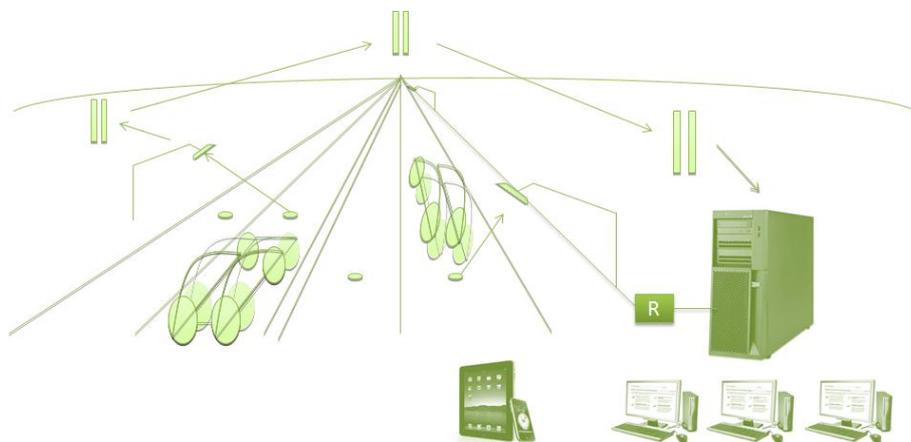


## INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA

Área Departamental de Engenharia de Electrónica e  
Telecomunicações e de Computadores



### SISTEMA DE CONTAGEM DE TRÁFEGO E CLASSIFICAÇÃO AUTOMÁTICA DE VEÍCULOS, EM TEMPO REAL E SEM FIOS

**PIERRE MICHEL HENRI GHISLAIN**  
(BACHAREL)

Trabalho final de Mestrado para Obtenção do Grau de  
Mestre em Engenharia de Electrónica e Telecomunicações

Vogal orientador:	Prof. António João Nunes Serrador
Vogal co-orientador:	Eng.º Duarte Miguel Fusco Carona
Presidente do Júri:	Prof. Mário Pereira Véstias
Vogal arguente:	Prof. Ezequiel Augusto Cachão Conde
Vogal arguente:	Eng.º Jorge Lopes

**Novembro 2011**

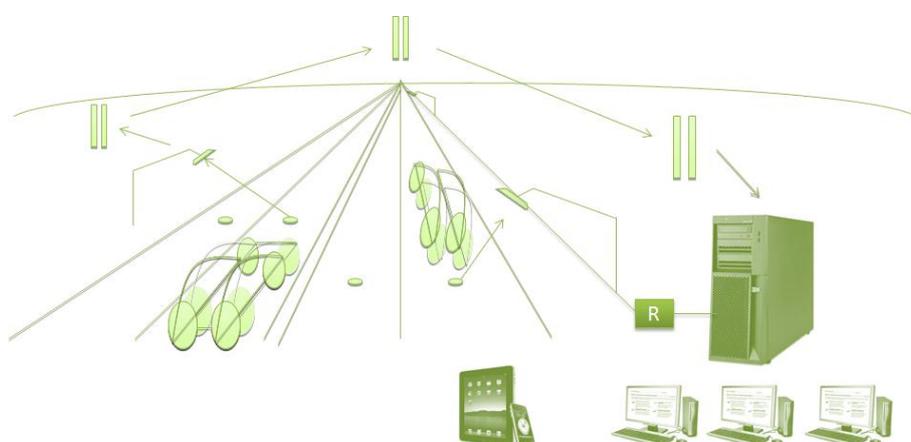




INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA  
SERVIÇO DE DOCUMENTAÇÃO E PUBLICAÇÕES

## INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA

Área Departamental de Engenharia de Electrónica e  
Telecomunicações e de Computadores



### SISTEMA DE CONTAGEM DE TRÁFEGO E CLASSIFICAÇÃO AUTOMÁTICA DE VEÍCULOS, EM TEMPO REAL E SEM FIOS

**PIERRE MICHEL HENRI GHISLAIN**  
(BACHAREL)

Trabalho final de Mestrado para Obtenção do Grau de  
Mestre em Engenharia de Electrónica e Telecomunicações

Vogal orientador:	Prof. António João Nunes Serrador
Vogal co-orientador:	Eng.º Duarte Miguel Fusco Carona
Presidente do Júri:	Prof. Mário Pereira Véstias
Vogal arguente:	Prof. Ezequiel Augusto Cachão Conde
Vogal arguente:	Eng.º Jorge Lopes

**Novembro 2011**



## Agradecimentos

Agradeço o seguimento semanal e o apoio do orientador desta tese, Prof. António Serrador.

Agradeço o apoio permanente do co-orientador desta tese, Eng.º Duarte Carona.

Agradeço o apoio prestado pelo representante da Brisa Inovação, Eng.º Jorge Lopes.

Agradeço aos meus colegas Mário Lopes, Filipe Palhinha e Pedro Ferreira pela disponibilidade e empatia no decorrer dos nossos testes e trabalhos em equipa.

Agradeço Dr. Paulo Silva e Eng.º Tec. Manuel Santos do apoio que me deram na revisão deste relatório.



## Resumo

Esta tese tem por objectivo o desenho e avaliação de um sistema de contagem e classificação de veículos automóveis em tempo-real e sem fios. Pretende, também, ser uma alternativa aos actuais equipamentos, muito intrusivos nas vias rodoviárias. Esta tese inclui um estudo sobre as comunicações sem fios adequadas a uma rede de equipamentos sensores rodoviários, um estudo sobre a utilização do campo magnético como meio físico de detecção e contagem de veículos e um estudo sobre a autonomia energética dos equipamentos inseridos na via, com recurso, entre outros, à energia solar. O projecto realizado no âmbito desta tese incorpora, entre outros, a digitalização em tempo real da assinatura magnética deixada pela passagem de um veículo, no campo magnético da Terra, o respectivo envio para servidor via rádio e WAN, *Wide Area Network*, e o desenvolvimento de *software* tendo por base a pilha de protocolos ZigBee. Foram desenvolvidas aplicações para o equipamento sensor, para o coordenador, para o painel de controlo e para a biblioteca de Interface de um futuro servidor aplicacional. O *software* desenvolvido para o equipamento sensor incorpora ciclos de detecção e digitalização, com pausas de adormecimento de baixo consumo, e a activação das comunicações rádio durante a fase de envio, assegurando assim uma estratégia de poupança energética. Os resultados obtidos confirmam a viabilidade desta tecnologia para a detecção e contagem de veículos, assim como para a captura de assinatura usando magnetoresistências. Permitiram ainda verificar o alcance das comunicações sem fios com equipamento sensor embebido no asfalto e confirmar o modelo de cálculo da superfície do painel solar bem como o modelo de consumo energético do equipamento sensor.

## Palavras-chave

Contagem e classificação de veículos, IEEE802.15.4, ZigBee, Magnetómetro, Sensor Inteligente Rodoviário.

## Abstract

The aim of this thesis is the design and evaluation of a vehicle counting and classification system, in real-time and over wireless communications, thus resolving the current problems of nowadays intrusive road sensors. The thesis covers the study of the wireless communications suitable for a network of road sensors, the magnetic field as a physical mean of vehicle detection and classification, and the study of energy autonomy for the equipment placed on the road, using, among others, solar energy. It is also the subject of study the real-time scanning of the magnetic signature left by a passing vehicle in the Earth's magnetic field and its radio transmission to a server. The development focused on the software, the ZigBee protocol *Stack* and the system on a chip cc2530. Applications have been built for the road sensor, the coordinator, the control panel and an interface library designed for a future application server. The software developed for the road sensor incorporates duty cycles for detection and digitalization, followed by low energy pauses, and activation of the radio communications only during the data transfer, thus ensuring an energy saving strategy. The results obtained confirm the possibility using this technology for vehicle detection, counting and signature capture using magneto-resistance. Also allowed verification of the range of wireless communications for the road sensor embedded in asphalt and confirms the models for calculating the surface of the solar panel and for the energy consumption of the road sensor.

## Keywords

Vehicle counting and classification, IEEE802.15.4, ZigBee, Magnetometer, Intelligent Road Sensor.

# Índice Geral

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	III
PALAVRAS-CHAVE	III
ABSTRACT	IV
KEYWORDS	IV
LISTA DE FIGURAS	VII
LISTA DE TABELAS	IX
ACRÓNIMOS	XI
<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
1.1 O PROBLEMA	1
1.2 OBJECTIVOS	2
1.3 MOTIVAÇÕES	2
1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	3
<b>2 ESTADO DA ARTE</b>	<b>5</b>
2.1 SOLUÇÕES EXISTENTES	5
2.2 COMUNICAÇÕES SEM FIOS DE BAIXO DÉBITO BINÁRIO	10
2.2.1 Faixa de frequência ISM	12
2.2.2 IEEE 802.15.4	13
2.2.3 ZigBee Alliance	13
2.2.4 6LoWPAN	15
2.2.5 IEEE 802.15.5	16
2.2.6 WirelessHART	16
2.2.7 ISA100.11a	16
2.2.8 Critérios de selecção	17
2.3 O MAGNETISMO PARA A DETECÇÃO DE VEÍCULOS	17
2.3.1 Tecnologia	17
2.3.2 Insígnia de barbeiro	19
2.3.3 Magnetoresistência anisotrópica	23
2.4 ALIMENTAÇÃO SOLAR	25
2.4.1 Modelo para o cálculo da superfície do painel solar	25
2.4.2 Determinação da potência mínima captável	26
<b>3 SOLUÇÃO</b>	<b>29</b>
3.1 ESQUEMA BLOCO DA SOLUÇÃO	29
3.2 ARQUITECTURA	30
3.2.1 Estimativa do consumo energético	33
3.2.2 Análise de desempenho: complexidade	34
3.2.3 Arquitectura $\mu P$ Mestre	35
3.3 COMPONENTES	37
3.3.1 Módulos ZigBee	37

3.3.2 Magnetómetro	42
3.3.3 Antena	44
3.3.4 Invólucro	46
3.4 MODELO DE CONSUMO ENERGÉTICO	47
3.4.1 Simulações	47
3.4.2 Consumo máximo	50
3.4.3 Dimensão do painel solar	50
3.4.4 Circuito de adaptação de voltagem de entrada	51
3.4.5 Acumulador	52
3.4.6 hipercondensador	53
3.4.7 Pilhas	54
<b>4 IMPLEMENTAÇÃO</b>	<b>57</b>
4.1 PROTOCOLO APLICACIONAL	57
4.2 ARQUITECTURA DE <i>FIRMWARE</i> DO CC2530	57
4.3 GESTÃO DE ENERGIA	59
4.4 ANÁLISE DO <i>FIRMWARE</i>	59
4.5 ALGORITMOS	61
<b>5 RESULTADOS</b>	<b>69</b>
5.1 MAGNETÓMETRO	69
5.2 TESTES DE COMUNICAÇÕES EM LINHA DE VISTA	72
5.3 INSERÇÃO NUM TUBO DEBAIXO DO ASFALTO	74
5.4 ATENUAÇÃO DE MATERIAIS UTILIZÁVEIS PARA A JANELA	75
5.5 ÂNGULO DE INCLINAÇÃO	76
5.6 CAPTURA DE ASSINATURAS	78
5.7 OCUPAÇÃO DO CANAL DE COMUNICAÇÕES	84
5.8 AUTONOMIA ENERGÉTICA	84
5.9 MELHORIAS PROPOSTAS	86
<b>6 CONCLUSÕES</b>	<b>95</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>101</b>
A. INFLUÊNCIA DA POSIÇÃO DO CAPTOR SOLAR	101
B. POTÊNCIA DE UM HIPERCONDENSADOR	104
D. PROTOCOLO APLICACIONAL	105
E. NORMA IEEE 802.15.4	108
<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>123</b>

## Lista de Figuras

FIG. 2-1 CONJUNTOS DIVERSOS DE EQ-SENSORES RODOVIÁRIOS E LIGAÇÕES	5
FIG. 2-2 EQ-SENSOR C/ MAGNETORESISTÊNCIAS 3 EIXOS, COMUNICAÇÕES SEM FIOS, ALIMENTADO P/ BATERIAS [12]	7
FIG. 2-3 EQ-SENSOR C/ MAGNETÓMETRO, COMUNICAÇÕES SEM FIOS, ALIMENTADO COM PAINEL SOLAR [13]	8
FIG. 2-4 EQ-SENSOR C/ MAGNETÓMETRO, COMUNICAÇÕES SEM FIOS, ALIMENTADO POR BATERIAS [14]	8
FIG. 2-5 EQ-SENSOR C/ VEHICLE MAGNETIC IMAGING, COMUNICAÇÕES SEM FIOS, ALIMENTADO POR BATERIAS [15]	9
FIG. 2-6 INSÍGNIA DE BARBEIRO.	20
FIG. 2-7 ORDENAÇÃO DOS DOMÍNIOS MAGNÉTICOS DOS FILMES DE <i>PERMALLOY</i> COM SET / RESET	24
FIG. 3-1 BLOCOS LÓGICOS DA SOLUÇÃO DO EQ-SENSOR	29
FIG. 3-2 ARQUITECTURA $\mu$ P MESTRE	36
FIG. 3-3 MODIFICAÇÃO DO CMT PELA PASSAGEM DE UM VEÍCULO [27]	43
FIG. 3-4 ANTENA COMPACTA FRACTAL DE ALTO RENDIMENTO [30]	44
FIG. 3-5 PLACA COM ADAPTAÇÃO DE IMPEDÂNCIA PARA A ANTENA [30]	45
FIG. 3-6 DIAGRAMAS DE RADIAÇÃO DO MÓDULO COM A ANTENA FRACTAL [31]	45
FIG. 3-7 REPRESENTAÇÃO CONCEPTUAL DO INVÓLUCRO DO EQ-SENSOR	46
FIG. 3-8 INFLUÊNCIA DO TRÁFEGO NO CONSUMO	48
FIG. 3-9 INFLUÊNCIA DA DIMENSÃO DO VEÍCULO NO CONSUMO	49
FIG. 3-10 INFLUÊNCIA DO NÚMERO DE AMOSTRAS E DA VELOCIDADE NO CONSUMO	50
FIG. 3-11 CURVA DE POTÊNCIA DE SAÍDA DE UMA CÉLULA SOLAR	51
FIG. 3-12 BLOCO DE ALIMENTAÇÃO SOLAR COM ACUMULADOR NIMH	52
FIG. 3-13 USO DE HIPERCONDENSADOR PARA A ALIMENTAÇÃO SEM INTERRUPTOR DO EQ-SENSOR	53
FIG. 4-1 SISTEMA OPERATIVO DO CC2530 COM <i>STACK ZIGBEE</i>	58
FIG. 4-2 MOTOR DE ESTADO PARA AS SOB TAREFAS DA APLICAÇÃO	60
FIG. 4-3 DETECÇÃO DO INÍCIO DE VEÍCULO	61
FIG. 4-4 ESTIMATIVA DA VELOCIDADE E ADAPTAÇÃO DA FREQUÊNCIA DE AMOSTRAGEM	64
FIG. 4-5 DETECÇÃO DO FIM DO VEÍCULO	64
FIG. 5-1 TESTE DE COMUNICAÇÕES EM LINHA DE VISTA	72
FIG. 5-2 EFEITO DO DESVANECIMENTO DE CURTO E LONGO ALCANCE	73
FIG. 5-3 TESTE DE ATENUAÇÃO DO SINAL COM TAMPA DE ACRÍLICO, VIDRO E ASFALTO	75
FIG. 5-4 ÂNGULO DE INCLINAÇÃO PARA A ANTENA DO COORDENADOR	76
FIG. 5-5 CAPTURA DE ASSINATURA NO SENTIDO DA MARCHA, CARRO BMW, VELOCIDADE 30 KM/H	78
FIG. 5-6 CAPTURA DE ASSINATURA NO SENTIDO DA MARCHA, CARRO BMW, VELOCIDADE 50 KM/H	79
FIG. 5-7 CAPTURA DE ASSINATURA COM SENSOR A 90°, EM MARCHA EM FRENTE	79
FIG. 5-8 CAPTURA DE ASSINATURA COM SENSOR A 90°, EM MARCHA A TRAZ	80
FIG. 5-9 MEDIDAS COM CARRO CITROËN C3	81
FIG. 5-10 MEDIDAS COM CARRO BMW DESPORTIVO	82
FIG. 5-11 MEDIDAS COM MODIFICAÇÃO DE ALTURA DO SENSOR	82
FIG. 5-12 MEDIDAS COM DUAS DIRECÇÕES ORTOGONAIS DE SENSIBILIDADE MAGNÉTICA	83
FIG. 5-13 MEDIDAS COM DUAS DIRECÇÕES ORTOGONAIS, ASSINATURAS DIVERSAS	84
FIG. 5-14 COMPARAÇÃO DA TAXA DE POUPANÇA ENERGÉTICA DOS <i>FIRMWARE</i>	86
FIG. 5-15 EQ-SENSOR DE BAIXO CONSUMO, COM SENSOR DE UM EIXO MAGNÉTICO	89
FIG. 5-16 ACCESS POINT COM O COORDENADOR ZIGBEE E UM MÓDULO DE COMUNICAÇÕES DE DADOS MÓVEIS	91

FIG. 5-17 REPRESENTAÇÃO IDEALIZADA _____	93
FIG. A-1 INFLUÊNCIA DA POSIÇÃO DO CAPTOR SOLAR _____	103
FIG. E-2 INSERÇÃO NO MODELO OSI DA IEEE802.15.4 _____	108
FIG. E-3 CONCEITO DAS PRIMITIVAS DE SERVIÇO _____	108
FIG. E-4 MODULAÇÃO O-QPSK DE 2 PORTADORAS SINUSOIDAIS E ORTOGONAIS DE 32 CHIP IGUAIS A 4 BITS DE DADOS _____	110
FIG. E-5 COMPARAÇÃO DA ASSOCIAÇÃO DE CANAIS ENTRE AS NORMAS IEEE802.11 E IEEE802.15.4 _____	110
FIG. E-6 TOPOLOGIAS OFERECIDAS PELA IEEE802.15.4 _____	112
FIG. E-7 ESTRUTURA DE SUPERTRAMA SÍNCRONA DO IEEE802.15.4 _____	113
FIG. G-8 PADRÃO TÍPICO DA RADIAÇÃO DIRECTA E DIFUSA TOTAL DIÁRIA EM LISBOA [51] _____	116
FIG. G-9 FACTOR DE OCULTAÇÃO DO EQ-SENSOR PELO TRÁFEGO RODOVIÁRIO _____	118
FIG. G-10 ESTADO DA ARTE NA INVESTIGAÇÃO DE CÉLULAS FOTOVOLTAICO [54] _____	119

## Lista de Tabelas

TAB. 2-1 NORMA DE REDES SEM FIOS PARA EQ-SENSORES .....	11
TAB. 2-2 PROJEÇÃO DO NÚMERO DE BYTES NECESSÁRIOS PARA A ASSINATURA DE VEÍCULOS.....	12
TAB. 2-3 PERFIS ZIGBEE ALLIANCE. [17].....	14
TAB. 2-4 TIPO DE MAGNETÓMETROS E GAMA DE UTILIZAÇÃO [25] .....	18
TAB. 2-5 MODELO DE CÁLCULO DA SUPERFÍCIE DE UM CAPTOR SOLAR .....	26
TAB. 2-5 RENDIMENTO TOTAL DE CONVERSÃO.....	26
TAB. 3-1 CONSUMO ENERGÉTICO DOS DIFERENTES BLOCOS DO EQ-SENSOR .....	33
TAB. 3-2 AVALIAÇÃO DA COMPLEXIDADE DAS ARQUITECTURAS .....	34
TAB. 3-3 CUSTO DOS SISTEMAS DE DESENVOLVIMENTO E LICENCIAMENTO DO <i>STACK ZIGBEE</i> .....	38
TAB. 3-4 FORNECEDORES DE COMPONENTES ZIGBEE .....	39
TAB. 3-5 MICROPROCESSADORES DOS MÓDULOS ZIGBEE .....	39
TAB. 3-6 CONSUMOS DE ENERGIA MODO ACTIVO E ADORMECIDO .....	40
TAB. 3-7 FAMÍLIA DE COMPONENTE ZIGBEE DA TEXAS INSTRUMENTS.....	41
TAB. 3-8 LISTA DOS FORNECEDORES DE MAGNETÓMETRO .....	42
TAB. 3-9 MODELO DE CONSUMO ENERGÉTICO PARA A ARQUITECTURA $\mu$ P MESTRE.....	47
TAB. 3-10 SUPERFÍCIE DE CAPTAÇÃO SOLAR PARA O EQ-SENSOR.....	51
TAB. 3-11 TECNOLOGIAS DE ACUMULADORES.....	52
TAB. 3-12 DIMENSIONAMENTO DO BLOCO DE HIPERCONDENSADOR .....	53
TAB. 3-13 DIMENSIONAMENTO DE UM BLOCO DE PILHAS NÃO RECARGÁVEIS.....	54
TAB. 4-1 COMANDOS DO PROTOCOLO APLICACIONAL DA REDE SEM FIOS .....	57
TAB. 4-2 PREAMBULO DE TRANSPORTE PARA A FRAGMENTAÇÃO DAS TRAMAS DE ASSINATURAS .....	65
TAB. 5-1 MEDIDAS DE TAXA DE PERDA DE PACOTES EM FUNÇÃO DA DISTÂNCIA.....	73
TAB. 5-2 ENSAIOS DE ATENUAÇÃO DAS COMUNICAÇÕES EM TUBOS SUBTERRÂNEOS.....	74
TAB. 5-3 MEDIDAS DE ATENUAÇÃO DO SINAL 2,4 GHZ ATRAVÉS DIVERSOS MATERIAIS.....	75
TAB. 5-4 MEDIDAS DE ATENUAÇÃO COM ÂNGULO DE INCLINAÇÃO DO COORDENADOR.....	76
TAB. 5-5 <i>LINK BUDGET UPLINK</i> ENTRE O EQ-SENSOR E O COORDENADOR.....	77
TAB. 5-6 OCUPAÇÃO DO CANAL DE COMUNICAÇÕES .....	84
TAB. 5-7 MEDIDAS DE CONSUMO ENERGÉTICO COM O <i>FIRMWARE</i> MULTI PRECISÃO .....	85
TAB. 5-8 MEDIDAS DE CONSUMO ENERGÉTICO COM <i>FIRMWARE POWER_SAVING</i> .....	85
TAB. 5-9 LISTA DE PRODUTOS .....	93
TAB. D-1 TRAMA <i>SIGNATURE</i> , SENTIDO EQ-SENSOR PARA SA.....	105
TAB. D-2 CAMPOS DA TRAMA <i>SIGNATURE</i> .....	105
TAB. D-3 TRAMA <i>STATUS</i> , BISENTIDO EQ-SENSOR SA.....	106
TAB. D-4 CAMPO TRAMA <i>STATUS</i> .....	106
TAB. D-5 TRAMA <i>CONFIG</i> , SENTIDO EQ-SENSOR PARA SA .....	106
TAB. D-6 CAMPOS TRAMA <i>CONFIG</i> .....	107
TAB. E-7 PONTOS DE ACESSO AOS SERVIÇOS .....	109
TAB. E-8 CANAIS E FREQUÊNCIAS DA NORMA IEEE802.15.4.....	109
TAB. E-9 LISTA DAS PRIMITIVAS DE SERVIÇO OFERECIDAS PELO MLME-SAP DA IEEE802.15.4 .....	113
TAB.G-10 DISTRIBUIÇÃO DIÁRIA DA TAXA DE LUZ DIRECTA E INDIRECTA.....	117
TAB. I-11 ATENUAÇÃO DO SINAL RÁDIO POR UM DIELECTICO DE 1 CM.....	121

## Lista de símbolos

$B_s$	Campo magnético aplicado em Gauss
$D$	Distância parametrizada entre o início da detecção do veículo e o primeiro extremo, mínimo ou máximo, da assinatura magnética
$f_a$	Frequência de amostragem de detecção
$f_d$	Frequência de amostragem de digitalização
$G$	Ganho de amplificação
$GND$	Massa eléctrica da alimentação ( <i>ground</i> )
$N$	Norma vectorial do campo magnético detectado
$N_A$	Número e amostras por metro de comprimento do veículo
$P_c$	Potência captável que corresponde a $P_r$ menos as perdas
$P_{Hc}$	Potência recuperável dum hipercondensador com uso de um DC-DC
$P_n$	Potência necessária definida pelo modelo de consumo do equipamento sensor
$P_r$	Potência de radiação solar no local e mês de menor insolação
$R$	Resistência de um elemento da ponte de <i>Wheatstone</i> do sensor
$S$	Sensibilidade magnética em mV/V/Gauss
$S_{up}$	Superfície mínima que propõe o modelo em m <sup>2</sup>
$V_{CC}$	<i>Voltage Common Collector</i> – alimentação em tensão
$V_{dif}$	Tensão diferencial entre os dois pontos de saída $V_{out1}$ e $V_{out2}$
$V_{esti}$	Velocidade estimada
$V_{max}$	Velocidade máxima para obtenção da definição de digitalização
$V_{min}$	Tensão diferencial mínima, bias mínimo
$V_{out1}$ e $V_{out2}$	Tensões de saída da ponte de <i>Wheatstone</i>

## Acrónimos

3G	<i>Third Mobile Phone Generation</i>
6loWPAN	<i>IPv6 over Low power Wireless Personal Area Networks</i>
ACK	<i>Acknowledge</i>
AES	<i>Advance Encryption Security</i>
AmpOp	<i>Amplificador operacional</i>
AMR	<i>Anisotropic Magneto Resistance (ver MRA)</i>
API	<i>Application Programming Interface</i>
ASK	<i>Amplitude Shift Keying</i>
BLE	<i>Bluetooth™ Low Energy</i>
BPSK	<i>Binary Phase Shift Keying</i>
CAP	<i>Contention Access Period</i>
CCA	<i>Clear Channel Assessment</i>
CFP	<i>Contention Free Period</i>
CMT	<i>Campo Magnético Terrestre</i>
µP	<i>Central Processing Unit</i>
CSMA/CA	<i>Carrier Sense Multiple Access / Collision Avoidance</i>
DC/DC	<i>Direct Current to Direct Current</i>
DSSS	<i>Direct Sequence Spread Spectrum</i>
ED	<i>Energy Detection</i>
ETSI	<i>European Telecommunications Standards Institute</i>
Eq-sensor	<i>Equipamento sensor</i>
FCS	<i>Field Check Sum</i>
FS	<i>Full Scale</i>
FFD	<i>Full Function Devices</i>
GPRS	<i>General Packet Radio Service</i>
GTS	<i>Guaranteed Time Slot</i>
HAL	<i>Hardware Abstraction Layer</i>
HART	<i>Highway Addressable Remote Transducer Protocol</i>
I <sub>2</sub> C	<i>Inter-Integrate Circuit</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IETF	<i>Internet Engineering Task Force</i>
ISM	<i>Industry, Security and Medical</i>
Ldv	<i>Linha de vista</i>
Li-ion	<i>Íons de Lítio</i>
LQI	<i>Line Quality Indicator</i>
LR-WPAN	<i>Low Rate – Wireless Personal Area Network</i>
MAC	<i>Media Access Control</i>
MIC	<i>Message Integrity Code</i>
MPP	<i>Maximum Power Point</i>
MRA	<i>Magnetoresistência anisotrópica</i>
NA	<i>Número de amostras</i>
NiCd	<i>Níquel cádmio</i>

NiMH	Níquel hidreto metálico
O-QPSK	<i>Offset Quadrature Phase Shift Keying</i>
OSAL	<i>Operating System Abstraction Layer</i>
OSI	<i>Open System Interconnection</i>
PHY	<i>Physical Layer in OSI model</i>
PIER	Potência Isotrópica Equivalente Radiada
PM0/1/3	<i>Power Mode 0 ou 1, 2, 3</i>
PN	<i>Pseudo Noise (pseudo ruído)</i>
PSSS	<i>Parallel-Sequence Spread Spectrum</i>
PVGIS	<i>Photovoltaic Geographical Information System</i>
RFD	<i>Reduced Function Devices</i>
ROLL	<i>Routing Over Low power and Lossy networks</i>
S11	Parâmetro S, perda de retorno do sinal RF de entrada
SA	Servidor Aplicacional
SAP	<i>Services Access Point</i>
Si	Silício
SMA	<i>SubMiniature version A</i>
SNR	<i>Signal to Noise Ratio</i>
SO	Sistema Operativo
SPI	<i>Serial Peripheral Interface</i>
SoC	<i>System on a Chip</i>
Squid	<i>Superconducting QUantum Interference Device</i>
SRD	<i>Short Range Device</i>
VSWR	<i>Voltage Standing Wave Ratio</i>
Wibree™	<i>Bluetooth Low Energy</i>
WiFi™	Wi-Fi Alliance, redes sem fios para computadores
WPAN	<i>Wireless Personal Area Network</i>
ZAF	<i>Zigbee Application Framework</i>

# 1 Introdução

## 1.1 O Problema

A detecção, contagem e identificação de veículos é uma função que desde sempre interessou as empresas e entidades ligadas a gestão de rodovias. Com eq-sensores, equipamentos sensores, é possível gerar e guardar dados sobre a evolução do tráfego automóvel. Com os dados obtidos, é possível prever o crescimento médio do tráfego, as suas variações na globalidade e por classe de veículos, consoante as horas do dia, o dia da semana, o período do ano, o local de medição, entre outros parâmetros.

O tráfego apresenta variações derivadas de múltiplos factores tais como: condições atmosféricas, acidentes, greves, obras na via ou ainda os recorrentes picos associados ao movimento pendular, períodos festivos, feriados, fim-de-semana, entre outros. O carácter aleatório de alguns destes factores implica o recurso a sistemas automáticos de recolha de dados, para uma contagem exacta e pormenorizada do volume de tráfego.

As redes de eq-sensores permitem fornecer dados fiáveis em tempo real e desencadear acções correctivas quando são detectados bloqueios, anomalias ou situações de perigo.

A contagem de veículos proporciona dados sobre um fluxo indiscriminado. É certo que esta é já uma informação de grande valor, mas a distinção entre as várias classes de veículos, tais como ligeiros, passageiros, mistos de mercadorias, *vans*, camiões e semi-remoque é, igualmente, uma informação importante porque é relevante para a estimativa dos períodos de manutenção e intervenções na via, assim como informativo das suas condições de utilização.

O ideal seria poder discriminar completa e automaticamente, o tráfego de veículos em classe, marca, modelo, número de eixos, classe de portagem e dimensões.

Actualmente, para realizar esta operação, não existem meios automáticos e de baixo custo que, simultaneamente, funcionem sem interrupção durante vários anos e sejam de fácil instalação e manutenção. O preenchimento desta lacuna é o objecto de estudo desta tese.

### 1.2 Objectivos

Hoje em dia, os concessionários rodoviários utilizam várias soluções técnicas que permitem contar os veículos e separar o tráfego, baseando-se na detecção do número de eixos dos veículos.

Esta tese visa avaliar a exequibilidade da realização de um eq-sensor energeticamente autónomo, de baixo custo e de pequena dimensão. Este eq-sensor deve efectuar a contagem de veículos em tempo real e digitalizar a assinatura magnética da passagem do veículo no CMT, campo magnético terrestre. Deve ainda enviar estes dados para o SA, servidor aplicacional.

### 1.3 Motivações

A tecnologia dos sensores acompanhou a diminuição de dimensão e do consumo energético dos processadores e dos *transceivers* rádio. Hoje em dia os SoC, *System on a Chip*, permitem digitalizar valores em tensão, processar informação e utilizar uma interface de comunicações sem fios.

No campo dos magnetómetros, os sensores que utilizavam campos magnéticos gerados artificialmente, recorrem agora ao uso de filmes finos de *Permalloy* cuja resistência apresenta variações em função da intensidade e direcção das flutuações do CMT. Esta realidade veio permitir o aparecimento de aplicações de baixo consumo energético.

As LR-WPAN, *Low Rate Wireless Personal Area Network*, com grande resistência ao ruído, utilizam uma tecnologia muito avançada que tem uma aplicação relevante neste projecto.

Tive, pessoalmente, a oportunidade de trabalhar com soluções de RFID, *radio frequency identification*, que permitem identificar pessoas ou objectos, recolher dados de sensor e enviar esta informação, recorrendo a comunicações sem fios, a leitores ligados a uma rede local. O alcance destas soluções é de poucos metros e apresentam uma taxa de erro elevada. A capacidade de processamento das etiquetas activas RFID é dedicada à função de identificação e apresentam-se como sistemas fechados.

Com esta tese, pretendo aprofundar o meu conhecimento sobre LR-WPAN aplicadas ao mundo dos sensores e das normas standardizadas e abertas. Pretendo também, consolidar a minha capacidade para desenhar soluções concebidas para o mercado global e que incorporem as tecnologias mais avançadas e robustas deste sector.

## 1.4 Estrutura da dissertação

Visando uma boa apresentação dos assuntos abordados durante a tese, foi definida a seguinte estrutura:

- Introdução - apresenta a tese e os seus desafios;
- Estado da Arte - analisa o modelo adoptado para o cálculo da superfície de captação e a oferta actual em soluções que podem cumprir as especificações do problema: as comunicações sem fios de baixo débito binário, os sensores magnéticos, particularmente, as magnetoresistências anisotrópicas, as fontes de energia para sensores, com ênfase na energia fotovoltaica;
- Solução – justificação da arquitectura proposta, procura e selecção dos componentes de electrónica, modelo de consumo energético do eq-sensor e esquema da solução;
- Implementação - módulos de electrónica, protocolo aplicacional, *firmware* do eq-sensor, do controlador e *software* do painel de controlo. Principais algoritmos. Biblioteca de interface para o SA;
- Resultados - dados sobre ensaios realizados com o magnetómetro, com as radiocomunicações sem fios, captura de assinaturas magnéticas de veículos, medidas de consumo energético, melhorias propostas;
- Conclusões;
- Anexos;
- Bibliografia.

Com os resultados desta tese e os testes realizados com o protótipo desenvolvido, foi possível submeter um *paper* para apresentação oral na CETC, Conference on Electronics, Telecommunications and Computers, realizada em Novembro de 2011 no ISEL [1].



## 2 Estado da arte

### 2.1 Soluções existentes

Os sistemas de contagem e de classificação de veículos permitem melhorar o planeamento, as previsões de tráfego rodoviário e o serviço prestado aos clientes dos operadores rodoviários. Permitem também o controlo da qualidade de serviço com uma base estatística rigorosa.

Actualmente, as soluções de contagem e classificação de veículos utilizam bobinas indutoras, sensores piezoeléctricos, olho fotosensível, ultrasons, entre outros. A maior parte destes sistemas, como alguns dos apresentados na Fig. 2-1, são alimentados a partir da berma da estrada, necessitando de uma racha para a passagem dos fios. Estas instalações são dispendiosas e geram fragilidades no asfalto.



Contador de carros com sensor pneumático [2]



Ligação à berma por via de uma racha [3]



Detectores piezo eléctricos [4]

**Fig. 2-1 Conjuntos diversos de eq-sensores rodoviários e ligações**

A solução pneumática utiliza um tubo de borracha fino e sensível às variações de pressão provocadas pela passagem dos veículos, possuindo um vida útil reduzida. As soluções piezoeléctricas suportam até 40 milhões de passagens [5].

Uma outra solução baseia-se numa bobina condutora embebida no asfalto que emite um campo magnético permanente. Este campo sofre variações quando um veículo passa e através de uma outra bobina ligada em série, estas variações são medidas, permitindo assim a contagem e classificação dos veículos. Como o campo magnético induzido é muito superior ao CMT este sensor proporciona uma resposta sempre idêntica. Em contrapartida, este sensor tem um elevado consumo energético o que obriga a uma ligação permanente à rede eléctrica, requer uma grande e demorada intervenção na via, para além de uma manutenção periódica. Segundo um estudo da Universidade de Berkeley, o recurso a bobinas indutoras permite uma precisão de 98% na classificação de veículos [6].

## Estado da arte

O custo destas soluções é superior ao custo dos sistemas com câmara e reconhecimento automático de veículos. A tendência para proporcionar uma supervisão ao nível de cada cruzamento, entradas e saídas de auto-estradas, saídas de portagem e, idealmente, em todos os quilómetros de auto-estrada, implica que a solução deve diminuir drasticamente o seu custo.

Uma das vantagens dos sistemas de detecção embutidos no asfalto é a continuidade de funcionamento durante temporais, nevoeiros, queda de neve e baixa luminosidade [7].

O recurso a vídeo para detecção da classe do veículo requer meios de processamento consideráveis para cada câmara de detecção. Estes meios de processamento podem tornar-se inoportunos para garantir uma detecção em tempo real distribuída por várias dezenas ou centenas de locais de contagem e classificação. Os magnetómetros oferecem uma informação muito mais compacta e simples de manusear informaticamente. O custo de processamento da classificação de um veículo, com base na sua assinatura magnética, será incomparavelmente mais pequeno. Conjectura-se que um único servidor poderá processar uma rede de dezenas de sensores e apresentar em tempo real a informação geográfica de tráfego.

O custo e a autonomia constituem dois importantes factores para eq-sensores rodoviários. A autonomia dos equipamentos com baterias situa-se, tipicamente, entre 3 e 10 anos. O custo destas soluções ainda é elevado denotando de um mercado emergente [8].

Uma das tecnologias utilizadas recorre à detecção das flutuações do campo magnético da Terra com um sensor magnetoresistivo integrado num chip de baixos custo e consumo energético. Aliado a microprocessadores e interfaces rádio com as mesmas características, esta nova geração de eq-sensores emerge como uma solução competitiva, para redes de sensores de contagem e classificação de veículos com centenas de pontos de recolha.

Num trabalho de investigação na Universidade de Uppsala, Suécia, Hamid Reza Hajimohammadi reporta uma taxa de identificação e classificação de 76% com a tecnologia de sensor com magnetoresistências, idêntico ao componente seleccionado para este projecto [9]. Esta taxa é inferior aos resultados obtidos com bobinas indutoras e terá de ser confirmada nos testes a efectuar na sequência do presente projecto.

Nesta gama de sistemas destacam-se as soluções da empresa norte-americana Sensys. Esta propõe um equipamento inserido no asfalto e coberto por uma capa de resina epóxi de endurecimento rápido para o nivelar, encarcerar e proteger. A resina epóxi tem uma muito baixa atenuação das micro-ondas e uma grande robusteza tanto à pressão como às vibrações sendo, por isso, um excelente substituto do asfalto. A Sensys fornece um invólucro de plástico de protecção do eq-sensor para a sua recuperação sem danos [10].

A Sensys põe um grande ênfase no *firmware* e *software* associado à sua solução como factor diferenciador. Esta característica demonstra a importância do *firmware* na construção de uma solução competitiva.

O eq-sensor apresentado na Fig.2-2 detecta as variações do CMT aquando da passagem de um veículo. Este equipamento funciona com pilhas de lítio de grande densidade energética. Possui uma frequência de amostragem de 125 Hz, utilizando 99% do período em estado adormecido de baixo consumo energético. Com baterias de Li-SOCL<sub>2</sub>, Lítio de Cloreto de tionila e configurado para o modo de envio de dados por lote em tempo diferido, o fabricante indica que alcança 10 anos de autonomia [11]. Este consumo muito baixo não é atingido quando configurado para o envio em tempo real.



**Fig. 2-2 Eq-sensor c/ magnetoresistências 3 eixos, comunicações sem fios, alimentado p/ baterias [12]**

As baterias de Lítio de Cloreto de tionila são sensíveis ao choque e podem explodir se submetidas a temperaturas superiores a 100<sup>o</sup> C. Nos testes de autonomia que a Sensys apresenta está documentada a utilização do equipamento com temperaturas acima dos 85<sup>o</sup>C durante os meses de verão, no Texas. É questionável o uso deste tipo de baterias num eq-sensor desprovido de um radiador de evacuação do calor.

A solução da Sensys tem um ponto de acesso rádio AP, *Access Point*, que utiliza uma antena direccionada com ganho superior a 10 dBi e um armário na berma que incorpora um concentrador com um *Gateway IP*. A solução da Sensys é integrada e compacta no que diz respeito ao eq-sensor. Os outros elementos da rede são relativamente volumosos. Esta concepção traduz-se por um custo elevado da solução completa.

Um outro fabricante é a Astucia, uma empresa inglesa que apresenta um eq-sensor, Fig. 2-3, com magnetómetro, comunicações sem fios e autonomia energética baseada num captor solar. O envio de dados é realizado por lote, em tempo diferido ou em tempo real. Como o equipamento pode memorizar até um ano de dados, não é necessário ter uma infraestrutura

## Estado da arte

na beirada da estrada. Basta passar, periodicamente, com um carro de serviço e proceder à recolha dos dados. Desta maneira poupa-se, para cada ponto de contagem e classificação, a infraestrutura de recolha e envio dos dados para a WAN, *Wide Area Network*.



