



INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA
Área Departamental de Engenharia Mecânica

ISEL



Estudo e desenvolvimento de um sensor de chuva piezoelétrico para automóveis

ANDRÉ SOBRAL GOMES PONTES ALEXANDRE
(Licenciado em Engenharia Mecânica)

Trabalho Final de Mestrado para obtenção do grau de Mestre
em Engenharia Mecânica

Orientadores:

Doutor Mário José Gonçalves Cavaco Mendes
Doutor João Manuel Ferreira Calado

Júri:

Presidente: Doutor João Carlos Quaresma Dias

Vogais:

Doutor Pedro Miguel Abreu Silva
Mestre Nuno Paulo Ferreira Henriques
Doutor Mário José Gonçalves Cavaco Mendes
Doutor João Manuel Ferreira Calado

Março de 2013



ISEL

INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA
Área Departamental de Engenharia Mecânica



Estudo e desenvolvimento de um sensor de chuva piezoelétrico para automóveis

ANDRÉ SOBRAL GOMES PONTES ALEXANDRE
(Licenciado em Engenharia Mecânica)

Trabalho Final de Mestrado para obtenção do grau de Mestre
em Engenharia Mecânica

Orientadores:

Doutor Mário José Gonçalves Cavaco Mendes
Doutor João Manuel Ferreira Calado

Júri:

Presidente: Doutor João Carlos Quaresma Dias

Vogais:

Doutor Pedro Miguel Abreu Silva
Mestre Nuno Paulo Ferreira Henriques
Doutor Mário José Gonçalves Cavaco Mendes
Doutor João Manuel Ferreira Calado

Março de 2013

RESUMO

A presença de sistemas eletrónicos nos veículos automóveis tem vindo a aumentar de forma considerável nos últimos 30 anos, tornando possível o aumento dos padrões de eficiência, segurança e conforto dos mesmos. Os sistemas de acionamento automático dos limpa-para-brisas, baseados em sensores de chuva óticos, têm registado um crescimento quase exponencial nos últimos 10 a 15 anos; no ano 2000, apenas 5 % dos veículos novos produzidos na Europa estavam equipados com este sistema, hoje é um equipamento amplamente difundido na oferta automóvel existente.

O presente trabalho consistiu no estudo de uma solução para deteção de chuva em veículos automóveis com a aplicação de um sensor piezoelétrico, tendo em vista a obtenção de uma solução mais versátil e aplicável em vários pontos do veículo. As reduzidas dimensões, a elevada sensibilidade do sensor e a facilidade de aplicação nas superfícies de ensaio foram fatores que motivaram a escolha deste tipo de equipamento como elemento sensorial.

As hipóteses definidas para o procedimento laboratorial basearam-se nas conclusões obtidas em estudos anteriormente desenvolvidos no campo dos sensores de chuva para automóveis e nas capacidades dos materiais piezoelétricos para medição de pluviosidade. Os sensores foram instalados sob as superfícies do veículo que apresentavam, simultaneamente, uma maior exposição à pluviosidade, quando este está em movimento, e um menor risco de sofrer danos.

Os resultados obtidos permitiram concluir que a utilização deste tipo de sensores permite detetar elevados níveis de pluviosidade e em superfícies com considerável capacidade de deformação elástica. A sua implementação futura em veículos automóveis exige mais algum trabalho de melhoria dos processos de fixação dos sensores e do condicionamento de sinal utilizados.

Palavras-chave: Automóvel; Chuva; Sensor piezoelétrico; Sistema de deteção de chuva

ABSTRACT

The presence of electronic devices in vehicles has been raising in a notorious way in the last 30 years, making possible to increase its efficiency, safety and comfort standards. Automatic windshield wiper acting systems, based on optical rain sensors, have had an almost exponential growth in the last 10 to 15 years; in the 2000 year, only 5 % of new vehicles produced in Europe were equipped with this system, today it is a widely spread equipment in the present automobile market offer.

The present work consisted in the study of a solution for rain detection in automobiles with the application of a piezoelectric sensor, in order to obtain a more versatile and applicable solution in several parts of the vehicle. The sensor's small dimensions, the high sensibility and easiness of application over the testing surfaces have been factors that motivated the choice of this type of equipment as a sensorial element.

The defined hypotheses for the laboratorial procedure were based on conclusions of previous studies about automotive rain sensors and in piezoelectric materials capabilities for rainfall measuring. The sensors were placed in automobiles' surfaces that presented, simultaneously, a greater exposition to rainfall, when the vehicle is in motion, and a smaller risk of suffering damage.

The results achieved showed that the use of this kind of sensors allows detecting high rainfall in surfaces with considerable elastic deformation capability. The future implementation in vehicles requires some more work to improve processes for setting sensors and signal conditioning used.

Keywords: Automobile; Rain; Piezoelectric sensor; Rain detection system

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Mário Mendes pela orientação, motivação, ajuda e disponibilidade demonstrados durante a realização deste trabalho.

Ao Professor João Calado pela coorientação, disponibilidade e ajuda prestadas, bem como as ideias e sugestões apresentadas.

Aos meus pais, pelo estímulo e condições dadas para a realização e conclusão deste trabalho e de todo o meu percurso académico.

Um especial agradecimento ao meu amigo Diogo Ferreira pelo tempo, meios e conhecimento disponibilizados e pelas sugestões e opiniões dadas.

Aos meus amigos Duarte Lopes, Francisco Apolinário, Filipa Silva, Filipe Paulo, Gonçalo Barros, Inês Santos, José Martins, Manuel Andrés e Tâmara Andrade pela força e motivação dados.

À Carmen, pela ajuda, motivação, carinho, amor e companheirismo neste e em todos os momentos da vida.

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Contextualização.....	1
1.2	Objetivos.....	5
1.3	Estrutura do trabalho.....	5
2	SISTEMAS DE DETEÇÃO DE CHUVA.....	7
2.1	Sensor de corrente residual.....	7
2.2	Sensor ótico.....	8
2.3	Sensores piezoelétricos.....	14
2.3.1	Constituição e funcionamento dos sensores piezoelétricos.....	18
2.3.2	Utilização dos sensores piezoelétricos para detecção de chuva.....	19
	Sensor de chuva piezoelétrico da Nissan.....	19
	Sensor piezoelétrico de medição de cadência de chuva.....	21
	Sensor de chuva da Vaisala.....	23
2.4	Novos sensores de chuva.....	27
2.4.1	Sensor capacitivo.....	28
2.4.2	Sensores de imagem.....	32
	Sensor por diferencial de imagens.....	33
	Sensor de imagens simultâneas.....	35
2.4.3	Sensor de ultrassons.....	38
3	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	41
3.1	Hipóteses consideradas.....	41
3.1.1	Tipos de pluviosidade considerados.....	42
3.1.2	Localização do sensor.....	43
3.1.3	Fatores exteriores indutores de erros na mensuranda.....	44
3.2	Caracterização dos equipamentos utilizados.....	45

3.2.1	Caracterização do sensor piezoelétrico.....	45
3.2.2	Caracterização da placa de aquisição de dados	47
3.2.3	Caracterização do CCS e cabo de ligação utilizados.....	48
3.3	Programas informáticos utilizados	51
3.3.1	LabView 2011 [®]	51
3.3.2	Matlab R2011a [®]	53
3.3.3	Microsoft Excel 2007 [®]	53
3.3.4	Signal Express [®] for DAQ.....	53
3.4	Descrição das superfícies de ensaio.....	54
3.5	Colocação do sensor nas superfícies.....	55
3.6	Modelo e metodologia seguidos para a simulação de granizo	56
3.7	Caracterização do veículo utilizado e local de ensaio	60
3.8	Colocação e localização dos sensores.....	60
3.9	Equipamento de simulação de chuva.....	61
3.10	Metodologia seguida.....	62
4	APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS	65
4.1	Sensor colocado na chapa.....	65
4.2	Sensor colocado no vidro simples	69
4.3	Conclusões laboratoriais	72
4.4	Sensor no capô.....	74
4.4.1	Motor térmico desligado.....	74
4.4.2	Motor térmico a funcionar	78
4.5	Sensor aplicado no para-brisas	79
4.5.1	Motor térmico desligado.....	79
4.5.2	Motor térmico a funcionar	80
4.6	Conclusões no automóvel.....	80
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHO FUTURO.....	83

6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	85
---	----------------------------------	----

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 – Constantes dos materiais piezoelétricos	17
Tabela 2.2 – Diâmetro nominal e gama dimensional associada (Salmi <i>et al.</i> , s/d)	26
Tabela 3.1 – Principais características do sensor piezoelétrico DT1 (adaptado de Measurement Specialties, 1999).....	47
Tabela 3.2 – Parâmetros operacionais do ampop 741 (adaptado de ST Microelectronics, 2001).....	50
Tabela 3.3 – Resultados obtidos durante o enchimento do copo graduado.....	62
Tabela 3.4 – Níveis de precipitação obtidos por simulação e respetivas designações.....	62
Tabela 3.5 – Ensaio realizados no automóvel.....	63
Tabela 4.1 – Valores obtidos dos ensaios realizados com sensor ligado diretamente à DAQ.....	66
Tabela 4.2 – Valores obtidos dos ensaios realizados com sensor ligado à DAQ por via de CCS.....	68
Tabela 4.3 – Valores obtidos dos ensaios realizados com sensor ligado diretamente à DAQ.....	70
Tabela 4.4 – Valores obtidos dos ensaios realizados com sensor ligado à DAQ por via do CCS.....	71
Tabela 4.5 – Valores obtidos dos ensaios realizados no capô e motor desligado com o sensor ligado diretamente na DAQ.....	74
Tabela 4.6 – Valores obtidos do sensor ligado à DAQ por intermédio do CCS e aplicação de filtro passa-banda 400-500 Hz.....	76
Tabela 4.7 – Valores obtidos dos ensaios realizados com motor a funcionar e sensor ligado diretamente na DAQ.....	78
Tabela 4.8 – Resultados obtidos do sensor instalado no para-brisas e ligado diretamente à DAQ.....	79

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 – Mary Anderson, inventora do limpa-para-brisas (Olive III, 2010).....	1
Figura 1.2 – Modelo simplificado de um sistema de limpa-para-brisas. (adaptado de Windscreen Wipers And Washers (Automobile), s/d)	2
Figura 2.1 – Princípio de funcionamento de um sensor ótico (adaptado de Kato e Yagi, 2008).....	9
Figura 2.2 – Sensor de chuva ótico integrado no espelho retrovisor interior de um veículo automóvel (Rain Sensors, 2006).....	10
Figura 2.3 – Aspeto de um sensor ótico de chuva e luz. (Kato e Yagi, 2008)	11
Figura 2.4 – Disposição dos recetores de luz nos sensores de chuva, luz e túnel (adaptado de Kato e Yagi, 2008).....	13
Figura 2.5 – Imagem exemplificativa do efeito piezoelétrico (The Piezoelectric Effect, s/d)	14
Figura 2.6 – Aplicação de uma força sobre um material piezoelétrico de forma a) longitudinal, b) transversal, c) em corte e d) hidroestática (adaptado de Gautschi, 2002).....	15
Figura 2.7 – Esquema ilustrativo da constituição básica de um sensor piezoelétrico e os eixos das direções dos esforços aplicáveis no sensor (adaptado de Moheimani e Flaming, 2006).....	16
Figura 2.8 – Esquemas ilustrativos do princípio de funcionamento de a) sensor piezoelétrico de força, b) sensor piezoelétrico de pressão e c) sensor piezoelétrico de aceleração (Mohapatra, 2011).....	19
Figura 2.9 – a) Vista geral do sensor e b) localização deste no veículo (Shiraishi, 1985).....	20
Figura 2.10 – Diagrama de blocos do funcionamento do sensor de chuva piezoelétrico (adaptado de Shiraishi, 1985)	21
Figura 2.11 – Esquema funcional do sensor piezoelétrico de medição de cadência de chuva (adaptado de Pankey <i>et al.</i> , 2005)	23

Figura 2.12 – Esquema de funcionamento do sensor da Vaisala (adaptado de Salmi e Ikonen, s/d).....	24
Figura 2.13 – Diferenças no sinal causado pelo impacto de a) uma gota de água e b) uma pedra de granizo (adaptado de Salmi e Ikonen, s/d)	24
Figura 2.14 – Montagem realizada para medição da dimensão das gotas de água (adaptado de Salmi <i>et. al.</i> , s/d)	25
Figura 2.15 – Valores da potência específica, por unidade de área, obtidos empiricamente para os níveis de precipitação iguais a a) 1,2 mm.h ⁻¹ , b) 6 mm.h ⁻¹ , c) 24 mm.h ⁻¹ e d) 27 mm.h ⁻¹ (adaptado de Elbasit <i>et al.</i> , 2010).....	27
Figura 2.16 – Ilustração do efeito de um corpo exterior sobre um campo elétrico (adaptado de Otte <i>et al.</i> , s/d).....	29
Figura 2.17 – Aspeto do protótipo funcional do sensor de chuva capacitivo (adaptado de Otte <i>et al.</i> , s/d).....	30
Figura 2.18 – Esquema funcional do sensor de chuva capacitivo (adaptado de Otte <i>et al.</i> , s/d).....	31
Figura 2.19 – Constituição do sensor de chuva por diferencial de imagens (adaptado de Hochstein, 2003a)	33
Figura 2.20 – Diagrama de funcionamento do sensor de chuva por diferencial de imagens (adaptado de Hochstein, 2003a).....	34
Figura 2.21 – Sensibilidade dos <i>pixels</i> L ₁ e L ₂ em função do valor do comprimento de onda (adaptado de Hochstein, 2003b).	36
Figura 2.22 – Pormenor da constituição do CCD, com a disposição dos <i>pixels</i> L ₁ e L ₂ e aplicação dos filtros com padrão a) em colunas e b) em xadrez (adaptado de Hochstein, 2003b).....	36
Figura 2.23 – Exemplo da resposta de uma linha do sensor à presença de gotas de água (adaptado de Hochstein, 2003b)	37
Figura 2.24 – Formas de alojamento possíveis do sensor por ultrassons no para-brisas (adaptado de Saurer <i>et. al.</i> , 1995)	39
Figura 3.1 – Relação entre diâmetro apresentado pelos grãos de granizo e energia cinética por unidade de área (adaptado de Hohl, 2001)	42

Figura 3.2 – Dimensões e camadas constituintes do sensor piezoelétrico DT1, em mm (adaptado de Measurement Specialties, 1999).....	46
Figura 3.3 – Vistas de topo e lateral da DAQ e respectivas ligações elétricas (adaptado de National Instruments Corporation, 2012)	48
Figura 3.4 – Esquema de circuito amplificador não-inversor (adaptado de Measurement Specialties, 1999).....	49
Figura 3.5 – Comportamento do sensor piezoelétrico em função do valor da frequência do sinal (adaptado de Measurement Specialties, 1999).....	51
Figura 3.6 – a) ilustração do comportamento de um filtro Chebyshev tipo I passa-banda e b) diagrama de Bode com as atenuações sofridas pelo sinal nas frequências limite da banda passante em função da ordem do filtro (adaptado de Augusto, 2011)	52
Figura 3.7 – Exemplo de sinal adquirido pela DAQ e visualizado no Signal Express for DAQ.	54
Figura 3.8 – Porta utilizada nos ensaios laboratoriais, com marcação do local onde o sensor ficou instalado	55
Figura 3.9 – Para-brisas apoiado em 4 pontos e sensor piezo elétrico instalado.....	55
Figura 3.10 – Fixação do sensor na superfície do para-brisas.....	56
Figura 3.11 – Superfície metálica devidamente colocada com marca da localização do sensor.....	56
Figura 3.12 – Relação entre número de grãos de granizo e energia cinética específica observados em quedas de granizo (adaptado de Hohl, 2001)	57
Figura 3.13 – Modelo de granizo criado a partir de esferas	59
Figura 3.14 – Veículo utilizado na realização dos ensaios com simulação de chuva.....	60
Figura 3.15 – Localização dos sensores a) no capô e b) no para-brisas	61
Figura 3.16 – Vista da pistola utilizada para simulação de chuva a) de lado e b) pormenor da cabeça.....	61

Figura 4.1 – Gráfico dos valores máximos de tensão obtidos do sensor colocado na chapa e ligado diretamente à DAQ.....	66
Figura 4.2 – Gráfico dos valores máximos de tensão obtidos do sensor na chapa com aplicação do CCS.....	68
Figura 4.3 – Gráfico dos valores máximos de tensão obtidos do sensor no vidro ligado diretamente à DAQ.....	69
Figura 4.4 – Gráfico dos valores máximos de tensão obtidos do sensor no vidro com aplicação do CCS.....	71
Figura 4.5 – Gráfico com os sinais obtidos da incidência da pluviosidade nas 3 intensidades definidas e sensor ligado diretamente à DAQ.	74
Figura 4.6 – Espectro dos sinais obtidos no capô com motor desligado e sensor ligado diretamente à DAQ.....	75
Figura 4.7 – Gráfico dos valores de tensão obtidos do sensor ligado à DAQ por intermédio do CCS e aplicação de filtro passa-banda 400-500 Hz.	77
Figura 4.8 – Gráfico dos sinais obtidos do sensor no capô, ligado diretamente à DAQ e com motor térmico do automóvel a funcionar	78

LISTA DE ABREVIATURAS

- ABS** ----- Anti-Blocking System (Sistema Anti-Bloqueio)
- ADEM**---- Área Departamental de Engenharia Mecânica
- Ampop** --- Amplificador operacional
- ASIC**----- Aplication Specific Integrated Circuit (Circuito Integrado de Aplicação Específica)
- CCD** ----- Charge-Coupled Device (Dispositivo de Detecção de Carga Elétrica)
- CCS** ----- Circuito de Condicionamento de Sinal
- CDC** ----- Capacity-to-Digital converter (conversor de capacidade elétrica em sinal digital)
- CI**----- Circuito Integrado
- DAQ** ----- Data Acquisition board (placa de Aquisição de Dados)
- ECU**----- Electronic Control Unit (Unidade de Controlo Eletrónica)
- INMG** ---- Instituto Nacional de Meteorologia e Geofísica
- IV**----- Infravermelhos
- LED**----- Light-Emitting Diode (Díodo Emissor de Luz)
- MIT** ----- Massachusetts Institute of Technology
- PCB** ----- Printed Circuit Board (Placa de Circuito Impresso)
- PVC**----- Polyvinyl Chloride (Policloreto de Polivinila)
- PVDF** ----- Poly(Vinylidene Fluoride) (Poli(Fluoreto de Vinilideno))
- RLTS** ----- Rain-Light-Tunnel Sensor (Sensor de chuva e luz com função de deteção de passagem em túneis).
- SONAR** -- Sound Navigation And Ranging (dispositivo de deteção de objetos por reflexão de ondas)

USB ----- Universal Serial Bus (porta de dados série)

UV----- Ultravioletas

WMO----- World Meteorological Organization (Organização Mundial da Meteorologia)

LISTA DE SÍMBOLOS

A_{sensor} --- área do sensor piezoelétrico

c ----- velocidade de propagação do sinal emitido por gerador de ultrassons

c_{in} ----- contacto elétrico de potencial neutro

C ----- capacidade elétrica apresentada pelo conjunto do sensor piezoelétrico e cabo coaxial blindado

d_{ij} ----- constante piezoelétrica que relaciona a tensão mecânica obtida no eixo j do material por ação da tensão elétrica aplicada segundo o eixo i

D ----- diâmetro da gota de chuva

e_1 ----- espessura da camada de vidro exterior de para-brisas

e_{ij} ----- coeficiente dielétrico

E_c ----- energia cinética detida pelo modelo de granizo no momento do impacto sobre a superfície de ensaio

f ----- frequência de sinal ultrassónico

f_c ----- frequência de corte inferior do sensor piezoelétrico

f_r ----- frequência de ressonância do material piezoelétrico

f_1 ----- frequência a -3dB da frequência de ressonância do material piezoelétrico presente na sua curva de frequências

f_2 ----- frequência a -3dB da frequência de ressonância do material piezoelétrico presente na sua curva de impedâncias

f_3 ----- frequência de ressonância da camada exterior de vidro de para-brisas

g ----- valor da aceleração da gravidade

g_{ij} ----- constante piezoelétrica que indica o campo elétrico existente segundo o eixo i do material piezoelétrico resultante do esforço aplicado neste segundo o seu eixo j

I-----nível de precipitação

k -----constante de valor inteiro

k_{ij} -----fator de acoplamento eletromecânico

K-----ganho aplicado no amplificador operacional

KE_t-----energia cinética por unidade de tempo

KE_c-----energia cinética por nível de precipitação

λ-----comprimento de onda de sinal ultrassônico

λ₁-----comprimento de onda de radiação recebida por fotodiodo

λ₂-----comprimento de onda de radiação recebida por fotodiodo

L₁ -----Identificação de fotodiodo

L₂ -----Identificação de fotodiodo

m-----massa da gota de chuva

m_e-----massa de uma esfera de vidro constituinte do modelo de granizo

m_m-----massa do modelo de granizo

p_h -----momento linear de uma gota de chuva segundo o seu eixo horizontal

p_v -----momento linear de uma gota de chuva segundo o seu eixo vertical

P_t-----probabilidade de ocorrência de precipitação

Q_m -----fator de qualidade mecânica

R-----resistência elétrica de carga aplicada à entrada do circuito de condicionamento de sinal

R₁-----resistência elétrica do circuito de condicionamento de sinal

R₂-----resistência elétrica do circuito de condicionamento de sinal

S_{ij} -----coeficiente de tendência elástica do material piezoelétrico

t ----- tempo

T ----- período temporal entre gotas

U_{ent} ----- valor da tensão elétrica à entrada do ampop

U_q ----- valor da queda de tensão elétrica obtida na resistência de controle

$U_{médio}$ --- valor médio da tensão elétrica obtida nos elétrodos do sensor piezoelétrico

U_{ref} ----- valor médio da tensão de referência do amplificador operacional

U_{saida} --- valor da tensão à saída do circuito de condicionamento de sinal

v_0 ----- valor da velocidade inicial detida pelo modelo de granizo

v_{imp} ----- valor da velocidade de impacto do modelo de granizo sobre a superfície de ensaio

$v_t(D)$ ---- velocidade da gota de chuva em função do seu diâmetro

v_v ----- valor da componente vertical da velocidade de uma gota de chuva

v_{wh} ----- valor da componente horizontal da velocidade do vento

x ----- deslocamento vertical do modelo de granizo

x_0 ----- posição inicial relativa do modelo de granizo

w ----- intervalo temporal constante

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

A introdução de dispositivos de ajuda à condução nos automóveis é algo que o tem acompanhado desde o seu surgimento, em finais do século XIX, atendendo à constante exigência de novas soluções que o tornassem cada vez mais apelativo no que respeita ao conforto de utilização e à segurança.

Um destes dispositivos de assistência na condução é o sensor de chuva. A sua existência em automóveis só faz sentido quando associado a um sistema de remoção da precipitação existente sobre a superfície do para-brisas, pois a função do sensor é a de detetar a referida precipitação. Em função do sinal fornecido pelo sensor, o controlador do sistema de remoção de chuva procede à sua ativação e respectiva regulação da intensidade de funcionamento. Este sistema de remoção de precipitação designa-se de limpa-para-brisas.

Inventado por Mary Anderson (1866-1953) (figura 1.1) em 1903, a sua invenção foi inicialmente alvo de críticas e de gozo, sendo até apontado como fonte de distração para os automobilistas (Massachusetts Institute of Technology [MIT], 2001). Por esta altura, o automóvel ainda não era um bem vulgar – tal só aconteceu com o surgimento do Ford T e do fabrico em série, em 1908. No entanto, a ridicularização deste invento rapidamente caiu em esquecimento, e dez anos volvidos após o seu surgimento, milhares de veículos norte-americanos eram vendidos com este equipamento de série (MIT, 2001).



Figura 1.1 – Mary Anderson, inventora do limpa-para-brisas (Olive III, 2010)

Os limpa-para-brisas atuais estão munidos de uma ou várias escovas, cada uma dotada de uma lâmina de borracha em todo o seu comprimento que arrastam a camada de água existente sobre o para-brisas para fora deste, mantendo um bom campo de visão para os ocupantes do veículo, especialmente para o condutor (Denton, 1995).

De forma genérica, um sistema de limpa-para-brisas é constituído pelos seguintes elementos (figura 1.2):

- Um motor elétrico;
- Um conjunto desmultiplicador de movimento (reductor);
- Um conjunto de hastes e alavancas que transformam o movimento rotativo em alternativo;
- Braço(s) de suporte das escova(s);
- Escova(s);
- Unidade de Controlo Eletrónica (ECU) do sistema.

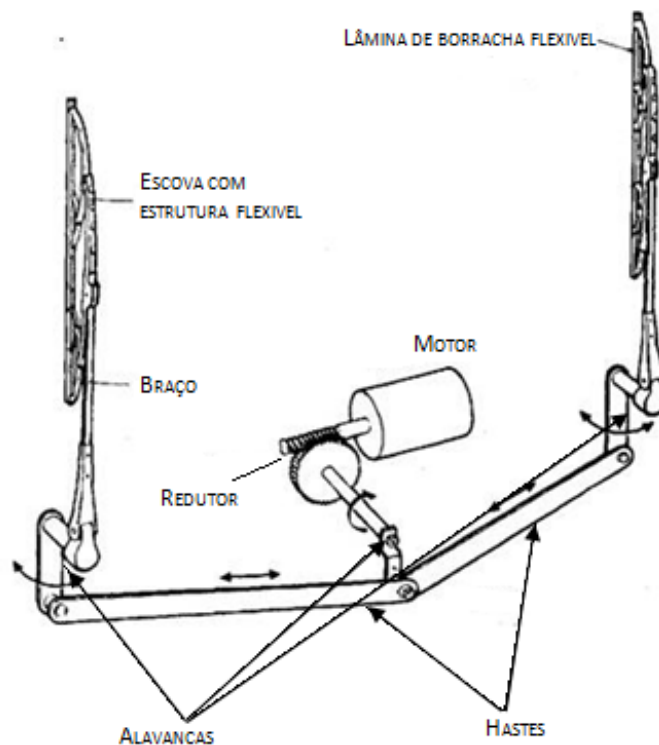


Figura 1.2 – Modelo simplificado de um sistema de limpa-para-brisas. (adaptado de Windscreen Wipers And Washers (Automobile), s/d)

O conjunto constituído pelo motor e pelo reductor (moto-reductor) existente fornece o movimento do motor elétrico desmultiplicado, para que o sistema de limpa-para-brisas seja

capaz de vencer o atrito existente entre as escovas e a superfície do vidro. O conjunto de hastes e alavancas permite a transformação do movimento rotativo num só sentido em um movimento rotativo com sentido alternado (Denton, 1995).

De modo a manter o total e perfeito contato com a superfície do para-brisas do automóvel, dado que estes últimos não são planos, as escovas são constituídas por uma lâmina de borracha, que por sua vez está encaixada numa estrutura plástica ou metálica, flexível, que permite, por um lado, que a lâmina de borracha fique suportada e, por outro, se adapte à morfologia do para-brisas (Denton, 1995).

De um modo geral, os sistemas de limpa-para-brisas possuem 3 modos de funcionamento: intermitente, outro contínuo lento e contínuo rápido. A regulação do funcionamento do moto-redutor em função do modo de funcionamento escolhido, a proteção contra sobrecargas e a definição da posição de repouso das escovas são funções da ECU do limpa-para-brisas (Denton, 1995).

As inovações técnicas obtidas desde o início do século XX e até ao final da 2ª Guerra Mundial deram origem aos primeiros sensores piezoelétricos, transístores e circuitos integrados (CI). O efeito piezoelétrico já era conhecido desde a Antiguidade mas só no final do século XIX, em 1880, é que o mesmo foi definido por meio dos irmãos Curie, quando estes descobriram que o quartzo fornecia uma tensão quando sujeito a um esforço mecânico. Quase 40 anos depois, durante a I Guerra Mundial, um investigador chamado Langevin teve a ideia oposta; estimular elétricamente placas de quartzo para estas vibrarem e emitirem ondas de alta frequência – ultrassons – no mar e permitiriam a deteção de objetos no fundo deste pela reflexão das mesmas ondas e captação destas pelas mesmas placas de quartzo que as haviam emitido. Esta descoberta permitiu criar a primeira aplicação prática que aproveita o fenómeno piezoelétrico: um equipamento de deteção de objetos por reflexão de ondas (SONAR), ainda hoje utilizado (Langevin, 1924; Langevin e Chilowsky, 1926 conforme citado em Gautschy, 2002).

Durante a II Guerra Mundial, foram descobertas as propriedades piezoelétricas de alguns materiais cerâmicos e, posteriormente, na década de 60 do século XX, as mesmas propriedades em materiais orgânicos e polímeros, nomeadamente o poli (fluoreto de vinilideno) (PVDF), o *nylon* ou o policloreto de polivinila (PVC) (Measurement Specialties, 1999). Até nos seres vivos, o efeito piezoelétrico está presente. Em 1957, Fukuda e Yasuda descobriram a existência de fenómenos piezoelétricos no osso que

atualmente sabe-se serem os responsáveis pela adaptação a nível de massa e estrutura que os ossos realizam permanentemente, de forma a conseguir suportar a carga imposta com a menor massa de osso possível. Tal explica a redução da massa óssea verificada em pessoas acamadas por longos períodos (idosos, doentes terminais) e em astronautas (Gautschy, 2002).

