

# SUPERCONDENSADORES

Pedro Alberto Macedo e Silva



Departamento de Engenharia Eletrotécnica

Instituto Superior de Engenharia do Porto

2013



Este relatório satisfaz, parcialmente, os requisitos que constam da Ficha da unidade curricular de TEDI, do 2º ano, do Mestrado de Automação e Sistemas.

Candidato: Pedro Alberto Macedo e Silva, 1040163@isep.ipp.pt

Orientação científica: Isabel Maria de Sousa de Jesus, isj@isep.ipp.pt

Coorientação científica: Ramiro de Sousa Barbosa, rsb@isep.ipp.pt



Departamento de Engenharia Eletrotécnica

Instituto Superior de Engenharia do Porto

21 de novembro de 2013



## *Agradecimentos*

Gostaria de agradecer:

- À docente e orientadora, Sr.<sup>a</sup> Eng.<sup>a</sup> Isabel Jesus e ao Sr. Eng.<sup>o</sup> Ramiro Barbosa por todo o apoio que me prestaram na realização deste trabalho.
- A ti Alexandra Magalhães, por todo o apoio, carinho, compreensão e incentivo.
- Aos meus Pais e Tios (Eulália e Salvador) por nunca terem desistido de mim.
- A todos os meus amigos e família, que durante este projeto sempre me ajudaram, apoiaram e encorajaram para alcançar os objetivos pretendidos.
- À empresa onde Estagiei, IBE, em especial aos Eng.<sup>os</sup> António Oliveira, Carlos Costa e Marco Eusébio, por todo o apoio e ajuda.
- A todos os que não estão aqui referidos e que contribuíram de uma forma ou de outra para a minha formação académica e pessoal.

Muito OBRIGADO!



## *Resumo*

Uma nova tecnologia, os EDLC, também denominados por supercondensadores, tem-se tornado numa importante e aliciante área de interesse. Estes regem-se pelos mesmos princípios fundamentais dos condensadores clássicos, no entanto possibilitam receber capacidades superiores, devido a uma maior área de superfície e a um dielétrico menos espesso. Esta particularidade permite obter uma maior densidade energética, comparativamente com os condensadores clássicos e uma maior densidade de potência, comparativamente com as baterias. Consequentemente a utilização de supercondensadores tem aumentado, representando já uma alternativa fiável, segura e amiga do ambiente, em detrimento das baterias comuns. Assim, este projeto tem como principais objetivos, identificar os diferentes tipos de supercondensadores, apresentar as vantagens de cada tipo e explorar a sua resposta, quer no domínio das frequências quer no domínio dos tempos, e por fim modelá-los recorrendo a componentes elétricos clássicos, nomeadamente resistências e condensadores. A modelação foi realizada recorrendo ao MATLAB, através da função de minimização *fminunc* e foram construídos quatro modelos equivalentes, com o objetivo de modelar a resposta dos vários EDLC analisados. Por escassez de tempo o principal foco de análise recaiu sobre o EDLC de 0,022 F.

### *Palavras-Chave*

EDLC, Supercondensadores, Condensadores, ESR, Modelação, Análise no Domínio dos Tempos, Análise em Frequência.



## *Abstract*

A new technology, the EDLC also called as supercapacitors, have become an important and exciting field of interest. These are governed by the same rules of classical capacitors, however they have higher capacities due to larger surface area and thinner dielectric. This feature allows for a higher energy density when compared to classical capacitors and for a higher power density when compared with the batteries.

Consequently the use of supercapacitors has increased, now representing an alternative reliable, safe and environmentally friendly, instead of the common batteries. The main objectives of this project are to identify the different types of supercapacitors, present the advantages of each type and explore their response either in the frequency domain or in the time domain, and modeling them using classical electrical components, such as resistors and capacitors. The modeling was performed using the MATLAB through the function `fminunc` and was constructed four equivalent models, in order to model the response of various EDLC analyzed. For lack of time the main focus of analysis was the EDLC of 0,022 F.

### ***Keywords***

EDLC, Supercapacitors, Capacitors, ESR, Modeling, Time Domain Analysis, Frequency Analysis.



# Índice

<b>SUPERCONDENSADORES</b> .....	<b>I</b>
<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	<b>I</b>
<b>RESUMO</b> .....	<b>III</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>V</b>
<b>ÍNDICE</b> .....	<b>VII</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>XI</b>
<b>ACRÓNIMOS</b> .....	<b>XVII</b>
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO .....	1
1.2. OBJETIVOS.....	2
1.3. CALENDARIZAÇÃO .....	2
1.4. ORGANIZAÇÃO DO RELATÓRIO .....	3
<b>2. CONCEITOS TEÓRICOS</b> .....	<b>5</b>
2.1. ELETROMAGNETISMO .....	5
2.2. CAMPO ELÉTRICO .....	6
2.3. LEI DE COULOMB.....	7
2.4. LEIS DE MAXWELL .....	8
2.5. CONDENSADORES-CONTEXTUALIZAÇÃO HISTÓRICA.....	10
2.6. CONSTITUIÇÃO DOS CONDENSADORES.....	11
2.7. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO.....	12
2.8. TIPOS DE CONDENSADORES .....	13
2.8.1. <i>Condensadores de mica</i> .....	14
2.8.2. <i>Condensadores de cerâmica</i> .....	14
2.8.3. <i>Condensadores eletrolíticos</i> .....	15
2.8.4. <i>Condensadores de tântalo</i> .....	17
2.8.5. <i>Condensador de filme de poliéster</i> .....	18
2.8.6. <i>Condensadores variáveis</i> .....	18
2.8.7. <i>Principais características</i> .....	19
2.9. CAPACIDADE ELÉTRICA DAS ARMADURAS .....	19
2.10. CAMPO ELÉTRICO NAS ARMADURAS .....	20
2.10.1. <i>Condensador de placas paralelas</i> .....	21
2.10.2. <i>Condensador de placas cilíndricas</i> .....	22
2.10.3. <i>Condensador de placas esféricas</i> .....	23
2.11. CÓDIGO DE CORES .....	25

2.12.	CÓDIGO ALFANUMÉRICO .....	26
2.13.	ASSOCIAÇÃO DE CONDENSADORES.....	27
2.14.	ANÁLISE NO DOMÍNIO DOS TEMPOS – CONDENSADORES CLÁSSICOS .....	28
2.15.	ANÁLISE NO DOMÍNIO DAS FREQUÊNCIAS.....	32
<b>3.</b>	<b>SUPERCONDENSADORES.....</b>	<b>37</b>
3.1.	CONTEXTUALIZAÇÃO HISTÓRICA – EDLC (SUPERCONDENSADORES).....	38
3.2.	PESQUISA E DESENVOLVIMENTO – OBJETIVOS FUTUROS PARA OS EDLC .....	40
3.3.	ARMAZENAMENTO DE CARGA NOS EDLC .....	41
3.4.	TIPOS DE EDLC .....	42
3.4.1.	<i>Eletroquímicos</i> .....	43
3.4.2.	<i>Carbonos Ativos</i> .....	43
3.4.3.	<i>Carbono – Nanotubos</i> .....	44
3.4.4.	<i>Carbono – Aerogel</i> .....	45
3.4.5.	<i>Condensadores híbridos</i> .....	45
3.4.6.	<i>Composto Híbrido</i> .....	45
3.4.7.	<i>Assimétricos</i> .....	46
3.4.8.	<i>Tipo bateria</i> .....	46
3.4.9.	<i>Pseudo Condensador</i> .....	47
3.4.10.	<i>Polímeros Condutores</i> .....	47
3.4.11.	<i>Metal óxido</i> .....	48
3.5.	PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DOS EDLC .....	48
3.6.	DENSIDADE ENERGÉTICA .....	49
3.7.	DENSIDADE DE POTÊNCIA.....	50
3.8.	RELAÇÃO ENTRE DENSIDADE ENERGÉTICA E DENSIDADE DE POTÊNCIA .....	50
3.9.	RESISTÊNCIA SÉRIE EQUIVALENTE - ESR .....	52
3.10.	MODELAÇÃO DE EDLC.....	52
3.10.1.	<i>Modelos equivalentes</i> .....	53
3.10.2.	<i>Impedâncias em circuitos RC</i> .....	54
3.10.3.	<i>Análise em frequência dos circuitos equivalentes</i> .....	61
3.10.4.	<i>Modelo de Miller</i> .....	63
3.10.5.	<i>Relações empíricas</i> .....	65
3.10.6.	<i>Limites teóricos</i> .....	66
3.10.7.	<i>Novas áreas de interesse</i> .....	66
3.11.	EDLC VANTAGENS E LIMITAÇÕES.....	67
3.12.	APLICAÇÃO DOS EDLC NO CONTEXTO ATUAL .....	69
3.13.	COMERCIALIZAÇÃO E FABRICANTES DE EDLC .....	71
3.14.	CUSTOS E DISTRIBUIDORES .....	73
<b>4.</b>	<b>DESCRIÇÃO DO HARDWARE/SOFTWARE DESENVOLVIDOS.....</b>	<b>75</b>
4.1.	SOFTWARE DE COMUNICAÇÃO E RECOLHA DE DADOS - SCOPEMETER .....	75
4.2.	PLACA DE AQUISIÇÃO DE DADOS .....	79
4.2.1.	<i>Especificações</i> .....	80
4.2.1.1.	<i>Conversor A/D</i> .....	80

4.2.1.2.	Comunicação RS-232.....	82
4.2.1.3.	<i>Timer</i> .....	84
4.3.	SOFTWARE DE RECOLHA DE DADOS .....	86
<b>5.</b>	<b>MODELAÇÃO E ANÁLISE DOS SUPERCONDENSADORES .....</b>	<b>89</b>
5.1.	CONDENSADORES CLÁSSICOS – ANÁLISE EM FREQUÊNCIA.....	89
5.2.	VALIDAÇÃO DOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS .....	92
5.2.1.	<i>Simulações no Pspice</i> .....	92
5.3.	EDLC E ESPECIFICAÇÕES .....	94
5.4.	ANÁLISE NO DOMÍNIO DOS TEMPOS .....	96
5.5.	LINEARIDADE DOS EDLC .....	109
5.6.	CONSTRUÇÃO DO MODELO EQUIVALENTE .....	111
5.6.1.	<i>Determinação da Função de transferência do sistema</i> .....	111
5.6.2.	<i>Modelação em Matlab</i> .....	115
5.6.3.	<i>Implementação do Modelo equivalente</i> .....	117
<b>6.</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>131</b>
	<b>REFERÊNCIAS DOCUMENTAIS .....</b>	<b>133</b>
	<b>ANEXO A. MATERIAL UTILIZADO .....</b>	<b>137</b>
	<b>ANEXO B. – LAYOUT DA PLACA DE AQUISIÇÃO DE DADOS .....</b>	<b>139</b>