**Fig. 2-3 Eq-sensor c/ magnetómetro, comunicações sem fios, alimentado com painel solar [13]**

Um outro fornecedor relevante é a empresa espanhola Libelium, uma *spin-off* da Universidade de Zaragoza. A Libelium iniciou em 2011 a comercialização de um eq-sensor munido de um detector magnético que controla os espaços de estacionamento. Recentemente, lançou uma outra solução de detecção de tráfego de veículos por ultra-sons. Todas as suas aplicações utilizam uma plataforma de processamento, denominada Waspote. Esta solução é alimentada por baterias e tem uma autonomia de 5 anos.



**Fig. 2-4 Eq-sensor c/ magnetómetro, comunicações sem fios, alimentado por baterias [14]**

Cita-se ainda a solução da empresa finlandesa Vassala que utiliza sensores GMR, *Giant Magnetometer Resistance*, com uma tecnologia proprietária designada por imagiologia magnética dos veículos, VMI, *Veicule Magnetic Imaging*, e possui uma autonomia com pilhas até 3 anos [15]. O eq-sensor tem também opções para detectar a presença de água e medir a temperatura, informação essa que, para os países nórdicos, tem bastante valor.



Fig. 2-5 Eq-sensor c/ Vehicle Magnetic Imaging, comunicações sem fios, alimentado por baterias [15]

Esta tese insere-se nesta gama de equipamentos e nas suas performances técnicas. Tendo em conta o que já se faz ao nível da oferta global, seleccionou-se um conjunto de factores que podem diferenciar e otimizar uma solução inovadora.

#### **Factores de sucesso:**

- Concepção de algoritmos *firmware* e *software* de alto desempenho;
- Baixo consumo energético com recurso a ciclos de trabalho / repouso do eq-sensor;
- Auto calibração do equipamento;
- Envio das ocorrências com assinatura magnética em tempo real;
- Opção de envio de ocorrência, sem assinatura magnética, para contagem;
- Opção de acumulação de ocorrências de contagem com referência temporal e envio diferido e agrupado;
- Comunicações sem fios de baixo débito e alto desempenho;
- Solução com autonomia energética de pelo menos 3 anos;
- Dimensão otimizada do contentor.

#### **Factores de diferenciação:**

- Baixo custo de fabrico do eq-sensor e dos elementos de rede, tais como o coordenador;
- Opção de compressão de dados;
- Opção de encriptação;
- Solução de fácil instalação e manutenção na rodovia;
- Dimensão mais pequena do que as soluções existentes;
- Resistência a altas temperaturas;

## 2.2 Comunicações sem fios de baixo débito binário

Nesta tese, as comunicações de dados usam uma rede sem fios com os seguintes elementos:

- Eq-sensores inseridos no asfalto das vias rodoviárias com SoC e módulo de comunicações rádio LR-WPAN;
- Concentrador situado na berma da via rodoviária com módulo de comunicação rádio para o LR-WPAN e módulo de comunicações para a WAN da entidade de gestão, recorrendo às comunicações de dados móveis GPRS/3G ou simplesmente a um acesso fixo de cobre ou de fibra óptica;
- SA com aplicação de gestão da rede de coordenadores e eq-sensores, motor de classificação de assinaturas magnéticas e GIS, *Grafical Information System*.

Note-se que esta tese está limitada, no seu âmbito, à rede LR-WPAN e ao eq-sensor.

Para criar uma rede de comunicações de baixo débito binário, baixo consumo energético e coexistente com outras redes sem fios, que partilhem a faixa não licenciada do espectro rádio ISM, *Industry Security & Medical*, nos [2,4..2,5] GHz, é necessário seleccionar uma norma compatível com as famílias de normas já existentes nesta faixa.

Inicialmente, as redes de eq-sensores utilizavam normas *ad hoc* e muito simples, utilizando o protocolo CDMA/CA, *colitions detection multiple access / colition avoidance*, para coexistir com outros emissores. O sinal não era espalhado no tempo ou na frequência e era muito sensível às interferências. Muitos fabricantes propunham soluções proprietárias como é o exemplo da RFID activa com possibilidade de transmissão de dados. Com a sobrelotação da faixa ISM 2,45 GHz pelo 802.11, WiFi, estas soluções proprietárias estão agora obsoletas.

A rede LR-WPAN deve, em particular, conviver com redes Wi-Fi e comunicações Bluetooth. Por isso a atenção centrou-se nas normas IEEE, *Institute of Electrical and Electronics Engineers*, que desenvolve um conjunto de normas adaptadas, eficientes e coexistentes.

A selecção das comunicações a usar segue os seguintes critérios:

1. Baixo débito binário;
2. Baixa potência de emissão;
3. Baixa taxa de erros;
4. Comunicações mesmo com baixo SNR, *Signal Noise Ratio*;
5. Coexistência com outras redes sem fios;

6. Potência média de emissão nula;
7. Baixo custo;
8. Sem licenciamento de faixa de espectro.

As principais normas que podem ser utilizadas na faixa ISM 2,45 GHz são as que se apresentam na Tab. 2-1. Evidencia-se a prevalência da norma de base IEEE 802.15.4 utilizada na maior parte dos protocolos disponíveis para as camadas PHY (*fiscal link*) e MAC (*datalink*):

**Tab. 2-1 Norma de redes sem fios para eq-sensores**

Norma	Designação	Tipo	Débito Binário [Kbps]	Consumo
IEEE 802.15.1	BLE (wibree™)	LR-WPAN	200	Baixo
IEEE 802.15.4	IEEE 802.15.4 ZigBee 6LoWPAN WirelessHART ISA100.11a	LR-WPAN	250	Baixo
IEEE 802.11	WiFi	HR-LAN	1000 – 600 000	Alto

A tecnologia BLE, *Bluetooth Low Energy*, anteriormente apelidada de wibree foi desenhada para competir com o ZigBee e apresenta-se hoje como uma opção de baixo consumo face a módulos Bluetooth. Por constituir uma versão da norma Bluetooth, é mais orientada para gerir periféricos informáticos pelo que não foi considerada para o presente projecto.

O enfoque inicial do projecto situou-se na tecnologia ZigBee e na IEEE 802.15.4 por serem normas abertas em termos de especificações, terem grande notoriedade para redes de eq-sensores e oferecerem baixo custo de aquisição dos componentes. Existem muitos fornecedores e uma oferta diversificada.

A faixa de comunicações ISM 2,45 GHz é sobrelotada de aplicações de radiocomunicações particularmente intensas. A importância das normas IEEE 802.11 (rede local sem fios) e IEEE 802.15.1 (Bluetooth, rede sem fios pessoal de alto débito binário), faz delas as principais fontes de interferência. Considerando que os eq-sensores podem ser instalados em vias rodoviárias isoladas ou na proximidade de portagens, a coexistência da rede de comunicações com estas normas foi um factor crítico de decisão.

A norma LR-WPAN IEEE 802.15.4 dedicou uma atenção particular à coexistência entre normas que partilhem o meio físico, minorando os cenários de colisão e interferência para garantir uma baixa taxa de erros, permitindo assim um melhor desempenho.

## 2.2.1 Faixa de frequência ISM

Existem duas faixas de frequência sem licenciamento ISM que a norma IEEE 802.15.4 pode ocupar: as faixas dos 868 e 2 450 MHz.

A assinatura magnética digitalizada de um veículo pode atingir uma grande dimensão. Sem ter em conta os algoritmos de compressão de dados, apresenta-se na Tab. 2-2 uma projecção para uma configuração mínima e outra para uma configuração com uma melhor definição da digitalização (12 bits). O eq-sensor a desenvolver tem um débito de envio elevado, por rajadas, e precisa de escoar esta informação logo a seguir à passagem de um veículo, para a detecção e digitalização do próximo veículo.

**Tab. 2-2 Projecção do número de bytes necessários para a assinatura de veículos**

<b>Veículo</b>	<b>Tamanho</b>	<b>Número de amostras</b>	<b>Precisão</b>	<b>Direcções magnéticas ortogonais</b>	<b>Dimensão dos dados</b>
	[m]		[bytes]		[bytes]
Veículo ligeiro de passageiros	5	10	1	1	50
		25	2	2	500
Camião c/ atrelado	30	10	1	1	300
		25	2	2	3000

Este volume de dados sugere a selecção da faixa com maior débito binário. A instalação do eq-sensor no exterior garante uma baixa taxa de eventuais interferências provocadas por outras fontes rádio. Por esta razão a sobrelotação da faixa de frequência não é uma preocupação, pelo que é dada preferência à faixa ISM dos 2,45 GHz que oferece um débito binário de 250 kBps e 16 canais de comunicações.

Segundo a terminologia da Anacom, na ausência de regulação específica para radiocomunicações no exterior, de rede de eq-sensores, este projecto caracteriza-se como rede de SRD, *short range devices*: «Aplicam-se as comunicações de dados de uso geral não licenciadas na faixa dos 2 400 – 2 483,5 MHz que não podem utilizar uma potência de emissão superior a 10 mW p.i.e.r., potência isotrópica equivalente radiada.» [16].

Esta limitação de potência é compatível com a norma IEEE 802.15.4 que mantém comunicações fiáveis com um SNR, *signal to noise ratio*, inferior a 0 dBm superando assim o Wi-Fi e o Bluetooth.

### 2.2.2 IEEE 802.15.4

A norma IEEE 802.15.4, cobre as camadas físicas (PHY) e de enlace de dados (Datalink) e foi pensada para otimizar a relação SNR. Apresenta uma boa sensibilidade e permite a coexistência com outras normas que partilham estas faixas do espectro.

O equipamento coordenador de rede IEEE 802.15.4, na fase inicial de arranque e antes de proceder a selecção de canal, testa cada canal disponível, calcular a densidade de energia electromagnética e detectar a presença de outras redes IEEE 802.15.4. Esta operação é dinâmica.

A potência de emissão é regulável e pode ser determinada com base no RSSI, *Radio Signal Strength Indicator*, e o LQI, *Line Quality Indicator*, que o receptor envia ao emissor nas suas mensagens. Quando realiza um envio de mensagens o emissor deve calcular o PER, *packet error rate*, com base nos pacotes ACK, *acknowledge*, e NAK, *not acknowledge*.

Esta norma incorpora elementos de topologia de rede, nomeadamente, em estrela e par-a-par. Ela serve de base para as normas que operam entre a camada de rede OSI, *Open System Interconnection*, e a camada aplicacional. Apresenta-se no Anexo E - IEEE 802.15.4 o sumário desta norma.

### 2.2.3 ZigBee Alliance

A ZigBee Alliance, é uma associação de direito privado que junta, essencialmente, fornecedores de componentes electrónicos e fabricantes de módulos e soluções de rede sem fios para eq-sensores, interruptores, comandos à distância, sistemas automatizados, entre muitas outras. Esta associação publica especificações e perfis e coordena testes de compatibilidade entre construtores. Para o uso de um *Stack* e de perfis ZigBee é necessário pagar um licenciamento à ZigBee Alliance.

Duas especificações são propostas: ZigBee com o *Stack* completo possuindo maior flexibilidade em termos de topologia e ZigBee RF4CE, *Radio Frequency for Customer Equipment*, uma versão reduzida às topologias em estrela e ponto-a-ponto do IEEE 802.15.4.

Em termos de especificações, elas integram na totalidade a norma IEEE 802.15.4 e acrescentam:

- Topologia arborescente e em malha;

## Estado da arte

- Auto organização e associação em estrutura previamente parametrizada;
- Detecção de equipamentos;
- Geração de chave de encriptação e activação da segurança nas comunicações;
- Gestão de coordenador, *router* e Pontos Terminais (ou equipamentos terminais);
- Envio e recepção de dados nos routers e coordenador;
- Gestão automática de poupança de energia;
- Gestão de parâmetros MAC e funções da camada MAC;
- Vários perfis aplicativos normalizados.

Em 2011, a especificação *ZigBee Network Device* foi publicada. Esta especificação permite aos fabricantes de *hardware* propor coordenadores com interface para IP. Nesta tese optou-se por um *Gateway* via comunicações série EIA-232.

A fragmentação de fluxo de dados deve ser realizada ao nível aplicacional por não fazer parte da especificação ZigBee, embora esteja presente em perfis especializados que apresentamos na Tab. 2-3. O grande laque de perfis, indica um crescimento do sector, das soluções e a emergência de um novo mercado. A maior parte destes perfis tem 1 ou 2 anos de publicação.

Tab. 2-3 Perfis ZigBee Alliance. [17]

Perfis ZigBee	Descrição	Ano das Especificações
<b>Building Automation</b>	Interface com BACnet rede cablada para edifícios	Não disponível
<b>Remote Control</b>	ZigBee RF4CE	2010
<b>Smart Energy</b>	Automação e estatísticas na distribuição de água e energia para as casas	2008
<b>Health Care</b>	Interface c/ Continua Health Alliance para a interoperabilidade e comunicações sem fios de baixo débito com equipamentos médicos	2009
<b>Home Automation</b>	Domótica, controlo da iluminação, interruptores, dimmers, segurança, gestão de energia das casas, telecomandados.	2007
<b>Input Device</b>	Para ratos, teclados e outros equipamentos de entrada de dados para computadores e equipamentos de consumo	RFC4
<b>Retail Services</b>	Supervisão e controlo da cadeia logística para a venda a retalho dos supermercados	Não disponível
<b>Telecom Services</b>	Certificação de interoperabilidade com telemóveis para equipamentos de pagamento, de informação, publicidade e comunicações ad hoc com outro móvel	2010
<b>3D sync</b>	Interface para óculos 3D	RF4CE
<b>Network Devices</b>	<i>Gateway</i> , bridge e repetidores, para equipamentos de rede	ZigBee Pro/11

Na lista apresentada na Tab. 2-3 não se encontra um perfil para uma rede de eq-sensores. Uma explicação é que uma parte deste mercado é servida pelas soluções industriais WirelessHART e ISA10010a enquanto outra parte é servida por *Stack* proprietários

construídos sobre o IEEE 802.15.4 que permitem, sem custo de licenciamento, implementar soluções mais optimizadas no processamento, na poupança energética e no protocolo de transferência de dados. Citam-se os exemplos do *Stack JenNET* [18] ou o *Stack Miwi* [19] que ambos suportam até 500 eq-sensores.

#### 2.2.4 6loWPAN

O 6loWPAN, *IPv6 over Low power Wireless Personal Area Networks*, é uma norma aberta e publicada sob a alçada da IETF, *Internet Engineering Task Force* [20] e [21]. Esta norma apresenta a rede LR-WPAN como a extensão da rede IP. Dir-se-ia que, ao contrário das especificações ZigBee, o esforço de normalização é iniciado no *Gateway* e centra-se no prolongamento do *Network Layer* IP sobre redes IEEE 802.15.4.

A norma 6loWPAN foi concebida à partida para suportar o IPv6 (e o IPv4) e por isso apresenta um claro critério de perenidade. Seguem as suas características fundamentais:

- Compressão de cabeçalho;
- Adaptação de tamanho dos pacotes IP (MTU até 1280 byte) e IEEE 802.15.4 (127 byte) por fragmentação / desfragmentação.
- Resolução de endereço Ipv6 = 128 bit, IEEE 802.15.4 = IEEE MAC 64 bits + 16 bit PANID.
- Topologia em árvore com: *Edge Router* IPv6 + 6loWPAN, Router e equipamentos terminais em IEEE 802.15.4;
- Compatibilidade com o protocolo de *routing* IETF ROLL, *Routing Over Low power and Lossy networks*, para optimizar a procura de caminho numa arquitectura em malha de equipamentos de baixo consumo, custo e potência;
- Normas abertas sem custo de licenciamento.

A norma 6loWPAN é suportada pela NXP-Jennic. A Texas Instruments recorre a um parceiro, a Sensinode, que desenvolveu uma versão licenciada deste *Stack*. A Microchip não oferece ainda este protocolo. O sistema operativo aberto Contiki para microprocessadores e SoC, suporta um conjunto de componentes com o 6loWPAN [22]. O mercado está algo imaturo em relação à implementação desta norma.

### 2.2.5 IEEE 802.15.5

A norma IEEE 802.15.5 proporciona uma arquitectura para redes WPAN que permite criar, dinamicamente, redes em malha tais como árvores de grande dimensão. A norma cobre as redes de baixo e alto débito binário. Apresenta as seguintes características fundamentais:

- Inicialização automática de rede;
- Endereçamento;
- *Multi-hop unicast*;
- Difusão;
- Optimização de energia;

Esta norma associada ao 6LoWPAN é concorrente da ZigBee Alliance com a vantagem de ser aberta e sem licenciamento, no entanto com a desvantagem de ser muito recente.

### 2.2.6 WirelessHART

A norma WirelessHART cria a interface com redes de cabos baseadas no protocolo HART, *Highway Addressable Remote Transducer Protocol*, [23], dominante nas redes de sensores para a indústria e sistemas de automação.

O protocolo utiliza a norma IEEE 802.15.4 para as camadas PHY e MAC, criando uma arquitectura de rede com as seguintes características:

- Rede em malha;
- Auto-organização da rede;
- Síncrona;
- *Gateway* com FieldBus, Profibus, entre outros BUS de automação industrial;
- Normalizado IEC 62591 em 2009 (*International Electrotechnical Commission*).

Esta norma tem o seu enfoque na automação industrial. Por não ser o enfoque deste projecto, apenas se menciona a norma sublinhando a sua grande importância para a indústria.

### 2.2.7 ISA100.11a

O standard ISA100.11a é dedicado aos sistemas de automação e redes de sensores [24] e tem as seguintes características:

- Integra o IEEE 802.15.4 para ISM 2.45 GHz;
- Suporta as topologias do IEEE 802.15.4;
- Gere saltos entre canais, *frequency hopping*, para aumentar a resistência a erros;
- Transporta por túnel protocolos tais como Fieldbus, HART, Profibus, ModBus;
- Utiliza a segurança AES, *advance encryption standard*, do IEEE 802.15.4, generalizada a toda a rede;
- Dedicada a aplicações críticas.

Enfoque na automação industrial, doméstica, transmissão e distribuição, RFID, entre outros. Actua no mesmo mercado do que o protocolo HART.

### 2.2.8 Critérios de selecção

De acordo com o já descrito, as normas de comunicações para as comunicações sem fios são numerosas e em pleno crescimento. O *Stack ZigBee* apresentou-se como a solução mais madura. A sua selecção permite também a avaliação do protocolo subjacente IEEE 802.15.4.

É deixado em aberto o uso de outros *Stack*, tal como o *Stack SIMPLICITI* da Texas Instruments que não necessita de um licenciamento e é apresentado como sendo eficiente em termos energéticos. No entanto, por se tratar de uma solução proprietária, não se optou por este *Stack*.

## 2.3 O magnetismo para a detecção de veículos

### 2.3.1 Tecnologia

O magnetómetro é um sensor electrónico que gera duas tensões variáveis e opostas em função da intensidade e direcção de um campo magnético que pode ser natural, tal como o CMT, ou artificial obtido com bobinas ou íman permanentes. Existem magnetómetros escalares e vectoriais, absolutos, de vibração, galvanómetro de deflexão, nuclear, entre outros, cujas tecnologias se apresentam na Tab. 2-4, sendo o mais integrado o magnetómetro constituído por uma ponte de *Wheatstone* de 4 magnetoresistências anisotrópicas.

Tab. 2-4 Tipo de magnetómetros e gama de utilização [25]

Tecnologias	Intervalo de detecção em Gauss				
	10 <sup>-8</sup>	10 <sup>-4</sup>	1	10 <sup>4</sup>	10 <sup>8</sup>
Squid	■	■	■	■	■
Fibra óptica		■	■	■	
Bomba óptica		■	■	■	
Precessão nuclear		■	■	■	
Bobina buscadora		■	■	■	■
Campo magnético terrestre			■	■	
Magneto resistência anisotrópica		■	■	■	
Barreira de fluxo		■	■	■	
Transistor magnético			■	■	
Díodo magnético				■	■
Sensor magneto óptico				■	■
Resistência magnética gigante			■	■	■
Sensores a efeito de Hall				■	■

Citam-se as seguintes tecnologias:

1. Squid, *Superconducting QUantum Interference Device* - medem a intensidade de um campo de 1 fempto-Tesla até 10 Tesla, ou seja respectivamente 10<sup>-9</sup> até 10<sup>6</sup> Gauss. Requerem materiais supra condutores e um sistema de arrefecimento muito eficiente;
2. Fibra óptica - coberta com componente sensível ao magnetismo. Sofre variação de potência luminosa quando é submetida a um campo magnético;
3. Precessão nuclear - utilizado em medicina, possui sensores muito estáveis mas dispendiosos;
4. Bobinas buscadoras – servem para determinar campos magnéticos variáveis ou rotativos. Sensores económicos e de fácil realização. Precisa de alimentação energética permanente e é difícil de integrar;
5. Barreira de fluxo – sensores mais comuns utilizados por exemplo nas aplicações de compasso magnético. Um sinal harmónico induz num núcleo ferromagnético um campo que por a sua vez induz uma corrente numa outra bobina usada para a medição. O campo magnético externo tem uma influência na indução e o seu valor é extraído por detecção de fase e comparação de potência. Estes sensores são pouco integráveis e precisam de alimentação permanente;
6. Sensores MRA - a tecnologia de detecção de variações do CMT utiliza sensores MRA, magnetoresistência anisotrópica. O fenómeno de variação da resistência de alguns componentes sensíveis ao campo magnético foi descoberto em 1856 por Lord Kelvin e precisou de um século para iniciar a sua exploração. As cabeças de leitura de discos rígidos de computadores utilizam este efeito. Estes componentes são mais económicos e integráveis e são constituídos por uma ponte de *Wheatstone* com magnetoresistências

em *Permalloy* depositadas sobre Si, Silício. O *Permalloy* é uma liga com 70%-90% Ni (Níquel) e o restante principalmente de Fe (Ferro) que recebe um tratamento térmico especial e a sua propriedade principal é ter uma permeabilidade magnética relativa de 8000 e absoluta de  $10^{-4}$  [H/m ou  $\text{NA}^{-2}$ ] e de ter uma MRA quando os seus domínios magnéticos são alinhados.

De todas as tecnologias disponíveis, as magnetoresistências apresentam o mais baixo custo, uma reduzida dimensão e baixo consumo, tipicamente 10 mA por direcção de sensibilidade magnética. A gama de sensibilidade inclui o campo magnético da Terra pelo que permite dispensar a produção de um campo magnético artificial. Os filmes de *Permalloy* utilizados nas magnetoresistências apresentam as seguintes propriedades:

- Baixa coercividade – não há efeito de histerese, embora seja necessário remagnetizar regularmente porque perdem rapidamente a sua anisotropia;
- Magnetostrição igual a zero – não há variação de dimensão do material quando existe variação do campo magnético. Como o sensor utiliza filmes de *Permalloy* muito finos, esta propriedade é essencial para a durabilidade dos componentes;
- Magnetoresistência anisotrópica – quando o campo magnético varia, o filme de *Permalloy* tem a sua resistência que varia em função da sua orientação no campo magnético. A variação de resistência em função da orientação pode alcançar uma diferença de 50% do valor diferencial de saída do componente;
- Componente completamente resistivo, ou seja, a sua impedância é real e pode ser utilizado com frequência elevada, p.e. até 5 MHz, sem alteração de propriedades [26]. Esta qualidade permite alimentar o componente por breves períodos, para as medições, sem introduzir uma distorção do sinal digitalizado.

Pelas razões apresentadas, este foi o magnetómetro seleccionado para o presente projecto.

### 2.3.2 Insígnia de barbeiro

O sensor com magnetoresistência anisotrópica adopta uma ponte de *Wheatstone* constituída por dois divisores de tensão. Esta multiplica por dois a sensibilidade das variações observadas, permite detectar o campo magnético em função da sua orientação e alimenta, diferencialmente, um AmpOp, amplificador operacional. Desta forma uma grande parte do ruído electromagnético é filtrado. Esta estrutura é vulgarmente chamada de «insígnia de barbeiro».

Cada divisor de tensão tem duas magnetoresistências constituída por vários elementos em *Permalloy*, p.e. seis elementos apresentados na Fig 2-3. Eles são orientados em ângulo recto relativamente aos elementos da outra resistência. Quando o campo magnético é orientado para obter resistência máxima numa das resistências, a sua congénere terá uma resistência mínima. O ponto central do divisor de tensão varia de maneira linear. O segundo divisor tem uma simetria em espelho relativamente ao primeiro divisor e comporta-se de maneira inversa duplicando a sensibilidade. A tensão de saída é proporcional à variação da magnetoresistência.

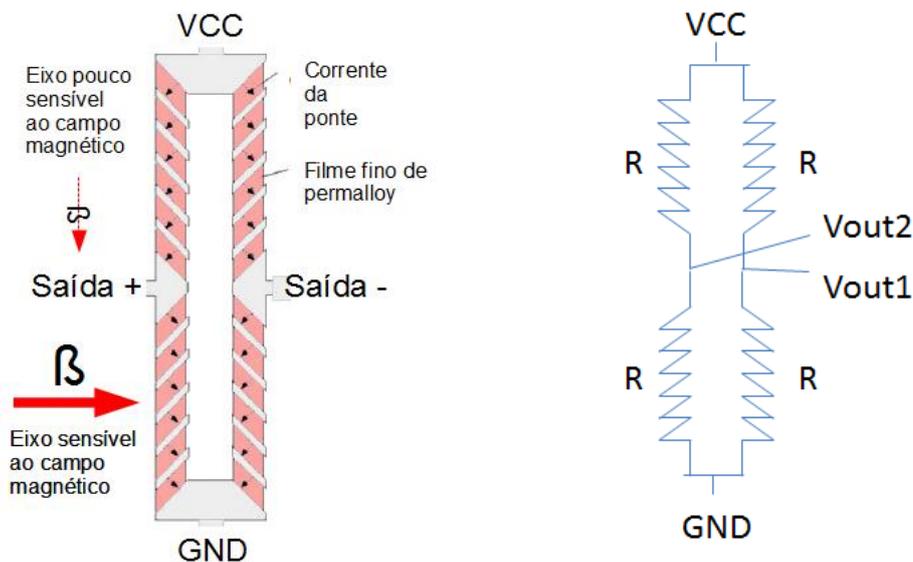


Fig. 2-6 Insígnia de Barbeiro.

Onde temos:

- $V_{CC}$ , *Voltage Common Collector*, alimentação eléctrica, tipicamente de 3 até 15 V;
- $R$  valor do elemento resistivo em *Permalloy* da ponte de *Wheatstone*, na ausência de campo magnético;
- $V_{out1}$  e  $V_{out2}$ , tensões de saída da ponte de *Wheatstone*;
- $V_{dif}$  é a tensão diferencial entre os dois pontos de saída  $V_{out1}$  e  $V_{out2}$ .

Na ausência de campo magnético externo, temos:

$$V_{out1} = V_{out2} = \frac{R}{R + R} \times V_{CC} = \frac{V_{CC}}{2} \quad (2.1)$$

Ou seja, um  $V_{CC}$  de 3.3 V cria uma tensão  $V_{out1}$  de 1,65 V, uma voltagem adequada para uma conversão analógica digital que se realiza entre  $V_{CC}$  e a massa,  $GND$ . A voltagem

diferencial é nula na ausência de campo magnético, o que não acontece na Terra. Existe portanto sempre uma voltagem diferencial porque as resistências vão tomar valores diferentes função da sua orientação no CMT. Quando um campo magnético externo influencia o componente, cada resistência perde ou ganha uma variação de resistência de valor absoluto igual a  $\Delta$ , em Ohm:

$$V_{out1} = \frac{R + \Delta}{R + \Delta + R - \Delta} \times VCC = \frac{R + \Delta}{2R} \times VCC = \left(\frac{1}{2} + \frac{\Delta}{2R}\right) \times VCC \quad (2.2)$$

$$V_{out2} = \left(\frac{1}{2} - \frac{\Delta}{2R}\right) \times VCC \quad (2.3)$$

A diferença de tensão entre  $V_{out1}$  e  $V_{out2}$  é igual a:

$$V_{dif} = (V_{out1} - V_{out2}) = \frac{\Delta}{R} \times VCC \quad (2.4)$$

Paralelamente, a fórmula que o fabricante apresenta na sua *application note* 218 [27] permite identificar a sensibilidade, o campo magnético aplicado e a variação de resistência:

$$V_{dif} = (V_{out1} - V_{out2}) = S \times B_s \times V_{cc} \quad (2.5)$$

Onde  $S$  e  $B_s$  são:

- $S$  a sensibilidade magnética em mV/V/Gauss;
- $B_s$  o campo magnético aplicado em Gauss.

Combinando (2.4) e (2.5) obtém-se:

$$\frac{\Delta}{R} = S \times B_s \quad (2.6)$$

A variação em Ohm de  $\Delta$  criada pelo CMT é relativamente pequena. Por exemplo, o componente HMC1002 da Honeywell tem uma sensibilidade nominal de 3,2 mV/V/Gauss, ou seja, 3,2 mV de variação para 1 V aplicado à ponte de *Wheatstone* ( $V_{cc}$ ) e um Campo Magnético externo de 1 Gauss. Com  $V_{cc}$  igual a 3,3 V e o valor do CMT de 0,5 Gauss, obtemos uma tensão diferencial de 5,28 mV, utilizando para o cálculo a equação (2.5). As variações criadas pela passagem de um veículo no CMT são tipicamente de  $\pm 0,7$  Gauss e o componente gerará, portanto, uma variação de [2,1..12,7] mV em redor do CMT sem correcção de *bias* ou  $\pm 7,4$  mV com correcção.

## Estado da arte

A precisão do magnetómetro publicada no descritivo do HMC1002 da Honeywell [26] é de, no máximo, 0,5% e tipicamente, 0,1%, da FS, *Full Scale*, de [-1..1] Gauss, o que é muito inferior aos erros gerados pela incerteza da posição de passagem do veículo acima do sensor, pela influência aleatória das peças moveis (pistões, alternador), dos objectos ferromagnéticos transportados, diferentes de veículo a veículo, do número de passageiros e ainda pelas pequenas variações existentes entre veículos do mesmo modelo. No entanto, esta precisão abre outras aplicações para além da detecção do modelo do carro, tal como a imagiologia magnética de baixo custo.

É necessário retirar à tensão diferencial de saída  $V_{dif}$ , um *bias* para contrabalançar o valor médio do CMT e aplicar uma forte amplificação para o adaptar à escala de tensão [0.. $V_{CC}$ ] esperada pelo microprocessador nos pins de entrada.

O *bias* é o desvio do valor diferencial de saída em relação ao meio da escala,  $V_{CC}/2$ , criada pelo CMT. Na ausência de CMT, o *bias* é nulo. O ganho de amplificação calcula-se a partir do valor máximo desejado para manter as assinaturas na gama de tensão seleccionada, que deverá ser igual ou inferior a  $V_{CC}$ . Este ganho é decidido heurísticamente.

Temos portanto a seguinte fórmula:

$$V = (V_{dif} - V_{bias}) \times G \quad (2.7)$$

Onde

- $V$  é a tensão de saída depois da correcção do *bias* e amplificação;
- $G$  é o ganho de amplificação;
- $V_{bias}$  é a tensão diferencial que é medida quando não existe variação do CMT;

O magnetómetro não entra em saturação pelas variações de tensão porque estas oscilam em redor do valor de saída  $V_{CC} / 2$  de  $\pm 20$  mV para a FS de [-2..2] Gauss. A saturação advém porém quando o campo magnético exterior varia acima de um valor de  $\pm 2$  Gauss [26], ocorrência possível com um carro blindado, frigorífico, eléctrico ou camião. O procedimento de Set / Reset reinicia o sensor depois desta perturbação que mesmo assim consiste numa assinatura magnética válida e suportada pelos algoritmos desenhados neste projecto.

Assim, no exemplo apresentado anteriormente, o *bias* é de 5,28 mV, a tensão diferencial máxima de saída de  $\pm 7,4$  mV com correcção de *bias*, ou seja [0..14,8] mV de variação, e o ganho seria portanto de 203 para obter a tensão máxima de 3 V. O fabricante recomenda

um ganho de 150 para a digitalização de assinatura magnética e 300 para a simples contagem de veículos [28].

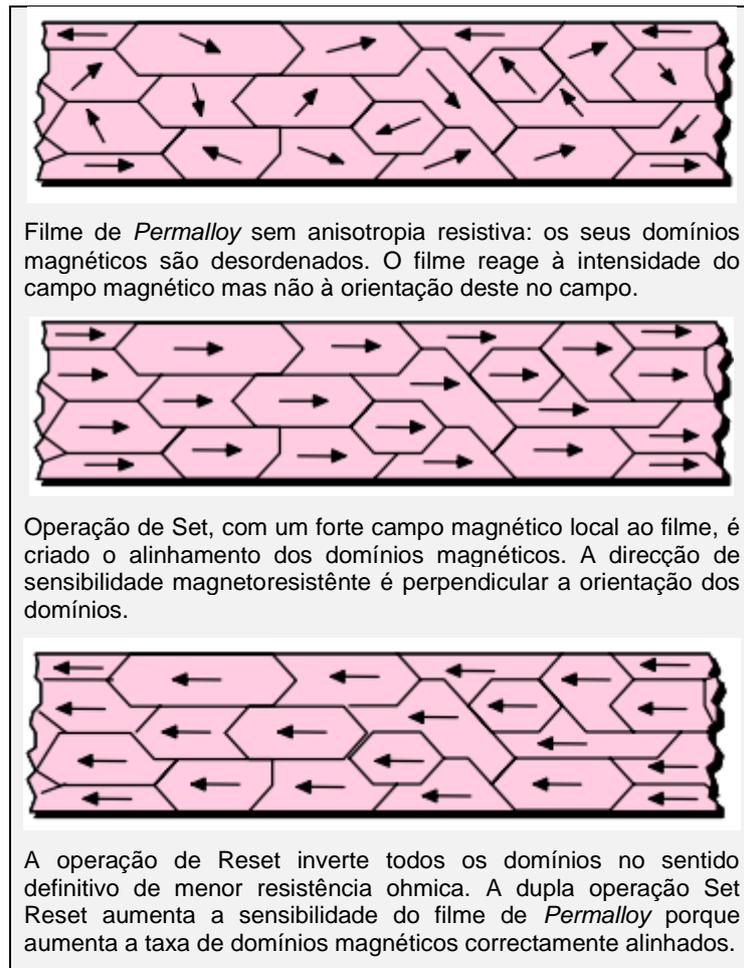
O valor do *bias* deve ser detectado por *firmware* com base no valor do CMT e corrigido, automaticamente, com recurso a um potenciômetro digital.

O valor do ganho pode ser um parâmetro configurável, através da estrutura de configuração enviada pelo servidor ao eq-sensor que, por sua vez, recorre a um potenciômetro digital. O ganho depende da orientação do sensor no CMT e esta é diferente em cada local de instalação.

O sensor magnético, por ser orientado no sentido do tráfego rodoviário, vê a sua sensibilidade variar numa gama de [50..100]% em relação à sua sensibilidade máxima. Esta ocorre com a orientação paralela às linhas de força do CMT. Isto implica que o ganho fixo terá respostas variáveis segundo o local de instalação, na ordem de um para dois. Um outro factor de variação de sensibilidade do sensor é a intensidade do CMT, que varia segundo o local de instalação, o período do dia, do ano, e as condições atmosféricas, pelo que não existe um valor optimizado que possa aproveitar a FS. Por esta razão o fabricante recomenda um ganho de apenas 150 enquanto o cálculo do nosso exemplo típico apresenta um ganho de 203. As variações referidas mostram, claramente, que as assinaturas de um mesmo veículo obtidas por eq-sensores sujeitos a diferentes envolventes terão uma amplitude sempre diferente. Esta diferença de amplitudes implica que o SA realize uma operação de normalização. Nota-se que as assinaturas têm sempre a mesma forma, ou seja, os eq-sensores produzem uma família de curvas congruentes entre si. A congruência entre duas curvas existe se uma pode ser transformada na outra por uma relação de isometria tal como a multiplicação da amplitude ou do número de amostras por um factor inteiro (translações), sendo que os factores não lineares, as rotações e reflexões não são aplicáveis no âmbito do tratamento posterior das assinaturas pelo SA.

### 2.3.3 Magnetoresistência anisotrópica

A diferença de resistência dos filmes de *Permalloy* segundo uma determinada orientação, ou seja o carácter anisotrópico da resistência, é obtida por orientação permanente dos seus domínios magnéticos, no sentido da menor resistência desejada. Esta orientação se perde com a passagem de veículo e o escoar do tempo, e deve ser recriada periodicamente com uma operação de Set / Reset [28] e que ilustra-se na representação a seguir:



**Fig. 2-7** Ordenação dos domínios magnéticos dos filmes de *Permalloy* com Set / Reset

Para calibrar o sensor, o componente seleccionado dispõe de bobinas internas por cada resistência em *Permalloy* que permitem gerar dois intensos campos magnéticos por elemento resistivo pelas operações de *Set* e *Reset*, de polaridade opostas e de elevada potência. Os campos magnéticos induzidos devem ser em redor de 40 Gauss [28]. Esta operação reordena os domínios magnéticos dos filmes de *Permalloy* e recria a anisotropia magnetoresistiva paralela a direcção dos domínios magnéticos. As bobinas miniaturas requerem uma corrente de 3 A durante um tempo muito curto, tipicamente 2  $\mu$ s por impulso. Para um fluxo de 1 veículo por segundo o que é aproximadamente o fluxo de tráfego intenso de uma via de uma auto-estrada, o consumo médio das operações de *Set* e *Reset* representa 6  $\mu$ Ah, o que não torna esta operação de calibragem prejudicial ao balanço do consumo energético. A operação de *Set Reset* não afecta as medidas, porque esta operação se realiza a seguir à digitalização completa da assinatura magnética.

A an213 [28] menciona que a operação de *Set Reset* deve ser realizada apenas quando o sensor foi submetido a um campo magnético exterior superior a 10 Gauss. O firmware pode portanto optimizar esta operação que pode ser realizada periodicamente e também quanto

se detecta uma assinatura magnética que saturações. Por outro lado, só a operação periódica de *Set Reset* garante a taxa de erro de 0,5% e o baixo factor de influencia entre eixos de sensibilidade magnética ortogonais, *Cross Axis effect*, de 0,5%.

## 2.4 Alimentação solar

O dimensionamento da célula solar ou do painel é um tema de grande experimentalismo. Uma atenção especial foi dedicada nesta tese a elaborar um modelo que se baseia em dados estatísticos de meteorologia, geografia e rendimentos de conversão que decorrem da construção do eq-sensor. Estes factores não podem ser desprezados sob pena de não ser possível garantir o funcionamento permanente do módulo, todos os dias do ano em todos os locais de instalação.

### 2.4.1 Modelo para o cálculo da superfície do painel solar

O método de cálculo da superfície mínima do painel solar se baseia nos seguintes parâmetros:

- $P_r$ : potência de radiação solar expectável no local e mês de menor insolação do ano;
- $r_{trc}$ : rendimento de conversão devido a temperatura, reflexão e conversão DC-DC;
- $R_{dir}$  e  $R_{ind}$ : influência dos componentes de radiação solar directa e indirecta;
- $r_h$ : rendimento de conversão devido a posição horizontal do eq-sensor;
- $r_j$ : rendimento de conversão ocasionado pela janela do eq-sensor;
- $f_o$ : rendimento de conversão devido ao factor de ocultação criado pelos veículos;
- $f_c$ : rendimento de conversão das células fotovoltaicas;
- $P_c$ : potência captável que corresponde a  $P_r$  menos as perdas;
- $P_n$ : potência necessária definida pelo modelo de consumo energético do eq-sensor;
- $S_{up}$ : superfície mínima do painel solar que propõe o modelo.

$P_{rad}$  e  $P_c$  são expressos em Wh/m<sup>2</sup>/dia,  $P_n$  em expressa em Wh e  $S_{up}$  em m<sup>2</sup> e todos os outros factores são percentagens. Os rendimentos de conversão são iguais a 100% menos as perdas ou são valores publicados.

$$S_{up} = \frac{P_n \times 24}{P_c} \quad (2.8)$$

$$S_{up} = \frac{P_n \times 24}{P_r \times r_{trc} \times ((R_{dir} \times r_h) + R_{ind}) \times r_j \times f_o \times f_c} \quad (2.9)$$

O uso deste modelo implica determinar as várias perdas com os dados de meteorologia, geografia, de construção do eq-sensor, do tráfego máximo expectável e das características das células fotovoltaicas a utilizar. Com estes parâmetros, se pode calcular a potência captável,  $P_c$  por hora e metro quadrado, sendo este valor uma média diária de 24 horas.