A indústria automóvel, na sua permanente evolução e busca pela satisfação dos clientes, começou a introduzir sistemas eletrónicos que visavam otimizar o funcionamento dos veículos automóveis, melhorar o conforto e segurança oferecidos por estes (Schlegel e Schuler, 2002). Exemplos disso são a introdução da injeção de combustível com controlo transístorizado em 1968, o surgimento do primeiro sistema de antibloqueio das rodas (ABS) em 1971, o primeiro *airbag* em 1974 ou a introdução do primeiro sensor de chuva em 1986. Estes últimos tornam-se cada vez mais apelativos na indústria automóvel ao permitirem uma condução mais confortável, simplificada e segura, pois promovem a redução do tempo em que o condutor tire uma das mãos do volante para acionar manualmente o limpa-para-brisas (Otte *et al.*, s/d).

A utilização destes equipamentos tem vindo a aumentar de forma exponencial. Um estudo de mercado realizado pela Roland Berger & Partners em 2000 previu um aumento da taxa de presença deste tipo de equipamentos em automóveis de 5 % para 50 % apenas no período compreendido entre 2000 e 2005 (Schlegel e Schuler, 2002). Atualmente está presente em quase todos os veículos automóveis novos, vendido como equipamento base, com um custo unitário de fabrico e implementação na ordem dos 18 dólares norte-americanos (USD) (Otte *et al.*, s/d).

Os atuais sensores de chuva utilizados nos veículos automóveis são sensores óticos e baseiam-se no princípio da reflexão e refração da luz infravermelha (IV) (Schlegel e Schuler, 2002). Apesar desta solução se encontrar num patamar de desenvolvimento bastante avançado, com a integração de outras funções como o acionamento automático dos faróis em caso da existência de níveis de luminosidade reduzida, os sensores óticos apresentam algumas limitações, nomeadamente, no que diz respeito à ativação indesejada dos limpa-para-brisas aquando da presença de sujidade ou outras partículas de sujidade na superfície do para-brisas que provoquem um efeito ótico semelhante ao causado pelas gotas de chuva. Outras limitações existentes prendem-se com a área do sensor, bastante reduzida face à área total do para-brisas, limitando a sua eficácia na deteção de

pluviosidade mais reduzida e/ou constituída por gotas de menor dimensão e no aspeto físico do compartimento onde fica o sensor, sendo algo volumoso e descontextualizado da elegância desejada em automóveis de luxo. Estes aspetos estimularam a investigação e o desenvolvimento de soluções mais compactas e eficientes na deteção de chuva, como os sensores capacitivos (Otte *et al.*, s/d).

A opção pelos sensores piezoelétricos para a realização deste trabalho prático foi feita com base na elevada sensibilidade, na sua reduzida dimensão, na facilidade de aquisição e de implementação sobre as superfícies de ensaio que este tipo de sensores apresenta (Pankey *et al.*, 2005).

1.2 OBJETIVOS

O presente trabalho experimental teve como principal objetivo o estudo de uma solução para deteção de chuva em veículos automóveis, com a aplicação de um sensor piezoelétrico capaz de detetar, de forma eficaz, a presença de gotas de chuva para, posteriormente, ser feita a ativação e respetiva regulação da frequência de funcionamento do limpa-para-brisas.

A pesquisa bibliográfica realizada permitiu verificar que este tipo de solução já tinha sido estudado por outros, com registo das respetivas patentes. No entanto, alguns aspetos funcionais continuavam em aberto, nomeadamente a utilização de sensores piezoelétricos do tipo fita (o utilizado neste trabalho experimental) e o circuito de condicionamento de sinal (CCS) utilizado. As limitações sentidas, no decorrer do trabalho, ao nível dos meios operacionais existentes influenciaram a qualidade dos resultados experimentais obtidos. Ainda assim, foi possível determinar a capacidade de deteção do sensor para o fim pretendido, a viabilidade do CCS utilizado para esta aplicação, determinar as melhorias a aplicar em trabalhos futuros e as aplicações alternativas possíveis com a montagem utilizada.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

A presente dissertação está dividida em 4 capítulos. No capítulo 2 é feito um levantamento dos sistemas de remoção e deteção de chuva existentes, com a descrição das suas principais características e limitações de funcionamento. No capítulo 3 é feita uma descrição técnica dos materiais utilizados e dos procedimentos seguidos nos ensaios

realizados. Este capítulo está dividido em duas partes: Parte I – Ensaio no laboratório e Parte II – Ensaio no automóvel. A apresentação e a discussão dos resultados obtidos, em cada uma das partes, são feitas no capítulo 4. Por fim, no capítulo 5 são tiradas as principais conclusões obtidas do trabalho experimental realizado e são apresentadas sugestões/propostas de trabalho futuro.

2 SISTEMAS DE DETEÇÃO DE CHUVA.

Neste capítulo é feito um levantamento dos sistemas de detecção de chuva, designados sensores de chuva. A precipitação incidente sobre as superfícies onde estes estão instalados provoca a sua estimulação e conseqüente ativação automática dos limpa-para-brisas, sendo a intensidade do sinal dado pelo sensor proporcional ao volume de precipitação existente (Otte *et al.*, s/d).

Para além da aplicação na indústria automóvel, os sensores de chuva são também utilizados em equipamentos meteorológicos para monitorização dos níveis de pluviosidade. Neste tipo de equipamento, o elemento sensorial é um sensor piezoelétrico capaz de detetar o número e dimensão de gotas de chuva com base no momento linear detido por cada gota no momento do impacto sobre a superfície do sensor (Salmi *et al.*, s/d). A revisão da literatura existente sobre este sensor permitiu reforçar e/ou definir com maior rigor as hipóteses formuladas para o trabalho experimental realizado.

Actualmente, encontram-se em desenvolvimento novos sensores de chuva baseados em outros princípios de detecção que não o da reflexão de luz. Contudo, os resultados obtidos dos ensaios realizados com os mesmos ainda não são suficientemente satisfatórios para que a sua aplicação em veículos automóveis seja viável (Otte *et al.*, s/d).

No final do capítulo, é feita uma descrição das mais recentes tecnologias aplicadas no desenvolvimento de novas soluções para a detecção de chuva.

2.1 SENSOR DE CORRENTE RESIDUAL

O funcionamento deste sistema baseia-se no atrito existente entre escova e superfície do para-brisas: quanto maior a quantidade de água presente na superfície do para-brisas, menor o atrito existente entre esta e a lâmina de borracha da escova. O coeficiente de atrito existente entre a lâmina de borracha da escova e a superfície do para-brisas varia entre 0,1 e 0,6, quando esta está molhada, e 0,8 a 2,5, quando se encontra seca (Denton, 1995). Assim, quanto menor a quantidade de água presente na superfície do vidro, maior o atrito existente entre as superfícies e, conseqüência de tal, o esforço realizado pelo motor elétrico e a intensidade da corrente elétrica que o percorre também serão maiores (Iacoponi e Di Nunzio, 1985).

A medição da intensidade da corrente que atravessa o motor elétrico é realizada por meio de uma resistência, de baixo valor ôhmico, que está ligada em série entre o motor e o potencial negativo (ligação à “massa”) e que provoca uma queda de tensão, U_q , na ordem das centenas de mV. A presença de uma resistência variável, ligada em paralelo à montagem destes dois últimos componentes, permite a calibração do sistema (Iacoponi e Di Nunzio, 1985).

A queda de tensão obtida na resistência a jusante do motor, U_q , é amplificada por um circuito amplificador não-inversor, cujo ganho toma o valor K , que tem ligada à sua entrada negativa uma tensão de referência, U_{ref} . A tensão à saída do amplificador, $U_{saída}$, é obtida por meio da equação 1. As tensões elétricas referidas estão expressas em V (Iacoponi e Di Nunzio, 1985):

$$U_{saída} = K * (U_q - U_{ref}), \quad (1)$$

A tensão obtida $U_{saída}$ entra num circuito integrador que, mediante a variação deste valor, vai alterar o valor da constante tempo que define o período entre ciclos de funcionamento. Um aumento do valor de $U_{saída}$ é resultado de uma maior queda de tensão na resistência a jusante do motor e consequência de um maior esforço realizado por este último, fazendo com que o circuito integrador aumente a constante tempo e reduza a frequência de funcionamento do limpa-para-brisas. Por outro lado, uma redução do valor de $U_{saída}$ é consequência de uma menor queda de tensão na resistência ligada em série com o motor do limpa-para-brisas, resultado de um menor atrito entre as escovas e a superfície do para-brisas. Esta redução do atrito é produto da existência de uma maior quantidade de água presente na superfície do para-brisas, fazendo com que o circuito integrador reduza a constante tempo, aumentando a frequência dos ciclos de funcionamento do limpa-para-brisas (Iacoponi e Di Nunzio, 1985):

2.2 SENSOR ÓTICO

É o tipo de sensor de chuva mais utilizado na indústria automóvel atualmente e o seu funcionamento baseia-se na diferença de intensidade existente entre o feixe de radiação infravermelha (IV) emitido e o recebido por reflexão no para-brisas (Otte *et al.*, s/d).

O sensor está integrado num só bloco onde estão alojados 1 díodo emissor de luz (LED) e um recetor de luz, ambos de radiação IV, colocados em posição diagonal para o interior,

com os eixos imaginários que passam pelo centro do emissor e recetor a formarem um ângulo interior de cerca de 90 °. A fixação do sensor ao para-brisas é realizada por meio de encaixe numa moldura de suporte que, por sua vez, está colada na superfície interior do para-brisas. Este método de fixação permite manter o sensor encostado ao para-brisas sob a ação de uma força constante e oferece uma fiabilidade e robustez ótimas (Schlegel e Schuler, 2002).

Para otimizar a receção do feixe de radiação IV, existe uma peça plástica prismática que promove a ampliação ótica do sinal IV emitido. Esta peça plástica, com a mesma área que a do corpo do sensor, apresenta uma face plana, e ao mesmo nível que o corpo do sensor, de forma a ficar perfeitamente encostado à superfície interior do para-brisas, enquanto a face oposta dispõe de uma superfície constituída por uma sucessão de irregularidades em forma de “V”, cujos planos constituintes formam um ângulo de 90 ° entre si e são perpendiculares aos eixos imaginários dos emissores e recetores do feixe de IV (Watanabe *et al.*, 1987).

A receção do feixe de radiação IV é feita por intermédio da sua reflexão na superfície interior do para-brisas. Quando estão presentes gotas de água na superfície exterior do para-brisas, uma parte do sinal IV emitido é refratado, originando uma redução da intensidade da radiação recebida. Esta diferença existente entre os sinais emitido e recebido é interpretada como a existência de gotas de água no para-brisas (figura 2.1). Quanto maior a intensidade do sinal refratado, maior a diferença existente entre as intensidade dos sinais emitido e recebido pelo sistema e maior a quantidade de água presente no para-brisas, com conseqüente aumento da frequência de funcionamento do limpa-para-brisas (Watanabe *et al.*, 1987).

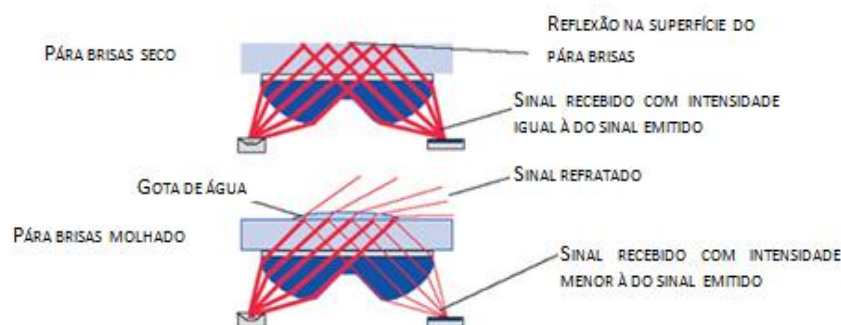


Figura 2.1 – Princípio de funcionamento de um sensor ótico (adaptado de Kato e Yagi, 2008)

A diferença de intensidade entre o feixe IV emitido e o recebido, provocado por cada gota de água sobre o para-brisas, gera um impulso elétrico cuja duração é proporcional à diferença de intensidade registada. A duração dos impulsos revela a dimensão das gotas de água existentes, enquanto o número de impulsos indica o número de gotas existente. Estes impulsos dão entrada num circuito condicionador de sinal baseado num amplificador diferencial e num sistema de controlo em anel fechado (*closed-loop control*) com uma constante temporal de cerca de 4 segundos, que evita grandes variações no sinal à entrada do amplificador, causadas pela elevada refração consequente das gotas de água de maior dimensão (Schlegel e Schuler, 2002).

Estes sensores são imunes à presença de interferências quasi-estáticas existentes na superfície exterior do para-brisas tais como sujidade, riscos ou mesmo rachas graças à sua capacidade de compensarem a presença destes (Schlegel e Schuler, 2002).

A sua evolução permitiu chegar aos atuais sensores de chuva com oito LED IV, dispostos em 2 setores circulares, com cada setor a dispor de 4 LED, em redor do recetor. Estes setores circulares de LED emitem radiação de forma alternada e numa frequência superior, em 1 múltiplo, à da maior frequência proveniente de luz artificial previsível de ser encontrada, garantindo uma elevada resistência a eventuais interferências exteriores. A reduzida dimensão e a forma circular do sensor permitem a sua colocação em posição central no para-brisas e integrado noutros componentes do veículo, nomeadamente no espelho retrovisor interior (figura 2.2) (Schlegel e Schuler, 2002).



Figura 2.2 – Sensor de chuva ótico integrado no espelho retrovisor interior de um veículo automóvel (Rain Sensors, 2006)

A natureza dos sinais utilizados no seu funcionamento permite que estes dispositivos possam também detetar os níveis de luminosidade no exterior e fornecer informação para

ativação automática dos dispositivos de iluminação exterior dos veículos, vulgo faróis, quando o valor de luminosidade registados estiver abaixo do valor pré-definido pelo sistema, informação da radiação IV existente para ajuste do sistema de climatização automática e a funcionalidade de manter os faróis acessos durante um curto período de tempo (*Coming Home – Leaving Home*). Os sensores com estas capacidades designam-se de sensores de chuva e luz. Este dispositivo utiliza a informação obtida pelo díodo recetor IV do sensor de chuva, nomeadamente, o nível de radiação com comprimento de onda de 870 nm existente no exterior do veículo (figura 2.3) (Schlegel e Schuler, 2002).



Figura 2.3 – Aspeto de um sensor ótico de chuva e luz. (Kato e Yagi, 2008)

Para que seja possível que um sensor de chuva e luz realize todas as funções desejadas e, ao mesmo tempo, mantenha uma dimensão física reduzida e otimizada, torna-se imperativa a utilização de circuitos integrados (IC) especificamente concebidos para uma determinada aplicação designados por Circuitos Integrados de Aplicação Específica (ASIC) que, no caso do sensor de chuva e luz, têm as seguintes funções (Schlegel e Schuler, 2002):

- Gestão da alimentação, nomeadamente no controlo dos valores da tensão.
- Modulação e controlo dos emissores de IV
- Filtragem e desmodulação do sinal obtido nos recetores.
- Capacidade de se manter em espera (modo *stand-by*).
- Domínio dos parâmetros existentes para a adaptação do sistema.
- Medição da iluminação ambiente existente.

As memórias e os microprocessadores são exemplos de IC que não são ASIC, visto terem uma função definida mas utilizáveis numa vasta gama de aplicações (Kommuru e Mahmoodi, 2009).

Um ASIC é um IC construído com base na tecnologia de Semicondutor de Óxido Metálico Complementar (CMOS) que consiste na utilização de transístores de efeito de campo de óxido metálico (MOSFET) e que podem ser de base negativa (NMOS) ou de base positiva (PMOS). Estes transístores funcionam como interruptores que atuam de forma conjunta, dando origem às portas lógicas que providenciam a base de funcionamento dos ASIC. Nos circuitos CMOS, os transístores estão dispostos em formato de sanduíche, constituída por 3 camadas: uma camada semicondutora, geralmente obtida a partir de um cristal de silício, outra de dióxido de silício e uma terceira camada de metal. Atualmente, todos os IC são concebidos com base na tecnologia CMOS. A sua larga difusão é explicada pelas vantagens que oferece aos projetistas de IC: elevadas velocidades de funcionamento dos IC, baixo consumo energético e facilidade de implementação ao nível dos transístores (Kommuru e Mahmoodi, 2009).

Comparativamente com os circuitos constituídos por componentes discretos utilizados nos sensores óticos de chuva, a utilização de ASIC permitiu uma redução do número de componentes utilizados (de 70 para 21), a utilização de uma placa de circuito integrado (PCB) mais barata – os ASIC utilizam PCB de 2 camadas, ao passo que os circuitos constituídos por componentes discretos utilizam PCB de 4 camadas – e, consequência destes últimos aspetos, a redução dos custos e tempos de fabrico e montagem (Schlegel e Schuler, 2002).

O modo *stand-by* oferecido pelo ASIC permite que o sensor detete a ocorrência de precipitação mesmo quando o veículo não se encontra em funcionamento, fechando automaticamente as janelas e/ou o teto de abrir caso estes tenham ficado abertos (Schlegel e Schuler, 2002).

De modo a evitar que as reduções súbitas e de curta duração da luminosidade no exterior do veículo causassem um curto ciclo de ativação e desativação dos faróis (passar debaixo de uma ponte, sob as copas de árvores), o sinal obtido do sensor de chuva e luz passa por um circuito com atraso à operação que evita um funcionamento indesejável e prejudicial à vida útil das lâmpadas. Contudo, a utilização deste tipo de condicionamento de sinal faz com que o sistema leve algum tempo a reagir após o veículo entrar num espaço com reduzida e prolongada luminosidade (ex.: túnel), tornando a sua ação lenta e a sua utilização algo desconfortável (Kato e Yagi, 2008).

Para evitar este comportamento, foram criados os sensores de chuva-luz-túnel (RLTS). Face aos sensores de chuva e luz, a principal diferença reside na forma de como a intensidade da luz exterior é medida; os RLTS dispõem de 3 recetores IV para a medição da luminosidade separados do recetor IV destinado à deteção de pluviosidade. A disposição e função de cada um dos recetores IV destinados à medição da luminosidade exterior são as seguintes: o primeiro recetor está colocado em posição central no sensor, dispõe de um grande ângulo de atuação (cerca de 40°) e mede a luminosidade existente no espaço diante do veículo. É o responsável pela deteção do anoitecer e/ou noite. Nesta situação, a ativação dos faróis só é feita se a informação recolhida pelos 3 recetores, relativamente ao nível de luminosidade existente, for comum. Os segundo e terceiro díodos estão colocados na parte superior do sensor e orientados para a frente do veículo; têm ângulos de atuação pequenos (15° e 4° respetivamente) e são os responsáveis pela análise da luminosidade do espaço anterior ao veículo, permitindo ao sistema distinguir, por exemplo, a passagem sob uma ponte da entrada num túnel. Estes dois díodos trabalham em conjunto na deteção antecipada dos níveis de luminosidade do espaço que se apresenta diante do veículo, permitindo a ativação dos faróis de forma antecipada e, ao mesmo tempo, evitando a ativação indesejada ou inconveniente (Schlegel e Schuler, 2002) (figura 2.4).

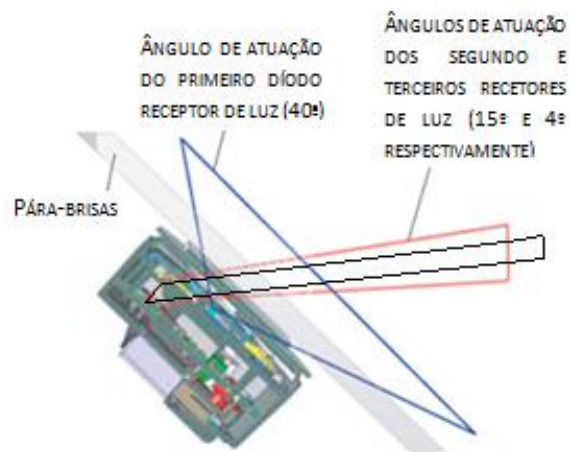


Figura 2.4 – Disposição dos recetores de luz nos sensores de chuva, luz e túnel (adaptado de Kato e Yagi, 2008)

As últimas evoluções no campo dos RLTS permitiram a utilização deste sensor para medir a intensidade da radiação solar incidente sobre o veículo. Em veículos equipados com sistemas de climatização automática, esta informação é útil para fazer a parametrização adequada do ar a ser insuflado para o habitáculo do veículo após colocar este em funcionamento, de forma a baixar a temperatura ambiente o mais rapidamente possível. Outra funcionalidade tomada pelo RLTS é a regulação automática da iluminação do painel de instrumentos em função do nível de luminosidade existente no exterior (Schlegel e Schuler, 2002).

2.3 SENSORES PIEZOELÉTRICOS

Todos os materiais que possuem a capacidade de transformar uma forma de energia noutra são designados de transdutores (Measurement Specialties, 1999). Deste grupo de materiais destacam-se os materiais piezoelétricos que, entre outras, possuem a capacidade de gerarem uma tensão elétrica entre as suas extremidades (ou faces do cristal) proporcional à magnitude da deformação mecânica sofrida (figura 2.5). O inverso também é possível, ou seja, um material piezoelétrico sofre uma deformação mecânica proporcional ao valor da tensão elétrica aplicada nas suas extremidades. A piezoelectricidade – energia elétrica consequente da deformação mecânica sofrida por um material piezoelétrico – é definida como sendo a interação eletromecânica linear entre os estados elétrico e mecânico de cristais que não possuem centro de simetria (Gautschi, 2002).

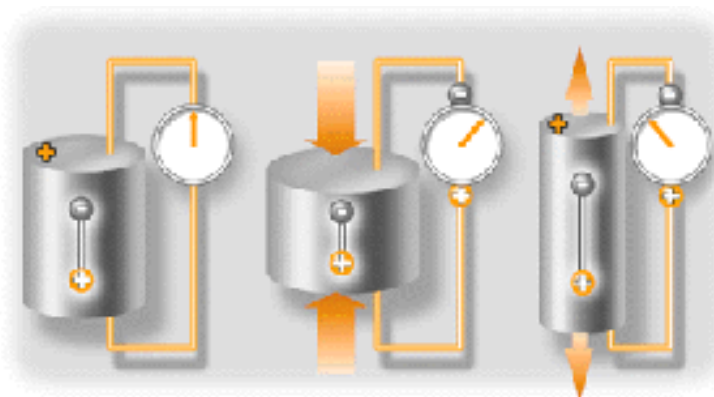


Figura 2.5 – Imagem exemplificativa do efeito piezoelétrico (The Piezoelectric Effect, s/d)

Os materiais piezoelétricos mais utilizados são os monocristais, como o quartzo, o gálio ortofosfato ou a turmalina, os materiais cerâmicos obtidos a partir de misturas de pó dos monocristais e os polímeros piezoelétricos. Dos monocristais, o quartzo é o mais utilizado, ao passo que os cerâmicos são obtidos em função das propriedades desejadas para o material a obter, tendo por base as características bem conhecidas dos elementos-base. Os materiais piezoelétricos cerâmicos também permitem obter sensores mais compactos e maior variedade de formas (Gautschi, 2002). Recentemente, o surgimento de polímeros piezoelétricos, como o PVDF e respectivos copolímeros deste, deu origem a um grande avanço no desenvolvimento de sensores piezoelétricos, ao permitir a criação de sensores com variadas e complexas formas geométricas, resistência a temperaturas relativamente elevadas (até 135 °C) e espessuras muito reduzidas, sendo possível criar sensores com espessuras de 200 Å (Measurement Specialties, 1999).

O efeito piezoelétrico ocorre nos materiais segundo as 4 formas possíveis de aplicação de uma força sobre si: de forma longitudinal, de forma transversal, em corte e de forma hidroestática (pressão dos fluídos sobre a superfície interna dos materiais piezoelétricos) (figura 2.6) (Gautschi, 2002).

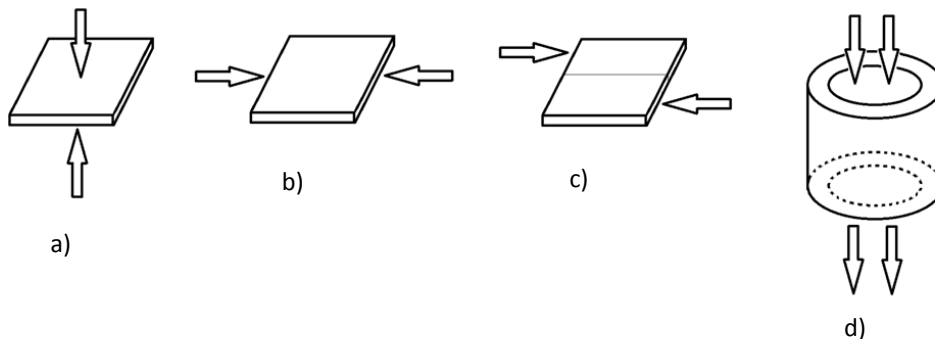


Figura 2.6 – Aplicação de uma força sobre um material piezoelétrico de forma a) longitudinal, b) transversal, c) em corte e d) hidroestática (adaptado de Gautschi, 2002)

A aplicação dos esforços nos materiais piezoelétricos é identificada com base num conjunto de índices de 1 até 6, onde cada valor corresponde à direção do esforço aplicado segundo o referencial de coordenadas do material. (figura 2.7) (Moheimani e Flaming, 2006).

Os materiais piezoelétricos caracterizam-se por um conjunto de constantes, que definem as suas capacidades nos processos de transformação de uma forma de energia em outra e as relações entre esforços em diferentes eixos (Moheimani e Flaming, 2006).

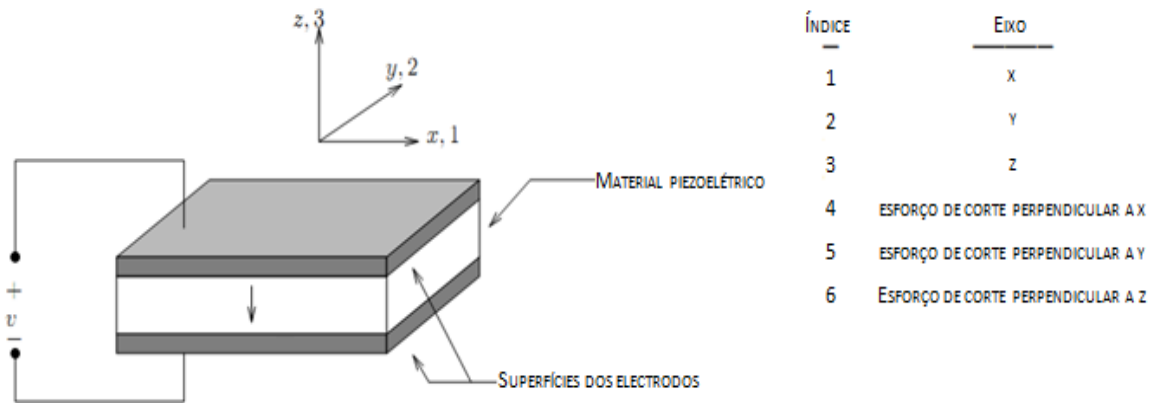


Figura 2.7 – Esquema ilustrativo da constituição básica de um sensor piezoelétrico e os eixos das direções dos esforços aplicáveis no sensor (adaptado de Moheimani e Flaming, 2006)

A capacidade do material piezoelétrico sofrer uma deformação mecânica proporcional à tensão elétrica aplicada no material constitui a base dos processos de comunicação sem fios e de ultrassons. Ao fazer com que a frequência de deformação do conversor seja igual à frequência de ressonância do próprio material piezoelétrico, as oscilações deste vão dispor de uma amplitude considerável. Atendendo ao elevado fator de qualidade mecânica, Q_m , apresentado pelos materiais piezoelétricos, especialmente o quartzo na sua frequência de ressonância, esta é bastante bem definida e estável (Gautschi, 2002). O fator Q_m define-se, matematicamente, como o quociente entre a frequência de ressonância (f_r) do material e a diferença entre os valores das frequências, 3 dB abaixo do valor de f_r , presentes nas curvas de frequências e impedâncias (f_1 e f_2 , respetivamente), conforme patente na equação 2 (Sensor Technology, Ltd. – Hydrophones, Piezoelectric Materials, Acoustic Transducers, 2008):

$$Q_m = \frac{f_r}{(f_1 - f_2)}, \quad (2)$$

Atualmente, é possível obter ondas ultrassónicas com frequências próximas dos THz por meio da oscilação de elementos piezoelétricos (Gautschi, 2002).