## *Índice de Figuras*

Figura 1 – Lei de Coulomb [1].	8
Figura 2 – Garrafa de Leiden [3].	11
Figura 3 – Condensador após concluir o processo de carga [5].	13
Figura 4 – Constituição do condensador de mica (esquerda) e após o encapsulamento (direita) [6].	14
Figura 5 – Constituição do condensador de cerâmica [4].	15
Figura 6 – Constituição do condensador eletrolítico [4].	16
Figura 7 – Condensador eletrolítico [7].	16
Figura 8 – Constituição do condensador tântalo [4].	17
Figura 9 – Constituição do condensador de poliéster [4].	18
Figura 10 – Condensador variável [8].	19
Figura 11 – Linhas de campo elétrico num condensador de placas paralelas [9].	21
Figura 12 – Condensador cilíndrico (vista lateral e frontal) [10].	23
Figura 13 – Condensador esférico, corte [11].	24
Figura 14 – Exemplo de código de cores em condensadores [12].	26
Figura 15 – Exemplo de condensador com código alfanumérico [12].	26
Figura 16 – Associação em série (esquerda) e em paralelo (direita).	27
Figura 17 – Circuito para ilustrar a carga do condensador.	29
Figura 18 – Figura para ilustrar a descarga do condensador.	29
Figura 19 – Tensão no condensador durante a carga e a descarga [13].	30
Figura 20 – Circuito RC para ilustrar a carga do condensador.	31
Figura 21 – Circuito RC para ilustrar a descarga do condensador.	31
Figura 22 – Circuito RC série.	32
Figura 23 – Diagrama de Bode das amplitudes, considerando $\omega c = 1$ .	34
Figura 24 – Diagrama de Bode da Fase, considerando $\omega c = 1$ .	35
Figura 25 – Constituição de um EDLC e processo de carga [14].	41
Figura 26 – Tipos de EDLC [15].	42
Figura 27 – Eléctrodo de Nanotubos [16].	44
Figura 28 – Relação entre densidade energética e densidade potencial para os diversos acumuladores de tensão [20].	51
Figura 29 – Exemplo de EDLC real.	52
Figura 30 – Hierarquia de circuitos equivalentes [21].	54
Figura 31 – Circuito RC série [22].	55
Figura 32 – Digrama complexo do circuito RC [22].	56

Figura 33 – Diagrama fasorial do circuito RC. ....	57
Figura 34 – Circuito RC paralelo [22]. ....	58
Figura 35 – Diagrama complexo do circuito RC paralelo [22]. ....	59
Figura 36 – Diagrama fasorial do circuito RC paralelo [22]. ....	60
Figura 37 – Diagrama de Nyquist para o modelo A [21]. ....	61
Figura 38 – Diagrama de Nyquist para o modelo B [21]. ....	62
Figura 39 – Diagrama de Nyquist para o modelo C [21]. ....	62
Figura 40 – Diagrama de Nyquist para o modelo D [21]. ....	63
Figura 41 – Modelo de Miller [21]. ....	64
Figura 42 – Cálculo da capacidade parcial do modelo de Miller [21]. ....	65
Figura 43 – Eficiência em função do ciclo de vida dos dispositivos de armazenamento [25]. ..	69
Figura 44 – Sistema de <i>backup</i> com EDLC [20]. ....	70
Figura 45 – Veículo a hidrogénio [26]. ....	71
Figura 46 – Aplicação para recolha de dados através do <i>Scopemeter</i> . ....	76
Figura 47 – Escolha da percentagem mínima entre variações da frequência. ....	77
Figura 48 – Exemplo de um ficheiro exportado através da aplicação. ....	78
Figura 49 – Placa de aquisição de dados. ....	79
Figura 50 – Fluxograma da função de leitura do A/D. ....	81
Figura 51 – Comunicação assíncrona [28]. ....	82
Figura 52 – Teste de comunicação realizado através do <i>Hyperterminal</i> . ....	84
Figura 53 – Aplicação para recolha de resultados. ....	87
Figura 54 – Circuito RC série. ....	90
Figura 55 – Diagramas de Bode com o condensador ID1. ....	91
Figura 56 – Diagramas de Bode com o condensador ID2. ....	91
Figura 57 – Diagrama de Bode do ensaio 3. ....	93
Figura 58 – Diagrama de Bode do ensaio 4. ....	94
Figura 59 – EDLC utilizados. ....	95
Figura 60 – Circuito utilizado para recolher a resposta no domínio dos tempos. ....	97
Figura 61 – Resposta ao degrau do EDLC de 0,022 F. ....	99
Figura 62 – Resposta ao degrau do EDLC de 0,22 F. ....	99
Figura 63 – Resposta ao degrau do EDLC de 0,33 F. ....	100
Figura 64 – Resposta ao degrau do EDLC de 3,3 F. ....	100
Figura 65 – Resposta ao degrau do EDLC de 25 F. ....	101
Figura 66 – Resposta ao degrau do EDLC de 35 F. ....	101
Figura 67 – Resposta do EDLC de 0,022 F, aplicando uma onda quadrada com amplitude de 1 V. ....	103
Figura 68 – Resposta do EDLC de 0,22 F, aplicando uma onda quadrada com amplitude de 1 V. ....	103

Figura 69 – Resposta do EDLC de 0,33 F, aplicando uma onda quadrada com amplitude de 1 V.....	104
Figura 70 – Resposta do EDLC de 3,3 F, aplicando uma onda quadrada com amplitude de 1 V.....	104
Figura 71 – Resposta do EDLC de 25 F, aplicando uma onda quadrada com amplitude de 1 V.....	105
Figura 72 – Resposta do EDLC de 35 F, aplicando uma onda quadrada com amplitude de 1 V.....	105
Figura 73 – Resposta impulsional do EDLC de 0,022 F. ....	106
Figura 74 – Resposta impulsional do EDLC de 0,22 F. ....	106
Figura 75 – Resposta impulsional do EDLC de 0,33 F. ....	107
Figura 76 – Resposta impulsional do EDLC de 3,3 F. ....	107
Figura 77 – Resposta impulsional do EDLC de 25 F. ....	108
Figura 78 – Resposta impulsional do EDLC de 35 F. ....	108
Figura 79 – Resposta no domínio dos tempos, aplicando três degraus de entrada de diferentes amplitudes ao EDLC de 0,022 F. ....	110
Figura 80 – Linearidade entre supercondensadores de diferentes capacidades.....	110
Figura 81 – Circuito RC série. ....	111
Figura 82 – Circuito misto com um condensador e duas resistências. ....	112
Figura 83 – Circuito misto com dois condensadores e duas resistências.....	113
Figura 84 – Circuito misto com três condensadores e três resistências.....	114
Figura 85 – Placa de aquisição e modelo equivalente implementado.....	118
Figura 86 – Modelo equivalente $G_1$ para o EDLC de 0,022 F e entrada em degrau unitário, com um condensador clássico de 2200 $\mu\text{F}$ .....	119
Figura 87 – Modelo equivalente $G_1$ para o EDLC de 0,022 F e entrada em degrau unitário, com um condensador clássico de 3300 $\mu\text{F}$ .....	120
Figura 88 – Modelo equivalente $G_1$ para o EDLC de 0,022 F com um condensador clássico de 2200 $\mu\text{F}$ e entrada em onda quadrada.....	120
Figura 89 – Modelo equivalente $G_1$ para o EDLC de 0,022 F com um condensador clássico de 3300 $\mu\text{F}$ e entrada em onda quadrada.....	121
Figura 90 – Resposta ao pulso para o EDLC de 0,022 F, do condensador de 2200 $\mu\text{F}$ .....	121
Figura 91 – Resposta ao pulso para o EDLC de 0,022 F, do condensador de 3300 $\mu\text{F}$ .....	122
Figura 92 – Resposta ao degrau para o EDLC de 0,022 F, através do modelo equivalente $G_2$ . ....	122
Figura 93 – Resposta à onda quadrada para o EDLC de 0,022F, através do modelo equivalente $G_2$ . ....	123
Figura 94 – Resposta ao pulso para o EDLC de 0,022 F, através do modelo equivalente $G_2$ .	123
Figura 95 – Modelação do EDLC de 0,022 F, através do modelo equivalente $G_3$ e aplicando à sua entrada um degrau unitário. ....	124

Figura 96 – Modelação do EDLC de 0,022 F, através do modelo equivalente $G_3$ e aplicando à sua entrada uma onda quadrada. ....	124
Figura 97 – Modelação do EDLC de 0,022 F, através modelo equivalente $G_3$ e aplicando à sua entrada um pulso. ....	125
Figura 98 – Modelação do EDLC de 0,022 F, através do modelo equivalente $G_3$ , aplicando à sua entrada um degrau unitário e $C_2=2200 \mu\text{F}$ . ....	126
Figura 99 – Modelação do EDLC de 0,022 F, através do modelo equivalente $G_3$ , aplicando à sua entrada uma onda quadrada e $C_2=2200 \mu\text{F}$ . ....	126
Figura 100 – Modelação do EDLC de 0,022 F, através do modelo equivalente $G_3$ , aplicando à sua entrada um pulso e $C_2=2200 \mu\text{F}$ .....	126
Figura 101 – Modelação do EDLC de 0,022 F, através do modelo equivalente $G_4$ e aplicando à sua entrada um degrau unitário.....	127
Figura 102 – Modelação do EDLC de 0,022 F, através do modelo equivalente $G_4$ e aplicando à sua entrada uma onda quadrada. ....	128
Figura 103 – Modelação do EDLC de 0,022 F, através do modelo equivalente $G_4$ e aplicando à sua entrada um pulso. ....	128
Figura 104 – <i>Scopemeter</i> – Fluke 123 [30].....	137
Figura 105 – Gerador de sinais TopWard 8110 [31].....	138

