão final módulo acelerómetros

No Anexo 2 é apresentado o desenho desta placa de circuito impresso.

### 3.3 - Módulo Energia Eléctrica

Este módulo tem a função de medir a tensão e a corrente num determinado ponto do circuito eléctrico. Como estas medições são isoladas, existe a possibilidade de as efectuar em dois pontos distintos.

A medida de tensão é obtida através de um transdutor de tensão por efeito de Hall com a referência LV 25P (Figura 3.4) da marca LEM.

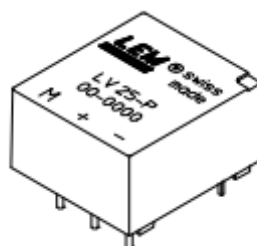


Figura 3.4 - Transdutor tensão LV 25-P

Este transdutor mede a tensão através da corrente, ou seja, no fundo não passa de um sensor de corrente. Como tal, é necessário fazer circular uma corrente, proporcional à tensão, nos seus terminais. Isto é conseguido recorrendo a uma resistência de potência, ligada em série com o transdutor, como exemplificado na Figura 3.5. Nesta pode-se observar

a resistência de potência, denominada de R1, ligada em série com o circuito de medição do transdutor.

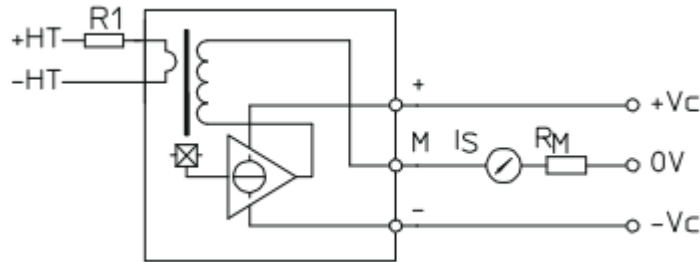


Figura 3.5 - Esquema de ligação do transdutor LV 25-P

Relativamente à saída do transdutor, esta gera uma corrente proporcional à corrente de medida. Assim, para se obter uma grandeza mensurável pelo ADC do microcontrolador é necessário colocar uma resistência de medida ( $R_M$ ), de modo a obter-se uma queda de tensão na mesma. A escolha dos valores destas resistências determina a escala de medição, bem como a sensibilidade da mesma.

Da folha de características do componente, R1 deverá ser calculado de maneira a que a corrente que atravessa o circuito de medição seja 10mA para a tensão nominal. Como tal, apresentam-se, a seguir, os cálculos para a obtenção do valor desta resistência:

$$V_{med} = 100V_{pk-pk} \quad (3.8)$$

$$V_{med} = R_1 * I_{med} \quad (3.9)$$

$$R_1 = \frac{V_{med}}{I_{med}}, I_{med} = 10mA \quad (3.10)$$

$$R_1 = \frac{100V}{10mA} \equiv R_1 = 10k\Omega \quad (3.11)$$

$$P = VI, V = RI \equiv P = RI^2 \quad (3.12)$$

$$P = 10k\Omega * (10mA)^2 \equiv P = 1W \quad (3.13)$$

Como se deduz, nas Equações 3.8 a 3.13, a resistência  $R_1$  terá de ser de 10k $\Omega$  com uma potência de, pelo menos, 1W.

Quanto a  $R_M$ , é calculado de acordo com a tensão que se quer na saída. Para a corrente nominal de 10mA no primário do sensor, a saída é de 25mA. De seguida são apresentados os cálculos para se chegar ao valor de  $R_M$ :

$$V = RI, I = 25mA, V = 5V \quad (3.14)$$

$$R = \frac{V}{I} \equiv R = \frac{5V}{25mA} \equiv R = 200\Omega \quad (3.15)$$

Com estes cálculos chega-se ao valor de 200 $\Omega$  porém, segundo a folha de características,  $R_M$  terá de estar compreendido entre 30 $\Omega$  e 190 $\Omega$ .

Calculando a tensão de saída, usando a resistência de 190 $\Omega$ , chegamos ao valor de:

$$V = RI, I = 25\text{mA}, R = 190\Omega \quad (3.16)$$

$$V = 190\Omega * 25\text{mA} \equiv V = 4,75\text{V} \quad (3.17)$$

Das Equação 3.16 e 3.17 podemos observar que, para o valor nominal a medir, vamos obter 4,75V na saída do transdutor.

O sinal desta saída passa por um amplificador operacional em configuração de seguidor de tensão, de modo a eliminarem-se efeitos de carga no secundário do transdutor e na resistência de medida. O ajuste final da tensão de saída é efectuado através de um potenciómetro. Este sinal é depois introduzido num segundo amplificador operacional somador de maneira a criar-se uma tensão de desvio. Tal é necessário uma vez que o ADC do microprocessador apenas admite entradas positivas e compreendidas entre 0 e 5 V. A referida tensão vale 2,5V. Valores abaixo de 2,5 poderão ser usados para medir tensões negativas e acima para medir tensões positivas.

Como a alimentação do transdutor necessita de uma tensão positiva e outra negativa, de maneira a conseguir medir tensões nos dois quadrantes, usou-se o componente TC962 da Microchip. Este consegue criar tensões negativas com correntes até 80mA. Para se conseguir atingir as necessidades de alimentação, efectuou-se uma ligação em paralelo de dois destes componentes. A Figura 3.6 ilustra a ondulação de tensão aos terminais deste componente. Como se pode observar, esta variação, em torno dos -12VDC, é na ordem dos 4% (cerca de 500mV).



Figura 3.6 - Ondulação da tensão da fonte de -12V

Quanto ao transdutor de corrente (Figura 3.7), este tem um funcionamento mais simplificado. A medição é feita por efeito de Hall, ou seja, sem contacto eléctrico entre o

cabo e o sensor. A sua saída é em tensão, com valor de *offset* de  $V_{CC}/2$ . Esta tensão de saída ataca um amplificador operacional, configurado como seguidor de tensão. À sua saída foi interligado um potenciômetro de modo a conseguir-se afinar a entrada de tensão no ADC do microprocessador.

Este sensor tem capacidade de medir entre 0A e 550A com uma sensibilidade de  $4,3 \cdot N$  mV, onde N corresponde ao número de passagens do cabo no interior da bobina de medição. Como este será alimentado a 12V DC, a sua tensão de *offset* será de 6V DC. De seguida são apresentados os cálculos para determinar a resolução e o valor de fim de escala deste sensor com a montagem utilizada:

$$V_{\text{offset}} = 6\text{VDC} \quad (3.18)$$

$$N = 1 \quad (3.19)$$

$$\text{Sens} = 4,3\text{mV/A} \quad (3.20)$$

$$\text{Para um } I = 250\text{A} \quad (3.21)$$

$$V_{\text{out}} = V_{\text{offset}} + I \times \text{Sens} \equiv V_{\text{out}} = 6 + 0,0043 \cdot 250 \equiv V_{\text{out}} = 7,075\text{V} \quad (3.22)$$



Figura 3.7 - Transdutor de corrente CSLA2EL da Honeywell

Como se pode observar, pelo resultado das contas efectuadas, para o valor nominal da corrente a medir, tem-se uma tensão de saída de 7,075V. Como o ADC do microprocessador apenas admite para entrada valores até 5V, este terá de ser adaptado. Para este efeito usou-se um potenciômetro multi-volta de maneira a conseguir o ajuste deste valor.

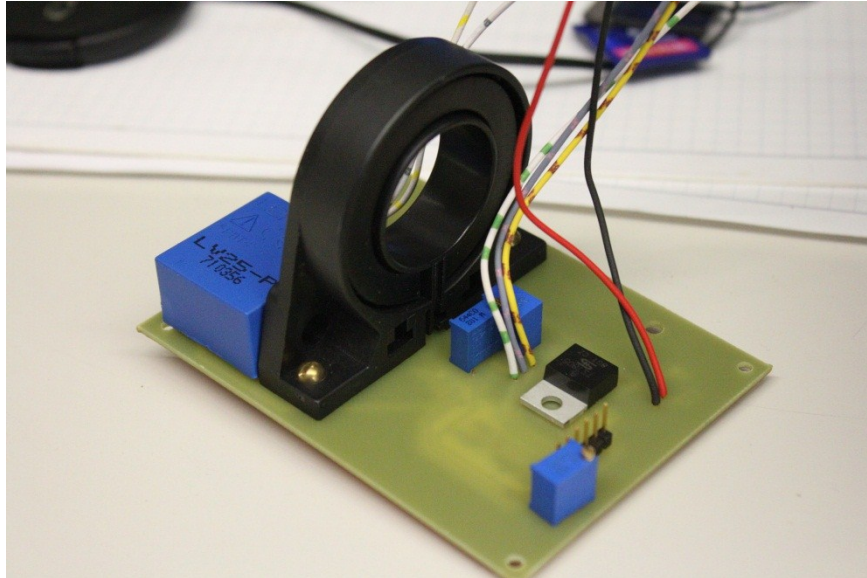


Figura 3.8 - Módulo energia eléctrica

A Figura 3.8 apresenta o resultado final do módulo de medida de energia eléctrica. No mesmo é possível observar o transdutor de corrente, a preto, e o transdutor de tensão, a azul. A placa desenvolvida possui ainda um regulador de tensão de 5V DC para alimentação do microprocessador, assim como três potenciômetros multi-volta de ajuste de ganhos de tensão de saída dos transdutores.

### 3.4 - Registo local de dados

Este registo de dados efectua-se por intermédio de um *data logger* desenvolvido para o efeito. Este compreende um microprocessador com interface CAN e uma interface para cartões SD (*Secure Digital*). Foi utilizada esta tecnologia para gravar os dados pelo seu baixo custo, facilidade de implementação e rapidez de operação. Outra vantagem é o facto de, actualmente, a maioria dos computadores já virem equipados com leitores deste tipo de cartões, o que simplifica a leitura dos dados. Ao nível do custo, estes cartões atingem cerca de 1,43€ por Gigabyte para cartões de 16GB o que é bastante barato, comparado com outros meios, existentes no mercado.

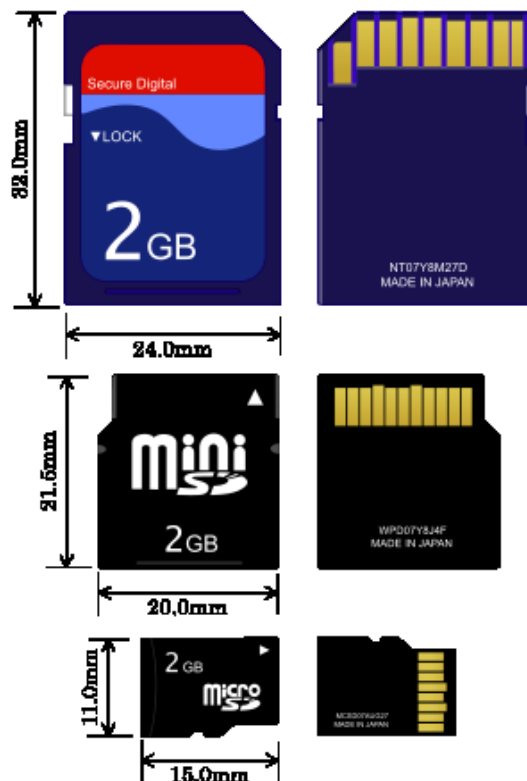


Figura 3.9 - Diferentes tipos de cartões SD

Na Figura 3.9 podem observar-se diferentes tipos de cartões SD existentes actualmente no mercado. Todos eles têm as mesmas funcionalidades, apenas diferindo nas dimensões externas.

O *data logger* desenvolvido captura todas as informações que passam no barramento, e grava-as para um ficheiro sem qualquer processamento. Posteriormente, estes dados são lidos e reescritos noutra ficheiro por forma a serem lidos e processados por um computador. Desta forma, consegue-se gravar todas as informações rapidamente, deixando-se a interpretação dos valores para o final.

Como o sistema é composto por 3 módulos de acelerómetros e 5 módulos de energia eléctrica, temos 8 subsistemas a enviar dados para o barramento. Todos estes dados são captados pelo data-logger. Assim, é possível efectuar uma estimativa de ocupação da memória do cartão de forma a prever-se o tempo de funcionamento associado. Sabe-se que cada módulo envia 8 *bytes* de informação a uma frequência de 50Hz logo, temos 400 *bytes* de dados, por segundo, por módulo. No total, o sistema regista cerca de 3200 *bytes*, ou seja 3,13 kB de dados por segundo. Tendo o cartão a capacidade de 2048000 kB (2GB) consegue-se armazenar todos estes dados durante 182 horas. Tal é suficiente para o decorrer de um fim-de-semana de prova.

Ao nível do *software*, usou-se um conjunto de bibliotecas específicas para cartões SD desenvolvidas pela própria Microchip. Isto permitiu acelerar o desenvolvimento do programa do microprocessador deste módulo.

Estas bibliotecas são responsáveis pela formatação dos dados em FAT32, tornando-se possível a leitura dos mesmos na maioria dos Sistemas Operativos existentes para computadores pessoais. Os dados são gravados no cartão em *clusters* de 512 *bytes* o que torna rápido o acesso para escrita no cartão.

Este acesso é efectuado no modo SPI apenas necessitando de quatro ligações eléctricas para ser estabelecida a comunicação bidireccional entre o cartão e o microcontrolador. Estas ligações compreendem dois sinais de dados, um para cada sentido, e um relógio, responsável por sincronizar os *bits* que são transmitidos e por fim um sinal de activação, que permite informar o cartão que vão ser lidos ou escritos dados.

O funcionamento deste módulo está organizado em seis estados:

- 0 - Sistema Parado
- 1 - Sistema em *Standby*
- 2 - Inicia *Logging*
- 3 - *Logging* Activado
- 4 - Para *Logging*
- 5 - Processa Dados

Quando o sistema é iniciado, fica no estado 0. Neste estado, o *data logger* está inactivo, ou seja, o cartão está desactivado e os dados que passam no barramento são completamente descartados.

No modo seguinte, estado 1, o sistema fica em *standby*, o cartão é inicializado e fica pronto a gravar dados, contudo, todos os dados são descartados tal como no estado anterior.

No estado 2, é criado um ficheiro no cartão, para receber os dados. Após a criação deste ficheiro, o módulo passa para o estado 3, e começa a gravar os dados no ficheiro aberto anteriormente tal como passam no barramento, sem qualquer processamento.

Quando se comuta para o quarto estado, o ficheiro é fechado, de forma a ser lido posteriormente, e os dados que passam no barramento são ignorados.

Por último, no quinto estado, os dados anteriormente lidos são processados de forma a serem lidos pelo computador. Este processamento transforma os dados hexadecimais em dados de texto, de modo a serem lidos posteriormente pelo *software* de análise dos dados. Dado o tempo associado a este processamento optou-se por se efectuar separadamente da gravação dos dados. No final deste processo, temos os dados relativos a cada módulo em ficheiros de texto separados, prontos para serem processados por qualquer programa de análise de dados como, por exemplo, o Excel® do Microsoft Office®. Nesta fase de

## Aquisição e recepção de dados no veículo

processamento os valores são convertidos da escala 0-1024 para o seu valor físico correspondente (Ampere, Volt ou Força G, dependendo da grandeza).

A passagem entre estados é efectuada a pedido do utilizador, que pode enviar dados para o barramento usando o conversor CAN-RS232 (este irá ser explicado em detalhe no ponto 3.7

A Figura 3.10 mostra uma fotografia do módulo de aquisição de dados, com um cartão SD de 2GB.

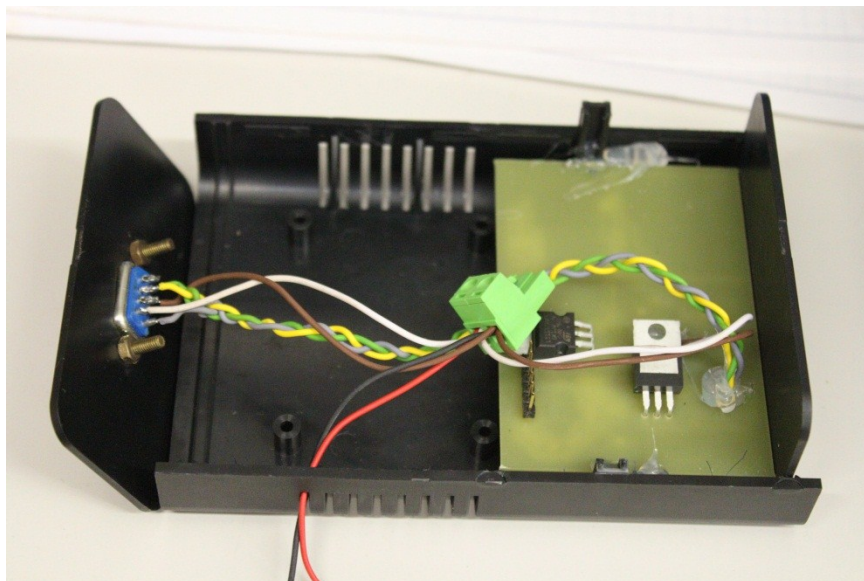


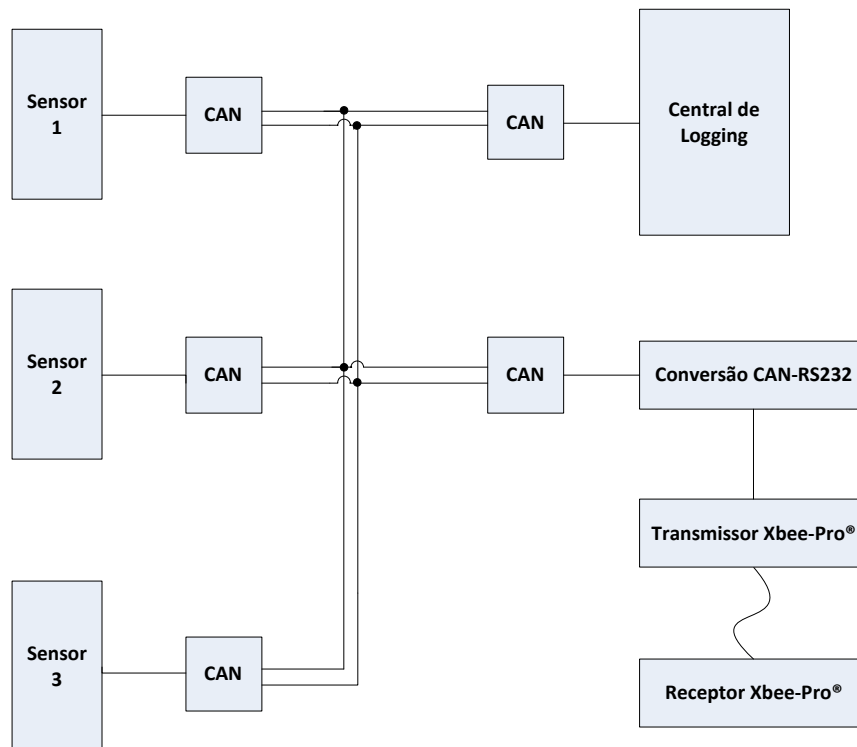
Figura 3.10 - *Data Logger*

O Anexo 3 contém o desenho desta placa de circuito impresso.

### 3.5 - Estrutura do sistema

O sistema de telemetria baseia-se numa estrutura em barramento de dados. Assim, existe uma linha única que interliga todos os módulos que compõem a cadeia de medição, das várias grandezas, bem como os módulos de aquisição de dados e de interface para RS232.

Este barramento de dados consiste num par de fios entrançados e numa linha de *ground*. Sobre este barramento é usado o protocolo CAN. A utilização desta tecnologia permite obter um bom *throughput* de dados usando uma ligação simples e fiável.



Esquema 3.1 - Representação da rede CAN implementada

O Esquema 3.1 apresenta a rede implementada para este sistema. Na mesma podemos identificar a central de *logging* local de dados, bem como o transceptor CAN-RS232, responsável pela interligação entre estes dois métodos distintos de transmissão de dados. Ligado por RS232 encontra-se o elemento fulcral na transmissão *wireless*, o módulo Xbee-Pro que será explicado em detalhe oportunamente.

O barramento CAN foi implementado com a utilização de microprocessadores compatíveis com esta tecnologia. Estes microprocessadores são do tipo dsPIC30f de 16 *bit* da marca Microchip®. Têm uma velocidade de processamento de 14,3MIPS. A ligação entre o barramento e o processador ficou a cargo do *transceiver* MCP2551 também da Microchip®. Este integrado é responsável por compatibilizar os níveis de tensão entre o processador e o barramento CAN e por efectuar o balanceamento de tráfego no mesmo.

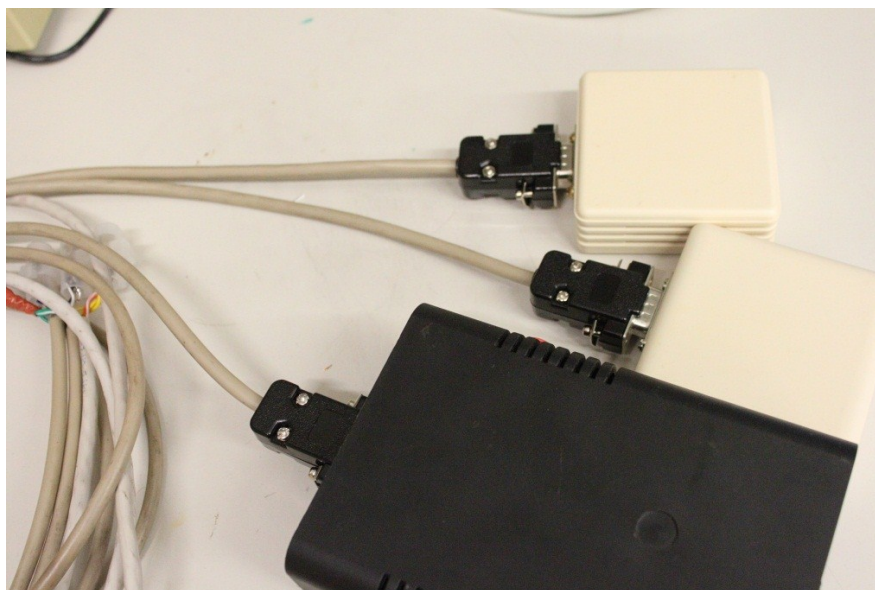


Figura 3.11 - Interligação entre os módulos

A Figura 3.11 apresenta o aspecto final da ligação entre os módulos que compõem o sistema. Este exemplo de ligação compreende dois acelerómetros, nas caixas brancas, e o *data logger*.