A tabela 2.1 indica as principais constantes que identificam as propriedades de um material piezoelétrico.

Constante	Descrição
d_{ij}	Constante piezoelétrica – Relação entre a tensão mecânica obtida no eixo j por ação da tensão elétrica aplicada no material segundo o eixo i
g_{ij}	Constante piezoelétrica – Campo elétrico obtido no material piezoelétrico segundo o eixo i resultante do esforço aplicado na direção do eixo j
S_{ij}	Coefficiente de tendência elástica – Relação entre o esforço aplicado no eixo j e a tensão mecânica resultante no eixo i, tendo em conta que não ocorrem alterações nos valores das tensões mecânicas existentes ao longo dos outros 2 eixos.
e_{ij}	Coefficiente dielétrico – Carga elétrica por unidade de área existente no eixo i por ação do campo elétrico aplicado segundo o eixo j.
k_{ij}	Fator de acoplamento eletromecânico – indicador da capacidade que um material piezoelétrico cerâmico tem para transformar energia mecânica em energia elétrica, assim como o oposto.

Tabela 2.1 – Constantes dos materiais piezoelétricos

No campo das aplicações práticas, para além dos sistemas de comunicação sem fios, estão também medição da velocidade do som, determinação das propriedades mecânicas dos materiais, ensaios de materiais, preparação de emulsões, remoção de partículas de pó e fumo, atomização de líquidos, controlo de equipamentos por via remota, diagnósticos e terapias médicas com ultrassons, auscultação de processos moleculares, microatuadores mecânicos bidirecionais, controlo de vibrações em estruturas como raquetes de ténis ou estabilizadores verticais (*flaps*) de aviões militares e sensores para os mais variados fins (Gautschi, 2002 e Moheimani e Flaming, 2006).

2.3.1 CONSTITUIÇÃO E FUNCIONAMENTO DOS SENSORES PIEZOELÉTRICOS

Um sensor piezoelétrico é constituído, fundamentalmente, por uma camada de material piezoelétrico, 2 elementos transmissores do esforço ao material piezoelétrico, 2 eléctrodos, 2 elementos protetores e um conector (figura 2.7). A rigidez apresentada pelo elemento piezoelétrico influencia a sua resposta em frequência e altera o valor da sua frequência natural. Quanto mais rígido for o elemento transdutor, menor os erros de amplitude e fase da mensuranda obtidos. Outro aspeto a ter em conta é a massa dos elementos existentes entre a mensuranda e o elemento sensorial, devendo ser a mais reduzida possível, de forma a minimizar as alterações que provoca no valor da frequência natural do elemento sensorial. Dependendo do tipo de sensor piezoelétrico em causa, este pode receber, em adição, um diafragma integrado no elemento de transmissão do esforço ou uma massa sísmica, conforme se tratem de sensores de pressão ou de aceleração, respetivamente (Gautschi, 2002). Mais à frente, será feita uma descrição de cada um dos tipos de sensores piezoelétricos existentes.

Os sensores piezoelétricos são designados de sensores ativos devido à natureza piezoelétrica do seu elemento sensorial: o facto de conseguirem devolver uma tensão elétrica, como resultado do esforço mecânico aplicado nas suas faces, faz com que o sensor não careça de alimentação elétrica. Uma análise do ponto de vista elétrico mostra que os sensores piezoelétricos são condensadores ativos, cujo material piezoelétrico comporta-se como um dielétrico que se autocarrega eletricamente por ação do esforço mecânico em si aplicado (Gautschi, 2002).

Os sensores piezoelétricos podem ser divididos em 3 tipos, dependendo do tipo de mensuranda em questão: sensores de força, de pressão e de aceleração ou acelerómetros (figura 2.8).

Os sensores de força medem o esforço aplicado no elemento transmissor de esforço sujeito ao mesmo. O outro elemento transmissor está estático e integra o eléctrodo que recebe e passa a carga elétrica, resultante da aplicação do esforço no sensor, para o conector do sensor. Quanto maior for o esforço aplicado, maior a deformação sofrida à compressão e, por conseguinte, o valor da tensão elétrica obtida (Gautschi, 2002).

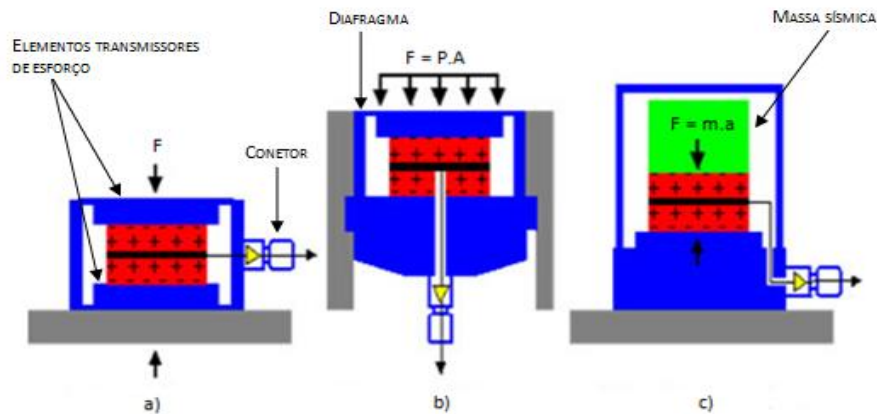


Figura 2.8 – Esquemas ilustrativos do princípio de funcionamento de a) sensor piezoelétrico de força, b) sensor piezoelétrico de pressão e c) sensor piezoelétrico de aceleração (Mohapatra, 2011)

No caso dos sensores de pressão, estes dispõem de um diafragma que está ligado a um dos elementos transmissores de esforço. Ao ser aplicada uma pressão no diafragma, esta vai dar origem a uma força, de valor definido pelo produto da área do diafragma com o valor da pressão. A força exercida sobre o elemento piezoelétrico vai dar origem a uma diferença de potencial proporcional ao seu valor (Gautschy, 2002).

Finalmente, os acelerómetros estão munidos de uma massa sísmica no seu interior que, por intermédio da ação da inércia resultante, vai exercer um esforço no elemento piezoelétrico proporcional ao valor da aceleração a que a massa sísmica está sujeita. No caso concreto destes sensores, a massa sísmica pode ser designada como elemento sensorial propriamente dito, separando-se do elemento piezoelétrico. A diferença de potencial da carga elétrica gerada será proporcional ao valor da aceleração registada (Gautschy, 2002).

2.3.2 UTILIZAÇÃO DOS SENSORES PIEZOELÉTRICOS PARA DETEÇÃO DE CHUVA

Uma das aplicações possíveis dos sensores piezoelétricos é a deteção e medição dos níveis de pluviosidade. A deteção de pluviosidade é utilizada para o acionamento de sistemas como o limpa-para-brisas em automóveis ou a leitura dos níveis de pluviosidade e registo da dimensão das gotas de chuva para fins meteorológicos.

Sensor de chuva piezoelétrico da Nissan

O primeiro exemplo conhecido é o sensor de chuva piezoelétrico desenvolvido pela Nissan no início dos anos 80 do século XX e implementado no modelo Sylvia S12 em meados da

mesma década. O sistema em questão é constituído por uma placa vibratória, colada sobre um elemento piezoelétrico alojado num invólucro plástico (figura 2.9a), um amplificador de sinal, um circuito de controlo de velocidade do limpa-para-brisas que engloba um gerador de impulsos, um oscilador e um contador de impulsos. O sensor está colocado no topo de um painel metálico da carroçaria, em frente e próximo do para-brisas do veículo (figura 2.9b). A placa vibratória dispõe de uma inclinação, compreendida entre 5° e 25°, de forma a ficar paralela ao para-brisas, de modo a tornar a deteção das gotas de chuva incidentes satisfatória quando o veículo circula a uma velocidade compreendida entre 15 e 90 km/h (Shiraishi, 1985).

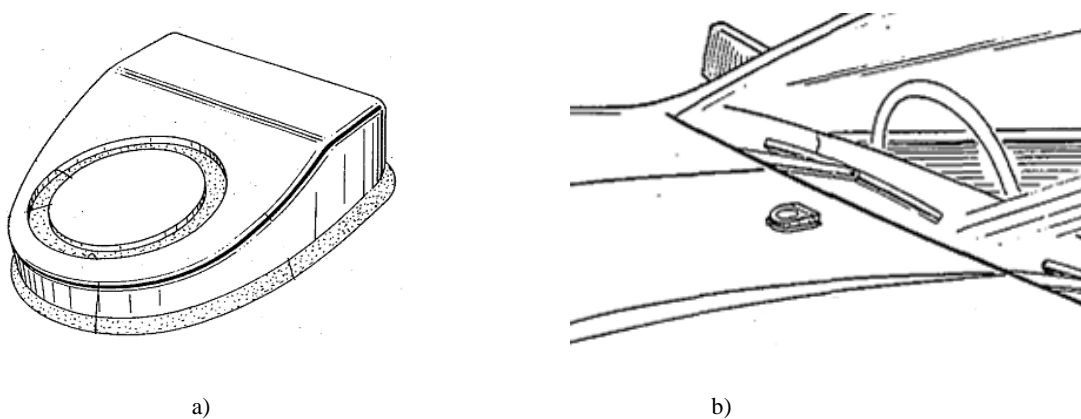


Figura 2.9 – a) Vista geral do sensor e b) localização deste no veículo (Shiraishi, 1985)

O funcionamento deste sistema baseia-se no impacto produzido pelas gotas de chuva na placa, originando um sinal analógico de amplitude proporcional à intensidade do estímulo produzido pelas gotas e, implicitamente, à dimensão destas. Depois de obtido e amplificado, o sinal analógico é introduzido no gerador de impulsos que transforma cada pico de tensão recebido num impulso digital de amplitude proporcional à do sinal recebido. Paralelamente, um oscilador produz impulsos de amplitude e frequência bem definidos. O contador de impulsos, que recebe o sinal tanto do gerador como do oscilador, vai somar o número de impulsos das duas fontes e originar um sinal de saída, cujo valor é definido em função do valor total de impulsos obtido pelo contador em comparação com um valor de referência pré-definido (figura 2.10). Este mesmo valor de saída é o que define a velocidade de funcionamento do limpa-para-brisas (Shiraishi, 1985).

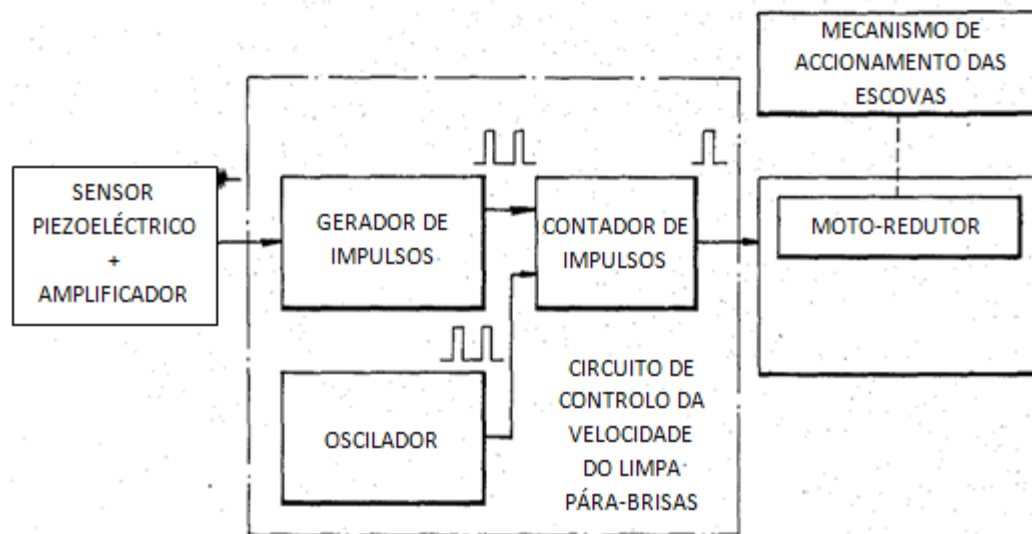


Figura 2.10 – Diagrama de blocos do funcionamento do sensor de chuva piezoelétrico (adaptado de Shiraishi, 1985)

De modo a reduzir ao máximo a possibilidade de as perturbações oriundas do automóvel serem detetadas pelo sensor, a frequência de ressonância da placa vibratória foi alterada para um valor compreendido entre os 10 e os 25 kHz. Foi determinado empiricamente que o maior valor de frequência registado para uma perturbação oriunda do automóvel era de 9 kHz. O aumento do valor da frequência de ressonância teve em conta a amplitude de sinal desejada à saída do sensor, pois foi conseguido com o aumento da espessura da placa vibratória mas à custa de uma menor sensibilidade por parte do sensor. Concluiu-se empiricamente que o sensor deve ter uma área igual ou superior a 100 mm², visto que as gotas ao incidirem sobre a superfície do sensor espalhavam-se por uma área com um valor médio semelhante a este (Shiraishi, 1985).

Sensor piezoelétrico de medição de cadência de chuva

Em 2003, Pankey *et al.* desenvolveram um sistema de deteção e medição de chuva tendo por base as vibrações sentidas na superfície do para-brisas do veículo. A medição destas é realizada por meio de um sensor piezoelétrico de força, preferencialmente um em forma de fita e resistente a altas temperaturas, instalado entre as duas camadas de vidro do para-brisas do veículo ou na superfície oposta àquela onde incide a chuva (Pankey *et al.*, 2005).

O sinal obtido por meio do sensor piezoelétrico é posteriormente amplificado por meio de um amplificador e convertido em sinal digital por via de um conversor A/D. Posteriormente, o sinal digital obtido é introduzido num processador que vai determinar a cadência da chuva tendo por base uma equação exponencial da probabilidade da

precipitação, derivada da equação de primeira ordem da distribuição de Poisson, conforme descrito na equação 3 (Pankey *et al.*, 2005):

$$P_t = I * e^{-It} , \quad (3)$$

Onde I representa a cadência da chuva, obtida pelo número de impulsos recebidos do conversor A/D, P_t a probabilidade de ocorrência do nível de precipitação e t o período compreendido entre impulsos.

Dados estatísticos existentes sobre precipitação mostram que a queda de chuva apresenta características deste tipo de distribuição. A obtenção do valor de I pode ser determinada por 3 métodos. No primeiro, o processador soma os valores dos períodos entre picos, num intervalo temporal definido, w, dando origem a um valor designado por n_1 . De seguida, cria um outro valor n_2 obtido a partir de um outro somatório dos valores dos períodos entre picos. A partir dos valores de w, n_1 e n_2 , o processador determina um valor I_{inter} definido pela equação 4 (Pankey *et al.*, 2005):

$$I_{inter} = -2 * \left(\frac{n_2 - n_1}{w * (n_2 + n_1)} \right) , \quad (4)$$

A média aritmética dos sucessivos valores obtidos para I_{inter} , calculada pelo processador, resulta no valor de I utilizado na equação 3 (Pankey *et al.*, 2005).

O segundo método consiste na obtenção de 2 somatórios de períodos entre gotas, n_1 e n_2 , onde o primeiro é o somatório de todos os períodos com valor igual ou inferior ao do segundo período registado entre gotas, ao passo que o segundo é o somatório de todos os períodos superiores a este valor. O valor de I é igual a (Pankey *et al.*, 2005):

$$I = \frac{n_1}{n_2} , \quad (5)$$

Finalmente, o terceiro método de cálculo, mais preciso na determinação do nível de pluviosidade do que o segundo, assemelha-se em tudo a este último, apenas diferindo na equação utilizada para o cálculo do valor de I (Pankey *et al.*, 2005):

$$I = \frac{n_1}{(T * n_2)} , \quad (6),$$

onde T é igual ao valor do segundo período registado entre gotas (Pankey *et al.*, 2005).

O valor de I é transmitido ao controlador do limpador de para-brisas, que definirá a frequência de funcionamento do limpador de para-brisas com base no valor da cadência de chuva (figura 2.11) (Pankey *et al.*, 2005).

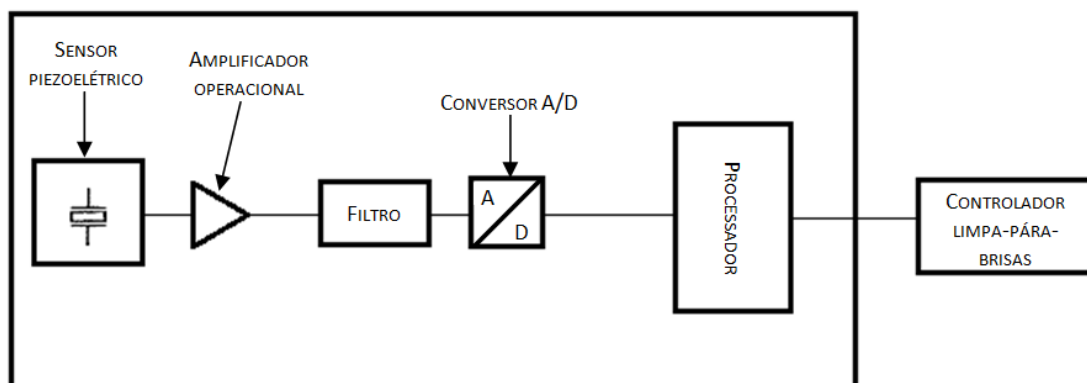


Figura 2.11 – Esquema funcional do sensor piezoelétrico de medição de cadência de chuva (adaptado de Pankey *et al.*, 2005)

Em alternativa, o conversor A/D e o processador podem ser substituídos por um microcontrolador, como o PIC12C672 da Microchip Technology Inc, que dispõe de arquitetura RISC, de um conversor A/D de 8 bits e um oscilador interno de 4 MHz, podendo funcionar com um oscilador externo de 10 MHz, em alternativa ao interno (Pankey *et al.*, 2005).

A imunidade ao ruído produzido por fontes externas (impacto de pedras, vento ou ondas acústicas) é conseguido graças ao algoritmo utilizado no cálculo da cadência de chuva, que ignora os sinais provocados por estas perturbações devido ao seu comportamento não padronizado, ao contrário do apresentado pelas gotas de chuva (Pankey *et al.*, 2005).

Sensor de chuva da Vaisala

A empresa finlandesa Vaisala desenvolveu um sensor de chuva meteorológico, o WXT520, tendo por base um sensor piezoelétrico de pressão que produz uma diferença de potencial proporcional à energia cinética das gotas que incidem sobre a superfície da película protetora do sensor. Para além da deteção, este equipamento permite também calcular a dimensão das gotas de água e, assim, determinar a intensidade da pluviosidade. A figura 2.12 ilustra o esquema funcional do sensor em questão.

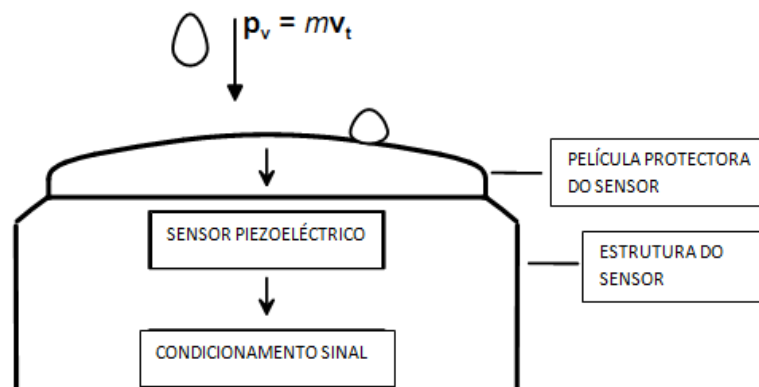


Figura 2.12 – Esquema de funcionamento do sensor da Vaisala (adaptado de Salmi e Ikonen, s/d)

Neste equipamento, a deteção das gotas de chuva baseia-se na amplitude do impacto provocado pelas gotas. O impacto de uma gota de água distingue-se do impacto de outros corpos devido ao sinal produzido pelo seu impacto no sensor. As figuras 2.13a e 2.13b mostram a diferença do sinal obtido do impacto de uma gota de água e do impacto de uma pedra de gelo (Salmi e Ikonen, s/d).

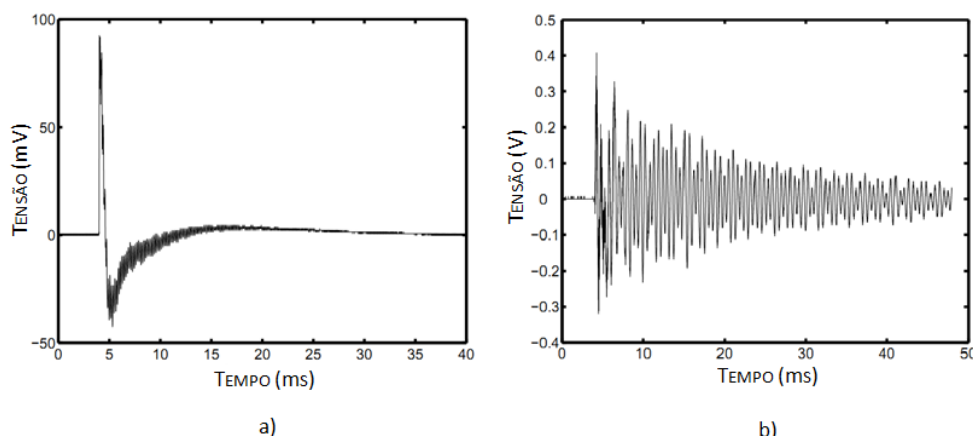


Figura 2.13 – Diferenças no sinal causado pelo impacto de a) uma gota de água e b) uma pedra de granizo (adaptado de Salmi e Ikonen, s/d)

A diferença de potencial obtida nos elétrodos do sensor é dada em função do momento linear detido pela gota de água no momento do impacto e a constante específica de deformação do sensor piezoelétrico g_{ij} (Salmi e Ikonen, s/d).

Para calibrar o sensor, os principais aspetos tidos em conta, associados ao fenómeno da precipitação, foram a alteração do formato da gota e a alteração da velocidade desta última causada pelo vento. Segundo a Organização Mundial de Meteorologia (WMO), o fator de alteração da velocidade da gota causada pelo vento tem um peso entre 2 % e 10 % no resultado final. (Salmi e Ikonen, s/d).

Para a determinação da dimensão das gotas de chuva, Salmi *et al.* construíram um dispositivo laboratorial que permitiu determinar a dimensão das gotas de chuva em função da velocidade que estas apresentavam no momento do impacto com o sensor (figura 2.14) (Salmi *et al.*, s/d).

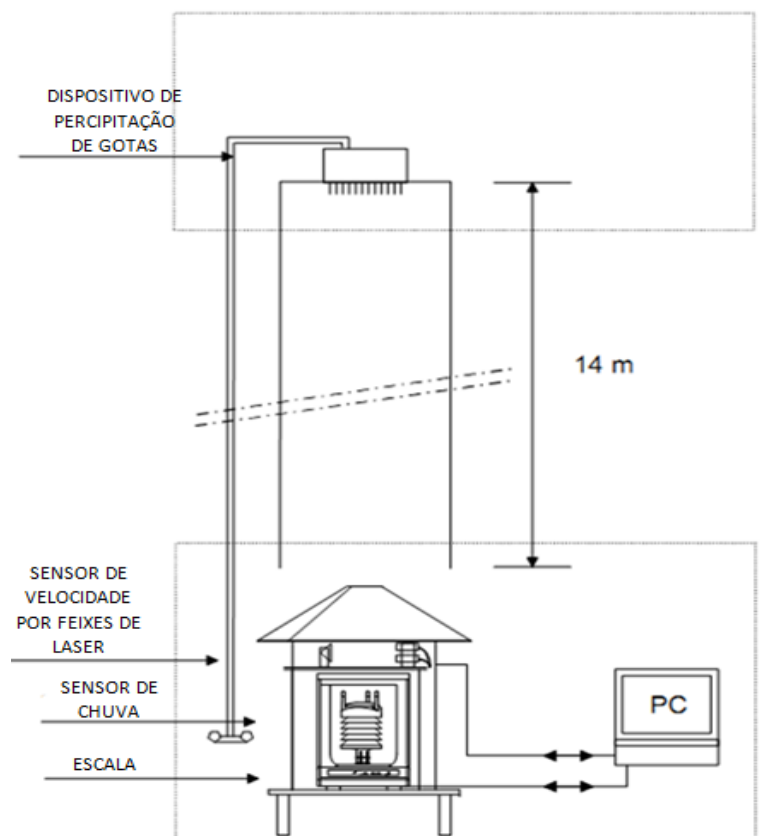


Figura 2.14 – Montagem realizada para medição da dimensão das gotas de água (adaptado de Salmi *et. al.*, s/d)

A relação obtida por Salmi e Elomaa (2007) que relaciona a velocidade da gota com o seu diâmetro é expressa na equação 7 (Salmi *et al.*, s/d).

$$v_t(D) = 9,4[1 - \exp(-0,556 * D^{1,13})], \quad (7)$$

com $v_t(D)$ igual à velocidade da gota, em $m.s^{-1}$ e D igual ao diâmetro da gota, em mm.

Os valores de diâmetro calculados foram comparados com os valores de diâmetro medidos e, a partir daí, foi possível determinar o valor de desvio padrão obtido para o diâmetro das gotas e definir valores nominais das gotas de chuva em função da gama de valores obtidos, conforme mostra a tabela 2.2 (Salmi *et al.*, s/d).

Classe dimensional	Diâmetro nominal (mm)	Gama de diâmetros (mm)
1	1,00	Até 1,122
2	1,25	1,123 a 1,403
3	1,60	1,404 a 1,795
4	2,00	1,796 a 2,244
5	2,50	2,245 a 2,895
6	3,20	2,896 a 3,591
7	4,00	3,592 a 4,489
8	5,00	Maior do que 4,489

Tabela 2.2 – Diâmetro nominal e gama dimensional associada (Salmi *et al.*, s/d)

Em 2010, Elbasit *et al.* demonstraram a relação existente entre o nível de pluviosidade, a energia cinética apresentada pelas gotas de chuva e o nível de erosão existente na floresta tropical.

A energia cinética da chuva pode ser expressa a partir de 2 formas distintas: em função da área e do tempo, KE_t – potência específica, expressa em $J.m^{-2}.s^{-1}$ – ou em função da área e do volume de precipitação, KE_c – expressa em $J.m^{-2}.mm^{-1}$. Empiricamente, é possível determinar o valor da potência específica (Elbasit *et al.*, 2010).

A obtenção dos valores de potência específica foi feita com os seguintes parâmetros: o tempo de amostragem foi de 10 s, a área do sensor para medição da precipitação é de 6000 mm^2 e definidas 8 classes dimensionais para as gotas. A figura 2.15 mostra os gráficos que relacionam os valores de potência por unidade área da chuva com os 4 níveis de pluviosidade registrados durante as medições, bem como o sinal obtido do sensor em cada situação (Elbasit *et al.*, 2010).

A partir destes valores, é possível calcular KE_c a partir da equação 8 (Elbasit *et al.*, 2010):

$$KE_c = c * KE_t * I^{-1}, \quad (8),$$

onde I é o nível de precipitação, em $mm.h^{-1}$, e c a constante de conversão de $mm.h^{-1}$ para $mm.s^{-1}$.

Sabendo o valor da área de incidência da precipitação – que neste caso foi de 6000 mm^2 – e o nível de precipitação registrado ao longo de todo o período de medição, obtém-se o valor da energia cinética da chuva (Elbasit *et al.*, 2010).