## *Índice de Tabelas*

Tabela 1 – Diagrama de Gantt.....	2
Tabela 2 – Permittividade relativa [4] .....	12
Tabela 3 – Principais características dos vários tipos de condensadores [4].....	19
Tabela 4 – Código de cores [12]. .....	25
Tabela 5 – Código alfanumérico [12].....	27
Tabela 6 – Resumo das principais características dos vários tipos de EDLC [15].....	49
Tabela 7 – Comparação das propriedades de alguns dispositivos de armazenamento de energia [25]. .....	68
Tabela 8 – Fabricantes de EDLC [15]. .....	72
Tabela 9 – Preços e quantidades mínimas para alguns distribuidores.....	73
Tabela 10 – Correspondência entre período de amostragem e número de incrementos.....	86
Tabela 11 – Ensaio realizados com condensadores clássicos. ....	90
Tabela 12 – Constantes de tempo utilizadas no Pspice. ....	93
Tabela 13 – EDLC utilizados.....	95
Tabela 14 – Densidade de energia e potência dos EDLC utilizados. ....	96
Tabela 15 – Constantes de tempo definidas. ....	97
Tabela 16 – Tensões de entradas aplicadas (em degrau). ....	98
Tabela 17 – Constantes de tempo obtidas. ....	102
Tabela 18 – Resultados obtidos na modelação por MATLAB, para um sistema de 1ª ordem. ....	116
Tabela 19 – Valores obtidos para a modelação do EDLC de 0,022 F, com um circuito misto de duas resistências e um condensador. ....	116
Tabela 20 – Valores obtidos para a modelação do EDLC de 0,022 F, com um circuito misto de duas resistências e dois condensadores.....	117
Tabela 21 – Valores obtidos para a modelação do EDLC de 0,022 F, com um circuito misto de três resistências e três condensadores.....	117
Tabela 22 – Condensadores utilizados para obtenção do modelo.....	118
Tabela 23 – Erros ISE e IAE obtidos.....	129



## *Acrónimos*

A/D	–	<i>Analog to Digital</i>
bps	–	<i>Bits per Second</i>
CD-ROM	–	<i>Compact Disk Read Only Memory</i>
DC	–	<i>Direct Current</i>
DoE	–	<i>United States Department of Energy</i>
EDLC	–	<i>Electric Double Layer Capacitor</i>
ESR	–	<i>Equivalent Séries Resistance</i>
Fosc	–	<i>Frequency Oscillator</i>
IAE	–	<i>Integral Absolute Error</i>
IGBT	–	<i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i>
INTCON	–	<i>Interrupt Control Register</i>
ISE	–	<i>Integral Square Error</i>
LED	–	<i>Ligth Emitting Diode</i>
LED	–	<i>Light Emitting Diode</i>
MATLAB	–	<i>Matrix Laboratory</i>
NEC	–	<i>Nippon Electric Company</i>
PCB	–	<i>Printed Circuit Board</i>
PIE1	–	<i>Peripheral Interrupt Enable Register 1</i>

RMS	–	<i>Root Mean Square</i>
SI	–	<i>Système International d’Unités</i>
SOHIO	–	<i>The Standard Oil Company</i>
SPBRG	–	<i>EUSART Baud Rate Generator Register Low Byte</i>
T0CON	–	<i>Timer0 Control Register</i>
TAD	–	<i>A/D Acquisition Time Select bits</i>
TV	–	<i>Television</i>
UART	–	<i>Universal Asynchronous Receiver/Transmitter</i>
USA	–	<i>United States of America</i>
USB	–	<i>Universal Serial Bus</i>





# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO

Este projeto foi promovido pelo departamento de Engenharia Eletrotécnica do Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP), no âmbito da unidade curricular TEDI, do Mestrado de Automação e Sistemas.

Os supercondensadores, ou EDLC, representam cada vez mais no âmbito industrial uma alternativa ecológica, às baterias comuns. De facto, os supercondensadores possuem uma maior densidade de potência do que as baterias, assegurando para além disso uma maior densidade de energia quando comparados com os condensadores clássicos, por esse motivo caracterizar a sua resposta é cada vez mais uma necessidade, quer no domínio dos tempos, quer no domínio das frequências.

Para facilitar esta análise foram utilizadas as potencialidades dos *softwares* Pspice e MATLAB.

## 1.2. OBJETIVOS

O objetivo principal deste projeto é modelar a resposta dos supercondensadores, através de um conjunto de componentes comuns, tais como resistências e condensadores.

Para atingir este objetivo foi necessário subdividir o projeto em múltiplas tarefas, das quais:

- Desenvolvimento da placa de aquisição de dados (através de uma PIC4550 e comunicação RS232);
- Obtenção da resposta no domínio dos tempos;
- Validação dos valores experimentais, segundo os dados do fabricante;
- Modelação dos EDLC através do MATLAB;
- Construção dos modelos equivalentes definidos;
- Validação dos modelos obtidos;
- Obtenção da resposta no domínio das frequências;
- Discussão e apresentação dos resultados obtidos.

## 1.3. CALENDARIZAÇÃO

A elaboração do projeto levou à calendarização apresentada na Tabela 1.

**Tabela 1 – Diagrama de Gantt.**

ID	Tarefa	Duração	Q4 12			Q1 13			Q2 13			Q3 13			Q4 13		
			Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out		
1	Pesquisa	55d	[Barra azul cobrindo Out, Nov, Dez, Jan, Feb, Mar]														
2	Desenvolvimento	35d	[Barra azul cobrindo Dez, Jan, Feb, Mar, Abr, Mai]														
3	Aquisição do material necessário	32d	[Barra azul cobrindo Jan, Feb, Mar, Abr]														
4	Validação de resultados	89d	[Barra azul cobrindo Mar, Abr, Mai, Jun, Jul, Ago, Set]														
5	Recolha das resposta/Modelação	50d	[Barra azul cobrindo Jun, Jul, Ago, Set, Out]														
6	Relatório	34d	[Barra azul cobrindo Set, Out]														

#### **1.4. ORGANIZAÇÃO DO RELATÓRIO**

Este relatório encontra-se dividido em seis capítulos: Introdução, Conceitos teóricos, Supercondensadores, Descrição do *Hardware/Software* desenvolvidos, Modelação e análise dos supercondensadores e Conclusões. Na Introdução, é feita a contextualização do projeto, a sua calendarização e objetivos. Nos capítulos, “Conceitos teóricos” e “Supercondensadores”, são abordados os conceitos fundamentais para a compreensão do projeto, que é descrito nos dois capítulos seguintes, “Descrição do *Hardware/Software* desenvolvidos” e Modelação e análise dos supercondensadores. As considerações e conclusões são incluídas no sexto e último capítulo, “Conclusões”.



## 2. CONCEITOS TEÓRICOS

Para uma melhor compreensão dos aspetos abordados ao longo deste trabalho, neste capítulo serão abordadas algumas noções sobre eletrotécnica, nomeadamente sobre os condensadores e sobre os fenómenos eletromagnéticos a eles associados.

Inicialmente é necessário assimilar que existem vários tipos de condensadores, que se distinguem não só pela forma que apresentam, mas principalmente pelos materiais que os constituem. Estes fatores influenciam diretamente a sua capacidade e a sua aplicação.

### 2.1. ELETROMAGNETISMO

O eletromagnetismo é representado por um conjunto de quatro equações designadas de leis de Maxwell (secção 2.4), que foram desenvolvidas tendo por base outras descobertas relevantes. Estas leis explicam e descrevem todos os fenómenos ocorridos entre a eletricidade e o magnetismo. Um dos fenómenos mais relevantes foi descoberto por Faraday em 1831. Este descobriu a indução eletromagnética e possibilitou a construção de aparelhos que funcionam tendo por base este fenómeno. Um exemplo deste tipo de aparelhos é o dínamo, que transforma energia mecânica em energia elétrica, por indução. De facto, grande parte dos aparelhos que nos rodeiam (motor elétrico, galvanómetro), são

consequência de fenómenos eletromagnéticos que sem a ajuda desta descoberta ou o apoio desta ciência seriam difíceis de compreender. Desta forma, e porque os componentes elétricos que serão abordados têm como princípio de funcionamento o campo elétrico, na subsecção seguinte serão apresentados os seus aspetos fundamentais.

## 2.2. CAMPO ELÉTRICO

O campo elétrico eletricamente representado pelas linhas de campo que existem em torno de qualquer corpo carregado. Estas linhas são linhas imaginárias que são traçadas para indicar a intensidade do campo elétrico, isto é, quanto maior for a densidade das linhas, mais intenso é o campo.

Se uma carga carregada com carga  $q$  for abandonada nas proximidades de um corpo com carga  $Q$ , esta pode ser atraída ou repelida por  $Q$  sob a ação de uma força  $F$ , designada por força elétrica. Forma-se assim em torno das cargas um campo elétrico.

Matematicamente a intensidade do campo elétrico  $E$  produzido pela carga  $Q$  é definido pela equação:

$$E = \frac{F}{q} \quad (1)$$

Na equação (1), se a carga  $q$  estiver carregada positivamente, então  $F$  e  $E$  terão o mesmo sentido, caso  $q$  esteja carregado negativamente então  $F$  e  $E$  terão sentidos contrários. A unidade SI para o campo elétrico é Newton/Coulomb [N/C].

A análise de cargas pode ser estendida a superfícies eletricamente carregadas de qualquer formato e tamanho, como é o caso dos condensadores. De facto o que é aqui referido traduz-se pela Lei de Coulomb (secção 2.3).

### 2.3. LEI DE COULOMB

A lei de Coulomb é equivalente à primeira lei de Maxwell, e descreve a interação entre duas ou mais cargas pontuais.