Por outro lado, será preciso calcular  $P_n$ , a potência necessária média por hora de um funcionamento diário de 24 horas, com o modelo de consumo do eq-sensor. Modelo é apresentado no parágrafo: 3.4 Modelo de consumo energético.

Com a potência necessária  $P_n$  e a potência captável  $P_c$ , é calculada  $S_{up}$ , a superfície mínima recomendada para o painel solar. No próximo parágrafo, determinam-se todas as perdas que permitem de calcular  $P_c$ , justificando cada parâmetro do modelo.

### 2.4.2 Determinação da potência mínima captável

O detalhe do cálculo com as escolhas geográficas e meteorológicas, é apresentado no Anexo E. Apresenta-se na Tab. 2-5, a súmula destes cálculos.

**Tab. 2-5 Modelo de cálculo da superfície de um captor solar**

Calculo de $\eta$ , o rendimento total de conversão				Perdas	Potência	Unidade
No mês de menor irradiação solar, média diária				0%	2380	[Wh/m <sup>2</sup> /dia]
Perdas do sistema de conversão e armazenamento				30%	1666	
Perdas pela inclinação horizontal do eq-sensor num período de grande nebulosidade	directa	37,50%	625	72%	181	
	indirecta	62,50%	1041	0%	1041	
	Total			27%	1222	
Perdas por reflexão, absorção e sujidades na janela do eq-sensor				30%	856	
Factor de ocultação do eq-sensor pelo tráfego em andamento				7,5%	792	
Perdas conversão fotovoltaica com células de alto rendimento				85%	119	
Perdas conversão fotovoltaica com células de baixo rendimento				92%	63	

Cálcula-se a partir destes dois últimos resultados e da irradiação solar inicial seleccionada o rendimento total de conversão apresentado na Tab. 2-6.

**Tab. 2-6 Rendimento total de conversão**

Rendimento total de conversão a partir da irradiação solar	$\eta$
Rendimento total de conversão com células Si monocristalino	5,0%
Rendimento total de conversão com células Si amorfo	2,7%

Foi seleccionado a região de Vila Real e o mês de Dezembro como local e período de menor irradiação solar por ano no território português. Por isso, o cálculo inicia com o valor de 2380 Wh/m<sup>2</sup>/dia que corresponde a irradiação solar neste local durante este período. O eq-sensor tem o seu painel solar horizontal e por esta razão, foi calculado no Anexo A, a influência da inclinação na luz directa sobre o eq-sensor em posição horizontal. O factor de ocultação do eq-sensor pelos veículos se torna importante para valores elevados de tráfego rodoviário e este fenómeno foi tomado em consideração no modelo. A influência do rendimento das células solares é também um parâmetro relevante e o progresso tecnológico na captação fotovoltaica da energia solar concorre para aumentar a rentabilidade do sistema. As células de Si monocristalino têm um rendimento superior a 15% mas as dimensões disponíveis iniciam à partir de 12 cm de diâmetro. As células de Si amorfo e policristalino com rendimento a partir de 8% são disponíveis em dimensões mais pequenas e em projecto industriais, podem ser fabricadas com medidas específicas.

A potência captável  $P_c$  para uma potência radiada  $P_r$  de 2380 Wh/m<sup>2</sup>/dia durante o mês de Dezembro em Vila Real, é de 119 Wh/m<sup>2</sup>/dia com células fotovoltaicas de Si monocristalino e de 63 Wh/m<sup>2</sup>/dia para células de menor rendimento. O rendimento de conversão do eq-sensor com o captor fotovoltaico horizontal e células de Si monocristalino é de 5% e com células policristalino ou amorfo é de 2,7%.



## 3 Solução

O eq-sensor deve detectar a passagem de um veículo e digitalizar a sua assinatura magnética com base na variação do CMT. De seguida deve enviar, em tempo real, a assinatura magnética digitalizada que permite contar os veículos e retirar o máximo de informação de identificação sobre o número de eixos, tipo e marca de veículo, tamanho, entre outras características. Esta identificação, fora do âmbito desta tese, deverá ser efectuada por correlação com assinaturas magnéticas anteriormente recolhidas, classificadas manualmente e associada cada uma à uma ficha de modelo de veículo na base de dados do SA.

### 3.1 Esquema bloco da solução

A solução é composta por vários blocos lógicos na Fig 3.1, com funções próprias e interfaces entre si. Por um lado o eq-sensor tem uma função analógica de medida do campo magnético envolvente, por outro, ele tem uma função de conversão ao formato digital desta informação analógica e de processamento destes dados. Finalmente, o bloco rádio é constituído por um transceiver que se encarrega das comunicações sem fios. A função de alimentação e autonomia energética é assegurada pelo bloco energético. Por além de ter um número reduzido de interface, os blocos têm uma operação não permanente e podem ser suspensos para economizar o consumo energético do sistema quando não são precisos.

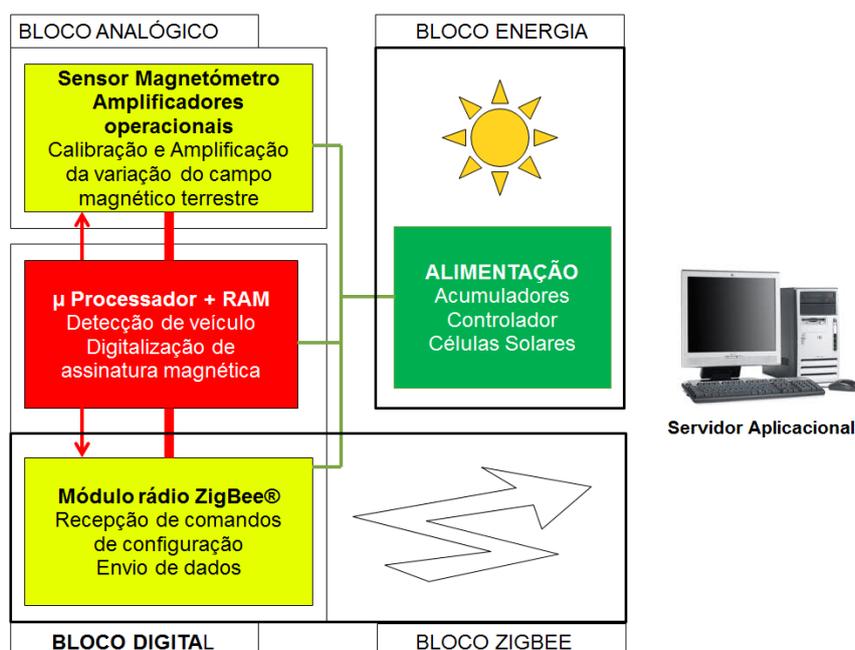


Fig. 3-1 Blocos lógicos da solução do eq-sensor

## 3.2 Arquitectura

Os requisitos fundamentais da arquitectura foram elaborados para cumprir com um conjunto de características que um produto ideal terá. Pretende-se otimizar a arquitectura com base nos seguintes critérios:

- Autonomia energética (período de tempo sem intervenção técnica para troca de pilha, de baterias recarregáveis ou do hipercondensador);
- Sem manutenção;
- Longa vida útil;
- Informação em tempo real;
- Comunicações sem fios;
- Pequena dimensão.

Parte destes requisitos são cumpridos com a selecção adequada dos componentes. A autonomia energética e a autonomia do eq-sensor dependem do funcionamento da solução, ou seja, do circuito electrónico seleccionado. A arquitectura procura otimizar a poupança energética. Esta depende de três factores:

1. Tráfego rodoviário;
2. Ritmo de envio de dados na rede sem fios;
3. Arquitectura electrónica do eq-sensor.

O tráfego rodoviário é um parâmetro externo e que não pode ser adaptado.

O ritmo de envio de dados na rede sem fios é proporcional ao número de assinaturas a enviar. A norma ZigBee tem um excesso (*overhead*) de potência gasta para cada início de transacção durante o qual é solicitada a associação do eq-sensor à rede. Este excesso é significativo quando os dados a enviar são constituídos por poucos pacotes de dados, por exemplo, a assinatura de uma viatura de 5 metros com 10 amostras por metro de veículo cabe em 80 bytes, ou seja, num pacote ZigBee. Com um protocolo simplificado, p.e. o *Stack SIMPLICITI* da Texas Instruments, que permite eliminar a associação prévia e autoriza o envio imediato e não solicitado de pacotes de dados, o envio de assinaturas é mais rápido e eficaz. Neste caso, o envio agrupado de assinaturas ou isolado tem o mesmo custo energético. Com o protocolo ZigBee, o *overhead* de associação torna mais económico o envio agrupado de assinaturas.

O envio agrupado tem no entanto um conjunto de problemas que o tornam pouco atraente, tais como:

- O eq-sensor deve funcionar em tempo real, no entanto o envio agrupado introduz atrasos;
- A memória disponível no componente seleccionado é no máximo de 8 kBytes de RAM sendo que o Stack ZigBee utiliza praticamente 6 kBytes e não permite criar uma fila de espera com várias assinaturas;
- A acumulação de assinaturas pode conduzir a uma situação de bloqueio: na altura de enviar muitos dados podem existir veículos próximos. Esta situação resolve-se com a perda de detecção de um veículo ou o cancelamento dos envios em curso e limpeza da fila de espera. Nos dois casos, perde-se informação. O modelo de envio em tempo real aproveita o tempo que existe entre dois veículos para enviar a assinatura e por isso anula o cenário de perda de informação.

Por estas razões, o envio em tempo real depois da digitalização da assinatura de um carro foi seleccionado como método de envio das assinaturas não existindo portanto implementação no *firmware* do envio agrupado e diferido.

A optimização energética concentra-se na arquitectura electrónica do eq-sensor. Esta admite 4 modelos:

1. **Sem optimização:** todos os componentes são sempre alimentados ficando apenas ao  $\mu$ P a possibilidade de controlar por *firmware* a poupança de energia do seu módulo rádio. Esta arquitectura serve de referência para avaliar a performance da poupança em energia das outras arquitecturas;
2. **Por interrupção.** O bloco analógico incluindo o magnetómetro, associado a um conjunto de AmpOp seguem em permanência a variação do CMT e geram uma interrupção quando esta ultrapassa um patamar (*threshold*) que assinala a passagem de um veículo. Utiliza-se uma operação diferencial positiva ou negativa. O  $\mu$ P, *Central Processing Unit*, em estado adormecido (*sleeping state*), é activado pela função de interrupção configurada para um dos seus PIN de entrada. O  $\mu$ P pode ter, em paralelo, um contador de despertar para executar tarefas de manutenção periódicas. A poupança reside na suspensão da actividade do  $\mu$ P durante as pausas sem veículo mas o bloco analógico com o magnetómetro e os AmpOps que geram a interrupção, devem ser alimentados permanentemente;
3. **Chopper.** Esta arquitectura procura melhorar a arquitectura 2) Por interrupção, criando um ciclo de trabalho / repouso sobre o magnetómetro e dos AmpOps. Um *chopper*

## Solução

controla o ciclo activando / desactivando a alimentação do bloco analógico. A funcionalidade do bloco analógico permanece intacta em relação ao modelo 2).

4.  **$\mu$ P Mestre.** O microprocessador controla o consumo energético por via de ciclos de trabalho alternados por períodos de adormecimento de todos os componentes, incluindo ele próprio. O  $\mu$ P utiliza um contador de tempo de adormecimento que reactiva o  $\mu$ P na sua conclusão. O consumo do  $\mu$ P durante as pausas com o Power mode 3 é de 1  $\mu$ A. O tempo de despertar é de 100  $\mu$ s o que é sustentável porque a duração mínima do ciclo de trabalho de detecção neste projecto é de 2 ms para  $V_{max}$ , a velocidade máxima de detecção, igual a 180 km/h e  $N_A$ , o número de amostras por metro do comprimento do veículo, igual a 10.

A arquitectura  $\mu$ P Mestre passa por vários estados dos quais se destacam:

- A detecção do veículo;
- A digitalização da sua assinatura magnética;
- O envio desta informação via comunicações sem fios ao SA;
- A magnetização dos filmes de *Permalloy* do magnetómetro, se houver necessidade.

No primeiro estado, para detectar o início de passagem de um veículo, o  $\mu$ P deve tirar periodicamente amostras da tensão diferencial de saída e testar se a condição de início de veículo é preenchida. Este estado se caracteriza pela frequência de amostragem de detecção que depende de  $V_{max}$  e  $N_A$ . O período de teste de uma amostra tem uma fase activa de processamento seguido de uma pausa de adormecimento que deve durar a maior percentagem deste tempo.

No segundo estado, é realizada uma estimativa da velocidade do veículo  $V_{esti}$  e o ritmo de amostragem de digitalização é função de  $V_{esti}$  e  $N_A$ , será inferior ou igual ao precedente. Neste caso, o período de adormecimento será superior ou igual a duração da pausa do estado de detecção.

O terceiro estado concentra as comunicações sem fios entre o eq-sensor e o coordenador. A duração do terceiro estado depende da quantidade dos dados que foram digitalizados. Os dados são enviados fragmentados numa sequência de pacotes com controlo de erro assegurado pela camada de rede ZigBee. Segue um procedimento de resposta a eventuais comandos enviados pelo SA ao eq-sensor. Só neste terceiro estado é activada a interface rádio do SoC. Esta interface tem um alto consumo energético, entre 23 mA e 34 mA, segundo a potência de emissão do eq-sensor e a minimização da duração deste estado é essencial para a gestão energética eficiente.

O último estado é muito curto e requer apenas a activação do circuito de Set / Reset do sensor caso existir a necessidade para isso.

Para os 4 estados existem soluções de optimização por *firmware*. Esta arquitectura é a mais versátil porque é completamente controlada por *firmware* e não requer uma electrónica analógica de decisão como na arquitectura por interrupção nem um circuito de chopper para criar um ciclo de trabalho / repouso, e é a mais promissora do ponto de vista da eficiência energética.

### 3.2.1 Estimativa do consumo energético

Utiliza-se como referência uma poupança de 90% com os ciclos de trabalho e um tráfego de 1 veículo seguido de um espaçamento de 9 vezes a sua dimensão, por exemplo, um veículo de 5 metros separado de 45 metros pelo seguinte veículo. Com este cenário médio, todos os blocos funcionais são solicitados e o sistema é submetido a um funcionamento que é adequado para comparar as diferentes arquitecturas como apresentado na Tab. 3-1.

Tab. 3-1 Consumo energético dos diferentes blocos do eq-sensor

Arquitectura	Bloco Analógico Magnetómetro e AmpOp [mA]	Bloco Digital µP [mA]	Bloco Digital Módulo rádio ZigBee [mA]	Total Estimativa [mA]	Classificação
Sem Optimização	20	10	29	49	4
Por Interrupção	21	1	2,9	23,9	3
Chopper	2,5	1	2,9	6,4	2
µP Mestre	2	1	2,9	5,9	1

As várias arquitecturas, na Tab. 3-1, diferenciam-se pelo uso do ciclo de trabalho / repouso e a capacidade de adormecimento parcial ou total dos seus blocos funcionais.

- **Sem optimização:** consumo máximo, todos os blocos do eq-sensor são sempre activos;
- **Por interrupção:** o bloco analógico é sempre activo e controla os tempos de actividade do µP e do bloco rádio. Mesmo se existir um baixo tráfego rodoviário, o bloco analógico requer sempre 20 mA e os AmpOps do circuito de interrupção 1 mA. Nesta simulação, o µP e o bloco rádio são activos em média 10% do tempo;
- **Chopper:** é introduzido um ciclo de trabalho no bloco analógico que, nesta simulação, é apenas activo 10% do tempo. 0,4 mA suplementares servem para alimentar o chopper;

## Solução

- **µP Mestre:** o µP controla o adormecimento dos outros blocos e dele próprio: a poupança é idêntica à arquitectura Chopper sem o circuito suplementar para controlar o bloco analógico.

A arquitectura µP Mestre otimiza mais o consumo energético porque por além de comandar por *firmware* a suspensão dos outros blocos, o µP comanda periodicamente o seu próprio adormecimento.

### 3.2.2 Análise de desempenho: complexidade

A definição que é dada da complexidade na Tab. 3-2, nesta comparação entre arquitecturas, se baseia no número de componentes discretos e na complexidade estimada do *firmware* relativamente a arquitectura «Sem Optimização». Como a solução procurada deve ter um preço competitivo, o critério de complexidade é relevante. A complexidade do *firmware* é de menor importância embora pode indiciar um aumento do consumo energético via um maior processamento e pausas mais pequenas de adormecimento.

Tab. 3-2 Avaliação da complexidade das arquitecturas

Arquitectura	Magnetómetro	AmpOp	Potenciómetro digital	Chopper 555	Interruptor MosFet	firmware	Total	Classificação
Sem Optimização	1	2	1	0	0	1	5	1
Por Interrupção	1	4	3	0	0	1	9	3
Chopper	1	4	3	1	1	1	11	4
µP Mestre	1	2	1	0	1	2	7	2

A seguir comentam-se os resultados da complexidade:

- **Sem Optimização:** Somente requer o mínimo de componentes e consegue por *firmware* suspender o Bloco Rádio;
- **Por Interrupção:** Requer um circuito analógico que determina o patamar (*threshold*) que desencadeia a interrupção com base nas variações em valor absoluta da tensão diferencial de saída do bloco analógico, em redor do CMT. O valor do CMT é calculado pelo µP e configurado via dois potenciómetros digitais. Este circuito é complexo e, a priori, não é demonstrado que ele não apresenta estados em quais bloqueia o µP. Se o

CMT é mal configurado, o circuito é incapaz de gerar a interrupção. O *firmware* deve implementar um contador do tipo cão-de-guarda (*Watchdog timer*) para precaver esta situação. Este contador não é realizado com a instrução de Watchdog timer associada a uma interrupção e que faz o reset do  $\mu\text{P}$  8051 quando houver um período demasiado grande sem a sua reinicialização. Deve ser realizada com os contadores de despertar do sistema operativo.

- **Chopper:** a adição de um circuito para activar durante curtos períodos de medida o bloco analógico introduz vários problemas na concepção do circuito. O bloco analógico pode apresentar uma tensão no PIN da interrupção de despertar do  $\mu\text{P}$  somente quando ele é activo e estabilizado. Quando o bloco analógico se encontra adormecido, este PIN deve ser forçado para o nível de não interrupção. Uma complexidade bastante grande portanto para o efeito escontado.
- **$\mu\text{P}$  Mestre:** esta arquitectura somente requer um mínimo de componentes discretos. Para o controlo da alimentação do bloco analógico pode ser necessário um circuito de comutação entre a alimentação e o bloco analógico comandado por um PIN de saída do  $\mu\text{P}$ . Alternativamente, existem  $\mu\text{Ps}$  que oferecem PINs de saídas *Power* que podem alimentar periféricos com até 20 mA. A complexidade desta arquitectura reside no *firmware* que deve gerir a poupança energética com controlo dos ciclos de trabalho / adormecimento de todos os blocos do eq-sensor.

A classificação do critério de complexidade elege novamente arquitectura  $\mu\text{P}$  Mestre.

A arquitectura  $\mu\text{P}$  Mestre proporciona o consumo energético mais baixo e a menor complexidade na sua concepção electrónica. Deduz-se que esta arquitectura também oferece o custo de fabrico mais favorável. É esta arquitectura que foi seleccionada para o projecto.

### 3.2.3 Arquitectura $\mu\text{P}$ Mestre

Com base no estudo anterior, apresenta-se a arquitectura  $\mu\text{P}$  Mestre.

## Solução

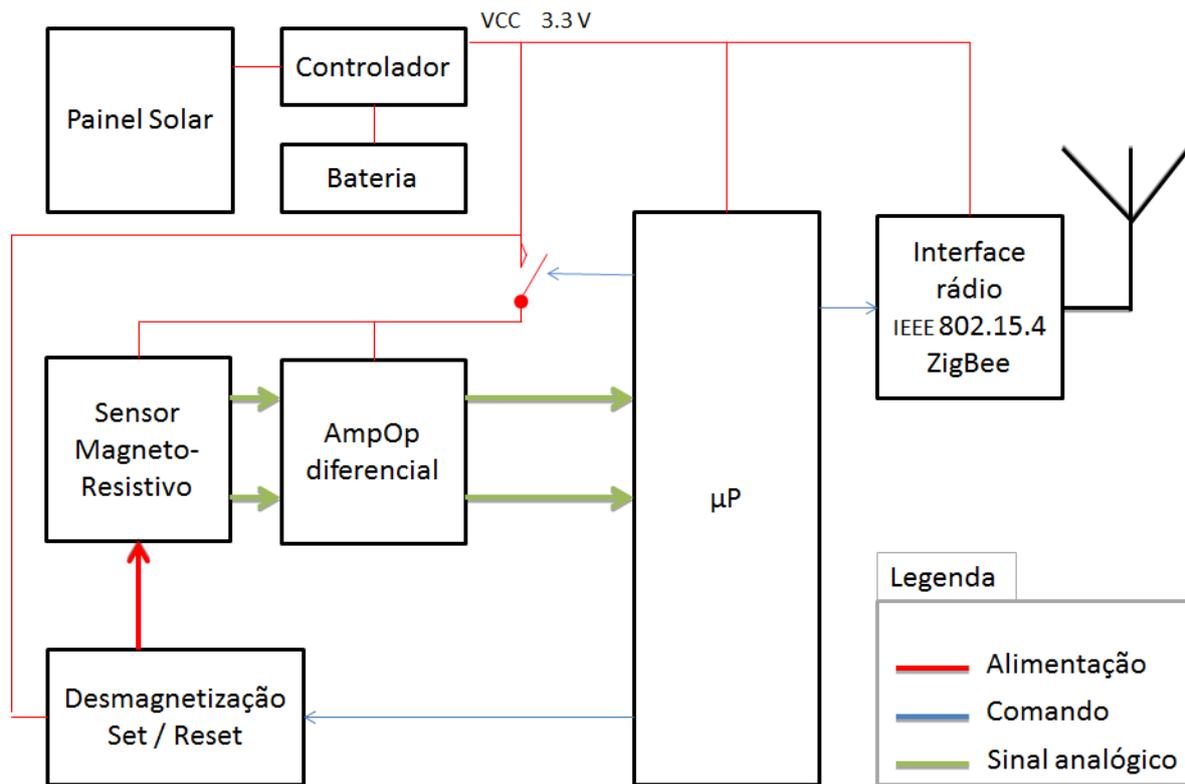


Fig. 3-2 Arquitectura µP Mestre

O µP controla todos os órgãos do eq-sensor.

- O módulo rádio é apenas activado no final de uma passagem de um veículo, depois da digitalização completa da sua assinatura magnética, para o seu envio em tempo real ao Coordenador da rede sem fios;
- O sensor magnetoresistivo e o seu bloco de acondicionamento de sinal é desligado da alimentação antes do µP adormecer;
- Quando o µP desperta, volta a alimentar o bloco analógico e logo a seguir digitaliza as entradas deste, depois do tempo de estabilização dos AmpOps de 100 µs;
- O próprio µP controla a sua poupança em energia por adormecimentos periódicos de curta duração, depois do adormecimento de todos os periféricos;
- O µP controla finalmente os impulsos de magnetização, Set/Reset do sensor por *firmware*, quando o valor do CMT apresenta um desvio em relação ao valor final da assinatura magnética ou sempre, segundo as versões do *firmware*.

Esta arquitectura requer a selecção de AmpOp com tempo de activação muito curto, tipicamente, inferior a 100 µs. O curto período de adormecimento do µP requer um código de *firmware* muito eficiente.

## 3.3 Componentes

### 3.3.1 Módulos ZigBee

Constituído, essencialmente, por um componente ZigBee / IEEE 802.15.4 e um *Stack* alternativo, e uma antena, o módulo pode também incluir um  $\mu$ P. Esta solução, ZigBee +  $\mu$ P, modular ou SoC, *System on a Chip*, constitui a maior parte da oferta no mercado. Muitos fabricantes autorizam que este  $\mu$ P seja programado para tarefas tais como a recolha de dados, conversão analógica digital e envio rádio. Existe também fabricantes que oferecem um interpretador que é composto por comandos «AT», similares aos comandos dos modems assíncronos.

Um subconjunto de produtos permite a programação de aplicações e inclusão destas no *Stack* ZigBee. Esta funcionalidade é preciosa para este projecto pois é necessário detectar o veículo, digitalizar a assinatura magnética antes de enviar os dados via rádio. Existe um processamento que não é oferecido pelos simples e estandardizados comandos «AT». As operações a realizar são sequenciais e as radio comunicações são apenas necessárias durante o estado de envio, o que permite suspender o *Stack* ZigBee durante os outros estados e concentrar os recursos de processamento para a aplicação do eq-sensor.

A disponibilidade do *Stack* ZigBee / IEEE IEEE802.15.4 é um denominador comum dos produtos seleccionados. A norma ZigBee permite aliviar a concepção dos elementos de rede tais como Routers e Concentrador que apenas deveriam ser configurados com o *firmware* do fabricante. Neste projecto, foi, no entanto, necessário desenvolver quase completamente o *firmware* do coordenador. A constituição da rede arborescente é automática ou desenhada por configuração com comandos apropriados. Não é preciso criar o *firmware* para estas importantes funcionalidades.

Existe portanto duas soluções:

- Recurso a componentes discretos com separação da parte rádio da parte de processamento ou
- Aquisição de um módulo SoC, *System on a Chip*, integrando um microprocessador programável e a interface rádio ZigBee / IEEE IEEE802.15.4.

A primeira solução pode utilizar componentes da FreeScale, Ember ou MicroChip. Os componentes adicionais são numerosos assim como os constrangimentos de desenho da interface entre o componente rádio, o microprocessador externo e o balún para adaptar a

## Solução

saída rádio à impedância de 50 ohms, típica das antenasna faixa dos 2,45 GHz. Na verdade, a realização de um módulo ZigBee + microprocessador é um projecto em si. No estudo do mercado, seleccionou-se apenas a solução da MicroChip que vende um módulo ZigBee sem microprocessador mas já com todos os componentes periféricos e um balún já calibrado e tem uma interface entre o módulo rádio e o microprocessador bastante simplificada via o bus I<sub>2</sub>C, *Inter-integrate circuit*. Se é preciso isolar o microprocessador da interface rádio, esta é uma solução de baixo custo e de rápido desenvolvimento.

A segunda solução SoC apresenta essencialmente a vantagem da integração e de diminuir fortemente o BoM, *Bill of Materials*. O ciclo de produção é mais curto. Se optar-se por um módulo com este chip e o seu balum e tomada para a antena, poupa-se um longo período de teste para a adaptação da impedância da saída rádio.

Em 2010, Atmel não tinha a sua oferta definida pelo que não ficou neste estudo. O *Stack ZigBee BitCloud™* é comercializado enquanto o sistema de desenvolvimento AVR Studio é gratuito.

De maneira geral, como mostra a Tab. 3-3, o preço da solução requer a aquisição de um licenciamento que varia entre 700 e 2100 €, sem IVA, segundo os fornecedores. A NXP-Jennic é uma excepção mas apresenta importantes dificuldades em termos de suporte e perenidade das soluções, um dos seus Chip LR-WPAN tendo sido descontinuado sem explicação ao mercado.

**Tab. 3-3 Custo dos sistemas de desenvolvimento e licenciamento do *Stack ZigBee***

Preços das soluções	ZigBee Stack [USD]	S.D. [USD]	Comentário
Texas Instrumento	Free	2800*	IAR, experiencia de uso no ISEL
NXP-Jennic	Free	free	O chip principal da gama foi descontinuado
Microchip	995	free	Sem resposta dos vários revendedores e do fornecedor
Ember	Free	3000	IAR
FreeScale	Free	3000	CodeWarrior

(\*) desconto de 50% para Universidade mas sem o direito de comercialização. SD, Sistema de Desenvolvimento.

A fonte de procura dos fornecedores foi a Internet, o conhecimento prévio da solução da Texas Instruments por via dos módulos Cirronet do ISEL e a minha própria experiência nos módulos da NXP/Jennic.

Tab. 3-4 Fornecedores de Componentes ZigBee

Fabricante	Marca	Módulo	Transceiver e SoC
ATMEL	Meshnetics	MNZB-24-B0	AT86RF230
NXP	Jennic	JN5148-001-M00/03	JN5148
NXP	Jennic	JN5149-001-M00/03	JN5149
DiGi	Maxstream	Xbee ZB XB24-Z7CIT-004	EMBxxx
Telegesis	Telegesis	ETRX2	EMB357
MicroChip	MicroChip	MRF24J40MA	MRF24J40
TI	TI	CC2430F128RTC	cc2430
TI	TI	cc2530	cc2530
Cirronet	Cirronet	ZMN2430	cc2430

Destacam-se soluções que utilizam o baixo consumo de processadores 8 bits e outras com arquitectura 32 bits ARM. Também um contraste grande existe na oferta de RAM que em algumas soluções se caracteriza pela sua dimensão muito reduzida. A seguir apresentam-se estas soluções na Tab. 3-5, pela ordem da arquitectura e RAM.

A permanência de microprocessadores de 8bits advém da baixa necessidade de processamento dos SoC, da manutenção de uma arquitectura para um mercado existente de programadores de *firmware*, da optimização que os fornecedores podem realizar em termos de integração e poupança energética. Por outro lado, os ARM sendo desenhado e testados em inúmeras aplicações móveis, oferecem igualmente qualidades de processamento e poupança de energia comprovada. O novo núcleo do  $\mu$ P 8051 do SoC cc2530 da TI, alcança 32 Mips, milhões de instruções por segundo, sendo a duração de uma instrução realizada num único ciclo do relógio de 32 MHz, igual a 31 ns. Esta performance é igualada pelo SoC da NXP-Jennic 5148 mas com registos de 32 bits.

Tab. 3-5 Microprocessadores dos módulos ZigBee

Fabricante	$\mu$ P	Arquitectura [bit]	FLASH [kbytes]	RAM [kbytes]	Programável	ADC
ATMEL	ATmega 1281v	8	128	8	SIM	4
NXP	Jennic	32	128	128	SIM	4
NXP	Jennic	32	192	96	SIM	4
DiGi	FreeScale SO8	8	32	2	SIM	4
Telegesis	ARM Cortex-M3	32	128	12	SIM	6
MicroChip	PIC 16..24..32				SIM	vários
TI	8051	8	128	8	SIM	8
TI	8051	8	128	8	SIM	8
Cirronet	ZMN2405	8	128	8	NÃO	8

## Solução

Caso se pretenda um processamento muito exigente, optar-se-á pelo módulo ZigBee rádio e por um microprocessador separado adaptado as exigências do projecto como as soluções da Atmel e da Microchip permitem. Os módulos NXP-Jennic oferecem maior flexibilidade com um  $\mu$ P de 32 bits. O  $\mu$ P do SoC da Texas Instruments tem um baixo consumo de 8 mA.

Tab. 3-6 Consumos de energia modo Activo e Adormecido

Marca	Módulo	Corrente emissão [mA]	Corrente recepção [mA]	Repouso c/ Interrupção [ $\mu$ A]	Repouso c/ timer [ $\mu$ A]
Jennic	JN5148-001-M00/03	15	17,5	1,2	2,6
MicroChip	MRF24J40MA	23	19	2	2
Meshnetics	MNZB-24-B0	18	19	1,5	6
Telegesis	ETR2	30	25	1	1
Texas Instruments	CC2430F128RTC	28	25	0,2	1
Texas Instruments	cc2530	28	24	0,4	1
Cirronet	ZMN2430	25	30	5	5
Jennic	JN5149-001-M00/03	37	37	0,1	2,6
Maxstream	Xbee ZB XB24-Z7CIT-004	60	62	1	4

Existe dois estados de repouso:

1. Repouso com temporização até ao despertar do módulo;
2. Repouso completo com despertar por interrupção via um PIN *hardware* de entrada.
3. Alguns módulos oferecem também a interrupção do modo de repouso por RF, Radio Frequência, em particular o SoC da Texas Instruments cc2350, activado quando chega uma mensagem do Coordenador ou de outro nó da PAN, *personal área network*.

A NXP-Jennic é o único fabricante que proporciona um sistema de desenvolvimento sem custo. A NXP-Jennic anunciou a abertura do seu *Stack* proprietário JenNET em fonte aberto sem custo de licenciamento para 2011. O componente Jennic 5139 da NXP-Jennic, melhor posicionado, foi descontinuado em 2010 pelo seu fabricante. Não havendo uma explicação relativamente a eliminação do componente, decidiu-se não apostar nesta solução.

O componente da Microchip exigia a montagem de um microprocessador periférico e requer a aquisição do *Stack* ZigBee. O fabricante não proporcionou o valor do sistema de desenvolvimento mesmo após vários pedidos via emails.

O ISEL já tinha experiência com componentes ZigBee da Texas Instruments. Os módulos da CIRONET do ISEL que utilizam os componentes cc2430 revelaram boas capacidades de comunicações permitindo alcançar distâncias em ldv, linha de vista, de mais de 100 metros.

Tecnicamente, o componente cc2530 da TI suporta um *Stack* compatível com as especificações ZigBee © 2007 (ZigBee e ZigBee PRO) e oferece ainda outros *Stacks* tais como o REMOTI, compatível com as especificações ZigBee version 1.0 RF4CE, *Radio Frequency for Consumer Equipments*, o SIMPLICITI, *Stack* proprietário da TI e muito eficiente em termos de poupança energética e TIMAC, compatível com a norma IEEE 802.15.4.

A Texas Instruments proporciona uma grande família de componentes para LR-WPAN:

**Tab. 3-7 Família de Componente ZigBee da Texas Instruments**

Componente	Função
<b>CC2420 e CC2520</b>	Transceiver a interligar a um $\mu$ P para realizar um equipamento de alta performance tal como um coordenador
<b>CC2430 e cc2530</b>	SoC, System on a Chip, um transceiver e um $\mu$ P integrados num único chip de baixo consumo energético.
<b>CC2531</b>	SoC com $\mu$ P, transceiver e interface USB
<b>CC2533</b>	SoC com $\mu$ P dedicado ao <i>Stack</i> ZigBee RF4CE (comandos a distância)
<b>CC2591</b>	SoC tipo cc2530 com LNA para elevar a potência de emissão, não conforme as normas ETSI e Anacom pelo excesso de potência de emissão EIRP

Esta gama proporciona escalabilidade para o projecto e permite conceber facilmente um nó ZigBee poderoso com  $\mu$ P separado e grande memória RAM. Se o firmware do coordenador tiver dificuldade para suportar vários eq-sensor, esta arquitectura alternativa permite aumentar fortemente o poder de processamento.

O componente cc2530 da TI incorpora também um AmpOp e tem duas saídas *Power* que podem fornecer até 20 mA a uma fonte externa. Estas funcionalidades unicamente presentes neste componente vão ser fulcrais para a conclusão deste trabalho, quando a proposta de protótipo semi-industrial que será apresentada. O potencial do cc2530 para um sensor sem fios autónomo e poupador em energia é nitidamente superior aos seus competidores se estas duas últimas funcionalidades são utilizadas.

Por além da experiência no ISEL, estivemos em contacto com uma empresa que realizou um projecto bem-sucedido com os chips da TI. O suporte sem contrato de manutenção anual é correcto e realizado através de um fórum e uma base de conhecimentos. O único senão desta tecnologia é o custo do seu sistema de desenvolvimento IAR (gratuito durante 60 dias). Como era possível realizar o protótipo com estes constrangimentos, optou-se por este fornecedor.

### 3.3.2 Magnetómetro

Tal como os componentes SoC ZigBee, realizou-se um estudo de mercado para os sensores magnéticos adequados para a gama de sensibilidade das variações do CMT com uma precisão de pelo menos 1%. Na Tab. 3-8, são apresentados os vários fornecedores com componentes integrados de pequena dimensão, realizados com filmes finos de *Permalloy*. Estes filmes precisam de uma reinicialização periódica e somente Honeywell e a Sensitec oferecem bobinas integradas ao Chip para realizar esta operação. O circuito de Set / Reset da Honeywell continua no entanto a necessitar vários componentes discretos e constitui ainda uma função a integrar e melhorar.

Tab. 3-8 Lista dos fornecedores de Magnetómetro

Fabricante	Modelo	Nº eixos	Sensibilidade [mV/V/Gauss]	Histerese [% FS]	Resistência [Ω]	Calibragem
Sensitec	AFF7755B	1	16,0	0,20	2500	bobinas set/reset
Zetex	ZMY20	1	4,7	1,00	1700	ímã permanente
NXP	KMZ41	2	3,0	0,18	2500	uso de sinal sinusoidal
	KM43T	2	4,8	0,18	3200	
Honeywell	HMC1001	1	3,2	0,08	850	bobinas set/reset
	HMC1002	2	3,2	0,08	850	
	HMC1021	1	1,0	0,08	1100	
	HMC1022	2	1,0	0,08	1100	

A unidade mV/V/Gauss é a variação do sensor, em mV, quando é aplicado uma tensão de 1 V e um campo magnético de 1 Gauss. A unidade % FS, *Full Scale*, é a percentagem da escala de sensibilidade que suporta o sensor sem saturação, no caso das magneto-resistências Honeywell, temos uma escala de [-2, 2] Gauss, sendo o CMT situado em redor de 0,5 Gauss.

Trata-se de componentes muito sensíveis, puramente passivos que requerem um circuito externo de magnetização para restaurar o carácter anisotrópico das suas resistências em filmes de *Permalloy* quando for submetido a um campo magnético superior a 10 Gauss. Nos componentes analisados, destaca-se a marca Honeywell:

- Pela sua extensa gama de magnetómetros,
- Pela sua boa documentação técnica,
- Por ser uma solução fiável, líder do mercado com produtos amplamente testados e
- Pela precisão superior dos seus produtos.

Os magnetômetros da Honeywell são sensores muito sensíveis que detectam as ligeiras flutuações do CMT quando um veículo passa por cima.



Fig. 3-3 Modificação do CMT pela passagem de um veículo [27]

Esta solução requer pouca energia porque não produz o seu próprio campo magnético. Ela aproveita o CMT existente em qualquer lugar na Terra e baseia a sua detecção nas flutuações geradas pelas passagens de massas metálicas ferromagnéticas na sua proximidade.

O Ferromagnetismo é a propriedade que um conjunto de metais tal como o ferro, o aço, gadolínio, níquel, cobalto têm. Um campo magnético externo tende a alinhar os domínios magnéticos microscópicos do material ferromagnético criando um material com uma maior permeabilidade magnética numa determinada gama de potencial do campo magnético externo.

Com a passagem de um veículo, existem zonas de compressão do fluxo magnético e outras zonas de depressão. O sensor traduz isso em variações de tensão.

O CMT tem um valor médio de 0,5 Gauss. Ele pode variar em redor deste valor de  $\pm 0,7$  Gauss, em função do local, da temperatura, do irradiação solar, o dia e a noite, entre outros factores. A orientação do sensor (eixos de medidas) relativamente ao Pólo Norte magnético faz variar a resposta, a  $V_{dif}$ , tensão diferencial de saída, num factor superior a 50%.

As variações do campo magnético, quando um veículo passa por cima do sensor, são aproximadamente de  $\pm 2$  Gauss, havendo no entanto veículos que podem criar picos superior a  $\pm 10$  Gauss, por exemplo, um carro blindado, e neste caso, saturar os filmes de *Permalloy* do sensor. Neste caso, é necessário remagnetizar o magnetómetro a seguir uma dessas ocorrências e também periodicamente para eliminar o *bias* devido a variação de temperatura.

## Solução

$V_{dif}$  depende da proximidade do sensor relativamente às massas ferromagnéticas e à velocidade de deslocação. A nota de aplicação [27] da Honeywell sugere uma amplificação de 150 até 300 nos respectivos casos de digitalização de assinatura e de contagem de veículo.

### 3.3.3 Antena

O desenho da antena otimiza o ganho e a directividade da potência de emissão do eq-sensor, o que é crítico para o consumo energético.

A realização de uma antena num PCB representa uma grande dificuldade porque o dipolo de uma antena de  $\lambda/4$  tem uma dimensão de 6 cm o que é muito grande para o projecto que deve caber num tubo entre 3 e 12 cm de diâmetro. Procura-se uma solução mais compacta para que existisse uma distância suficiente entre as partes metálica do eq-sensor e a antena.