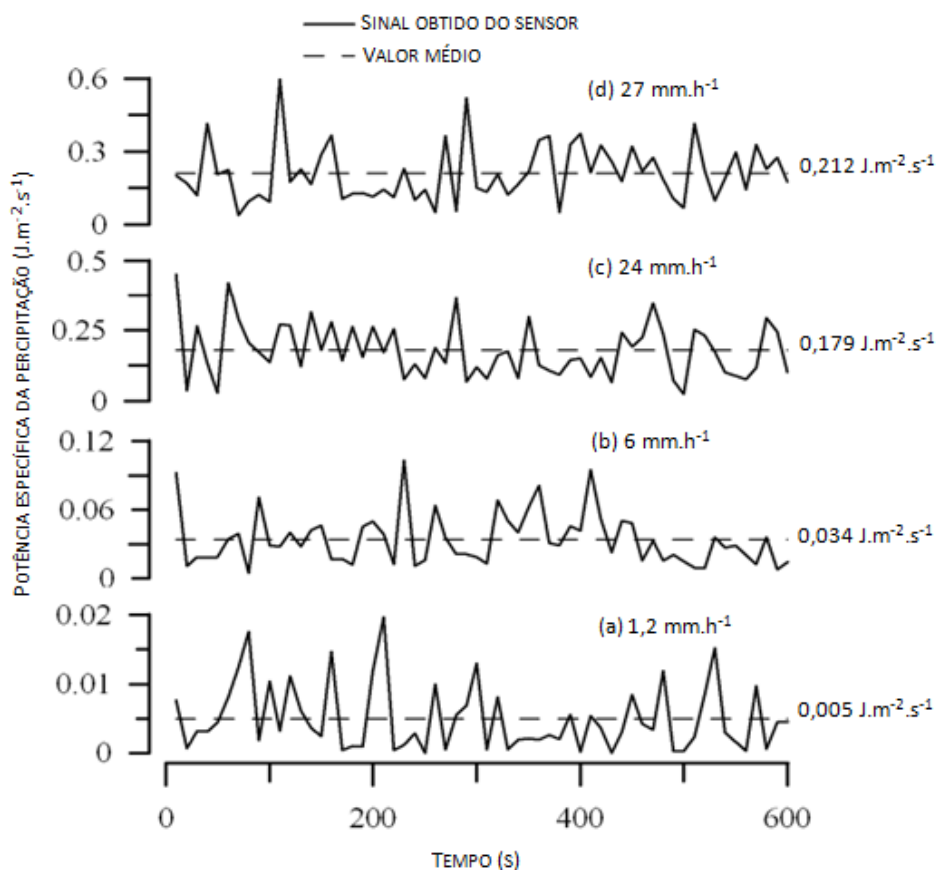


Figura 2.15 – Valores da potência específica, por unidade de área, obtidos empiricamente para os níveis de precipitação iguais a a) 1,2 mm.h⁻¹, b) 6 mm.h⁻¹, c) 24 mm.h⁻¹ e d) 27 mm.h⁻¹ (adaptado de Elbasit *et al.*, 2010)

Os dados obtidos mostraram que a energia cinética das gotas é proporcional à dimensão da gota (Salmi e Ikonen, s/d). Uma análise ao gráfico da figura 2.15 permite verificar que o valor médio de KE_t aumenta em função do valor do nível de precipitação registado. Com isto, a existência de um maior nível de pluviosidade implica um maior valor de energia cinética (Elbasit *et al.*, 2010).

2.4 NOVOS SENSORES DE CHUVA

Nos últimos anos, com especial destaque para a última década, tem-se assistido ao surgir de novas soluções na área dos sensores de chuva. À exceção do sensor de chuva capacitivo, os resultados obtidos dos respetivos protótipos ainda não são suficientemente satisfatórios para que os mesmos passem à fase de produção em série (Otte *et al.*, s/d).

Experiências sensoriais com humanos provam que é necessária uma área de pelo menos 10000 mm² para uma deteção e remoção eficaz das gotas de água do para-brisas. Comparativamente com os sensores atualmente aplicados, estes conseguem detetar numa

área máxima de 500 mm². Os mesmos estudos sugeriam que uma solução eficaz de remoção necessitaria de uma área de detecção de, pelo menos, 8000 mm² e capaz de detetar gotas com um diâmetro mínimo de 1 mm (Hochstein, 2003a).

Das novas soluções surgidas, o sensor capacitivo é o que se apresenta como mais viável como alternativa técnica e comercialmente viável ao sensor ótico. Os últimos desenvolvimentos na área dos sensores de chuva capacitivos apresentaram uma eficácia na detecção de chuva superior e um custo de produção inferior face ao sensor ótico (Otte *et al.*, s/d). Outras soluções desenvolvidas foram os sensores de imagem e o de ultrassons.

2.4.1 SENSOR CAPACITIVO

A utilização de sensores capacitivos não é nova. Para além de serem a base tecnológica utilizada no dispositivo de *interface* humana tátil (*mousepads*), integrado em computadores portáteis, foram desenvolvidas, no passado, soluções de detecção de chuva, de medição de temperatura ou mesmo dos níveis de humidade baseadas nestes sensores. Devido às limitações técnicas existentes à data, a falta de fiabilidade apresentada ou mesmo os elevados custos apresentados, fizeram com que a sua implementação e comercialização não fosse viável (Otte *et al.*, s/d). Em 2002, Kithil apresentou três aplicações possíveis em automóveis com sensores capacitivos, das quais uma consistia num sensor capacitivo de chuva integrado no para-brisas. A viabilidade técnica da solução ficou comprovada mas os elevados custos de produção do para-brisas com os eléctrodos integrados condicionam a sua comercialização, tornando-a inviável, em comparação com o custo apresentado pelo sensor ótico (Kithil, 2002 e Otte *et al.*, s/d). Os mais recentes avanços obtidos na área dos IC permitiram ultrapassar os problemas de cariz técnico existentes, associados a um bom dimensionamento do sensor (Otte *et al.*, s/d).

Em 2010, Otte *et al.* conseguiram desenvolver um sensor capacitivo de chuva eficaz, fiável, de dimensão inferior à do sensor ótico, com melhor integração estética no veículo e com um custo de fabrico inferior ao valor de referência de um sensor ótico: 11,4 USD contra os 18 USD de referência para um sensor ótico. Estes aspetos tornam viável a comercialização do sensor pela Hyundai, construtor automóvel que incentivou e apoiou a realização deste projeto (Otte *et al.*, s/d).

A capacidade sensorial dos sensores capacitivos é baseada na interferência causada por um objeto sobre o campo elétrico a que está sujeito. O princípio de funcionamento destes

sensores é semelhante ao do condensador elétrico: um par de placas metálicas condutoras elétricas (elétrodos), separadas por uma camada de uma substância dielétrica e estando carregadas eletricamente, possuem um campo elétrico cujas linhas de campo estão compreendidas entre as duas placas e confinadas num invólucro. Estando definidos o campo elétrico e o dielétrico no condensador, é possível determinar a sua capacidade elétrica, ou simplesmente capacidade, expressa em Farads (F). A diferença do sensor capacitivo face ao condensador reside no espaço funcional – superfície em vidro em contacto com o exterior – e a alteração do dielétrico – objeto sobre o para-brisas – que provoca alterações nas linhas de campo existente e, conseqüentemente, uma variação no valor do campo elétrico. Por outras palavras, a alteração do dielétrico no sensor capacitivo vai provocar uma variação da capacidade do sensor. Os diferentes elementos exteriores à superfície do para-brisas promovem diferentes variações da capacidade, sendo possível distinguir, por exemplo, a presença de sujidade da presença de gotas de chuva (figura 2.16) (Otte *et al.*, s/d).

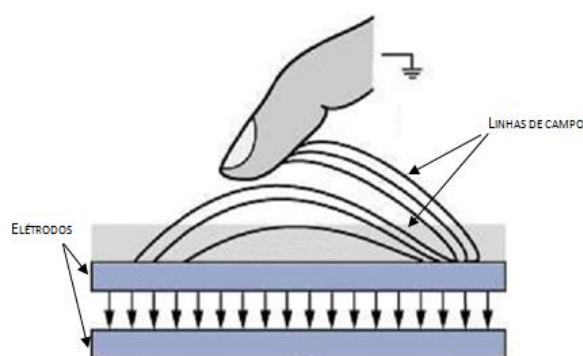


Figura 2.16 – Ilustração do efeito de um corpo exterior sobre um campo elétrico (adaptado de Otte *et al.*, s/d)

O sensor de chuva capacitivo desenvolvido por Otte *et al.* é constituído por dois condutores de cobre, paralelos e bastante finos e próximos um do outro que se encontram impressos numa PCB (elemento capacitivo), um IC conversor de variações de capacidade elétrica em sinal digital (CDC), um IC conversor de tensão e um microprocessador capaz de interpretar a informação recebida, ativar e regular a velocidade do limpa-para-brisas em caso de deteção de gotas de água e prevenir o seu funcionamento inoportuno (figura 2.17) (Otte *et al.*, s/d).

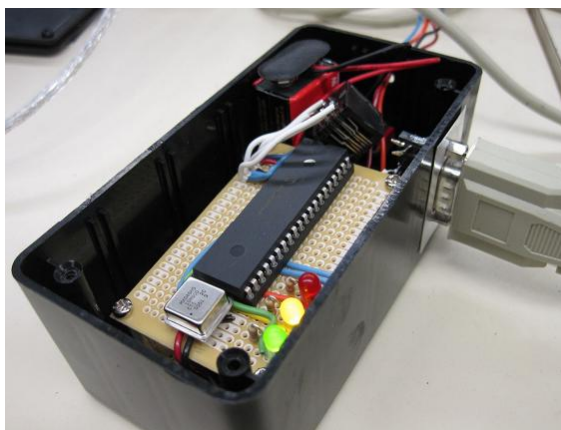


Figura 2.17 – Aspeto do protótipo funcional do sensor de chuva capacitivo (adaptado de Otte *et al.*, s/d)

Os condutores de cobre do elemento capacitivo tomam variados padrões que permitem maximizar o número de linhas de campo existentes entre os elétrodos existentes na área sensorial. O campo elétrico é obtido a partir de uma corrente elétrica com tensão alternada (AC) que é introduzida num dos condutores do elemento capacitivo (Otte *et al.*, s/d).

O elemento capacitivo tem uma capacidade na ordem entre os 5 e os 15 pF. De forma a melhorar a sensibilidade do sensor, o valor mínimo da capacidade obtida deve ser o mais reduzido possível, de modo a que esteja o mais próximo possível do valor da variação de capacidade registada aquando de uma perturbação das linhas de campo. No caso da chuva, a variação de capacidade provocada por esta varia entre os 0,1 e os 0,5 pF. A distância entre os condutores de cobre, espessura dos mesmos, padrão utilizado e área sensível foram determinados por via do programa COMSOL, tendo em conta parâmetros como a espessura de um para-brisas típico (6 a 8 mm), a sua constante dielétrica – 4,5 – e o valor máximo de capacidade desejado – 16 pF. (Otte *et al.*, s/d).

Atendendo à tensão disponibilizada pela bateria de um automóvel ligeiro típico, que se encontra entre os 11 e os 14 VDC, e à tensão de funcionamento dos IC's, que é de 5 VDC, foi necessário utilizar um IC conversor de tensão; no caso concreto do sensor de chuva capacitivo, foi utilizado o IC ADP3301-5 da Analog Devices, um conversor de tensão linear que funciona com tensões de entrada até 14 VDC e disponibiliza, à saída, 5 VDC e uma intensidade de corrente máxima de 100 mA, suficiente para alimentar todo os IC presentes no sensor (Otte *et al.*, s/d).

O CDC utilizado é um IC de arquitetura Sigma-Delta de 24 bits, mais concretamente o AD 7745 da Analog Devices. O CDC tem a função principal de monitorizar as variações de

capacidade verificadas no elemento capacitivo e converter estas num sinal digital. Para conseguir tal, é também o responsável por alimentar elétricamente o elemento sensorial. Um dos condutores de cobre do elemento sensorial está ligado a um contacto (*pin*) do CDC pelo qual é injetado um sinal de onda quadrada com uma frequência de 32 kHz e uma tensão de 5 V. O outro contacto elétrico do elemento sensorial, com potencial neutro, é ligado ao *pin* com a indicação “C_{in}” (Otte *et al.*, s/d).

O microcontrolador utilizado é o PIC18F, um controlador de 8 bits, possível de ser programado em linguagem C e munido de uma memória interna utilizável de 3,5 kB para alojamento de programas. No sensor capacitivo, o microcontrolador e o CDC dispõem de uma hierarquia de comunicação entre si do tipo mestre-súbdito (*master-slave*), isto é, o microcontrolador faz a gestão do funcionamento do CDC, definindo o seu estado de funcionamento correto, fazendo a seleção da informação referente à variação da capacidade do sensor de chuva, entre outras, e, com base na informação obtidas por via experimental sobre a capacidade do elemento capacitivo sem sofrer perturbação, o microcontrolador compara a informação recebida do CDC e, se esta estiver dentro de uma determinada gama de valores numa só amostra, fornece uma tensão de saída, compreendida numa gama de valores, para o controlador do limpa-para-brisas, ativando este (figura 2.18) (Otte *et al.*, s/d).

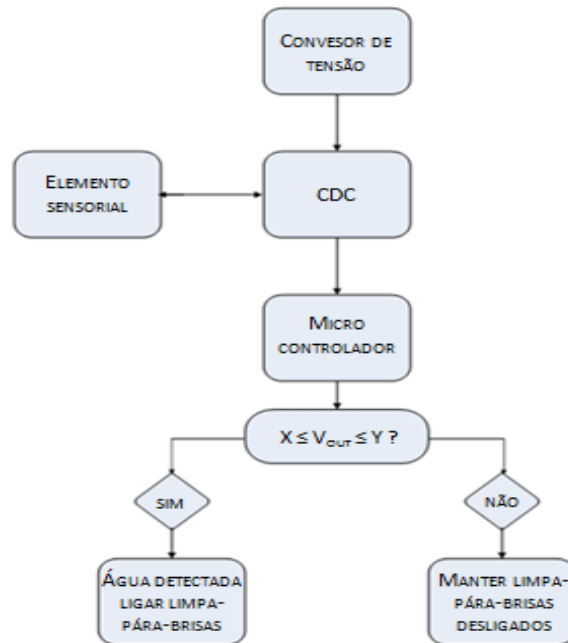


Figura 2.18 – Esquema funcional do sensor de chuva capacitivo (adaptado de Otte *et al.*, s/d)

2.4.2 SENSORES DE IMAGEM

Em 2003, Hochstein, por intermédio da Valeo Electrical Systems, patenteou dois sensores assentes sobre o princípio da captação de imagens: o sensor por diferencial de imagens e o sensor de imagens simultâneas (Hochstein, 2003a, 2003b).

O sensor por diferencial de imagens deteta a presença de água sobre a superfície exterior do para-brisas com base na comparação de imagens sucessivas captadas com recurso à iluminação pulsada da superfície interior do para-brisas, onde a presença das gotas causa uma reflexão característica e única. A subtração da informação obtida pelas 2 imagens resulta na reflexão das gotas de água sobre o vidro (Hochstein, 2003a).

O sensor por imagens simultâneas foi concebido com base na experiência obtida no desenvolvimento do sensor por diferencial de imagens e principais limitações sentidas neste, nomeadamente na rapidez de funcionamento do sensor. Em alternativa à comparação de imagens sucessivas, foi aplicada um dispositivo de captação de imagem (CCD) constituído por 2 tipos de elementos constituintes (*pixels*), onde cada tipo de *pixel* é sensível à radiação com um determinado comprimento de onda, fazendo com que o sensor consiga captar 2 imagens em simultâneo num mesmo instante (Hochstein, 2003b).

Um CCD é um dispositivo capaz de converter os fótons presentes na luz e transformá-los em eletrões. A sua construção é baseada na tecnologia CMOS e é constituído por uma matriz com milhares de fotodíodos (*pixels*) que convertem os fótons da luz incidente em eletrões, ao atraírem um eletrão livre por cada fóton incidente. Esta conversão é proporcional ao tempo de exposição a que os *pixels* estão expostos: quanto maior o período, maior o número de fótons incidente e maior o número de eletrões obtidos por cada fotodíodo (Conceitos na Tecnologia da Imagem Digital, s/d).

A matriz do CCD está sobre um substrato, ou camada, de silício, que faz o registo da tensão elétrica obtida em cada *pixel*. Este processo é realizado por meio de uma tensão elétrica aplicada, de forma sincronizada, à camada de silício, sendo a leitura feita linha a linha. A tensão elétrica de cada *pixel* é, então, conduzida para um amplificador que o converte num sinal digital em série. Quando todas as linhas de *pixels* tiverem sido lidas, a imagem é reconstituída a partir do sinal digital obtido pelo amplificador (Abramowitz e Davidson, s/d).

Sensor por diferencial de imagens

Este sensor consiste na captação de imagens sucessivas da superfície do para-brisas e sua comparação. O diferencial de imagens obtido indica a presença de água na superfície do vidro ou não. Uma fonte luminosa, constituída por um LED IV e um gerador de impulsos, ilumina o para-brisas na área ocupada pelo sensor de forma pulsada. Um CCD, cujos *pixels* dispõem de uma elevada sensibilidade à radiação IV, capta imagens da superfície exterior do para-brisas, estando munido de um filtro e uma lente convexa que permite aumentar o ângulo e o espaço visível do mesmo (figura 2.19) (Hochstein, 2003a).

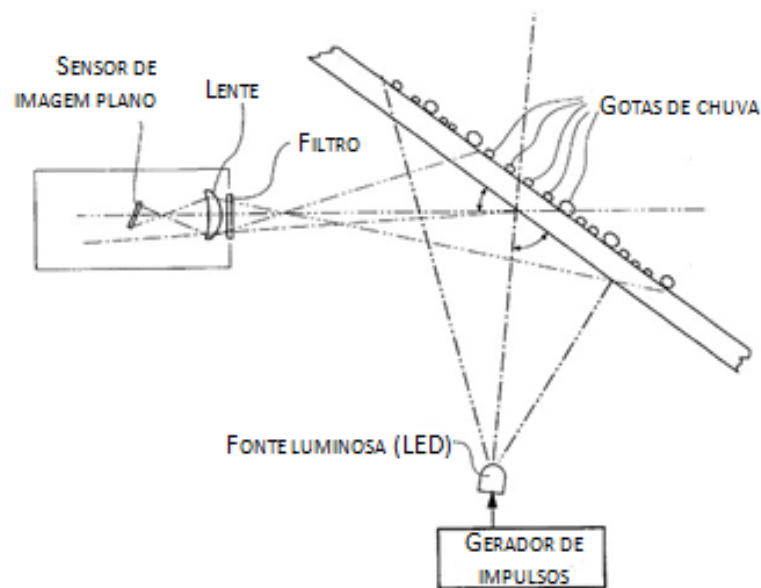


Figura 2.19 – Constituição do sensor de chuva por diferencial de imagens (adaptado de Hochstein, 2003a)

A escolha comprimento de onda da fonte luminosa e o filtro utilizados neste sensor são bastante importantes devido à interferência que poderia ser causada pela luz ambiente. A principal interferência sofrida por todos os sensores de chuva cujo funcionamento assenta na ótica, onde se incluem o sensor de chuva ótico e os sensores de captação de imagens, é a variação de intensidade luminosa existente no exterior, que pode ir dos 10^{-2} até 10^4 Lux, que pode limitar a capacidade de captação dos sensores. Outra interferência é a causada por objetos que possam emitir ou refletir um sinal luminoso de intensidade e características semelhantes às das gotas de chuva. Para minimizar estes aspeto, foi utilizado um LED cuja radiação emitida dispunha de um comprimento de onda bem definido. A experiência revelou que a utilização de um LED com um feixe luminoso com um comprimento de onda de 880 nm e um filtro ótico que permite a passagem de radiações entre os 40 e os 70

nm devolveram resultados muito satisfatórios a nível de sensibilidade. A utilização de um LED, cuja radiação emitida tem este comprimento de onda, prende-se com a reduzida transmissividade que o vidro do para-brisas apresenta para este comprimento de onda, que é de cerca de 10 % (Hochstein, 2003a).

Uma primeira imagem é captada com a luminosidade ambiente (A) e, de seguida, é obtida uma segunda com a incidência da luz IV (B), fornecida pela fonte luminosa. Ambas as imagens são guardadas e um processador de imagem vai comparar as imagens linha a linha, coluna a coluna ou mesmo pixel a pixel, dependendo do nível de sensibilidade desejada, devolvendo o diferencial das imagens B face a A (B-A). No caso da comparação pixel a pixel, a sensibilidade do sensor a fraturas no para-brisas ou outros elementos no exterior são maiores. A deteção das gotas é conseguida com uma eficiência assinalável devido à forma singular de como estas refletem a luz IV oriunda da fonte luminosa do sensor de chuva, originando os aumentos da amplitude das perturbações promovidas pelas gotas registadas na imagem B. Com base neste resultado, é gerado um sinal de controlo indicador da presença das gotas de chuva (figura 2.20). Este sinal é, de seguida, processado por um programa de controlo e um filtro para ativar o limpa-para-brisas (Hochstein, 2003a).

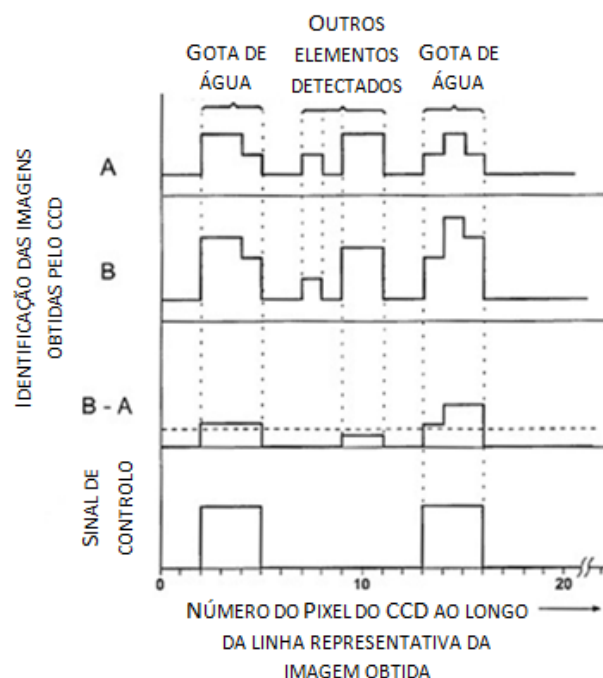


Figura 2.20 – Diagrama de funcionamento do sensor de chuva por diferencial de imagens (adaptado de Hochstein, 2003a)

Apesar da eficiência assinalada na deteção das gotas de chuva, ficou patente a necessidade de utilizar um dispositivo de captação de imagem mais eficaz, de forma a permitir que o sensor seja capaz de detetar humidade até um determinado nível e reduzir a sensibilidade do sensor às perturbações exteriores que possam ser interpretadas como presença de gotas de água na superfície do para-brisas (Hochstein, 2003a). Outra limitação do sistema prendia-se com a necessidade de não haver variação do ambiente exterior envolvente no período de captação das imagens A e B, sob pena de o sensor não funcionar (Hochstein, 2003b).

Sensor de imagens simultâneas

O sensor de imagens simultâneas pode ser encarado como uma evolução do sensor por diferencial de imagens, pois foi desenvolvido com o intuito de superar as limitações funcionais sentidas com este. A principal alteração reside no tipo de CCD utilizado que, neste sensor de chuva, é constituído por 2 tipos de *pixels*, L_1 e L_2 , cujas sensibilidades atingem os seus valores máximos na presença de radiações com comprimentos de onda distintos, e estão dispostos de forma alternada na superfície do CCD (Hochstein, 2003b).

Para além do CCD, o sensor é constituído por um LED IV, semelhante ao utilizado no sensor por diferencial de imagens, uma lente ampliadora, dois filtros do tipo passa-banda de radiação IV e os módulos de controlo de CCD e captura de imagem, de separação e armazenamento de imagens, de diferenciação, de comparação e de análise e filtragem de dados, sendo este último responsável por dar o sinal de ativar ou não o limpa-para-brisas (Hochstein, 2003b).

O seu funcionamento consiste na captação de 2 imagens em simultâneo pelo CCD a partir da ação conjunta dos *pixels* L_1 e L_2 , com a superfície iluminada de forma permanente e contínua pelo LED de radiação IV. Os *pixels* L_1 tem um pico de estimulação para radiação com comprimento de onda λ_1 e captam a imagem resultante da radiação refletida, neste comprimento de onda, pela superfície do vidro e demais elementos presentes sobre esta, iluminados pelo LED. Os *pixels* L_2 procedem de forma análoga para a radiação com comprimento de onda λ_2 que está dentro da gama de valores da luz visível (figura 2.21). Os *pixels* L_1 e L_2 estão dispostos de forma alternada sobre a superfície do CCD. Os filtros utilizados neste sensor de chuva são do tipo passa-banda para as radiações cujos comprimentos de onda estão na gama dos IV. Um dos filtros deixa passar radiações cujos

comprimentos de onda sejam com valor igual a λ_1 , enquanto o outro permite a passagem de radiação com comprimento de onda λ_2 (Hochstein, 2003b).

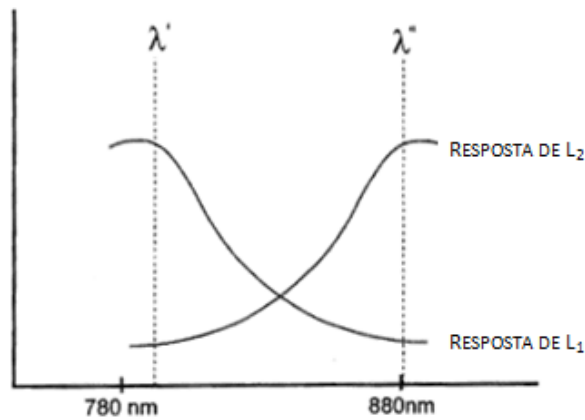


Figura 2.21 – Sensibilidade dos *pixels* L_1 e L_2 em função do valor do comprimento de onda (adaptado de Hochstein, 2003b).

Estes filtros dispõem de um padrão que pode ser em colunas, com a largura de um pixel, ou em xadrez, com quadrados da dimensão de um pixel, que permitem melhorar a definição da imagem obtida pelo CCD (figura 2.22) (Hochstein, 2003b).

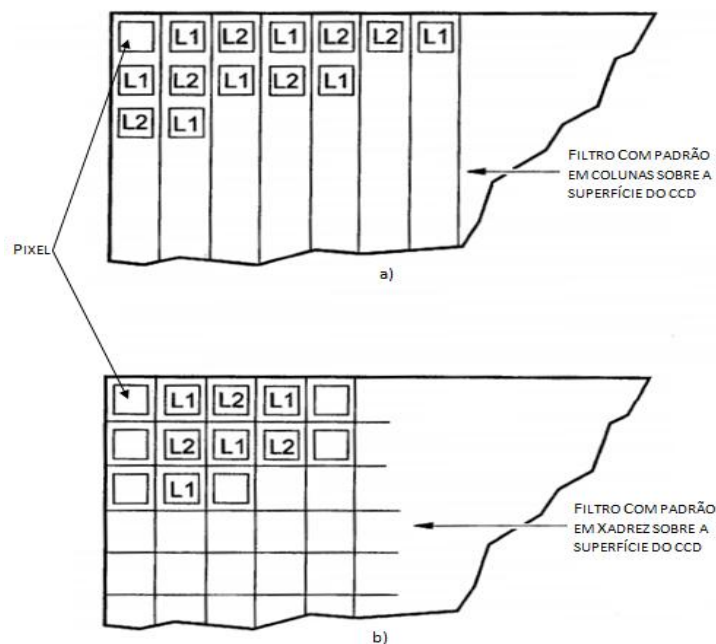


Figura 2.22 – Pormenor da constituição do CCD, com a disposição dos *pixels* L_1 e L_2 e aplicação dos filtros com padrão a) em colunas e b) em xadrez (adaptado de Hochstein, 2003b).

A lente existente no sensor tem um efeito grande ocular, aumentando o ângulo de percepção ótica do CCD e permitindo que este consiga captar uma imagem de toda a superfície do para-brisas. Depois de captadas e separadas, as imagens obtidas a partir dos *pixels* L_1 e L_2

são armazenadas no módulo de registo de imagens. Posteriormente, são processadas pelo módulo comparador diferencial de imagens, cuja função é fazer a comparação das imagens por meio da intensidade da radiação medida por cada *pixel* L_1 e L_2 existente em cada linha. Com base nesta informação, é feita a diferença entre o sinal obtido pelo *pixel* L_2 e o *pixel* L_1 consecutivo, segundo a relação $L_{2n} - L_{1(n+1)}$, onde n é igual ao índice identificador de cada *pixel* (Hochstein, 2003b).

Na figura 2.23 está retratado um exemplo de várias gotas sobre uma linha do sensor de imagem e as reações dos elementos que a constituem. As alturas das barras dos gráficos indicam a intensidade do sinal luminoso recebido por cada um dos elementos L_1 e L_2 .

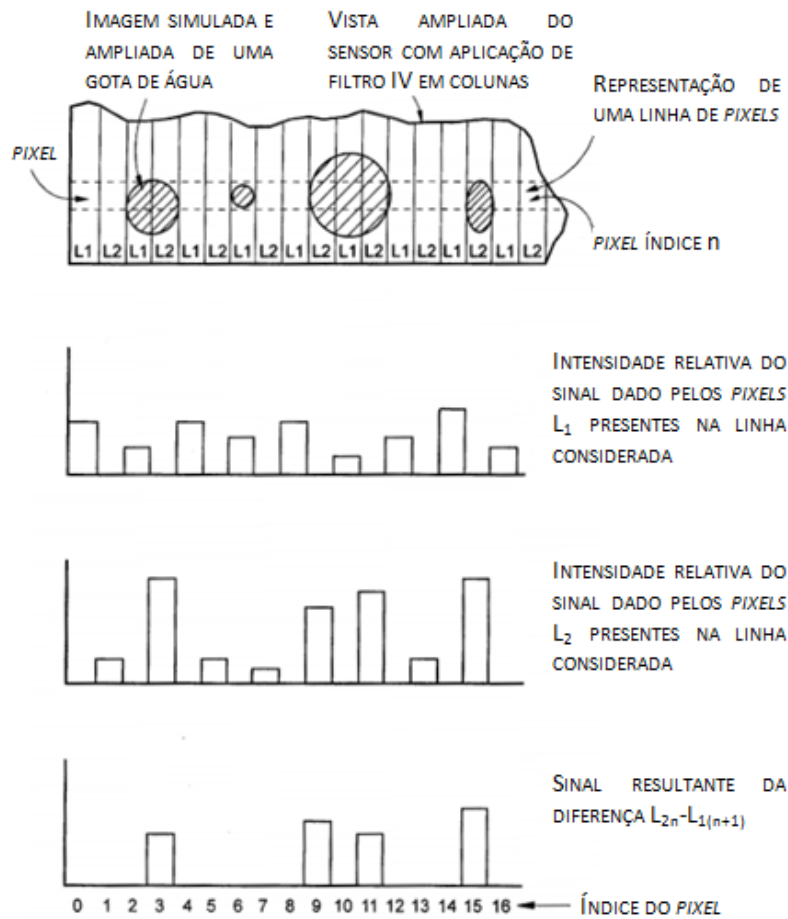


Figura 2.23 – Exemplo da resposta de uma linha do sensor à presença de gotas de água (adaptado de Hochstein, 2003b)

Este sinal resultante do diferencial entre os sinais obtidos pelos *pixels*, indicia a presença de água na superfície do para-brisas, e a sua intensidade é proporcional à quantidade de água presente na superfície do para-brisas. A diferenciação pode ser feita coluna a coluna, linha a linha ou mesmo *pixel* a *pixel* (Hochstein, 2003b).