Se duas cargas carregadas eletricamente possuírem o mesmo sinal, a direção da linha de força contrária a elas (afastando-se) diz-se repulsiva. Se por outro lado as cargas possuírem sinais contrários, a direção das linhas de força tem o mesmo sentido (aproximando-se) diz-se atrativa.

Matematicamente a Lei de Coulomb é definida pela equação:

$$F_{12} = \frac{k q_1 q_2}{r_{12}^2} e_{12} \quad (2)$$

onde  $F_{12}$  representa a força que a carga 1 exerce sobre a carga 2,  $e_{12}$  é um vetor de módulo unitário, no sentido do ponto 1 ao ponto 2,  $r_{12}$  é a distância entre os dois pontos e  $q_1$  e  $q_2$  são os valores das duas cargas.  $k$  representa a constante de Coulomb e o seu valor no sistema SI é dado por:

$$k = 9 * 10^9 \left[ \frac{N.m^2}{C^2} \right] \quad (3)$$

Na Figura 1 é possível identificar as variáveis descritas pela Lei de Coulomb.

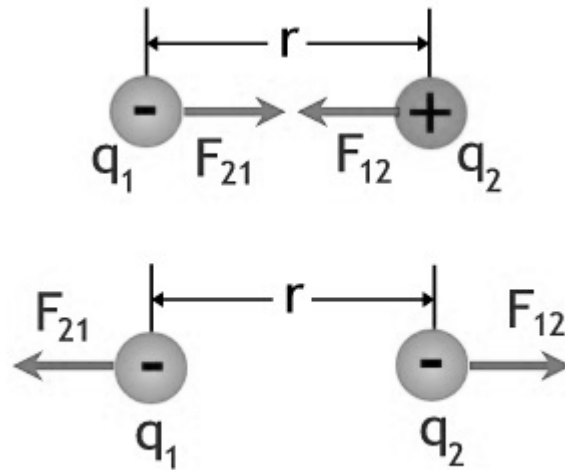


Figura 1 – Lei de Coulomb [1].

As duas primeiras cargas da Figura 1 são opostas (negativo - positivo) e por isso a força entre estas é atrativa, ou seja,  $F_{21}$  e  $F_{12}$  convergem para o mesmo ponto. Por sua vez no segundo caso as duas cargas têm o mesmo sinal (negativo - negativo) e as forças  $F_{21}$  e  $F_{12}$  são divergentes.

## 2.4. LEIS DE MAXWELL

Baseando-se nos estudos de Faraday, Gauss e Volt, Maxwell unificou em 1864 todos os fenômenos eletromagnéticos observáveis nesses trabalhos, onde estabeleceu relações entre as várias teorias da época. De facto este demonstrou que os fenômenos eletromagnéticos podiam ser descritos por quatro Leis:

- Lei de Gauss para a eletricidade;
- Lei de Gauss para o magnetismo;
- Lei de Ampère;
- Lei de Faraday.

A Lei de Gauss para a eletricidade (campo elétrico), matematicamente é definida pela equação (4):

$$\iint \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{Q}{\epsilon_0} \quad (4)$$

onde  $\vec{E}$  representa o campo elétrico,  $d\vec{A}$  representa uma infinitésima parte da área da superfície,  $Q$  representa a carga total e  $\epsilon_0$  corresponde à constante elétrica.

A Lei de Gauss para o magnetismo (campo magnético), matematicamente é definida pela equação (5):

$$\iint \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0 \quad (5)$$

onde  $\vec{B}$  corresponde ao valor do campo magnético e  $d\vec{A}$  corresponde a uma infinitésima parte da área da superfície.

A Lei de Ampère, matematicamente é definida pela equação (6):

$$\int \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt} \quad (6)$$

onde  $\vec{B}$  corresponde ao valor do campo magnético,  $d\vec{l}$  corresponde a uma infinitésima parte da curva  $C$  [2],  $\mu_0$  corresponde à constante magnética,  $I$  corresponde ao valor da corrente que atravessa a superfície  $s$ ,  $\epsilon_0$  já definido anteriormente e  $\frac{d\Phi_E}{dt}$  representa a variação do fluxo elétrico ao longo do tempo.

A Lei de Faraday, matematicamente é definida pela equação (7).

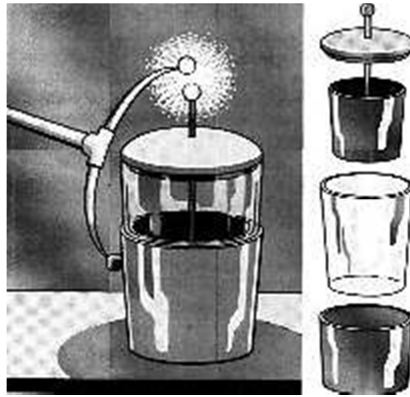
$$\int \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d\Phi_B}{dt} \quad (7)$$

onde  $\vec{E}$  representa o campo elétrico,  $d\vec{l}$  já definido anteriormente,  $\frac{d\Phi_B}{dt}$  representa a variação do fluxo magnético ao longo do tempo.

De uma forma geral a primeira lei, a lei de Gauss para a eletricidade, relaciona os campos elétricos, as suas fontes e as cargas elétricas. A segunda lei, é equivalente à primeira mas aplicável a campos magnéticos. A terceira lei, ou lei de Ampère, descreve a relação entre um campo magnético e a corrente elétrica que o origina e por último a quarta lei, a lei de Faraday descreve as características do campo elétrico, originando assim um fluxo magnético variável. Objetivamente as Leis de Maxwell abordam os conceitos sobre campos elétricos e a interação entre cargas, o campo magnético e o fenómeno de indução eletromagnética.

## 2.5. CONDENSADORES-CONTEXTUALIZAÇÃO HISTÓRICA

O primeiro condensador foi inventado em 1745 pelo cientista holandês Pieter van Musschenbroek. Enquanto usava uma garrafa de vidro para isolar uma lâmina metálica no seu interior, este descobriu que quando segurava a garrafa na mão, a carga elétrica que conseguia armazenar era muito maior do que quando a mesma se encontrava sobre a mesa. Este aumento deve-se ao facto de na mão serem induzidas cargas de sinal contrário que atraem as placas de metal. Aproximando uma segunda lâmina metálica por fora da garrafa, facilita-se a entrada da carga elétrica, podendo assim ser armazenadas cargas mais elevadas. Esta invenção é atualmente designada por garrafa de Leiden, em homenagem à cidade onde o cientista holandês viveu, e o seu princípio é utilizado frequentemente nos circuitos elétricos, sobretudo nos que necessitam que a corrente varie rapidamente. A Figura 2 ilustra como é possível construir e verificar a experiência de Pieter van Musschenbroek.



**Figura 2 – Garrafa de Leiden [3].**

## **2.6. CONSTITUIÇÃO DOS CONDENSADORES**

Atualmente o princípio da garrafa de Leiden ainda se mantém intacto. De facto, os condensadores são constituídos por duas placas condutoras, designadas por armaduras, separadas por um material isolante, denominado por dielétrico.

São exemplos de materiais dielétricos o ar, a mica, o plástico, o óxido ou qualquer outro material que impeça a passagem da corrente elétrica. A Tabela 2 apresenta alguns dos materiais dielétricos utilizados em condensadores, e as suas respetivas permitividades relativas (capacidade do material dielétrico de armazenar energia elétrica).

**Tabela 2 – Permitividade relativa [4]**

<b>Dielétrico</b>	<b><math>\epsilon_r</math> (Valor médio)</b>
<b>Vácuo</b>	1,0
<b>Ar</b>	1,0006
<b>Teflon</b>	2,0
<b>Papel parafinado</b>	2,5
<b>Borracha</b>	3,0
<b>Óleo de transformador</b>	4,0
<b>Mica</b>	5,0
<b>Porcelana</b>	6,0
<b>Baquelite</b>	7,0
<b>Vidro</b>	7,5
<b>Água destilada</b>	80,0
<b>Titanato de bário e estrôncio</b>	7500,0

Da observação da Tabela 2, é possível concluir que o material dielétrico mais eficaz é o vácuo sendo o menos eficaz o titanato de bário e estrôncio. Na secção seguinte será abordado o princípio de funcionamento dos condensadores.

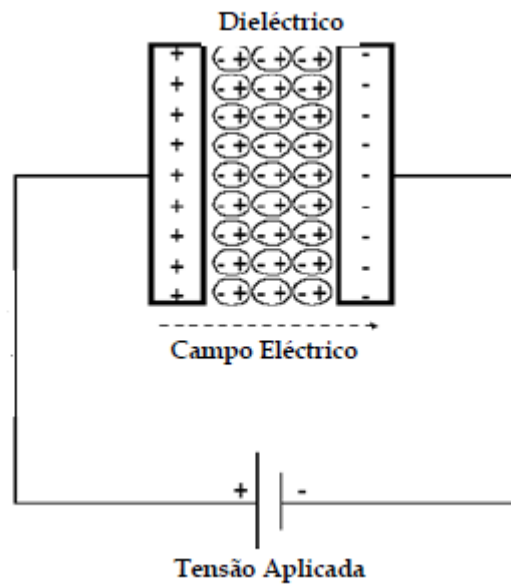
## **2.7. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO**

Na secção 2.2 foi introduzido o conceito de campo elétrico numa carga, no entanto esta análise, como se poderá ver posteriormente (secção 2.10) pode ser estendida a superfícies carregadas de qualquer forma, como é o caso dos condensadores.

A definição de campo elétrico é essencial para explicar o princípio de funcionamento dos condensadores. De facto, considerando apenas um condensador clássico e uma fonte de alimentação de corrente contínua, no instante em que é aplicada uma tensão aos terminais do condensador temos uma transferência de cargas entre os seus elétrodos, ou seja, os eletrões deslocam-se da armadura positiva do condensador para a armadura negativa.

Este deslocamento estabelece um fluxo de elétrons (corrente elétrica), mesmo não havendo passagem de cargas elétricas através do dielétrico do condensador.

O processo de carga do condensador diz-se concluído quando a tensão nas armaduras atinge o valor da tensão aplicada aos terminais (Figura 3), desde que este não exceda a tensão máxima admitida pelo condensador.