Esta ligação física foi conseguida utilizando um cabo emalhado de cinco condutores com a disposição apresentada na Tabela 3.2. As ligações aos diferentes módulos foram efectuadas utilizando fichas DB9.

Cor	Função
Verde	CANL
Castanho	0V DC
Cinzento	Ground CAN
Branco	+12V DC
Amarelo	CANH

Tabela 3.2 - Cores do cabo de dados

### 3.6 - Comunicação CAN-bus

No campo das comunicações entre os módulos, optou-se pela utilização do protocolo CAN. Esta opção deveu-se à simplicidade de utilização deste, à grande disponibilidade de documentação de apoio a esta tecnologia e ao baixo custo do *hardware* associado.

O protocolo CAN é do tipo CSMA/CD (*Carrier Sense Multiple Access/Collision Detection*) ou seja, todos os nós da rede necessitam de a monitorizar, antes de enviarem dados, e, após

este tempo passar, todos os nós têm igual acesso. Além disto, os nós têm a capacidade de detectar colisões nas transmissões e de tomarem as devidas acções.

Neste trabalho, optou-se por apenas utilizar este protocolo, sem nenhuma aplicação específica, como por exemplo CANOpen. Desta forma consegue-se reduzir a complexidade a nível de *software*, assim como agilizar o processamento dos microcontroladores presentes no sistema. Para este sistema, optou-se pela utilização de um barramento a 1 Mbit/s de maneira a conseguir-se transferir a grande quantidade de dados que cada módulo necessita transmitir para os receptores. A escolha desta velocidade do *bus* condiciona o comprimento do mesmo, porém, dadas as dimensões do veículo, isto não será um problema.

Em anexo é possível encontrar um documento onde se descreve, com maior detalhe, o funcionamento deste protocolo.

Nesta utilização, os dispositivos presentes no barramento CAN são identificados utilizando-se dois endereços. O primeiro corresponde ao endereço da rede em que este está inserido enquanto o segundo representa o endereço do dispositivo nesta rede. Para complementar estes endereços, existem ainda duas máscaras de aceitação dos endereços da rede e do dispositivo. Estas máscaras permitem que dispositivos com endereços diferentes recebam a mesma transmissão, se a máscara assim o permitir. O Esquema 3.2 ilustra o exposto:

Endereço	1 1 1 1 0 0 1 1
Máscara	1 1 1 1 1 1 1 0
Resultado	1 1 1 1 0 0 1 X

Esquema 3.2 - Funcionamento dos endereços CAN

Como se observa no esquema, a aplicação da máscara sobre o endereço, faz com que surja um *bit* “*dont-care*” no seu resultado. Assim, este dispositivo tanto aceitará comunicações para o endereço 0b11110011 como 0b11110010.

### 3.7 - Ligação Wireless

Para esta ligação *Wireless* optou-se pela utilização de módulos XBee PRO® (Figura 3.12) sob a forma de kit que engloba 2 módulos transceptores bem como duas placas de desenvolvimento. Estas funcionam como interface TTL-RS232, num dos casos, e TTL-USB no outro. Estes módulos têm a capacidade de comunicar a distâncias até 40km em campo aberto com a utilização de antenas tipo dipolo (Anexo 4). A sua frequência de trabalho é de 868MHz, que encaixa no espectro de livre utilização em território nacional [23]. A máxima velocidade de comunicação RF (Radiofrequência) destes módulos é de 24kbps o que corresponde a cerca de 3000 caracteres por segundo, já que cada um é constituído por 8 *bits*. Devido a esta limitação, de largura de banda da transmissão *wireless*, optou-se por transmitir os dados a frequências distintas, reservando-se grande parte do canal de dados RF para os dados dos

## Aquisição e recepção de dados no veículo

acelerómetros colocados nas extremidades do veículo e para os dados relativos aos módulos de análise de energia eléctrica, tendo estes uma frequência de envio de 50Hz. Os dados relativos ao acelerómetro colocado no centro de massa são enviados a uma frequência de 10Hz, uma vez que estes dados não são vitais para se verificar o bom funcionamento do veículo.



Figura 3.12 - Módulo XBee PRO 868MHz

Para interface entre o barramento CAN e o módulo de transmissão Xbee, utilizou-se um conversor CAN-RS232, constituído por uma placa de desenvolvimento da Microchip, dsPICDEM MC1 (Figura 3.13), que engloba transceptores CAN e RS232 controlados pelo microprocessador dsPIC30F601A. Esta placa de desenvolvimento é bastante versátil, possuindo outras funcionalidades, que não são usadas no âmbito deste projecto, como por exemplo, ecrã LCD, drives de controlo de motores e interface RS485, entre outras.

O *software* incorporado no microprocessador é responsável por gerar tramas de dados a enviar para o Xbee, constituídas pelos dados recebidos do barramento CAN.

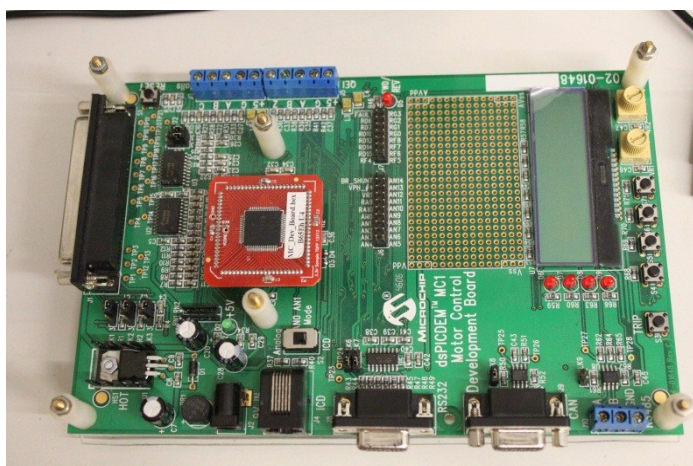


Figura 3.13 - Placa de desenvolvimento dsPICDEM MC1

### 3.8 - Alimentação do Sistema

A alimentação geral do sistema é feita a 12V DC, sendo depois convertida, localmente, para as tensões necessárias ao funcionamento de cada módulo. Estas conversões, de nível de tensão, foram efectuadas com conversores lineares devido à sua simples implementação. Em relação ao consumo de corrente deste sistema, é bastante diminuto como se pode observar pela análise efectuada a seguir:

- Módulo Acelerómetros

Componente	Consumo (mA)
Acelerómetro - MMA3202	8
Acelerómetro - MMA1260	2.2
Microprocessador - dsPIC30f4012	87
Transceiver CAN - MCP2551	10
LED Indicação Funcionamento	10
TOTAL	117.2

- Módulo Energia Eléctrica

Componente	Consumo (mA)
AmpOps - LM348	2.4
Transdutor Tensão - LV 25-P	35
Transdutor Corrente - CSLA2EL	20
Microprocessador - dsPIC30f4012	87
Transceiver CAN - MCP2551	10
LED Indicação Funcionamento	10
TOTAL	164.4

- Módulo *Data Logger*

Componente	Consumo (mA)
Cartão SD	80
Conversor nível - ADG3304	1.8

## Aquisição e recepção de dados no veículo

Microprocessador - dsPIC30f4013	TBD*
Transceiver CAN - MCP2551	10
LED Indicação Funcionamento	10
TOTAL	101.8*

- Módulo CAN-RS232

Componente	Consumo (mA)
Microprocessador - dsPIC30f4013	TBD*
Transceiver RS232 - ST232	5
Transceiver CAN - MCP2551	10
LED Indicação Funcionamento	10
TOTAL	25*

Para este cálculo foi pressuposto a utilização de uma placa dedicada para este efeito, quando na verdade o que foi efectuado, por razões limitativas de tempo, foi utilizar uma placa de desenvolvimento como dito no ponto 3.7 - .

- Xbee Pro 868MHz

No caso dos módulos Xbee, a corrente varia com a potência de envio programada. Para a potência máxima de 300mW, o consumo de corrente é de 500mA durante o envio. Já na recepção, consome cerca de 65mA.

\* - Para o microprocessador dsPIC30f4013 o consumo de corrente ainda não está especificado pelo fabricante do mesmo, pelo que não é possível considerá-lo nestas estimativas.

- Total de todo o sistema

Módulo	Quantidade	Consumo (mA)
Acelerómetro	3	117.2
Energia Eléctrica	5	164.4

Registo de dados localmente (data logger)	1	101.8
Xbee Pro 868Mhz	1	500
Ligação Wireless	1	25
TOTAL		908.4

### 3.9 - Receptor Xbee-Pro® 868MHz

A estação de recepção de dados é composta por um computador ligado a um XBee por intermédio de uma placa de desenvolvimento fornecida pela Digi®. Esta placa engloba um dispositivo Xbee PRO 868 e o interface.

Neste computador, corre um *software* de análise em tempo real dos dados por forma a diagnosticar erros no funcionamento do motor assim como registar estes eventos numa base de dados. Este trabalho foi desenvolvido pelo colega Rui Pedro Moreira Santos.

### 3.10 - Conclusão

Neste capítulo apresentaram-se os módulos que englobam a solução final, assim como os protocolos e soluções adoptadas para interligação dos mesmos. Apresentaram-se ainda os métodos de gravação, transmissão e interpretação dos dados adquiridos pelos sensores. Foi efectuada uma análise aos diversos sensores e calculados os elementos passivos necessários ao seu bom funcionamento.

Fez-se ainda referência às necessidades de energia eléctrica adequadas ao bom funcionamento do sistema.

Por fim apresentou-se o receptor XBee-Pro e o *software* responsável pela interpretação dos dados.



# Capítulo 4

## Testes ao sistema

Este capítulo ilustra os testes efectuados aos diferentes módulos assim como os testes efectuados ao barramento CAN.

Apresenta-se ainda o veículo alvo deste sistema.

### 4.1 - Testes laboratoriais

Para testar o bom funcionamento de todo o sistema procedeu-se, primeiramente, a testes em laboratório a cada um dos subsistemas que compõem o sistema final.

O primeiro sistema testado foi o dos acelerómetros, efectuando-se uma medição recorrendo a um osciloscópio digital de 2 canais. Este teste compreendeu a análise dos sinais de saída dos acelerómetros, efectuando-se uma rotação completa sobre cada um dos 3 eixos obtendo-se a resposta estática do sensor. Como se pode observar, pela Figura 4.1, o sinal está compreendido entre 0V e 5V que corresponde á posição absoluta sobre o eixo de rotação.

## Testes ao sistema

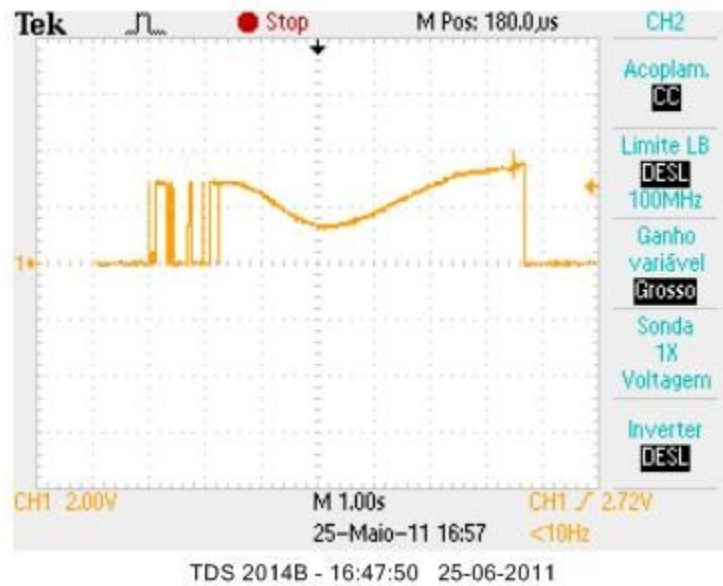


Figura 4.1 - Rotação sobre o eixo Z

De seguida fez-se um teste às acelerações dinâmicas, aplicando-se uma força longitudinal aos sensores obtendo-se uma resposta para cada um dos eixos. Tal está representado na Figura 4.2 e na Figura 4.3, respectivamente para o eixo X e Z.

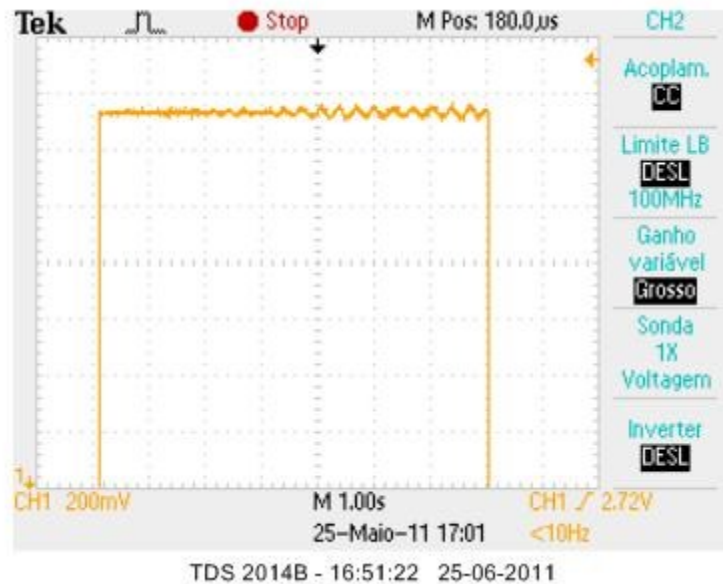


Figura 4.2 - Vibração no eixo X

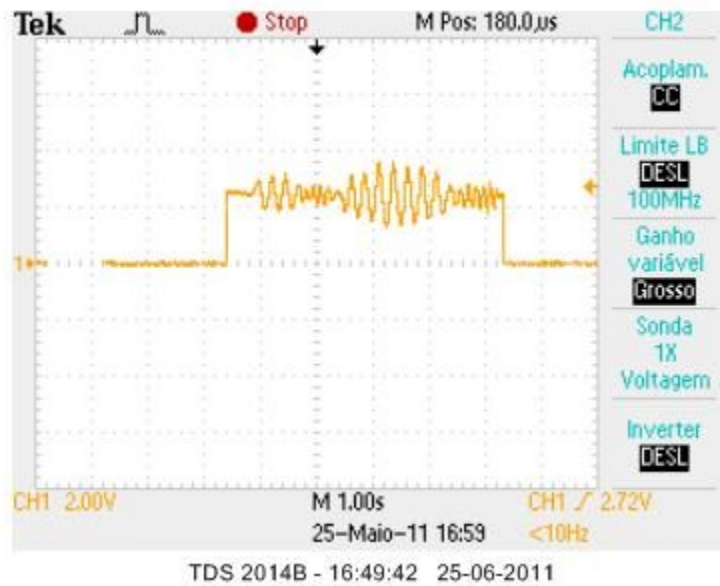


Figura 4.3 - Vibração no eixo Z

Como se consegue observar pelos oscilogramas, para se visualizar uma variação do valor de saída do sensor responsável pela medição do eixo Z, foi necessário aumentar a escala do osciloscópio. Já para o sensor Z, a saída é muito mais amplificada em virtude do menor alcance das medições.

De seguida efectuaram-se testes ao barramento CAN, de maneira a conseguir-se afinar o melhor *baudrate* para esta função. Na Figura 4.4 pode-se observar uma trama medida no barramento CAN. A laranja temos a linha CAN-H e a azul a CAN-L. Como seria de esperar, estas são complementares entre si tendo 2.5V como valor médio. Isto representa o funcionamento típico de um barramento CAN. Estes níveis de tensão são regulados pelos *transceivers* MCP2551 presentes em cada um dos módulos. Nestes testes usou-se o módulo dos acelerómetros e o módulo conversor CAN-RS232 de maneira a criar-se uma rede com estes dois dispositivos.

## Testes ao sistema

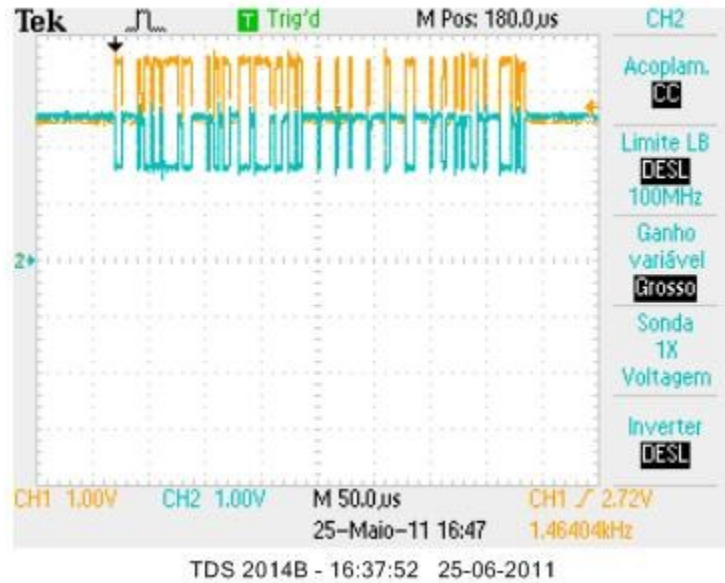


Figura 4.4 - CANH (Laranja) e CANL (Azul) do barramento CAN

No decorrer destes testes, experimentaram-se diversas situações, por exemplo, a falha de recepção por parte do módulo destinatário de uma trama. Neste caso o emissor nota a falha de recepção e reenvia a trama até esta ser recebida, ou até ser ultrapassado o tempo estabelecido para a recepção. Estes reenvios sucessivos podem ser observados na Figura 4.5. O barramento é solicitado até que a mensagem seja entregue, ou até ser atingido o tempo máximo para a entrega da trama. Este teste foi efectuado parando o microprocessador receptor da transmissão. Deste modo o emissor entrou em erro, enviando as mensagens em contínuo.

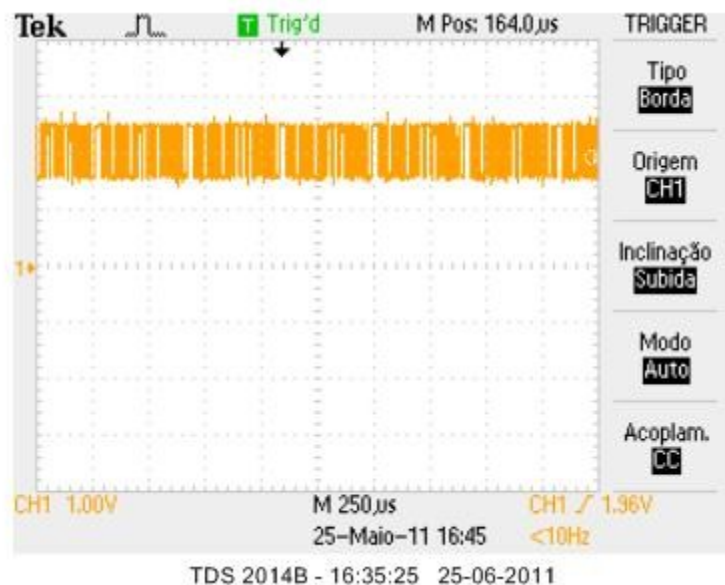


Figura 4.5 - Reenvios sucessivos em caso de erro de transmissão

Posteriormente passou-se para o teste do módulo de gravação de dados para cartão SD. Os testes a este subsistema englobaram o teste à criação e acesso de dados no cartão, assim como o teste de gravação dos dados que transitam no barramento CAN.

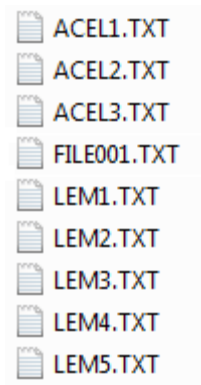


Figura 4.6 - Organização de ficheiros do cartão

A Figura 4.6 representa a estrutura criada para o armazenamento dos dados no cartão. Cada módulo ligado ao sistema é representado por um ficheiro de texto., Desta forma consegue-se visualizar e analisar estes dados em separado. Na Figura 4.7 está representado um exemplo de dados gravados para um módulo de acelerómetros.

1	X=	-007	Y=	-001	Z=	-029
2	X=	-008	Y=	-002	Z=	-029
3	X=	-007	Y=	-001	Z=	-028
4	X=	-008	Y=	+000	Z=	-030
5	X=	-007	Y=	-001	Z=	-030
6	X=	-008	Y=	-002	Z=	-029
7	X=	-008	Y=	-002	Z=	-030
8	X=	-007	Y=	-001	Z=	-029
9	X=	-008	Y=	+000	Z=	-029
10	X=	-007	Y=	-001	Z=	-030
11	X=	-007	Y=	-001	Z=	-029
12	X=	-008	Y=	-001	Z=	-031

Figura 4.7 - Representação dos dados no cartão SD

A Figura 4.8 mostra a interpretação dos dados adquiridos recorrendo ao Microsoft Excel®.

1	X=	-001250	Y=	-000875	Z=	-1100
2	X=	-001500	Y=	-000875	Z=	-1108
3	X=	-001250	Y=	-001000	Z=	-1104
4	X=	-001500	Y=	-001000	Z=	-1096
5	X=	-001500	Y=	-000750	Z=	-1100
6	X=	-001250	Y=	-000750	Z=	-1096
7	X=	-001250	Y=	-000875	Z=	-1096
8	X=	-001000	Y=	-000875	Z=	-1104
9	X=	-001500	Y=	-000750	Z=	-1100
10	X=	-001250	Y=	-001000	Z=	-1096
11	X=	-001250	Y=	-000875	Z=	-1100
12	X=	-000750	Y=	-001000	Z=	-1104
13	X=	-001250	Y=	-001125	Z=	-1108
14	X=	-001000	Y=	-000750	Z=	-1100

Figura 4.8 - Amostra de dados convertidos em mG

A Figura 4.9 ilustra um exemplo de gráfico gerado para 249 valores de um acelerómetro no eixo Z. Estes valores correspondem a pouco menos de 5 segundos já que, como já foi dito, os dados são gravados com uma frequência de 50Hz.