Finalmente, o sinal diferencial entra no módulo de análise e filtragem de dados, onde a intensidade da imagem obtida é digitalmente processada, por meio de algoritmos de filtragem e de ponderação de valores médios, de forma a ser possível determinar os objetos presentes na superfície do vidro, sendo comparados com os valores de referência previamente introduzidos no sensor para vários níveis de pluviosidade: chuva ligeira, moderada ou forte, nevoeiro, neve, etc. A partir daqui, o módulo determina o sinal de saída para ativação do limpa-para-brisas e respetiva frequência de funcionamento em função da condição meteorológica verificada (Hochstein, 2003b).

Apesar dos custos relativamente baixos de vários componentes empregues neste tipo de sensor, é possível aplicar várias alterações por forma a melhorar o seu funcionamento (Hochstein, 2003b).

2.4.3 SENSOR DE ULTRASSONS

Em 1995, Saurer *et al.* patentearam um sensor de ultrassons para deteção de elementos estranhos presentes na face exterior do para-brisas, por meio da reflexão e receção de um sinal emitido (Saurer *et al.* 1995).

Este sensor é constituído por um gerador de ultrassons aplicado no para-brisas, colado na face interior da primeira camada do para-brisas, e de um circuito de comando e controlo do gerador de ultrassons, estando os dois ligados por meio de dois condutores elétricos. A película de polivinil butiral (PVB) que promove a adesão das duas camadas de vidro que constituem o para-brisas foi eliminada da área de contato do sensor, de forma a eliminar eventuais reflexões parasitas do sinal por parte do PVB. O gerador de ultrassons consiste num transdutor piezoelétrico capaz de emitir um sinal que é refletido pelos objetos presentes no exterior do para-brisas. A receção do sinal refletido por um elemento no para-brisas denuncia a presença deste. A diferença de amplitude existente entre o sinal emitido e o sinal recebido pelo transdutor varia em função da constituição do elemento detetado (Saurer *et al.*, 1995).

Relativamente ao alojamento do gerador de ultrassons, este pode ser feito de duas formas. A primeira consiste em abrir uma cavidade na segunda camada de vidro do para-brisas, que está em contacto com o interior do veículo, com uma largura e altura ligeiramente superiores à do gerador, de modo a permitir a colagem deste na face interior da primeira camada de vidro. O espaço em redor ao sensor permite que este possa vibrar sem

condicionalismos, enquanto uma cobertura de policloreto de vinil (PVC) pode ser utilizada para tapar a abertura existente na segunda camada de vidro (figura 2.24a). A segunda opção consiste na implementação do gerador de ultrassons entre as duas camadas de vidro, com a criação de um volume entre estas, fornecendo o espaço necessário para o gerador. Este é colado da mesma forma que na primeira opção de alojamento, com a utilização de um espaçador sobre o sensor, aumentando a pressão deste sobre a camada de vidro e a rigidez do para-brisas (figura 2.24b). Apesar de esta opção de alojamento do gerador de ultrassons exigir a sua implementação durante o fabrico do para-brisas, foi a que revelou ser mais eficaz na deteção de chuva, neve, humidade e lama em para-brisas com camadas de espessuras diferentes (Saurer *et al.*, 1995).

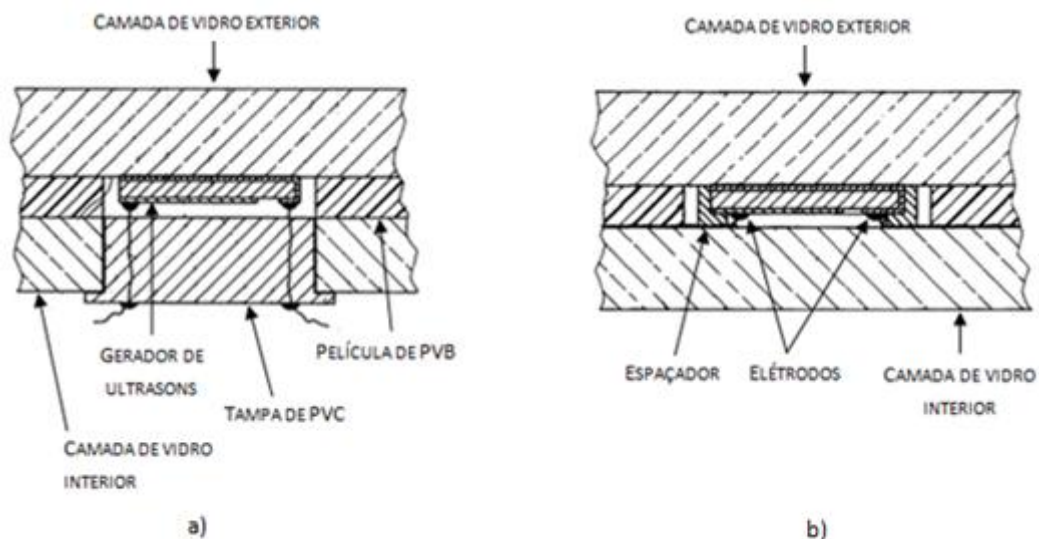


Figura 2.24 – Formas de alojamento possíveis do sensor por ultrassons no para-brisas (adaptado de Saurer *et al.*, 1995)

A solução ilustrada na figura 2.24a tem um funcionamento ideal em para-brisas cujas espessuras das camadas de vidro sejam iguais. Quando as espessuras das camadas de vidro são diferentes, a sua eficiência diminui. Neste tipo de situações, a utilização do método de implementação ilustrado na figura 2.24b torna-se mais eficaz (Saurer *et al.*, 1995).

O sinal emitido pelo transdutor possui uma frequência próxima da de ressonância da camada de vidro exterior, de modo a que amplitude do sinal emitido seja máxima e a sensibilidade do sensor otimizada. Matematicamente, a frequência do sinal emitido pelo gerador de ultrassons e a frequência de ressonância da camada de vidro relacionam-se conforme expresso na equação 9 (Saurer *et al.*, 1995).

$$f_3 = k * f \Leftrightarrow \quad (9)$$

$$\frac{c}{2 * e_1} = k * \frac{c}{\lambda}, \quad (10)$$

onde f_3 é igual à frequência de ressonância do vidro, em Hz, c é a velocidade de propagação do sinal emitido pelo gerador, em $m.s^{-1}$, e_1 igual à espessura da camada exterior de vidro do para-brisas, em m, f é a frequência do sinal ultrassônico, em Hz, λ o seu comprimento de onda, em m e k é uma constante de valor inteiro. Outro aspeto a ter em conta para não comprometer a transmissão do sinal é a espessura da camada de cola utilizada na junção do gerador de ultrassons com a camada de vidro. A experiência demonstrou que a espessura da camada de cola utilizada deve ser igual ou inferior a 0,83 % do valor de λ (Saurer *et al.*, 1995). O sinal obtido por reflexão pelo transdutor dá origem a uma tensão que é conduzida pelos elétrodos do gerador de ultrassons até ao circuito condicionador de sinal que, por seu turno, comanda o circuito controlador do limpa-para-brisas existente para proceder ao seu acionamento (Saurer *et al.*, 1995).

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Neste capítulo é feita a formulação das hipóteses levadas em conta, bem como descritos e justificados todos os passos dados, tipos de ensaios realizados e equipamentos utilizados.

Atendendo à extensão do procedimento experimental e às diferenças significativas entre os ensaios realizados no laboratório e no veículo, foi necessário dividi-lo em duas partes:

- Parte I – Ensaio em laboratório
- Parte II – Ensaio no veículo

Os objectivos da primeira parte dos ensaios foram conhecer o comportamento do sensor, determinar a gama máxima de valores de tensão dados pelo sensor instalado em superfícies, cujas características se assemelham às das existentes e utilizadas no veículo, submetidas à simulação do tipo de precipitação com maior valor de energia cinética. Outro dos objetivos foi o de conceber e dimensionar o CCS a utilizar durante os ensaios no laboratório e no veículo.

Na segunda parte, os objetivos consistiram em determinar se o sensor é ou não capaz de detetar os estímulos oriundos do impacto da precipitação sobre a superfície, concluir qual a localização que oferece as melhores condições para detetar o impacto da água, determinação da dimensão das gotas perceptíveis pelo sensor e verificar a influência dos elementos indutores de erro na mensuranda, nomeadamente a vibração do motor térmico do veículo e o campo eletromagnético gerado pela bobina de ignição do mesmo.

3.1 HIPÓTESES CONSIDERADAS

A realização da atividade experimental foi baseada em 3 hipóteses formuladas, fundamentadas na informação recolhida durante o levantamento do estado da arte. As hipóteses formuladas são as seguintes:

- Tipos de pluviosidade, quanto ao estado físico, considerados;
- Localização do sensor que oferece as melhores condições de deteção da pluviosidade;
- Fatores exteriores indutores de erro na mensuranda.

3.1.1 TIPOS DE PLUVIOSIDADE CONSIDERADOS

A precipitação define-se como a deposição de água sobre a superfície terrestre, proveniente da atmosfera e apresentando-se no estado líquido ou sólido (Retallack, 1981 a e World Meteorological Organization, 1966, conforme citado em Instituto Nacional de Meteorologia e Geofísica [INMG], 1984). O granizo é exemplo da precipitação em estado sólido, constituída por estruturas granulares que, quando acumuladas, podem atingir dimensões próximas de uma bola de ténis (INMG, 1984).

Salmi *et al.* (s/d) determinaram 8 classes dimensionais para as gotas de chuva, cujos diâmetros nominais estão compreendidos entre 1 e 5 mm. No caso do granizo, os resultados obtidos da observação de várias quedas de granizo permitiram determinar 6 classes dimensionais, cujos diâmetros do granizo se encontram entre 7 e 27 mm (Hohl, 2001). Medições de granizo realizadas na Suíça entre 1976 e 1983 permitiram concluir que existe uma relação entre o diâmetro apresentado pelos grãos de granizo e a energia cinética por unidade de área apresentada (figura 3.1) (Schiesser, 1988 citado em Hohl, 2001).

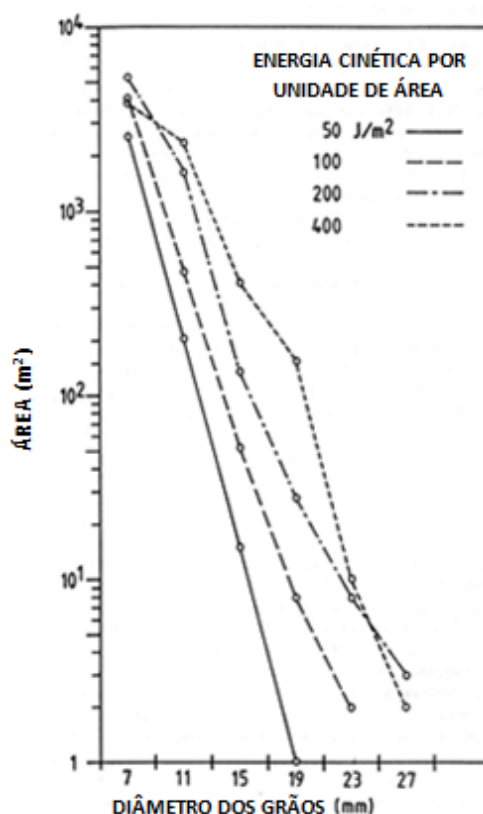


Figura 3.1 – Relação entre diâmetro apresentado pelos grãos de granizo e energia cinética por unidade de área (adaptado de Hohl, 2001)

Estes aspetos permitiram definir o granizo como sendo o tipo de pluviosidade com maior nível energético e a base para o modelo utilizado nos ensaios em laboratório e a precipitação líquida o modelo a utilizar nos ensaios no veículo. O modelo utilizado para a simulação de granizo está descrito na seção 3.6 e os métodos de cálculo da intensidade e simulação de pluviosidade simulada no veículo são descritos na seção 3.9.

3.1.2 LOCALIZAÇÃO DO SENSOR

Uma gota de chuva ao incidir numa superfície dispõe, nesse instante, de um determinado momento linear, resultante do produto da massa da gota pela sua velocidade. Tendo em conta o facto de a queda de chuva tomar uma trajetória vertical, o seu momento linear total é dado pelo produto expresso na equação 11 (Salmi e Ikonen, s/d):

$$p_v = m * v_v , \quad (11)$$

onde p_v , m e v_v são, respetivamente, o momento linear vertical, em J, a massa, em kg, e a velocidade vertical da gota de água, em $m.s^{-1}$.

A ação do vento tem influência na trajetória e valor da velocidade de incidência da precipitação sobre uma superfície, sendo a sua velocidade composta também por uma componente vertical e outra horizontal. No entanto, a ação da componente vertical da velocidade do vento sobre a da chuva é negligenciável, de acordo com Joss e Waldvogel (1977). Assim, a ação do vento sobre a gota de chuva dá-se por ação da componente horizontal da sua velocidade sobre a gota de chuva, originando o momento linear expresso na equação 12 (Salmi e Ikonen, s/d).

$$p_h = m * v_{wh} , \quad (12)$$

Com p_h e v_{wh} sendo, respetivamente, o momento linear obtido pela gota de água, em J, e o valor da componente horizontal da velocidade do vento, em $m.s^{-1}$. A componente horizontal do vento provoca alterações na trajetória da chuva, tornando-a oblíqua, e o momento linear resultante desta mesma componente de velocidade promove uma redução do momento linear obtido da componente vertical da velocidade da gota de água. De forma a compensar este aspeto, a superfície de instalação do sensor deve ser também inclinada, de modo a que seja possível medir parte do impacto causado pelo momento linear obtido a partir de v_{wh} (Salmi e Ikonen, s/d).

Atendendo ao facto de que os ensaios no veículo foram realizados no exterior e apenas foi possível simular precipitação que incidia de forma oblíqua sobre a superfície, tornou-se necessário a colocação do sensor em superfícies oblíquas, de modo a permitir a uma melhor perceção das vibrações resultantes do momento linear total detido pelas gotas de chuva incidentes. Por outro lado, e atendendo a que se trata de um sensor piezoelétrico para deteção de pluviosidade, é necessário instalar o sensor em superfícies onde a incidência desta é maior durante o deslocamento do veículo, nomeadamente o para-brisas, o capô ou o tejadilho do veículo. No caso da instalação do sensor na superfície do para-brisas, é preferível a sua implementação sobre o eixo bissetor vertical do para-brisas, ainda que outros pontos deste também sejam possíveis para a medição das vibrações causadas pela precipitação (Pankey *et al.*, 2005).

Devido ao facto de o veículo utilizado para a realização dos ensaios dispor de tejadilho em lona, não foi colocada a hipótese de instalar o sensor nesta superfície. Este aspeto é relevante, ao levar em conta a eventual aplicabilidade da solução estudada em veículos automóveis descapotáveis ou equipados com tejadilhos amovíveis (*targa*). Assim, foram definidas as seguintes localizações para implementação do sensor no veículo:

- Eixo bissetor da face interior do para-brisas do veículo;
- Face interior do capô do veículo.

3.1.3 FATORES EXTERIORES INDUTORES DE ERROS NA MENSURANDA

Outros aspetos a ter em conta na experimentação são os fatores exteriores indutores de erro. Devido à natureza capacitiva dos sensores piezoelétricos, estes são bastante sensíveis a interferências de origem eletromagnética (EMI). Apesar do sensor estar preparado para ser imune a campos elétricos até $75 \text{ V} \cdot \mu\text{m}^{-1}$, o ponto de conexão dos fios com os seus contactos elétricos é um ponto crítico face a estas perturbações (Measurement Specialties, 1999). Devido à reversibilidade do fenómeno piezoelétrico, a exposição do sensor piezoelétrico a um campo elétrico exterior vai provocar uma deformação mecânica em si (Gautschy, 2002).

Tendo em conta a elevada sensibilidade do filme piezoelétrico ao funcionar como conversor mecânico-elétrico, a presença de vibrações será bastante perceptível. A reduzida espessura do filme piezoelétrico faz com que a área percorrida pelas forças atuantes seja também ela reduzida, dando origem a pressões de elevado valor causadas pela ação de

força de valor reduzido (Measurement Specialties, 1999). A instalação do sensor na superfície interior do capô do veículo faz com que este esteja sujeito às vibrações acústicas emitidas pelo motor térmico, durante o seu funcionamento, ou mesmo as que são transmitidas à superfície do capô, promovendo o surgimento de ruído elétrico consequente da transformação mecânico-elétrica.

O filme piezoelétrico também dispõe de uma assinalável capacidade de conversão piroelétrica para radiações com comprimentos de onda compreendidos entre os 7 e os 20 μm , correspondentes à radiação térmica emitida, por exemplo, pelo corpo humano. Na concepção de sistemas de conversão mecânico-elétrica, a sensibilidade do sensor é especialmente elevada em frequências muito baixas – até 1 Hz (Measurement Specialties, 1999).

Dada a sensibilidade apresentada pelos sensores piezoelétricos, foram tidas em conta as perturbações em baixo enumeradas:

- Interferências causadas por radiação eletromagnética;
- Interferências causadas por vibração consequente do funcionamento do motor térmico;
- Interferências causadas por variações da temperatura exterior.

De forma a minimizar o ruído elétrico provocado pela tensão resultante da conversão piroelétrica, sem comprometer a sensibilidade do sensor na conversão mecânico-elétrica, é importante definir a frequência mínima de corte para um valor igual a 1 Hz. Este aspeto será descrito com maior detalhe na seção 3.2.3.

3.2 CARACTERIZAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

3.2.1 CARACTERIZAÇÃO DO SENSOR PIEZOELÉTRICO

O sensor piezoelétrico utilizado para a medição e deteção das gotas de chuva é do tipo fita flexível, cujo elemento piezoelétrico é constituído pelo polímero poli (fluoreto de vinilideno) (PVDF), comercializado com a designação DT1-028K pela Measurement Specialties. É constituído por uma camada de polímero piezoelétrico, com uma área sensível de dimensões 30 mm por 12 mm. Esta área sensível está coberta com uma tinta de prata, com propriedades condutoras de eletricidade e que tomam o papel de eléctrodos do sensor. Sobre esta estão mais duas camadas, uma de um elemento transmissor de esforço

mecânico fabricado em politereflalato de etileno (PET) e outra de um material plástico protetor. (figura 3.2) (Measurement Specialties, 1999).

É adequado para este tipo de aplicação a utilização de sensores piezoelétricos, do tipo fita flexível, com uma sensibilidade de cerca de 5 mV.g^{-1} e cuja gama de frequências de funcionamento esteja compreendida entre os 10^{-2} e 10^9 Hz (Pankey *et al.*, 2005).

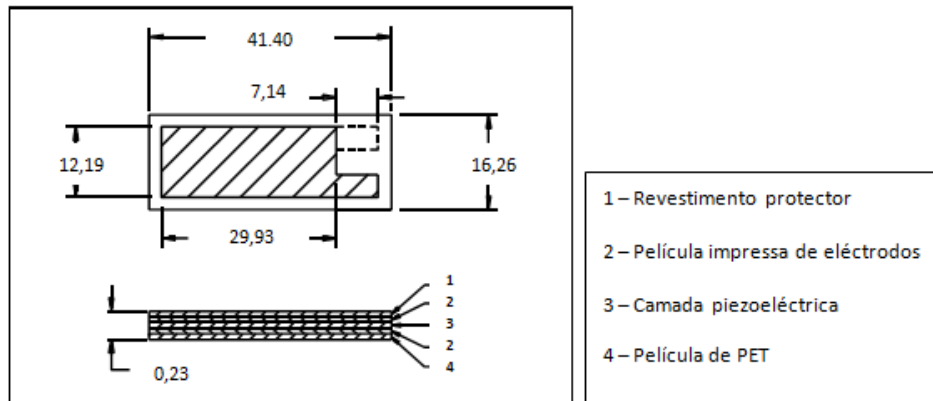


Figura 3.2 – Dimensões e camadas constituintes do sensor piezoelétrico DT1, em mm (adaptado de Measurement Specialties, 1999)

O sensor utilizado dispõe das características abaixo listadas:

- Elevada flexibilidade dos materiais constituintes;
- Baixo peso;
- Grande capacidade de moldação a superfícies e de adesão às mesmas por meio de colas ou adesivos comuns;
- Ampla gama de frequências de funcionamento – dos 0,01 até aos 10^9 Hz;
- Ampla gama de pressões dinâmicas – dos 10^{-8} até aos 10^6 Pa;
- Grande resistência dielétrica, suportando campos até $75 \text{ V.}\mu\text{m}^{-1}$;
- Elevada resistência mecânica, suportando impactos até 10^{10} Pa;
- Alta resistência à exposição às radiações UV;
- Elevada impermeabilidade à humidade ($< 0,02\%$ de absorção).

A tabela 3.1 apresenta as características do material piezoelétrico com o qual o sensor é fabricado.

Símbolo	Parâmetro	PVDF	Unidades
t	Espessura	9, 28, 52 ou 110	μm (micron, 10^{-6})
d_{31}	Constante de deformação piezo	23	$10^{-12} \frac{\text{m.m}^{-1}}{\text{V.m}^{-1}} \text{ ou } \frac{\text{C.m}^{-2}}{\text{N.m}^{-2}}$
d_{33}		-33	
g_{31}	Constante de tensão piezo	216	$10^{-3} \frac{\text{V.m}^{-1}}{\text{N.m}^2} \text{ ou } \frac{\text{m.m}^{-1}}{\text{C.m}^{-2}}$
g_{33}		-330	
k_{31}	Fator de acoplamento eletromecânico	12%	
k_t		14%	
C	Capacidade	380 para 28 μm de espessura	pF.cm ² a 1 kHz
Y	Módulo de Young	2 – 4	10^9 N.m^{-2}
V_0	Velocidade do som	Esticado	1,5
		Espessura	2,2
p	Coeficiente piroelétrico	30	C
ϵ	Permitividade	106 – 113	$10^{-12} \text{ F.m}^{-1}$
ϵ/ϵ_0	Permitividade relativa	12 – 13	
ρ_m	Densidade mássica	1,78	10^3 kg.m^{-3}
ρ_e	Resistividade volúmica	$>10^{13}$	Ohm.metros
R	Resistividade de superfície metalizada	<3	Ohm/quadrado unitário para NiAl
		0,1	Ohm/quadrado unitário para tinta prata
$\tan \delta_e$	Perda tangencial (?)	0,02	A 1 kHz
	Tensão normal de escoamento	45 – 55	10^6 N.m^{-2} (segundo a direção da deformação)
	Gama de temperaturas	-40 a 80 – 100	°C
	Absortividade de água	<0,02	% H ₂ O
	Tensão elétrica máxima de funcionamento	750 (30)	V.mm^{-1} ($\text{V.}\mu\text{m}^{-1}$), DC, a 25 °C
	Tensão elétrica de quebra	2000 (80)	V.mm^{-1} ($\text{V.}\mu\text{m}^{-1}$), DC, a 25 °C

Tabela 3.1 – Principais características do sensor piezoelétrico DT1 (adaptado de Measurement Specialties, 1999)

3.2.2 CARACTERIZAÇÃO DA PLACA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

De forma a visualizar os dados adquiridos pelo sensor, foi utilizada uma placa de aquisição de dados (DAQ), que permite a visualização e registo do sinal obtido do sensor piezoelétrico num computador pessoal (PC).

A DAQ utilizada é da marca National Instruments, modelo USB-6008, dotado de 4 ou 8 entradas analógicas, dependendo se estiver a operar em modo diferencial ou em modo de entrada simples referenciada (RSE), respetivamente. No primeiro modo de operação, a placa permite uma resolução de 12 bits, enquanto no modo RSE este valor passa para 11 bits. Em ambos, a frequência máxima de amostragem é de 10000 amostras por segundo. A DAQ também dispõe de 2 portas digitais, uma com 7 canais e outro com 3 canais, que não foram utilizados nesta atividade experimental (figura 3.3). A transferência da informação

obtida para o computador é feita por via de uma porta de dados série (USB) (National Instruments Corporation, 2012).

A obtenção do sinal do sensor piezoelétrico foi feita mediante as entradas analógicas configuradas no modo diferencial. Para além da maior resolução, este modo é o mais adequado para sinais oriundos de elementos sensoriais ou circuitos de condicionamento de sinal cujo potencial neutro não é comum ao da DAQ (National Instruments Corporation, 2012). Esta situação é verificada no sensor piezoelétrico utilizado e respetivo CCS utilizado.

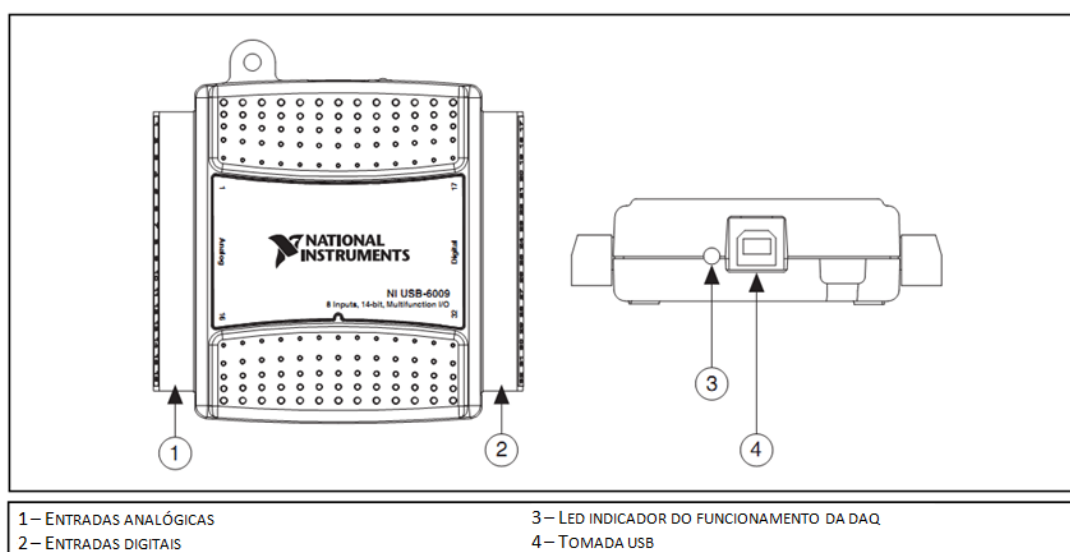


Figura 3.3 – Vistas de topo e lateral da DAQ e respetivas ligações elétricas (adaptado de National Instruments Corporation, 2012)

3.2.3 CARACTERIZAÇÃO DO CCS E CABO DE LIGAÇÃO UTILIZADOS

Os valores de tensão obtidos diretamente do sensor piezoelétrico, resultantes do estímulo provocado pelo impacto da chuva na superfície onde está instalado, estão compreendidos na gama dos mV (Pankey *et al.* 2005).

O dimensionamento correto do CCS é importante para evitar elevados níveis de ruído elétrico, reduzida largura de banda do sinal obtido e, em alguns casos, instabilidade do sinal (Moheimani e Flaming, 2006). No dimensionamento de um circuito condicionador de sinal para um sensor piezoelétrico é importante ter em conta os seguintes aspetos:

- Gama de frequências;
- Amplitude do sinal obtido;

- Cálculo de uma resistência de carga (R) de modo a reduzir o valor da frequência de corte (f_c) do sensor e minimizar as perdas de sinal devido ao efeito de carga elétrica do sensor (*loading effect*);
- Utilização de circuitos *buffer* no caso da gama de valores de tensão obtida pelo sensor ser muito pequena. Se R tomar valores superiores a 22 M Ω , é recomendável a utilização deste tipo de circuitos (Measurement Specialties, 1999).