**Figura 3 – Condensador após concluir o processo de carga [5].**

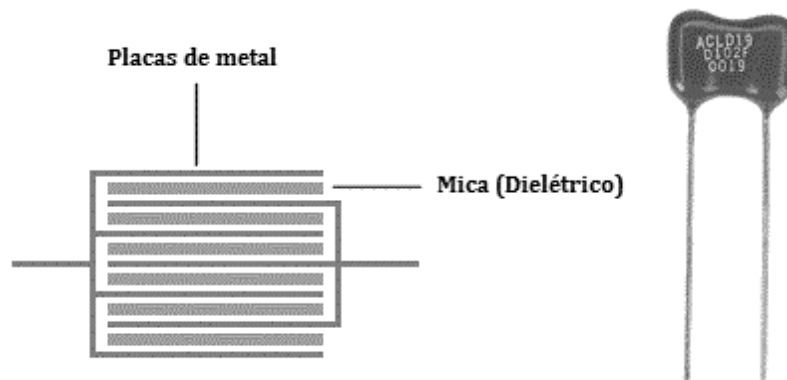
## **2.8. TIPOS DE CONDENSADORES**

Os condensadores, à semelhança do que acontece com as resistências, podem ser divididos em dois grupos, condensadores de valor fixo e condensadores de valor variável.

Os condensadores fixos mais comuns são os de mica, cerâmica, eletrolíticos, de tântalo e de filme de poliéster. De seguida serão analisadas algumas das principais características de cada um destes condensadores.

### 2.8.1. Condensadores de mica

O condensador de mica típico é constituído basicamente por placas de mica separadas por lâminas metálicas, que constituem as placas (Figura 4). As placas são ligadas a dois terminais. A área total do condensador corresponde à área de uma das placas multiplicada pelo número de lâminas.

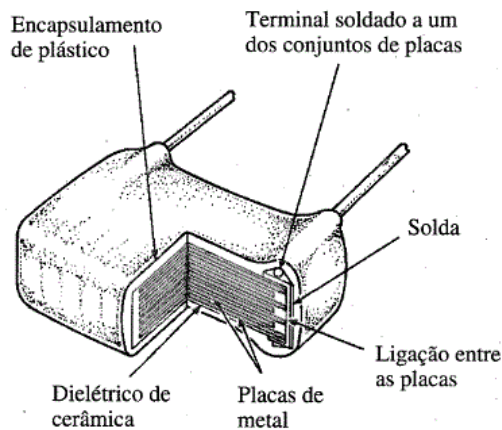
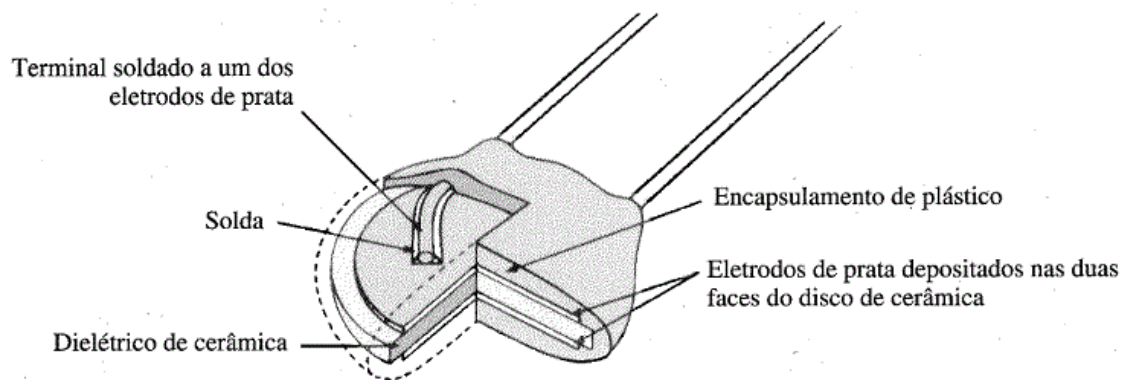


**Figura 4 – Constituição do condensador de mica (esquerda) e após o encapsulamento (direita) [6].**

Este condensador apresenta excelentes características mesmo quando submetido a grandes variações de temperatura ou de tensão. A corrente de fuga é reduzida e normalmente a capacidade destes condensadores varia entre alguns pF e 0,2  $\mu$ F. As tensões de trabalho são de 100 V ou superiores.

### 2.8.2. Condensadores de cerâmica

Existem condensadores de cerâmica de vários tamanhos e formas. No entanto a estrutura básica é praticamente a mesma para todos. As placas, normalmente são de cobre ou prata e o dielétrico entre elas é constituído por cerâmica. Os terminais são ligados às placas através de eléctrodos, sendo posteriormente aplicada uma camada isolante de cerâmica ou plástico sobre as placas e o dielétrico (Figura 5).

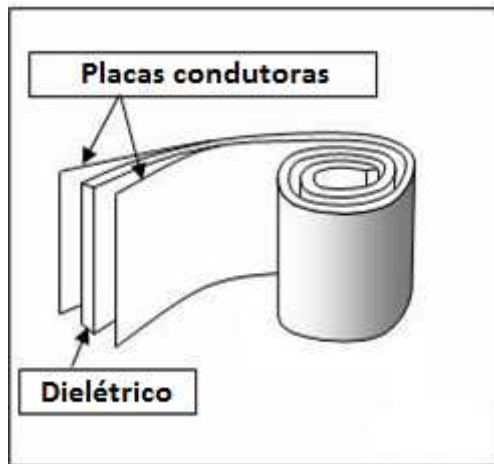


**Figura 5 – Constituição do condensador de cerâmica [4].**

As principais características deste tipo de condensadores são: corrente de fuga muito baixa e capacidade de serem usados em circuitos de corrente alternada ou de corrente contínua. Estes condensadores podem apresentar valores que vão desde alguns pF até cerca de 2  $\mu$ F, com tensões de trabalho extremamente elevadas (5000 V ou superior).

### 2.8.3. Condensadores eletrolíticos

A estrutura básica de um condensador eletrolítico consiste numa folha de alumínio com uma face coberta por óxido de alumínio. O alumínio representa a placa positiva e o óxido o dielétrico. Uma camada de papel ou gaze saturada de eletrólito é colocada sobre o óxido de alumínio e uma outra folha de alumínio (sem a cobertura de óxido) é colocada sobre a camada com vista a formar a placa negativa.



**Figura 6 – Constituição do condensador eletrolítico [4].**

Este tipo de condensadores é utilizado com maior frequência em circuitos que necessitam de capacidades na ordem de um a milhares de  $\mu\text{F}$  (Figura 7). Normalmente são utilizados em circuitos de corrente contínua porque apresentam boas características de isolamento quando a tensão é aplicada com a polaridade direta, quando a tensão é aplicada com polaridade inversa este apresenta um comportamento semelhante a um curto-circuito. Existem condensadores eletrolíticos que podem ser utilizados em circuitos de corrente alternada e em casos nos quais a tensão inverte a polaridade por curtos períodos de tempo.



**Figura 7 – Condensador eletrolítico [7].**

As suas principais características são a tensão de trabalho e a tensão de pico. A tensão de trabalho pode ser aplicada entre os terminais do condensador por longos períodos de tempo sem que este seja danificado. A tensão de pico é a tensão máxima contínua que pode ser aplicada por curtos períodos de tempo. Este tipo de condensadores normalmente costuma apresentar baixas tensões de rutura e correntes de fuga relativamente elevadas. Podem ser encontrados desde alguns  $\mu\text{F}$  até milhares de Farad, com tensões de trabalho na ordem dos 500 V.

#### 2.8.4. Condensadores de tântalo

Existem dois tipos de condensadores de tântalo, os de dielétrico sólido e os de dielétrico húmido (Figura 8). Em ambos os casos, tântalo em pó com elevado grau de pureza é compactado num invólucro de forma retangular ou cilíndrica. O terminal do ânodo é então inserido e a peça é tratada termicamente a altas temperaturas, tornando-se extremamente porosa. O resultado é um material com uma superfície muito grande em relação ao seu volume, sendo imerso numa camada de dióxido de magnésio muito fina, que cobre todos os poros do material. É adicionado um eletrólito para estabelecer o contacto entre a camada de óxido e o cátodo, originando assim um condensador de tântalo sólido. Quando é utilizado um ácido húmido, o condensador resultante é chamado de condensador de tântalo de dielétrico húmido.

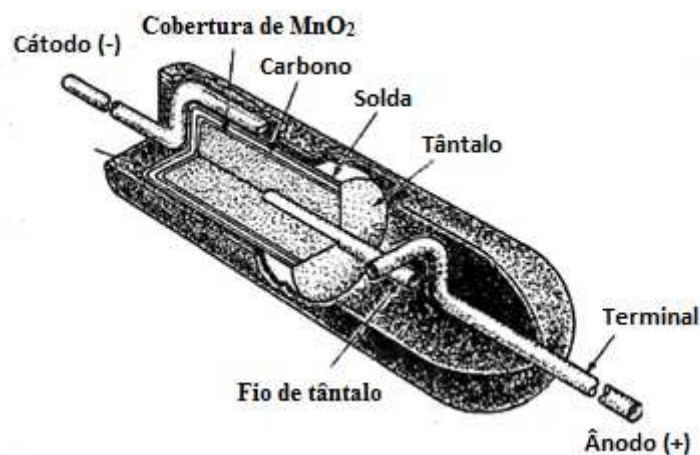
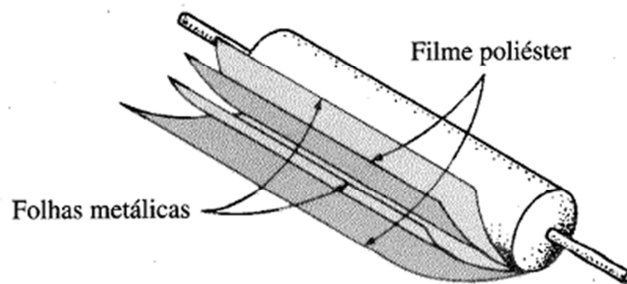


Figura 8 – Constituição do condensador tântalo [4].