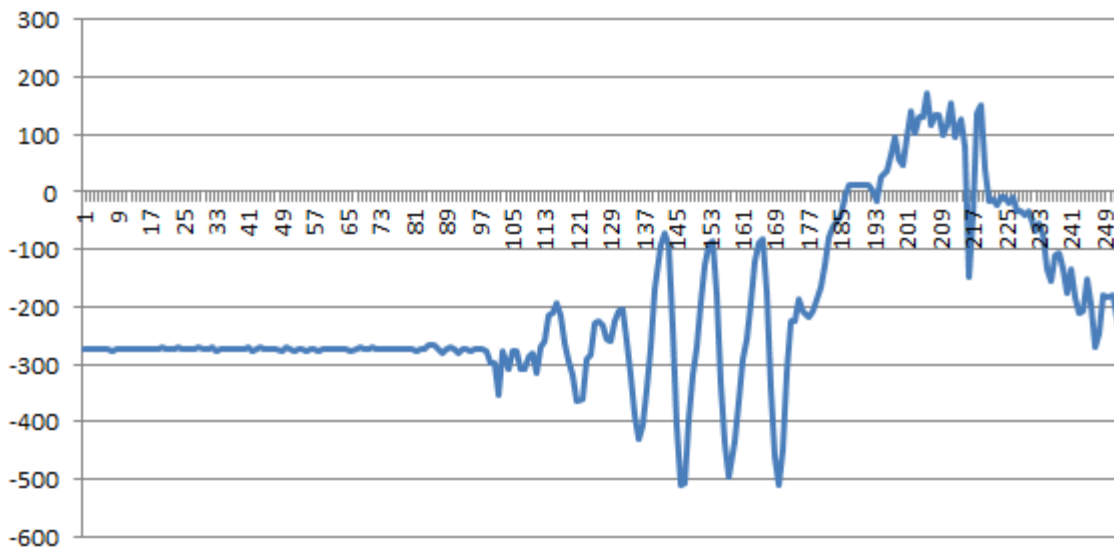


Figura 4.9 - Exemplo dos valores adquiridos de um acelerómetro

## 4.2 - O veículo

O intuito deste projecto é criar um sistema de monitorização de dados relativos ao funcionamento do *power train* de um veículo eléctrico orientado à competição automóvel. Como tal, idealizou-se e alterou-se um veículo de estrada por forma a cumprir todos os

requisitos de um veículo de competição, nomeadamente a nível de segurança e comportamento dinâmico.



Figura 4.10 - Fiat Uno do ano 1990

O veículo escolhido para esta alteração foi um Fiat Uno 45 (Figura 4.10) uma vez que existe uma competição inteiramente dedicada a este veículo em Portugal, o Desafio Único FEUP1. Desta forma será possível comparar o funcionamento de ambos os veículos.

O desenvolvimento do *power train* desta viatura ficou a cargo do colega Tiago Manuel Silva Ramos, na sua tese intitulada “Sistema de tracção de um VEC (Veículo Eléctrico de Competição) ”.

O estudo relativo à dinâmica de carga e descarga das baterias e ainda da energia necessária para se efectuar uma prova determinada foi efectuado pelo colega Tiago Alberto Correia da Rocha, culminando com uma tese de mestrado integrado com o título “Sistema de Alimentação de um Veículo Eléctrico de Competição”.

Esta viatura foi adquirida pela FEUP para desenvolvimento destes trabalhos estando, inicialmente, bastante maltratada. Foi necessário um grande trabalho de equipa para se conseguir reparar todo o carro de maneira a ficar com o aspecto presente na Figura 4.11.



Figura 4.11 - Estado exterior inicial (esquerda) e final (direita)

## Testes ao sistema

Seguidamente à reparação da carroçaria do veículo procedeu-se à sua decoração exterior com autocolantes embelezadores e publicitários. Na Figura 4.11 pode-se observar as evidentes diferenças do antes e após do veículo.

Sendo este veículo orientado para a competição automóvel, houve variadíssimas alterações que se tornaram necessárias. Entre estas alterações figura a inclusão de um arco tubular de protecção do habitáculo, o *rollbar*. Outra grande alteração foi a remoção de todo o interior com excepção do tablier. Esta modificação permitiu reduzir bastante o peso total do veículo permitindo também a reparação de toda a chapa interior (Figura 4.13). Seguidamente foi colocado o assento de competição e todos os acessórios de segurança obrigatórios e necessários, como é o caso do extintor, fechos do capô e mala, entre outros.



Figura 4.12 - Cofre do motor do VEC



Figura 4.13 - Interior do VEC

Outra alteração mecânica foi a fixação do motor e o seu acoplamento mecânico ao veio da caixa de velocidades. A alteração do motor de tracção levou a outras alterações dos órgãos auxiliares como é o caso da bomba de circulação de água, necessária para a refrigeração do motor eléctrico e a bomba de vácuo, necessária para o sistema de auxílio á travagem.

A Figura 4.13 mostra o interior de veículo depois de reparado pela equipa de trabalho.

Na Figura 4.12 tem-se o aspecto actual do cofre do motor, onde se pode visualizar a caixa de velocidades à direita. À sua esquerda está posicionado o motor eléctrico sobre o qual foi colocado o controlador. Como o motor tem arrefecimento a água, é necessário haver um reservatório, um radiador e toda a tubagem de transporte da água (vista na Figura 4.12).

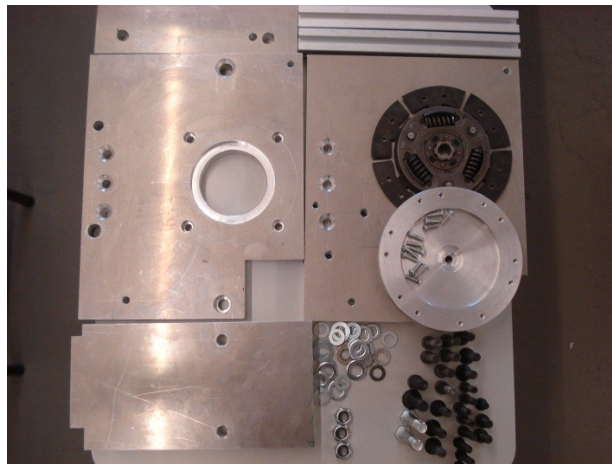


Figura 4.14 - Peças usadas na fixação e acoplamento do motor

A Figura 4.14 mostra o conjunto de peças que compõem o sistema mecânico de acoplamento e fixação do motor eléctrico á caixa de velocidades do VEC.

Foi ainda alterado todo o sistema eléctrico de alimentação das luzes frontais, traseiras e interiores.

Todo este trabalhado foi efectuado em grupo pelos quatro intervenientes neste projecto.



Figura 4.15 - Equipa: Tiago Ramos, João Queirós, Rui Santos e Tiago da Rocha

## 4.3 - Testes no veículo

### 4.3.1 - Testes efectuados

Após esta breve introdução, passa-se a explicar o procedimento utilizado para os testes no veículo.

Começou-se por proteger os módulos, em caixas, de maneira a estes ficarem livres de sujidades e de impactos directos. Para tal foram adquiridas caixas com as dimensões indicadas para cada um dos módulos. A Figura 4.16 apresenta a solução adoptada para protecção e acondicionamento do módulo dos acelerómetros.

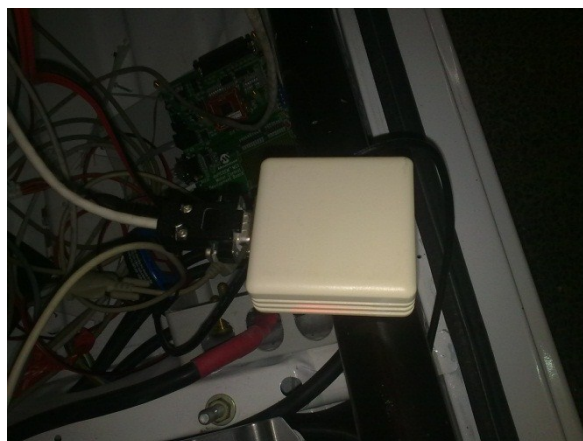


Figura 4.16 - Módulo acelerómetros acondicionado

De seguida colocaram-se os módulos acelerómetros sobre o centro de massa e zona frontal do veículo. O módulo de *data logger* ficou posicionado no interior do habitáculo do mesmo. Após uma pequena viagem de teste, foi possível captar os dados apresentados na Figura 4.17. Esta ilustra a tensão entre duas fases. A Figura 4.18 mostra a corrente na primeira fase de alimentação do motor. No gráfico da tensão, o eixo YY representa a tensão em Volt. Como se observa neste gráfico, em torno do ponto 415 existe uma queda abrupta no seu valor. Esta súbita variação deveu-se ao controlador ter excedido um dos seus parâmetros e ter desligado a sua saída. Os valores representam o *shutdown* do controlador e a tensão gerada pelo motor a rodar em circuito aberto como se pode observar pelo gráfico da corrente no mesmo instante onde o eixo YY representa a corrente em Ampere.

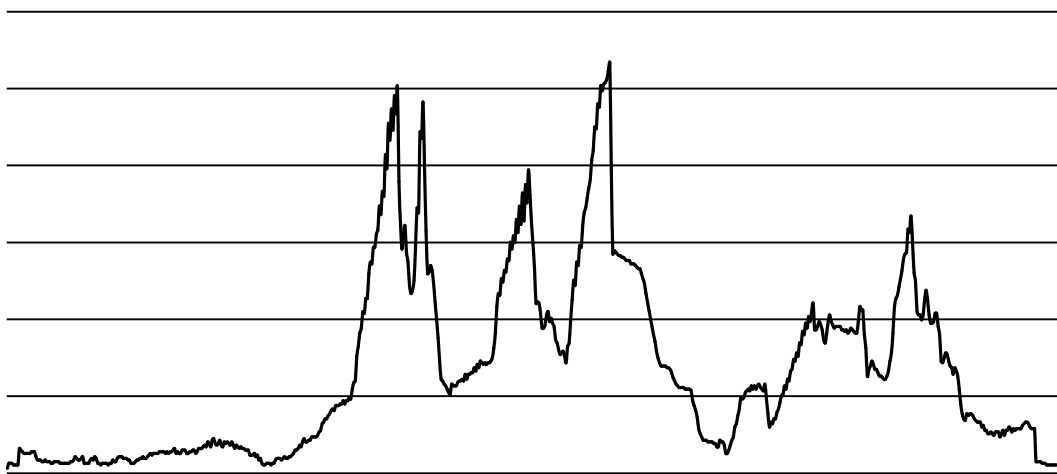


Figura 4.17 - Gráfico da tensão entre duas fases

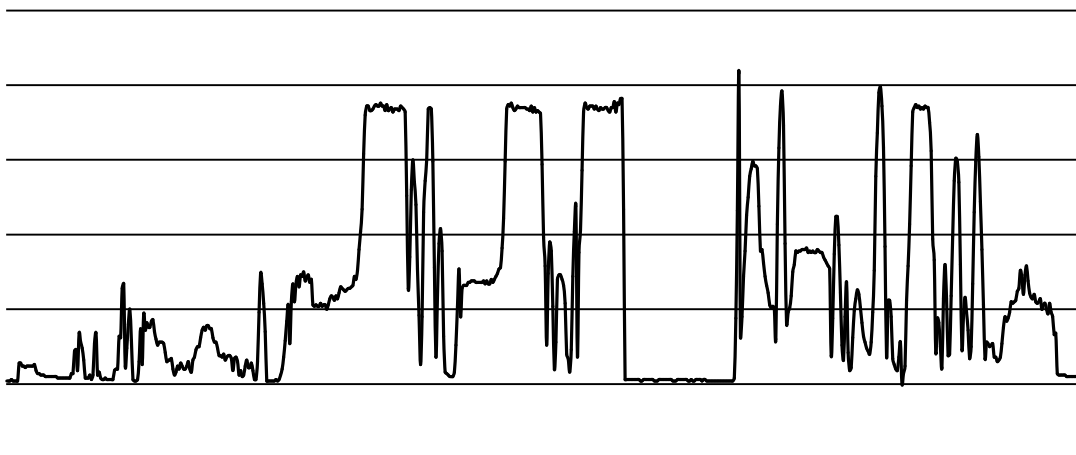


Figura 4.18 - Corrente numa fase de alimentação do motor

## Testes ao sistema

O próximo teste efectuado, prendeu-se com o alcance dos módulos *wireless*. Para este teste o indicado seria uma zona ampla e livre de obstáculos, tentando-se desta forma replicar o espaço presente num circuito de competição. Não havendo esta possibilidade, os testes foram efectuados em redor dos edifícios dos departamentos da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Conseguiu-se concluir que, devido aos obstáculos presentes, o sinal é bastante limitado em algumas zonas. Porém, em campo aberto, em todo o comprimento da rua, foi possível constatar o bom alcance destes módulos, ainda que um deles possua uma antena composta apenas por um fio eléctrico.

Este sistema foi então interligado com o *software* de recepção e análise dos dados desenvolvido pelo colega Rui Pedro Moreira Santos no âmbito da sua dissertação de mestrado. A Figura 4.19 apresenta os resultados obtidos.

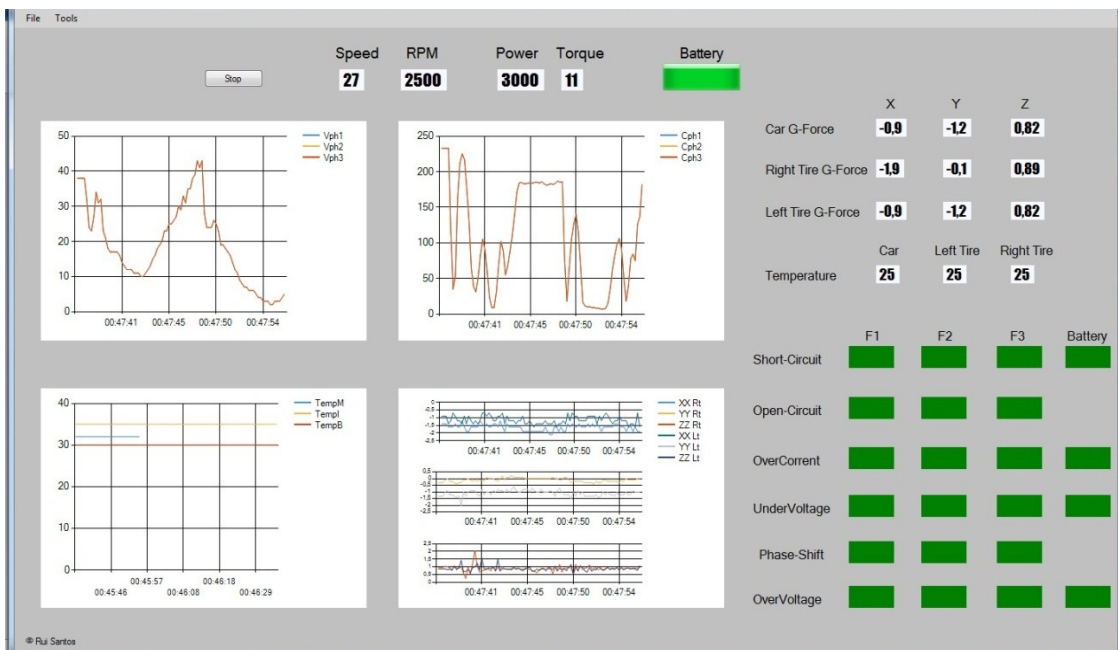


Figura 4.19 - *Software* de análise de dados

Figura 4.19 apresenta-se o *software* de recepção e análise de dados onde se pode observar os gráficos da tensão (cima esquerdo), da corrente (cima direito), temperaturas (baixo esquerdo) e dos acelerómetros (baixo direito). Pode-se ainda visualizar os dados numéricos das temperaturas, acelerações, velocidades e potências, assim como os erros detectados pelo sistema.

## 4.4 - Conclusão

Neste capítulo foram expostos todos os testes efectuados no sistema ao longo da execução deste trabalho.

Iniciou-se com o teste aos acelerómetros, onde foi possível visualizar o comportamento esperado. Seguiu-se o teste ao módulo de leitura dos acelerómetros. Este teste consistiu na verificação da comunicação deste com o receptor. O comportamento foi o esperado.

De seguida efectuou-se o teste às comunicações CAN, constatando-se que é um barramento bastante robusto.

Concluiu-se com o teste efectuado ao *data logger*. Mais uma vez constatou-se o bom funcionamento do mesmo com a visualização das gravações efectuadas na memória não volátil.

Foi também apresentado o veículo alvo deste sistema de telemetria. Este veículo é um Fiat Uno de 1990 preparado para competição com todos os órgãos de segurança essenciais.

Por fim efectuaram-se testes do sistema no veículo, onde foi possível verificar o seu correcto funcionamento.



## Capítulo 5

### Conclusão e trabalhos futuros

Ao longo da execução deste trabalho foram focados variadíssimos aspectos da temática em causa.

Começou-se por fazer uma pesquisa na área dos sensores das grandezas que se pretendiam avaliar. Esta pesquisa culminou com a exposição efectuada no capítulo do estado da arte. Neste capítulo falou-se também da história da telemetria desde os seus primórdios. Foram também apresentados barramentos de dados utilizados em veículos automóveis.

De seguida passou-se para a explicação do trabalho efectuado ao longo desta tese. Este trabalho consistiu no desenvolvimento de um protótipo de um sistema de telemetria, orientado para um veículo de competição, com motorização puramente eléctrica. Foram desenvolvidos e criados módulos de medição de forças de aceleração aplicadas ao veículo, de medição de corrente e tensão aplicadas ao motor e às baterias, um *data logger* responsável pelo armazenamento de dados dos sensores e um sistema *wireless* de transmissão de dados, em tempo real, para um local remoto e fixo. No desenvolvimento destes módulos teve-se o cuidado de reduzir ao máximo o consumo de energia já que será utilizado como sistema embebido num veículo eléctrico. Como tal, para maximizar a autonomia deste, é necessário manter o consumo total de energia o mais reduzido possível.

O próximo passo passou pela compatibilização de dados entre o sistema emissor de dados remotos e o receptor dos mesmos. Este último é composto por um computador onde corre um *software* de análise de dados e detecção de falhas em tempo real.

No fim da execução de todos os módulos foram efectuados testes laboratoriais de forma a se perceber se o funcionamento dos mesmos cumpre com os requisitos necessários ao seu bom funcionamento. Estes consistiram em testes de bancada onde foram testados todos os módulos, incluindo o *data logger* e o módulo responsável pela conversão CAN-RS232.

Por fim, foi apresentado o veículo alvo deste sistema, um Fiat Uno de 1990, que foi convertido para motorização eléctrica, tendo sido equipado com todos os elementos de segurança necessários para a competição automóvel.

## Conclusão e trabalhos futuros

O sistema implementado foi colocado no veículo e testado com sucesso.

Futuramente seria interessante implementar outros módulos de aquisição de diferentes grandezas.

Nestas grandezas incluem-se as temperaturas dos pneus, do motor, do controlador e das baterias.

Também seria interessante a aquisição de dados GPS do veículo de forma a conseguir-se relacionar os dados recolhidos com a posição do veículo em pista.

Outros valores que seriam importantes considerar são as velocidades da roda e do motor. O conhecimento destes valores possibilitaria a monitorização do consumo de energia para diferentes regimes de funcionamento do motor.

Por fim, seria importante criar invólucros mais robustos para cada um dos módulos já que estes poderão vir a ser colocados em zonas sujeitas a humidades, sujidade e impactos fortes.

Um bom melhoramento seria implementar um conversor CAN-RS232 dedicado, em detrimento da utilização da placa de desenvolvimento que foi usada neste trabalho.

# Referências

- [1] Wikipedia. (2011, 10 Dezembro). *Telemetry*. Available: <http://en.wikipedia.org/wiki/Telemetry>
- [2] D. Slyh, *et al.*, "Smokin' Buckeye Telemetry System," Engineering, The Ohio State University, Ohio, 2000.
- [3] B. Motorsport. (12 de Dezembro). *Telemetry*. Available: <http://www.bosch-motorsport.com/content/language2/html/2968.htm>
- [4] Cosworth. (12 de Dezembro). *Cosworth - Telemetry*. Available: <http://www.cosworth.com/Default.aspx?id=1094105>
- [5] AA1Car. (15 de Dezembro). *Controller Area Network (CAN) Diagnostics*. Available: [http://www.aa1car.com/library/can\\_systems.htm](http://www.aa1car.com/library/can_systems.htm)
- [6] N. Navet, *et al.*, "Trends in Automotive Communication Systems," *Proceedings of the IEEE*, vol. 93, pp. 1204-1223, 2005.
- [7] W. Zhenye, *et al.*, "Research of fault-tolerant redundancy and fault diagnosis technology based on can," in *Advanced Computer Control (ICACC), 2010 2nd International Conference on*, 2010, pp. 287-291.
- [8] C. Gabriel and H. Horia, "Integrating sensor devices in a LIN bus network," in *Electronics Technology: Integrated Management of Electronic Materials Production, 2003. 26th International Spring Seminar on*, 2003, pp. 150-153.
- [9] T. Pop, *et al.*, "Timing analysis of the FlexRay communication protocol," *Real-Time Systems*, vol. 39, pp. 205-235, 2008.
- [10] L. B. Fredriksson, "Can for critical embedded automotive networks," *Ieee Micro*, vol. 22, pp. 28-35, Jul-Aug 2002.
- [11] Wikipedia. (13 de Dezembro). *Microelectromechanical systems*. Available: [http://en.wikipedia.org/wiki/Microelectromechanical\\_systems](http://en.wikipedia.org/wiki/Microelectromechanical_systems)
- [12] M. A. Erişmiş, "Mems accelerometers and gyroscopes for inertial measurement units," The Graduate School Of Natural And Applied Sciences Of Middle East Technical University, 2004.
- [13] A. Burg, *et al.*, "MEMS Gyroscopes and their Applications."
- [14] Wikipedia. (5 de Dezembro). *Thermistor*. Available: <http://en.wikipedia.org/wiki/Thermistor>
- [15] B. M. Goltsman and Y. I. Ravich, "The thermocouple temperature instability," in *Thermoelectrics, 1997. Proceedings ICT '97. XVI International Conference on*, 1997, p. 748.
- [16] Agilent. (2009, Practical Temperature Measurements. *Application Note 290*. Available: <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5965-7822E.pdf>
- [17] J. Merchant. (26 Janeiro). *Infrared Temperature Measurement Theory and Application*. Available: <http://www.omega.com/techref/iredtempmeasur.html>
- [18] Melexis. (27 de Janeiro). *MLX90247 Infrared Sensor IC*. Available: [http://www.melexis.com/Sensor\\_ICs\\_Infrared\\_and\\_Optical/Infrared\\_Thermometers/Infrared\\_Sensor\\_IC\\_19.aspx](http://www.melexis.com/Sensor_ICs_Infrared_and_Optical/Infrared_Thermometers/Infrared_Sensor_IC_19.aspx)
- [19] C. W. Lai, *et al.*, "High gain amplification of low-side current sensing shunt resistor," in *Power Engineering Conference, 2008. AUPEC '08. Australasian Universities*, 2008, pp. 1-5.