O CCS escolhido foi um amplificador de tensão não-inversor baseado no amplificador operacional (ampop) 741C, da ST Microelectronics, com a aplicação de R em paralelo com o sensor. Os ampop fazem parte do lote de IC adequados para serem utilizados na conceção de um CCS para este sensor piezoelétrico (Measurement Specialties, 1999). Face à alternativa de ter um CCS baseado num amplificador de carga, os amplificadores de tensão apresentam a vantagem de serem muito menos sensíveis a variações de temperatura, o que é uma vantagem apelativa para a aplicação e os ensaios a realizar, onde a temperatura não será constante (Measurement Specialties, 1999). O valor do ganho obtido no CCS é definido pelos valores das resistências R_1 e R_2 utilizadas (figura 3.4) (Nielson e Riedel, 1996).

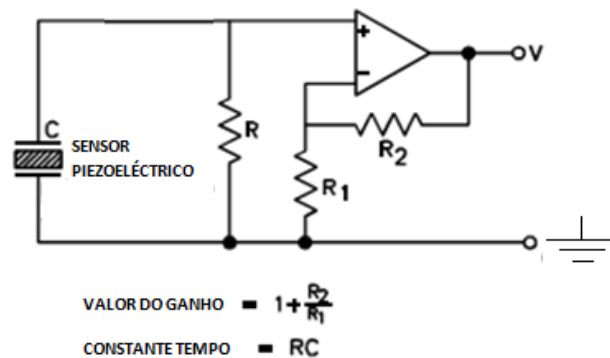


Figura 3.4 – Esquema de circuito amplificador não-inversor (adaptado de Measurement Specialties, 1999)

Devido ao facto de que a DAQ só permite tensões, nas suas entradas analógicas, com valores compreendidos entre -10 e 10 V (National Instruments, 2012) e por forma a garantir que um pico de estímulo não originasse uma tensão de valor superior e causasse danos na DAQ, a alimentação do ampop foi feita com uma tensão de $+10$ V na entrada de alimentação positiva e de -10 V na entrada de alimentação negativa, com recurso a uma fonte de alimentação estabilizada. A tabela 3.2 mostra os valores de tensão de entrada e de alimentação do ampop utilizado, o 741C da ST Microelectronics.

Símbolo	Parâmetro	UA741M	UA741I	UA741C	Unidade
V_{cc}	Tensão de alimentação	±22			V
V_{id}	Tensão de entrada diferencial	±30			V
V_i	Tensão de entrada	±15			V
P_{tot}	Potência dissipada	500			mW
	Duração do curto-circuito à saída	Infinito			
T_{oper}	Gama de temperaturas de operação ao ar livre	-55 a +125	-40 a +105	0 a +70	°C
T_{stg}	Gama de temperaturas de armazenamento	-65 a +150			°C

Tabela 3.2 – Parâmetros operacionais do ampop 741 (adaptado de ST Microelectronics, 2001)

Na ligação entre o sensor e o CCS foi utilizado um cabo coaxial blindado. Estes, apesar de apresentarem vantagens na redução do ruído, têm a desvantagem de contribuírem para o aumento do valor de C e eventuais perdas de sinal. A utilização de cabos cujo isolamento seja de polietileno de elevada pureza ou de Teflon permite minimizar estas duas últimas desvantagens (Measurement Specialties, 1999).

O valor de f_c do sensor piezoelétrico é determinado em função do valor de R e do valor da capacidade elétrica apresentada pelo conjunto composto pelo sensor e o cabo (C). A figura 3.5 mostra o comportamento do sensor em função do valor da frequência do sinal elétrico gerado. A amplitude do sinal com frequência f_c sofre uma atenuação de -3 dB, correspondendo a 70,7 % do seu valor total, ao passo que um sinal com 0 dB de atenuação, e cuja frequência tenha um valor bastante superior ao de f_c , toma a totalidade do valor da sua amplitude (Measurement Specialties, 1999).

O valor da capacidade do conjunto sensor e cabo foi medido por meio de um multímetro. O valor obtido foi de 1,32 nF.

Conforme referido na secção 3.1, o sensor piezoelétrico é especialmente sensível a radiações cuja frequência se encontre na gama entre os 0,01 e 1 Hz. Por outro lado, a gama de frequências típicas de um sensor piezoelétrico que seja utilizado no controlo de vibrações em estruturas está compreendida entre 1 e 1000 Hz (Moheimani e Flaming, 2006). Assim, o valor de f_c ficou definido em 1 Hz, cuja amplitude do sinal neste valor de frequência sofre uma atenuação de -3 dB (Measurement Specialties, 1999). Sabendo os valores de f_c e C, o valor de R é determinado por meio da equação 13.

$$f_c = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C} \Leftrightarrow \quad (13)$$

$$R = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_c \cdot C} \Leftrightarrow \quad (14)$$

$$R = 120571926,58 \, \Omega \approx 121 \, \text{M}\Omega \quad (15)$$

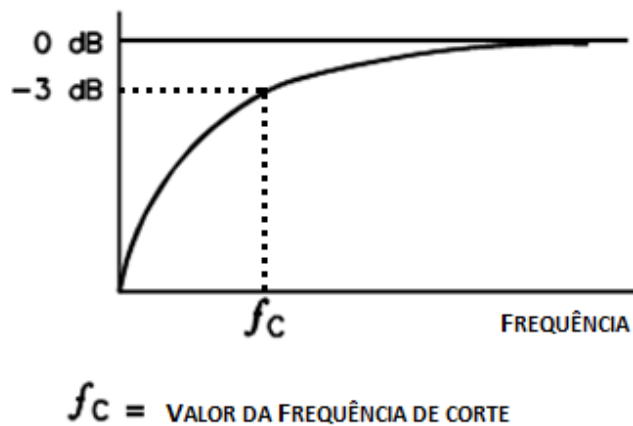


Figura 3.5 – Comportamento do sensor piezoelétrico em função do valor da frequência do sinal (adaptado de Measurement Specialties, 1999).

3.3 PROGRAMAS INFORMÁTICOS UTILIZADOS

Para proceder à recolha, visualização e tratamento dos dados obtidos da actividade experimental, foram utilizados os seguintes programas informáticos:

- LabView 2011[®], da National Instruments[®];
- Matlab R2011a[®], da MathWorks[®];
- Microsoft Excel[®] 2007;
- Signal Express[®] for DAQ, da National Instruments[®].

As secções 3.3.1 a 3.3.4 descrevem as funções desempenhadas por cada programa na realização dos ensaios.

3.3.1 LABVIEW 2011[®]

Para a criação e aplicação de filtros sobre o sinal obtido, foi utilizado o LabView2011[®], da National Instruments[®]. Devido às diferentes vibrações que ocorrem em cada uma das localizações utilizadas para o sensor, torna-se necessária a utilização de filtros, em adição ao CCS utilizado (Pankey *et al.*, 2005).

Cada tipo de filtro tem a sua característica de destaque: os Butterworth são os que promovem uma maior estabilidade do valor de passagem num filtro passa-banda, os Chebyshev aqueles que apresentam a queda mais íngreme na banda de transição, à exceção dos filtros elípticos que são mais eficazes neste ponto mas muito mais complexos de serem realizados (Augusto, 2011). Em todos os ensaios em que foi necessária a aplicação de filtros, todos estes foram do tipo passa-banda, com alguns casos a exigir um filtro com uma banda de passagem de apenas 10 Hz, daí esta característica de Chebyshev o tornar o mais interessante, associada a uma maior simplicidade. A opção de um filtro elíptico também seria possível mas numa futura implementação física de um filtro, esta tornar-se-ia mais complexa e elaborada (Augusto, 2011).

Outra característica do filtro Chebyshev prende-se com a amplitude de ondulação na banda de passagem. Esta tem um valor constante mas aumenta o número de flutuações existentes em função do valor da ordem do filtro. Quanto maior a ordem, mais ondulações ocorrem. Estas ondulações também promovem variações na amplitude do sinal com valor igual à da amplitude máxima da ondulação; se o número de ordem do filtro for ímpar, provoca redução na amplitude no sinal, se for par, provoca um aumento deste (Augusto, 2011).

Para este trabalho experimental, foi aplicado um filtro Chebyshev, do tipo I e passa-banda, por via de software e a juzante do CCS.

A figura 3.6a ilustra o comportamento de um filtro Chebyshev do tipo passa-banda e a figura 3.6b mostra as atenuações da amplitude de sinal verificadas junto às frequências limite da banda passante num filtro Chebyshev, em função da sua ordem.

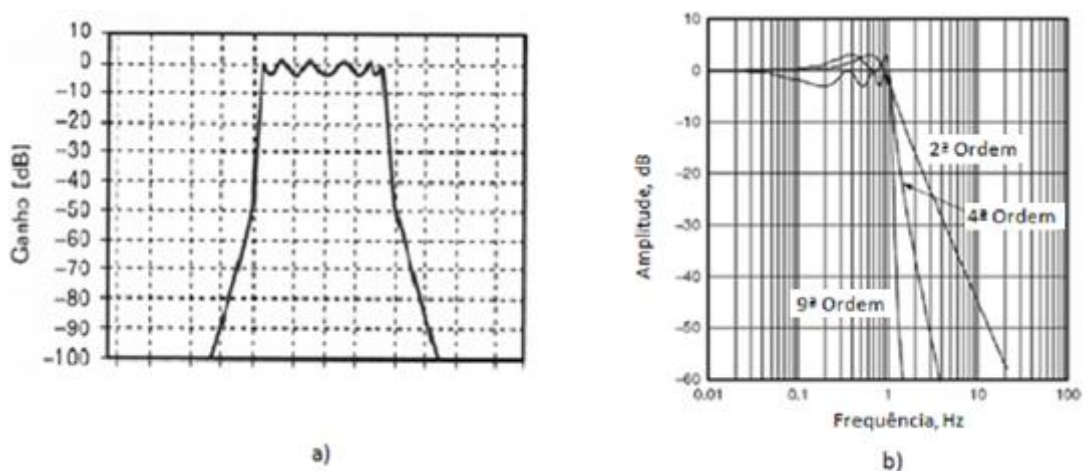


Figura 3.6 – a) ilustração do comportamento de um filtro Chebyshev tipo I passa-banda e b) diagrama de Bode com as atenuações sofridas pelo sinal nas frequências limite da banda passante em função da ordem do filtro (adaptado de Augusto, 2011)

Observando o diagrama anterior, é possível constatar que um filtro Chebyshev de 9ª ordem já oferece uma grande atenuação, -60 dB, numa banda de transição que não chega a 1 Hz. Por outro lado, não é conveniente ter uma atenuação de sinal na banda de passagem, o que acontece nas ordens ímpares. Assim, a utilização de um filtro de 10ª ordem oferece, por um lado, uma estreita banda de transição associada a um ligeiro aumento da amplitude do sinal (Augusto, 2011). Dos vários tipos de filtros apresentados pelo programa, foi escolhido o filtro do tipo passa-banda Chebyshev de 10ª ordem, em todas as situações em que foi necessário filtrar o sinal.

3.3.2 MATLAB R2011A®

Este programa foi utilizado para determinar as componentes de frequência do sinal adquirido, distinguir quais as correspondentes ao sinal resultante do estímulo da chuva e, assim, obter a gama de frequências a aplicar nos filtros anteriormente definidos. As componentes do sinal são obtidas por via da transformada rápida de Fourier (FFT) do sinal obtido.

3.3.3 MICROSOFT EXCEL 2007®

O programa da Microsoft foi a ferramenta escolhida para registo dos valores dos gráficos obtidos a partir do Signal Express for DAQ, que ficaram registados sob a forma de 2 colunas, uma com os valores dos instantes decorridos e a outra com os valores das tensões obtidas nos respetivos instantes. Para além desta, o programa foi também utilizado para fazer o tratamento estatístico da informação recolhida, com o cálculo dos valores da média e desvio padrão dos valores de tensão obtidos do sensor, realização de gráficos e calcular a distribuição dimensional das gotas em função da intensidade de pluviosidade simulada no veículo.

3.3.4 SIGNAL EXPRESS® FOR DAQ

A aquisição, visualização e registo do sinal fornecido pela DAQ foi efetuada por via do programa Signal Express for DAQ da National Instruments. Para além das funções anteriormente referidas, o programa permitiu parametrizar a DAQ no que respeita à porta de entrada utilizada, modo de ligação efetuado (diferencial) e gama de valores da tensão do sinal recebido. A figura 3.7 ilustra o aspeto de um sinal recebido da DAQ e visualizado no programa em questão.

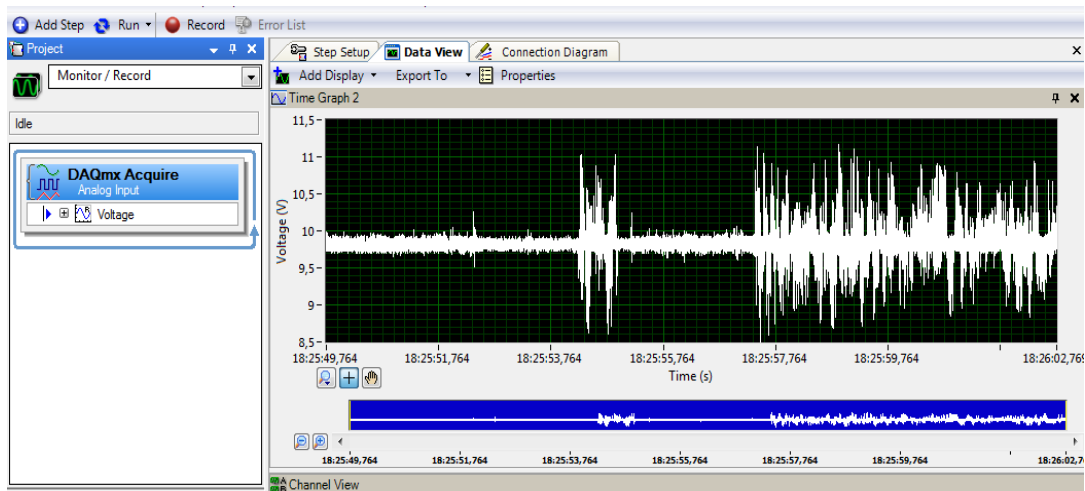


Figura 3.7 – Exemplo de sinal adquirido pela DAQ e visualizado no Signal Express for DAQ.

O programa permite a exportação dos gráficos obtidos para ficheiros .xls, compatíveis com o Microsoft Excel 2007 e sob a forma de colunas, que permite realizar o tratamento estatístico dos valores de erro obtidos nas medições e aplicação de filtros sobre os mesmos.

PARTE I – ENSAIOS EM LABORATÓRIO

3.4 DESCRIÇÃO DAS SUPERFÍCIES DE ENSAIO

As superfícies utilizadas nos ensaios em laboratório foram escolhidas segundo as características físicas apresentadas, próximas das apresentadas pelas localizações definidas no automóvel, de modo a que os resultados obtidos nos ensaios estivessem o mais próximo possível da realidade existente na parte II dos ensaios.

A estrutura metálica utilizada, para simulação do capô, é uma antiga porta do veículo utilizado constituída por 2 peças de chapa de aço com uma espessura de 0,7 mm, onde uma constitui o painel exterior e a outra a estrutura interior da porta. As extremidades periféricas das peças estão unidas por dobra e as extremidades interiores da estrutura interior da porta estão coladas à face interior do painel da porta¹. (figura 3.8).

¹ Apesar de o capô ser constituído por uma só folha de chapa, a sua forma encurvada e os vincos que dispõe ao longo do seu comprimento proporcionam-lhe uma resistência à flexão comparável à da porta. Este aspeto foi comprovado empiricamente.



Figura 3.8 – Porta utilizada nos ensaios laboratoriais, com marcação do local onde o sensor ficou instalado

No caso do para-brisas, os existentes nos veículos são laminados, ou seja, são constituídos por 2 ou 3 camadas de vidro, intercaladas com películas de PET aderente. Para a realização dos ensaios em laboratório, foi utilizado um para-brisas plano, de 6 mm de espessura oriundo de um veículo semelhante ao utilizado na parte II dos ensaios (figura 3.9).



Figura 3.9 – Para-brisas apoiado em 4 pontos e sensor piezo elétrico instalado

3.5 COLOCAÇÃO DO SENSOR NAS SUPERFÍCIES

Em cada uma das superfícies de ensaio foi colocado um sensor em posição central da face oposta àquela em que é dado o estímulo, com o centro geométrico do sensor piezoelétrico coincidente com a interseção das bissetrizes do para-brisas. Esta disposição é a que permite, por um lado, a melhor captação dos estímulos aplicados sobre a superfície e, por outro lado, preservar a integridade do próprio sensor (Pankey *et al.*, 2005).

Em ambos os casos, foi utilizada, numa primeira fase, fita-cola larga para a fixação do sensor à superfície (Figuras 3.10 e 3.11).

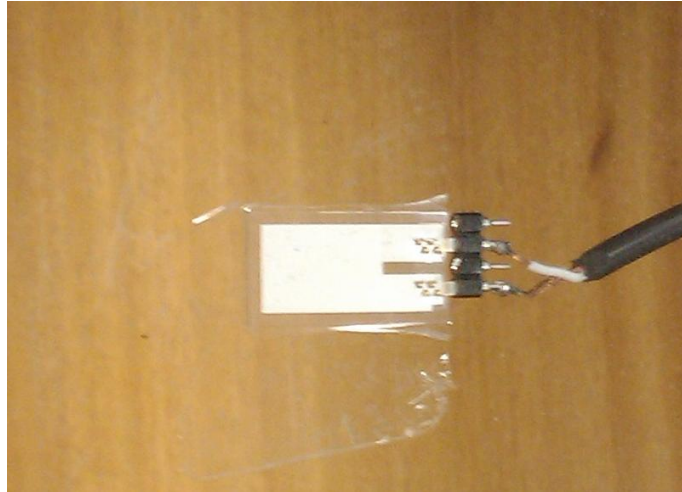


Figura 3.10 – Fixação do sensor na superfície do para-brisas.



Figura 3.11 – Superfície metálica devidamente colocada com marca da localização do sensor.

3.6 MODELO E METODOLOGIA SEGUIDOS PARA A SIMULAÇÃO DE GRANIZO

A simulação de granizo em laboratório exigiu a criação de um modelo que simulasse o impacto deste tipo de precipitação sobre a superfície de ensaio. O primeiro passo tomado foi determinar o valor da energia cinética registado durante uma queda de granizo severa. A figura 3.12 mostra o gráfico com os valores da energia cinética por unidade de área detida pelo granizo no momento do impacto sobre a superfície e o número de grãos contabilizados no decorrer de precipitações ocorridas num espaço de 15 dias.

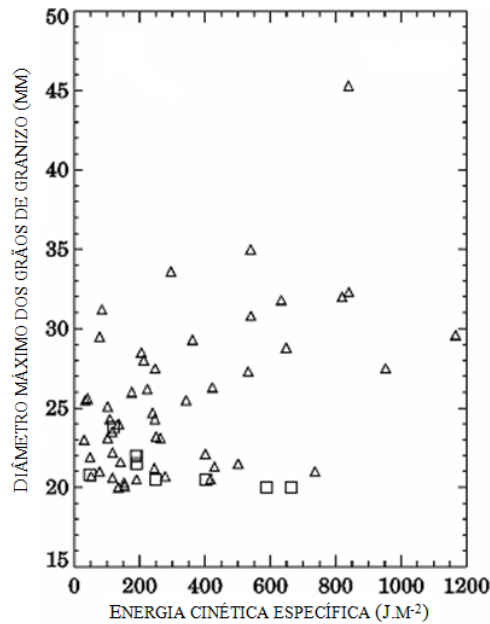


Figura 3.12 – Relação entre número de grãos de granizo e energia cinética específica observados em quedas de granizo (adaptado de Hohl, 2001)

Do gráfico anterior é possível verificar que, durante as quedas de granizo, foram registados valores de energia cinética limites na ordem dos 1000 J.m^{-2} , cujos grãos apresentam diâmetros na ordem dos 30 mm. Estas características foram levadas em conta no dimensionamento do modelo de granizo, atendendo a que os ensaios laboratoriais visam simular o tipo de precipitação extremo possível de ocorrer.

Calculando o valor da área sensível do sensor, A_{sensor} , o produto desta pela energia cinética por unidade de área fica igual à energia cinética aplicada na área do sensor, E_c , conforme expresso na equação 16.

$$E_c = 1000 * A_{\text{sensor}} \Leftrightarrow \quad (16)$$

$$E_c = 1000 * 3,65 * 10^{-5} \Leftrightarrow \quad (17)$$

$$E_c = 0,37 \text{ J} , \quad (18)$$

com A_{sensor} expressa em m^2 .

As condições existentes no laboratório limitaram a altura de queda do modelo de granizo em 40 cm. Sabendo o valor da energia cinética que o modelo tem de ter no instante do impacto, torna-se necessário calcular o valor da velocidade no momento do impacto, v_{imp} , e da massa detida pelo modelo.

A distância percorrida por um corpo cujo movimento é uniformemente acelerado é dada pela lei do movimento uniformemente variado, dada pela equação 19 (Cruzeiro, 2003).

$$x = x_0 + v_0 * t + \frac{1}{2} * g * t^2 , \quad (19)$$

onde x é igual à distância percorrida, em m, x_0 a posição inicial relativa do corpo, em m, v_0 a velocidade inicial do corpo, em $m.s^{-1}$, t o tempo decorrido, em s, e g igual à aceleração da gravidade, em $m.s^{-2}$. No caso específico da queda do modelo de granizo no laboratório, tanto x_0 como v_0 tomam valores nulos porque o modelo de granizo é lançado da origem do referencial tomado (a 0,4 m de altura da face da superfície de ensaio) e a partir do repouso. Conhecendo a distância percorrida pelo modelo de granizo e o valor da aceleração da gravidade ($9,81 m.s^{-2}$), t é dado pela equação 20.

$$t = \sqrt{\frac{2*x}{g}} \Leftrightarrow \quad (20)$$

$$t = \sqrt{\frac{2*0,4}{9,81}} \Leftrightarrow \quad (21)$$

$$t = 0,29 \text{ s} \quad (22)$$

Sabendo o valor de t, a velocidade atingida pelo modelo de granizo nesse instante é dada pela equação 23 (Cruzeiro, 2003).

$$v_{imp} = g * t \Leftrightarrow \quad (23)$$

$$v_{imp} = 2,85 \text{ m. s}^{-1} \quad (24)$$

A partir dos valores de V_{imp} e de E_c , é possível determinar a massa que o modelo de granizo deve dispor, m_m , conforme expresso pela equação 25.

$$E_c = \frac{1}{2} * m_m * v_{imp}^2 \Leftrightarrow \quad (25)$$

$$m_m = \frac{2*0,37}{2,85^2} \Leftrightarrow \quad (26)$$

$$m_m = 0,09 \text{ kg} = 90 \text{ g} \quad (27)$$

Para criar o modelo de granizo, foram utilizadas esferas de vidro, cujo peso unitário, m_e é de cerca de 15 g. Tendo em conta o peso total que o modelo deve dispor, o número de esferas a utilizar, n_e , é dado pela equação 28.

$$n_e = \frac{m_m}{m_e} = \frac{90 \text{ g}}{15 \text{ g}} = 6 \quad (28)$$

As 6 esferas utilizadas foram unidas por meio de uma camada plástica autocolante, conforme ilustrado pela figura 3.13.



Figura 3.13 – Modelo de granizo criado a partir de esferas²

Foram realizados 10 ensaios com o modelo de granizo anteriormente dimensionado em cada uma das superfícies consideradas, 5 sem aplicação do CCS para determinação do ganho a aplicar no sinal e mais 5 com a aplicação do CCS e respetivo ganho calculado. Cada ensaio consistiu em um (1) lançamento vertical sobre a área do sensor, partindo do repouso, a uma altura de 0,4 m.

PARTE II – TESTE NO VEÍCULO

Na segunda parte do procedimento experimental, o sensor foi instalado nas superfícies de ensaio anteriormente definidas. Face aos ensaios efetuados em laboratório, os ensaios no veículo diferenciam-se no estímulo aplicado na superfície – simulação de precipitação líquida sobre a superfície – e presença de fatores indutores de ruído elétrico e erros na mensuranda. Os ensaios foram realizados ao ar livre, junto ao edifício da Área Departamental de Engenharia Mecânica (ADEM), no ISEL.

² O modelo ilustrado é maior do que aquele que foi utilizado nos ensaios.

3.7 CARACTERIZAÇÃO DO VEÍCULO UTILIZADO E LOCAL DE ENSAIO

Para a realização dos ensaios, o veículo escolhido foi um Citroën 2CV6 de 1984 (figura 3.14).



Figura 3.14 – Veículo utilizado na realização dos ensaios com simulação de chuva.

A escolha por este veículo baseou-se nos seguintes aspetos:

- A construção ligeira do veículo, com as peças da carroçaria fabricadas em chapa de aço com 0,7 mm de espessura, facilita a captação das vibrações provocadas pela queda das gotas de água sobre esta superfície.
- A facilidade de instalação dos sensores sobre as superfícies de ensaio, bem como a simplicidade de implementação do cabo que liga o sensor ao CCS.
- Apesar de potenciar o surgimento de mais ruído elétrico no sensor, o reduzido isolamento da estrutura face a vibrações exteriores, nomeadamente as provocadas pelo funcionamento do motor térmico, permitiu verificar a capacidade de influência destas sobre o sinal obtido pelo sensor.

3.8 COLOCAÇÃO E LOCALIZAÇÃO DOS SENSORES

Os sensores foram instalados no meio do capô do veículo, segundo a sua largura, e no centro geométrico do para-brisas. Tal como na parte I, o método de fixação do sensor às superfícies de ensaio foi por meio de fita-cola larga (figura 3.15a e 3.15b).



a)



b)

Figura 3.15 – Localização dos sensores a) no capô e b) no para-brisas

3.9 EQUIPAMENTO DE SIMULAÇÃO DE CHUVA

Para realizar a simulação da precipitação, foi utilizada uma pistola dispersora de água, utilizada para rega e lavagem domésticas. Os simuladores podem ser classificados em 3 tipos: gotejadores, bocal e aspersor (Elbasit *et al.*, 2010). Este dispositivo permitia escolher a intensidade do jato de água desejada, ao rodar a extremidade da pistola (cabeça da pistola) e selecionar a saída correspondente (figura 3.16a e 3.16b).



a)



b)

Figura 3.16 – Vista da pistola utilizada para simulação de chuva a) de lado e b) pormenor da cabeça.

A intensidade da precipitação é medida em mm.h^{-1} de água, sobre uma área de 1 m^2 . (INMG, 1984)

Para determinar os volumes de precipitação possíveis de obter com o equipamento, foram utilizadas as 3 posições da cabeça da pistola que originavam um fluxo sob a forma de gotas. Depois, um copo graduado foi cheio com um determinado volume de água e o período de tempo decorrido para tal cronometrado, em cada uma das posições consideradas. A partir dos dados obtidos, obtiveram-se os caudais em $\text{mm}^3.\text{h}^{-1}$. Os resultados estão expressos na tabela 3.3.

Volume de água obtido (ml)	Tempo de enchimento (s)	Caudal ($\text{mm}^3.\text{h}^{-1}$)
300	1,01	1069306930,7
	2,00	540000000,0
	3,97	272040302,3

Tabela 3.3 – Resultados obtidos durante o enchimento do copo graduado.

Tendo em conta que a pluviosidade medida em mm.h^{-1} toma por referência a precipitação ocorrida numa área de 1 m^2 (1000000 mm^2), o quociente do caudal obtido pelo valor da área de referência em mm^2 é igual aos valores de precipitação em mm.h^{-1} . Em função deste valor, os níveis de precipitação foram designados de chuva fina, chuva média e chuva grossa, conforme expresso na tabela 3.4.

Designação	Volume de precipitação (mm.h^{-1})
Chuva fina	272
Chuva média	540
Chuva grossa	1069

Tabela 3.4 – Níveis de precipitação obtidos por simulação e respetivas designações.

3.10 METODOLOGIA SEGUIDA

Os ensaios foram realizados com base nas seguintes variáveis:

- Superfícies de ensaio: capô e para-brisas
- Intensidade da precipitação projetada sobre a superfície: chuva fina, chuva média e chuva grossa
- Estado do motor térmico: em funcionamento ou desligado

Para além dos 3 níveis de pluviosidade anteriormente definidos, foi também obtida a mensuranda do ruído em cada uma das superfícies e para cada estado do motor térmico do

veículo, que servirá de referência face aos valores obtidos nos ensaios com pluviosidade e permitir determinar os níveis de ruído em cada uma das situações. Nas situações em que o motor térmico se encontrava em funcionamento, este apresentava-se a um regime constante e mínimo (cerca de 800 rotações por minuto). A tabela 3.5 mostra todos os ensaios realizados em função das variáveis acima definidas.

Superfície de ensaio	Estado do motor térmico	Mensuranda obtida do sensor
Capô	Desligado	Ruído (ausência pluviosidade)
		Chuva fina
		Chuva média
		Chuva grossa
	Em funcionamento	Ruído
		Chuva fina
		Chuva média
		Chuva grossa
Para-brisas	Desligado	Ruído
		Chuva fina
		Chuva média
		Chuva grossa
	Em funcionamento	Ruído
		Chuva fina
		Chuva média
		Chuva grossa

Tabela 3.5 – Ensaios realizados no automóvel.