As antenas  $\lambda/4$  cerâmicas de dimensão inferior a 1 cm são muito correntes e de preço muito baixo. Elas necessitam no entanto uma adaptação de impedância, ou seja, deve-se realizar o protótipo completo e medir a impedância da antena posicionada no contentor do eq-sensor com um analisador vectorial que suporta a faixa de frequência ISM centrada em 2,45 GHz e permite ter um diagrama de VSWR, *Voltage Standing Wave Ratio* (rácio do sinal reflectido ressonante sobre o sinal de entrada), e de S11 (parâmetro S atenuação do sinal reflectido). Só com esta medida é que pode ser calculado o circuito de adaptação (balún).

Alternativamente a esta solução, a Texas Instruments SoC documenta a solução da antena fractal Fractus® Compact Reach Xtend™, apresentada na Fig. 3-6, utilizada no dongle USB de *debugging* do kit de desenvolvimento e que não precisa de balún a condição de utilizar a placa recomendada [29] por ser uma antena a espectro mais largo do que as antenas cerâmicas.

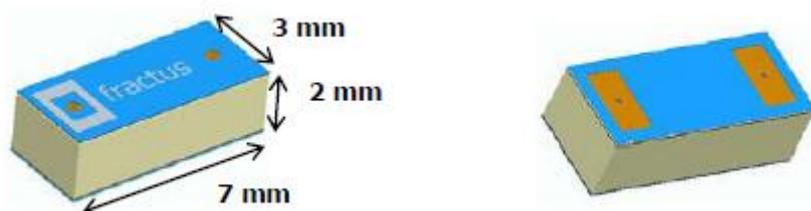


Fig. 3-4 Antena compacta fractal de alto rendimento [30]

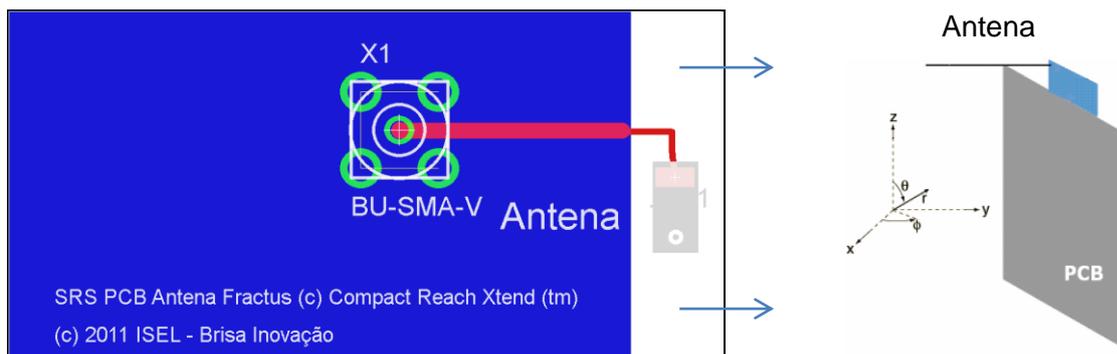


Fig. 3-5 Placa com adaptação de impedância para a antena [30]

O desenho de um mini PCB com base nas recomendações deste fabricante [31], com uma ficha SMA, *SubMiniature version A*, que permite realizar a conectividade com o módulo com o transceiver SoC cc2530 via um cabo coaxial fino, poderá constituir uma solução eficaz e robusta para o protótipo. Segue o desenho da placa realizado em Eagle CAD a escala 2X o tamanho normal. Esta placa pode ser inserida na tampa a pouca profundidade, verticalmente (no sentido das setas).

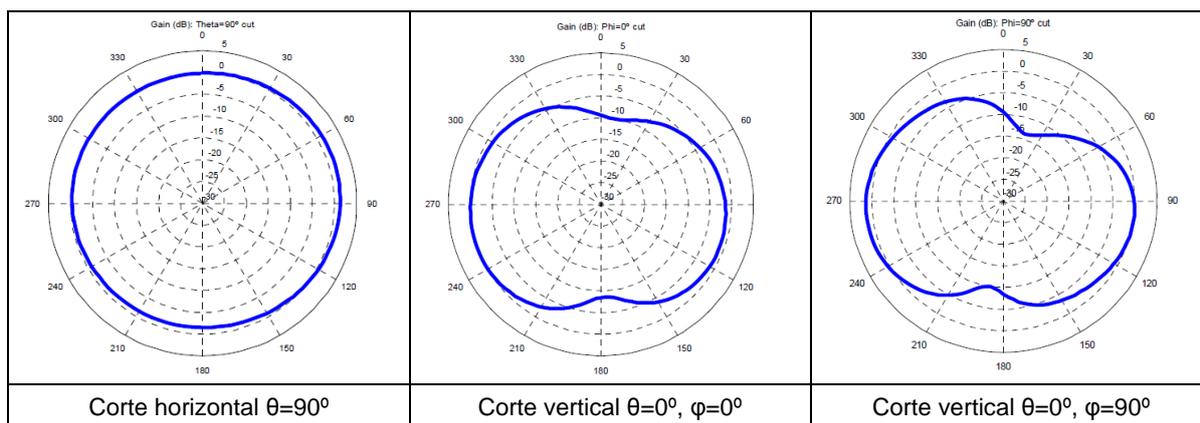


Fig. 3-6 Diagramas de radiação do módulo com a antena Fractal [31]

A emissão é um torro (donut) horizontal com maior radiação lateral do que cima e baixo. Segundo o fabricante, o ganho de pico documentado é de 1 dBi e a eficiência radiativa de 70%.

Seria possível desenhar uma antena com maior ganho sabendo que o Coordenador se encontra sempre, no sentido da marcha, lateralmente à direita do eq-sensor, na berma. Existe antenas cerâmicas que admitem um fundo de massa (GND) por baixo (outro lado da placa) e cujo padrão de radiação é assimétrico com um lobo com ganho de 4 dBi. É preciso realizar o balún (circuito de adaptação) e este trabalho somente pode ser iniciado quando o protótipo estiver completamente construído.

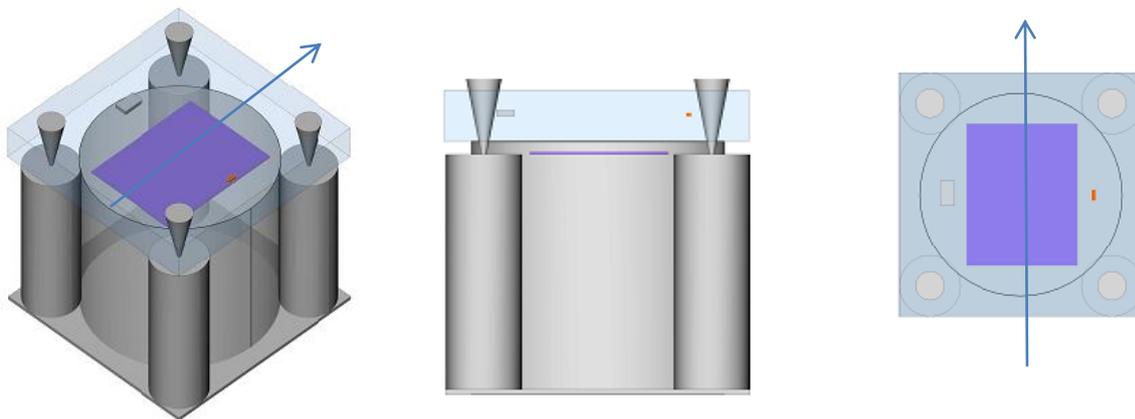
### 3.3.4 Invólucro

Para a construção do invólucro de protecção da Fig. 3-9, sugere-se:

- Tampa de plástico ou de vidro de alta resistência as rachas e resistente a temperatura.
- Corpo tubular de alumínio fundido com grossas arestas de evacuação do calor para limitar o aquecimento do eq-sensor no pleno verão que pode ser destrutivo e rachas para facilitar a sua inclusão na via rodoviária.

No desenho conceptual do invólucro apresentado na Fig. 3-9, as setas indicam o sentido de circulação da faixa de rodagem.

A antena, representada por um pequeno bloco vermelho a escala, é uma antena multicamada de cerâmica ou fractal, que se propõe de inserir na janela de acrílico, de espessura proposta de 2 cm por perfuração parcial de 1 cm. Desta maneira, a antena está bem isolada e distante do corpo metálico e muito perto da superfície da via.



*Legenda: vermelho: antena, cinzento: magnetómetro, seta indica o sentido de marcha dos veículos.*

**Fig. 3-7 Representação conceptual do invólucro do eq-sensor**

O captor solar deverá ser afixado a uma esquadra em alumínio de boa espessura e fixada / parafusada internamente ao corpo de alumínio com uma junta térmica de óxido de titânio (pasta condutora do calor) para evacuar o calor do captor solar durante os meses de exposição solar máxima.

O magnetómetro é constituído por um invólucro de plástico preto que submetido ao sol durante o dia com maior radiação solar numa caixa transparente que tem um efeito de estufa solar pode alcançar temperaturas superior a 150° e por isso deixar de funcionar e ser destruído. O sensor magnetométrico poderá ser protegido com um pequeno ecrã com um filme de alumínio colado a uma mousse de isolante térmica. O alumínio não é ferromagnético, ou seja, não influencia o campo magnético em redor do sensor.

Nem o corpo nem a tampa terão qualquer orifício: o conjunto deve suportar uma completa imersão (fortes inundações).

Caso o eq-sensor for muito pequeno e funcionar com alimentação por bateria planas, a configuração «dot» em superfície poderá ser seleccionada, sendo essencial garantir a fixação e a não perigosidade dos elementos de fixação caso houver libertação indesejada do eq-sensor.

### 3.4 Modelo de consumo energético

#### 3.4.1 Simulações

O modelo de consumo energético é importante porque permite decidir o tipo de alimentação necessária e a capacidade de armazenamento dos componentes. A arquitectura  $\mu$ P Mestre passa pelos seguintes estados previamente documentados no ponto: 3.2 Arquitectura.

Tab. 3-9 Modelo de consumo energético para a arquitectura  $\mu$ P Mestre

Estado	Bloco Digital [mA]	Bloco Analógico [mA]	Bloco Rádio [mA]	Set Reset [mA]	Duração [ms]	Fluxo
1- Detecção	10	10	-	-	0,5	
Adormecido	$3,3 \times 10^{-3}$	-	-	-	$1/f_a - 0,5$	
2 - Digitalização	10	20	-	-	0,5	
Adormecido	$3,3 \times 10^{-3}$	-	-	-	$1/f_d - 0,5$	
3 - Envio de assinatura	10	-	23,8	-	400	
4 - Magnetização	-	-	-	2000	$4 \times 10^{-3}$	

O *firmware* passa por 4 estados quando passa, acima dele, um veículo. O estado de detecção processa-se enquanto não se detecta um veículo e o ciclo de trabalho é calculado com base na velocidade máxima,  $V_{max}$ , e no número de amostragem por metro de veículo,  $N_A$ . O estado de digitalização ocorre durante a passagem do veículo e a duração do ciclo de trabalho é função da velocidade estimada do veículo,  $V_{esti}$ , e  $N_A$ . O estado de envio da assinatura depende da dimensão do veículo. O estado de re-magnetização Set / Reset termina o processo se houve uma saturação do sensor, senão esta etapa pode ser

## Solução

dispensada. A seguir, o *firmware* retoma o primeiro estado de detecção, à espera do próximo veículo.

Os parâmetros que influem no modelo de consumo são os seguintes:

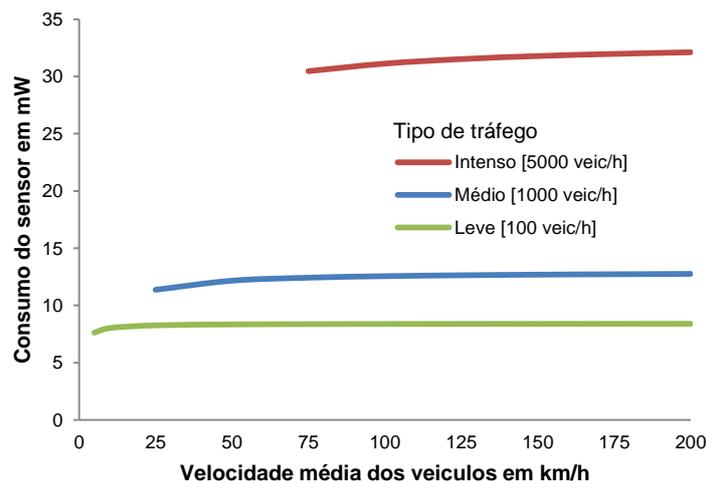
Factores exógenos:

- O tráfego rodoviário;
- A dimensão média dos veículos.

Factores endógenos:

- A velocidade máxima de digitalização;
- A quantidade das amostras a realizar por metro de veículo.

Os factores exógenos constituem uma imposição do local onde está instalado o eq-sensor. As simulações dão o gráfico apresentado na Fig.3-10, sendo que parte das curvas não é desenhado porque o tráfego não existe à aquela velocidade:



**Fig. 3-8 Influência do tráfego no consumo**

Nesta simulação,  $V_{max}$  é fixa e é igual a 120 km/h e  $N_A$  à 10 amostras por metro de veículo. Quando mais intenso é o tráfego, maior é o consumo do eq-sensor. A razão é que o envio dos dados via as comunicações sem fios pesa cada vez mais e este estado tem um consumo energético mais elevado, [23..34] mA, do que os outros estados de detecção e digitalização cujo consumo é bastante baixo, 6 mA no modelo de consumo.

Esta simulação mostra bem a importância que reveste o protocolo de comunicações sem fios e a gestão da potência de emissão do eq-sensor, dois factores que permitem otimizar o estado de envio de dados. Os veículos em infracção de limite de velocidade até 200 km/h são capturados com  $N_A$  igual a 5 e perde-se apenas precisão no estado de detecção. A

estimativa da velocidade  $V_{esti}$  pode, neste caso, ser superior a  $V_{max}$  e nesta versão de *firmware* / simulação, utiliza-se neste caso  $V_{max}$ .

Para um tráfego intenso de 0,5 veículos por segundo, o consumo médio tende para o valor de 7 mA (20 mW).

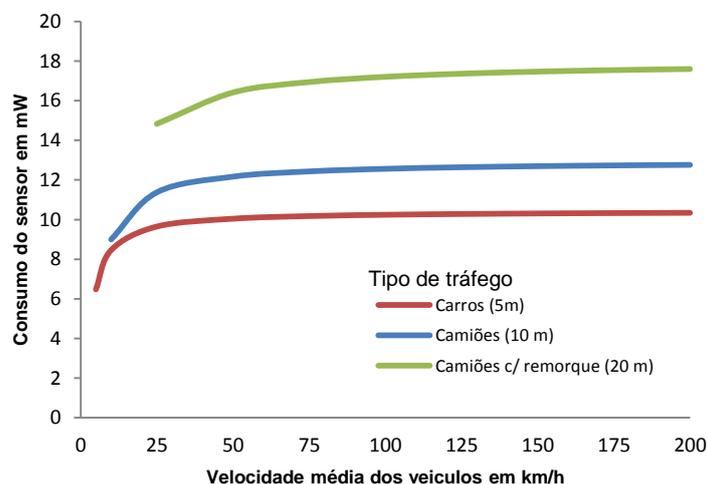


Fig. 3-9 Influência da dimensão do veículo no consumo

Na simulação que segue na Fig. 3-10, o tráfego de veículos é fixo, de 500 veículos por hora. O parâmetro variável é o comprimento do veículo que cria uma assinatura proporcionalmente de uma maior dimensão. O estado de envio tem um custo cada vez superior.

O estado de digitalização tem um consumo unitário por segundo inferior ou igual ao consumo do estado de detecção, pelo que a dimensão do veículo implica um gasto menor ou igual no estado de digitalização do que no estado de detecção. A diferença de consumo entre estados diminui com o aumento da velocidade dos veículos o que cria uma ligeira subida das curvas com o aumento da velocidade.

O factor decisivo se situa na optimização do tempo de envio das assinaturas que pode ser diminuído pela selecção de um protocolo de comunicações optimizado e pelo uso da compressão de dados.

Quanto aos factores endógenos, a fig. 3-12 mostra que estes se limitem ao produto  $V_{max} \times N_A$  configurado no *firmware* do eq-sensor. Estes parâmetros regem a duração do ciclo de trabalho / repouso de detecção. Quanto mais elevado o produto  $V_{max} \times N_A$ , maior é o custo energético porque a percentagem da parte activa do ciclo aumenta com a diminuição da duração destes. Para o estado de digitalização, temos o mesmo efeito com o produto  $V_{esti} \times$

## Solução

$N_A$  sendo  $V_{esti}$  inferior ou igual a  $V_{max}$ . Estes dois parâmetros são configurados em função da precisão desejada das assinaturas e da velocidade média do local de instalação. Como o estado de digitalização tem um consumo inferior ou igual ao estado de detecção, as curvas são crescentes. Estes dois parâmetros influenciam directamente a vida útil da bateria.

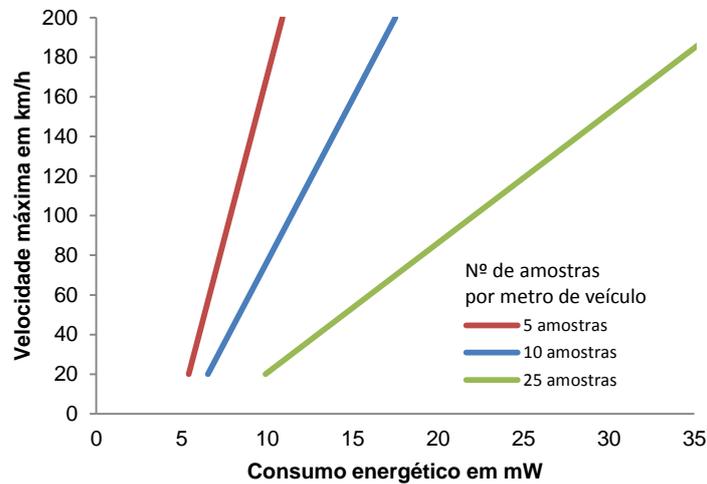


Fig. 3-10 Influência do número de amostras e da velocidade no consumo

### 3.4.2 Consumo máximo

Analise-se dois casos que enquadram este estudo:

- O Pior caso será de 35 mW, ou seja, uma corrente de 11,67 mA, o que corresponde a captura de 25 amostras por metro de veículo e a uma velocidade máxima de 200 km/h.
- O Caso mais provável será de 25 mW, ou seja, uma corrente de 8,3 mA, o que corresponde a 10 amostras por metro de veículo e uma velocidade máxima de 120 km/h.

### 3.4.3 Dimensão do painel solar

Com base no modelo de dimensionamento, o potencial de captação diário será superior ou igual a 63 Wh/m<sup>2</sup>/dia (energia ao metro quadrado recolhida durante 24 horas) o que é equivalente a 2,625 W/m<sup>2</sup> de potência média por metro quadrado. Com base na equação (2.5) precedentemente apresentada no Modelo 2.4.1 (Modelo para o cálculo da superfície do painel solar), obtém-se com os valores do modelo de produção de energia por captação solar:

Os valores apresentados na Tab. 3-11 mostram que uma célula solar de 12,5x12,5 cm<sup>2</sup> de Si monocristalino permite suportar os valores apresentados.

Tab. 3-10 Superfície de captação solar para o eq-sensor

Célula solar	Energia captada [Wh/m <sup>2</sup> ]	Potência de consumo [mW]	Superfície de captação [cm <sup>2</sup> ]	Raiz quadrada [cm]
Si amorfo	63	45	171,43	13,09
		25	95,24	9,76
Si monocristalino	119	45	90,76	9,53
		25	50,42	7,10

### 3.4.4 Circuito de adaptação de voltagem de entrada

A voltagem de saída de uma célula solar pode variar entre 0 V e 0,63 V. A corrente de saída é proporcional a irradiação solar recebida e não depende da voltagem de saída. Existe um ponto de rendimento óptimo denominado PPM, Ponto de Potência Máxima (MPP, *Maximum Power Point*) situado nos 0,53 V para as células monocristalinas, que proporciona o máximo da potência alcançável.

Vários fabricantes de componentes propõem um componente denominado «elevador de cargas», (*Charge Pump Device*) que converte tensões contínuas de um patamar para outro. A operação consiste na carregamento de um conjunto de capacidades em paralelo e a seguir a sua comutação em serie para o andar de saída.

No que diz respeito as células solares, existem elevadores específicos para 1 célula solar que capturam tensões entre 200 mV e 1 V e as convertem para 3 ou 5 V contínuos com rendimento de 90%. Por exemplo o TPS61200 da Texas Instruments [32] ou o LTC3105 da Linear que integra um circuito de PPM [33]. Estes componentes admitem uma retroacção com um AmpOp que mantém a corrente de entrada no PPM, em redor de 0,53 V, e extraem o máximo de potência da célula solar.

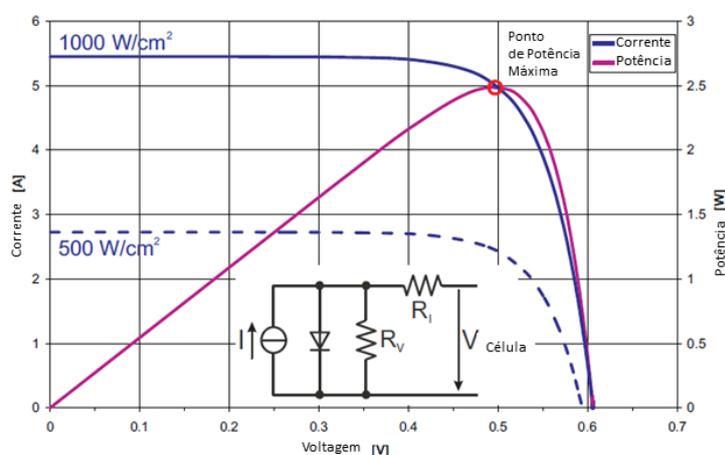


Fig. 3-11 Curva de potência de saída de uma célula solar

### 3.4.5 Acumulador

Para armazenar a energia recolhida durante o dia, o eq-sensor deve recorrer a baterias recargáveis ou a hipercondensadores. No caso dos acumuladores, existe uma variação grande de densidade de energia publicada pelos fabricantes, o que justifica que se tomou a média dos valores publicados. A tabela é ordenada por N<sup>o</sup> de ciclos e Densidade Volúmica de Energia. Varias tecnologias propostas no mercado se listam a seguir:

Tab. 3-11 Tecnologias de acumuladores

Tecnologia	Densidade de Energia [Wh/L]	Voltagem nominal [V]	Capacidade AA* [mAh]	N <sup>o</sup> de ciclos
NiCd	100	1,20	1390	2000
NiMh	240	1,20	3336	750
Li-ion	305	3,60	1413	700
Chumbo	60	2,10	475	650
Alkaline	250	1,45	2876	100

\*AA : d:14,5 x a:50,5 mm, NiCd, Níquel Cádmio, NiMH, Níquel hidreto metálico, Li-ion, Íons de Lítio

Como o NiCd é tóxico e o Li-ion não pode ser carregado se a temperatura externa é superior a 100° sobe pena de explodir, sobra unicamente a tecnologia NiMh, níquel-hidreto metálico que deve oferecer aproximadamente 2-3 anos de serviço. Serão precisos 4 acumuladores para alcançar 4,8 V. Isso implica que deve haver um componente DC/DC entre o captor solar e os acumuladores. Sugere-se o uso do LTC3105 da Linear que aceita a entrada de tensões muito baixas, até 200 mV, e carrega baterias NiMH controlando a tensão de saída para não ultrapassar a tensão máxima suportada.

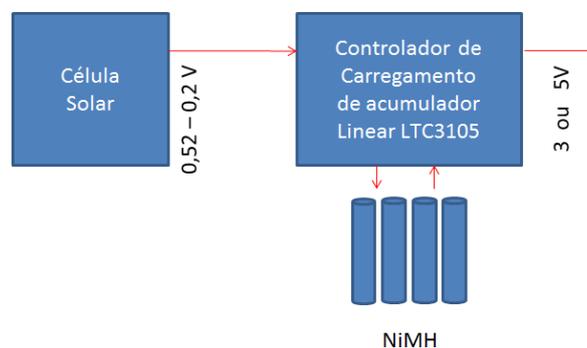


Fig. 3-12 Bloco de alimentação solar com acumulador NiMH

Para o dimensionamento do acumulador, considera-se o consumo por dia que, no pior caso, é de 288 mAh (12 mA x 24 h). Aplicando um facto de segurança de 2, obtém-se 576 mAh.

Portanto, um acumulador de 1000 mAh poderia ser suficiente, existindo sempre o constrangimento associado a memória de carga e ao número reduzido de ciclos de carga / descarga suportados. A selecção de um acumulador de maior capacidade, por exemplo de 2100 mAh constituído de apenas 1 pilha recargável NiMH dimensão AA, Varta Longa Duração 1,2 V, referência 56706, [34], permite uma diminuição da capacidade de carga de mais de 50% sem terminar a vida útil do sistema.

### 3.4.6 hipercondensador

Alternativamente a um acumulador, poderá seleccionar-se um hipercondensador com o circuito apresentado na Fig. 3-14.

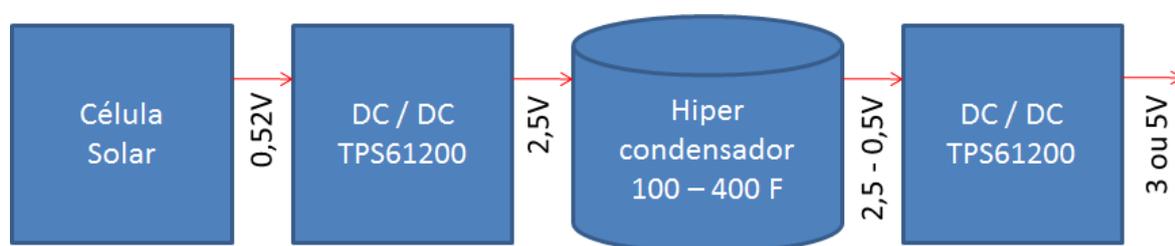


Fig. 3-13 Uso de hipercondensador para a alimentação sem interrupção do eq-sensor

O primeiro conversor DC/DC retira a potência da célula solar e a converte numa corrente com uma tensão regulada de 2,5 V. Na saída do hipercondensador temos um outro conversor DC/DC que regula a tensão para 3 ou 5 V. O circuito apresentado têm um rendimento de 81% (90 x 90%).

Tab. 3-12 Dimensionamento do bloco de hipercondensador

$P_s$ [mW]	$P_t$ [W.dia]	V [Volt]	C [Farad]	Fornecedores	Componentes	Qtd.	Volume [cm]
45	3888	2,7	1381	Illinois Capacitor	407DCN2R7K 400 F 2,7 V	3	7x7x6,2
25	2160		767			2	7 x 3,5 x 6,2
10	864		307			1	3,5 x 3,5 x 6,2
45	3888	2,5	1620	Rubycon	2.5DMB100M22X65 100 F 2,5 V	8	12,8 x 6,6 x 13,2
25	2160		900			4	12,8 x 3,2 x 6,6
10	864		360			2	6,4 x 3,2 x 6,6

*Ps* potência do eq-sensor; *Pt* potência total 24 horas; V voltagem máxima suportada pelo hipercondensador; C capacidade do hipercond.

O anexo B apresenta o modelo do dimensionamento do hipercondensador com o circuito apresentado, que conduz a Tab. 3-12, onde  $P_s$  é a potência solicitada,  $P_t$  a potência

## Solução

necessária total por dia,  $V$ , a voltagem máxima suportada pelo hipercondensador, e  $C$  a capacidade total necessária, em Farad.

Os hipercondensadores têm duas importantes limitações:

1. Gama de temperatura de funcionamento limitada de  $[-25^{\circ}, 60^{\circ}]$ ;
2. Vida útil: após 1000 horas diminuição de 30% da capacidade útil e a vida útil é dividida por 2 quando a temperatura de uso aumenta de  $10^{\circ}$  C. Um fornecedor recomenda carregar o hipercondensador a 80%, o que garante uma vida útil aproximada de uma década [35].

Como a gama de temperaturas que os eq-sensores terão de suportar, ou seja, pelo menos os extremos meteorológicos portugueses de  $[-20^{\circ}\text{C}, 50,5^{\circ}\text{C}]$  e o efeito de estufa no Eq-sensor em consequência da janela transparente e do painel solar, os hipercondensadores não são adequados para este projecto.

### 3.4.7 Pilhas

Em vez de um painel solar, seria possível recorrer a uma bateria de longa duração. As pilhas alcalinas e de lítio preenchem este critério. É utilizada a potência de 25 mW (7,58 mA a 3,3V) para estimar a vida útil:

Tab. 3-13 Dimensionamento de um bloco de pilhas não recargáveis

Pilhas Alcalinas	Capacidade	Corrente de fuga	Consumo	Duração		Volume
	[Ah]	[%]	[mA]	[dias]	[anos]	[cm]
2 x 2 D	40	20	7,58	176	0,5	7 x 7 x 6,2
2 x 2 x 2 D	80	20	7,58	352	1,0	7 x 7 x 12,4
1 x Energizer NEDA	50	20	7,58	220	0,6	13 x 13 x 7
2 x Energizer NEDA	100	20	7,58	440	1,2	13 x 13 x 14
Pilha Lítio	Capacidade	Corrente de fuga	Consumo	Duração		Volume
4 x SL-2790	140	20	7,58	616	1,7	6,6 x 6,6 x 12

As pilhas não constituem uma panaceia. São volumosas, a capacidade anunciada pode não ser alcançada e, finalmente, as de maior capacidade têm um preço de venda elevado. Mesmo assim constituem uma opção para este projecto. O uso da configuração mais optimizada para a poupança de energia no *firmware* do Eq-sensor pode permitir um aumento desta vida útil superior a presente estimativa.

Cita-se ainda a pilha Alcalina *Spring Fitting* 4R25X da Energizer de 6 V 11 Ah [36] (15 Ah com um DC/DC a 80% e com 10% de corrente de fuga para fornecer 3 V regulado) utilizada na construção civil. Trata-se de um conjunto de módulos Alcalinos dentro de um invólucro standardizado, hermético e não sensível a humidade, que permite garantir uma corrente de

fuga mínima. A sua dimensão é de: 11,5 x 6,8 x 6,8 cm. O modelo é pouco divulgado e parece atingido de obsolescência.



## 4 Implementação

A seguir ao estudo e à elaboração dos modelos, procedeu-se a selecção dos fornecedores e a escolha da tecnologia adoptada. A selecção do SoC cc2530 [37] permitiu a aquisição de um sistema de desenvolvimento completo com dois módulos configuráveis e interface série EIA 232. A interface com o magnetómetro foi realizada com uma placa desenhada à medida que incorpora o magnetómetro, o amplificador diferencial e de ganho regulável por potenciómetro e o circuito Set/Reset recomendado pelo fabricante.

O enfoque foi dado à realização do *firmware* e *software* e ao estudo dos aspectos de radiocomunicações e autonomia energética.

### 4.1 Protocolo aplicacional

Como este projecto se articula com vários intervenientes, foi elaborado um protocolo de comunicações ao nível aplicacional que deixa a correcção de erros e a fragmentação para camadas de nível mais baixo, de transporte (*firmware* do projecto) e rede (*Stack ZigBee* da TI). Os comandos do protocolo são apresentados na Tab. 4-1 e o protocolo detalhado no Anexo D.

Tab. 4-1 Mensagens do protocolo aplicacional da rede sem fios

Função	CMD	Origem	Descrição
<b>SIGNATURE</b>	0x00	Eq-sensor	Receber dados dos eq-sensores na forma de um ou dois vectores de amostras;
<b>STATUS</b>	0x01	SA	Solicitar um relatório de informação a um determinado eq-sensor;
<b>STATUS</b>	0x01	Eq-sensor	Após um Reset ou Power ON ou em resposta a um pedido de STATUS do SA, envio pelo Eq-sensor de uma trama STATUS com dados relativos à tensão do painel solar, da bateria, temperatura do SoC, entre outros.
<b>CONFIG</b>	0x02	SA	Solicitar a configuração do eq-sensor. O protótipo foi desenhado para testar a maior parte das funcionalidades do cc2530 e do <i>Stack ZigBee</i> . Existem bastantes parâmetros que podem ser configurados para otimizar o funcionamento do eq-sensor.
<b>CONFIG</b>	0x02	Eq-sensor	O Eq-sensor envia toda a sua estrutura de configuração em formato binário. O SA irá copiar esta estrutura binária para poder consultar os seus valores numa estrutura idêntica no seu código.

### 4.2 Arquitectura de *firmware* do cc2530

O SoC cc2530 da Texas Instruments é configurado com o *Stack ZigBee* tal como se apresenta na Fig. 4-1, que é assente: na camada MAC e PHY IEEE 802.15.4; no OSAL, um mini sistema operativo da Texas Instruments assegurando o registo, inicialização e

## Implementação

lançamento de tarefas (processos), a sincronização entre tarefas, a gestão de mensagens, de interrupções, de contadores, de alocação dinâmica de memória e de poupança automática de energia; no HAL, *Hardware Abstraction Layer*, uma biblioteca de funções que simplificam o uso dos recursos *hardware* do SoC e que autoriza a programação de registos do cc2530 e assembler do microprocessador de 8 bits 8151, directamente em linguagem C.

A aplicação acede a todas as camadas havendo no entanto incompatibilidades que o programador deve descobrir via a documentação e *testing*.

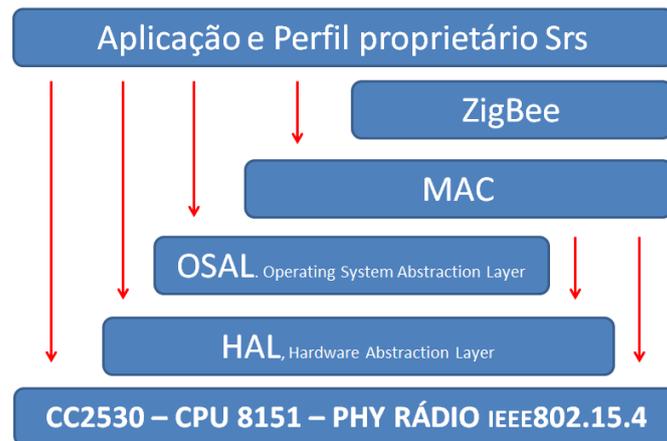


Fig. 4-1 Sistema Operativo do cc2530 com Stack ZigBee

A camada ZigBee é constituída pelo *Stack ZigBee* que ocupa a camada de rede e gere a topologia e os aspectos de associação, *routing*, detecção de erros, reenvio de pacotes, entre outros; e pelo *ZAF, ZigBee Application Framework*, que define perfis incorporados às camadas de transporte até a aplicacional, para comando à distância de *hardware*, medição de água e electricidade, interrupção de corrente eléctrica, recolha a distância de estatísticas de consumo de contadores de gaz, electricidade, entre outros. No presente projecto, não se optou por um perfil estandardizado por este não existir na oferta de *software* da Texas Instruments.

A aplicação utiliza as funcionalidades do SoC via um conjunto de API's, *Application Programming Interface*, que enviam mensagens para cada tarefa. A própria aplicação recebe mensagens e deve detectar as que lhe são dirigidas. Depois do processamento associado a uma mensagem, a aplicação pode programar um contador que gerará uma nova mensagem quando terminar, ou entrar em adormecimento. O OSAL, *Operating System Abstraction Layer*, poderá reactivar uma tarefa quando existir uma nova mensagem ou uma interrupção associada a tarefa. Um processo é solicitado em termos de processamento pelo contexto exterior gerido pelo OSAL ou por timer que ele próprio configura. Durante os períodos sem processamento agendados OSAL pode entrar em estado de baixo consumo.

O escalonamento dos processos realizado pelo OSAL evita o *polling* e otimiza a poupança de energia.

Os HAL, *Stack ZigBee*, ZAF e Aplicação são tarefas geridas pelo OSAL com prioridade decrescente.

Esta arquitectura é proprietária. Neste projecto, o código C é parcialmente portátil para outras arquitecturas na medida em que o *firmware* desenvolvido utiliza pouco as funções do sistema operativo e que estas são completamente suportadas noutros sistemas. No entanto, seria preciso fazer uma migração de *software*.

### 4.3 Gestão de energia

O OSAL tem uma configuração de compilação que permite adormecer o  $\mu$ P de maneira automática: quando uma tarefa termina a execução do seu código, ela “devolve a mão” ao SO. Se todas as tarefas procederem desta maneira, o SO sabe quando não existe mais necessidade de processamento pendente e calcula o tempo livre até a próxima tarefa agendada por *timer* e conseqüentemente, pode adormecer todo SoC durante este período. Uma interrupção *hardware* ou o fim do *timer* de adormecimento terminam este estado.

Dois estados de adormecimento são possíveis: via *timer* e sensível a interrupções, e adormecimento profundo, com um contador de despertar como única via de saída do estado adormecido. Uma configuração de compilação permite desactivar a interface rádio quando não é utilizado.

Esta solução não favorece as pausas muito curtas porque é sempre necessário esperar o fim dos processamentos de todas as tarefas. O fabricante recomenda um mínimo de 14 ms para uma pausa de adormecimento, valor que este projecto teve de alterar para 1 ms, no intuito de conseguir frequências de amostragem até 500 Amostras/segundo, ou seja, todos os 2 ms.

### 4.4 Análise do *firmware*

O *software* aproveita a estrutura por tarefa e cria um conjunto de sub-tarefas chamadas entre si por uma máquina de estados e temporizações (contador). Fundamentalmente, existem 4 estados principais.

## Implementação

O primeiro estado gere a detecção de veículo e um ciclo de trabalho (duty cycle) de curta duração e cuja pausa de adormecimento depende de  $V_{max}$ , a velocidade máxima de detecção, parâmetro configurável do *firmware*. Isso garante que para  $V_{max}$  haverá  $N_A$ , *número de amostras*, amostras digitalizadas por metro de comprimento do veículo. Este parâmetro  $V_{max}$  pode ser igual à velocidade média dos veículos se for aceite uma taxa de erro no início da detecção da passagem, ou seja, um veículo em excesso de velocidade será também detectado. Uma vez detectado o início do veículo, o algoritmo memoriza as amostras e procura o fim do primeiro eixo do mesmo.

O segundo estado gere a digitalização do veículo em movimento. No início, é calculado uma estimativa da velocidade do veículo,  $V_{esti}$ . Com esta velocidade define-se a frequência de amostragem para a digitalização da assinatura.

O terceiro estado acontece quando o *firmware* detecta o fim do veículo. Os dados são enviados em tempo real pela rede sem fios, imediatamente a seguir a passagem do veículo. Depois, o processo executa a manutenção que detecta se existem comunicações de dados pendentes provenientes do SA. As funções rádio de emissão e recepção do *transceiver* do cc2530 são activadas apenas neste estado. Se não passe veículo durante um determinado prazo, um contador activa uma manutenção isolada que permite manter as comunicações com o coordenador e reiniciar o sensor.

O quarto estado é dedicado a funções de manutenção e a operação de Set//Reset que magnetiza os filmes de *Permalloy* e reestabelece as resistências anisotrópicas do sensor.

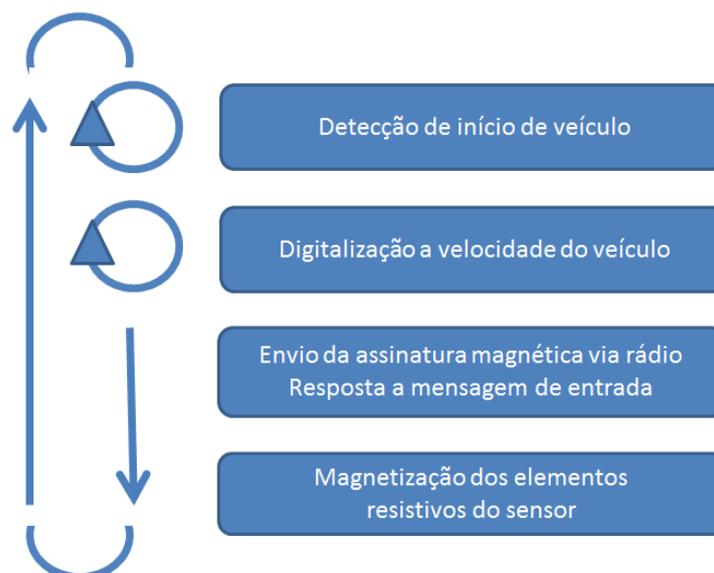


Fig. 4-2 Motor de estado para as sob tarefas da Aplicação

## 4.5 Algoritmos

O CMT deve ser determinado pelo *firmware* e acompanhar as assinaturas magnéticas no envio para o SA, para que seja retirado este *bias* e normalizar as assinaturas. O CMT é calculado com base numa média de medidas sem variações e que se repete pelo menos 3 vezes. A terceira média é aceite como valor para o CMT. Este algoritmo simples permite dispensar *hardware* exterior e obter uma auto-calibração do eq-sensor relativamente às flutuações lentas do CMT. Os resultados obtidos são correctos sendo a curva das assinaturas tendencialmente iniciadas e terminadas por este valor.