## Referências

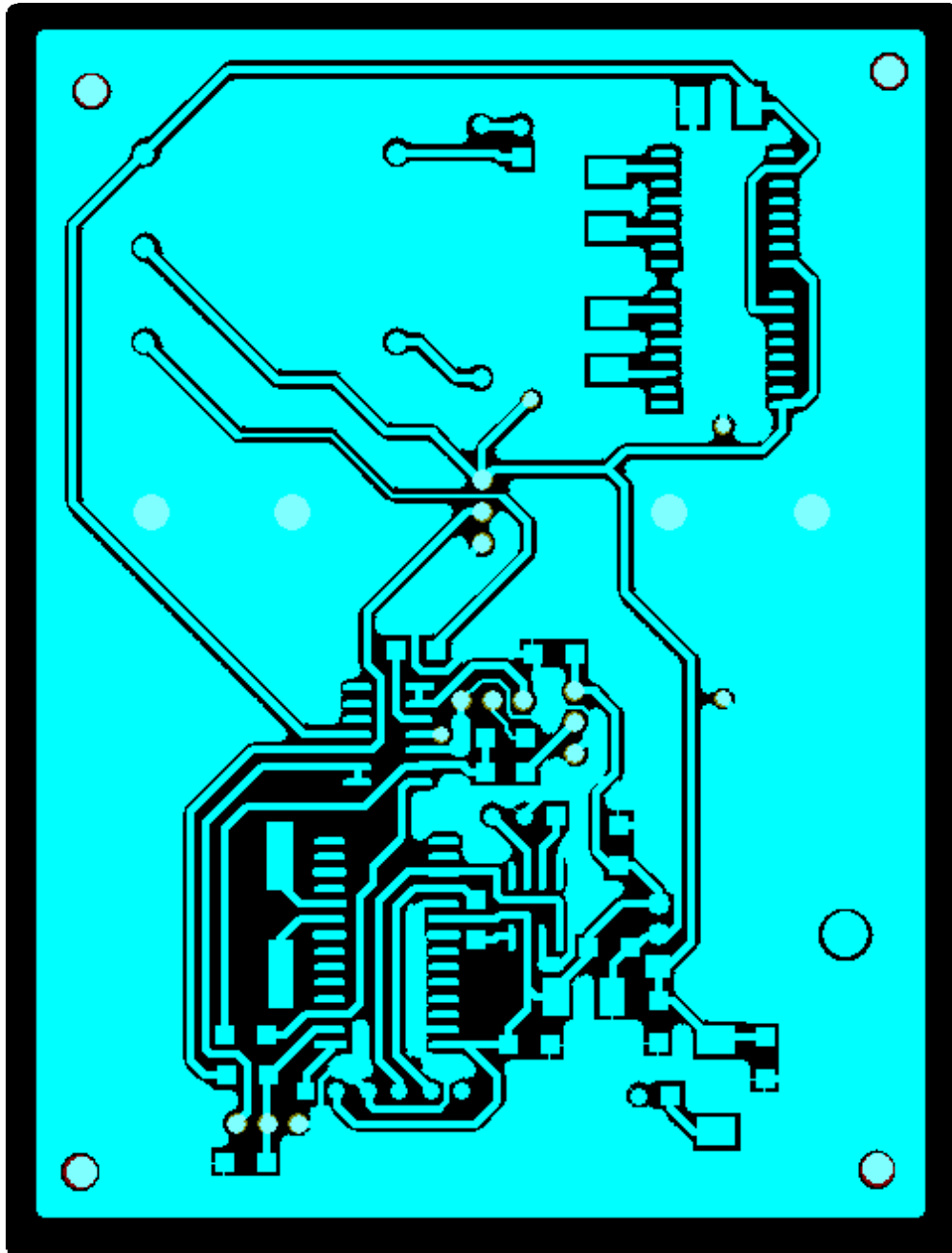
- [20] J. Liao, *et al.*, "Studies of Rogowski coil current transducer for low amplitude current (100A) measurement," in *Electrical and Computer Engineering, 2003. IEEE CCECE 2003. Canadian Conference on*, 2003, pp. 463-466 vol.1.
- [21] Honeywell, "Hall Effect Sensing And Application," in *Sensong and Control*, Honeywell, Ed., ed. Illinois.
- [22] LEM, "Voltage Transducer LV 25-P," vol. 080729/17, ed.
- [23] *Utilizações de espectro isentas de licenciamento radioelétrico*  
*Isenção de licença de estação*, Anacom, 2000.

# Anexos



# Anexo 1

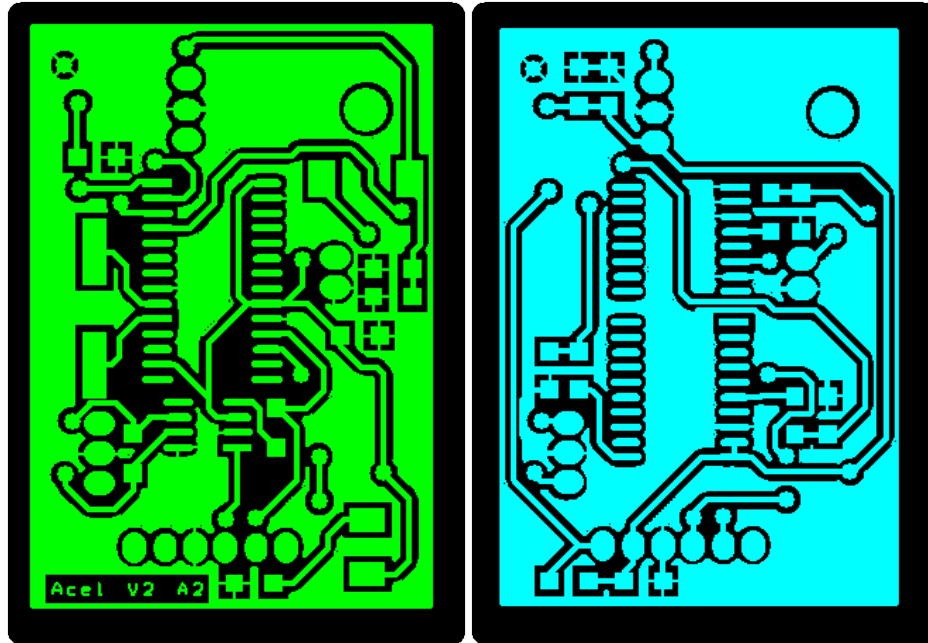
Placa de circuito impresso do módulo de energia eléctrica





## Anexo 2

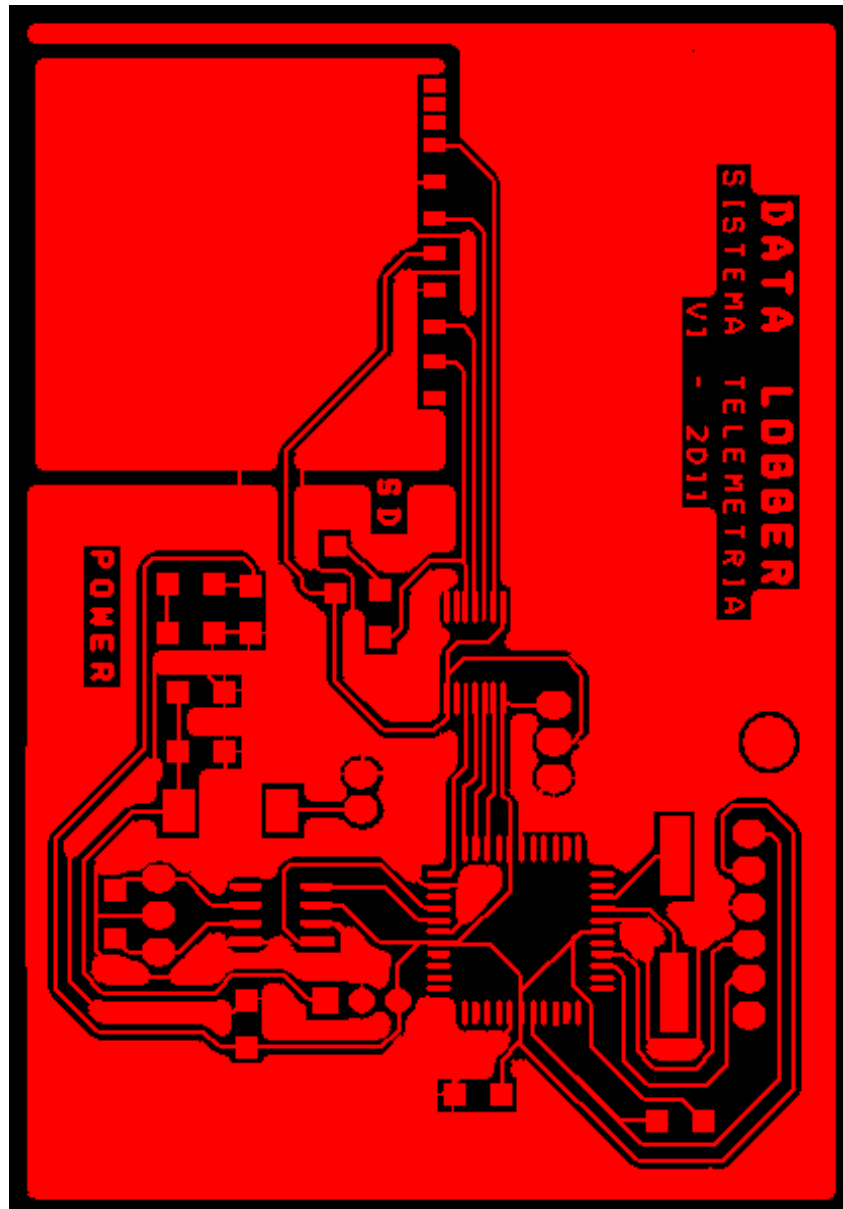
Placa de circuito impresso do módulo dos acelerómetros (face superior e inferior)





# Anexo 3

Placa de circuito impresso do *data logger*





# Anexo 4

# XBEE-PRO<sup>®</sup> 868 Range Validation

## White Paper

### *Abstract*

This paper explains the range performance testing procedures that were used, the environment in which the test was conducted, and the results that were recorded: Reliable performance was demonstrated at 25 miles (40 kilometers) with Line of Sight conditions.

## Environment

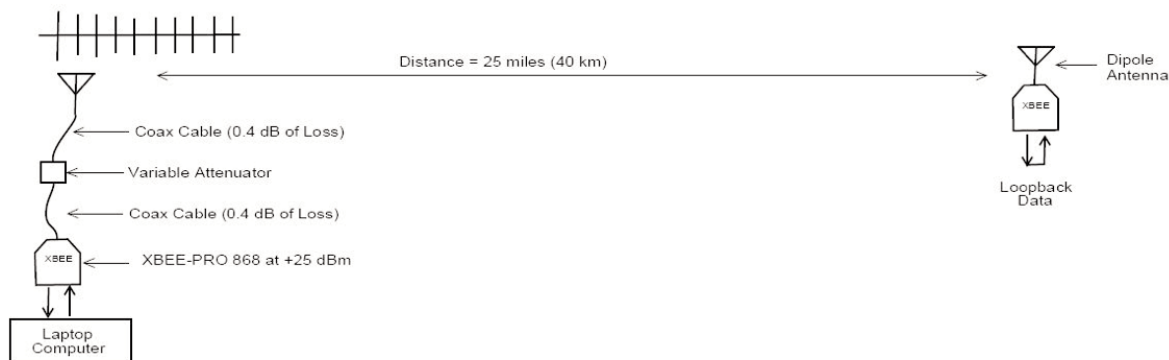
- Date: September 29, 2008
- Location: Utah County—Approximately 50 kilometers south of Salt Lake City, Utah, in the western U.S.
- GPS Coordinates:
  - o Origin: 40.348582,-111.904831
  - o Destination: 40.069544,-111.600838



## Testing

For this test, the radio frequency was shifted up 3 MHz. This was because in the U.S. there are licensed frequencies present in the range of 868 MHz to 871 MHz that exceed -60 dBm. One of these signals was sharing part of the band of 869.4 to 869.650 MHz. This shift would allow an accurate range test and at the same time avoid unwanted interference to the users of that band.

One radio was set up with a loopback on the Data In (Din) and Data Out (Dout) lines. The radio was placed on the roof of a seven-meter-tall house with a dipole antenna. The other radio was then driven 40 kilometers away to an elevated position (there was approximately 300 meters difference between the two points) in order to attain clear LOS (Line of Sight). See diagram below.



The range test was performed with Digi International's software utility X-CTU. Thirty-two bytes of data were sent with each packet. Retries were set to "0" on both radios. If the data sent was not received within one second, the packet was considered failed. One hundred packets were sent for each measurement. Both an 868 MHz 2.1 dBi dipole antenna and a 900 MHz 15dBi Yagi antenna were tested (the Yagi antenna only tested the reverse link). The power output of the module was set to +27 dBm (500 Mw EIRP) in order to overcome the additional loss from the variable attenuator. Testing results for different configurations are recorded in Tables 1 and 2.

868 MHz Dipole Antenna at 40 km	
Variable Attenuation	Percentage of Good Packets
0 dB	100%
9 dB	100%
10 dB	100%
11 dB	96.9%
12 dB	63%
13 dB	32%
15 dB	5%
20 dB	0%

Table 1

900 MHz Yagi Antenna at 40 km	
Variable Attenuation	Percentage of Good Packets
0 dB	98%
10 dB	100%
20 dB	100%
25 dB	90%
30 dB	0%

Table 2

As shown in Table 1, the dipole antenna allowed the radios to communicate clearly over a distance of 40 kilometers LOS with 11 dB of link budget remaining before performance was severely impacted. The 11 dB could very well allow the radio to communicate further than 40 kilometers; however, greater distance is not recommended since different changes in the environment, such as weather conditions or objects in the Fresnel zone, could cause the link to change and be less reliable.

Table 2 shows that using a Yagi antenna on one end of the link, from the loopback dipole radio to the receiving radio 40 kilometers away has 25 dB of link budget remaining. This shows that a directional antenna on a receiving radio could be used to increase the link budget by 14dB, which corresponds to approximately four times the estimated RF LOS range. If one wanted to use a directional antenna on the transmitting radio, then the power of the radio with the directional antenna would need to be reduced in order to keep the EIRP below the required limits.

## Conclusions

When operating in clear RF LOS conditions, XBee-PRO 868 modules are capable of 40 kilometers of transmission, with a theoretical limit beyond 100 kilometers when used with high gain antennas.

The purpose of this test was not to demonstrate the maximum range possible under ideal conditions, but to establish a benchmark under realistic conditions for how the radios will behave in similar environments and to demonstrate the link budget and reliability that can be expected in similar scenarios.



**Digi International**  
877-912-3444  
952-912-3444  
info@digicom

**Digi International**  
**France**  
+33-1-55-61-98-98  
www.digi.fr

**Digi International**  
**KK**  
+81-3-5428-0261  
www.digi-intl.co.jp

**Digi International**  
**(HK) Limited**  
+852-2833-1008  
www.digi.cn

**Digi International**, the leader in device networking for business, develops reliable products and technologies to connect and securely manage local or remote electronic devices over the network or via the web. With over 20 million ports shipped worldwide since 1985, Digi offers the highest levels of performance, flexibility and quality.

**www.digi.com**  
**info@digicom**



# Anexo 5



---

---

## Controller Area Network (CAN) Basics

---

---

Author: Keith Pazul Microchip Technology Inc.
--

### INTRODUCTION

Controller Area Network (CAN) was initially created by German automotive system supplier Robert Bosch in the mid-1980s for automotive applications as a method for enabling robust serial communication. The goal was to make automobiles more reliable, safe and fuel-efficient while decreasing wiring harness weight and complexity. Since its inception, the CAN protocol has gained widespread popularity in industrial automation and automotive/truck applications. Other markets where networked solutions can bring attractive benefits like medical equipment, test equipment and mobile machines are also starting to utilize the benefits of CAN. The goal of this application note is to explain some of the basics of CAN and show the benefits of choosing CAN for embedded systems networked applications.

### CAN OVERVIEW

Most network applications follow a layered approach to system implementation. This systematic approach enables interoperability between products from different manufacturers. A standard was created by the International Standards Organization (ISO) as a template to follow for this layered approach. It is called the ISO Open Systems Interconnection (OSI) Network Layering Reference Model and is shown in Figure 1 for reference.

The CAN protocol itself implements most of the lower two layers of this reference model. The communication medium portion of the model was purposely left out of the Bosch CAN specification to enable system designers to adapt and optimize the communication protocol on multiple media for maximum flexibility (twisted pair, single wire, optically isolated, RF, IR, etc.). With this flexibility, however, comes the possibility of interoperability concerns.

To ease some of these concerns, the International Standards Organization and Society of Automotive Engineers (SAE) have defined some protocols based on CAN that include the Media Dependant Interface definition such that all of the lower two layers are specified.

ISO11898 is a standard for high-speed applications, ISO11519 is a standard for low-speed applications, and J1939 (from SAE) is targeted for truck and bus applications. All three of these protocols specify a 5V differential electrical bus as the physical interface.

The rest of the layers of the ISO/OSI protocol stack are left to be implemented by the system software developer. Higher Layer Protocols (HLPs) are generally used to implement the upper five layers of the OSI Reference Model.

HLPs are used to:

- 1) standardize startup procedures including bit rates used,
- 2) distribute addresses among participating nodes or types of messages,
- 3) determine the structure of the messages, and
- 4) provide system-level error handling routines. This is by no means a full list of the functions HLPs perform, however it does describe some of their basic functionality.

### CAN PROTOCOL BASICS

#### Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection (CSMA/CD)

The CAN communication protocol is a CSMA/CD protocol. The CSMA stands for Carrier Sense Multiple Access. What this means is that every node on the network must monitor the bus for a period of no activity before trying to send a message on the bus (Carrier Sense). Also, once this period of no activity occurs, every node on the bus has an equal opportunity to transmit a message (Multiple Access). The CD stands for Collision Detection. If two nodes on the network start transmitting at the same time, the nodes will detect the 'collision' and take the appropriate action. In CAN protocol, a non-destructive bitwise arbitration method is utilized. This means that messages remain intact after arbitration is completed even if collisions are detected. All of this arbitration takes place without corruption or delay of the higher priority message.

There are a couple of things that are required to support non-destructive bitwise arbitration. First, logic states need to be defined as dominant or recessive. Second, the transmitting node must monitor the state of the bus to see if the logic state it is trying to send actually appears on the bus. CAN defines a logic bit 0 as a dominant bit and a logic bit 1 as a recessive bit.

A dominant bit state will always win arbitration over a recessive bit state, therefore the lower the value in the Message Identifier (the field used in the message arbitration process), the higher the priority of the message. As an example, suppose two nodes are trying to transmit a message at the same time. Each node will monitor the bus to make sure the bit that it is trying to send actually appears on the bus. The lower priority message will at some point try to send a recessive bit and the monitored state on the bus will be a dominant. At that point this node loses arbitration and immediately stops transmitting. The higher priority message will continue until completion and the node that lost arbitration will wait for the next period of no activity on the bus and try to transmit its message again.

## Message-Based Communication

CAN protocol is a message-based protocol, not an address based protocol. This means that messages are not transmitted from one node to another node based on addresses. Embedded in the CAN message itself is the priority and the contents of the data being transmitted. All nodes in the system receive every message transmitted on the bus (and will acknowledge if the message was properly received). It is up to each node in the system to decide whether the message received should be immediately discarded or kept to be processed. A single message can be destined for one particular node to receive, or many nodes based on the way the network and system are designed.

For example, an automotive airbag sensor can be connected via CAN to a safety system router node only. This router node takes in other safety system information and routes it to all other nodes on the safety system network. Then all the other nodes on the safety system network can receive the latest airbag sensor information from the router at the same time, acknowledge if the message was received properly, and decide whether to utilize this information or discard it.

Another useful feature built into the CAN protocol is the ability for a node to request information from other nodes. This is called a Remote Transmit Request (RTR). This is different from the example in the previous paragraph because instead of waiting for information to be sent by a particular node, this node specifically requests data to be sent to it.

For example, a safety system in a car gets frequent updates from critical sensors like the airbags, but it may not receive frequent updates from other sensors like the oil pressure sensor or the low battery sensor to make sure they are functioning properly. Periodically, the safety system can request data from these other sensors and perform a thorough safety system check. The system designer can utilize this feature to minimize network traffic while still maintaining the integrity of the network.

One additional benefit of this message-based protocol is that additional nodes can be added to the system without the necessity to reprogram all other nodes to recognize this addition. This new node will start receiving messages from the network and, based on the message ID, decide whether to process or discard the received information.

## CAN Message Frame Description

CAN protocol defines four different types of messages (or Frames). The first and most common type of frame is a Data Frame. This is used when a node transmits information to any or all other nodes in the system. Second is a Remote Frame, which is basically a Data Frame with the RTR bit set to signify it is a Remote Transmit Request (see Figure 2 and Figure 3 for details on Data Frames). The other two frame types are for handling errors. One is called an Error Frame and one is called an Overload Frame. Error Frames are generated by nodes that detect any one of the many protocol errors defined by CAN. Overload errors are generated by nodes that require more time to process messages already received.