### 2.8.5. Condensador de filme de poliéster

A estrutura básica deste tipo de condensadores consiste em duas folhas de metal separadas por uma folha de poliéster (Figura 9). A camada externa de poliéster comporta-se como um invólucro isolante e por sua vez as folhas de metal são ligadas a terminais que se projetam axial ou radialmente para fora do invólucro. A sua forma cilíndrica permite uma grande área para as placas, enquanto o uso de um dielétrico de plástico permite que a distância entre placas seja pequena. Devido ao tamanho do condensador caso seja possível imprimir a sua capacidade, a mesma é impressa no invólucro, caso contrário é utilizado um código de cores.

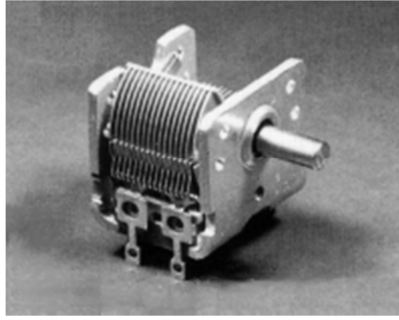


**Figura 9 – Constituição do condensador de poliéster [4].**

Este tipo de condensadores pode ser usado em circuitos de corrente contínua e corrente alternada e a sua resistência de fuga é da ordem de  $100 \text{ M}\Omega$ . A sua capacidade varia dos  $0,1 \mu\text{F}$  até os  $18 \mu\text{F}$  no caso dos condensadores de contactos coaxiais e de  $0,01 \mu\text{F}$  a  $10 \mu\text{F}$  para os condensadores de contacto radiais, com tensões de trabalho até  $1000 \text{ V}$ .

### 2.8.6. Condensadores variáveis

O dielétrico deste tipo de condensadores é o ar e a sua capacidade é modificada girando o eixo que faz variar a área comum às placas fixas e móveis. Quanto maior for a área comum, maior a capacidade dos condensadores.



**Figura 10 – Condensador variável [8].**

### 2.8.7. Principais características

A tabela resume as principais características dos condensadores apresentados nas subsecções anteriores.

**Tabela 3 – Principais características dos vários tipos de condensadores [4].**

<b>Condensador</b>	<b>Capacidade</b>	<b>Tensão de funcionamento</b>
<b>Mica</b>	10 pF a 0,001 $\mu$ F	50 V a 500 V
<b>Cerâmica</b>	10 pF a 0,047 $\mu$ F	100 V a 6 kV
<b>Eletrolíticos</b>	0,1 $\mu$ F a 15000 $\mu$ F	5 V a 450 V
<b>Tântalo</b>	0,047 $\mu$ F a 420 $\mu$ F	6,3 V a 50 V
<b>Poliéster</b>	0,001 $\mu$ F a 0,68 $\mu$ F	50 V a 600 V
<b>Variáveis</b>	1,5 pF a 600 pF	5 V a 100 V

## 2.9. CAPACIDADE ELÉTRICA DAS ARMADURAS

Define-se a capacidade elétrica como a relação entre a carga acumulada e a diferença de potencial na superfície da armadura, sendo esta representada pela letra  $C$ .

$$C = \frac{Q}{\Delta V} \quad (8)$$

Na equação (8),  $C$  representa a capacidade,  $Q$  representa a carga acumulada que é diretamente proporcional ao tamanho da armadura, e  $\Delta V$  representa a diferença de potencial na superfície das armaduras. Quanto maior for a armadura, mais fácil será acumular carga na sua superfície ( $Q$ ). No entanto esta não pode aumentar indefinidamente, caso contrário a força entre os elétrons será tão elevada que se produzirá uma descarga. Esta descarga é realizada quando as armaduras se encontram à carga máxima e é designada por potencial de rutura. A unidade de capacidade, no sistema internacional de unidades SI é o Farad (F).

A capacidade de um condensador pode ser incrementada se:

- o dielétrico possuir uma permissividade relativa mais elevada;
- a área de superfície da armadura for aumentada;
- a distância entre as armaduras diminuir.

A equação seguinte permite calcular a capacidade, considerando as premissas anteriores:

$$C = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 A}{d} \quad (9)$$

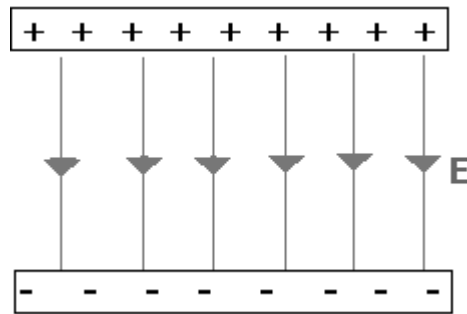
onde,  $\epsilon_r$  representa a permissividade do material dielétrico;  $\epsilon_0$  a permissividade no vazio;  $A$  a área de superfície da armadura e  $d$  a distância entre armaduras. A permissividade indica a capacidade de um material armazenar carga.

## 2.10. CAMPO ELÉTRICO NAS ARMADURAS

Nos condensadores os três tipos de armaduras mais comuns são as: placas paralelas, cilíndricas e esféricas. Como foi referido na secção 2.2, o campo elétrico pode ser calculado para diferentes áreas e formatos, influenciam diretamente o campo elétrico produzido.

### 2.10.1. Condensador de placas paralelas

Um condensador deste tipo é formado por duas placas metálicas de forma variável, paralelas e de área  $A$  (Figura 11). Na região central do condensador, as linhas de campo são aproximadamente paralelas.



**Figura 11 – Linhas de campo elétrico num condensador de placas paralelas [9].**

O campo produzido por cada uma das placas pode ser aproximado pelo campo de um plano infinito carregado eletricamente. Através da equação (10) é possível calcular o campo produzido em cada uma das placas.

$$E = 2\pi k\sigma \quad (10)$$

O campo total no centro do condensador é dado pela equação (11).

$$E = 4\pi k\sigma \quad (11)$$

Nas equações (10) e (11),  $\sigma$  representa a densidade energética na superfície da armadura e  $k$  a constante de Coulomb definida na equação (3). A capacidade e a diferença de potencial deste tipo de condensadores podem ser calculadas pela equação (8), apresentada anteriormente.

### 2.10.2. Condensador de placas cilíndricas

Este condensador é formado por duas armaduras cilíndricas, coaxiais de raios  $a$  e  $b$ . O campo elétrico entre as armaduras não se propaga exatamente na direção radial, no entanto se o comprimento dos cilindros for maior do que a distância entre as armaduras, podemos admitir que as linhas de campo na região central são paralelas e radiais. Recorrendo à Lei de Gauss, o campo elétrico é definido pela equação (12):

$$E = \frac{2kQ}{Lr} \quad (12)$$

onde,  $Q$  representa a carga na superfície da armadura;  $L$  o comprimento e  $r$  o raio da armadura.

A diferença de potencial neste tipo de condensadores é obtida integrando o campo elétrico ao longo da direção radial:

$$\Delta V = \int_a^b E \, dr = \frac{2kQ}{L} \ln(b/a) \quad (13)$$

onde,  $b$  e  $a$  representam o raio externo e interno respectivamente, como é possível visualizar na Figura 12.

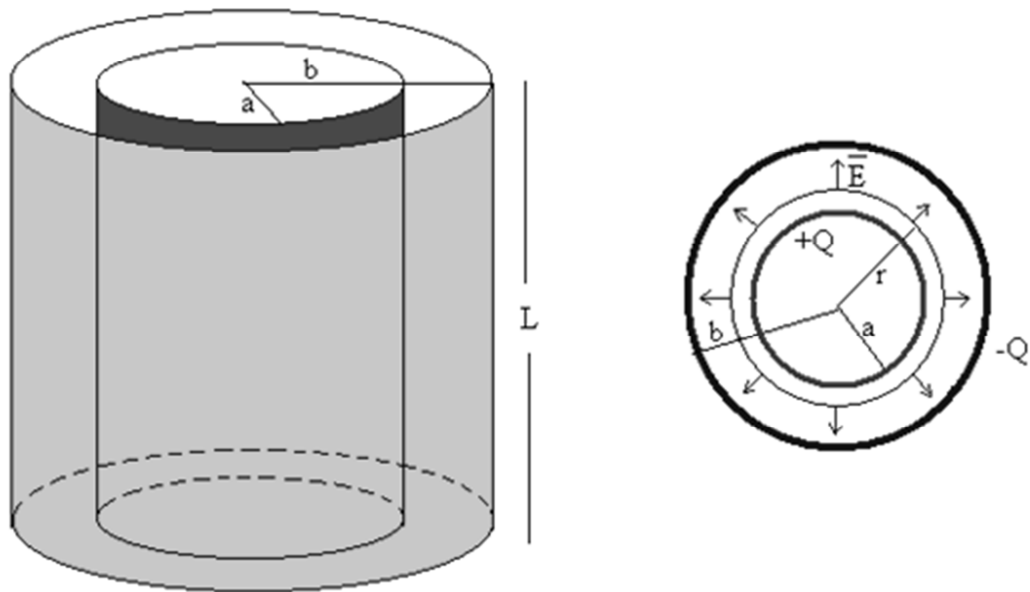


Figura 12 – Condensador cilíndrico (vista lateral e frontal) [10].

A capacidade, por sua vez, pode ser calculada através da equação (14):

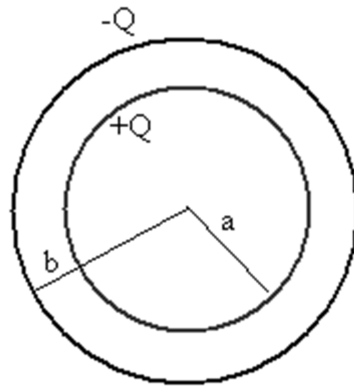
$$C = \frac{L}{2k \ln(b/a)} \quad (14)$$

### 2.10.3. Condensador de placas esféricas

Este tipo de condensador é formado por duas esferas condutoras concêntricas com raios  $a$  e  $b$ , sendo  $a < b$ .