O algoritmo de determinação de início de curva não utiliza o valor estimado do CMT e um *threshold*. Em vez disso, utiliza uma média das últimas N amostras, tipicamente de [3..10], conforme a configuração, e compara esta média com a última amostra digitalizada. É calculado o valor absoluto da subtração destes dois valores que é comparado com o *threshold* de início de veículo, um parâmetro configurável. Este algoritmo filtra parte do ruído e tem mostrado nos testes ser um bom meio de detecção.

O algoritmo de detecção do veículo mais óbvio seria utilizar um patamar (*threshold*) acima ou abaixo do CMT. A auto-calibração do CMT de facto oferece um valor sempre ajustado e correcto. O problema é que a curva da assinatura varia muito de veículo para veículo e depende da localização do Eq-sensor relativamente às linhas de força do CMT. Ou seja, o patamar pode ser demasiado grande ou demasiado pequeno. Por outro lado, existem parasitas nas medidas que podem activar falsas detecções com um sistema de patamar.

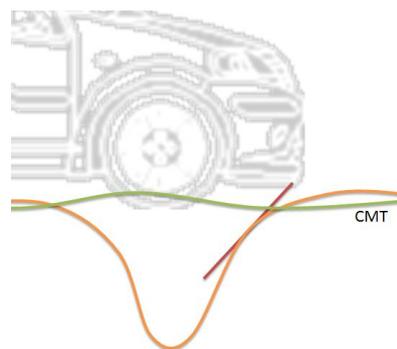


Fig. 4-3 Detecção do início de veículo

Optou-se por desenhar um medidor de variação da inclinação da curva, independentemente do signo desta variação, como representado na Fig 4-3. A dimensão do vector de amostras é configurável e de pequena dimensão. Quando é alcançada uma taxa de variação configurada, o eq-sensor passa ao estado de digitalização. Se o sensor entra em saturação

## Implementação

devido a passagem de uma massa ferromagnética de grande dimensão, este algoritmo independentemente do CMT termina correctamente a assinatura. O Set/Reset a seguir reinicia os filmes de *Permalloy* e o sensor pode continuar a sua operação normal.

Para adaptar a digitalização à velocidade do veículo e não obter longas sequências de amostras ou esgotamento da memória RAM do SoC, 2 Kbytes disponíveis para a aplicação, quando um camião semi remorque passa lentamente, o algoritmo estima a velocidade do veículo.

É processada uma estimativa da sua velocidade,  $V_{esti}$ , com base numa distância média estandardizada e configurável por *firmware* de início de veículo dividido pelo tempo decorrido entre o início da detecção e o cimo do primeiro eixo / roda do veículo. Com  $V_{esti}$ , é determinada a frequência de amostragem para o estado de digitalização. É recuperado o conjunto de digitalizações iniciais do estado de detecção realizadas a frequência de detecção baseada em  $V_{max}$  que são adaptadas a esta frequência de amostragem de digitalização baseada em  $V_{esti}$  e inseridas no início do vector de digitalização para obter uma curva completa. Durante as pausas entre duas amostras de digitalização, o eq-sensor é adormecido. O número de amostras digitalizadas por veículo é assim constante e aproximadamente igual ao tamanho do veículo multiplicado por  $N_A$ , seja qual for a sua velocidade. Como a memória disponível no cc2530 é muito diminuta, esta abordagem permite digitalizar um fluxo de tráfego rodoviário com velocidade variável sem que, para os grandes veículos, se assista a um esgotamento da RAM.

Os cálculos realizados pelo *firmware* baseam-se nas equações seguintes:

Temos a  $f_a$ , frequência de amostragem de detecção, em [amostras/s]

$$f_a = \frac{V_{max} * N_A}{3,6} \quad (4.1)$$

Com os seguintes parâmetros configurados no *firmware*

- $V_{max}$ , velocidade máxima de detecção [km/h];
- $N_A$ , número de amostragens por metro do comprimento do veículo. Trata-se de uma medida de precisão que é utilizada com  $V_{max}$  para definir a  $f_a$ , frequência de amostragem na fase de detecção, em número de amostras por metro [a/m].

Quando um veículo é detectado, o *firmware* tem a sua disposição  $N_a$ , o número de amostras do início da assinatura até o primeiro cimo (positivo ou negativo) criado pela variação do campo magnético. Com  $N_a$  é calculado uma  $V_{esti}$ , velocidade estimada com a equação (4.2):

$$V_{esti} = \frac{D \times 3,6}{N_a \times 1/f_a} \quad (4.2)$$

Onde temos:

- $D$ , a distância parametrizada entre o início da detecção e o primeiro cimo;
- $N_a$ , o número de amostras recolhidas durante o percurso  $D$ ;
- $f_a$ , a frequência de detecção calculada em (4.1).

Com a  $V_{esti}$  é calculado a  $f_d$ , frequência de digitalização com a equação (4.3):

Se  $V_{esti} < V_{max}$  (4.3)

$$f_d = \frac{V_{esti} \times N_A}{3,6}$$

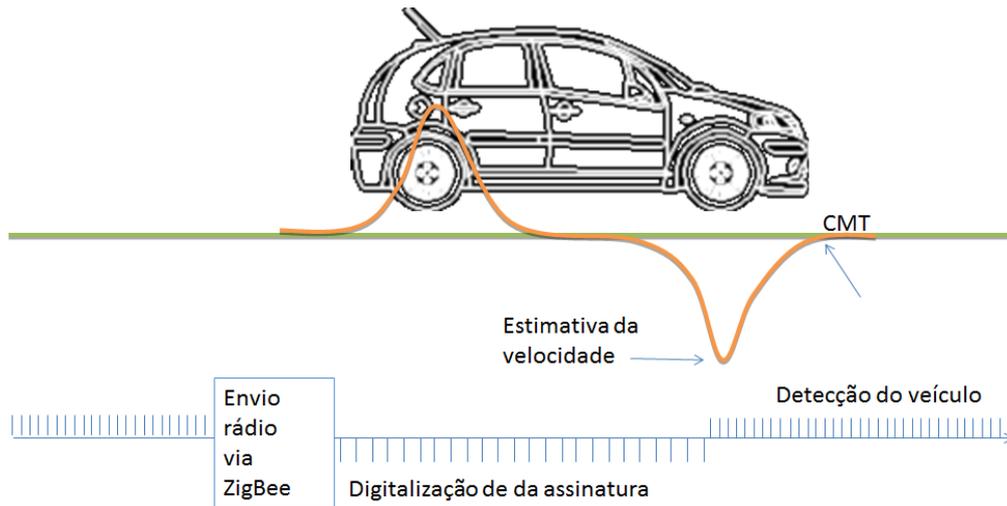
Caso contrário

$$f_d = f_a$$

Um outro dado importante que confere este método é a utilização de um ciclo de trabalho de digitalização de duração maior ou igual ao ciclo de detecção. Ora a rentabilidade da poupança de energia por ciclos de trabalho e repouso é muito sensível a duração dos respectivos ciclos, existindo uma nítida melhoria quando mais se estende esta duração. Se no estado de detecção é preciso assumir sempre a velocidade máxima  $V_{max}$  ou seja uma frequência de amostragem máxima e uma duração mínima do ciclo de detecção, o ciclo de digitalização será mais comprido e terá uma maior poupança energética.

A  $V_{esti}$  pode não ser limitada por  $V_{max}$  caso esta última for a velocidade média do tráfego rodoviário. O *firmware* permite compilar uma versão com esta alternativa.

O *firmware* adapta as amostras recolhidas na fase de detecção ao ritmo de amostragem da fase de digitalização seleccionando um número de amostras no vector circular de detecção e inserindo estes em prefixo no vector de digitalização. Utiliza-se sempre uma relação de multiplicador inteiro entre a duração de uma amostra de detecção e a duração de uma amostra de digitalização, o que permite seleccionar um número de amostras inteiro a transportar do vector de detecção para o vector de digitalização.

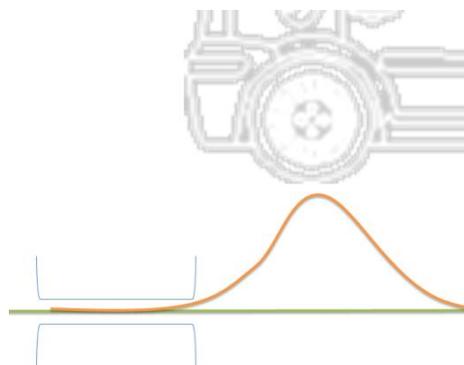


**Fig. 4-4 Estimativa da velocidade e adaptação da frequência de amostragem**

O fim do veículo corresponde à ausência de flutuações durante um número de amostras relativamente a um patamar configurável como representado na Fig. 4-5. O fim do veículo deve convergir para o valor do CMT embora esta condição não é utilizada para a saída do estado de digitalização. Se não houver detecção do fim do veículo, quando é alcançado o máximo de amostras autorizadas, passa-se para o 3º estado de envio de dados.

Se o número de amostras de fim de veículo for demasiado pequeno, o algoritmo pode ter cortado uma assinatura em 2, se for demasiado grande, pode perder o veículo que segue se este se encontrar muito próximo. As variações do campo magnético produzidas pela passagem do veículo devem ser suficientes para evitar cortes da assinatura magnética e o ruído de fundo suficientemente baixo para permitir detectar o fim do veículo. O *firmware* permite configurar o treshold de detecção e de fim de assinatura para controlar isso.

Estes problemas implicam que não se pode pôr o eq-sensor numa fila de espera mas sim, após o ponto de acumulação de veículos.



**Fig. 4-5 Detecção do fim do veículo**

Uma vez realizada a detecção, digitalização e atingido o fim do veículo, a assinatura é enviada num conjunto de pacotes ZigBee para o coordenador que os encaminha através do seu *Gateway* série até o SA. Na especificação ZigBee não consta a fragmentação de pacotes e por isso, com um preâmbulo de transporte do perfil SRS, é realizado esta operação. A fragmentação é realizada apenas com o envio de assinaturas.

**Tab. 4-2** Preâmbulo de transporte para a fragmentação das tramas de assinaturas

ID	N_SEG	PAYLOAD
2 bytes	1 byte	Até 127 bytes

Onde:

- ID é o nº do Eq-sensor na rede;
- N\_SEG é o nº do segmento (pacote) da trama enviada;

O tamanho encontra-se no primeiro segmento que contém o início da trama assinatura na posição 5 (ver Anexo D). O SA que faz a desfragmentação, detecta este valor e com base neste contador, espera a conclusão do envio dos pacotes ZigBee encaminhados via o *Gateway* série para reconstituir a trama. O Coordenador recebe e reencaminha os pacotes com o preâmbulo, sem analisar o seu conteúdo.

Este preâmbulo, permite a recepção, pelo SA, de tramas provenientes de vários sensores com pacotes misturados entre si.

O *Stack* ZigBee do coordenador armazena até um pacote de dados de entrada por sensor durante um período de tempo limitado, por omissão 10 segundos. O eq-sensor depois do envio da assinatura ou periodicamente, solicita este pacote que é um comando do protocolo aplicacional e responde imediatamente ao pedido com uma trama de informação, de configuração ou um reset do SoC.

O *Stack* ZigBee não proporciona um controlo de potência activo. Como as topologias que oferecem o ZigBee são múltiplas, cada tipo de controlo de potência activo tem benefícios e penalidades. Por exemplo, numa rede arborescente densa, o controle de potência em malha fechada ou aberta deve decidir de um valor que satisfaça os nós próximos como os distantes. Por isso, a solução é uma média e é deixado a aplicação a decisão de configuração da potência de emissão, sabendo que por omissão, esta é configurada para 0 dBm.

No presente projecto, temos uma topologia de rede em estrela entre os eq-sensores e o coordenador situado na berma da auto-estrada. Como os eq-sensores utilizam o canal de

## Implementação

comunicação somente quando é necessário e quando este canal não está sendo utilizado, a topologia se resume a um conjunto de ligações ponto a ponto, na qual os eq-sensores devem otimizar o nível de potência de envio relativamente ao coordenador, enquanto este, alimentado por um grande painel solar ou uma ligação ao sector eléctrico, pode recorrer a potência de emissão fixa mais alta de 4 dBm. Portanto, só o eq-sensor deve recorrer a um controlo de potência de emissão em malha fechada para auto-calibrar a sua potência de emissão e limitar o seu consumo energético. O eq-sensor recebe com cada mensagem originado do coordenador, o LQI, *line quality indicator* e o RSSI, *received signal strength indicator*. O *firmware* calcula uma média destes indicadores e também o PER, *packet error rate*, com base na recepção de pacotes ACK, *ACKnowledge* e NAK, *None Acknowledge*, e adapta o seu nível de potência de emissão.

Uma outra importante característica do controlo de potência em malha fechada reside na adaptação as condições meteorológicas desfavoráveis incluindo fortes chuvas, neve, etc... que podem precisar um aumento de potência durante um lapso de tempo que é necessário manter tão pequeno como possível. No anexo I é mostrado que uma camada de lama de 2 cm pode criar uma atenuação de 19 dB, ora o sistema deve funcionar com a maior resiliência possível. O controlo de potência de emissão do eq-sensor ajuda a alcançar este objectivo. Com este algoritmo, os diferentes locais de instalação em termos de distância até o coordenador não precisam de afinações e testes de potência porque o sensor realiza esta calibração automaticamente por *firmware*.

O *firmware* do concentrador foi desenhado como um encaminhador de pacotes entre a rede ZigBee e a porta série do *kit* de desenvolvimento adquirido.

Uma versão mais avançada foi desenhada para o coordenador que emite um ACK para cada pacote correctamente recebido. Se o eq-sensor não receber um ACK durante um período, reenvia uma vez o pacote não confirmado. O coordenador, por sua vez, afasta os pacotes repetidos por via da numeração sequencial que o eq-sensor insere no preambulo. O eq-sensor termina o envio de uma trama caso não haja um ACK depois do envio repetido de um pacote.

Uma versão com dois processos separados para as comunicações sem fios e as comunicações série, tendo em comum uma lista de buffers, foi desenvolvida. Esta estrutura tem por objectivo tirar o melhor proveito do SoC cc2530 para realizar um coordenador eficiente que adapta as velocidades de comunicações entre o sem fios e as comunicações

série. Esta arquitectura optimiza o encaminhamento de pacotes e deveria permitir suportar vários eq-sensor.

Foi ainda desenvolvido um PdC, *Painel de Controlo*, que independentemente do SA permite:

- Monitorizar a recepção de tramas e apresentar o seu conteúdo;
- Desfragmentar conjuntos de pacotes e reconstituir as tramas SIGNATURE;
- Apresentar graficamente a assinatura recebida;
- Solicitar a trama de STATUS de um eq-sensor;
- Visualizar o conteúdo de uma trama STATUS originada por um eq-sensor;
- Solicitar a trama de CONFIG de um eq-sensor;
- Configurar um eq-sensor da rede ZigBee com uma trama CONFIG originado pelo PdC;
- Gravar as assinaturas recebidas em ficheiros CSV e BIN.

Este utilitário permite a configuração e os testes do *firmware*. Ele antecipa a interligação com o SA.

O projecto tem uma biblioteca em C++ para o SA, que permite receber um conjunto de pacotes e analisando o preâmbulo, desfragmentar as tramas oriundas de um eq-sensor e encaminhadas pelo coordenador até o SA. Desta forma, apresenta-se ao contexto superior, as aplicações, a assinatura completamente reconstituída.



## 5 Resultados

### 5.1 Magnetómetro

O objectivo do projecto é obter assinaturas congruentes (de forma semelhante) para um mesmo modelo de veículo entre várias instalações de eq-sensores que possam ser comparadas com uma base de dados de assinaturas estandardizadas e identificadas, após duas operações de normalização de isometria linear no número de amostras e na amplitude. A orientação do magnetómetro é fundamental para garantir a congruência das assinaturas. Existem 3 orientações possíveis:

- Paralelo às linhas de força do CMT;
- Sem orientação definida usando um eq-sensor com 3 direcções de sensibilidade;
- Paralelo ao movimento dos veículos (sentido de rodagem da via);

A orientação do sensor em paralelo com as linhas de força do CMT permite obter maior sensibilidade e, por isso, maior amplitude de variação do sinal de saída. O problema é que o sensor tem uma resposta à passagem de veículos que depende do ângulo entre a direcção do tráfego e a orientação do eixo de sensibilidade máxima do sensor. Por isso, neste caso, as assinaturas são diferentes em cada local de instalação e a congruência será violada. As curvas obtidas não obedecem ao mesmo padrão. Esta solução é adequada apenas para contagem de veículos e necessita do uso de uma bússola durante a instalação para orientar o eq-sensor. Ela garante a sensibilidade máxima do sensor.

Alternativamente, a Honeywell documenta [27] que um magnetómetro com 3 direcções ortogonais de sensibilidade, proporciona um valor sempre independente da orientação do sensor, através do cálculo da norma vectorial ou do módulo:

$$N = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad (5.1)$$

$$N^2 = x^2 + y^2 + z^2 \quad (5.2)$$

Onde:

- N é a norma vectorial;
- N<sup>2</sup> o módulo vectorial;
- x, y e z as direcções de sensibilidade do sensor, ortogonais entre si.

Caso se pretenda guardar toda a informação das 3 direcções de sensibilidade, será ainda preciso calcular o ângulo do vector ou então transferir os vectores de amostras x, y e z

## Resultados

directamente para o SA. Em qualquer caso, o acréscimo de processamento no eq-sensor e no SA é muito significativo e pode dificultar a poupança de energia no eq-sensor, aumentar o custo energético das comunicações de dados sem fios e reduzir o número de assinaturas que o SA poderá processar por segundo. A solução com 3 eixos não é otimizada em poupança energética nem em processamento, é otimizada em precisão.

Poder-se-ia pensar que 2 direcções ortogonais e horizontais seriam suficientes para obter  $N_h$ , a norma vectorial no plano horizontal. Ora, os dados da assinatura magnética devem ser invariantes com a localização geográfica da instalação do eq-sensor. Como as linhas de força do CMT são inclinadas em relação à superfície da terra de maneira diferente em cada local de instalação, 2 eixos não oferecem uma assinatura congruente e são precisas as 3 direcções ortogonais para o cálculo de uma assinatura independente do local de instalação.

Esta opção com 3 direcções de medida permite a não orientação do Eq-sensor na altura da sua instalação e de obter sempre o mesmo padrão de curva. Também, a amplitude da norma medida deverá ser semelhante em qualquer local, embora o CMT tenha variações de potência em função dos locais geográficos de instalação, da altura do ano e da meteorologia, e por isso, o SA deverá sempre realizar a normalização das assinaturas.

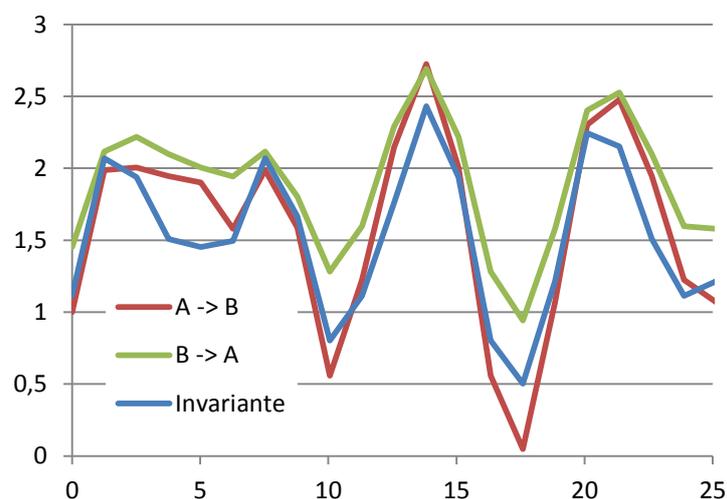
Um outro problema com várias direcções de sensibilidade magnética ortogonais é que cada uma tem uma amplitude do sinal de saída bastante diferente que pode ser até 50% inferior a maior amplitude. Este fenómeno se deve a orientação do eixo de sensibilidade magnética em relação ao CMT. Se for na direcção da maior sensibilidade, a amplitude das tensões de saída é alta, e no caso contrário, esta amplitude é de 50% inferior. Uma opção seria de amplificar cada eixo magnético separadamente para aproveitar toda a gama de entrada dos ADC. Neste caso, cada eixo de sensibilidade do sensor magnético teria um ganho diferente e estes três ganhos seriam diferentes conforme a orientação de instalação do eq-sensor. Este método induz uma distorção da assinatura obtida a partir da norma vectorial e ela deixa de ser congruente quando o eq-sensor é instalado em vários locais para um mesmo carro. Ora, se a assinatura não é congruente, isso significa que o sistema incorpora um erro em si e cria um enviesamento que piora a precisão das medidas. A título de exemplo, calculou-se o caso com dois eixos magnéticos ortogonais para um campo magnético idêntico mas duas orientações do eq-sensor, ortogonais entre si. São calculadas duas normas vectoriais:

- Uma sem amplificação diferenciada das tensões de saída dos dois eixos magnéticos ortogonais. As orientações dão exactamente a mesma curva não existindo erro sistémico, e

- As duas outras normas vectoriais são calculadas com amplificação diferenciadas das amplitudes das tensões de saída e a seguir, são calculadas as respectivas normas. As curvas resultantes na Fig. 5-1 são diferentes evidenciando a produção de erro entre as curvas  $A \rightarrow B$  e  $B \leftarrow A$ . Este método cria portanto um enviesamento dos dados e o padrão adquire erros estatísticos tornando mais difícil o reconhecimento.

Este erro pode se inserir facilmente num sistema se existir esta amplificação com ganhos diferentes dos *outputs* do magnetómetro ou também e mais subrepticamente no processamento informático a jusante. De facto, para o programador, seria normal ao receber 3 vectores de valores com amplitude bastante diferentes de normalizar estes valores na escala máxima de medida para os máximos da curva. Esta miopia pode passar despercebida, escondida dentro da complexidade dos sistemas de reconhecimento por padrão. O sintoma deste problema consistia na obtenção de uma excelente taxa de reconhecimento no local de testes que não seja reproduzível em outras instalações do sensor. O estudo estatístico com um mesmo carro por eq-sensores instalados em diferentes locais, deveria apresentar uma curva difusa em vez de uma curva nítida em jeito de atractor estatístico.

Com o uso de um único eixo magnético orientado na direcção do tráfego rodoviário, os estudos estatísticos para um mesmo carro, em diferentes locais, são congruentes e proporcionam como atractor, uma curva mediana bem nítida.



**Fig. 5-1 Comparação de normas vectoriais c/ ou s/ amplificação variável dos eixos do magnetómetro**

O uso de 3-eixos de sensibilidade implica a aquisição de um magnetómetro mais dispendioso e um processamento mais complexo, incluindo 3 ADC e o cálculo da norma que

## Resultados

é bastante lento dada a existência de uma raiz quadrada. Alternativamente, pode-se limitar ao cálculo do módulo (5.2). O módulo vectorial requer uma capacidade de armazenamento de dados, superior (por exemplo, com 8 bits de precisão, o valor máximo 0xFF nas 3 direcções cria um módulo de 0x2FA03, ou seja, 5 bytes) e uma duração alongada de envio dos dados. A duração do ciclo de trabalho será afectada. Com o componente cc2530 que foi seleccionado serão excedidos os limites de memória e de processamento. A solução viável é de armazenar os dados digitalizados e os enviar sem qualquer tratamento ao SA. O *firmware* actual faz isso com 2-eixos de maneira razoável.

A empresa Sensys [10] utiliza, no seu eq-sensor, um componente com 3 direcções axiais.

Finalmente, o magnetómetro pode ser sempre orientado na direcção do trafego da rodovia. Neste caso, o eixo principal produz uma curva de amplitude que varia segundo os locais de instalação e a sua posição relativamente ao norte magnético, mas verificamos que esta curva é congruente para um determinado modelo de veículo, qualquer que seja o local de instalação. Um só eixo magnético é portanto suficiente para criar um sistema de contagem e classificação de veículos. A grande vantagem desta solução é de minimizar o processamento, as comunicações de dados e o consumo energético.

### 5.2 Testes de comunicações em linha de vista

Os testes em Idv apresentados na Fig. 5-1 e na Tab. 5-1 foram realizados no exterior, com o *firmware* PER\_TEST da Texas Instruments montado em cada módulo, sendo um, um emissor de 1000 pacotes, 100 por segundos, a potência de -3 dBm, e o outro, um receptor que verifica o FCS, *Field Check Sum*, de cada pacote e caso houver um erro, incrementa um contador. A taxa de erro, PER, *Packet Error Rate*, é obtida com o contador de pacotes com erro nos últimos N pacotes enviados.



Fig. 5-1 Teste de comunicações em linha de vista

Tab. 5-1 Medidas de taxa de perda de pacotes em função da distância

Distância	Emissão	Recepção	PER
[m]	[dBm]	[dBm]	[%]
1	-3	-55	0
10	-3	-58	0
25	-3	-78	0
75	-3	-94	55

As comunicações em Idv com baixa potência de emissão de  $-3$  dBm (0,5 mW) são suportadas até 25 metros do ponto de emissão com taxa de erro nula e 20 dB reserva de potência relativamente ao mínimo de  $-97$  dBm que suporta o componente cc2530.

Os testes realizados com o módulo do ISEL da Cirronet que utiliza o CC2430 e pelo qual se desenvolveu um programa de captura do pacote ACK com LQI, em tempo real, indicaram uma grande sensibilidade à atenuação de curto alcance (variação de 20% na taxa de erro e perda de comunicações):

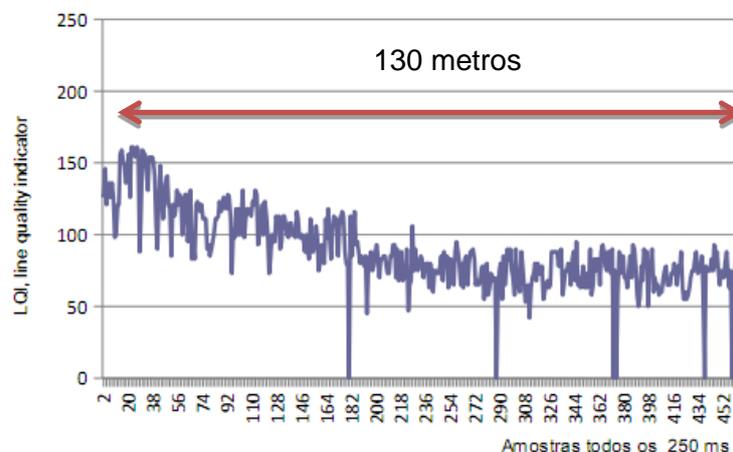


Fig. 5-2 Efeito do desvanecimento de curto e longo alcance

Este resultado explica porque vários componentes SoC oferecem duas saídas de antenas para proporcionar diversidade espacial, por exemplo, o SoC Atmel ATmega128RFA1 [38]. O componente, em leitura, selecciona a fonte de RF de melhor qualidade e comuta para ela. O componente seleccionado, cc2530 da TI, não oferece esta facilidade sendo necessário adicionar um interruptor de radio frequência, medir a potência recebida de cada antena separada de  $\lambda/4$  para uma determinada origem e comutar para a melhor fonte.

## Resultados

Na medida em que os multipercursos para as rádio frequências são quase inexistentes nas instalações previstas em auto-estradas, esta opção não é significativa para este projecto. A instalação dos mesmos sensores em zona urbana mudaria completamente a situação e o coordenador poderia então ter este circuito suplementar para otimizar a recepção de pacotes provenientes dos seus eq-sensores associados.

### 5.3 Inserção num tubo debaixo do asfalto

O local de ensaios é o ISEL e os tubos são subterrados a 30 cm por baixo da superfície da estrada. Existe portanto uma camada de asfalto de 10 cm, 20 cm constituído de terra e pedras. Surpreendentemente, ainda existe parte do sinal que atravessa estes obstáculos. Na Tab. 5-2, apresentam-se as medidas:

Tab. 5-2 Ensaio de atenuação das comunicações em tubos subterrâneos

Distância [m]	Obstáculo	Emissão [dBm]	Recepção [dBm]	Per [%]
0,4	Terra	-3	-52	0,0
12	terra + alcatrão + ldv	-3	-98	98,5
		4	-97	9,0
30		4	-96	11,5

A atenuação é importante para um sistema que deveria funcionar com pilhas visto que não existe acesso ao sol dentro de uma conduta e não se pode utilizar células fotovoltaicas. O recurso a tubos subterrâneos é pouco recomendável porque o eq-sensor terá tendência em elevar a sua potência de emissão para diminuir o PER o que conduz o equipamento a gastar os seus recursos energéticos. Também a norma ZigBee, na banda ISM 2.4 GHz, não pode emitir mais de 10 mW, 10 dBm, de EIRP, *Equivalent Isotropically Radiated Power*. O componente seleccionado cc2530 é limitado a uma potência máxima de 4,5 dBm, ou 2,81 mW. Esta potência máxima limita o ganho máximo que a antena de emissão pode proporcionar é de 5,5 dBi.

O eq-sensor deve ser inserido com pouca profundidade e ter uma cobertura, protecção com material de baixa atenuação às microondas tal como o plástico, alguns tipos de vidro, resina epóxi, ou o asfalto, entre outros.

#### 5.4 Atenuação de materiais utilizáveis para a janela

A construção de uma “janela” para o eq-sensor é um elemento importante. Testou-se a atenuação do acrílico, do vidro normal e de uma camada de asfalto de grande espessura.

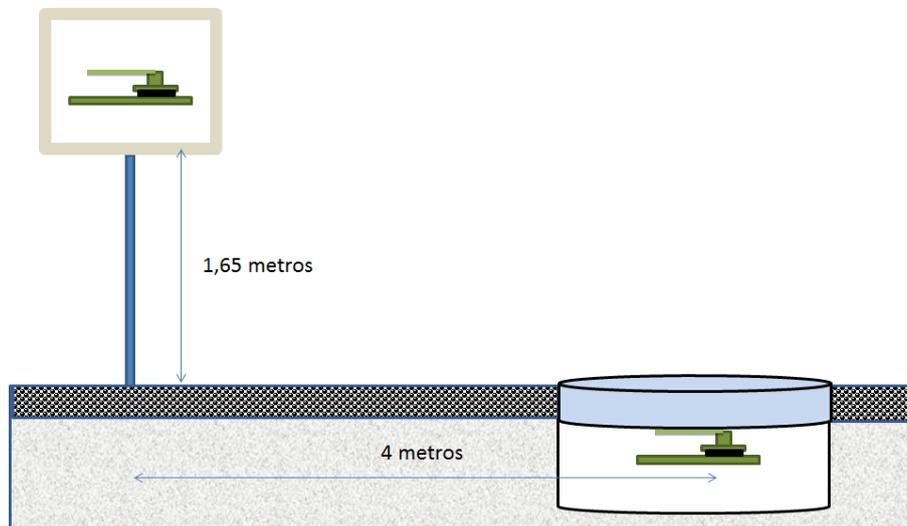


Fig. 5-3 Teste de atenuação do sinal com tampa de acrílico, vidro e asfalto

Tab. 5-3 Medidas de atenuação do sinal 2,4 GHz através diversos materiais

Material	Espessura [cm]	Atenuação [dB]
Acrílico	2	2
Vidro	2	4
Asfalto	10	11

O resultado mostra que o acrílico é especialmente indicado. O vidro normal é muito transparente às microondas mas a literatura indica que o vidro reforçado tem uma atenuação de 10 dB por cm [39]. O vidro com uma grelha metálica no interior é inadequado para microondas com comprimento de ondas de 13 cm.

O asfalto evidenciou uma fraca atenuação de cerca de 1 dB por cm de espessura. Trata-se de um componente assimilável a um plástico e a sua mistura com vidro, plástico e um absorvente / fixador, em grãos ou pó, para diminuir a plasticidade e dar maior rigidez, poderia ser uma alternativa mais económica ao uso da fibra epóxi que, por exemplo, a Sensys recomenda. O asfalto permeável às radio frequências não existe no mercado.

## Resultados

Como existe acrílico de grande resistência [40] e em diversas espessuras, este material é o mais indicado para o projecto se for utilizado a captação solar. Se a fonte de energia for assegurada por baterias não recarregáveis, a utilização do PVC, Policloreto de Vinila, é adequada para as rádio frequências. Duas cavidades podem ser criadas na janela, nas quais podem ser inseridos a antena e o magnetómetro, sem provocar alteração significativa na estrutura.

### 5.5 Ângulo de inclinação

Um conjunto de medidas teve como enfoque o ângulo de inclinação do coordenador relativamente ao eq-sensor. Como o eq-sensor é encarcerado num buraco cujo diâmetro de 10 cm é um pouco maior do que a metade do comprimento de onda (13 cm) da frequência utilizada, 2,4 GHz, este poço serve de guia de onda e favorece a radiação vertical em detrimento de uma radiação ao nível do chão que acontece apenas por difracção.

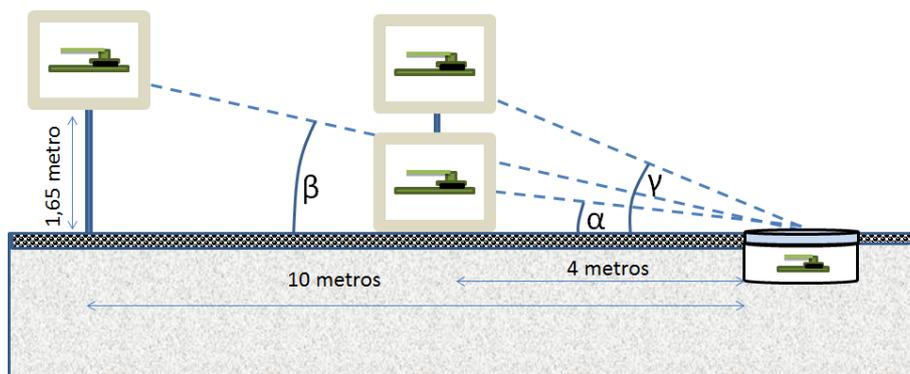


Fig. 5-4 Ângulo de inclinação para a antena do coordenador

Tab. 5-4 Medidas de atenuação com ângulo de inclinação do coordenador

Distância	Altura	Ângulo	Receive power	PER
[m]	[m]	[°]	[dBm]	[%]
1	1,65	1,65	-55	100
4	0,1	$\alpha = 3$	-82	100
4	1,65	$\gamma = 45$	-76	100
10	1,65	$\beta = 19$	-94	99

O ângulo  $\gamma$  de  $45^\circ$  permite obter um ganho de 6 dB comparativamente à potência de recepção para um coordenador pausado no chão, com ângulo de poucos graus. A atenuação a 10 metros, com um ângulo de  $19^\circ$ , já alcança -94 dBm o que é um valor limite

em termos de comunicações sem fios. O ângulo do coordenador deve ser elevado para garantir a recepção do sinal dos eq-sensores.

Os resultados permitem tirar as seguintes e importantes conclusões:

- 1) O coordenador deverá ser instalado em altura;
- 2) O coordenador terá uma antena directiva;
- 3) A antena no eq-sensor terá de ser o mais próximo possível da superfície tal como sugerido no estudo preliminar em 3.3.4 (Antena) e poderá ser directiva para o quadrante direito superior no sentido da marcha dos veículos, para os países com condução a direita, em direcção do coordenador situado na berma da rodovia;

Com as atenuações pode-se estabelecer um *link budget* Tab 5-5 entre o eq-sensor e o coordenador:

**Tab. 5-5 Link budget uplink entre o eq-sensor e o coordenador**

Item	Ganhos	Atenuações	Unidade
$P_e$ , Potência do emissor (eq-sensor)	0		dBm
$G_e$ , Ganho antena do emissor	0		dB
$p_j$ , Perdas decorrentes da janela em acrílico reforçado de 2 cm		4	dB
$p_i$ , Perda de inclinação, 10 metros		18	dB
$A$ , Atenuação de espaço livre p/ 10 metros		60	dB
$G_r$ , Ganho antena do receptor (coordenador)	10		dB
<b><math>P_r</math>, Potência recebida</b>	<b>-72</b>		<b>dBm</b>
$S_r$ , Sensibilidade do receptor (coordenador)	-97		dBm
$R_p$ , Reserva de potência (máxima perda suplementar autorizada)	25		dB

Calculado a partir da equação do *Path Loss*:

$$P_r = P_e + G_e - p_j - p_i - A + G_r \quad (5.3)$$

$$(5.4)$$

$$R_p = P_r - S_r$$

A reserva de potência em *uplink* pode ser essencial nos dias em que se forma uma camada acima do sensor de água, neve, placas de gelo ou lama. A atenuação dieléctrica tem nestes casos valores importantes e convém garantir a maior resistência a falha para este sistema de informação, em particular para se diferenciar dos sistemas existentes com câmaras. Se reportar ao Anexo I para o cálculo da atenuação de uma camada de 1 cm de dieléctrico.

O eq-sensor aumenta ou diminui a sua potência de emissão de -28 dBm até 4 dBm via o controlo de potência em malha fechada implementado no *firmware*. É necessário manter a

## Resultados

maior reserva de potência para limitar a potência de emissão e manter baixo o consumo energético. Ressalva-se, no entanto, que grande parte do consumo da potência de emissão deve-se ao subcomponente rádio e não tanto a potência de emissão em si: com uma potência de emissão de -28 dBm, o consumo é de 23 mA e com uma potência superior de 32,5 dB, ou seja, de 4 dBm, o consumo é apenas de 34 mA. O consumo nominal é de 27 mA para uma potência de -3 dBm.

### 5.6 Captura de assinaturas

As sessões de testes decorreram no ISEL e na Brisa em Loures. Para o efeito foi utilizado um BMW desportivo Serie Um e um Citroën C3. No ISEL, o eq-sensor foi colado na superfície da estrada o que proporciona resultados melhores em termos de amplitude do sinal. Em Loures, o eq-sensor foi inserido num buraco de 10 cm de diâmetro e 10 cm de profundidade realizado no asfalto sendo o módulo de processamento instalado na berma. O coordenador foi conectado a um PC via comunicações serie, com o *software* Painel de Controlo que grava as assinaturas recebidas em formato CSV, *Coma Separated Values*, que o Excel da Microsoft e o Calc do OpenOffice.org reconhecem. A seguir, apresentamos os resultados.

Os testes de passagem de carro foram realizados com o sensor orientado no sentido da marcha, na Fig. 5-5.

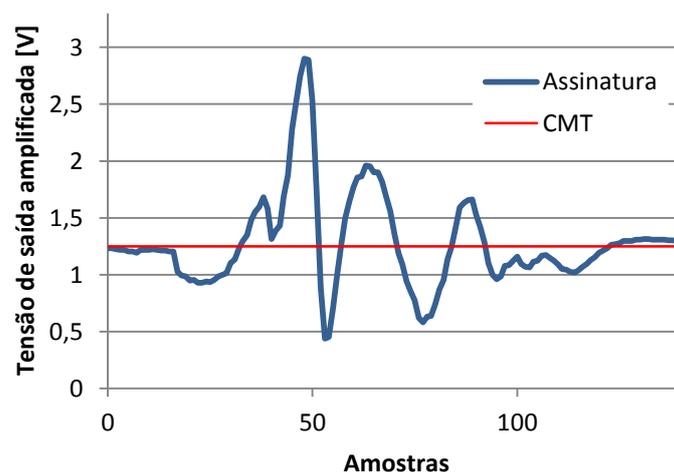


Fig. 5-5 Captura de assinatura no sentido da marcha, carro BMW, velocidade 30 km/h

O eq-sensor contabiliza correctamente a passagem de veículos.

O resultado é aceitável no que diz respeito à amplitude do sinal recebido, ou seja, a sensibilidade do sensor, a captura inicial do sinal até ao seu fim e a determinação do CMT. Esta amplitude depende da orientação do sensor em relação às linhas de força do campo

magnético da Terra, visto que este é orientado em direção da marcha dos veículos e por isso, esta amplitude varia consoante o local de instalação.

A detecção de eixos do veículo declarada como possível pela Honeywell é pouco exequível para carros monobloco que não têm eixos. O que se detecta é o motor e outros elementos de transmissão. Nos carros ligeiros o alumínio e os materiais compósitos limitam a amplitude e sofisticação da assinatura magnética.

A assinatura é muito específica para cada modelo de veículo e poderá ser um meio de classificação, a partir de uma base de dados de referência com assinaturas identificadas.