Data Frames consist of fields that provide additional information about the message as defined by the CAN specification. Embedded in the Data Frames are Arbitration Fields, Control Fields, Data Fields, CRC Fields, a 2-bit Acknowledge Field and an End of Frame.

The Arbitration Field is used to prioritize messages on the bus. Since the CAN protocol defines a logical 0 as the dominant state, the lower the number in the arbitration field, the higher priority the message has on the bus. The arbitration field consists of 12-bits (11 identifier bits and one RTR bit) or 32-bits (29 identifier bits, 1-bit to define the message as an extended data frame, an SRR bit which is unused, and an RTR bit), depending on whether Standard Frames or Extended Frames are being utilized. The current version of the CAN specification, version 2.0B, defines 29-bit identifiers and calls them Extended Frames. Previous versions of the CAN specification defined 11-bit identifiers which are called Standard Frames.

As described in the preceding section, the Remote Transmit Request (RTR) is used by a node when it requires information to be sent to it from another node. To accomplish an RTR, a Remote Frame is sent with the identifier of the required Data Frame. The RTR bit in the Arbitration Field is utilized to differentiate between a Remote Frame and a Data Frame. If the RTR bit is recessive, then the message is a Remote Frame. If the RTR bit is dominant, the message is a Data Frame.

The Control Field consists of six bits. The MSB is the IDE bit (signifies Extended Frame) which should be dominant for Standard Data Frames. This bit determines if the message is a Standard or Extended Frame. In Extended Frames, this bit is RB1 and it is reserved. The next bit is RB0 and it is also reserved. The four LSBs are the Data Length Code (DLC) bits. The Data Length Code bits determine how many data bytes are included in the message. It should be noted that a Remote Frame has no data field, regardless of the value of the DLC bits.

The Data Field consists of the number of data bytes described in the Data Length Code of the Control Field.

The CRC Field consists of a 15-bit CRC field and a CRC delimiter, and is used by receiving nodes to determine if transmission errors have occurred.

The Acknowledge Field is utilized to indicate if the message was received correctly. Any node that has correctly received the message, regardless of whether the node processes or discards the data, puts a dominant bit on the bus in the ACK Slot bit time (see Figure 2 or Figure 3 for the location of the ACK Slot bit time).

The last two message types are Error Frames and Overload Frames. When a node detects one of the many types of errors defined by the CAN protocol, an Error Frame occurs. Overload Frames tell the network that the node sending the Overload Frame is not ready to receive additional messages at this time, or that intermission has been violated. These errors will be discussed in more detail in the next section.

## **Fast, Robust Communication**

Because CAN was initially designed for use in automobiles, a protocol that efficiently handled errors was critical if it was to gain market acceptance. With the release of version 2.0B of the CAN specification, the maximum communication rate was increased 8x over the version 1.0 specification to 1Mbit/sec. At this rate, even the most time-critical parameters can be transmitted serially without latency concerns. In addition to this, the CAN protocol has a comprehensive list of errors it can detect that ensures the integrity of messages.

CAN nodes have the ability to determine fault conditions and transition to different modes based on the severity of problems being encountered. They also have the ability to detect short disturbances from permanent failures and modify their functionality accordingly. CAN nodes can transition from functioning like a normal node (being able to transmit and receive messages normally), to shutting down completely (bus-off) based on the severity of the errors detected. This feature is called Fault Confinement. No faulty CAN node or nodes will be able to monopolize all of the bandwidth on the network because faults will be confined to the faulty nodes and these faulty nodes will shut off before bringing the network down. This is very powerful because Fault Confinement guarantees bandwidth for critical system information.

As discussed previously, there are five error conditions that are defined in the CAN protocol and three error states that a node can be in, based upon the type and number of error conditions detected. The following section describes each one in more detail.

### Errors Detected

#### CRC Error

A 15-bit Cyclic Redundancy Check (CRC) value is calculated by the transmitting node and this 15-bit value is transmitted in the CRC field. All nodes on the network receive this message, calculate a CRC and verify that the CRC values match. If the values do not match, a CRC error occurs and an Error Frame is generated. Since at least one node did not properly receive the message, it is then resent after a proper intermission

# AN713

---

## Acknowledge Error

In the Acknowledge Field of a message, the transmitting node checks if the Acknowledge Slot (which it has sent as a recessive bit) contains a dominant bit. This dominant bit would acknowledge that at least one node correctly received the message. If this bit is recessive, then no node received the message properly. An Acknowledge Error has occurred. An Error Frame is then generated and the original message will be repeated after a proper intermission time.

## Form Error

If any node detects a dominant bit in one of the following four segments of the message: End of Frame, Interframe Space, Acknowledge Delimiter or CRC Delimiter, the CAN protocol defines this to be a form violation and a Form Error is generated. The original message is then resent after a proper intermission time. (see Figure 2 and/or Figure 3 for where these segments lie in a CAN message).

## Bit Error

A Bit Error occurs if a transmitter sends a dominant bit and detects a recessive bit, or if it sends a recessive bit and detects a dominant bit when monitoring the actual bus level and comparing it to the bit that it has just sent. In the case where the transmitter sends a recessive bit and a dominant bit is detected during the Arbitration Field or Acknowledge Slot, no Bit Error is generated because normal arbitration or acknowledgment is occurring. If a Bit Error is detected, an Error Frame is generated and the original message is resent after a proper intermission time.

## Stuff Error

CAN protocol uses a Non-Return-to-Zero (NRZ) transmission method. This means that the bit level is placed on the bus for the entire bit time. CAN is also asynchronous, and bit stuffing is used to allow receiving nodes to synchronize by recovering clock information from the data stream. Receiving nodes synchronize on recessive to dominant transitions. If there are more than five bits of the same polarity in a row, CAN will automatically stuff an opposite polarity bit in the data stream. The receiving node(s) will use it for synchronization, but will ignore the stuff bit for data purposes. If, between the Start of Frame and the CRC Delimiter, six consecutive bits with the same polarity are detected, then the bit stuffing rule has been violated. A Stuff Error then occurs, an Error Frame is sent, and the message is repeated.

## Error States

Detected errors are made public to all other nodes via Error Frames or Error Flags. The transmission of an erroneous message is aborted and the frame is repeated as soon as the message can again win arbitration on the network. Also, each node is in one of three error states, Error-Active, Error-Passive or Bus-Off.

### Error-Active

An Error-Active node can actively take part in bus communication, including sending an active error flag, which consists of six consecutive dominant bits. The Error Flag actively violates the bit stuffing rule and causes all other nodes to send an Error Flag, called the Error Echo Flag, in response. An Active Error Flag, and the subsequent Error Echo Flag may cause as many as twelve consecutive dominant bits on the bus; six from the Active Error Flag, and zero up to six more from the Error Echo Flag depending upon when each node detects an error on the bus. A node is Error-Active when both the Transmit Error Counter (TEC) and the Receive Error Counter (REC) are below 128. Error-Active is the normal operational mode, allowing the node to transmit and receive without restrictions.

### Error-Passive

A node becomes Error-Passive when either the Transmit Error Counter or Receive Error Counter exceeds 127. Error-Passive nodes are not permitted to transmit Active Error Flags on the bus, but instead, transmit Passive Error Flags which consist of six recessive bits. If the Error-Passive node is currently the only transmitter on the bus then the passive error flag will violate the bit stuffing rule and the receiving node(s) will respond with Error Flags of their own (either active or passive depending upon their own error state). If the Error-Passive node in question is not the only transmitter (i.e. during arbitration) or is a receiver, then the Passive Error Flag will have no effect on the bus due to the recessive nature of the error flag. When an Error-Passive node transmits a Passive Error Flag and detects a dominant bit, it must see the bus as being idle for eight additional bit times after an intermission before recognizing the bus as available. After this time, it will attempt to retransmit.

### Bus-Off

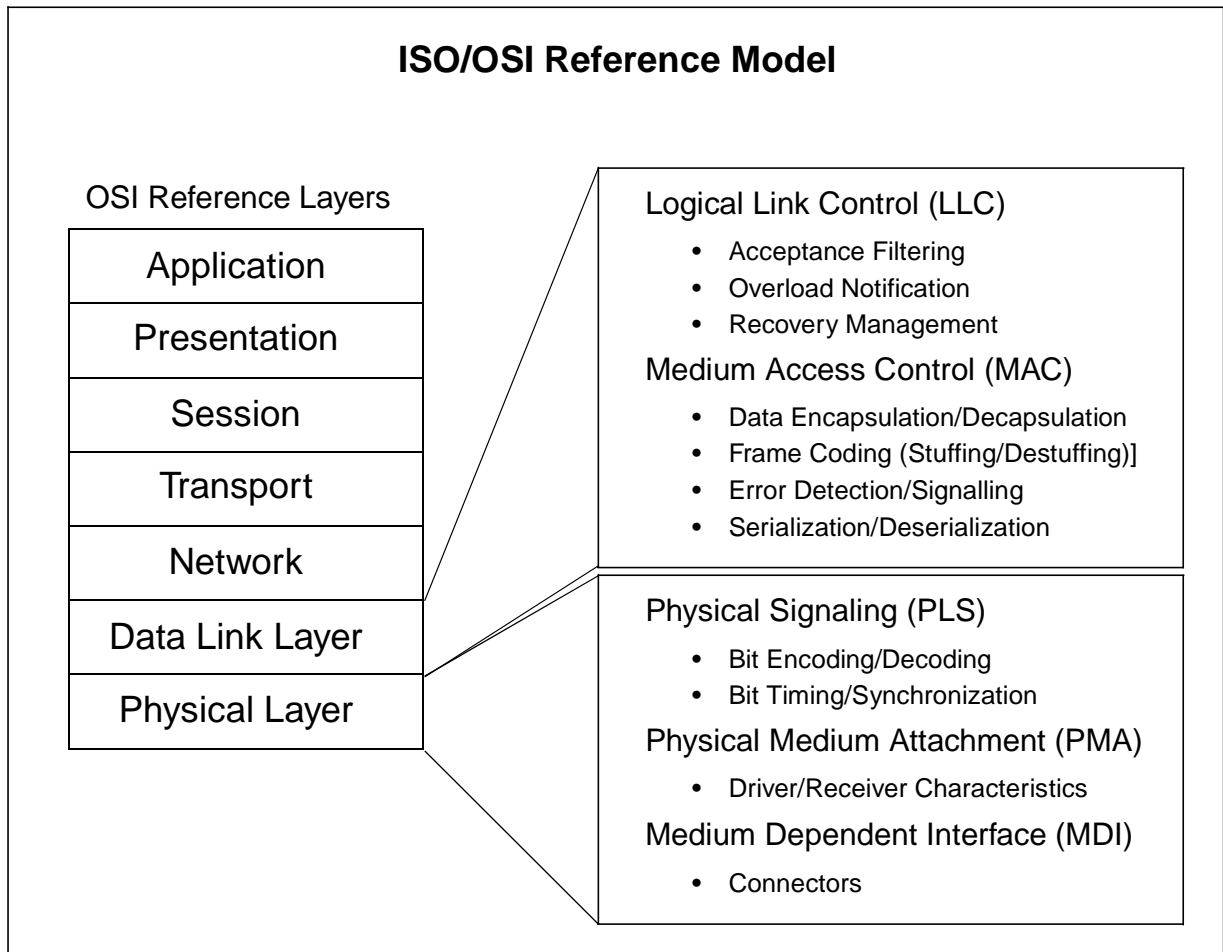
A node goes into the Bus-Off state when the Transmit Error Counter is greater than 255 (receive errors can not cause a node to go Bus-Off). In this mode, the node can not send or receive messages, acknowledge messages, or transmit Error Frames of any kind. This is how Fault Confinement is achieved. There is a bus recovery sequence that is defined by the CAN protocol that allows a node that is Bus-Off to recover, return to Error-Active, and begin transmitting again if the fault condition is removed.

## **CONCLUSION**

The CAN protocol was optimized for systems that need to transmit and receive relatively small amounts of information (as compared to Ethernet or USB, which are designed to move much larger blocks of data) reliably to any or all other nodes on the network. CSMA/CD allows every node to have an equal chance to gain access to the bus, and allows for smooth handling of collisions.

Since the protocol is message-based, not address based, all messages on the bus receive every message and acknowledge every message, regardless of whether it needs the data or not. This allows the bus to operate in node-to-node or multicast messaging formats without having to send different types of messages.

Fast, robust message transmission with fault confinement is also a big plus for CAN because faulty nodes will automatically drop off the bus not allowing any one node from bringing a network down. This effectively guarantees that bandwidth will always be available for critical messages to be transmitted. With all of these benefits built into the CAN protocol and its momentum in the automotive world, other markets will begin to see and implement CAN into their systems.



**FIGURE 1:** ISO/OSI Reference Model

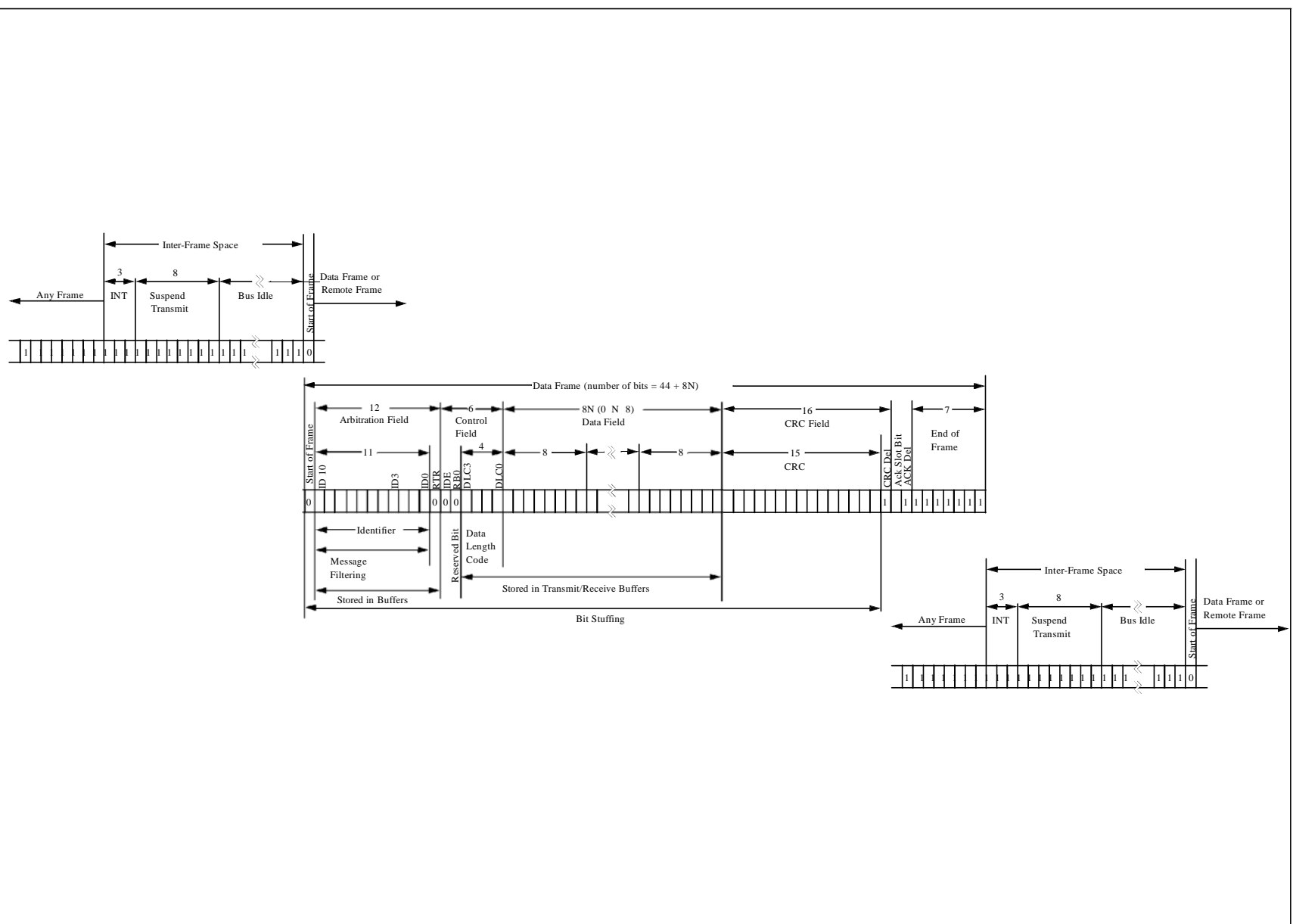


FIGURE 2: Standard Data Frame



---

---

**Note the following details of the code protection feature on PICmicro® MCUs.**

- The PICmicro family meets the specifications contained in the Microchip Data Sheet.
- Microchip believes that its family of PICmicro microcontrollers is one of the most secure products of its kind on the market today, when used in the intended manner and under normal conditions.
- There are dishonest and possibly illegal methods used to breach the code protection feature. All of these methods, to our knowledge, require using the PICmicro microcontroller in a manner outside the operating specifications contained in the data sheet. The person doing so may be engaged in theft of intellectual property.
- Microchip is willing to work with the customer who is concerned about the integrity of their code.
- Neither Microchip nor any other semiconductor manufacturer can guarantee the security of their code. Code protection does not mean that we are guaranteeing the product as “unbreakable”.
- Code protection is constantly evolving. We at Microchip are committed to continuously improving the code protection features of our product.

If you have any further questions about this matter, please contact the local sales office nearest to you.

---

Information contained in this publication regarding device applications and the like is intended through suggestion only and may be superseded by updates. It is your responsibility to ensure that your application meets with your specifications. No representation or warranty is given and no liability is assumed by Microchip Technology Incorporated with respect to the accuracy or use of such information, or infringement of patents or other intellectual property rights arising from such use or otherwise. Use of Microchip's products as critical components in life support systems is not authorized except with express written approval by Microchip. No licenses are conveyed, implicitly or otherwise, under any intellectual property rights.

#### Trademarks


The Microchip name and logo, the Microchip logo, FilterLab, KEELoc, microID, MPLAB, PIC, PICmicro, PICMASTER, PICSTART, PRO MATE, SEEVAL and The Embedded Control Solutions Company are registered trademarks of Microchip Technology Incorporated in the U.S.A. and other countries.

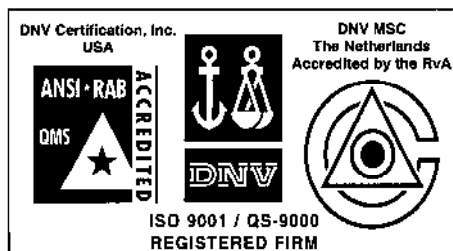
dsPIC, ECONOMONITOR, FanSense, FlexROM, fuzzyLAB, In-Circuit Serial Programming, ICSP, ICEPIC, microPort, Migratable Memory, MPASM, MPLIB, MPLINK, MPSIM, MXDEV, PICC, PICDEM, PICDEM.net, rfPIC, Select Mode and Total Endurance are trademarks of Microchip Technology Incorporated in the U.S.A.

Serialized Quick Turn Programming (SQTP) is a service mark of Microchip Technology Incorporated in the U.S.A.

All other trademarks mentioned herein are property of their respective companies.

© 2002, Microchip Technology Incorporated, Printed in the U.S.A., All Rights Reserved.

 Printed on recycled paper.