O campo elétrico entre as duas esferas, segundo a Lei de Gauss, é dado pela seguinte equação (15).

$$E = \frac{kQ}{r^2} \quad (15)$$



**Figura 13 – Condensador esférico, corte [11].**

A diferença de potencial entre as armaduras é dada pela equação (16).

$$\Delta V = \int_a^b E \, dr = kQ \left( \frac{1}{a} - \frac{1}{b} \right) \quad (16)$$

e a capacidade do condensador pela equação (17).

$$C = \frac{ab}{k(b - a)} \quad (17)$$

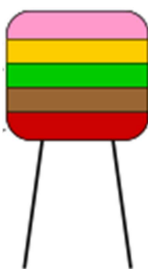
## 2.11. CÓDIGO DE CORES

O código de cores dos condensadores permite obter algumas informações sobre os mesmos, como por exemplo, capacidade, tolerância e tensão máxima. A Tabela 4 permite identificar e descodificar essa informação.

Tabela 4 – Código de cores [12].

Cor	1º e 2º Algarismo	Multiplicador	Tolerância	Tensão máxima
Preto	0	x1	20%	
Castanho	1	x10	± 1%	
Vermelho	2	x100	± 2%	250 V
Laranja	3	x1000	± 2,5%	
Amarelo	4	x10000		400 V
Verde	5	x100000	± 5%	
Azul	6	x1000000		630 V
Violeta	7	x10000000		
Cinzentos	8	x100000000		
Branco	9	x1000000000	± 10%	

Utilizando o condensador da Figura 14, as cores violeta e amarela representam o primeiro e segundo algarismos (74), a cor verde representa o multiplicador, neste caso (x100000), a cor castanha representa a tolerância (± 1%) e a cor vermelha representa a tensão máxima (250 V). Em suma, o condensador da Figura 14 apresenta uma capacidade de 7,4 µF com uma tolerância de ± 1% e uma tensão máxima de 250 V.



**Figura 14 – Exemplo de código de cores em condensadores [12].**

Para além do código de cores existe outra forma de identificar as principais características do condensador, através do código alfanumérico. Este código será abordado na secção seguinte.

## **2.12. CÓDIGO ALFANUMÉRICO**

O código alfanumérico é habitualmente utilizado como demonstra a Figura 15.



**Figura 15 – Exemplo de condensador com código alfanumérico [12].**

A Tabela 5 permite descodificar a informação alfanumérica contida no condensador da Figura 15.

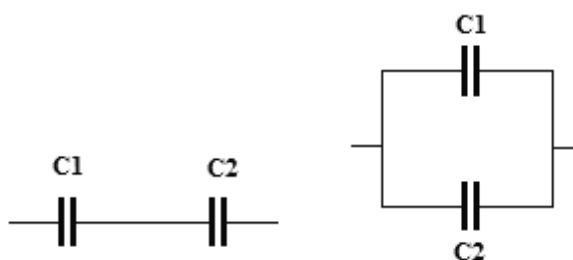
**Tabela 5 – Código alfanumérico [12].**

$\leq 10 \text{ pF}$		$>10 \text{ pF}$			
<b>B</b>	$\pm 0,1 \text{ pF}$	<b>F</b>	$\pm 1\%$	<b>M</b>	$\pm 20\%$
<b>C</b>	$\pm 0,25 \text{ pF}$	<b>G</b>	$\pm 2\%$	<b>P</b>	+ 100% - 0%
<b>D</b>	$\pm 0,5 \text{ pF}$	<b>H</b>	$\pm 3\%$	<b>S</b>	+ 50% - 20%
<b>F</b>	$\pm 1 \text{ pF}$	<b>J</b>	$\pm 5\%$	<b>Z</b>	+80% - 20% ou + 100% - 20 %
<b>G</b>	$\pm 2 \text{ pF}$	<b>K</b>	$\pm 10\%$		

O condensador da Figura 15 com o código 104 M, indica que o primeiro e o segundo algarismo, correspondem ao número 10. O seu algarismo 4 corresponde ao multiplicador ( $\times 10000$ ) e a sua tolerância M, corresponde a  $\pm 20\%$  segundo a Tabela 5.

### 2.13. ASSOCIAÇÃO DE CONDENSADORES

Os condensadores, tal como as resistências, podem ser associados em série ou em paralelo (Figura 16).



**Figura 16 – Associação em série (esquerda) e em paralelo (direita).**

Quando associados em paralelo a capacidade total representa a soma das capacidades dos condensadores em paralelo do circuito. Em termos matemáticos a capacidade total pode ser definida pela equação (18).

$$C_T = C_1 + \dots + C_n \quad (18)$$

representando  $C_T$  a capacidade total e  $n$  o número de condensadores em paralelo presentes no circuito.

Quando associados em série a capacidade total é dada pelo somatório do inverso de cada um dos condensadores em série do circuito. Matematicamente a capacidade total pode ser definida pela equação (19).

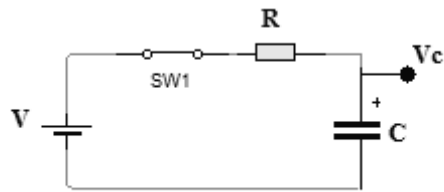
$$\frac{1}{C_T} = \frac{1}{C_1} + \dots + \frac{1}{C_n} \quad (19)$$

Ao contrário do que acontece com as resistências, quando dois condensadores são ligados em série a capacidade diminui em vez de aumentar.

## 2.14. ANÁLISE NO DOMÍNIO DOS TEMPOS – CONDENSADORES CLÁSSICOS

Depois de conhecidas algumas das principais características dos condensadores, nesta secção serão analisadas as respostas no domínio dos tempos dos condensadores clássicos.

Considerando apenas um circuito com uma fonte de alimentação, um condensador e um interruptor, como retrata a Figura 17, no instante em que o interruptor  $SWI$  é fechado, o positivo da fonte de alimentação remove os eletrões da armadura positiva do condensador e o pólo negativo da fonte de alimentação envia eletrões para a armadura negativa do condensador. Quando a tensão entre as armaduras atinge o valor da tensão da fonte de alimentação, a corrente no circuito será aproximadamente zero.



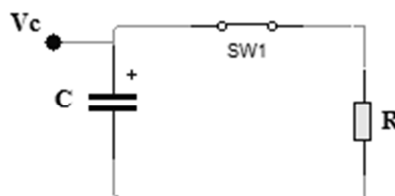
**Figura 17 – Circuito para ilustrar a carga do condensador.**

Matematicamente, a carga do condensador é definida pela equação (20).

$$V_c = V(1 - e^{-\frac{t}{RC}}) \quad (20)$$

onde,  $V$  representa o valor da tensão aplicada pela fonte de alimentação,  $t$  o tempo decorrido e o produto  $RC$ , a constante de tempo do condensador. No caso da Figura 17, idealmente o fator  $R$  não existe (desprezando também a resistência interna da fonte), por isso na equação (20), seria apenas  $C$  e não  $RC$ .

No processo de descarga do condensador, supondo que este se encontra totalmente carregado (Figura 18), no instante em que  $SW1$  é fechado, a carga do condensador começa a ser dissipada pela resistência. Quando a tensão no condensador é aproximadamente zero, o processo de descarga diz-se concluído.

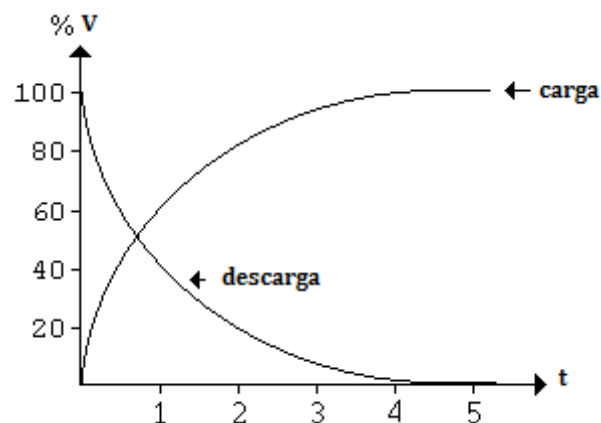


**Figura 18 – Figura para ilustrar a descarga do condensador.**

Matematicamente a descarga pode ser definida pela equação (21), com o condensador carregado inicialmente à tensão  $V$ .

$$V_c = V(e^{-\frac{t}{RC}}) \quad (21)$$

A Figura 19 representa a tensão do condensador durante o processo de carga e de descarga.

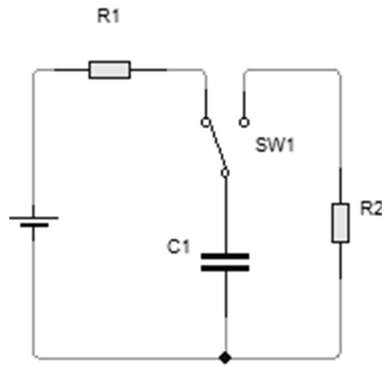


**Figura 19 – Tensão no condensador durante a carga e a descarga [13].**

O produto de  $RC$ , definido na equação (20), representa também a constante de carga ( $\tau$ ). Esta é igual a 63,2 % da tensão máxima aplicada ao condensador. A equação (22) traduz esta correlação:

$$\tau = RC \quad (22)$$

Através da equação (22), é possível obter a constante de carga do condensador. De seguida e considerando um circuito simples, com uma resistência de carga  $R1$ , uma segunda resistência de descarga  $R2$ , um interruptor  $SW1$ , uma fonte alimentação e um condensador  $C1$  será calculado e caracterizado todo o processo de carga e descarga do condensador.

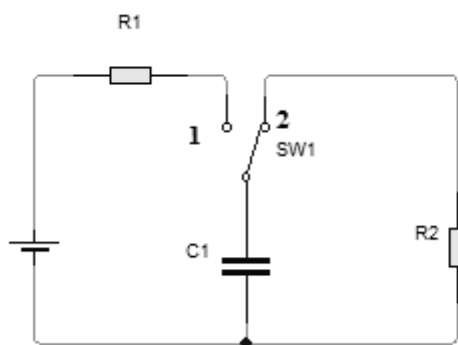


**Figura 20 – Circuito RC para ilustrar a carga do condensador.**

O circuito implementado na Figura 20, possibilita definir a constante de tempo de carga do condensador  $C1$  através da resistência  $R1$ , sendo este o produto entre  $R1$  e  $C1$  (equação (22)).