O mesmo veículo no ISEL, com velocidade mais elevada na Fig. 5-6, a seguir:

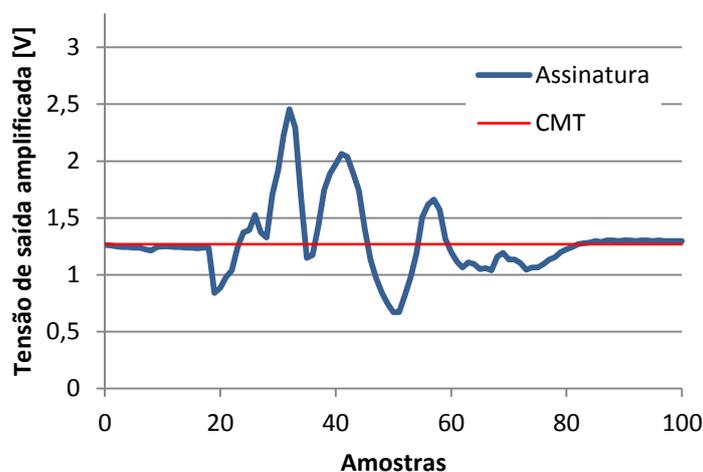


Fig. 5-6 Captura de assinatura no sentido da marcha, carro BMW, velocidade 50 km/h

- O sinal perde definição, por exemplo, a flutuação inicial é pouco nítida.
- O padrão da assinatura é semelhante ao da assinatura anterior.

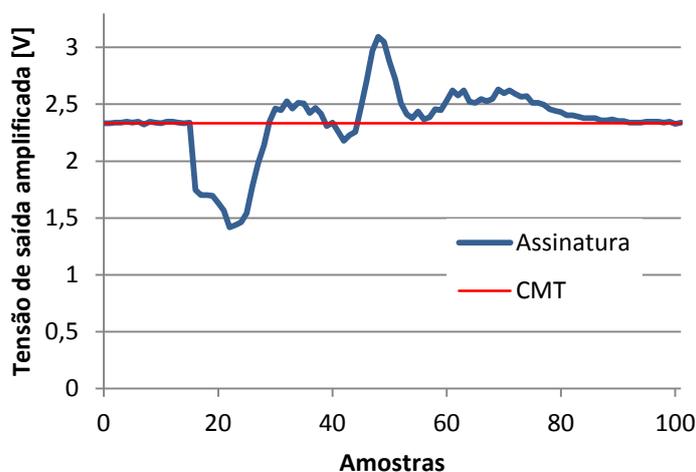


Fig. 5-7 Captura de assinatura com sensor a 90°, em marcha em frente

## Resultados

Com o mesmo carro e com o magnetómetro orientado a 90° em relação à direcção de passagem, obtemos o seguinte gráfico

Fig. 5-7, em marcha em frente.

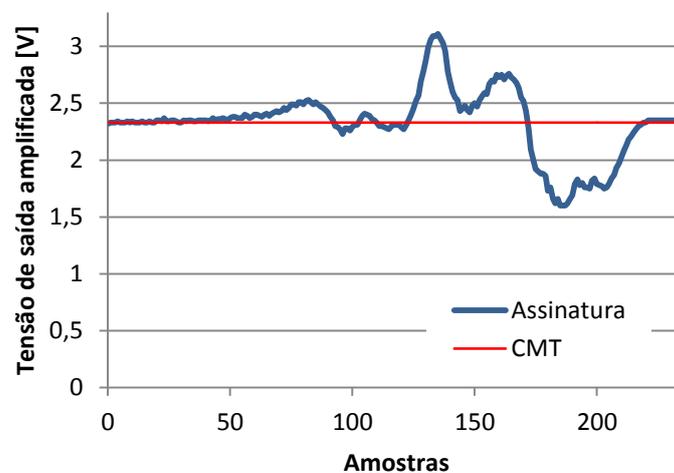
Este gráfico mostra:

- Uma forte deslocação do patamar de 1,25 V para 2,4 V, associado ao CMT;
- Uma amplitude máxima igual a 75% da sensibilidade anterior;
- Uma assinatura diferente e sem correlação com as assinaturas anteriores.

O deslocamento do patamar do CMT ilustra o problema da calibragem do eq-sensor que, para beneficiar de toda a gama de medida prevista, deve centrar este valor em redor dos 1,5 V sob pena de ter parte do sinal saturado e, por consequência, cortado.

Conclui-se que a orientação do sensor deverá ser feita sempre no sentido de orientação do tráfego rodoviário e não no sentido das linhas de força do campo magnético da Terra.

E o seguinte gráfico Fig. 5-8, corresponde à marcha atrás com a instalação anterior. A assinatura é inversa.



**Fig. 5-8** Captura de assinatura com sensor a 90°, em marcha a traz

É portanto possível detectar o sentido de marcha de um veículo quando é conhecida a assinatura num determinado sentido. A assinatura aparece invertida no eixo temporal, sem inversão de amplitude.

Na Fig. 5-9, apresentam-se uma serie de testes realizados com um Citroën C3. A assinatura de um carro ligeiro económico, como o Citroen C3, denota a utilização de muitos materiais não ferromagnéticos (carroceria em alumínio), uma vez que esta é fraca em termos de amplitude e complexidade.

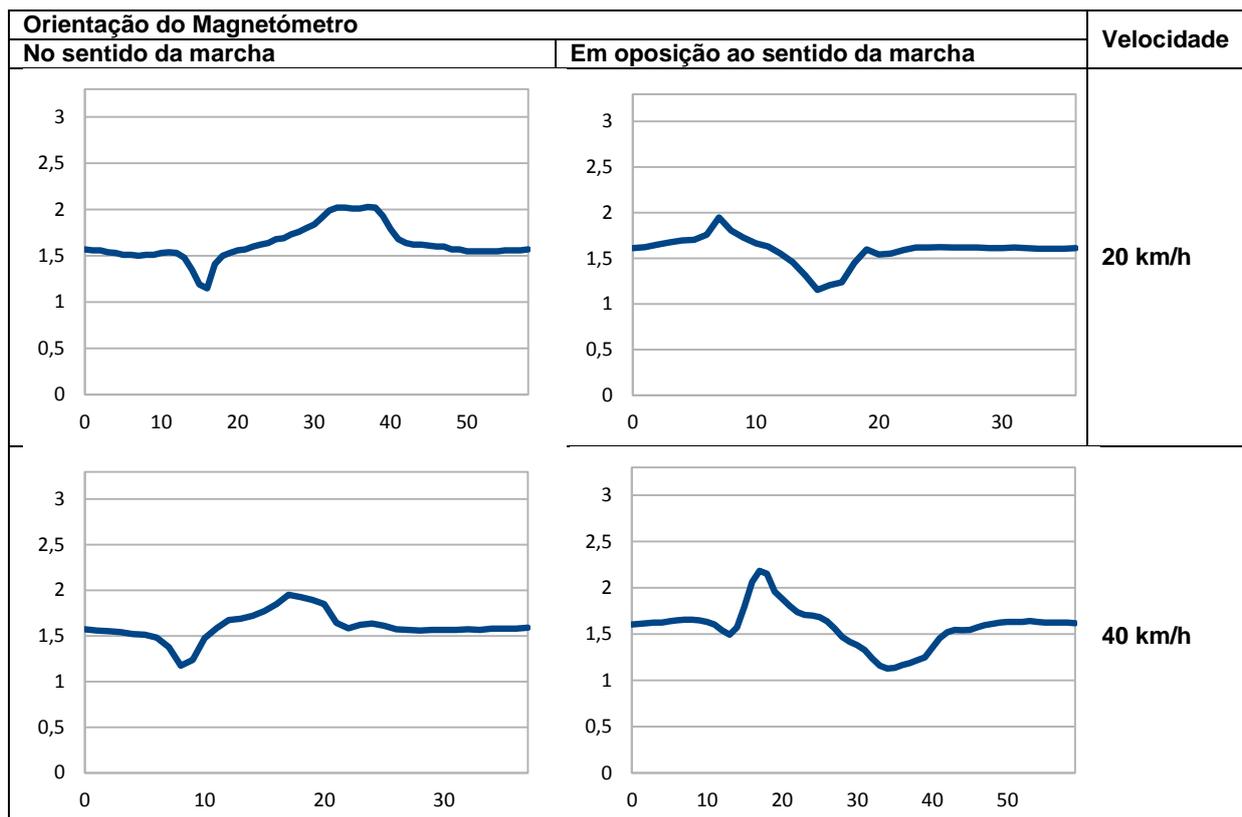
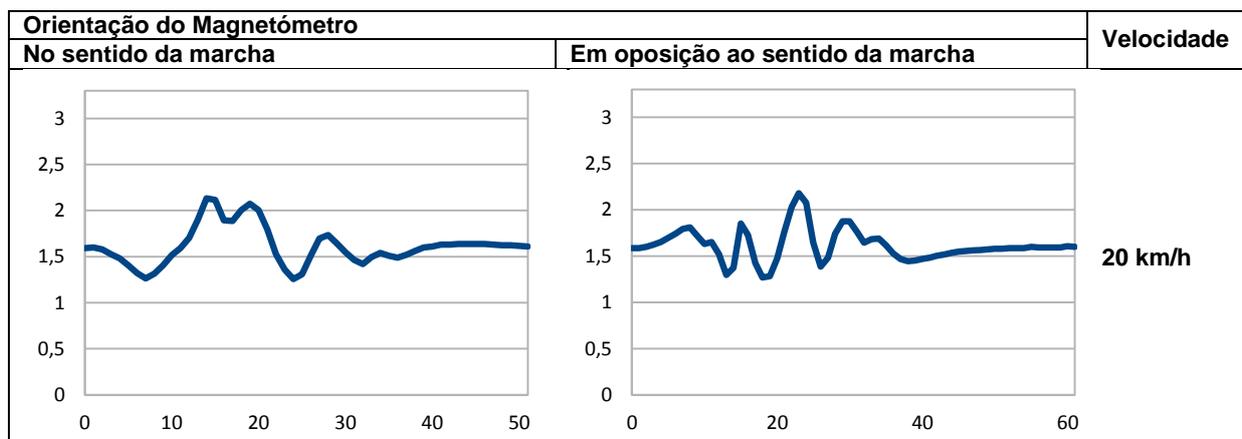


Fig. 5-9 Medidas com carro Citroën C3

A sua forma é completamente diferente do próximo veículo e mostra que pode existir identificação de modelo / marca de veículo com assinatura magnética. A forma da assinatura com o veículo a deslocar-se em marcha atrás não é exactamente simétrica.

Segue uma série de testes idênticos realizados com um BMW Serie 1 desportivo na Fig. 5.10. As assinaturas aparecem com um nítido padrão associado ao tipo de veículo mas também é notável uma variação de forma entre as várias assinaturas.



## Resultados

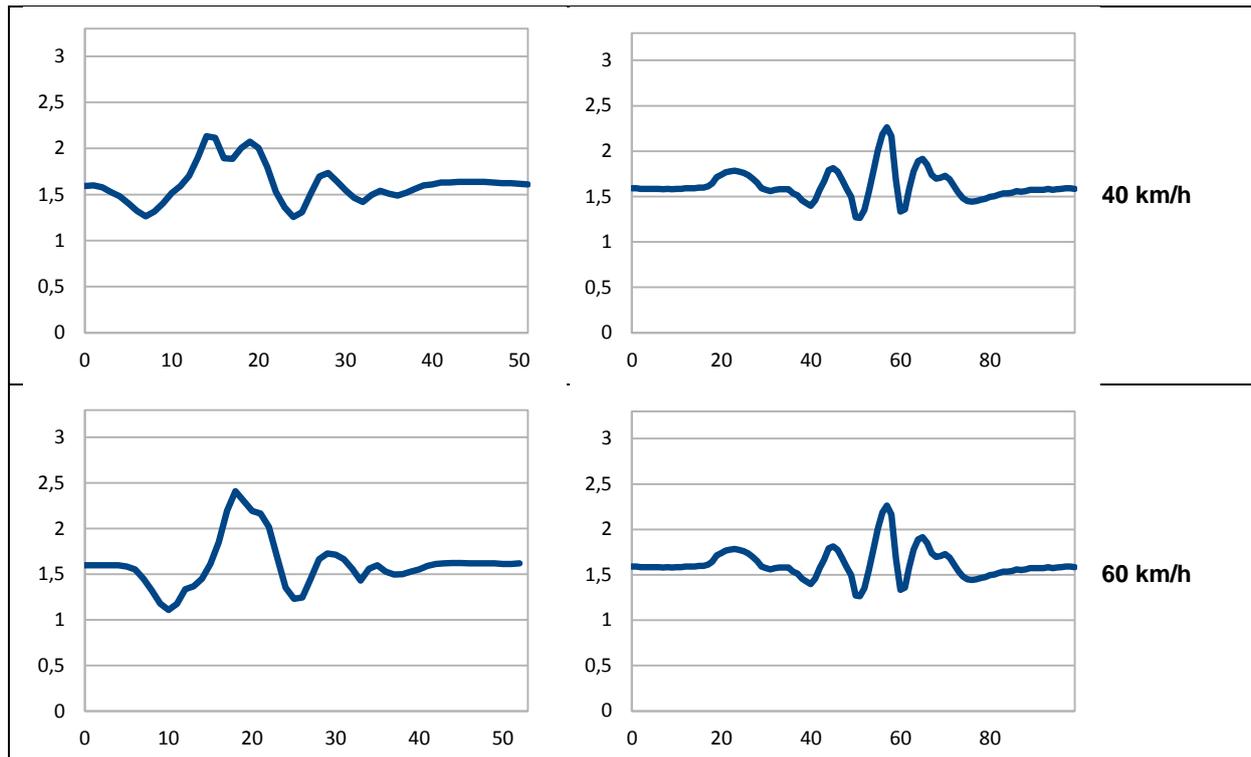


Fig. 5-10 Medidas com carro BMW desportivo

A taxa de amostragem determinada com base na estimativa da velocidade é aceitável e reprodutível para as diferentes velocidades.

Os testes na Fig. 5-11 mostram o efeito da modificação da altura do sensor em relação ao veículo.

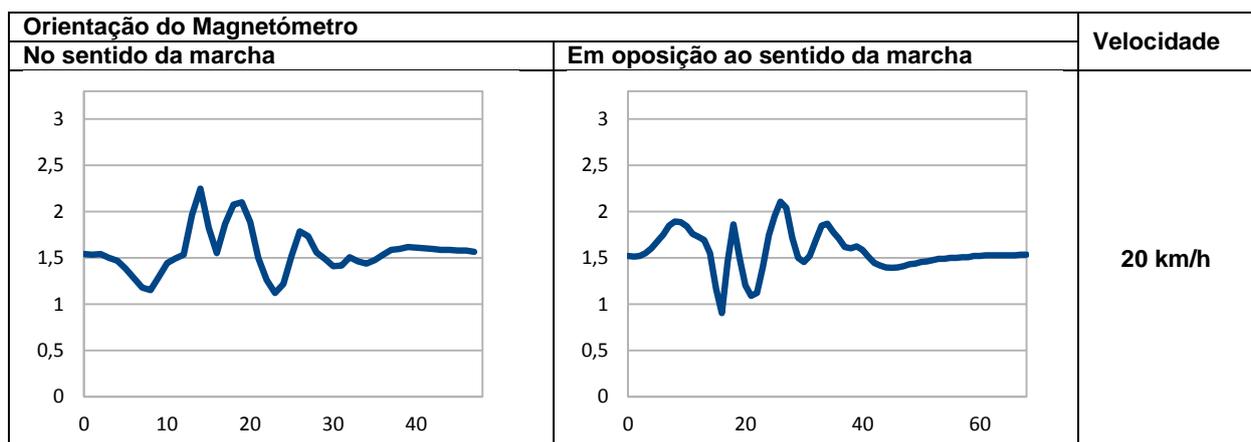


Fig. 5-11 Medidas com modificação de altura do sensor

A inserção do sensor no buraco do alcatrão em vez da detecção em superfície não altera significativamente os valores da amplitude do sinal.

A digitalização de duas direcções magnéticas ortogonais, na Fig. 5-12, é possível com o sensor que dispomos, o HMC1002 da Honeywell. Esta operação multiplica por dois o tempo

de processamento e limita a capacidade do eq-sensor de entrar em estado adormecido, mas a detecção e a digitalização continuam a ser efectuadas sem atrasos. Calculou-se também a norma vectorial do plano horizontal apresentada na cor amarela. O eixo B é orientado na direcção do tráfego.

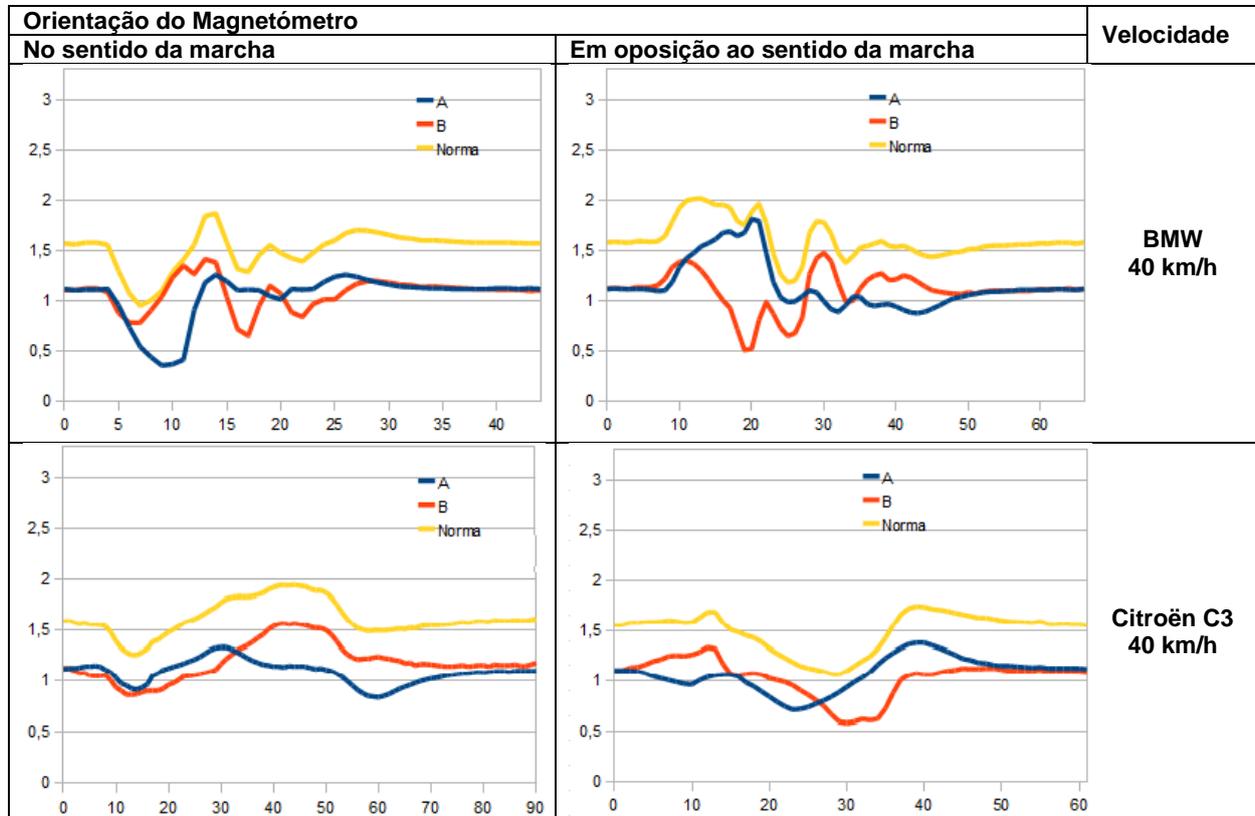


Fig. 5-12 Medidas com duas direcções ortogonais de sensibilidade magnética

A direcção de sensibilidade magnética A é alinhada com a marcha dos veículos, B é paralelo e a Norma é a norma vectorial de A e B, no plano horizontal.

Os resultados obtidos não oferecem uma curva de melhor discriminação, como as direcções das linhas de força do campo magnético da Terra são oblíquas e diferentes em cada local de instalação, a norma da variação do vector do campo magnético da Terra só pode ser tomada com 3 direcções ortogonais de sensibilidade [27]. Só desta forma se obtém, de facto, uma referência independente da posição de instalação do sensor e da sua posição relativamente ao CMT.

A Fig. 5-13 mostra duas assinaturas capturadas durante as sessões de teste por veículos imprevistos. As assinaturas são completamente diferentes das assinaturas da BMW Serie 1 e da Citroën C3. Esta diversidade sugere que seja possível alcançar uma taxa alta de reconhecimento de modelo de veículo e os classificar.

## Resultados

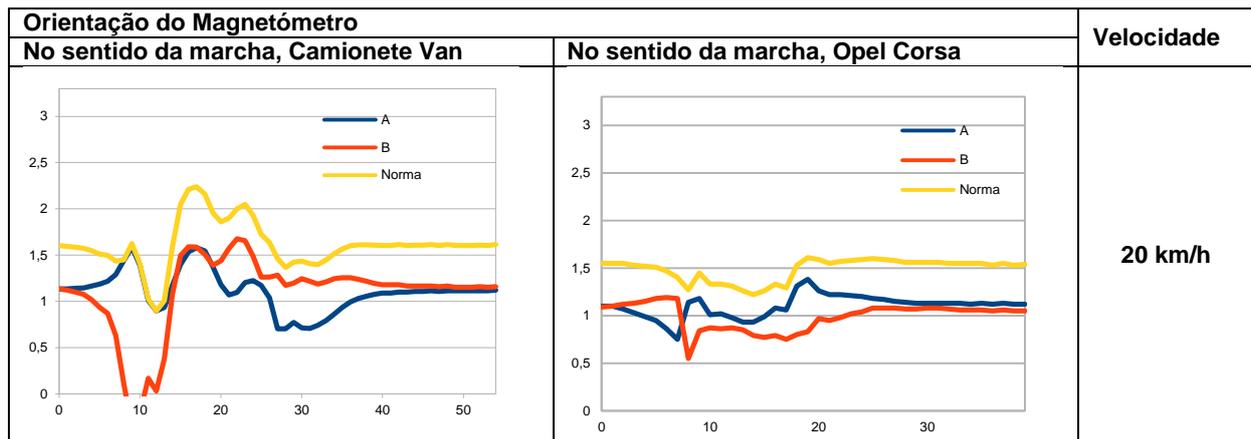


Fig. 5-13 Medidas com duas direcções ortogonais, assinaturas diversas

### 5.7 Ocupação do canal de comunicações

Neste projecto, o ciclo de ocupação do canal é limitado ao envio da assinatura digital do veículo após a sua espera e passagem. Um tempo estimado, no pior dos cenários como apresentado na Tab. 5-6, em 0,56% como segue a simulação que utiliza um tráfego máximo de 5000 veículos por hora correspondendo ao pior caso de figura.

Tab. 5-6 Ocupação do canal de comunicações

Itens	Valor	Unidade
Nº de veículos p/ hora	5000	veic./h
	1,39	veic./s
Débito binário	250	kbps
Pacotes enviados	1000	bit por veic.
Uso do canal por veículo	0,004	s/veic.
<b>Uso relativo do canal</b>	<b>0,56%</b>	

Este resultado cumpre com a norma IEEE 802.15.4 2006 – E.3.4, que recomenda uma ocupação do canal inferior a 1% por parte dos elementos da rede: equipamentos terminais, routers e coordenador.

### 5.8 Autonomia energética

A poupança de energia do *Stack ZigBee* da Texas Instruments recorre a um modo de adormecimento indirecto, por omissão. O sistema operativo, o OSAL, quando não existem mais tarefas a realizar, analisa as tarefas agenciadas e vê se existe um intervalo de tempo suficiente para adormecer o SoC.

O tempo de comutação do OSAL é de 2 ms, ou seja, 4 ms para adormecer e despertar o SoC (as nossas medições com osciloscópio mostram 500  $\mu$ s). Por omissão, o OSAL tem um tempo mínimo para o período de adormecimento que é de 14 ms. É um valor inadequado para este projecto cujo ciclo de trabalho mais curto é igual a 2ms ( $V_{max}$  180 km/h com  $N_A$  igual a 10 amostras por metro de veículo). O tempo mínimo para realizar o adormecimento do OSAL foi diminuído para 1 ms contrariando as recomendações da TI mas produzindo efeitos positivos na diminuição do consumo.

Como é possível observar na Tab. 5-7, a percentagem de poupança energética com a versão **Normal** do *firmware* do projecto é aquém do desejado, ou seja, só com uma velocidade máxima de 90 km/h e 5 amostras por metro de veículo é que inicia-se alguma poupança. Ressalva-se que mesmo nesta configuração do *firmware* ainda não optimizada, a corrente consumida é pouco elevada, porque o módulo rádio é sempre suspenso quando não é utilizado em emissão. Caso o módulo rádio seja utilizado em permanência, o consumo medido se situaria nos 30 mA.

Tab. 5-7 Medidas de consumo energético com o *firmware* multi precisão

$V_{max}$ [km/h]	Amostras	Período [ms]	Corrente [mA]	Poupança [%]
180	10	2	8,4	0
90		4	8,4	0
45	5	8	7,3	13
20		16	3,9	54
		36	1,9	77

Optou-se por otimizar o *firmware* tornando fixo um conjunto de escolhas dinâmicas. O código aceita uma compilação POWER\_SAVING que apenas utiliza a precisão de 7 bits para o ADC.

Tab. 5-8 Medidas de consumo energético com *firmware* POWER\_SAVING

$V_{max}$ [km/h]	Amostras	Período [ms]	Corrente [mA]	Poupança [%]
180	10	2	5,0	40
90		4	3,1	63
45	5	8	1,7	80
20		16	1,0	88
		36	0,7	92

## Resultados

É utilizado apenas o magnetómetro com 1 direcção de sensibilidade magnética. Também foram desactivadas todas as funções desnecessárias para esta nova série de testes tal como o comando do LCD, as funções de monitor de *debugging*. A Tab. 5-8 mostra as medições com o firmware POWER\_SAVING que processa ciclos de trabalho e repouso durante os estados de detecção e digitalização. A poupança é nítida validando o método.

Concluindo, temos resultado apresentado na Fig 5-13 que mostra o ganho em poupança energética que já alcança 80% com  $V_{max}$  igual a 90 km/h e 5 amostras por metro de veículo.

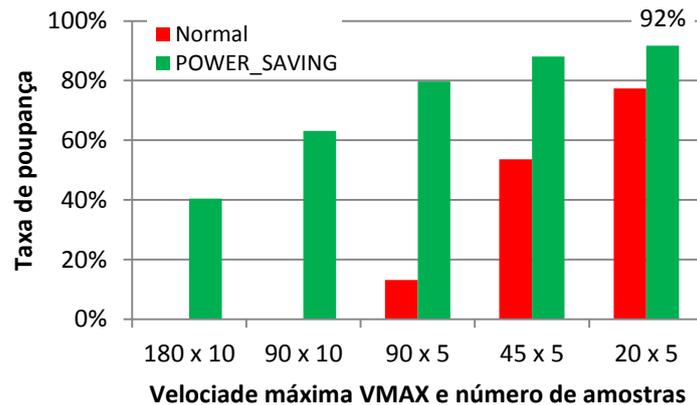


Fig. 5-14 Comparação da taxa de poupança energética dos *firmware*

O que limita a poupança no ciclo de trabalho / repouso é a quantidade de processamentos realizados durante cada detecção, ou seja, a duração da parte activa do ciclo. O uso do algoritmo de detecção de *threshold*, através de uma média e o cálculo dinâmico do valor do CMT são funções que tornam difícil uma maior optimização. Uma opção seria simplificar o algoritmo de *threshold* e inserir o código directamente na função de serviço dos eventos e proceder da mesma forma para o cálculo do CMT. Portanto, existe ainda um factor de optimização do *firmware*.

Quanto às comunicações de dados, estas requerem um consumo em corrente nominalmente de 27 mA para -3 dBm. Este consumo é somente utilizado durante as comunicações e não durante as pausas de espera de ACK ou NAK, denotando uma optimização do *Stack ZigBee* neste aspecto.

## 5.9 Melhorias propostas

Um conjunto de tarefas, deve ser terminado no âmbito do projecto pré-industrial que segue esta tese:

- O estudo e testes do uso dos potenciómetros digitais e o *firmware* de autocalibração. A selecção e aquisição deste componente não foram finalizadas;

- A implementação da compressão de dados para o envio das assinaturas;
- Um estudo mais avançado sobre a antena do eq-sensor com um reflector  $\lambda/4$  que poderia utilizar como dieléctrico o material da janela, por exemplo de acrílico, para aumentar o ganho do lado da berma;

As comunicações com o protocolo ZigBee não conduzem a uma optimização completa do consumo energético. Este projecto não utiliza uma topologia de rede em árvore mas sim em estrela de 2 níveis, eq-sensores e um único coordenador com o *Gateway* de comunicações para a WAN. Os testes com ligações par-à-par demonstram uma grande velocidade de comunicações que o ZigBee não reproduz.

A solução da Texas Instruments inclui o *Stack* proprietário SIMPLICITI que oferece uma maior poupança energética e poderia melhorar esta vertente do projecto. Este *Stack* assenta sobre o OSAL, o que ainda cria um *overhead* de processamento. O *Stack* SIMPLICITI não tem custo de licenciamento ao contrário do ZigBee.

A solução mais económica em consumo energético seria o recurso ao *basicRF*, sem o sistema operativo OSAL, que a TI disponibiliza e que se limita a uma biblioteca de funções que são executados sequencialmente. Esta solução é perfeitamente executável visto que o *firmware* desenvolvido não precisa de processamento multitarefas no âmbito deste projecto utiliza poucas funcionalidades do OSAL e essas podem ser supridas com funções do HAL.

O propósito de um protótipo é ser um equipamento que permite ensaiar várias configurações e testar hipóteses. Não é portanto um produto final. Os resultados dos testes conduzem a duas arquitecturas distintas. Uma privilegia a simplicidade do eq-sensor, a outra a flexibilidade e a qualidade da digitalização das assinaturas magnéticas. Como o projecto entrou numa fase de decisão relativamente ao protótipo industrial, apresenta-se as duas soluções que sintetizam esta tese.

A primeira solução baseia-se na utilização completa das funcionalidades do componente SoC cc2530 da TI, nomeadamente do AmpOp e das saídas PWR / 20 mA. Esta solução é extremamente simples e integrada, oferecendo um BoM muito reduzido, o que significa facilidade de construção, baixo custo e dimensão reduzida do eq-sensor. Apresenta-se esta versão na Fig. 5-14, com as seguintes características:

- Esta versão é específica ao componente SoC Texas Instruments cc2530;
- Usa um magnetómetro com uma única direcção de sensibilidade magnética que é direccionada no sentido da marcha dos veículos;

## Resultados

- O firmware do eq-sensor é a versão `POWER_SAVING` com 1 ADC activo;
- O magnetómetro é alimentado por uma saída PWR do próprio SoC cc2530 que pode alimentar um periférico até 20 mA, o que é mais do dobro do que o magnetómetro precisa. Isso permite ao SoC cortar a alimentação ao magnetómetro durante as pausas dos ciclos de trabalho com uma grande simplicidade técnica;
- Será utilizado o Amplificador Operacional do componente cc2530 em vez de circuitos externos. Este amplificador tem um ganho teórico de 108 dB e pode ser suspenso no PM1, *Power Mode 1*, para um consumo de 0,2 mA e nos PM2/3 para um consumo de uns microamperes. O despertar do componente para o PM0 e a sua entrada em actividade é imediata quando ele vem do PM1 e demora 100 µs a partir dos PM2/3.
- Será necessário ter 3 potenciómetros digitais, o que permite a autocalibragem e dispensa a intervenção humana. O componente que se recomenda é o Intersil ISL23448 com quatro potenciómetros digitais e um bus SPI, *Serial Peripheral Interface* [41];
- Propõe-se uma alimentação por pilhas Alcalinas de longa duração em vez de pilhas de lítio que podem incendiar-se quando submetidas a altas temperaturas em redor de 100°C, temperatura que pode ser alcançada no pleno verão quando se vê o asfalto tornar-se parcialmente líquefacto, o que indica uma temperatura de superfície da estrada superior a 150°C [42];
- Este eq-sensor poderá ter uma vida útil, sem manutenção, de vários anos, esta vida útil dependendo essencialmente da densidade do tráfego rodoviário;

Um eq-sensor com estas recomendações será muito pequeno, muito barato e poderá ser simplesmente fixado na superfície da estrada (contentor em forma de «dot» ou rectângulo plano), ou inserido num buraco de dimensões modestas, tapado com uma argamassa de materiais transparentes às microondas ou inserido num câmara de betão existindo na rodovia para este efeito.

Nota-se que o uso de apenas duas pilhas AA de longa duração conduz a uma dimensão do eq-sensor que pode ser muito reduzida.

O preço de fabrico deste eq-sensor é muito baixo por ter um *BoM* muito pequeno.

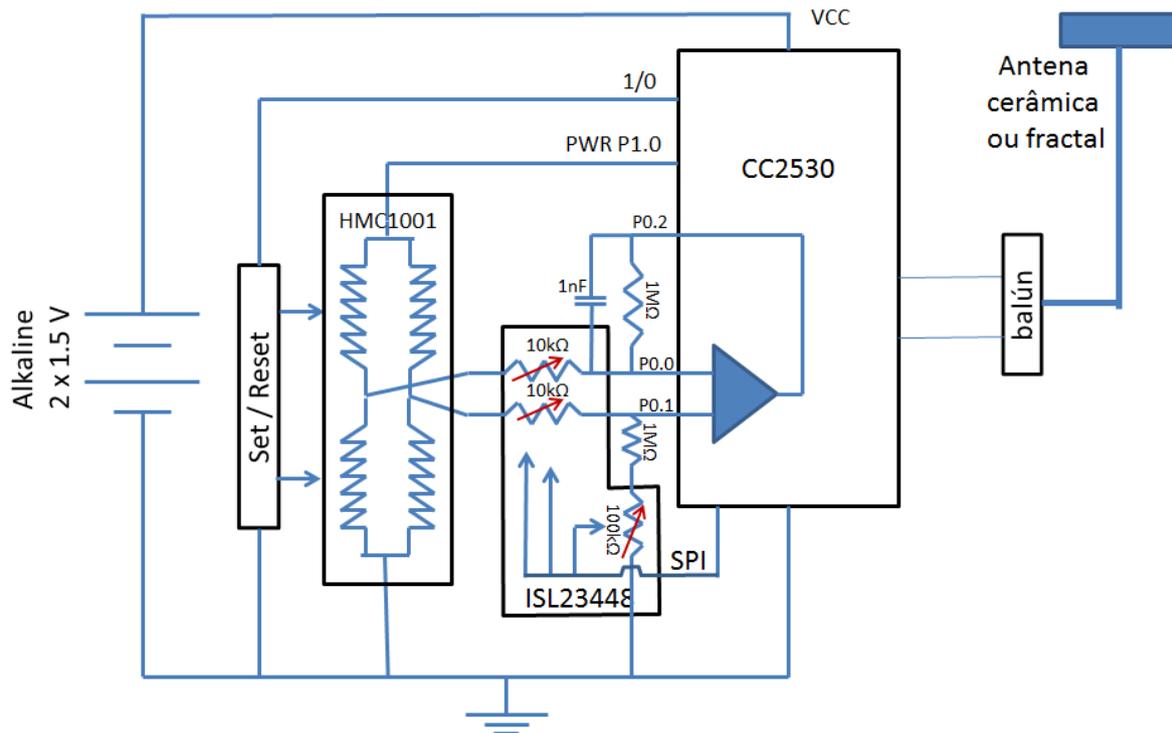


Fig. 5-15 Eq-sensor de baixo consumo, com sensor de um eixo magnético

À versão minimalista anterior se contrapõe a versão de instrumentação cujo objectivo é de proporcionar a máxima informação com a maior definição. Este eq-sensor de alta-gama tem o seu enfoque na função de detecção do modelo de veículo e a existência de materiais e / ou ocupantes transportados pela alterações que criam na assinatura estandardizada. É portanto um verdadeiro elemento de um *scanner* magnético para veículos que seria constituído por um vector de vários sensores num comprimento da largura de uma faixa de rodagem.

- Esta versão utiliza um magnetómetro com 3 direcções ortogonais;
- Uma das direcções é preponderante e serve para detectar a passagem de veículos;
- Utiliza-se a precisão de digitalização máxima de 12 bits;
- As 3 direcções são digitalizadas e transferidas ao SA sem processamento local a não ser a compressão de dados;
- O equipamento utiliza vários potenciómetros digitais que devem ser calibrados por *firmware* para centrar o ponto de repouso (*bias*) para os 3-eixos e o ganho único de amplificação;
- O eq-sensor é alimentado por energia solar e utilizado juntamente com um conjunto de hipercondensadores, para garantir uma vida útil de uma década;

## Resultados

Esta versão é mais sensível do que a versão anterior porque garante, sempre, uma captação óptima do CMT. O seu custo de fabrico e a sua dimensão são pelo menos 3 vezes superior à versão anterior. A sua alimentação requer uma célula solar, um seguidor de ponto máximo de potência de saída para uma célula solar de 12,5 cm de diâmetro, um conversor DC-DC de muito baixa tensão de entrada, um conjunto de hipercondensadores, um outro conversor DC-DC de saída para retirar o máximo de potência, vários potenciômetros digitais, entre outros.

Em relação ao coordenador, embora inicialmente fora do âmbito desta tese, por necessidade foi desenvolvido o seu *firmware* e apresentam-se as recomendações que permitem seleccionar uma arquitectura simples ou uma solução completamente autónoma e com grande poder de processamento local.

A solução simples para a realização de um coordenador é a implementação de um encaminhador de pacotes, tipo *frame-relay*, aceitando todos os pacotes provenientes dos eq-sensores e comutando-os directamente para o SA via um *Gateway* IP sobre uma WAN 3G ou de fibra óptica.

O coordenador deve utilizar uma antena com ganho suficiente e ser colocado em altura. Para facilitar as instalações, o coordenador poderia ser fornecido opcionalmente com um poste standardizado, uma alimentação solar e ter uma interface de comunicação de dados móveis. Desta maneira, a instalação seria muito simplificada.

O coordenador poderia guardar os dados das assinaturas numa memória circular de grande dimensão de mais de 100 MBytes. Quando as comunicações móveis de dados não são disponíveis, as assinaturas são memorizadas e devem ser enviadas quando houver novamente comunicações na ordem anti-chronológica, sem perturbar o funcionamento normal do coordenador, para garantir o envio em tempo real. O componente da Texas Instruments cc2530 pode suportar a configuração de um relógio de tempo universal via *firmware* e as assinaturas em espera podem ser gravadas com a data e hora da sua chegada. O módulo de comunicações de dados móveis proporcionara um método para inicializar este relógio com a data e hora correctas. Visto que o número de eq-sensores que são controlados pelo *access point* é reduzido, o uso de um outro SoC cc2530 para a função de coordenador ZigBee, memorização e/ou encaminhador de pacote deverá ser suficiente.

Com base num consumo médio de 150 mA, 50 mA para o ZigBee e 100 mA para o módulo de comunicações móveis, por exemplo da TELTONIKA [43], obtêm-se a superfície mínima com células de Si monocristalino. Com a equação (2.9) e a energia captável de 119 Wh/m<sup>2</sup>/dia, obtêm-se a superfície mínima de 0,03 m<sup>2</sup>, ou seja, 17 cm x 17 cm. Este valor

pode ser assegurado por duas células de 12 x 12 cm em série. Utiliza-se dois acumuladores de Lítio em paralelo para assegurar mais de 3600 mAh por dia.

Por além do módulo de comunicações móveis, poderá existir um adaptador de rede Ethernet. Como estes módulos precisam geralmente apenas de uma ligação serie TTL [44], podem ter um espaço previsto dentro do *access point* e constituir uma opção suplementar.

O envio dos dados seria efectuado em tempo real, periodicamente ou quando se reestabelecem as comunicações WAN. Não existe processamento de classificação das assinaturas no *access point*. O *access point* é apenas um equipamento de comunicações ZigBee, bufferização e encaminhamento das tramas sobre uma rede WAN. Esta simplicidade garante um custo de fabrico muito competitivo, uma instalação simples e rápida, dois critérios que projectos de grande dimensão impõem.