---

*Microchip received QS-9000 quality system certification for its worldwide headquarters, design and wafer fabrication facilities in Chandler and Tempe, Arizona in July 1999. The Company's quality system processes and procedures are QS-9000 compliant for its PICmicro® 8-bit MCUs, KEELoc® code hopping devices, Serial EEPROMs and microperipheral products. In addition, Microchip's quality system for the design and manufacture of development systems is ISO 9001 certified.*

---





---

## WORLDWIDE SALES AND SERVICE

---

### AMERICAS

#### Corporate Office

2355 West Chandler Blvd.  
Chandler, AZ 85224-6199  
Tel: 480-792-7200 Fax: 480-792-7277  
Technical Support: 480-792-7627  
Web Address: <http://www.microchip.com>

#### Rocky Mountain

2355 West Chandler Blvd.  
Chandler, AZ 85224-6199  
Tel: 480-792-7966 Fax: 480-792-7456

#### Atlanta

500 Sugar Mill Road, Suite 200B  
Atlanta, GA 30350  
Tel: 770-640-0034 Fax: 770-640-0307

#### Boston

2 Lan Drive, Suite 120  
Westford, MA 01886  
Tel: 978-692-3848 Fax: 978-692-3821

#### Chicago

333 Pierce Road, Suite 180  
Itasca, IL 60143  
Tel: 630-285-0071 Fax: 630-285-0075

#### Dallas

4570 Westgrove Drive, Suite 160  
Addison, TX 75001  
Tel: 972-818-7423 Fax: 972-818-2924

#### Detroit

Tri-Atria Office Building  
32255 Northwestern Highway, Suite 190  
Farmington Hills, MI 48334  
Tel: 248-538-2250 Fax: 248-538-2260

#### Kokomo

2767 S. Albright Road  
Kokomo, Indiana 46902  
Tel: 765-864-8360 Fax: 765-864-8387

#### Los Angeles

18201 Von Karman, Suite 1090  
Irvine, CA 92612  
Tel: 949-263-1888 Fax: 949-263-1338

#### New York

150 Motor Parkway, Suite 202  
Hauppauge, NY 11788  
Tel: 631-273-5305 Fax: 631-273-5335

#### San Jose

Microchip Technology Inc.  
2107 North First Street, Suite 590  
San Jose, CA 95131  
Tel: 408-436-7950 Fax: 408-436-7955

#### Toronto

6285 Northam Drive, Suite 108  
Mississauga, Ontario L4V 1X5, Canada  
Tel: 905-673-0699 Fax: 905-673-6509

### ASIA/PACIFIC

#### Australia

Microchip Technology Australia Pty Ltd  
Suite 22, 41 Rawson Street  
Epping 2121, NSW  
Australia  
Tel: 61-2-9868-6733 Fax: 61-2-9868-6755

#### China - Beijing

Microchip Technology Consulting (Shanghai)  
Co., Ltd., Beijing Liaison Office  
Unit 915  
Bei Hai Wan Tai Bldg.  
No. 6 Chaoyangmen Beidajie  
Beijing, 100027, No. China  
Tel: 86-10-85282100 Fax: 86-10-85282104

#### China - Chengdu

Microchip Technology Consulting (Shanghai)  
Co., Ltd., Chengdu Liaison Office  
Rm. 2401, 24th Floor,  
Ming Xing Financial Tower  
No. 88 TIDU Street  
Chengdu 610016, China  
Tel: 86-28-6766200 Fax: 86-28-6766599

#### China - Fuzhou

Microchip Technology Consulting (Shanghai)  
Co., Ltd., Fuzhou Liaison Office  
Unit 28F, World Trade Plaza  
No. 71 Wusi Road  
Fuzhou 350001, China  
Tel: 86-591-7503506 Fax: 86-591-7503521

#### China - Shanghai

Microchip Technology Consulting (Shanghai)  
Co., Ltd.  
Room 701, Bldg. B  
Far East International Plaza  
No. 317 Xian Xia Road  
Shanghai, 200051  
Tel: 86-21-6275-5700 Fax: 86-21-6275-5060

#### China - Shenzhen

Microchip Technology Consulting (Shanghai)  
Co., Ltd., Shenzhen Liaison Office  
Rm. 1315, 13/F, Shenzhen Kerry Centre,  
Renminnan Lu  
Shenzhen 518001, China  
Tel: 86-755-2350361 Fax: 86-755-2366086

#### Hong Kong

Microchip Technology Hongkong Ltd.  
Unit 901-6, Tower 2, Metroplaza  
223 Hing Fong Road  
Kwai Fong, N.T., Hong Kong  
Tel: 852-2401-1200 Fax: 852-2401-3431

#### India

Microchip Technology Inc.  
India Liaison Office  
Divyasree Chambers  
1 Floor, Wing A (A3/A4)  
No. 11, O'Shaughnessy Road  
Bangalore, 560 025, India  
Tel: 91-80-2290061 Fax: 91-80-2290062

### Japan

Microchip Technology Japan K.K.  
Benex S-1 6F  
3-18-20, Shinyokohama  
Kohoku-Ku, Yokohama-shi  
Kanagawa, 222-0033, Japan  
Tel: 81-45-471-6166 Fax: 81-45-471-6122

### Korea

Microchip Technology Korea  
168-1, Youngbo Bldg. 3 Floor  
Samsung-Dong, Kangnam-Ku  
Seoul, Korea 135-882  
Tel: 82-2-554-7200 Fax: 82-2-558-5934

### Singapore

Microchip Technology Singapore Pte Ltd.  
200 Middle Road  
#07-02 Prime Centre  
Singapore, 188980  
Tel: 65-334-8870 Fax: 65-334-8850

### Taiwan

Microchip Technology Taiwan  
11F-3, No. 207  
Tung Hua North Road  
Taipei, 105, Taiwan  
Tel: 886-2-2717-7175 Fax: 886-2-2545-0139

### EUROPE

#### Denmark

Microchip Technology Nordic ApS  
Regus Business Centre  
Lautrup høj 1-3  
Ballerup DK-2750 Denmark  
Tel: 45 4420 9895 Fax: 45 4420 9910

#### France

Microchip Technology SARL  
Parc d'Activite du Moulin de Massy  
43 Rue du Saule Trapu  
Batiment A - 1er Etage  
91300 Massy, France  
Tel: 33-1-69-53-63-20 Fax: 33-1-69-30-90-79

#### Germany

Microchip Technology GmbH  
Gustav-Heinemann Ring 125  
D-81739 Munich, Germany  
Tel: 49-89-627-144 0 Fax: 49-89-627-144-44

#### Italy

Microchip Technology SRL  
Centro Direzionale Colleoni  
Palazzo Taurus 1 V. Le Colleoni 1  
20041 Agrate Brianza  
Milan, Italy  
Tel: 39-039-65791-1 Fax: 39-039-6899883

#### United Kingdom

Arizona Microchip Technology Ltd.  
505 Eskdale Road  
Winnersh Triangle  
Wokingham  
Berkshire, England RG41 5TU  
Tel: 44 118 921 5869 Fax: 44-118 921-5820

01/18/02

# Anexo 6



# Surface Mount Micromachined Accelerometer

The MMA3202 series of dual axis (X and Y) silicon capacitive, micromachined accelerometers features signal conditioning, a 4-pole low pass filter and temperature compensation and separate outputs for the two axes. Zero-g offset full scale span and filter cut-off are factory set and require no external devices. A full system self-test capability verifies system functionality.

## Features

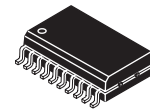
- Sensitivity in two separate axes: 100g X-axis and 50g Y-axis
- Integral Signal Conditioning
- Linear Output
- Ratiometric Performance
- 4th Order Bessel Filter Preserves Pulse Shape Integrity
- Calibrated Self-test
- Low Voltage Detect, Clock Monitor, and EPROM Parity Check Status
- Transducer Hermetically Sealed at Wafer Level for Superior Reliability
- Robust Design, High Shocks Survivability
- Qualified AEC-Q100, Rev. F Grade 2 (-40°C/ +105°C)

## Typical Applications

- Vibration Monitoring and Recording
- Impact Monitoring
- Appliance Control
- Mechanical Bearing Monitoring
- Computer Hard Drive Protection
- Computer Mouse and Joysticks
- Virtual Reality Input Devices
- Sports Diagnostic Devices and Systems

## MMA3202KEG

**MMA3202KEG: XY-AXIS SENSITIVITY  
 MICROMACHINED  
 ACCELEROMETER  
 ±100/50g**



**KEG SUFFIX (Pb-FREE)  
 20-LEAD SOIC  
 CASE 475A-02**

## ORDERING INFORMATION

Device	Temperature Range	Case No.	Package
MMA3202EG	-40 to +125°C	475A-02	SOIC-20
MMA3202EGR2	-40 to +125°C	475A-02	SOIC-20, Tape & Reel
MMA3202KEG*	-40 to +125°C	475A-02	SOIC-20
MMA3202KEGR2*	-40 to +125°C	475A-02	SOIC-20, Tape & Reel

\*Part number sourced from a different facility.

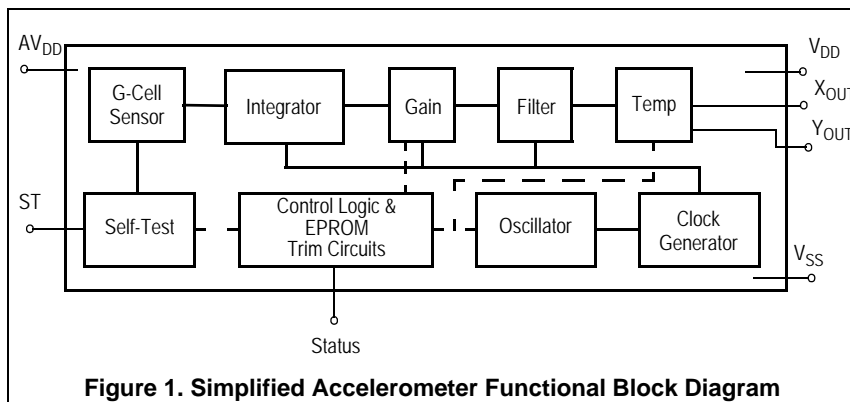


Figure 1. Simplified Accelerometer Functional Block Diagram

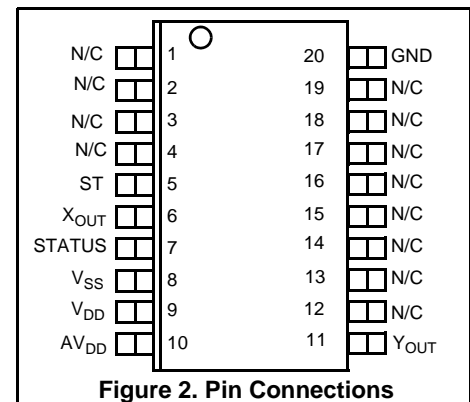


Figure 2. Pin Connections

### Table 1. Maximum Ratings

(Maximum ratings are the limits to which the device can be exposed without causing permanent damage.)

Rating	Symbol	Value	Unit
Powered Acceleration (all axes)	$G_{pd}$	1500	g
Unpowered Acceleration (all axes)	$G_{upd}$	2000	g
Supply Voltage	$V_{DD}$	-0.3 to +7.0	V
Drop Test <sup>(1)</sup>	$D_{drop}$	1.2	m
Storage Temperature Range	$T_{stg}$	-40 to +125	°C

1. Dropped onto concrete surface from any axis.

### ELECTRO STATIC DISCHARGE (ESD)

**WARNING: This device is sensitive to electrostatic discharge.**

Although the accelerometers contain internal 2 kV ESD protection circuitry, extra precaution must be taken by the user to protect the chip from ESD. A charge of over 2000 volts can accumulate on the human body or associated test equipment. A charge of this magnitude can alter the

performance or cause failure of the chip. When handling the accelerometer, proper ESD precautions should be followed to avoid exposing the device to discharges which may be detrimental to its performance.

**Table 2. Operating Characteristics**(Unless otherwise noted:  $-40^{\circ}\text{C} \leq T_A \leq +105^{\circ}\text{C}$ ,  $4.75 \leq V_{DD} \leq 5.25$ , Acceleration = 0g, Loaded output.)<sup>(1)</sup>

Characteristic	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Operating Range <sup>(2)</sup>					
Supply Voltage <sup>(3)</sup>	$V_{DD}$	4.75	5.00	5.25	V
Supply Current	$I_{DD}$	6	8	10	mA
Operating Temperature Range	$T_A$	-40	—	+125	$^{\circ}\text{C}$
Acceleration Range X-axis	$g_{FS}$	—	112.5	—	g
Acceleration Range Y-axis	$g_{FS}$	—	56.3	—	g
Output Signal					
Zero-g ( $T_A = 25^{\circ}\text{C}$ , $V_{DD} = 5.0\text{ V}$ ) <sup>(4)</sup>	$V_{OFF}$	2.35	2.5	2.65	V
Zero-g	$V_{OFF,V}$	$0.46 V_{DD}$	$0.50 V_{DD}$	$0.54 V_{DD}$	V
Sensitivity X-axis ( $T_A = 25^{\circ}\text{C}$ , $V_{DD} = 5.0\text{ V}$ ) <sup>(5)</sup>	$S$	19	20	21	mV/g
Sensitivity Y-axis ( $T_A = 25^{\circ}\text{C}$ , $V_{DD} = 5.0\text{ V}$ )	$S$	38	40	42	mV/g
Sensitivity X-axis	$S_V$	3.72	4	4.28	mV/g/V
Sensitivity Y-axis	$S_V$	7.44	8	8.56	mV/g/V
Bandwidth Response	$f_{-3dB}$	360	400	440	Hz
Nonlinearity	$NL_{OUT}$	-1.0	—	+1.0	% FSO
Noise					
RMS (.01 Hz – 1 kHz)	$n_{RMS}$	—	—	2.8	mVrms
Power Spectral Density	$n_{PSD}$	—	110	—	$\mu\text{V}/(\text{Hz}^{1/2})$
Clock Noise (without RC load on output) <sup>(6)</sup>	$n_{CLK}$	—	2.0	—	mVpk
Self-Test					
Output Response	$g_{ST}$	9.6	12	14.4	g
Input Low	$V_{IL}$	$V_{SS}$	—	$0.3 \times V_{DD}$	V
Input High	$V_{IH}$	$0.7 \times V_{DD}$	—	$V_{DD}$	V
Input Loading <sup>(7)</sup>	$I_{IN}$	-30	-100	-300	$\mu\text{A}$
Response Time <sup>(8)</sup>	$t_{ST}$	—	2.0	—	ms
Status <sup>(9) (10)</sup>					
Output Low ( $I_{load} = 100\ \mu\text{A}$ )	$V_{OL}$	—	—	0.4	V
Output High ( $I_{load} = 100\ \mu\text{A}$ )	$V_{OH}$	$V_{DD} - 0.8$	—	—	V
Minimum Supply Voltage (LVD Trip)	$V_{LVD}$	2.7	3.25	4.0	V
Clock Monitor Fail Detection Frequency	$f_{min}$	50	—	260	kHz
Output Stage Performance					
Electrical Saturation Recovery Time <sup>(11)</sup>	$t_{DELAY}$	—	0.2	—	ms
Full Scale Output Range ( $I_{OUT} = 200\ \mu\text{A}$ )	$V_{FSO}$	0.25	—	$V_{DD} - 0.25$	V
Capacitive Load Drive <sup>(12)</sup>	$C_L$	—	—	100	pF
Output Impedance	$Z_O$	—	300	—	$\Omega$
Mechanical Characteristics					
Transverse Sensitivity <sup>(13)</sup>	$V_{XZ,YZ}$	—	—	5.0	% FSO
Package Resonance	$f_{PKG}$	—	10	—	kHz

- For a loaded output the measurements are observed after an RC filter consisting of a 1 k $\Omega$  resistor and a 0.01  $\mu\text{F}$  capacitor to ground.
- These limits define the range of operation for which the part will meet specification.
- Within the supply range of 4.75 and 5.25 volts, the device operates as a fully calibrated linear accelerometer. Beyond these supply limits the device may operate as a linear device but is not guaranteed to be in calibration.
- The device can measure both + and - acceleration. With no input acceleration the output is at mid-supply. For positive acceleration the output will increase above  $V_{DD}/2$  and for negative acceleration the output will decrease below  $V_{DD}/2$ .
- The device is calibrated at 20g.
- At clock frequency  $\approx 70$  kHz.
- The digital input pin has an internal pull-down current source to prevent inadvertent self test initiation due to external board level leakages.
- Time for the output to reach 90% of its final value after a self-test is initiated.
- The Status pin output is not valid following power-up until at least one rising edge has been applied to the self-test pin. The Status pin is high whenever the self-test input is high, as a means to check the connectivity of the self-test and Status pins in the application.
- The Status pin output latches high if a Low Voltage Detection or Clock Frequency failure occurs, or the EPROM parity changes to odd. The Status pin can be reset low if the self-test pin is pulsed with a high input for at least 100  $\mu\text{s}$ , unless a fault condition continues to exist.
- Time for amplifiers to recover after an acceleration signal causing them to saturate
- Preserves phase margin (60 $^{\circ}$ ) to guarantee output amplifier stability.
- A measure of the device's ability to reject an acceleration applied 90 $^{\circ}$  from the true axis of sensitivity.

## PRINCIPLE OF OPERATION

The Freescale Semiconductor, Inc. accelerometer is a surface-micromachined integrated-circuit accelerometer.

The device consists of a surface micromachined capacitive sensing cell (g-cell) and a CMOS signal conditioning ASIC contained in a single integrated circuit package. The sensing element is sealed hermetically at the wafer level using a bulk micromachined “cap” wafer.

The g-cell is a mechanical structure formed from semiconductor materials (polysilicon) using semiconductor processes (masking and etching). It can be modeled as a set of beams attached to a movable central mass that move between fixed beams. The movable beams can be deflected from their rest position by subjecting the system to an acceleration (Figure 3).

As the beams attached to the central mass move, the distance from them to the fixed beams on one side will increase by the same amount that the distance to the fixed beams on the other side decreases. The change in distance is a measure of acceleration.

The g-cell beams form two back-to-back capacitors (Figure 3). As the central mass moves with acceleration, the distance between the beams change and each capacitor's value will change, ( $C = NA\epsilon/D$ ). Where A is the area of the facing side of the beam,  $\epsilon$  is the dielectric constant, D is the

distance between the beams, and N is the number of beams. The X-Y device contains two structures at right angles to each other.

The CMOS ASIC uses switched capacitor techniques to measure the g-cell capacitors and extract the acceleration data from the difference between the two capacitors. The ASIC also signal conditions and filters (switched capacitor) the signal, providing a high level output voltage that is ratiometric and proportional to acceleration.

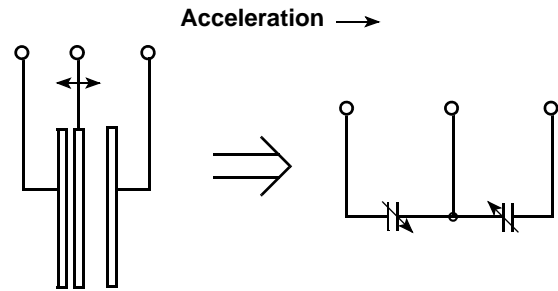


Figure 3. Simplified Transducer Physical Model

## SPECIAL FEATURES

### Filtering

The Freescale Semiconductor, Inc. accelerometers contain an onboard 4-pole switched capacitor filter. A Bessel implementation is used because it provides a maximally flat delay response (linear phase) thus preserving pulse shape integrity. Because the filter is realized using switched capacitor techniques, there is no requirement for external passive components (resistors and capacitors) to set the cut-off frequency.

### Self-Test

The sensor provides a self-test feature that allows the verification of the mechanical and electrical integrity of the accelerometer at any time before or after installation. This feature is critical in applications such as automotive airbag systems where system integrity must be ensured over the life of the vehicle. A fourth “plate” is used in the g-cell as a self-test plate. When the user applies a logic high input to the self-test pin, a calibrated potential is applied across the self-test plate and the moveable plate. The resulting electrostatic force ( $F_e = 1/2 AV^2/d^2$ ) causes the center plate to deflect. The resultant deflection is measured by the accelerometer's control ASIC and a proportional output voltage results. This procedure assures that both the mechanical (g-cell) and electronic sections of the accelerometer are functioning.

### Ratiometricity

Ratiometricity simply means that the output offset voltage and sensitivity will scale linearly with applied supply voltage. That is, as you increase supply voltage the sensitivity and offset increase linearly; as supply voltage decreases, offset and sensitivity decrease linearly. This is a key feature when interfacing to a microcontroller or an A/D converter because it provides system level cancellation of supply induced errors in the analog to digital conversion process.

### Status

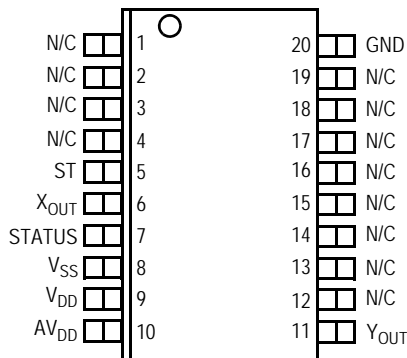
Freescale accelerometers include fault detection circuitry and a fault latch. The Status pin is an output from the fault latch, OR'd with self-test, and is set high whenever one (or more) of the following events occur:

- Supply voltage falls below the Low Voltage Detect (LVD) voltage threshold
- Clock oscillator falls below the clock monitor minimum frequency
- Parity of the EPROM bits becomes odd in number.

The fault latch can be reset by a rising edge on the self-test input pin, unless one (or more) of the fault conditions continues to exist.

## BASIC CONNECTIONS

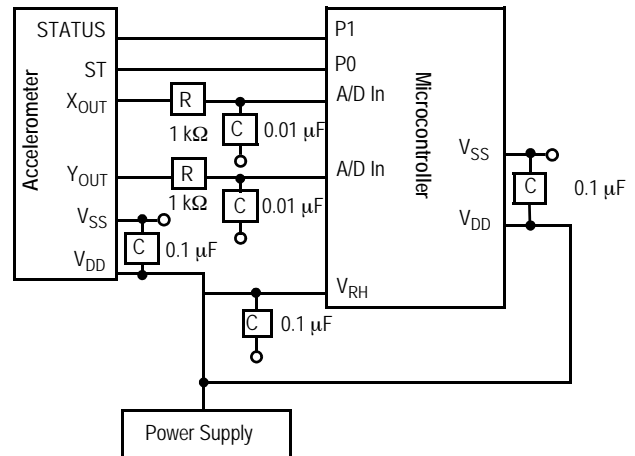
### PINOUT DESCRIPTION



**Table 3. Pin Descriptions**

Pin No.	Pin Name	Description
1 thru 3	—	Leave unconnected.
4	—	No internal connection. Leave unconnected.
5	ST	Logic input pin used to initiate self-test.
6	X <sub>OUT</sub>	Output voltage of the accelerometer. X Direction.
7	STATUS	Logic output pin to indicate fault.
8	V <sub>SS</sub>	The power supply ground.
9	V <sub>DD</sub>	The power supply input.
10	AV <sub>DD</sub>	Power supply input (Analog).
11	Y <sub>OUT</sub>	Output voltage of the accelerometer. Y Direction.
12 thru 16	—	Used for factory trim. Leave unconnected.
17 thru 19	—	No internal connection. Leave unconnected.
20	GND	Ground.