A simulação de pluviosidade sobre as superfícies de ensaio foi feita com o operador da pistola a uma distância de 1,5 m, na horizontal, entre a extremidade da pistola e o ponto onde se encontra o sensor. Esta distância deve-se ao facto de a distância entre o plano imaginário vertical tangente ao pára-choques do veículo e o ponto onde o sensor está colocado no para brisas ser igual a este valor. Para que as condições de ensaio fossem semelhantes em ambas as superfícies, esta distância foi aplicada nos ensaios sobre o capô. Para cada uma das superfícies de ensaio, e para cada um dos níveis de pluviosidade considerados, foram realizados 2 ensaios, um sem aplicação de CCS para determinação do valor de ganho a aplicar e das componentes de frequência em que o sinal ocorre, e um outro com a aplicação do CCS e respetivo ganho e ainda o filtro dimensionado para deixar apenas deixar passar o sinal oriundo do sensor.

4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos dos ensaios realizados, bem como testadas as hipóteses formuladas na secção 3.1 e a confirmação ou não das mesmas. Com recurso a ferramentas estatísticas, nomeadamente o desvio-padrão, desvio-padrão médio, média e distribuição normal, foi feito um tratamento estatístico à informação recolhida e determinar quais os níveis de incerteza obtidos, a capacidade de o sensor detetar precipitação no estado líquido e a dimensão das gotas de chuva incidentes sobre a superfície de ensaio.

Devido às diferentes conclusões obtidas em cada um dos tipos de ensaios realizados, o capítulo está estruturado com a separação da análise de resultados na Parte I e na Parte II dos ensaios.

PARTE I – ENSAIOS EM LABORATÓRIO

Os objetivos dos ensaios em laboratório foram determinar a sensibilidade do sensor nas superfícies de ensaio, determinar o erro obtido nos valores obtidos e confirmar o funcionamento do CCS escolhido e dimensionado.

A incerteza associada a uma medida pode ser expressa pelo valor do desvio padrão obtido na observação (σ), para atividades experimentais cujo número de amostras seja inferior a 10, ou por via do desvio padrão médio dos dados do ensaio (σ_m) quando o número de amostras é superior a 10 (Silva, s/d).

Na primeira parte dos ensaios foi possível verificar as seguintes hipóteses anteriormente formuladas:

- Tipos de pluviosidade, quanto ao estado físico, considerados;
- Localização do sensor que oferece as melhores condições de deteção da pluviosidade;

4.1 SENSOR COLOCADO NA CHAPA

A figura 4.1 mostra o gráfico resultante dos valores de picos de tensão obtidos dos 5 ensaios realizados, bem como o valor de ruído e o valor médio da tensão obtida do sensor ligado diretamente à DAQ, enquanto a tabela 4.1 revela os valores obtidos dos ensaios,

bem como os valores dos respetivos desvios-padrão e valores médios dos picos e dos desvios padrão.

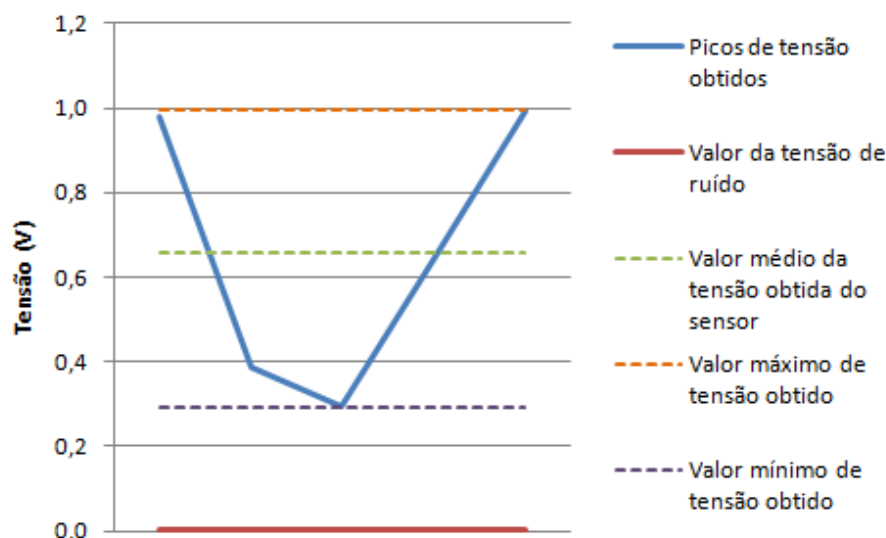


Figura 4.1 – Gráfico dos valores máximos de tensão obtidos do sensor colocado na chapa e ligado diretamente à DAQ.

Ensaio	Tensão máxima obtida (V)	Média das tensões máximas obtidas (V)	Desvio padrão	Erro de medição relativo (%)	Valor médio desvio padrão (V)	Erro de medição relativo médio (%)
1	0,980		0,108	11,035%		
2	0,389		0,087	22,361%		
3	0,293	0,660	0,043	14,851%	0,0951	14,414%
4	0,644		0,104	16,122%		
5	0,995		0,133	13,397%		
Ruido	0,00247	0,00205	0,00141	56,920%	---	---

Tabela 4.1 – Valores obtidos dos ensaios realizados com sensor ligado diretamente à DAQ

Os valores de tensão obtidos apresentam uma flutuação considerável entre ensaios, com especial destaque para o segundo e terceiro ensaios. Contudo, e à exceção do segundo ensaio, os valores apresentados pelos desvios padrão encontram-se dentro da mesma ordem de grandeza, representando entre 11 % a 15 % do respetivo valor, à exceção do segundo ensaio, cuja percentagem foi de cerca de 22 %. A média dos valores de tensão obtidos cifrou-se em 0,66 V, cerca de 66 % do maior valor de tensão obtido, enquanto o valor médio dos desvio padrão representou cerca de pouco mais de 14 % do valor médio das tensões obtidas. Este aspeto torna-se interessante na medida em que mostra que o desvio

padrão médio apresentou uma ordem de grandeza similar aos desvios apresentados por cada um dos ensaios e a percentagem entre este último e a média dos valores de tensão obtidos ficou na mesma gama de valores da percentagem dos desvios padrão de cada ensaio. A incerteza média na medição foi de 0,0951 V e um erro médio associado de 14,414 %.

O ruído oriundo do sensor sem receber qualquer estímulo foi de cerca de $2,5 \times 10^{-3}$ V, apresentando uma ordem de grandeza entre 0,3 % e 0,8 % dos valores máximo de tensão obtidos nos ensaios, o que pode ser considerado como pouco relevante no resultado final obtido.

Atendendo aos valores de incerteza obtidos relativamente pequenos face às tensões obtidas em cada ensaio e à diferença na ordem de grandezas existente entre o valor de ruído e os valores de tensão obtidos, é possível concluir que o sensor detetou os impactos na superfície de ensaio considerada.

Com estes dados, o valor do ganho a aplicar (K) é obtido através do quociente entre o valor da tensão máxima desejada à saída do CCS, $U_{saída}$, e o valor da tensão média obtida aos terminais do sensor no momento do impacto, $U_{médio}$, conforme descrito pela equação 29.

$$K = \frac{U_{saída}}{U_{médio}} \Leftrightarrow \quad (29)$$

$$K = \frac{10 \text{ V}}{0,66 \text{ V}} = 15,15 \Rightarrow K = 15 \quad (30)$$

Com o valor de K definido, foi implementado o CCS dimensionado na secção 3.2.3 com este valor de ganho na montagem utilizada. Após a realização dos 5 ensaios nestas condições, a figura 4.2 mostra o gráfico com a evolução dos valores de tensão obtidos, o valor médio desta e o valor do ruído e a tabela 4.2 os valores de tensão obtidos, valor médio, desvio padrão e erro associado.

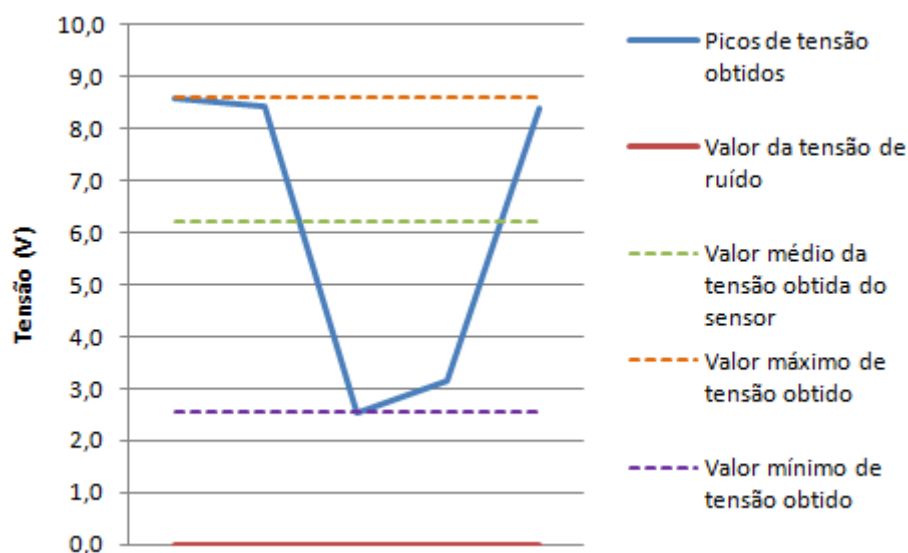


Figura 4.2 – Gráfico dos valores máximos de tensão obtidos do sensor na chapa com aplicação do CCS.

Ensaio	Valor pico (V)	Média dos valores de pico (V)	Desvio padrão	Erro de medição relativo (%)	Valor médio desvio padrão (V)	Erro de medição relativo médio (%)
1	8,589	6,216	1,562	18,191%	1,320	21,244%
2	8,415		2,043	24,278%		
3	2,548		0,463	18,177%		
4	3,145		0,572	18,173%		
5	8,382		1,962	23,412%		
Ruido	0,0000254	0,000254	0,000	0,000%	---	---

Tabela 4.2 – Valores obtidos dos ensaios realizados com sensor ligado à DAQ por via de CCS.

Os valores de tensão máxima obtido à saída do CCS estiveram dentro dos valores esperado, à exceção do verificado nos ensaios 3 e 4, em semelhança com o ocorrido nos ensaios do sensor ligado diretamente à DAQ. As percentagens dos desvios-padrão face aos respetivos valores de tensão obtidos apresentaram valores consideravelmente superiores aos verificados nos ensaios anteriores, compreendidos entre os 18 % e os 24 %. O valor médio do valor de tensão obtido foi de cerca de 6,2 V que, face ao maior valor de tensão obtido, representa cerca de 70 % deste, percentagem semelhante à encontrada nos ensaios sem CCS. O valor de ruído elétrico obtido, quando não foram aplicados estímulos na superfície, foi de $2,54 \times 10^{-4}$ V, menor do que o obtido nos primeiros ensaios. Em termos de percentagem, o ruído elétrico representou entre $1,43 \times 10^{-4}$ % e $4,81 \times 10^{-4}$ %. As medições

foram realizadas com uma incerteza média de 1,32 V e um erro médio associado de 21,244%.

Com estes resultados, é possível concluir que o sensor detectou os impactos do modelo de granizo sobre a superfície de ensaio considerada, ainda que os valores de tensão obtidos à saída do CCS tenham sido menores do que os esperados. Este último facto deveu-se, por um lado, à qualidade da fixação do sensor à superfície e, por outro, à falta de condições de repetibilidade dos ensaios.

4.2 SENSOR COLOCADO NO VIDRO SIMPLES

À semelhança do realizado na superfície de chapa, foram realizados 5 ensaios com o sensor instalado no vidro simples e ligado diretamente à DAQ. A figura 4.3 mostra o gráfico com os valores de tensão máxima obtidos em cada ensaio, valor médio obtido e valor de ruído e a tabela 4.3 mostra os valores de tensão obtidos, valor médio, desvio padrão e erro associado.

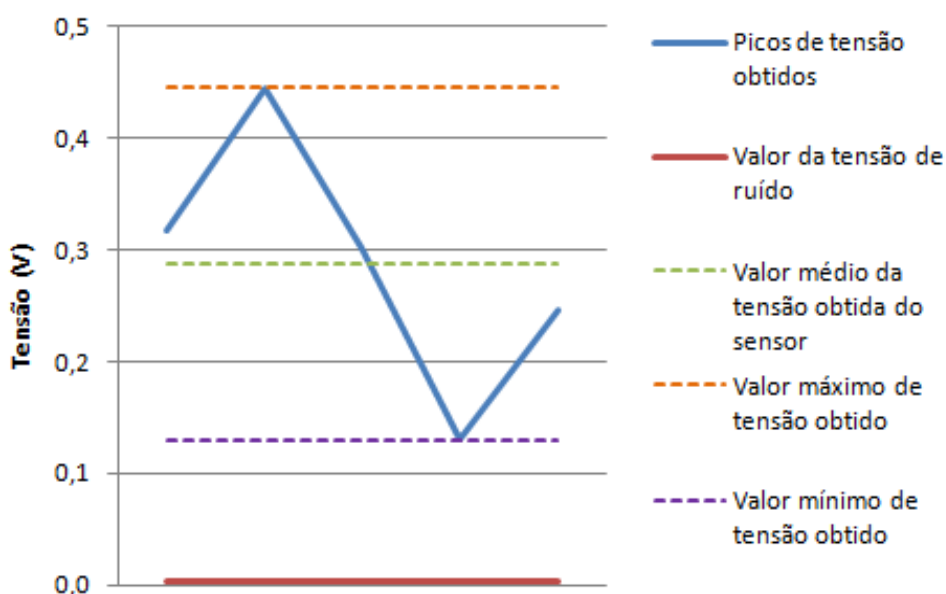


Figura 4.3 – Gráfico dos valores máximos de tensão obtidos do sensor no vidro ligado diretamente à DAQ.

Ensaio	Tensão máxima obtida (V)	Média das tensões máximas obtidas (V)	Desvio padrão	Erro de medição relativo (%)	Valor médio desvio padrão (V)	Erro de medição relativo médio (%)
1	0,318		0,0452	14,217		
2	0,445		0,0549	12,328		
3	0,303	0,289	0,0354	11,694	0,0364	12,614
4	0,130		0,0189	14,544		
5	0,247		0,0276	11,178		
Ruido	0,00247	0,00235	0,000795	32,144		

Tabela 4.3 – Valores obtidos dos ensaios realizados com sensor ligado diretamente à DAQ

Mais uma vez, verifica-se que os valores de tensão máximo obtidos em cada ensaio apresentam diferenças assinaláveis, oscilando entre os 0,130 V e os 0,445 V. Contudo, é de notar que a diferença entre o maior e o menor valor de tensão é menor do que a mesma diferença para a situação análoga na chapa, onde os valores de tensão variaram entre os 0,293 V e os 0,995 V. Este aspeto pode ser explicado pelo facto de o sensor piezo estar instalado numa superfície mais regular e com um melhor assentamento do que na chapa. Nota-se ainda que os valores de tensão obtidos no vidro são, em geral, menores que os valores obtidos na chapa, facto explicado pela menor capacidade de deformação elástica do vidro face à chapa. O valor médio da tensão obtida do sensor ficou-se pelos 0,289 V, o que corresponde a 65 % do maior valor de tensão obtido.

Os valores do desvio padrão tomaram valores com grandezas relativamente próximas entre si, representando erros de medição relativos compreendidos entre os 11,178 % e os 14,554%, valores semelhantes aos encontrados na chapa. O desvio padrão médio ficou em 0,0364V, o que corresponde a um erro de medição médio de 12,614 %, menor do que o encontrado em situação semelhante na chapa.

Relativamente ao ruído elétrico existente, o valor deste atingiu os $2,47 \times 10^{-3}$ V, praticamente igual ao encontrado na chapa. Face aos valores de pico obtidos no vidro, a tensão de ruído representou entre 0,6 % e 1,9 % dos referidos valores de pico.

Com estes dados, foi calculado o valor do ganho a aplicar no CCS utilizado, conforme descrito na equação 31, sendo esta análoga à equação 29 e apenas diferindo no valor de $U_{\text{médio}}$:

$$K = \frac{U_{saída}}{U_{médio}} \Leftrightarrow \quad (31)$$

$$K = \frac{10 \text{ V}}{0,29 \text{ V}} = 34,48 \Rightarrow K = 35 \quad (32)$$

A realização dos ensaios no vidro com o sensor ligado ao CCS munido deste valor de ganho devolveu a figura 4.4, que mostra o gráfico com a evolução dos valores de tensão obtidos, o valor médio desta e o valor do ruído, e a tabela 4.4 com os valores de tensão obtidos, valor médio, desvio padrão e erro associado.

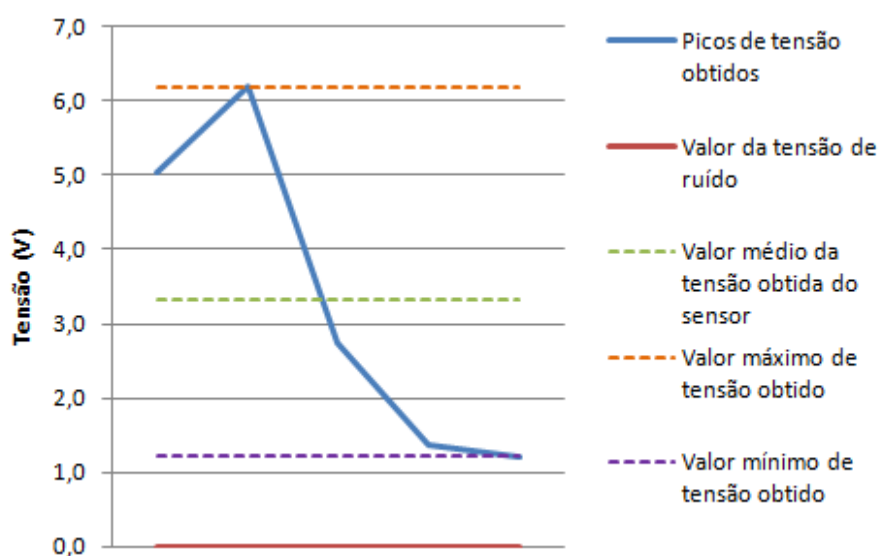


Figura 4.4 – Gráfico dos valores máximos de tensão obtidos do sensor no vidro com aplicação do CCS.

Ensaio	Valor pico (V)	Média dos valores de pico (V)	Desvio padrão	Erro de medição relativo (%)	Valor médio desvio padrão (V)	Erro de medição relativo médio (%)
1	5,046		1,864	36,936%		
2	6,188		1,982	32,032%		
3	2,741	3,315	1,650	60,212%	1,194	36,012%
4	1,380		0,251	18,169%		
5	1,218		0,221	18,176%		
Ruído	6,01E-06	6,01E-06	0,000	0,000%		

Tabela 4.4 – Valores obtidos dos ensaios realizados com sensor ligado à DAQ por via do CCS.

Os valores patentes na tabela 4.4 revelam uma maior disparidade face ao ensaio na chapa equivalente. Os valores máximos de tensão obtidos oscilaram entre os 1,218 V e os 6,188V, com uma diferença entre o maior e o menor pico de quase 5 V. Este aspeto foi tido

em conta à data dos ensaios laboratoriais, tendo este tipo de ensaio (vidro e aplicação do CCS) sido repetido várias vezes. No entanto, verificou-se que em todas as séries de ensaios uma diferença entre o maior e o menor valor do pico de tensão com igual ordem de grandeza. Os valores de tensão registados foram muito inferiores aos esperados.

O erro de medição relativo aumentou consideravelmente face aos ensaios com o sensor ligado diretamente, com um valor médio de 36,012 %. Uma das causas deste valor prendeu-se com o aumento dos valores dos desvios dos ensaios, que oscilaram entre os 18,169 % e os 60,212%. Um dos motivos para este acontecimento pode dever-se à limitada capacidade de aderência do adesivo utilizado à superfície do vidro e à falta de condições de repetibilidade dos ensaios.

Os valores de tensão do ruído elétrico foram substancialmente mais baixos, tal como verificado na chapa, com um valor constante de $6,01 \times 10^{-6}$ V. Percentualmente, e face ao valor de tensão máximo obtido dos ensaios, o ruído representou cerca de $4,859 \times 10^{-5}$ %.

Tal como na chapa, foi possível detectar os impactos do modelo do granizo sobre a superfície de ensaio considerada. No entanto, verifica-se uma maior redução dos valores de tensão obtidos à saída do CCS comparativamente com os valores de tensão obtidos em circunstâncias semelhantes para a chapa. O vidro, como superfície de ensaio e sendo menos flexível que a chapa de aço, não permite obter uma sensibilidade tão elevada como a obtida nesta última. Tendo em conta a limitada sensibilidade do CCS, a maior redução dos valores de tensão obtidos à saída deste, comparativamente aos resultados obtidos na chapa, fica explicada, juntamente com a eficiência do método de aplicação do sensor à superfície de ensaio utilizado.

4.3 CONCLUSÕES LABORATORIAIS

Os resultados obtidos permitiram concluir que o impacto do granizo nas superfícies de ensaio faz com que o sensor piezoelétrico produza um sinal elétrico semelhante ao obtido com a pluviosidade líquida. O impacto de uma gota de água proveniente de chuva devolve um sinal característico, semelhante aos gráficos dos ensaios (Salmi e Ikonen, s/d). Assim, foi possível comprovar a primeira hipótese relativamente ao granizo.

No que diz respeito às superfícies de ensaio utilizadas, os resultados obtidos permitiram concluir que a chapa oferece melhor sensibilidade mas uma maior propensão a erros de

medição, com valores de erros de medição relativa, no global, maiores que os registados no vidro. Por outro lado, o vidro apresentou valores de desvio-padrão relativos menores que os encontrados na chapa, o que a torna uma superfície menos propensa a interferências exteriores mas com menor sensibilidade.

Os resultados obtidos permitiram ainda concluir que o CCS utilizado funcionou da forma esperada, ainda que os valores de tensão obtidos tenham sido abaixo do esperado, com especial destaque para o vidro devido às características e limitações técnicas que lhe são inerentes. Outro aspeto que possa ter contribuído para a redução dos valores de tensão esperados foi para a capacidade de adesão do adesivo utilizado no vidro e a aderência entre a superfície do vidro e o sensor.

PARTE II – ENSAIOS NO AUTOMÓVEL

A realização dos ensaios sobre esta superfície foi feita tendo em conta as conclusões obtidas na parte I e com a presença da variável estado do motor térmico, conforme definido na secção 3.10. Nesta parte dos ensaios, foram comprovadas as 3 hipóteses definidas na secção 3.1, em que, no caso da primeira, foi determinado qual o nível de pluviosidade mínima passível de ser detetável pelo sensor. Ficou ainda determinado qual a capacidade de deteção em cada uma das superfícies e a influência das interferências oriundas do motor térmico.

Atendendo à grande dimensão da frequência de amostragem do sinal (1000 registos por segundo), houve a necessidade de fazer uma redução da mesma de forma a ser possível a construção de um gráfico legível e um tratamento estatístico da informação mais simples. A amostra considerada tinha uma dimensão inicial de 5000 registos (5 segundos de incidência da pluviosidade sobre a superfície de ensaio) e por via empírica, foi possível concluir que obtendo o valor médio de cada conjunto de 20 registos fornecia o melhor compromisso entre rigor dos dados apresentados e facilidade na obtenção de um gráfico legível. Assim, as amostras consideradas passaram de uma dimensão de 5000 para 250 valores.

4.4 SENSOR NO CAPÔ

4.4.1 MOTOR TÉRMICO DESLIGADO

O primeiro ensaio realizado na superfície de ensaio metálica foi realizado com o sensor ligado diretamente à DAQ, de forma a determinar os valores de tensão resultantes da incidência da pluviosidade líquida nas intensidades definidas na seção 3.9. A figura 4.5 mostra o gráfico com os sinais obtidos e respectivos valores médios e a tabela 4.5 apresenta os referidos resultados.

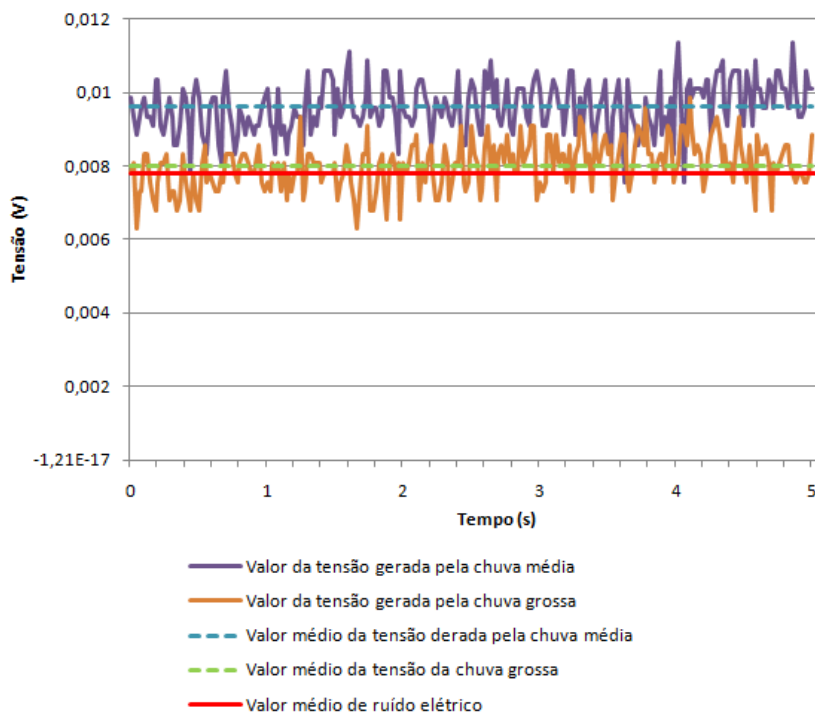


Figura 4.5 – Gráfico com os sinais obtidos da incidência da pluviosidade nas 3 intensidades definidas e sensor ligado diretamente à DAQ.

Ensaio	Valor máximo de tensão (V)	Média dos valores de tensão (V)	Desvio padrão	Erro relativo de medição (%)	Valor médio desvio padrão (V)	Erro médio relativo de medição (%)
Chuva média	0,0114	0,0096	0,0007	6,131%	0,0007	6,375%
Chuva grossa	0,0099	0,0080	0,0007	6,619%		
Ruído	0,0177	0,0078	0,0044	24,716%		

Tabela 4.5 – Valores obtidos dos ensaios realizados no capô e motor desligado com o sensor ligado diretamente na DAQ

O primeiro facto observável é a não deteção da chuva fina pelo sensor. Os valores de tensão obtidos do sensor estiveram compreendidos entre os 0,0099 V e os 0,0114 V. De notar o facto de a tensão máxima obtida da chuva grossa ser menor do que o da chuva média, aspeto este que pode dever-se a uma maior dimensão das gotas deste nível de pluviosidade face às da chuva grossa. Os erros de medição relativos tomaram valores entre os 6,131 % e os 6,619 %, com um valor médio de 6,375 %, e o ruído elétrico a ter um valor máximo de 0,0177 V, com um erro de medição relativo de 24,716 %. O maior erro de medição do ruído face à pluviosidade deve-se à maior variação dos valores de ruído registados ao longo dos ensaios. Atendendo às conclusões obtidas relativamente à chapa na parte laboratorial dos ensaios, este valor está dentro do previsível. Os valores médios das tensões obtidas estão compreendidos entre 81,32 % e os 84,21 %, consequência do reduzido erro de medição verificado.

De modo a determinar quais as componentes de frequência dos sinais da incidência dos tipos de chuva e do próprio ruído, foi realizada a transformação do sinal, em ordem à frequência, por meio da FFT via programa Matlab[®], que devolveu o gráfico representado na figura 4.6.

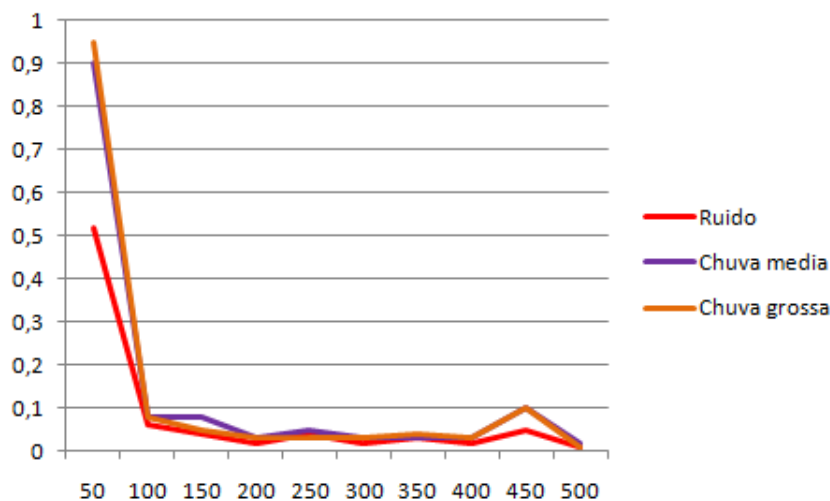


Figura 4.6 – Espectro dos sinais obtidos no capô com motor desligado e sensor ligado diretamente à DAQ.