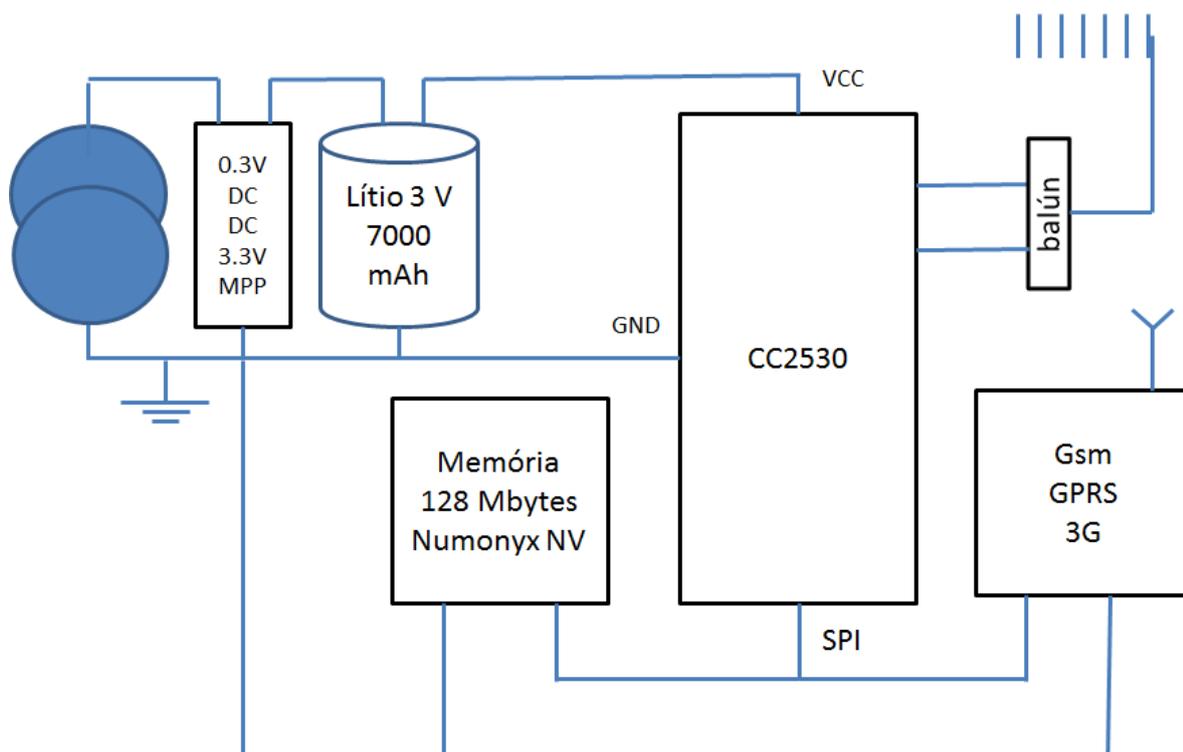


Fig. 5-16 Access Point com o coordenador ZigBee e um módulo de comunicações de dados móveis

Alternativamente, se é preciso, na berma da estrada, um grande poder de processamento e de decisão, a solução será de desenvolver um coordenador com funções de processamento de alto nível, com sistema operativo Linux ou Windows CE. Esta solução retoma a arquitectura dos sistemas com magnetómetros inductivos e detector piezoeléctricos que dispõem desta função. Na berma da estrada reside um armário técnico onde é inserido um

## Resultados

microcomputador com ecrã que permite ter acesso às estatísticas *in loco* e que armazena e envia os dados já processados para o SA.

Um exemplo de concurso público International com sensores magnéticos ganho pela Vaisala ilustra o que o mercado necessita. Este concurso refere um número importante de locais de instalação, 35 com 140 eq-sensores, para a supervisão de uma auto-estrada de 150 km em Bangkok [45]. Dois factores de selecção foram impostos pelo concurso: o tempo de instalação completo do sistema era de apenas 20 dias úteis e o custo era o segundo factor de selecção. Só a solução com o sensor de um eixo magnético e o coordenador encaimhador de pacotes ligado a uma rede móvel poderia competir neste tipo de concurso. A arquitectura com um coordenador inteligente para além de dispersar os pontos de processamento obriga a uma logística bastante complexa de distribuição das bases de dados e dos *softwares*. O número de consultas ao coordenador inteligente localizado numa berma da estrada seria diminuto e essencialmente associado às tarefas de manutenção.

O SA, servidor aplicacional, que centraliza os dados de tráfego deverá, por um lado classificar cada assinatura recebida e, por outro, disponibilizar as estatísticas a um sistema de apresentação geográfico da informação. Esta base de dados GIS, *Grafical Information System*, poderá ser acessível via Tablete ou Telemóvel multimédia a todos os utilizadores autorizados e, igualmente, aos técnicos de manutenção no local de instalação de eq-sensores, onde poderão consultar as estatísticas em tempo real. Assim, o modelo de coordenador com grande capacidade de processamento tem pouco sustento por ser mais caro, mais difícil a manter e muito mais propício a avarias. Mas essencialmente, não existe vantagem a ter um ponto com informação tratada na berma da estrada e se for realmente necessário, um Tablete com 3G proporciona esta facilidade sem a necessidade deste investimento.

Finalmente, levanta-se a question do repetidor, ou seja, do uso de um equipamento acessório permitindo aumentar a rede sem fios até por exemplo, um armário técnico com acesso a rede WAN. Nesta fase do projecto, não se propõe desenvolver um repetidor. Se o coordenador for de baixo custo de fabrico, a instalação de vários coordenadores num determinado ponto de tráfego rodoviário intenso não encarecerá a solução e multiplicará os pontos de memorização das assinaturas, o que pode aumentar a resiliência do sistema.

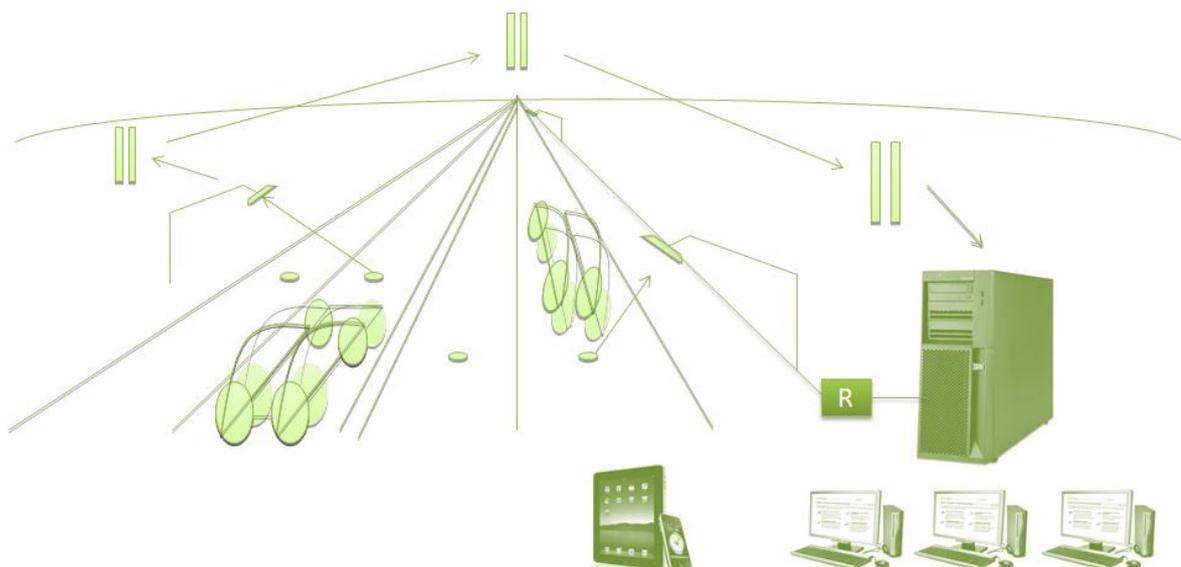


Fig. 5-17 Representação idealizada

O conceito completo é representado artisticamente na Fig. 5-17 com a lista dos seus produtos na Tab. 5-9, onde se destacam, os eq-sensores, os AP, *access points*, com coordenadores ZigBee e módulo de comunicações móveis de dados, a rede do operador móvel, representada pelas suas antenas, o SA e os equipamentos terminais de gestão e consulta dos dados fixos e móveis.

Tab. 5-9 Lista de produtos

Produtos	Descrição
<b>Eq-sensor</b>	Equipamento sensor standard
<b>Eq-sensor +</b>	Equipamento sensor + sensores de temperatura, luz e da presença de água
<b>Access point GPRS</b>	Encaminhador com módulo de comunicações de dados móveis
<b>Access point Ethernet</b>	Encaminhador com adaptador Ethernet
<b>Servidor – Classificador</b>	Serviço do Windows que recolhe os dados de todo o projecto, processa a classificação das assinaturas e grava em BD SQL os resultados estatísticos
<b>Servidor – GIS</b>	Programa de visualização geográfica dos dados
<b>Servidor – Internet</b>	Interface para o acesso via Tablete e Telemóveis inteligentes

Será necessário construir vários protótipos completos desta solução e os testar em vários locais para determinar a sua capacidade convergente de classificação, a coerência e invariabilidade dos resultados.



## 6 Conclusões

Esta tese iniciou com um conjunto de premissas muito reduzidas e o trabalho realizado incorpora todas as vertentes de um projecto que se inicia de raiz. Estudo da oferta do mercado global, análise das necessidades, estado da arte em matéria de sensores e de microprocessadores com interface rádio de baixo consumo e débito, arquitectura electrónica para maximizar a poupança energética, modelo de cálculo da superfície de um painel solar, estimativa do consumo do eq-sensor e respectivo cálculo da dimensão do painel solar, selecção dos fornecedores de componentes, programação dos respectivos *firmware*, testes de detecção de passagem de veículo e captura da assinatura magnética.

Na análise prévia, recolheu-se informações sobre o estado da arte tanto dos magnetómetros, soluções sem fios para rede de sensores e sistemas de processamentos associados. A dificuldade residia na selecção de uma solução suficientemente aberta para testar a tecnologia de maneira abrangente e suficientemente competitiva para ser candidata ao projecto semi-industrial. A selecção dos sensores da Honeywell e o SoC da Texas Instruments têm-se revelado adequados em termos de integração de sistema, sendo a qualidade dos resultados obtidos bastante satisfatória. Destaca-se o suporte técnico efectivo dos fornecedores.

Realizaram-se dois modelos para a gestão energética: o modelo de cálculo da superfície de um painel solar tendo em conta as condicionantes climáticas e geográficas e o modelo do consumo energético do eq-sensor. Para o primeiro modelo procurou-se dados fiáveis de levantamento da irradiação solar em Portugal e usou-se o pior mês de irradiação solar. Estabeleceu-se uma função que dá a superfície mínima do painel solar em função do consumo energético. Esta superfície pode ser concretizada com uma ou várias células solares graças ao recurso dos componentes DC-DC de baixa tensão de entrada.

Para minimizar o consumo evidenciou-se que há várias arquitecturas possíveis. O uso de ciclo de trabalho / repouso é a solução principal utilizada para obter um baixo consumo energético, inferior a 1 mA. A arquitectura com uma interrupção gerada pelo magnetómetro, revelou ser muito complexa devido a variação lenta do campo magnético terrestre que requer permanente calibrações e menos económica do que a arquitectura denominada  $\mu$ P Mestre e que dá ao  $\mu$ P um papel activo, desactivando todos os blocos funcionais do eq-sensor por *firmware*. A comparação destas arquitecturas permitiu seleccionar a mais económica e ter uma estimativa do seu consumo energético. Com este consumo e o modelo anteriormente mencionado, é possível calcular a superfície mínima de exposição solar necessária ao eq-sensor.

## Conclusões

Este estudo incorpora a selecção de componentes electrónicos para estas 3 fontes de energia. Confirmou-se que existem componentes que optimizam a colheita e o armazenamento da energia: os DC-DC aceitam voltagem inferior a 0.5 V e a elevam para 3.3 V ou 5 V por transporte de cargas. Estes permitem ter projectos com uma única célula solar. A optimização da captura da potência de uma célula solar requer a gestão do MPP, *Maximum Power Point*, que pode ser incluída no componente electrónico. Hoje existem soluções completamente integradas que eram ainda há poucos anos discretos e muito complexos a implementar.

Como o consumo da versão com um eixo magnético será inferior a 1 mA, estudou-se também o recurso a baterias não recargáveis em alternativa aos hipercondensadores e acumuladores recargáveis alimentados por energia solar. O modelo com baterias pode ser enterrado no asfalto com uma fina capa de uma argamassa constituída de asfalto e materiais transparentes às microondas.

Evidenciou-se a necessidade de criar um controlo da potência de emissão do eq-sensor em malha fechada para que a autocalibração da potência de emissão seja optimizada tanto em relação ao local de instalação como a capacidade de adaptação às condições de propagação temporariamente desfavoráveis. O *link budget* deve ter uma reserva de potência de 20 dB para permitir ao sensor funcionar com a potência de emissão mais baixa possível e ter uma capacidade de adaptação a situações limites com presença acima dele de “poças de água”, placa de gelo, capa de neve, lama, ... Pois, quanto mais robusto e resistente às condições adversas, mais a solução se diferencia das soluções existentes constituídas, por exemplo, por câmaras.

O desenvolvimento do *firmware* constitui uma peça central e fundamental deste projecto. De facto, toda a actividade do eq-sensor depende do  $\mu P$  e a qualidade da detecção dos veículos é directamente dependente dos algoritmos implementados. Um esforço foi realizado neste sentido para proporcionar a autocalibração do valor do campo magnético terrestre e obter uma detecção de passagem de veículos fiável e de boa qualidade. O *firmware* é configurável com duas dezenas de parâmetros e permitiu avaliar as duas configurações pré-industriais propostas. A experiência adquirida pela equipa sobre o magnetómetro e o SoC é um dado importante que permitirá avançar com segurança para o desenvolvimento do projecto pré-industrial.

A atenuação do local de inserção no alcatrão até o coordenador tem dois parâmetros que são, o ângulo de inclinação do coordenador com a horizontal da estada que deve ser superior a 30° e o material de recobrimento que deve ser transparente às microondas. O asfalto revelou ter uma baixa atenuação sendo no entanto necessário substituir as pedras de sustentação por um material rígido, transparente às microondas.

Os testes permitiram evidenciar a necessidade da operação de set / reset para garantir a sensibilidade do sensor. A orientação do sensor foi objecto de vários testes e determinou-se que o eixo principal deve ficar na direcção do tráfego dos veículos. Quando se considere somente este eixo na direcção do tráfego, a assinatura obtida é congruente nos vários locais analisados, independentemente da orientação do sensor em relação ao CMT.

O uso da norma vectorial com o sensor com 2 eixos pode dar respostas diferentes quando instalado em locais afastados, para o mesmo carro. Pois a inclinação do CMT fluctua e, por isso, somente o magnetómetro com 3 eixos pode oferecer uma análise vectorial do CMT e das suas variações. Por isso, o magnetómetro com 2 eixos não será adequado para a detecção e classificação de veículo porque introduz um erro sistémico nas medidas.

A recolha de assinaturas mostrou que existe uma congruência entre curvas recolhidas de um mesmo veículo, com velocidades diferentes e originada de locais diferentes. A estimativa da velocidade, *Vesti*, permite ter um número de amostras aproximadamente constante e específico para as assinaturas de um determinado modelo de veículo. A captura de assinaturas de outros veículos mostra diversidade e a especificidade. Quanto a norma calculada com dois eixos de sensibilidade magnética, os testes não foram suficientemente numerosos e sistemáticos para explorar completamente os resultados e tirar conclusões definitivas. Pois, esta abordagem deixa de lado o ângulo do vector e somente a interface com um motor de classificação permitia determinar cientificamente se dois eixos acrescentam informação, ou não, à assinatura obtida apenas com o eixo principal na direcção do tráfego. De um ponto de vista teórico, apresentou-se reservas em relação ao uso de apenas 2 eixos de sensibilidade magnética e sugere-se o uso de 1 eixo ou 3 eixos ortogonais. Pois, o pior que pode acontecer a um *hardware* é de incorporar um erro sistémico na sua concepção.

A extensão das funções de *sensing* tal como a medida da temperatura, da luz e a detecção de presença de água acima do sensor, poderia criar valor acrescentado sem conduzir a um aumento significativo do preço de fabrico do eq-sensor. Com uma modificação do firmware dos eq-sensores é possível criar pontos de medida da velocidade com dois eq-sensores a uma determinada distância e detectar inversões de marcha. Esta facilidade é particularmente eficaz contra os veículos sem iluminação a noite e os dias com fraca visibilidade quando as câmaras não conseguem alertar o centro de controlo.

A pertinência do uso do protocolo ZigBee e do OSAL para o eq-sensor é um assunto em aberto. Sem o OSAL e o ZigBee, o eq-sensor poderia ganhar anos de autonomia energética porque seria possível alcançar o ponto óptimo de duração das pausas nos ciclos de trabalho. As comunicações de dados seriam simplificadas para se limitar a camada IEEE

## Conclusões

802.15.4 em topologias ponto a ponto, estabelecidas permanentemente sem processo de associação. A substituição do ZigBee pelo *Stack SIMPLICITI* da TI é igualmente uma possibilidade que deveria proporcionar uma melhoria em termos de poupança energética. Penso que seria interessante investir no desenvolvimento de *firmware* de teste com estas premissas, visto que a duração da autonomia do eq-sensor é um factor crítico de sucesso.

O desenho de um eq-sensor com um diâmetro de 3 cm e uma profundidade de 10 cm é exequível. O custo de fabrico tanto deste sensor como do coordenador é pouco elevado e pode permitir a disseminação de pontos de recolha de assinaturas em maior número.

Espera-se que a classificação das assinaturas seja um processo informático incomparavelmente menos intensivo em processamento do que o reconhecimento de imagem que é utilizado com câmaras. Trata-se de uma característica chave de diferenciação da solução: determinar quantas assinaturas podem ser processadas em tempo real por um SA com o motor de classificação e comparar esta informação com sistema de reconhecimento e contagem de veículos por câmaras. O baixo custo dos pontos de recolha de assinaturas magnéticas será igualmente obtido para o SA. Eventualmente, terá de haver um processador para a recepção e classificação em tempo real e equipamentos clientes separados para a consulta da base de dados e apresentação dos dados num GIS, *Grafical Information System*.

A realização de um *scanner magnético* de veículos com um vector de sensores com 3 eixos e alta precisão, posicionado na largura de uma faixa de rodagem, é uma outra outra aplicação que permitiria detectar a marca e o modelo do veiculo bem como a presença de bagagem e de passageiros.

O desenho de uma antena direcional de alto ganho para o eq-sensor permitiria aumentar a reserva de potência do link budget, o que é um dado importante para o sucesso do projecto.

Concluindo esta tese, dir-se-ia que os objectivos foram alcançados na medida em que se desbravou o terreno, testou-se as tecnologias e que existe uma base sólida para escolher uma estratégia de investigação para desenvolver protótipos de testes com integração a uma WAN e a um SA. Não foi especificado se a continuidade do projecto era um eq-sensor de baixo custo ou de alta definição, pelo que se estudou os dois casos de figura. Penso no entanto que a equipa de desenvolvimento deveria pensar em termos de plataforma processamento mais do que em termos de eq-sensor, ou seja, desenvolver uma mini plataforma LR-WPAN genérica de processamento que poderia ter interfaces com vários sensores, memória e meios de comunicações sem fios, ZigBee, comunicações de dados móveis GPRS, 3G e comunicações IP fixas. As interligações dos diversos módulos poderiam ser realizadas por um sistema de fichas e cabos com as mais pequenas

dimensões existindo no mercado, para permitir o desenvolvimento de projectos muito integrados. Esta plataforma permitiria explorar completamente a tecnologia do cc2530 com vários projectos acoplados a um único método de desenvolvimento de *firmware* e uma única direcção de projectos, o que permite a compilação de uma biblioteca de interface proprietária e a produção de desenvolvimentos por acoplamento de módulos, com muito maior rapidez e fiabilidade do que a realização de um projecto de raiz.



## Anexos

### A. Influência da posição do captor solar

Utilizando como fonte um artigo [46] para o solstício de inverno é dada pela seguinte fórmula:

$$T_d = \frac{2}{15} * \arccos(\min(\max(-\tan(\varphi) * \tan(\delta), -1), 1)) \quad (\text{A.1})$$

Onde:

- $T_d$  é a duração do dia, em horas,
- $\varphi$  é a latitude do local,
- $\delta$  é a declinação do local na data de interesse.

O cálculo da declinação faz-se com a seguinte fórmula [47]:

$$\delta = -23,45 * \cos\left(\frac{360}{365} * (D + 10)\right) \quad (\text{A.2})$$

Onde

- O co-seno,  $\cos$ , é calculado em graus,
- O valor  $23,45^\circ$  é uma aproximação da inclinação do eixo de rotação terrestre em relação ao plano de órbita de translação,
- $D$  é o número do dia juliano.

Como o solstício de inverno é dia 22 de Dezembro no hemisfério norte. A sua declinação é:

$$\delta = -23,45 * \cos\left(\frac{360}{365} * (365 - 22 + 10)\right) = -22,95^\circ$$

Utilizando da latitude  $\varphi = 41^\circ$  para Vila Real, a duração do dia no solstício de inverno  $T_d$  é:

$$T_d = \frac{2}{15} * \arccos(\min(\max(-\tan(41) * \tan(-22,95), -1), 1))$$

$$T_d = \frac{2}{15} * \arccos(0,3681) = 9h07 \quad (\text{A.3})$$

Para o mesmo dia e local, queremos determinar o início e o fim do dia. Para isso é preciso determinar a hora do Tempo do meio dia  $T_m$  para o local e o dia de 22 de Dezembro. Este valor calcula-se com a equação do tempo e a variação da longitude em relação ao meridiano central. O valor que também pode ser lido em ábacos e é de 12h33 (12,55).

$$T_i = 12,55 - \frac{T_d}{2} = 7,99 = 07h59 \quad (\text{A.4})$$

$$T_f = 12,55 + \frac{T_d}{2} = 17,11 = 17h07 \quad (\text{A.5})$$

Em tempo sideral local. A hora legal tem uma hora a mais durante o inverno.

É necessário calcular a função da posição do ângulo de incidência da luz directa sobre o captor solar. A posição do sol é a elevação e é medida com a seguinte fórmula obtida do artigo [48]:

$$\text{sen}(\theta) = \cos(\varphi) * \cos(\delta) * \cos(\gamma) + \text{sen}(\varphi) * \text{sen}(\delta) \quad (\text{A.6})$$

Onde

- $\Theta$  é a elevação solar
- $\varphi$  é a latitude
- $\delta$  é a declinação
- $\gamma$  é a hora angular que se calcula a partir da seguinte fórmula:

$$\gamma = 15 * (t - h_z) \quad (\text{A.7})$$

Onde

- $t$  é a hora da declinação
- $h_z$  é a hora do zénite

Para Vila Real, no solstício de inverno, obtemos a formula simplificada a partir de (A.3):

$$\text{sen}(\theta) = \cos(41) * \cos(-22,95) * \cos(15 * (t - h_z)) + \text{sen}(41) * \text{sen}(-22,95)$$

$$\text{sen}(\theta) = 0,695 * \cos(15 * (t - h_z)) - 0,256 \quad (\text{A.8})$$

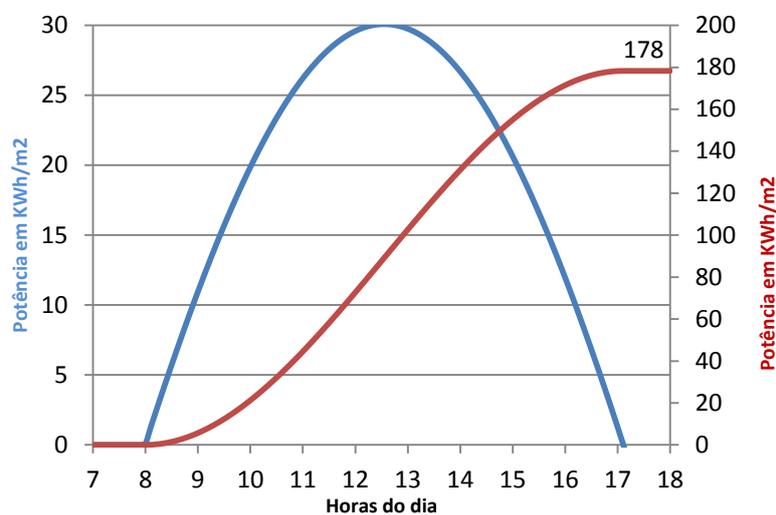
Procura-se então potência eléctrica com captor horizontal da luz solar directa. Esta potência utiliza uma função integral com a potência instantânea e a inclinação do sol ao longo do dia. A luz directa neste exemplo é de 625 Wh/m<sup>2</sup>/dia.

$$P_d = \int_{t=T_i}^{T_f} \frac{P_{d1}}{T_d} \text{sen}(\theta) dt \quad (\text{A.9})$$

$$P_d = \int_{t=7,59}^{17,07} \frac{625}{9,12} (0,695 * \cos(15 * (t - 12,55)) - 0,256) dt$$

$$P_d = \int_{t=7,59}^{16,56} 47,6 * \cos( 15 * (t - 12,55)) - 17,54 dt \quad (A.10)$$

Obtém-se portanto, a potência de luz directa média recebida no captor solar horizontal em função da posição do sol no dia de solstício de inverno em Vila Real :



**Fig. A-1 Influência da posição do captor solar**

Se a captação de luz depender apenas da luz directa, a inclinação horizontal do captor implica uma perda de 72% da energia, ou seja em vez de 625 Wh/m<sup>2</sup> temos 177,7 Wh/m<sup>2</sup>.

## B. Potência de um hipercondensador

Determinação do valor de um hipercondensador para uma dada potência a debitar durante um determinado período no pressuposto que se utiliza um DC-DC para extrair a potência.

A potência de um condensador obedece à seguinte fórmula

$$P_a = \frac{1}{2} C V^2 \quad [W = F V^2] \quad (B.1)$$

Onde

- $P_a$  é a potência máxima armazenável;
- $C$  é a capacidade do condensador;
- $V$  é a voltagem medida nos bornes do condensador.

A potência recuperável de um condensador e de um conversor DC/DC é dada pela seguinte equação:

$$P_{Hc} = (P_a - p_r) * R = \frac{1}{2} C R_c (V^2 - v^2) \quad [W] \quad (B.2)$$

Onde

- $P_{Hc}$  é a Potência recuperável do hipercondensador;
- $P_a$  é a Potência armazenável;
- $R_c$  é o rendimento da conversão DC-DC;
- $v$  é a voltagem remanescente das cargas que ficam no condensador.

Podemos portanto extrair a fórmula que dá o valor procurado da capacidade do hipercondensador

$$C = \frac{2 P_{Hc}}{R_c * (V^2 - v^2)} \quad [F] \quad (B.3)$$

A  $P_{Hc}$  deve ser igual ou superior a  $P_t$ , a potência necessária para 24 horas de funcionamento do eq-sensor ou seja:

$$P_{Hc} \geq P_t = P_s * 3600 * 24 \quad [W. h. dia] \quad (B.4)$$

## D. Protocolo Aplicacional

O protocolo de comunicações do nível aplicacional utiliza um conjunto de tramas acordadas entre os participantes do projecto.

O eq-sensor uma vez digitalizada uma assinatura magnética oriunda da passagem de um veículo, envia, sem solicitação, uma trama SIGNATURE ao Coordenador da rede. Este encaminha os pacotes para o SA via o Bridge série. O SA tem uma camada de *software* que desfragmenta a trama e, se for bem recebida, envia-a ao contexto. A trama integra um conjunto de medidas para além dos dados da assinatura.

Tab. D-1 Trama SIGNATURE, Sentido Eq-sensor para SA

FIELD	SOP	LENGTH	CMD	DATA						
				ID	N_OCUR	CMT	SAMP_S	N_MEAS	SIGNATURE	
Dim (bits)	8	16	8	16	16	8	16	16	0 até 65359	
Inform.	0x01	0 to 0xffff	0x00						Vect1 = 0 to 32679 Vect2 = 0 to 32679	
Type	Const							Var		
	32 bit			72 bit						

Tab. D-2 Campos da Trama SIGNATURE

Campo	Descrição
<b>SOP</b>	Start Of Packet. Início de trama.
<b>LENGTH</b>	Tamanho de 0 até 65535 bits.
<b>CMD</b>	Comando SIGNATURE 0x00
<b>ID</b>	Nº do eq-sensor. Inteiro único numa rede de eq-sensores.
<b>N_OCUR</b>	Nº de ocorrências, ou seja, de detecção de veículos desde o último Reset.
<b>TMF</b>	Terrestrial Magnetic Field. Valor capturado pelo sensor do campo magnético terrestre para a sua localização e orientação.
<b>SAMP_S</b>	Nº de amostras por segundo.
<b>N_MEAS</b>	Nº de amostras na matriz variável SIGNATURE.
<b>SIGNATURE</b>	A última configuração do eq-sensor é conhecida pelo SA. Esta configuração indica o nº de bit da precisão das amostras que podem ser armazenados em 1 (7 bits) e 2 (9, 10 e 12 bits) Bytes, e o nº de direcções magnéticas medidas, 1 ou 2. A matriz é enviada por colunas, a primeira direcção magnética constituída de 1 ou 2 bytes por medida, seguida da 2 direcção de medida magnética com a mesma quantidade de dados. O total é igual ao N_MEAS.

Actualmente não existe um comando 0x00 do SA para o Eq-sensor.

A trama STATUS é enviada de maneira não solicitada quando o eq-sensor faz um Reset ou um Power On. O SA pode enviar esta trama ao Eq-sensor sendo neste caso apenas válido o CMD igual a 0x01, o LENGTH a 0x00 e o conjunto DATA inexistente. O Eq-sensor responde a esta Trama com uma Trama com CMD 0x01 e com os dados correctamente preenchidos.

**Tab. D-3 Trama STATUS, bisentido Eq-sensor SA**

FIELD	SOP	LENGTH	CMD	DATA					
				ID	N_OCUR	SOLAR	V <sub>CC</sub>	TEMP	STATE
Dim (bits)	8	16	8	16	16	16	16	16	16
Inform.	0x01	0 to 0xffff	0x01						
Type	Const								
	32 bits			88 bits					

**Tab. D-4 Campo trama STATUS**

Campo	Descrição
<b>SOP</b>	Start Of Packet. Início de trama.
<b>LENGTH</b>	Tamanho de 0 até 65535 bits.
<b>CMD</b>	Comando STATUS 0x01
<b>ID</b>	Nº do eq-sensor. Inteiro único numa rede de eq-sensores.
<b>N_OCUR</b>	Nº de ocorrências, ou seja, de detecção de veículos desde o último Reset.
<b>SOLAR</b>	Tensão medida no captor solar.
<b>V<sub>CC</sub></b>	Tensão de alimentação do SoC equivalente à tensão do acumulador.
<b>TEMP</b>	Temperatura do SoC.
<b>STATE</b>	Word com 16 bits de status de erros que o Eq-sensor pode assinalar.

A trama CONFIG é enviada apenas se o SA a solicita com uma trama com CMD 0x02, LENGTH igual a 0x00 e o conjunto DATA inexistente. O Eq-sensor responde com a trama CONFIG documentando o MAC e toda a estrutura de configuração do Eq-sensor na forma de um vector binário cuja dimensão é conhecida.

**Tab. D-5 Trama CONFIG, sentido Eq-sensor para SA**

FIELD	SOP	LENGTH	CMD	DATA		
				ID	MAC	STRUT
Dim (bits)	8	16	8	16	48	Dimensão conhecida
Inform.	0x01	0 to 0xffff	0x02			
Type	Const					
	32 bits			64 + sizeof( Estrutura de configuração )		

Tab. D-6 Campos trama CONFIG

<b>Campo</b>	<b>Descrição</b>
<b>SOP</b>	Start Of Packet. Início de trama.
<b>LENGTH</b>	Tamanho de 0 até 65535 bits.
<b>CMD</b>	Comando STATUS 0x01
<b>ID</b>	Nº do eq-sensor. Inteiro único numa rede de eq-sensores.
<b>MAC</b>	Endereço MAC do Eq-sensor.
<b>SOLAR</b>	Tensão medida no captor solar.
<b>STRUT</b>	Estrutura binária da configuração do Eq-sensor.

## E.Norma IEEE 802.15.4

O IEEE 802.15.4 define a camada física (PHY) e de ligação de dados (*datalink*) para o ZigBee, o Cluster Tree IEEE 802.15.5, o 6LoWPAN, o WirelessHART e o ISA100.11a que definem as camadas de Rede, Transporte, Sessão e Apresentação.

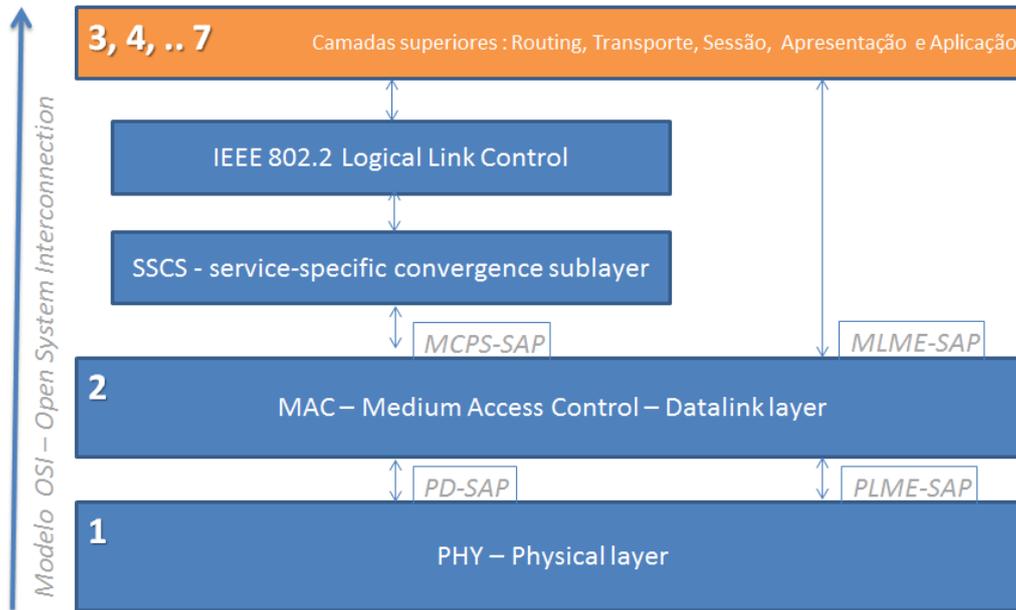


Fig. E-2 Inserção no modelo OSI da ieee802.15.4

Neste modelo, cada camada tem funções bem determinadas que são acessíveis através dos SAP, *Service Access Point*. Os SAP aceitam pedidos via Primitivas de Serviço (REQUEST) e devolvem uma confirmação de execução (CONFIRM) com um estado e outros parâmetros de retorno como por exemplo, a potência do sinal recebida na Primitiva de Serviço PLME-ED.CONFIRM, *Physical Layer Management Entity - Energy Detection*.

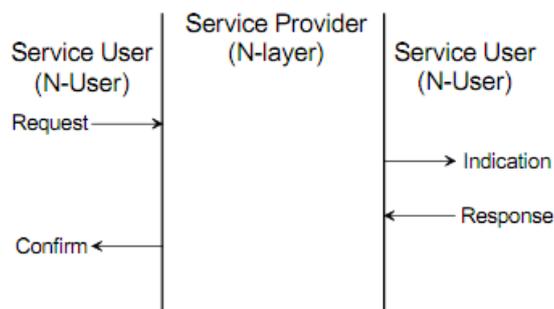


Fig. E-3 Conceito das Primitivas de Serviço

Os processamentos ocorrem através dos SAP que são implementados na forma de funções. Os pacotes de desenvolvimento dos vários fornecedores oferecem uma interface muito semelhante, o que torna menos dependente um dado projecto de um dado *hardware* subjacente. Os SAP são os seguintes:

Tab. E-7 Pontos de Acesso aos Serviços

SAP	literal	Uso geral
<b>MCPS-SAP</b>	MAC Common Part Subayer	Troca de dados, Limpeza da fila de espera
<b>MLME-SAP</b>	MAC subLayer Management Entity	Funções de gestão da camada MAC
<b>PD-SAP</b>	PHY Data	Troca de dados
<b>PLME-SAP</b>	PHY subLayer Management Entity	Gestão da camada PHY

Existem duas versões, 2003 e 2006, a ultima com retro compatibilidade. Existem 27 canais enumerados de 0 até 26. As faixas de frequências IEEE 802.15.4-2006 suportadas são:

Tab. E-8 Canais e Frequências da norma ieee802.15.4

Banda frequências	Nº canais	Modulação *	Débito binário	Débito de Chip
<b>868 – 868,6 MHz</b>	0 (0..0)	BPSK, ASK, O-QPSK	20, 250, 100 kbps	300, 600, 400 kChips
<b>902 – 928 MHz</b>	10 (1..10)	BPSK, ASK, O-QPSK	40, 250, 250 kbps	600, 1600, 1000 kChips
<b>2400 – 2483,5 MHz</b>	16 (11..26)	O-QPSK	250 kbps	2 MChips

\* BPSK, Binary Phase Shift Keying, ASK, Amplitude Shift Keying, O-QPSK, Offset Quadrature Phase Shift Keying, PSSS, Parallel Sequence Spread Spectrum

Neste projecto será dada ênfase à norma O-QPSK e na banda de frequência dos 2.4 GHz.

A camada PHY, física, do IEEE 802.15.4 foi concebido para:

- Ser muito resistente às interferências por ser destinado à faixa do espectro sem licenciamento, partilhado por várias normas de comunicações e consequentemente muito utilizado;
- Ter um débito binário baixo para otimizar a relação sinal ruído (SNR) e permitir baixas potências de emissão;
- Coexistir com normas existentes.

O IEEE 802.15.4 é uma comunicação de banda estreita (canal de 2 MHz) que recorre à modulação de duas portadoras de 2 MHz sinusoidais e ortogonais entre si (desfasadas de 90°).

A modulação para a faixa dos 2.4 GHz é o O-QPSK com 16 pontos de modulação que permitem o envio de 4 bits de dados em paralelo.

Os dados não são directamente modulados. Cada sequência de 4 bits de dados é convertida numa sequência de ruído pseudo aleatório, PN, *Pseudo Noise*, constituída por 32 bits. Esta sequência tem 2 importantes características:

1. A sua potência média de emissão é nula;
2. A sua descodificação permite a autocorreção de erros de transmissão.

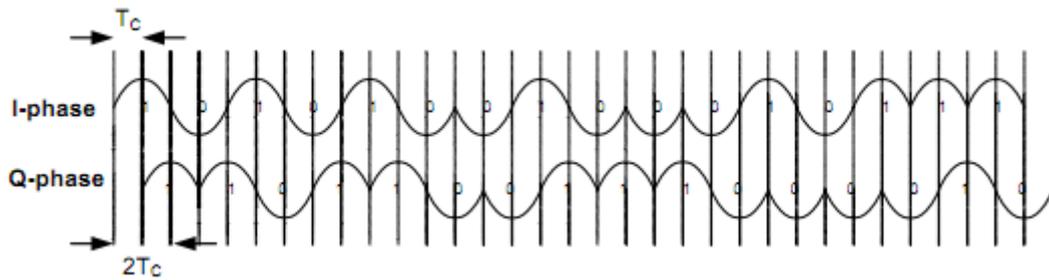


Fig. E-4 Modulação O-QPSK de 2 portadoras sinusoidais e ortogonais de 32 Chip iguais a 4 bits de dados

Este método, DSSS, *Direct Sequence Spread Spectrum*, aumenta fortemente a resistência às interferências e melhora a coexistência sendo o sinal semelhante ao ruído branco.

A coexistência entre normas que partilham o mesmo espectro é fundamental tanto para a sobrevivência das respectivas normas como para a eficiência das comunicações. A banda ISM dos 2.4 GHz é saturada pelas redes locais sem fios tanto em potência como em taxa de ocupação do espectro, em frequência e no tempo. A norma IEEE 802.11b e sucessoras, utilizam um canal de comunicação com uma largura de banda 10 vez superior à da IEEE 802.15.4, o que limita fortemente as interferências.