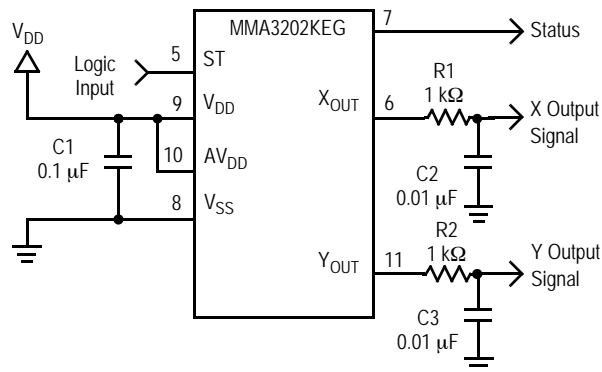
### PCB Layout



**Figure 5. Recommended PCB Layout for Interfacing Accelerometer to Microcontroller**

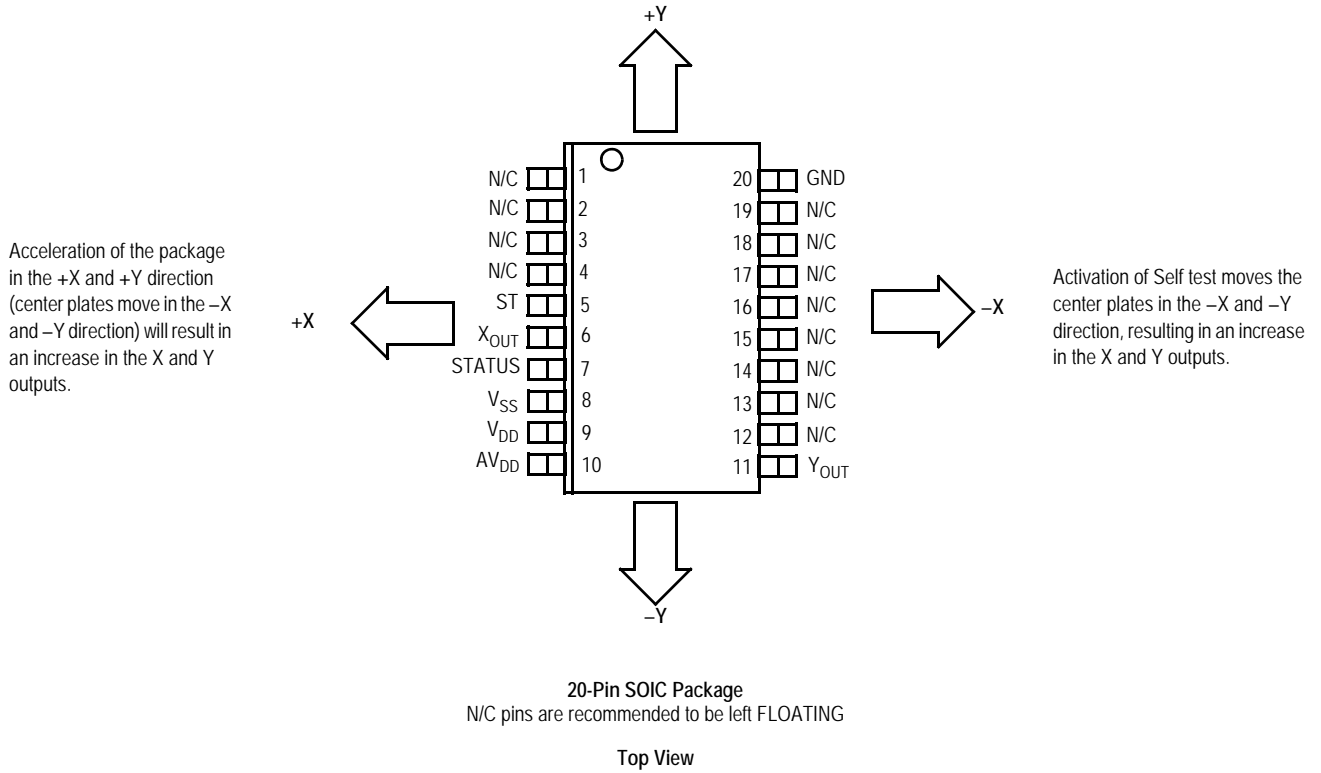
**NOTE:**

- Use a 0.1  $\mu\text{F}$  capacitor on V<sub>DD</sub> to decouple the power source.
- Physical coupling distance of the accelerometer to the microcontroller should be minimal.
- Place a ground plane beneath the accelerometer to reduce noise, the ground plane should be attached to all of the open ended terminals shown in [Figure 5](#).
- Use an RC filter of 1 k $\Omega$  and 0.01  $\mu\text{F}$  on the output of the accelerometer to minimize clock noise (from the switched capacitor filter circuit).
- PCB layout of power and ground should not couple power supply noise.
- Accelerometer and microcontroller should not be a high current path.
- A/D sampling rate and any external power supply switching frequency should be selected such that they do not interfere with the internal accelerometer sampling frequency. This will prevent aliasing errors.

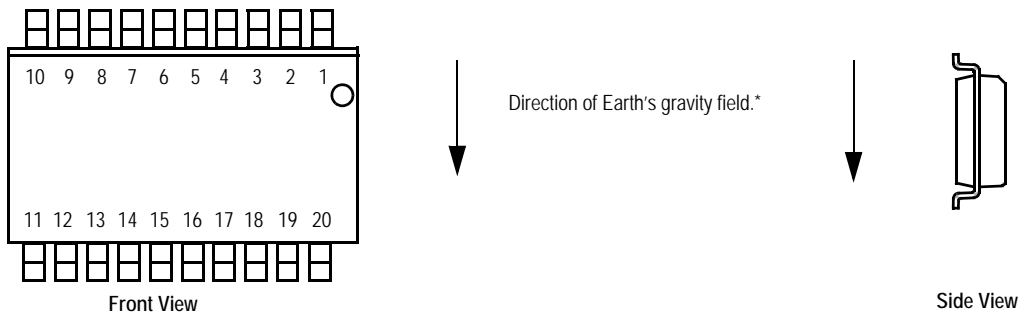


**Figure 4. SOIC Accelerometer with Recommended Connection Diagram**

### Dynamic Acceleration Sensing Direction



### Static Acceleration Sensing Direction



\* When positioned as shown, the Earth's gravity will result in a positive 1g output in the X channel.

## MINIMUM RECOMMENDED FOOTPRINT FOR SURFACE MOUNTED APPLICATIONS

Surface mount board layout is a critical portion of the total design. The footprint for the surface mount packages must be the correct size to ensure proper solder connection interface between the board and the package. With the correct

footprint, the packages will self-align when subjected to a solder reflow process. It is always recommended to design boards with a solder mask layer to avoid bridging and shorting between solder pads.

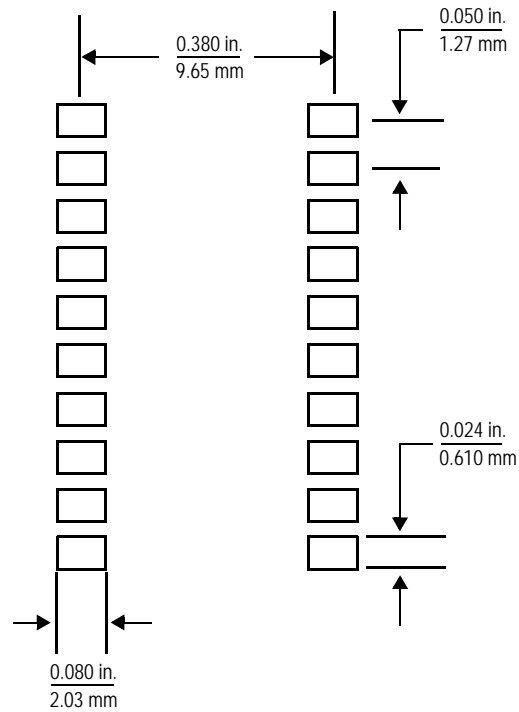
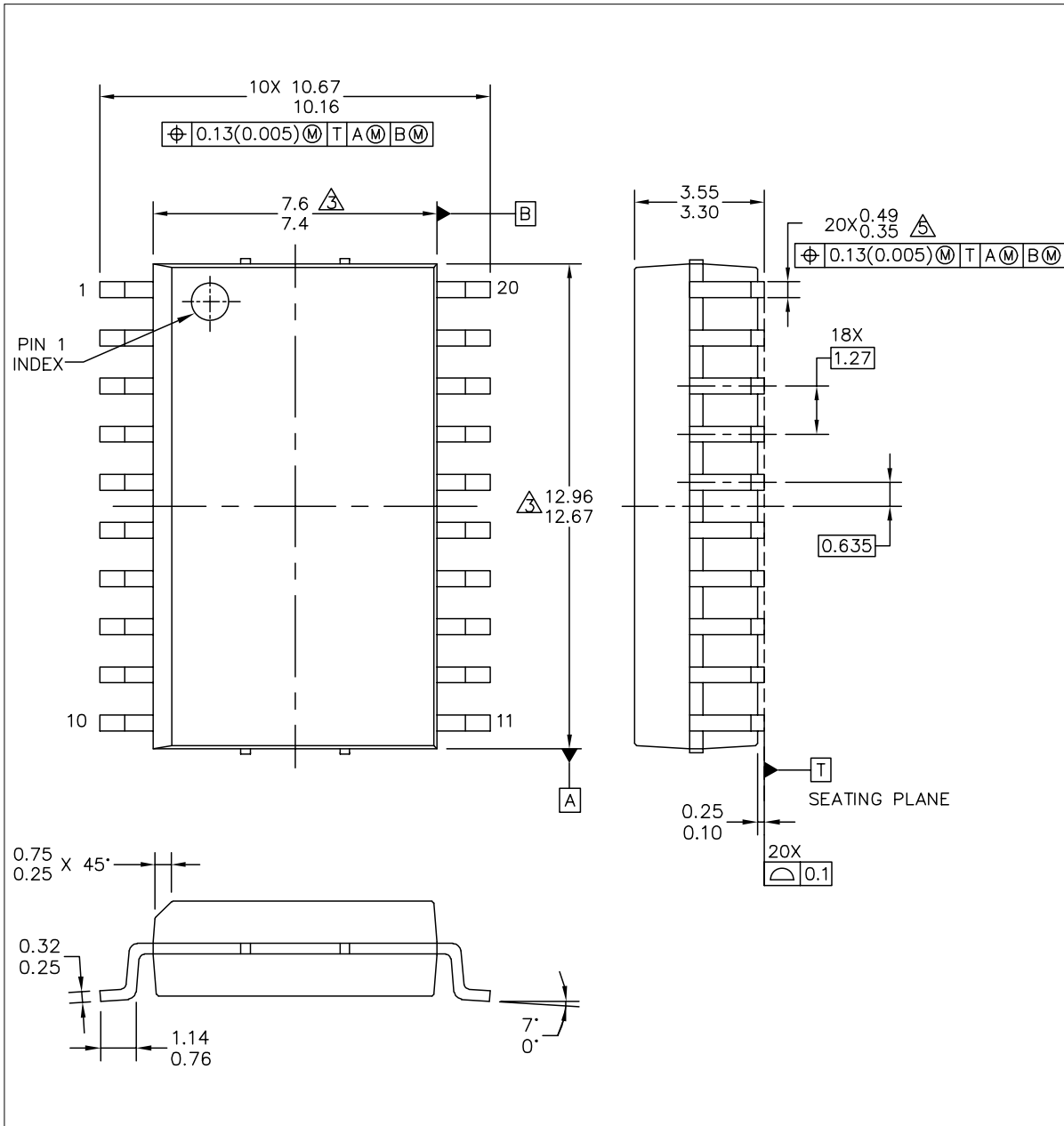


Figure 6. Footprint SOIC-20 (Case 475A-02)

# PACKAGE DIMENSIONS



© FREESCALE SEMICONDUCTOR, INC. ALL RIGHTS RESERVED.	<b>MECHANICAL OUTLINE</b>	PRINT VERSION NOT TO SCALE	
TITLE: 20LD SOIC W/B, 1.27 PITCH 7.5 X 12.8, ACCLEROMETER CASE-OUTLINE	DOCUMENT NO: 98ASB17933C	REV: C	
	CASE NUMBER: 475A-02	06 JUL 2006	
	STANDARD: NON-JEDEC		

**CASE 475A-02  
ISSUE C  
20-LEAD SOIC**

## PACKAGE DIMENSIONS

NOTES:

1. DIMENSIONING AND TOLERANCING PER ASME Y14.5M-1994.
2. DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS.

③ THIS DIMENSION DO NOT INCLUDE MOLD PROTRUSION.

4. MAXIMUM MOLD PROTRUSION 0.15(0.006) PER SIDE.

⑤ THIS DIMENSION DOES NOT INCLUDE DAM BAR PROTRUSION ALLOWABLE DAM BAR PROTRUSION SHALL BE 0.13(0.005) TOTAL IN EXCESS OF THIS DIMENSION AT MAXIMUM MATERIAL CONDITION.

© FREESCALE SEMICONDUCTOR, INC. ALL RIGHTS RESERVED.	<b>MECHANICAL OUTLINE</b>	PRINT VERSION NOT TO SCALE	
TITLE: 20LD SOIC W/B, 1.27 PITCH 7.5 X 12.8, ACCLEROMETER CASE-OUTLINE	DOCUMENT NO: 98ASB17933C	REV: C	
	CASE NUMBER: 475A-02	06 JUL 2006	
	STANDARD: NON-JEDEC		

PAGE 2 OF 2

**CASE 475A-02**  
**ISSUE C**  
**20-LEAD SOIC**

**MMA3202KEG**

## How to Reach Us:

### Home Page:

[www.freescale.com](http://www.freescale.com)

### Web Support:

<http://www.freescale.com/support>

### USA/Europe or Locations Not Listed:

Freescale Semiconductor, Inc.  
Technical Information Center, EL516  
2100 East Elliot Road  
Tempe, Arizona 85284  
1-800-521-6274 or +1-480-768-2130  
[www.freescale.com/support](http://www.freescale.com/support)

### Europe, Middle East, and Africa:

Freescale Halbleiter Deutschland GmbH  
Technical Information Center  
Schatzbogen 7  
81829 Muenchen, Germany  
+44 1296 380 456 (English)  
+46 8 52200080 (English)  
+49 89 92103 559 (German)  
+33 1 69 35 48 48 (French)  
[www.freescale.com/support](http://www.freescale.com/support)

### Japan:

Freescale Semiconductor Japan Ltd.  
Headquarters  
ARCO Tower 15F  
1-8-1, Shimo-Meguro, Meguro-ku,  
Tokyo 153-0064  
Japan  
0120 191014 or +81 3 5437 9125  
[support.japan@freescale.com](mailto:support.japan@freescale.com)

### Asia/Pacific:

Freescale Semiconductor China Ltd.  
Exchange Building 23F  
No. 118 Jianguo Road  
Chaoyang District  
Beijing 100022  
China  
+86 10 5879 8000  
[support.asia@freescale.com](mailto:support.asia@freescale.com)

### For Literature Requests Only:

Freescale Semiconductor Literature Distribution Center  
1-800-441-2447 or +1-303-675-2140  
Fax: +1-303-675-2150  
[LDCForFreescaleSemiconductor@hibbertgroup.com](mailto:LDCForFreescaleSemiconductor@hibbertgroup.com)

Information in this document is provided solely to enable system and software implementers to use Freescale Semiconductor products. There are no express or implied copyright licenses granted hereunder to design or fabricate any integrated circuits or integrated circuits based on the information in this document.

Freescale Semiconductor reserves the right to make changes without further notice to any products herein. Freescale Semiconductor makes no warranty, representation or guarantee regarding the suitability of its products for any particular purpose, nor does Freescale Semiconductor assume any liability arising out of the application or use of any product or circuit, and specifically disclaims any and all liability, including without limitation consequential or incidental damages. "Typical" parameters that may be provided in Freescale Semiconductor data sheets and/or specifications can and do vary in different applications and actual performance may vary over time. All operating parameters, including "Typicals", must be validated for each customer application by customer's technical experts. Freescale Semiconductor does not convey any license under its patent rights nor the rights of others. Freescale Semiconductor products are not designed, intended, or authorized for use as components in systems intended for surgical implant into the body, or other applications intended to support or sustain life, or for any other application in which the failure of the Freescale Semiconductor product could create a situation where personal injury or death may occur. Should Buyer purchase or use Freescale Semiconductor products for any such unintended or unauthorized application, Buyer shall indemnify and hold Freescale Semiconductor and its officers, employees, subsidiaries, affiliates, and distributors harmless against all claims, costs, damages, and expenses, and reasonable attorney fees arising out of, directly or indirectly, any claim of personal injury or death associated with such unintended or unauthorized use, even if such claim alleges that Freescale Semiconductor was negligent regarding the design or manufacture of the part.

Freescale™ and the Freescale logo are trademarks of Freescale Semiconductor, Inc. All other product or service names are the property of their respective owners.

© Freescale Semiconductor, Inc. 2009. All rights reserved.

RoHS-compliant and/or Pb-free versions of Freescale products have the functionality and electrical characteristics of their non-RoHS-compliant and/or non-Pb-free counterparts. For further information, see <http://www.freescale.com> or contact your Freescale sales representative.

For information on Freescale's Environmental Products program, go to <http://www.freescale.com/epp>.

# Anexo 7



# Low G Micromachined Accelerometer

The MMA series of silicon capacitive, micromachined accelerometers feature signal conditioning, a 2-pole low pass filter and temperature compensation. Zero-g offset full scale span and filter cut-off are factory set and require no external devices. A full system self-test capability verifies system functionality.

## Features

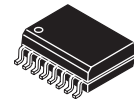
- Integral Signal Conditioning
- Linear Output
- 2nd Order Bessel Filter
- Calibrated Self-test
- EPROM Parity Check Status
- Transducer Hermetically Sealed at Wafer Level for Superior Reliability
- Robust Design, High Shock Survivability

## Typical Applications

- Vibration Monitoring and Recording
- Appliance Control
- Mechanical Bearing Monitoring
- Computer Hard Drive Protection
- Computer Mouse and Joysticks
- Virtual Reality Input Devices
- Sports Diagnostic Devices and Systems

## MMA1260EG

**MMA1260EG: Z AXIS SENSITIVITY  
 MICROMACHINED  
 ACCELEROMETER  
 ±1.5g**



**EG SUFFIX (Pb-FREE)  
 16-LEAD SOIC  
 CASE 475-01**

## ORDERING INFORMATION

Device Name	Temperature Range	Case No.	Package
MMA1260EG	-40° to 105°C	475-01	SOIC-16
MMA1260EGR2	-40° to 105°C	475-01	SOIC-16 Tape & Reel

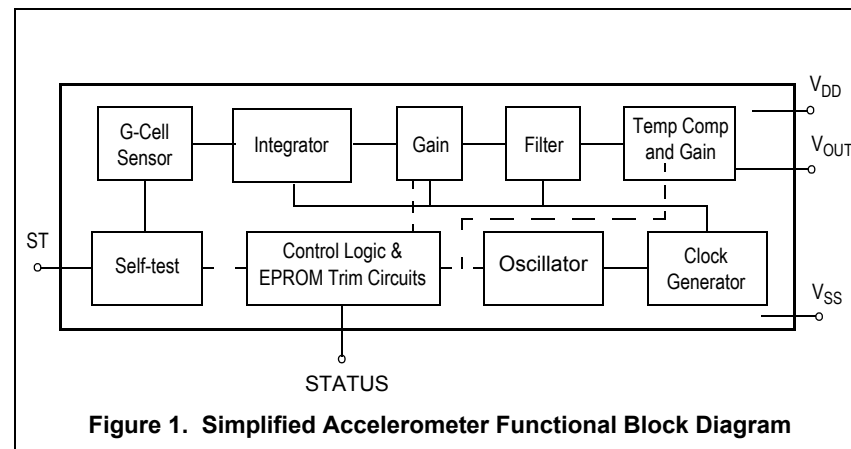


Figure 1. Simplified Accelerometer Functional Block Diagram

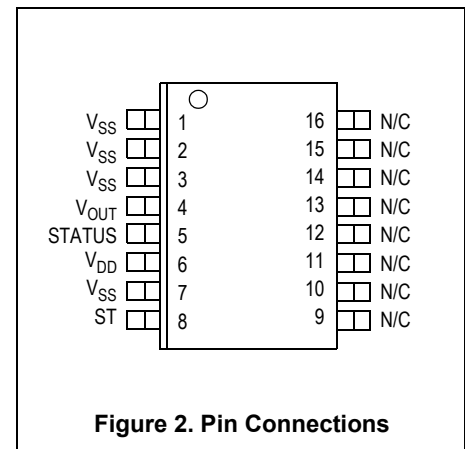


Figure 2. Pin Connections

**Table 1. Maximum Ratings**

(Maximum ratings are the limits to which the device can be exposed without causing permanent damage.)

Rating	Symbol	Value	Unit
Powered Acceleration (all axes)	$G_{pd}$	1500	g
Unpowered Acceleration (all axes)	$G_{upd}$	2000	g
Supply Voltage	$V_{DD}$	-0.3 to +7.0	V
Drop Test <sup>(1)</sup>	$D_{drop}$	1.2	m
Storage Temperature Range	$T_{stg}$	-40 to +125	°C

1. Dropped onto concrete surface from any axis.

### ELECTRO STATIC DISCHARGE (ESD)

**WARNING: This device is sensitive to electrostatic discharge.**

Although the Freescale accelerometers contain internal 2 kV ESD protection circuitry, extra precaution must be taken by the user to protect the chip from ESD. A charge of over 2000 volts can accumulate on the human body or associated test equipment. A charge of this magnitude can alter the

performance or cause failure of the chip. When handling the accelerometer, proper ESD precautions should be followed to avoid exposing the device to discharges which may be detrimental to its performance.