As componentes com maior intensidade, tanto do ruído como do sinal da pluviosidade são as com frequência até 100 Hz, mais precisamente na frequência dos 50 Hz. Entre os 100 Hz e os 400 Hz, o valor das componentes dos sinais do ruído e da simulação de pluviosidade mantêm-se iguais, sendo que entre os 400 Hz e os 500 Hz as componentes dos sinais de chuva tomam valores sensivelmente superiores. Será um filtro passa-banda,

do tipo Chebyshev de 10ª ordem entre estas duas frequências que será aplicado juntamente com o CCS dimensionado.

Com os valores médios de tensão obtidos de cada sinal, foi calculado o valor do ganho a aplicar no CCS por meio da equação 33. Devido à pequena diferença de tensões verificada entre tipos de pluviosidade, foi utilizada o maior valor médio de tensão registado no cálculo do valor de K.

$$K = \frac{U_{saída}}{U_{médio}} \Leftrightarrow \quad (33)$$

$$K = \frac{10 \text{ V}}{0,0096 \text{ V}} = 1041,7 \Rightarrow K = 1042 \quad (34)$$

Aplicando o CCS com o referido valor de ganho e o filtro passa-banda com as características anteriormente referidas, obteve-se o gráfico ilustrado na figura 4.7 e os dados apresentados na tabela 4.6.

Uma primeira análise da tabela 4.6 permite constatar que os valores de tensão obtidos foram bastante inferiores aos esperados. Este aspeto deveu-se, em parte, ao facto de os meios disponíveis à data dos ensaios só terem permitido a aplicação de um filtro após a obtenção e registo do sinal condicionado e amplificado pelo CCS, havendo uma perda de amplitude do sinal. Outro fator a contribuir para este aspeto poderá ter sido o efeito capacitivo do próprio CCS, aspeto que promove a atenuação do sinal obtido (Otte *et al.*, 2010).

Ensaio	Valor máximo de tensão (V)	Média dos valores de tensão (V)	Desvio padrão	Erro relativo de medição (%)	Valor médio desvio padrão (V)	Erro médio relativo de medição (%)
Chuva média	0,0173	0,00046	0,00198	11,455%	0,00247	11,996%
Chuva grossa	0,0237	0,00053	0,00297	12,537%		
Ruido	0,0050	0,00033	0,00035	7,063%		

Tabela 4.6 – Valores obtidos do sensor ligado à DAQ por intermédio do CCS e aplicação de filtro passa-banda 400-500 Hz.

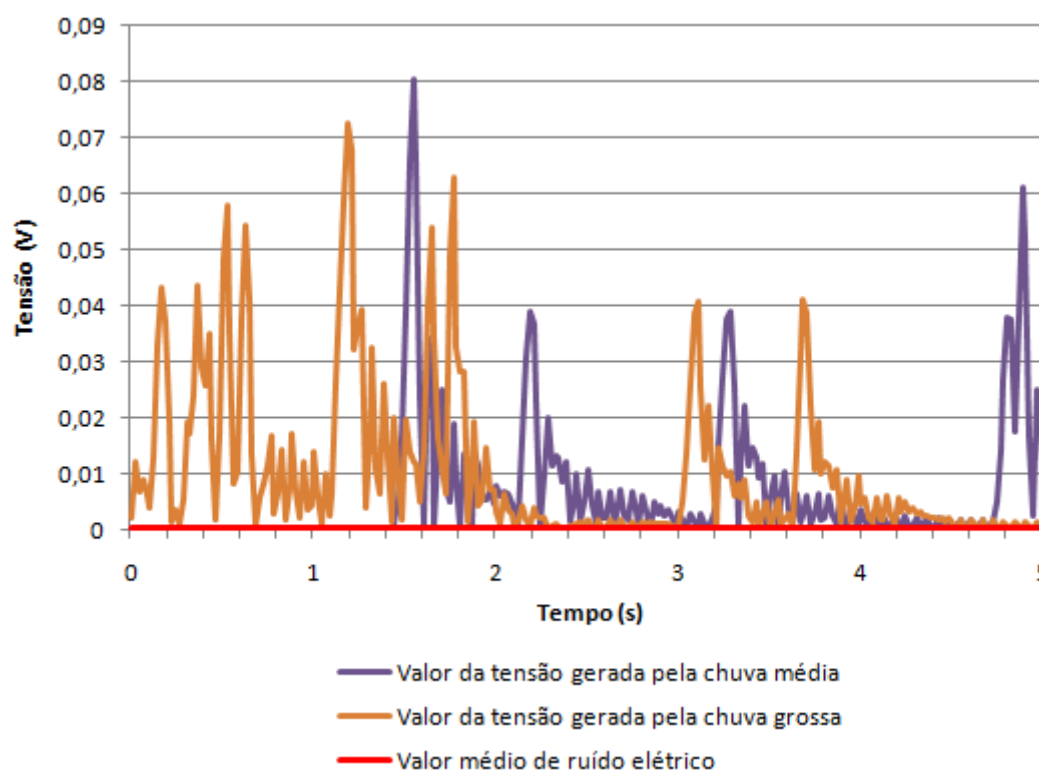


Figura 4.7 – Gráfico dos valores de tensão obtidos do sensor ligado à DAQ por intermédio do CCS e aplicação de filtro passa-banda 400-500 Hz.

A análise ao gráfico da figura 4.7 permite constatar que o sinal da chuva fina tornou-se praticamente impercetível face aos sinais da chuva média e grossa. A aplicação do filtro terá sido o principal motivo para tal. Os sinais da chuva média e grossa apresentam-se irregulares, ao contrário do esperado. Uma das consequências deste aspeto é o valor médio do sinal que se apresenta numa ordem de grandeza muito inferior face aos valores máximos, com percentagens compreendidas entre os 2,23 % e os 2,66 %.

Tal como verificado na parte I dos ensaios e esperado nos resultados dos ensaios no veículo automóvel, o nível de ruído ficou reduzido de forma substancial face ao inicial, em parte, por efeito do próprio CCS e também por efeito do filtro aplicado. Os erros de medição relativos apresentaram valores satisfatórios, compreendidos entre os 11,455 % e os 12,537 %, com um valor médio de 11,996 %.

Na secção seguinte, é feita a mesma análise de resultados com o motor térmico do veículo em funcionamento e comparação com os resultados patentes nesta secção.

4.4.2 MOTOR TÉRMICO A FUNCIONAR

De forma análoga à aplicada na secção anterior, foram registados os resultados obtidos da incidência da pluviosidade sobre o capô do veículo e com o motor térmico deste em funcionamento nas condições descritas na secção 3.10.

A tabela 4.7 e a figura 4.8 mostram, respetivamente, os valores de tensão obtidos com o sensor ligado diretamente à DAQ e a ilustração dos mesmos.

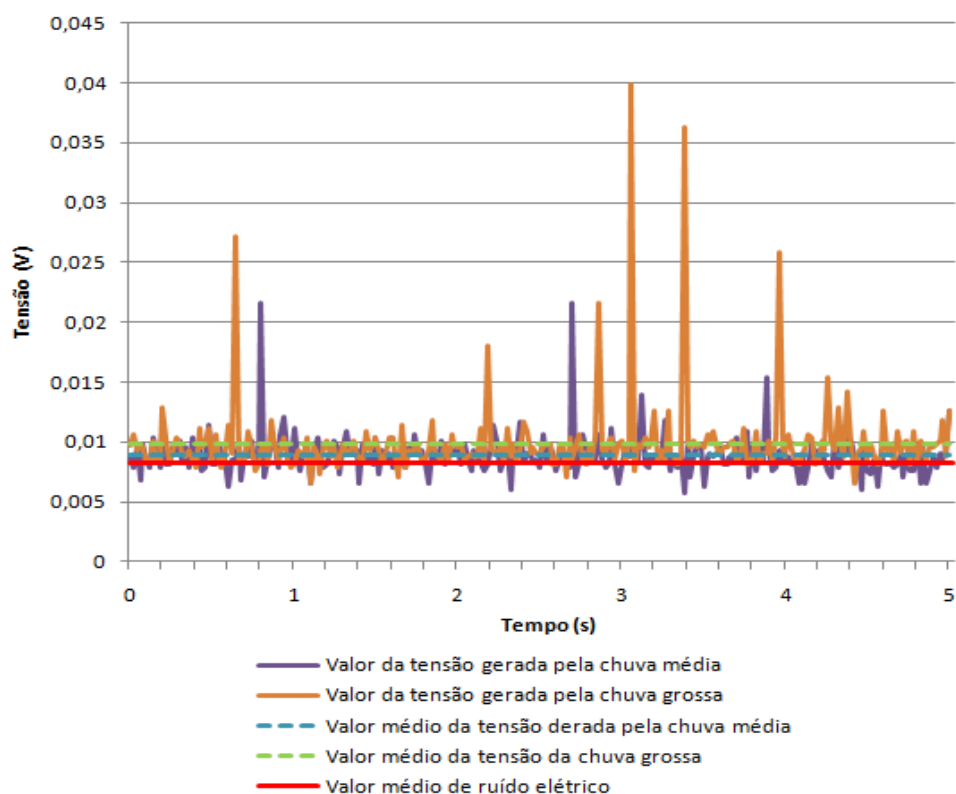


Figura 4.8 – Gráfico dos sinais obtidos do sensor no capô, ligado diretamente à DAQ e com motor térmico do automóvel a funcionar

Ensaio	Valor máximo de tensão (V)	Média dos valores de tensão (V)	Desvio padrão	Erro relativo de medição (%)	Valor médio desvio padrão (V)	Erro médio relativo de medição (%)
Chuva média	0,0216	0,00891	0,00171	7,956%	0,00251	8,128%
Chuva grossa	0,0399	0,00991	0,00331	8,301%		
Ruido	0,3638	0,00825	0,00940	2,583%		

Tabela 4.7 – Valores obtidos dos ensaios realizados com motor a funcionar e sensor ligado diretamente na DAQ

A tabela 4.7 mostra que os valores de tensão máxima para cada intensidade de chuva simulada são muito próximos entre si, inclusive os valores de erro de medição relativos que se apresentam mais pequenos face aos encontrados na situação análoga com o motor desligado, que se encontram entre os 7,956 % e os 8,301 %. Outro facto é o valor médio do ruído apresentar um valor praticamente igual ao dos apresentados em cada intensidade de pluviosidade simulada e um valor de erro de medição relativo bastante reduzido de 2,583%. Este facto vem reforçado pelo gráfico da imagem 4.8 e sugere que estes valores são consequência das interferências induzidas pelo motor térmico, nomeadamente pelas suas vibrações mecânicas e ação do campo eletromagnético gerado pela bobine de ignição.

Assim, foi calculada a FFT do sinal obtido de modo a determinar as componentes do ruído e as do sinal e determinar quais as que devem ser filtradas. O gráfico obtido não foi conclusivo, não sendo possível obter uma gama de frequências que permite filtrar o ruído do sinal obtido a partir da chuva e concluir se o sensor detetou ou não algum estímulo provocando pela pluviosidade. Este facto vem de encontro ao visualizado no gráfico do sinal no domínio do tempo: não é possível detetar os sinais provocados pela precipitação.

Estes ensaios foram repetidos 3 vezes mas os resultados obtidos nos mesmos foram similares aos aqui apresentados.

4.5 SENSOR APLICADO NO PARA-BRISAS

4.5.1 MOTOR TÉRMICO DESLIGADO

À semelhança do realizado nos ensaios realizados no capô, o sensor foi aplicado no centro geométrico do para-brisas do veículo de modo a determinar os valores neste. A tabela 4.8 mostra os valores obtidos com o sensor ligado diretamente na DAQ.

Ensaio	Valor máximo de tensão (V)	Média dos valores de tensão (V)	Desvio padrão	Erro relativo de medição (%)	Valor médio desvio padrão (V)	Erro médio relativo de medição (%)
Chuva fina	0,00247	0,00247	4,23E-16	1,71E-13		
Chuva média	0,00247	0,00247	4,23E-16	1,71E-13	4,23E-16	1,71E-13
Chuva grossa	0,00247	0,00247	4,23E-16	1,71E-13		
Ruido	0,00247	0,00247	1,22E-16	4,93E-14		

Tabela 4.8 – Resultados obtidos do sensor instalado no para-brisas e ligado diretamente à DAQ.

Os valores máximos para as diferentes intensidades de pluviosidade definidas são iguais ao valor máximo de ruído. Não é possível detetar qualquer pluviosidade na superfície do vidro. Os erros de medição relativos são muito reduzidos, com valores praticamente igual a zero, o que permite concluir que o sensor, quando montado no para-brisas, não é capaz de detetar qualquer precipitação.

De modo a confirmar os dados obtidos, foi aplicado o CCS com ganhos de 7291, 14582 e 29164. A utilização destes valores é justificada por 2 aspectos: por um lado, no decorrer da primeira parte dos ensaios em laboratório, verificou-se que o ganho aplicado no CCS para o vidro é, sensivelmente, 3,5 vezes superior ao ganho utilizado no CCS com o sensor instalado na chapa metálica. Por outro lado, tendo em conta o ganho aplicado no CCS com o sensor instalado no capô do veículo, este último foi multiplicado por 3,5, sendo igual a 7291 e os valores seguintes, 14582 e 29164, são o seu dobro e quádruplo, respetivamente. Limitações no valor máximo das resistências a aplicar no CCS não permitiram aplicar valores muito superiores ao último apresentado. Contudo, os resultados obtidos foram iguais, permitindo concluir que não é possível detetar chuva na superfície do vidro.

4.5.2 MOTOR TÉRMICO A FUNCIONAR

Foram ainda realizados os ensaios com o motor térmico do veículo a funcionar, de modo a compreender a influência deste nos valores obtidos pelo sensor. Os valores obtidos foram iguais aos obtidos na tabela 4.8.

Tal facto mostra que o para-brisas, para além de não permitir a deteção da precipitação pelo sensor, está isolado de qualquer vibração oriunda do motor térmico. Este isolamento deve-se à borracha em todo o seu perímetro que o suporta na carroçaria do veículo, atuando como um absorvedor de vibrações.

À semelhança do que foi feito nos ensaios com o motor térmico desligado, de forma a confirmar os dados obtidos, foi aplicado o CCS com os mesmos ganhos de 7291, 14582 e 29164. Os resultados obtidos foram iguais, permitindo concluir que não é possível detetar chuva na superfície do vidro.

4.6 CONCLUSÕES NO AUTOMÓVEL

Os resultados obtidos durante os ensaios no veículo automóvel permitiram concluir que a deteção de pluviosidade no capô do veículo só é possível para volumes de pluviosidade

médio e elevado e somente sem o motor térmico do veículo estar em funcionamento. Este último, estando em funcionamento, faz com que o sensor não consiga detetar qualquer tipo de estímulo que não seja ruído eletromagnético. Duas causas para tal acontecer: por um lado, a proximidade do sensor da bobine de ignição e a relativa permeabilidade da ficha do cabo no sensor, permitem que o campo eletromagnético produzido pela primeira induza uma tensão elétrica no cabo, originando ruído elétrico. Por outro, o capô do veículo, ao dispor de uma propensão apreciável para vibrar durante o funcionamento do motor, devido à fraca resistência à torção e um método de fixação limitado quando fechado, permite que o sensor detete somente as vibrações parasitas e não as provocadas pelo impacto da precipitação.

Por outro lado, os dados obtidos dos ensaios realizados no para-brisas foram claros quanto à incapacidade de o sensor conseguir detetar o impacto das gotas de água nesta superfície. Para além das propriedades e características condicionantes anteriormente referidas, é de realçar as limitações técnicas impostas pela própria DAQ, nomeadamente no que diz respeito à resolução que esta oferece.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHO FUTURO

A capacidade de deformação elástica das superfícies onde o sensor piezoelétrico está instalado determina a capacidade de detecção dos impactos sobre a superfície de ensaio, em conjunto com o método de fixação do sensor. De igual importância, o bom isolamento do sensor de interferências exteriores de origem mecânica, acústica e eletromagnética, bem como a aplicação de um eficaz condicionamento do sinal obtido é crucial para que o sensor tenha uma boa sensibilidade e o sinal obtido disponha de um baixo nível de ruído elétrico.

A realização deste trabalho experimental permitiu concluir que o sensor piezoelétrico utilizado é capaz de detetar chuva com níveis de pluviosidade elevados em superfícies de chapa metálica que apresentem uma espessura consideravelmente reduzida (0,7 mm) e bem isolados elétrica, mecânica e acusticamente. Os valores obtidos dos ensaios no capô com o motor térmico a funcionar mostraram que o sensor fica incapaz de detetar qualquer perturbação causada pela precipitação devido aos elevados níveis de ruído. Relativamente à aplicação do sensor no vidro, os resultados obtidos permitiram concluir que o sensor não consegue detetar qualquer nível de pluviosidade, devido à estrutura tríplice apresentada pelo vidro e que atualmente é utilizada em todos os veículos automóveis por motivos de segurança. As películas plásticas intercaladas entre as camadas de vidro promovem a absorção de vibrações exteriores, impossibilitando a detecção de quaisquer vibrações com causa na superfície oposta àquela onde o sensor está instalado. Por outro lado, a borracha em todo o perímetro do para-brisas e que permite a fixação desta à carroçaria do veículo funciona também como absorvedor de vibrações exteriores ao impacto da precipitação.

Comparativamente às soluções atualmente aplicadas em veículos automóveis para detecção de chuva, nomeadamente os sensores óticos, a solução piezoelétrica fica em desvantagem devido à limitada capacidade de detecção de chuva para níveis de pluviosidade reduzidos, dependendo do tipo de superfície utilizada e da maior sensibilidade a interferências exteriores. Por outro lado, os atuais sensores óticos conseguem ser mais do que simples sensores de chuva, integrando também as funções de sensor de luz, para ativação automática dos dispositivos de iluminação exterior do veículo e até regulação dos mesmos (comutação automática de luzes de estrada para luzes de cruzamento ao incidir uma fonte luminosa sobre o sensor, sinal da presença de um veículo em sentido contrário), tornando a solução ótica mais versátil.

As limitações técnicas dos equipamentos disponíveis, nomeadamente a nível da resolução da DAQ e da propensão para induzir ruído dos cabos utilizados para as ligações nas placas de montagem e ensaio de circuitos elétricos (*bradboards*) onde foram realizadas as montagens dos CCS, foram fatores limitadores da capacidade de medição de valores no decorrer das medições efetuadas. Em ambas as superfícies, a presença de valores aleatórios de ruído e a perda de capacidade de deteção do sensor deveu-se, também, à solução utilizada para fixação do sensor à superfície, que não assegurava um contacto e aderência totais. O contacto do sensor ficou também condicionado pela rugosidade apresentada pelas superfícies e deformação das mesmas, com especial destaque para a chapa metálica. O tipo de CCS utilizado, com recurso a componentes analógicos discretos também contribuiu para a menor sensibilidade do sensor devido à capacidade elétrica introduzida por estes. Sendo o sensor piezoelétrico um sensor de natureza capacitiva que está dependente de valores de tensão muito reduzidos, é importante diminuir ao máximo a capacidade elétrica do conjunto, utilizando conversores A/D e microprocessadores digitais, como referido por alguns autores (Otte *et. al.*, 2010 e Pankey *et. al.*, 2005).

O trabalho desenvolvido permitiu concluir que a capacidade de deteção de chuva, deste sensor piezoelétrico, pode ser melhorada em futuros trabalhos de investigação, com a utilização de mais do que um sensor aplicado numa superfície e com a utilização de soluções de fixação do sensor às superfícies de ensaio. Dada a elevada sensibilidade do sensor a interferências eletromagnéticas, a utilização do sensor num meio mais isolado a nível eletromagnético será mais um fator que irá favorecer a capacidade de deteção de estímulos do sensor e os níveis de ruído medidos. No caso específico do para-brisas, e atendendo ao atual processo de fabrico do mesmo, a implementação do sensor no meio do mesmo, com a remoção parcial de uma ou duas camadas de vidro e colocação do sensor ao nível da camada plástica entre camadas de vidro, poderá melhorar significativamente a capacidade de deteção de chuva do sensor nesta superfície.

Atendendo aos resultados obtidos nos ensaios laboratoriais, onde o sensor demonstrou uma excelente capacidade de detetar impactos de intensidade considerável (1000 J/m^2) em ambas as superfícies, destaque para o potencial estudo e desenvolvimento de outras aplicações com este tipo de sensores no automóvel, tais como um sensor de alarme – deteção de tentativa de quebra de vidro e/ou arrombamento de porta – ou um sensor para acionamento de dispositivos de segurança passiva, como os *airbags* ou os sensores pirotécnicos dos cintos de segurança, em caso de colisão.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abramowitz, Mortimer e Davidson, Michael W. (s/d). Full-Frame CCD Architecture, Em: *Concepts in Digital Imaging Technology*, 07-12-2012, Disponível em: <http://learn.hamamatsu.com/articles/fullframe.html>

Anderson, Mary. (1903). *Window Cleaning Device*, United States Patent Office.

Augusto, José A. Soares. (2011). *Introdução ao Projeto de Filtros e a Funções de Aproximação*, Departamento de Física da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa (DF-FCUL), Lisboa

Cruzeiro, Leonor. (2003). *Mecânica*, Disponível em: http://w3.ualg.pt/~rguerra/fisicaaplicada/docs/cap2_mecânica.pdf

Escola Superior de Tecnologia de Tomar (s/d). *Conceitos na Tecnologia da Imagem Digital*, Disponível em: http://www.aif.estt.ipt.pt/FFicheiros_PDF/FSensitAnalogica_FOTO/FFichas/FID.pdf

Denton, Tom. (2000). *Automobile Electrical and Electronic Systems* (2ª edição), Butterworth-Heinemann, ISBN 0 340 73195 8, Bath

Elbasit, Mohamed A. M. Abd.; Yasuda, Hiroshi e Salmi, Atte. (2010). Simulated Rainfall Erosivity, *Proceedings of 2010 International Conference on Chemistry and Chemical Engineering (ICCCE 2010)*, Malásia, maio 2010

Gautschi, G. (2002). *Piezoelectric Sensorics*, Springer, ISBN 3540422595, Berlim, Alemanha

Hochstein, Peter A. (2003a). *Differential Imaging Rain Sensor*, United States Patent And Trademark Office

Hochstein, Peter A. (2003b). *Interleaved Mosaic Imaging Rain Sensor*, United States Patent And Trademark Office

- Hohl, Roman Marco. (2001). *Relationship Between Hailfall Intensity And Hail Damage On Ground, Determined By Radar And Lightning Observations*, University of Fribourg, Zurique, Suíça
- Iacoponi, Stefano e Di Nunzio, Victorino. (1985). *Device For Automatically Adjusting The Frequency Of Activation Of A Motor Vehicle Windscreen Wiper*, United States Patent And Trademark Office.
- Instituto Nacional de Meteorologia e Geofísica. (1984). *Precipitação – Quantidade total e Número de dias no ano (Precipitação igual ou superior a 1 mm)*, Comissão Nacional do Ambiente, Lisboa
- Kato, Shinishi e Yagi, Toshinori. (2008). *Development Of a Rain-Light Sensor*, Mitsubishi Motors Technical Review, nº 20, (2008), pp. 99 – 102
- Kithil, Philip W. (2002). *New Applications of Capacitive Sensors In Laminated Automotive Glass*, *Proceedings of SAE 2002 World Congress*, ISBN 0-7680-0927-8, EUA, março 2002
- Kommuru, Hima Bindu e Mahmoodi, Hamid. (2009). *ASIC Design Flow Tutorial Using Synopsys Tools*, San Francisco State University, disponível em <http://www.sfsu.edu/Fnecrc/Ffiles/Fsynopsys/520tutorials/FASIC/520Design/520Flow/520Tutorial.pdf>
- Lemelson – MIT. (2001). *Mary Anderson – Windshield Wipers*, Em: *Lemelson – MIT*, 27-09-2011, Disponível em: <http://web.mit.edu/invent/iow/anderson.html>
- Measurement Specialties, Inc. (1999). *Piezo Film Sensors Technical Manual*, Measurement Specialties, Inc.
- Mohapatra, Debashish. (2011). *Basics of Piezoelectric Transducers*, Em: *iPortal*, 21-09-2012, Disponível em: <http://www.debashish.info/index.php/e-learning/instrumentation/instrumentation-devices-a-systems/79-basics-of-piezoelectric-transducers>
- Moheimani, S.O. Reza e Flaming, Andrew J. (2006). *Piezoelectric Transducers for Vibration Control and Damping* (1ª edição), Springer, ISBN 978-1-84628-332-1

- National Instruments Corporation. (s/d). NI-USB 6008, Em: *National Instruments*, 17-09-2012, Disponível em: http://sine.ni.com/gallery/app/ui/page?nodeId=201986&mTitle=NI%20USB-6008&mGallery=set_usb-6008
- National Instruments Corporation. (2012). *User Guide And Specification – NI USB 6008/6009 Bus-Powered Multifunction DAQ USB Device*, National Instruments Corporation, Disponível em: <http://www.ni.com/pdf/manuals/371303m.pdf>
- Nilsson, James W e Riedel, Susan A. (1996). *Electric Circuits* (5ª edição), Addison-Wesley Publishing Company, ISBN 0-201-40100-2, EUA
- Olive III, J. Fred. (2010). Mary Anderson, 04-10-2011, Disponível em: <http://www.encyclopediaofalabama.org/face/Article.jsp?id=h-2553>
- Otte, E.; Qaiser, A.; Sandhu, I. e Tazabekov, A. (s/d). *Capacitive Rain Sensor For Automatic Wiper Control*, Michigan State University, disponível em http://egr.msu.edu/Fclasses/Fece480/Fcapstone/Fspring10/Fgroup06/FDocuments/FECE480_Design_Team6_Final_Report.pdf
- Pankey, Brent W.; Byrne, Colin John.; Ackerman, Mark S.; Rohde, Mitchell M. e Williams, William J. (2005). *Method For Determining A Rate Of Rain*, United States Patent.And trademark Office
- Rain Sensors. (2006)., 21-09-2012, Disponível em: <http://www.golfmkv.com/forums/attachment.php?attachmentid=1357&stc=1&d=1141863851>
- Salmi, Atte.; Elomaa, Lasse.; Kopsala, Panu e Laukkanen, Emmi. (s/d). *Piezoelectric Vaisala Raincap[®] Rain Sensor Applied To Drop Size Distribution Monitoring*, Vaisala Oyj, Helsinquia, Finlândia
- Salmi, Atte e Ikonen, Jouni. (s/d). *Piezoelectric Precipitation Sensor From Vaisala*, Vaisala Oyj, Helsinquia, Finlândia
- Saurer, Eric.; Duthé, Bernard e Jeanmonod, Roland. (1995). *Window, Notably Automobile Vehicle Windscreen, Including An Integrated Ultrasonic Device For Detecting The Presence Of Foreign Bodies On One Of Its Faces*, United States Patent and Trademark Office

Schlegel, Michael e Schuler, Thomas. (2002). Smart Rain-Light-Tunnel Sensor, *Proceedings of SAE 2002 World Congress*, ISBN 0-7680-0927-8, EUA, março 2002

Sensor Technology, Ltd. – Hydrophones, Piezoelectric Materials, Acoustic Transducers. (2008). Material Constants: Definitions, Em: *Technical Notes*, 30-11-2012, Disponível em: <http://www.sensortech.ca/site/index.cfm?DSP=Page&ID=64>

Shiraishi, Yasuhiro. (1985). *Automatic Windshield Wiper Speed Control with Piezoelectric Sensor*, United States Patent And Trademark Office

Silva, Carla. (s/d). *Incertezas e Propagação de Incertezas*, Disponível em: <http://w3.ualg.pt/~lhansson/Incertezas%20e%20Propagação%20de%20Incertezas.pdf>

ST Microelectronics. (2001). *UA741 General Purpose Single Operational Amplifier*, ST Microelectronics, Itália

Standard Quick-mount Piezoelectric Bending Sensors (Generators). (s/d)., 21-09-2012, Disponível em <http://www.piezo.com/prodbg7qm.html>

The Piezoelectric Effect. (s/d). Em: *Tech-faq*, 08-07-2012, Disponível em <http://www.tech-faq.com/piezoelectric-effect.html>

Watanabe, Takashi.; Tsuda, Nobuo.; Tomikawa, Inao., (1987). *Eletro-Optical Rain Detetor For Windshields*, United States Patent And Trademark Office

Windscreen Wipers And Washers (Automobile). (s/d). Em *Depth Tutorials and Information*, 21-04-2011, Disponível em <http://what-when-how.com/automobile/windscreen-wipers-and-washers-automobile/>