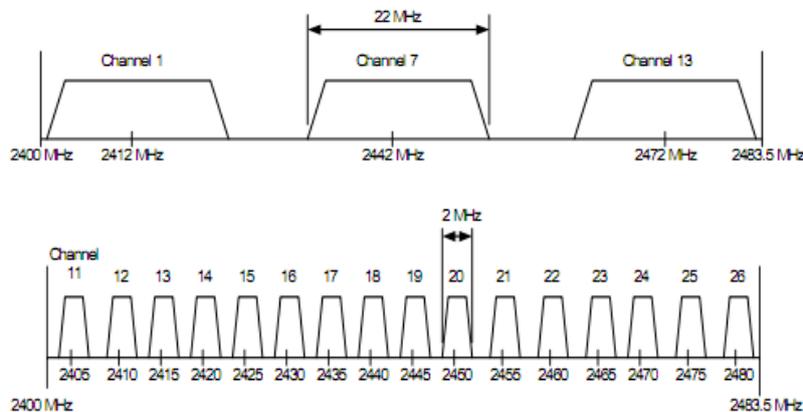


Fig. E-5 Comparação da associação de canais entre as normas IEEE 802.11 e IEEE 802.15.4

As seguintes estratégias da IEEE 802.15.4 diminuem ainda mais as interferências:

- CCA, *Clear Channel Assessment*, e selecção dinâmica do canal: verificação de presença de energia electromagnética e/ou detecção de outro sinal IEEE 802.15.4 alheio para todos os canais antes de seleccionar o menos ruidoso para iniciar a rede WPAN, *Wireless Personal Area Network*.
- Protecção contra colisões: uso do protocolo CSMA/CA, *Carrier Sense Multiple Access / Collision Avoidance*. A camada PHY utiliza o CCA no canal antes de enviar uma trama.

Este protocolo é também utilizado pelos outros protocolos normalizados que utilizam as faixas ISM.

- Modulação: a utilização de sequências PN, de pseudo ruído, espelhadas no tempo (2MHz chip/s para um débito binário de dados de 250 Kbps) com uma modulação O-QPSK 16 pontos, é muito resistente à presença de ruído.
- Ciclo de trabalho de curta duração: a norma IEEE802.15.4 foi concebida para sistemas com baixo débito binário 250 Kbps para 2,4 GHz e 20 Kbps para 868 MHz, e uma taxa de ocupação do canal inferior ou igual a 1% do tempo.
- Alinhamento do canal: relativamente a bandas de emissão da IEEE802.11, existem 4 canais de 2 MHz da IEEE802.15.4 que caem nos intervalos de guarda, aumentando assim a probabilidade de seleccionar um canal com menor ruído.
- Entre outras estratégias.

O IEEE 802.15.4 foi pensada para suportar espectro com presença de potência electromagnética de redes locais ou Bluetooth e oferece uma excepional taxa de comunicação sem erro mesmo com um sinal de potência inferior a potência do ruído.

Os pontos de acessos aos serviços da IEEE 802.15.4, PD-SAP, *PHY Data – Service Access Point*, geram a troca de dados entre a camada superior (MAC) e a camada física. O PLME-SAP, *PHY subLayer Management Entity*, gera as primitivas de gestão. Um SAP de interface com o *hardware* RF-SAP, *Radio Frequency Service Access Point*, permite emitir e receber dados e PHI PIB, *PHY Information Base*, é a base de informação constituída pelos parâmetros fixos e configuráveis do hardware.

A camada MAC de ligação de dados (*data link*) é responsável dos acessos à camada PHY.

- Envio e recepção de dados;
- Gestão da topologia de rede em Estrela ou par-a-par;
- Segurança, autenticação e encriptação;
- Sincronização das comunicações com *Beacons* e reserva de tempo de comunicação garantido;
- Sistema de endereçamento de 64 (IEEE MAC) ou 16 bits;
- Selecção do canal via CCA com indicadores de nível de energia e LQI;

Topologias suportadas pela camada MAC, *Media Access Control*:

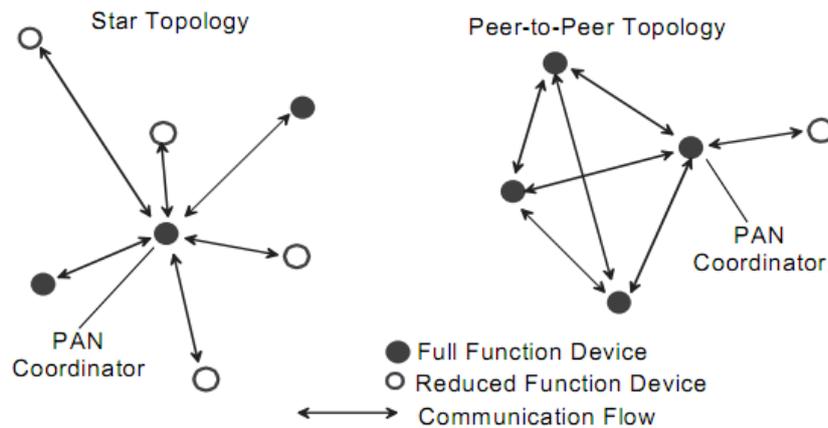


Fig. E-6 Topologias oferecidas pela IEEE802.15.4

A topologia em Estrela é limitada a 1 Coordenador e N nós terminais que podem ter todas as funções ou funções reduzidas, respectivamente, FFD e RFD, *Full Function Devices* e *Reduced Function Devices*.

A topologia par-a-par (*peer-to-peer*) é uma relação *ad hoc* entre 2 nós que a camada aplicacional deve gerir para lhe dar início, autorizar comunicações e terminar.

Compreende-se que com um pouco de código na capa aplicacional consegue-se criar topologias malhadas tais como a topologia arvorecente de grupos (*Cluster Tree*) que utiliza vários identificadores de PAN baseados em *piconet*, associados entre si por via de Coordenadores que se tornam Equipamentos Terminais para a WPAN de nível superior. Esta topologia é suportada por protocolos de níveis superior como o ZigBee, IEEE 802.15.5 + 6LoWPAN, WirelessHART, entre outros.

Dois pontos de acesso aos serviços, SAP, *Service Access Points*, são previstos: o MCPS-SAP e o MLME-SAP, respectivamente, *MAC Common Part Sublayer* e *MAC subLayer Management Entity*. O MCPS-SAP integra os serviços de dados sendo o outro SAP utilizado para a gestão da camada.

Várias opções de encriptação estão disponíveis e integradas na camada MAC:

- Ausência de segurança (transparente);
- Com MIC, *Message Integrity Code*, código de integridade de mensagem (código de escrutínio (*hashing*) de 32, 64 ou 128 bits);
- Com código encriptação AES, *Advance Encryption Security*, ou AES + MIC;

Geralmente, esta funcionalidade é reservada às camadas mais altas (sessão no modelo OSI) e a sua inclusão na IEEE 802.14.5 torna-a obrigatória, uma recomendação para a segurança dos equipamentos de automação industrial.

O MLME-SAP oferece um conjunto de funções muito densas:

Tab. E-9 Lista das Primitivas de Serviço oferecidas pelo MLME-SAP da IEEE802.15.4

SAP	Descrição
ASSOCIATE	Associação de um equipamento a uma rede em Estrela de 1 nível
DESSOCIATE	Desassociação de uma associação
BEACON-NOTIFY	Proporciona os parâmetros da trama de Beacon e o LQI
GET	Obter informações da PIB, PHY Information Base, lista dos parâmetros
GTS	Gestão dos Guaranteed Time Slots para comunicações prioritárias
ORPHAN	Notificação à Aplicação da existência de um equipamento sem associação
RESET	Reset para os valores por omissão
RX-ENABLE	Permite activar ou desactivar o receptor durante um tempo
SCAN	Pede a Energia e a Presença de uma outra rede num determinado canal
COMM_STATUS	Maneira de comunicar o estado das comunicações e erros de segurança
SET	Gravar informações na PIB
START	Inicia uma nova configuração de superframe ou inicia o PAN
SYNC	Sincronismo com Beacons
SYNC-LOSS	Indica a perda de sincronização com o coordenador
POLL	Pede ao coordenador se existe tramas pendentes

O Coordenador pode emitir SuperTrama inteiramente configurável. Esta estrutura síncrona define intervalos de tempos, *time slot*, nos quais todos os equipamentos podem enviar tramas, desde que se utilize o algoritmo de CSMA/CA, durante o período de contenção CAP, *Contention Access Period*. Durante o período sem contenção CFP, *Contention Free Period*, os *slots* são reservados para 1 equipamento que os pode utilizar directamente.

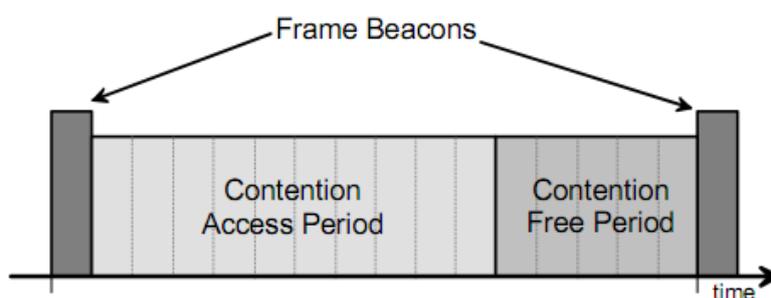


Fig. E-7 Estrutura de SuperTrama síncrona do IEEE802.15.4

A emissão de Beacon é realizada por um período configurável ou ao pedido.

O Coordenador pode entrar em adormecimento durante o período CFP se nenhum dos equipamentos terminais recebeu GTS, *Guaranteed Time Slot*. É portanto possível configurar um ciclo de trabalho para o Coordenador.

As comunicações síncronas utilizam-se com a topologia em Estrela. Para a topologia par-a-par, não pode ser utilizada uma SuperTrama e o emissor utiliza o CCA e o protocolo CSMA/CA. A recepção de pacotes é neste caso sempre seguida de uma confirmação com um ACK.

A norma IEEE 802.15.4 incorpora uma interface com camada superior de nível 2, o SCS – Service specific convergence sublayer e ieee802.LLC. Utiliza-se os endereços IEEE MAC que são universais. Se um equipamento dispõe de um Adaptador de Rede Local e for o Coordenador de uma rede IEEE 802.15.4, é possível criar um *Gateway* via o enlaço de rede entre as duas redes. Esta opção é ultrapassada pelo 6LoWPAN que cria um *Gateway* IP e será avaliado a seguir.

Esta curta apresentação mostra o grau de complexidade da norma IEEE 802.15.4 que é facilmente integrada em especificações que pretendem facilitar a criação de uma rede pessoal sem fios. A seguir são abordadas as principais soluções comerciais de WPAN.

## G. Detalhe do cálculo da potência mínima captável

Este cálculo inicia-se na recepção da radiação solar.

A melhor fonte de informação sobre irradiação solar é o atlas da União Europeia PVGIS, *Photovoltaic Geographical Information System* [49], que permite obter a radiação média mensal de qualquer cidade em Portugal continental e Ilhas. As taxas de radiação são dadas para uma célula solar horizontal e com inclinação óptima. Neste caso, será assumida a inclinação óptima e será deduzido o valor da orientação horizontal com a análise própria.

Com recurso ao PVGIS, determina-se que a região de menor radiação solar é o norte-oeste de Portugal Continental e as Ilhas dos Açores. Por exemplo, Vila Real. O período de menor radiação é o mês de Dezembro com o valor de 2380 Wh/m<sup>2</sup>/dia.

Estes dados são coerentes com dados obtidos via o Instituto de Meteorologia Nacional e via o Estudo ERAMAC da Ilha da Madeira [50]. Para as Ilhas dos Açores, constatou-se que a irradiação solar é equivalente ao norte-oeste de Portugal Continental.

Obtém-se a pior irradiação solar diária: 2,38 KWh/m<sup>2</sup>/dia para Portugal Continental e Ilhas.

Segundo o PVGIS, a capacidade de conversão de um sistema fotovoltaico de 75%. No caso particular deste projecto, adaptou-se esta abordagem as seguintes perdas:

- perdas devido a temperatura: 8%;
- perdas devido a reflexão angular sobre a célula solar: 4,3%;
- outras perdas no conversor DC-DC e no acumulador estimadas em 30%.

Como neste modelo, o que interessa é o potencial de produção eléctrica no pior mês do ano, as perdas devidas as temperaturas não são tomadas em conta por acontecer nos períodos de grande irradiação solar. As perdas de reflexão angular serão abordadas a seguir, ficando um factor de 30%, 20% para o componente de adaptação da tensão DC-DC e 10% para o acumulador.

Obtém-se a potência eléctrica potencial: 1,66 KWh/m<sup>2</sup>/dia

A radiação solar tem duas componentes: a radiação directa e a difusa. A radiação difusa é uma componente importante da radiação solar cujo mínimo é estimado em 25% quando o céu está limpo sem nebulosidade e é devida a:

- Dispersão de Rayleigh sobre os átomos da atmosfera,

- Dispersão de Mie sobre as partículas em suspenso,
- Reflexão da luz directa na terra e respectivas difusões acima referenciadas e absorção de moléculas tais como ozono, vapor de água, gás carbónico.

A luz directa pode ser ocultada pela nebulosidade com uma percentagem tipicamente de 80% até 99% segundo o tipo de nuvens. Nestes dias a luz é apenas de origem difusa. A componente de luz difusa é particularmente presente no início e fim do dia, quando o sol não tem luz directa sobre o captor, e durante os dias de menor irradiação, ou seja, com o céu coberto por nuvens, com chuva, etc... As estatísticas de medição que utilizamos incorporam estas duas componentes e o que se deve determinar é a ponderação destas para o período utilizado.

Quanto menor é a radiação, maior é a taxa de cobertura do céu por nuvens e maior é a componente indirecta. A esta luz difusa, não se aplica o factor corrector da inclinação do eq-sensor porque a posição ideal para captar a luz difusa é a posição horizontal. Ou seja, esta componente vem melhorar o rendimento de captação solar para um captor horizontal pelo que deve ser estimada.

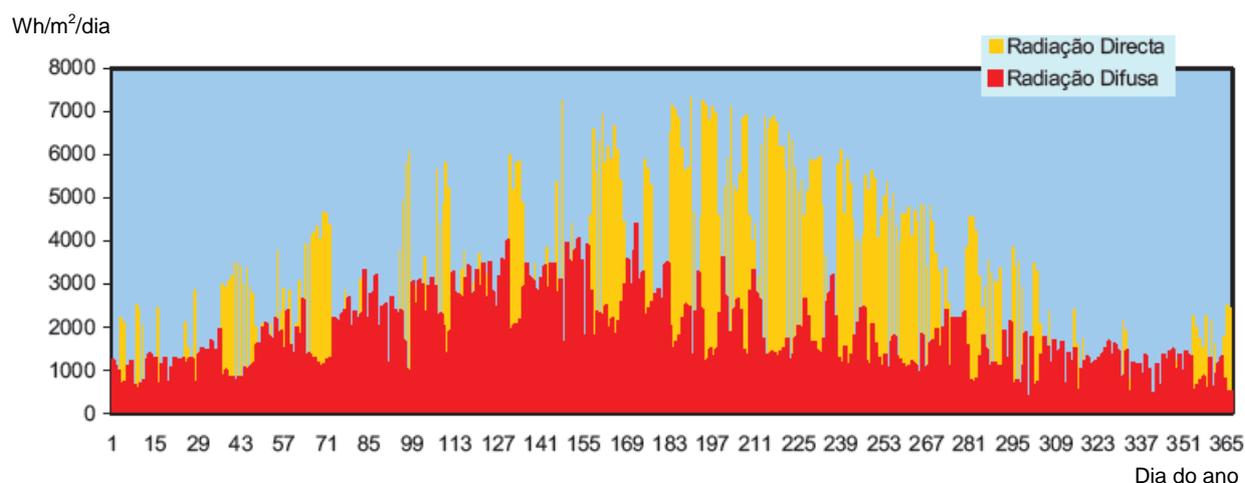


Fig. G-8 Padrão típico da radiação directa e difusa total diária em Lisboa [51]

Na ausência de dados de distribuição destes dois factores, por minoração, determina-se que o sol é visível durante menos de 50% do dia no período com menos irradiação solar do ano, como é patente no Gráfico 1 que se refere a região de Lisboa com maior irradiação do que a região de referência seleccionada, de Vila-Real. A Tab. G-4 apresenta esta estimativa.

Durante este período de menor irradiação solar, a luz tem 25% de luz difusa e 75% de luz directa, ou seja, a estimativa por excesso é de 37,5% da energia de irradiação derivada de luz directa e 62,5% derivada de luz indirecta. Esta distinção é relevante devido à posição horizontal do captor que no pior período do ano tem uma orientação mais favorável.

Tab.G-10 Distribuição diária da taxa de luz directa e indirecta

Distribuição diária [%]	Luz directa [%]	Luz indirecta [%]
50	75,0	25,0
50	0,0	100,0
<b>Média diária</b>	37,5	62,5

Obtém-se portanto, potência eléctrica potencial luz directa sem factor correctivo devido ao ângulo entre o sol e a superfície do captor de 625 Wh/m<sup>2</sup>/dia e a potência eléctrica potencial luz indirecta de 1,041 kWh/m<sup>2</sup>/dia

Importa-se ainda avaliar a influência do ângulo de incidência da luz solar directa sobre o captor. O movimento do sol do amanhecer ao crepúsculo descreve uma parábola inclinada que irradia sobre o painel solar horizontal uma energia que depende:

- da duração do dia;
- da posição do sol;

Estes dois parâmetros variam ao longo do ano. A menor irradiação acontece no solstício do inverno. Tomando este dia como base, são calculadas as perdas devidas à inclinação dos raios solares relativamente ao captor horizontal do Eq-sensor. Reenvia-se para o Anexo A para os detalhes do cálculo. As perdas para a luz directa são de 72% e a potência de 625 Wh/m<sup>2</sup>/dia passando para 177,7 Wh/m<sup>2</sup>/dia. A correcção devido a orientação horizontal do captor proporciona o seguinte valor: potência eléctrica potencial luz directa e indirecta de 1,222 kWh/m<sup>2</sup>/dia.

Como o eq-sensor será protegido por uma janela resistente ao tráfego automóvel, é necessário aplicar um factor de reflexão e absorção da energia solar por um vidro anti-reflexo. As perdas são na da ordem dos 10% para os vidros incolores, extra claros e acrílicos com tratamento anti-reflexos [52]. A escolha de um vidro banal pode no entanto conduzir a uma perda na ordem dos 30% pelo que este parâmetro é relevante na construção do eq-sensor.

É ainda preciso acrescentar a atenuação devida a presença de sujidade na janela do eq-sensor que bloqueia uma parte substancial da irradiação solar e que é estimado em 20%. Este factor no entanto poderá ser superior em caso de sujidade. Este tipo de problema pode ser reportado pelo eq-sensor ao centro de tratamento de dados via as variações da tensão de controlo da bateria e da tensão do captor solar que podem ser medidas e enviadas.

Utiliza-se portanto uma perda de 30% de reflexão, absorção e sujidade sobre a janela: potência eléctrica potencial: 856 Wh/m<sup>2</sup>/dia.

Como os carros passam acima do eq-sensor, durante esta passagem, o captor solar é ocultado. Este factor de ocultação depende do tráfego. A taxa de ocultação na hora de maior tráfego pode alcançar 14% quando existe um tráfego de 0,5 carros por segundo, de dimensão média de 5 metros. Como é utilizado um período mensal e que o eq-sensor tem acumuladores que suportam vários dias de baixa radiação solar, existe um efeito de alisamento dos picos de perdas e se pode utilizar como referência um dia de tráfego médio para determinar este factor.

Por exemplo, na ponte do 25 de Abril, o 15 de Março 2008, temos a seguinte estatística [53]:

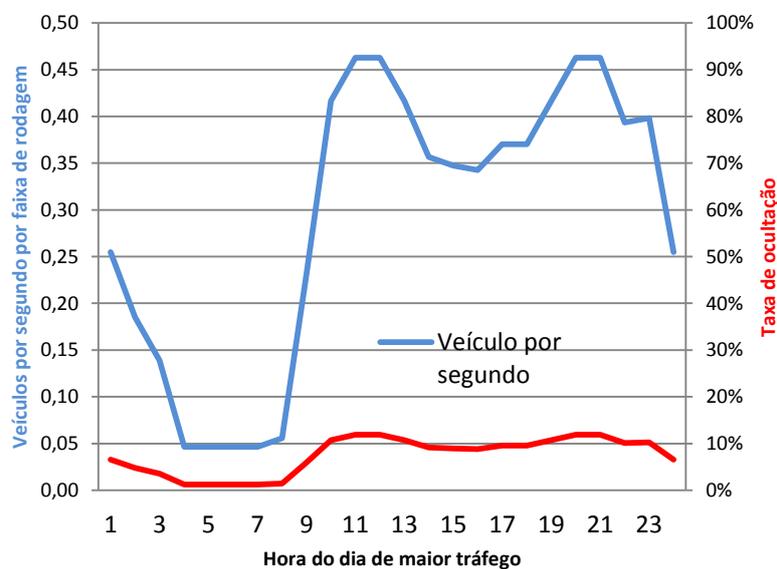


Fig. G-9 Factor de ocultação do eq-sensor pelo tráfego rodoviário

Para esta via muito utilizada existe uma ocultação de 10% da luz solar durante todas as horas do dia. Esta ocultação corresponde a perda da luz directa pelo que considera-se que ainda sobra 25% de luz indirecta. Por isso, o factor de atenuação a aplicar é de 7,5%. Disso resulta a potência eléctrica potencial com taxa de ocultação: 792 Wh/m<sup>2</sup>.

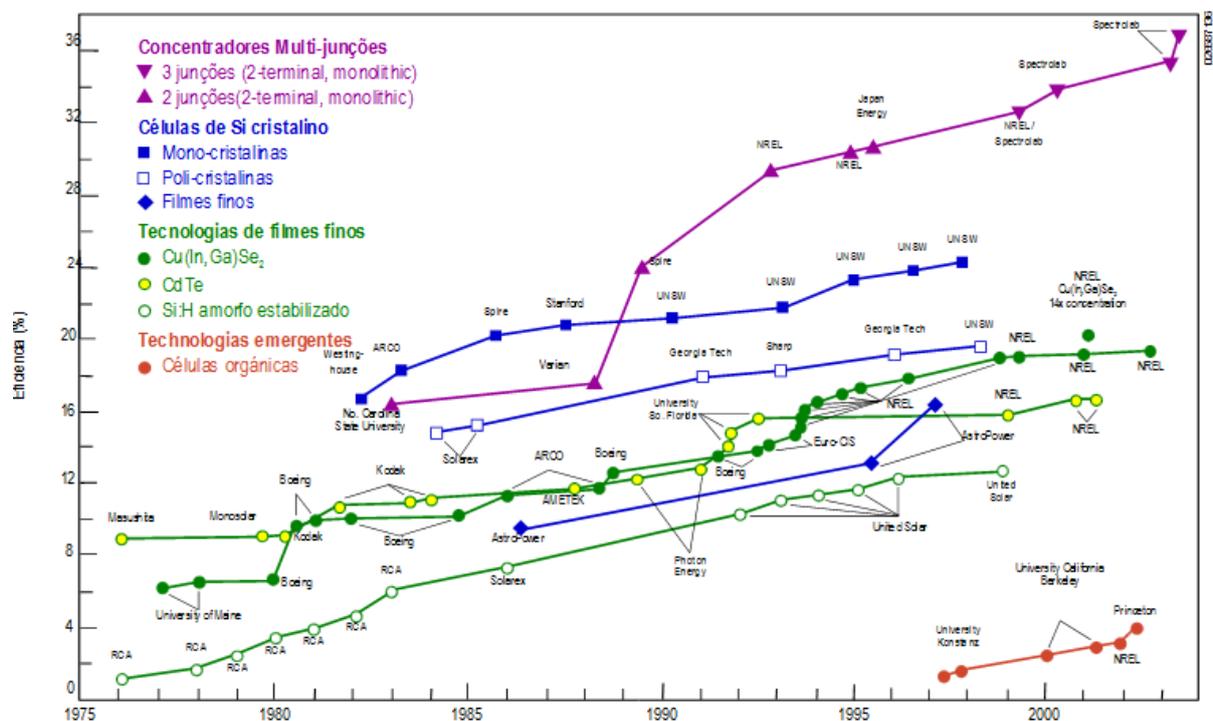
O factor de ocultação pode ser importante nas vias onde existem filas de espera. Por isso, o eq-sensor deve ser sempre instalado a seguir ao ponto de espera responsável da fila, portanto, a seguir a uma barreira de parque, de uma portagem, de um semáforo, sob pena de gerar o mau funcionamento do equipamento com velocidades de passagem demasiadas lentas, paragem acima do eq-sensor e falta de luz solar para alimentar o acumulador.

O projecto utilizará captadores fotovoltaicos de luz de exterior cujo rendimento de conversão se situa entre 8 e 24% como consta na estatística apresentada na Fig. G-9. Para o projecto,

- O captor deve funcionar com a luz do dia,
- Ser resistente à intensidade da luz solar de verão,
- Ao consequente aquecimento do eq-sensor e
- Ter o maior rendimento possível.

O contentor do eq-sensor deverá ter paredes de alumínio e um sistema de arrefecimento passivo para evitar um sobre aquecimento que pode danificar as células solares e acelerar o seu envelhecimento.

Apresenta-se um apanhado do Estado da Arte na investigação mundial sobre células solares que alcançam já 24% para as células sem concentração na Fig. G-10:



São indicadas as células solar para a luz natural e que oferecem um rendimento de conversão entre [15%, 18,8%] e um envelhecimento máximo de 10% numa década [54]. A tecnologia é o silicone monocristalino. Para estas células utiliza-se um rendimento de conversão de 15%.

Existem outras células tal como o Si policristalino e o Si amorfo, cujo rendimento ronda os 8-10% mas tem a grande vantagem de ser disponíveis em dimensões inferiores às células

## Anexos

monocristalinas e oferecerem voltagens de saída maior e mais adaptados a sistema mono celular.

Obtém-se finalmente a Potência eléctrica captável com células solar de alto rendimento:  $119 \text{ Wh/m}^2/\text{dia}$  e baixo rendimento:  $63 \text{ Wh/m}^2/\text{dia}$ . Os factores de conversão são respectivamente de 5% e 2,7%.

## I. Atenuação por uma camada de dielétrico

As comunicações sem fios a 2.4 GHz não são sensíveis a atenuação devido a chuva. No entanto, o eq-sensor pode ser coberto por uma camada de água (poça), de lama, de gelo, de neve, e esta situação cria uma atenuação importante do sinal rádio.

A penetração electromagnética em dielétricos, *skin depth*, tem a seguinte equação [55]:

$$D_p = \frac{\lambda}{2 \times \pi} \times \frac{\sqrt{\epsilon_r}}{Lf} \quad (\text{H.1})$$

Onde:

- $D_p$  é a distância normal de penetração a superfície em [cm] para uma atenuação de 1/e;
- $\lambda$  é o comprimento de onda;
- $\epsilon_r$  é a permitividade eléctrica real;
- $Lf$  é a permitividade eléctrica imaginária.

Obtém-se as seguintes atenuações na Tab. I-5 por cm de dielétrico [56]:

Tab. I-11 Atenuação do sinal rádio por um dielectico de 1 cm

Dielectrico	$\epsilon_r$	Lf	Dp [cm]	$\alpha$ [dB]/cm
Água pura	78	12	1,43	3,03
Água salgada	80	80	0,22	20
Gelo	3,2	0,001	1012	0,00
Neve	3	0,01	337	0,01

A lama sendo carregada de minerais, ela pode se apromixar da água salgada e por isso, o eq-sensor deve ter uma importante reserva de potência para superar as intempérias. O efeito no entanto é superável com 20 dB de reserva de potência que o *link budget* deve garantir.



## Bibliografia

- [1] P.Ghislain, D.Carona, A.Serrador, P.Jorge, P.Ferreira and J.Lopes, "Wireless Magnetic Based Sensor System for Vehicles Classification," *ISEL Academic Journal of Electronics Telecommunications and Computers*, 2011.
- [2] ELTEC, "WATER DETECTION WARNING SYSTEMS," [Online]. Available: <http://www.elteccorp.com/hiwater.php>.
- [3] IDT, "Iowa Department of Transportation," 2005. [Online]. Available: [http://www.iowadot.gov/i-235/tripguide\\_info.htm](http://www.iowadot.gov/i-235/tripguide_info.htm).
- [4] IRD, "Single/Dual Tire Sensor," *International Road Dynamics Inc.*, p. [http://www.irdinc.com/products/sensors\\_accessories/in\\_road\\_sensors/single\\_dual.php](http://www.irdinc.com/products/sensors_accessories/in_road_sensors/single_dual.php), 2010.
- [5] RoadTrax, "BI Traffic Sensor," 2011. [Online]. Available: [http://www.irdinc.com/products/pdf/Piezo\\_Roadtrax.pdf](http://www.irdinc.com/products/pdf/Piezo_Roadtrax.pdf).
- [6] S. C. E. P. V. Sing Yiu, "Traffic Surveillance with Wireless Magnetic Sensors," University of California, Berkeley, USA, 2004.
- [7] G. Leduc, "Road Traffic Data: Collection Methods and Applications," *JRC Technical Notes*, 2008.
- [8] RITA, "US Department of Transportation, Research and Innovative Technology Administration," 2011. [Online]. Available: <http://www.itscosts.its.dot.gov>.
- [9] H. R. Hajimohammadi, "Classification of Data Series at Vehicle Detection," *University of Uppsala, Suécia*, 2009.
- [10] Sensys, 2011. [Online]. Available: <http://www.sensysnetworks.com/>.
- [11] Sensys, "Measurement of Sensys™ Wireless Sensor Battery Life," pp. [http://www.sensysnetworks.com/userfiles/repos/whitepapers/sensys\\_performance--battery\\_life\\_v1.1.pdf](http://www.sensysnetworks.com/userfiles/repos/whitepapers/sensys_performance--battery_life_v1.1.pdf), 2007.

- [12] Sensys, "Sensor," 2011. [Online]. Available: <http://www.sensysnetworks.com/products/sensor/>.
- [13] Astucia, "M210 Solar Powered Logging Stud," 2011. [Online]. Available: <http://www.astucia.co.uk/products/product-details?categoryid=177101&productid=181896>.
- [14] Libelium, "Smart Parking Sensor Platform enables city motorists save time and fuel," 2011. [Online]. Available: [http://www.libelium.com/smart\\_parking/](http://www.libelium.com/smart_parking/).
- [15] Vaisala, 2011. [Online]. Available: <http://www.vaisala.com/en/roads/products/trafficanalyzers/Pages/default.aspx>.
- [16] Anacom, "Quadro Nacional de Atribuição de Frequências 2009-2010," Anacom, Lisboa, 2009.
- [17] ZigBee Alliance, "Especificações," 2011. [Online]. Available: <http://www.zigbee.org/Standards/Overview.aspx>.
- [18] NXP-Jennic, "JenNET - Protocol Stack," 2011. [Online]. Available: [http://www.jennic.com/products/protocol\\_stacks/jennet](http://www.jennic.com/products/protocol_stacks/jennet).
- [19] Microchip, "Miwi . Wireless Networking Protocol Stack," 2011. [Online]. Available: [http://www.microchip.com/stellent/idcplg?IdcService=SS\\_GET\\_PAGE&nodeId=1824&appnote=en520606](http://www.microchip.com/stellent/idcplg?IdcService=SS_GET_PAGE&nodeId=1824&appnote=en520606).
- [20] RFC 4919, "IPv6 over Low-Power Wireless Personal Area Networks (6LoWPANs)," 2007. [Online]. Available: <http://tools.ietf.org/html/rfc4919>.
- [21] RFC 4944, "Transmission of IPv6 Packets over IEEE 802.15.4 Networks," 2007. [Online]. Available: <http://tools.ietf.org/html/rfc4944>.
- [22] Contiki OS, 2011. [Online]. Available: <http://www.contiki-os.org/>.
- [23] HART foundation, " Industrial Communication Protocol," 2011. [Online]. Available: <http://www.hartcomm.org/index.html>.
- [24] ISA, "ISA100, Wireless Systems for Automation," 2009. [Online]. Available: <http://www.isa.org/MSTemplate.cfm?MicrositeID=1134&CommitteeID=6891>.

- [25] Wikipedia, "Magnetometer," 2011. [Online]. Available: <http://en.wikipedia.org/wiki/Magnetometer>.
- [26] Honeywell, "HHMC\_1001, HMC\_1002," 2011. [Online]. Available: [http://www51.honeywell.com/aero/common/documents/myaerospacecatalog-documents/Missiles-Munitions/HMC\\_1001-1002-1021-1022\\_Data\\_Sheet.pdf](http://www51.honeywell.com/aero/common/documents/myaerospacecatalog-documents/Missiles-Munitions/HMC_1001-1002-1021-1022_Data_Sheet.pdf).
- [27] Honeywell, "an218," 2008. [Online]. Available: [http://www51.honeywell.com/aero/common/documents/myaerospacecatalog-documents/Defense\\_Brochures-documents/Magnetic\\_\\_Literature\\_Application\\_notes-documents/AN218\\_Vehicle\\_Detection\\_Using\\_AMR\\_Sensors.pdf](http://www51.honeywell.com/aero/common/documents/myaerospacecatalog-documents/Defense_Brochures-documents/Magnetic__Literature_Application_notes-documents/AN218_Vehicle_Detection_Using_AMR_Sensors.pdf).
- [28] Honeywell, "an213," 2002. [Online]. Available: [http://www51.honeywell.com/aero/common/documents/myaerospacecatalog-documents/Defense\\_Brochures-documents/Magnetic\\_\\_Literature\\_Application\\_notes-documents/AN213\\_Set\\_Reset\\_Function\\_of\\_Magnetic\\_Sensors.pdf](http://www51.honeywell.com/aero/common/documents/myaerospacecatalog-documents/Defense_Brochures-documents/Magnetic__Literature_Application_notes-documents/AN213_Set_Reset_Function_of_Magnetic_Sensors.pdf).
- [29] Texas Instruments, an048, "Application note 048 - Compact Reach Xtrend," 2008. [Online]. Available: <http://www.ti.com/lit/an/swra092b/swra092b.pdf>.
- [30] Fractus, "Antenas fractais de alto rendimento," 2011. [Online]. Available: [www.fractus.com](http://www.fractus.com).
- [31] Fractus, "User manual," 2011. [Online]. Available: [http://www.fractus.com/sales\\_documents/FR05-S1-N-0-102/UM\\_FR05\\_S1\\_N\\_0\\_102.pdf](http://www.fractus.com/sales_documents/FR05-S1-N-0-102/UM_FR05_S1_N_0_102.pdf).
- [32] Texas Instruments, "LOW INPUT VOLTAGE SYNCHRONOUS BOOST CONVERTER," Feb 2008. [Online]. Available: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps61200.pdf>.
- [33] Linear, "LTC3105 - 400mA Step-Up DC/DC Converter with Maximum Power Point Control and 250mV Start-Up," [Online]. Available: <http://www.linear.com/product/LTC3105>.
- [34] Varta, "LONGLIFE ACCUS AA 2100 mAh," 2011. [Online]. Available: <http://www.en.varta-consumer.com/en/Products/Rechargeables/Longlife-Accus/AAA->

800-mAh.aspx#AA-2100-mAh.

- [35] Wima, "SuperCap," 2011. [Online]. Available: <http://www.farnell.com/datasheets/1306256.pdf>.
- [36] Energizer, "Eveready 4R25," [Online]. Available: [http://data.energizer.com/PDFs/4R25\\_EU.pdf](http://data.energizer.com/PDFs/4R25_EU.pdf).
- [37] Texas\_Instruments, "CC2530," 2011. [Online]. Available: <http://www.ti.com/product/cc2530>.
- [38] ATMEL, "ATmega128RFA1," 2011. [Online]. Available: [http://www.atmel.com/dyn/products/product\\_card.asp?part\\_id=4692](http://www.atmel.com/dyn/products/product_card.asp?part_id=4692).
- [39] Wikia, "Wireless WiKi," 2011. [Online]. Available: <http://wireless.wikia.com/wiki/Wi-Fi>.
- [40] Spartech, "Acrílico resistente a abrasão," 2008. [Online]. Available: <http://www.spartech.com/polycast/SAR.html>.
- [41] Intersil, "Quad Low Voltage Digitally Controlled Potenciometer," 2011. [Online]. Available: <http://www.intersil.com/data/fn/fn7905.pdf>.
- [42] Wikipedia, "Asphalt," 2011. [Online]. Available: <http://en.wikipedia.org/wiki/Asphalt>.
- [43] TELTONIKA, *GSM/GPRS Data module TM1*, 2011.
- [44] TIBBO, "Módulos Ethernet com stack IP," 2011. [Online]. Available: <http://docs.tibbo.com/soism/index.html?rj203.htm>.
- [45] Vaisala, "Thailand permanent traffic analysers for motorways," Vaisala, Bangkok, 2011.
- [46] Wikipedia, "Duração do dia," 2011. [Online]. Available: [http://pt.wikipedia.org/wiki/Dura%C3%A7%C3%A3o\\_do\\_dia](http://pt.wikipedia.org/wiki/Dura%C3%A7%C3%A3o_do_dia).
- [47] Wikipedia, "Declinação," 2011. [Online]. Available: <http://pt.wikipedia.org/wiki/Declina%C3%A7%C3%A3o>.
- [48] Wikipedia, "Solar elevation angle," 2011. [Online]. Available: [http://en.wikipedia.org/wiki/Solar\\_elevation\\_angle](http://en.wikipedia.org/wiki/Solar_elevation_angle).

- [49] PVGIS, "PVGIS, Photovoltaic Geographical Information System," 2011. [Online]. Available: <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/index.htm>.
- [50] Ministerio\_do\_Ambiente, "Atlas do Ambiente," 2010. [Online]. Available: <http://www2.apambiente.pt/atlas/est/index.jsp>.
- [51] Portal-Energia, "Energia fotovoltaica Manual sobre tecnologias, projectop e instalações," 2004. [Online]. Available: [www.portal-energia.com](http://www.portal-energia.com).
- [52] Wikipedia, "Poli methyl methacrylate," 2011. [Online]. Available: [http://en.wikipedia.org/wiki/Acrylic\\_glass](http://en.wikipedia.org/wiki/Acrylic_glass).
- [53] M. O. Domingues, "Vias de tráfego rodoviário - Critérios de amostragem para caracterização do ruído," *Laboratório Nacional de Engenharia Civil*, 2008.
- [54] NREL, "National Renewable Energy Laboratory," 2011. [Online]. Available: <http://www.nrel.gov/pv/>.
- [55] Londo South Bank University, "Sea water and Microwaves," 2011. [Online]. Available: <http://www.lsbu.ac.uk/water/microwave.html>.
- [56] Jonathan H. Jiang and Dong L. Wu, "Ice and water permittivities for millimeter and sub-millimeter remote sensing applications," *ATMOSPHERIC SCIENCE LETTERS*, pp. 146-151, 15 Nov 2004.
- [57] L. B. -. C. M. L. T. Davide Brunelli, "An Efficient Solar Energy Harvester for Wireless Sensor Nodes," *University of Bologna, Italy - Swiss Federal Institute of Technology, Zurich, Suíça*, 2008.
- [58] Texas\_Instruments, "Power Management for CC2530," 2011.
- [59] S. Y. Cheung, *Traffic Surveillance by Wireless Sensor Networks: Vehicle Detection, Classification and Re-Identification by Wireless Sensor Networks*, VDM Verlag, 2008.
- [60] L. Gioanola, *Pyroelectric and AMR sensors for intelligent transportation systems: A flexible, robust and low-cost solution for vehicle detection*, LAP LAMBERT Academic Publishing, 2010.

- [61] L. G. M. M. R. T. M. A. S. P. Mirko Franceschinis, "Wireless Sensor Networks for Intelligent Transportation Systems," *IEEE*, 2009.
- [62] SAFESPOT, 2011. [Online]. Available: <http://www.safespot-eu.org/>.
- [63] Wikipedia, "Aleksandr Stoletov," 2011. [Online]. Available: [http://en.wikipedia.org/wiki/Aleksandr\\_Stoletov](http://en.wikipedia.org/wiki/Aleksandr_Stoletov).
- [64] P. C. a. S. Middelhoek, Thin Film Resistive Sensors, Institute of Physics Publishing, 1992.
- [65] Wikipedia, "Equação do tempo," 2011. [Online]. Available: [http://pt.wikipedia.org/wiki/Equa%C3%A7%C3%A3o\\_do\\_tempo](http://pt.wikipedia.org/wiki/Equa%C3%A7%C3%A3o_do_tempo).
- [66] Honeywell, "A New Perspective on Magnetic Field Sensing," 1998. [Online]. Available: [http://www51.honeywell.com/aero/common/documents/myaerospacecatalog-documents/Defense\\_Brochures-documents/Magnetic\\_\\_Literature\\_Technical\\_Article-documents/A\\_New\\_Perspective\\_on\\_Magnetic\\_Field\\_Sensing.pdf](http://www51.honeywell.com/aero/common/documents/myaerospacecatalog-documents/Defense_Brochures-documents/Magnetic__Literature_Technical_Article-documents/A_New_Perspective_on_Magnetic_Field_Sensing.pdf).