**Table 2. Operating Characteristics**(Unless otherwise noted:  $-40^{\circ}\text{C} \leq T_A \leq +105^{\circ}\text{C}$ ,  $4.75 \leq V_{DD} \leq 5.25$ , Acceleration = 0g, Loaded output.<sup>(1)</sup>)

Characteristic	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Operating Range <sup>(2)</sup>					
Supply Voltage <sup>(3)</sup>	$V_{DD}$	4.75	5.00	5.25	V
Supply Current	$I_{DD}$	1.1	2.2	3.2	mA
Operating Temperature Range	$T_A$	-40	—	+105	$^{\circ}\text{C}$
Acceleration Range	$g_{FS}$	—	1.55	—	g
Output Signal					
Zero g ( $T_A = 25^{\circ}\text{C}$ , $V_{DD} = 5.0\text{ V}$ ) <sup>(4)</sup>	$V_{OFF}$	2.25	2.5	2.75	V
Zero g ( $V_{DD} = 5.0\text{ V}$ )	$V_{OFF}$	2.2	2.5	2.8	V
Sensitivity ( $T_A = 25^{\circ}\text{C}$ , $V_{DD} = 5.0\text{ V}$ ) <sup>(5)</sup>	S	1140	1200	1260	mV/g
Sensitivity ( $V_{DD} = 5.0\text{ V}$ )	S	1110	1200	1290	mV/g
Bandwidth Response	$f_{-3dB}$	40	50	60	Hz
Nonlinearity	$NL_{OUT}$	-1.0	—	+1.0	% FSO
Noise					
RMS (0.1 Hz – 1.0 kHz)	$n_{RMS}$	—	5.0	9.0	mVrms
Spectral Density (RMS, 0.1 Hz – 1.0 kHz) <sup>(6)</sup>	$n_{SD}$	—	500	—	$\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$
Self-Test					
Output Response ( $V_{DD} = 5.0\text{ V}$ )	$\Delta V_{ST}$	0.3	0.6	0.9	V
Input Low	$V_{IL}$	$V_{SS}$	—	$0.3 V_{DD}$	V
Input High	$V_{IH}$	$0.7 V_{DD}$	—	$V_{DD}$	V
Input Loading <sup>(7)</sup>	$I_{IN}$	-300	-125	-50	$\mu\text{A}$
Response Time <sup>(8)</sup>	$t_{ST}$	—	10	25	ms
Status <sup>(9), (10)</sup>					
Output Low ( $I_{load} = 100\ \mu\text{A}$ )	$V_{OL}$	—	—	0.4	V
Output High ( $I_{load} = 100\ \mu\text{A}$ )	$V_{OH}$	$V_{DD} - 0.8$	—	—	V
Output Stage Performance					
Electrical Saturation Recovery Time <sup>(11)</sup>	$t_{DELAY}$	—	—	2.0	ms
Full Scale Output Range ( $I_{OUT} = 200\ \mu\text{A}$ )	$V_{FSO}$	$V_{SS} + 0.25$	—	$V_{DD} - 0.25$	V
Capacitive Load Drive <sup>(12)</sup>	$C_L$	—	—	100	pF
Output Impedance	$Z_O$	—	50	—	$\Omega$
Mechanical Characteristics					
Transverse Sensitivity <sup>(13)</sup>	$V_{XZ,YZ}$	—	—	5.0	% FSO

- For a loaded output the measurements are observed after an RC filter consisting of a 1 k $\Omega$  resistor and a 0.1  $\mu\text{F}$  capacitor to ground.
- These limits define the range of operation for which the part will meet specification.
- Within the supply range of 4.75 and 5.25 volts, the device operates as a fully calibrated linear accelerometer. Beyond these supply limits the device may operate as a linear device but is not guaranteed to be in calibration.
- The device can measure both + and - acceleration. With no input acceleration the output is at midsupply. For positive acceleration the output will increase above  $V_{DD}/2$  and for negative acceleration the output will decrease below  $V_{DD}/2$ .
- The device is calibrated at 1g. Sensitivity limits apply to 0Hz acceleration.
- At clock frequency  $\approx 70\text{ kHz}$ .
- The digital input pin has an internal pull-down current source to prevent inadvertent self test initiation due to external board level leakages.
- Time for the output to reach 90% of its final value after a self-test is initiated.
- The Status pin output is not valid following power-up until at least one rising edge has been applied to the self-test pin. The Status pin is high whenever the self-test input is high, as a means to check the connectivity of the self-test and Status pins in the application.
- The Status pin output latches high if a Low Voltage Detection or Clock Frequency failure occurs, or the EPROM parity changes to odd. The Status pin can be reset low if the self-test pin is pulsed with a high input for at least 100  $\mu\text{s}$ , unless a fault condition continues to exist.
- Time for amplifiers to recover after an acceleration signal causes them to saturate.
- Preserves phase margin (60 $^{\circ}$ ) to guarantee output amplifier stability.
- A measure of the device's ability to reject an acceleration applied 90 $^{\circ}$  from the true axis of sensitivity.

## PRINCIPLE OF OPERATION

The Freescale accelerometer is a surface-micromachined integrated-circuit accelerometer.

The device consists of a surface micromachined capacitive sensing cell (g-cell) and a CMOS signal conditioning ASIC contained in a single integrated circuit package. The sensing element is sealed hermetically at the wafer level using a bulk micromachined “cap” wafer.

The g-cell is a mechanical structure formed from semiconductor materials (polysilicon) using semiconductor processes (masking and etching). It can be modeled as two stationary plates with a moveable plate in-between. The center plate can be deflected from its rest position by subjecting the system to an acceleration (Figure 3).

When the center plate deflects, the distance from it to one fixed plate will increase by the same amount that the distance to the other plate decreases. The change in distance is a measure of acceleration.

The g-cell plates form two back-to-back capacitors (Figure 4). As the center plate moves with acceleration, the distance between the plates changes and each capacitor's value will change, ( $C = A\epsilon/D$ ). Where A is the area of the plate,  $\epsilon$  is the dielectric constant, and D is the distance between the plates.

The CMOS ASIC uses switched capacitor techniques to measure the g-cell capacitors and extract the acceleration data from the difference between the two capacitors. The ASIC also signal conditions and filters (switched capacitor) the signal, providing a high level output voltage that is ratiometric and proportional to acceleration.

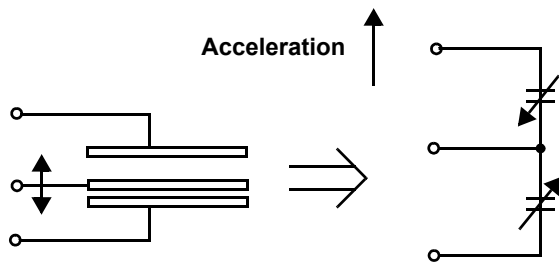


Figure 3. Transducer Physical Model

Figure 4. Equivalent Circuit Model

## SPECIAL FEATURES

### Filtering

The Freescale accelerometers contain an onboard 2-pole switched capacitor filter. A Bessel implementation is used because it provides a maximally flat delay response (linear phase) thus preserving pulse shape integrity. Because the filter is realized using switched capacitor techniques, there is no requirement for external passive components (resistors and capacitors) to set the cut-off frequency.

### Self-Test

The sensor provides a self-test feature that allows the verification of the mechanical and electrical integrity of the accelerometer at any time before or after installation. This feature is critical in applications such as automotive airbag systems where system integrity must be ensured over the life of the vehicle. A fourth “plate” is used in the g-cell as a self-test plate. When the user applies a logic high input to the self-test pin, a calibrated potential is applied across the self-test plate and the moveable plate. The resulting electrostatic force ( $F_e = 1/2 AV^2/d^2$ ) causes the center plate to deflect. The resultant deflection is measured by the accelerometer's control ASIC and a proportional output voltage results. This procedure assures that both the mechanical (g-cell) and electronic sections of the accelerometer are functioning.

### Status

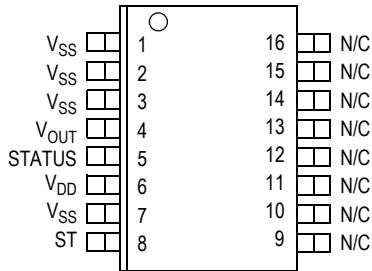
Freescale accelerometers include fault detection circuitry and a fault latch. The Status pin is an output from the fault latch, OR'd with self-test, and is set high whenever the following event occurs:

- Parity of the EPROM bits becomes odd in number.

The fault latch can be reset by a rising edge on the self-test input pin, unless one (or more) of the fault conditions continues to exist.

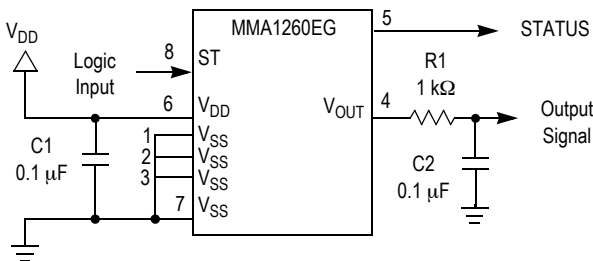
## BASIC CONNECTIONS

### Pinout Description



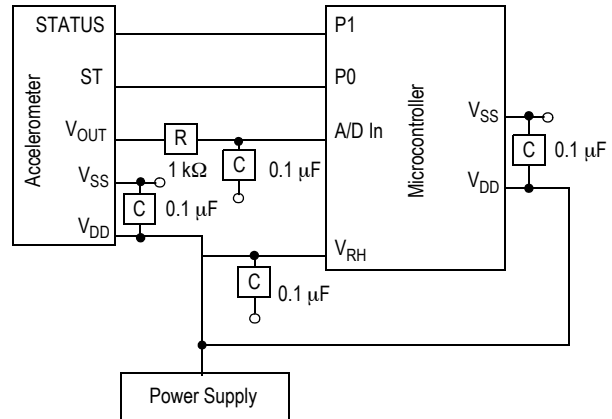
**Table 3. Pin Descriptions**

Pin No.	Pin Name	Description
1 thru 3	V <sub>SS</sub>	Redundant connections to the internal V <sub>SS</sub> and may be left unconnected.
4	V <sub>OUT</sub>	Output voltage of the accelerometer.
5	STATUS	Logic output pin to indicate fault.
6	V <sub>DD</sub>	The power supply input.
7	V <sub>SS</sub>	The power supply ground.
8	ST	Logic input pin used to initiate self-test.
9 thru 13	Trim pins	Used for factory trim. Leave unconnected.
14 thru 16	—	No internal connection. Leave unconnected.



**Figure 5. SOIC Accelerometer with Recommended Connection Diagram**

### PCB Layout



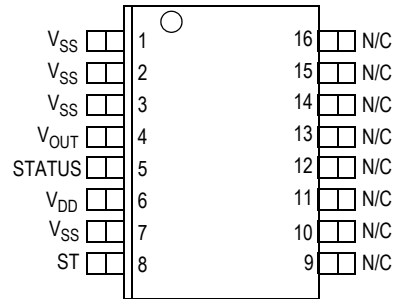
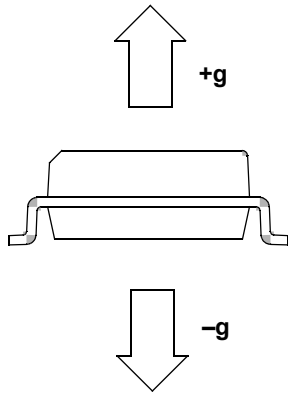
**Figure 6. Recommended PCB Layout for Interfacing Accelerometer to Microcontroller**

### NOTES:

1. Use a 0.1 μF capacitor on V<sub>DD</sub> to decouple the power source.
2. Physical coupling distance of the accelerometer to the microcontroller should be minimal.
3. Place a ground plane beneath the accelerometer to reduce noise, the ground plane should be attached to all of the open ended terminals shown in [Figure 6](#).
4. Use an RC filter of 1 kΩ and 0.1 μF on the output of the accelerometer to minimize clock noise (from the switched capacitor filter circuit).
5. PCB layout of power and ground should not couple power supply noise.
6. Accelerometer and microcontroller should not be a high current path.
7. A/D sampling rate and any external power supply switching frequency should be selected such that they do not interfere with the internal accelerometer sampling frequency. This will prevent aliasing errors.

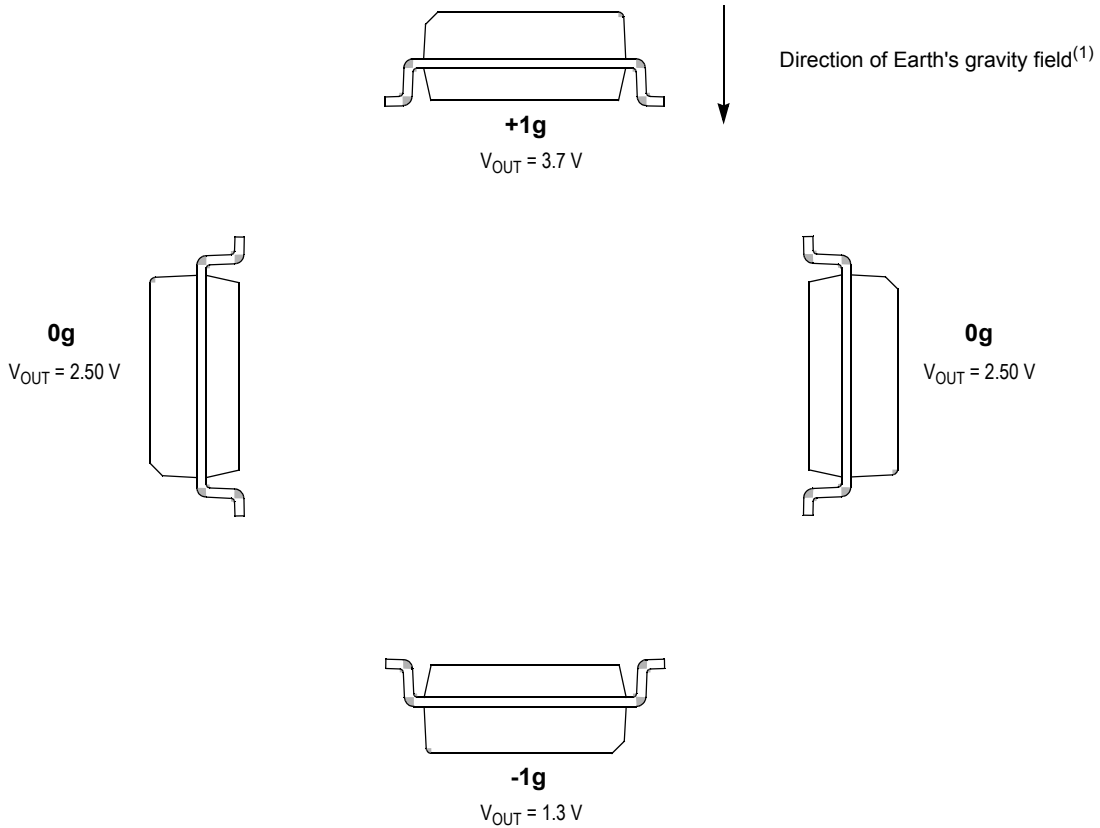
## ACCELERATION SENSING DIRECTIONS

### DYNAMIC ACCELERATION



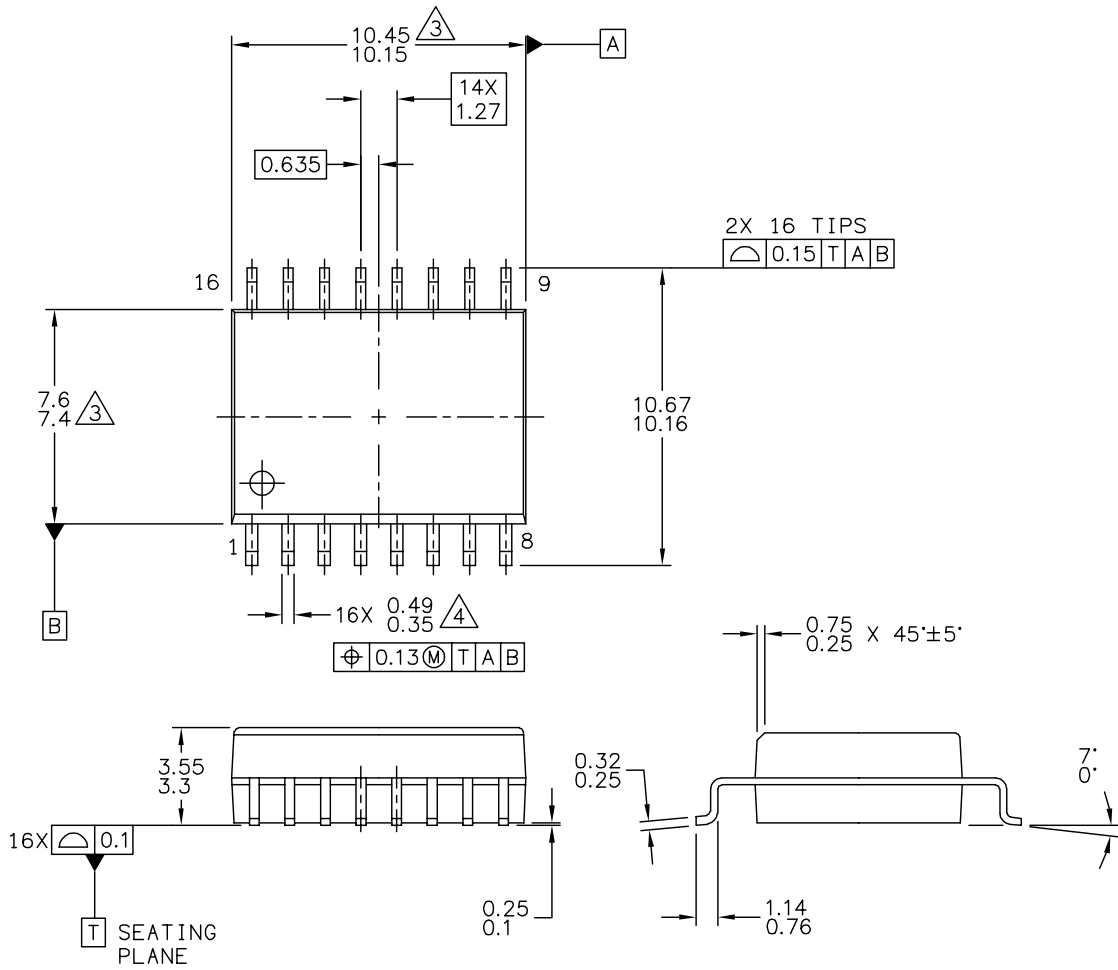
16-Pin SOIC Package  
N/C pins are recommended to be left FLOATING

### STATIC ACCELERATION



1. When positioned as shown, the Earth's gravity will result in a positive 1g output

# PACKAGE DIMENSIONS



© FREESCALE SEMICONDUCTOR, INC. ALL RIGHTS RESERVED.	<b>MECHANICAL OUTLINE</b>	PRINT VERSION NOT TO SCALE	
TITLE: 16 LEAD SOIC ACCELEROMETER	DOCUMENT NO: 98ASB16926C	REV: C	
	CASE NUMBER: 475-01	17 MAR 2005	
	STANDARD: NON-JEDEC		

PAGE 1 OF 2

**CASE 475-01  
ISSUE C  
16 LEAD SOIC**

**MMA1260EG**

## PACKAGE DIMENSIONS

### NOTES:

1. ALL DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS.

2. INTERPRET DIMENSIONS AND TOLERANCES PER ASME Y14.5M-1994.

3. THESE DIMENSIONS DO NOT INCLUDE MOLD FLASH OR PROTRUSIONS. MOLD FLASH OR PROTRUSIONS SHALL NOT EXCEED 0.15 PER SIDE.

4. THIS DIMENSION DOES NOT INCLUDE DAMBAR PROTRUSION. PROTRUSIONS SHALL NOT CAUSE THE LEAD WIDTH TO EXCEED 0.75

© FREESCALE SEMICONDUCTOR, INC. ALL RIGHTS RESERVED.	<b>MECHANICAL OUTLINE</b>	PRINT VERSION NOT TO SCALE	
TITLE: 16 LEAD SOIC ACCELEROMETER	DOCUMENT NO: 98ASB16926C	REV: C	
	CASE NUMBER: 475-01	17 MAR 2005	
	STANDARD: NON-JEDEC		

PAGE 2 OF 2

**CASE 475-01  
ISSUE C  
16 LEAD SOIC**

**MMA1260EG**

## **How to Reach Us:**

### **Home Page:**

[www.freescale.com](http://www.freescale.com)

### **Web Support:**

<http://www.freescale.com/support>

### **USA/Europe or Locations Not Listed:**

Freescale Semiconductor, Inc.  
Technical Information Center, EL516  
2100 East Elliot Road  
Tempe, Arizona 85284  
+1-800-521-6274 or +1-480-768-2130  
[www.freescale.com/support](http://www.freescale.com/support)

### **Europe, Middle East, and Africa:**

Freescale Halbleiter Deutschland GmbH  
Technical Information Center  
Schatzbogen 7  
81829 Muenchen, Germany  
+44 1296 380 456 (English)  
+46 8 52200080 (English)  
+49 89 92103 559 (German)  
+33 1 69 35 48 48 (French)  
[www.freescale.com/support](http://www.freescale.com/support)

### **Japan:**

Freescale Semiconductor Japan Ltd.  
Headquarters  
ARCO Tower 15F  
1-8-1, Shimo-Meguro, Meguro-ku,  
Tokyo 153-0064  
Japan  
0120 191014 or +81 3 5437 9125  
[support.japan@freescale.com](mailto:support.japan@freescale.com)

### **Asia/Pacific:**

Freescale Semiconductor Hong Kong Ltd.  
Technical Information Center  
2 Dai King Street  
Tai Po Industrial Estate  
Tai Po, N.T., Hong Kong  
+800 2666 8080  
[support.asia@freescale.com](mailto:support.asia@freescale.com)

### **For Literature Requests Only:**

Freescale Semiconductor Literature Distribution Center  
P.O. Box 5405  
Denver, Colorado 80217  
1-800-441-2447 or 303-675-2140  
Fax: 303-675-2150  
[LDCForFreescaleSemiconductor@hibbertgroup.com](mailto:LDCForFreescaleSemiconductor@hibbertgroup.com)

Information in this document is provided solely to enable system and software implementers to use Freescale Semiconductor products. There are no express or implied copyright licenses granted hereunder to design or fabricate any integrated circuits or integrated circuits based on the information in this document.

Freescale Semiconductor reserves the right to make changes without further notice to any products herein. Freescale Semiconductor makes no warranty, representation or guarantee regarding the suitability of its products for any particular purpose, nor does Freescale Semiconductor assume any liability arising out of the application or use of any product or circuit, and specifically disclaims any and all liability, including without limitation consequential or incidental damages. "Typical" parameters that may be provided in Freescale Semiconductor data sheets and/or specifications can and do vary in different applications and actual performance may vary over time. All operating parameters, including "Typicals", must be validated for each customer application by customer's technical experts. Freescale Semiconductor does not convey any license under its patent rights nor the rights of others. Freescale Semiconductor products are not designed, intended, or authorized for use as components in systems intended for surgical implant into the body, or other applications intended to support or sustain life, or for any other application in which the failure of the Freescale Semiconductor product could create a situation where personal injury or death may occur. Should Buyer purchase or use Freescale Semiconductor products for any such unintended or unauthorized application, Buyer shall indemnify and hold Freescale Semiconductor and its officers, employees, subsidiaries, affiliates, and distributors harmless against all claims, costs, damages, and expenses, and reasonable attorney fees arising out of, directly or indirectly, any claim of personal injury or death associated with such unintended or unauthorized use, even if such claim alleges that Freescale Semiconductor was negligent regarding the design or manufacture of the part.

Freescale™ and the Freescale logo are trademarks of Freescale Semiconductor, Inc. All other product or service names are the property of their respective owners.

© Freescale Semiconductor, Inc., 2007. All rights reserved.

RoHS-compliant and/or Pb-free versions of Freescale products have the functionality and electrical characteristics of their non-RoHS-compliant and/or non-Pb-free counterparts. For further information, see <http://www.freescale.com> or contact your Freescale sales representative.

For information on Freescale's Environmental Products program, go to <http://www.freescale.com/epp>.