Por exemplo, se  $R1$  tiver o valor de  $1\text{ k}\Omega$  e  $C1$  de  $10\text{ mF}$ ,  $\tau$  será igual a  $10\text{ s}$ . Na prática é possível afirmar que o condensador irá demorar  $10\text{ s}$  a atingir  $63,2\%$  da sua carga máxima. A tensão no condensador seria definida pela fonte de alimentação (valor máximo da tensão no condensador) e a curva característica seria em tudo semelhante à da Figura 19.

Depois de concluído o processo de carga, outro aspeto importante a controlar é o tempo de descarga. Para tal é necessário ligar uma resistência em paralelo com o condensador, como ilustra a Figura 21 e trocar o interruptor da posição 1, para a posição 2, tal como mostra a Figura 21.



**Figura 21 – Circuito RC para ilustrar a descarga do condensador.**

Como é possível constatar pela (Figura 21), os valores de  $R1$  e  $R2$  influenciam diretamente a resposta do condensador, quer durante a sua carga, quer durante a descarga. Posteriormente, este processo será também abordado no domínio das frequências, onde a definição das resistências de carga e descarga assumem um papel preponderante.

## 2.15. ANÁLISE NO DOMÍNIO DAS FREQUÊNCIAS

Considerando um circuito RC série, como o da Figura 22 com uma resistência  $R$ , um condensador  $C$  e um gerador de sinais  $V_{in}$ , será apresentada a análise no domínio das frequências do circuito.

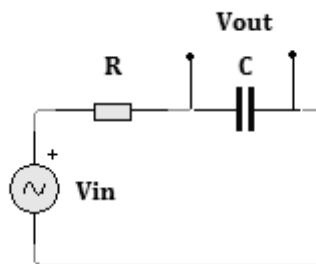


Figura 22 – Circuito RC série.

Aplicando a lei de Kirchoff ao circuito é possível escrever a equação (23):

$$V_{in}(t) = RI(t) + V_c(t) \quad (23)$$

onde,  $i$  representa a corrente que percorre o circuito e  $V_c$  a queda de tensão no condensador  $C$ .

Convertendo para impedâncias todos os componentes do circuito e reescrevendo a equação em função de  $V_{out}$ , obtém-se a equação (24).

$$V_{out} = V_c = \left[ \frac{Z_c}{Z_c + Z_R} \right] V_{in} \quad (24)$$

Recorrendo à transformada de Laplace e aplicando a mesma à equação (24) é possível escrever a equação (25):

$$V_{out} = \frac{\frac{1}{Cs}}{\frac{1}{Cs} + R} V_{in} \quad (25)$$

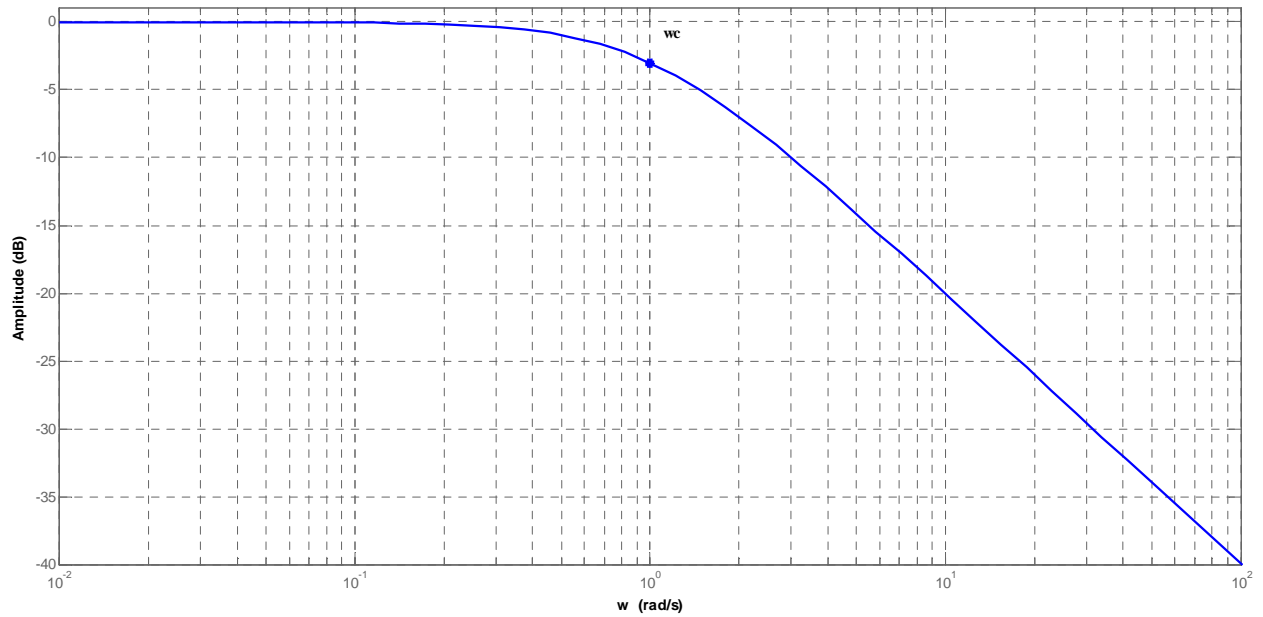
sabendo que  $Z_c = \frac{1}{Cs}$  e  $Z_R = R$ .

A equação (25) permite obter a função de transferência do circuito, que é dada pela equação (26), sendo  $s = j\omega$ .

$$H(s) = \frac{1}{1 + RCs} \quad (26)$$

Depois de caracterizada a função de transferência é possível obter a resposta em frequência do sistema. Na Figura 23 é apresentado o diagrama de Bode da amplitude da função de transferência (26):

O diagrama de Bode da amplitude é similar à ao da Figura 23.



**Figura 23 – Diagrama de Bode das amplitudes, considerando  $\omega_c = 1$ .**

Na Figura 23, a amplitude é representada em dB e é obtida através da equação (27).

$$Amp = 20 \log \left( \frac{V_{out}}{V_{in}} \right) \quad (27)$$

A frequência de corte, assinalada na Figura 23 e representada por  $\omega_c$  é dada pela equação (28):

$$\omega_c = \frac{1}{RC} \quad (28)$$

sendo  $\omega_c$  definida pela equação (29):

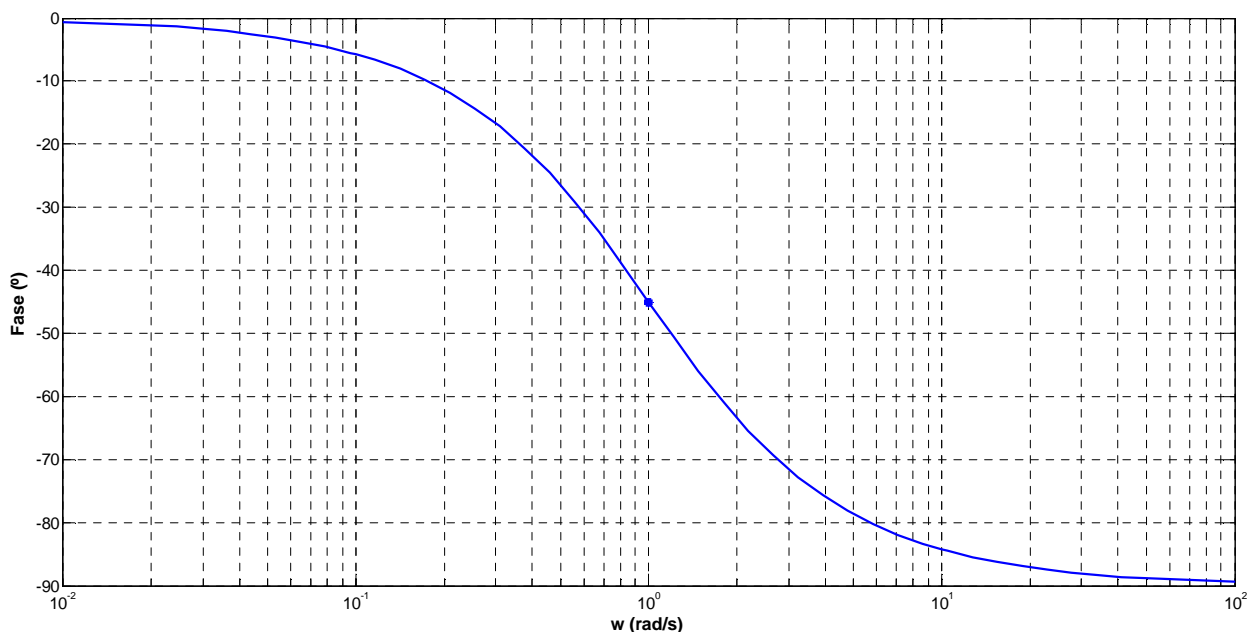
$$\omega_c = 2\pi f \quad (29)$$

em que  $f$  é a frequência aplicada ao sistema. Substituindo na equação (28) a (29) obtemos a equação (30).

$$f = \frac{1}{2\pi RC} \quad (30)$$

Através da equação (30), é possível concluir que a constante de tempo e a frequência são inversamente proporcionais. Idealmente a frequência  $f$  deve ser definida de forma a permitir obter a resposta do sistema duas décadas acima e duas abaixo da frequência de corte (permitindo assim visualizar todo o diagrama de bode, para a amplitude e para a fase, como é apresentado na Figura 23 e Figura 24), no entanto devido às limitações dos geradores de sinais mais comuns, isso nem sempre é possível.

Considerando a constante de carga igual a um, a fase é similar à apresentada na Figura 24.



**Figura 24 – Diagrama de Bode da Fase, considerando  $\omega_c = 1$ .**

A fase do diagrama de Bode, atinge os  $-45^\circ$  à frequência do pólo do sistema (zeros do denominador da função de transferência), caindo posteriormente para  $-90^\circ$  nas altas frequências.

Assim, e depois de analisada a resposta em frequência dos condensadores clássicos, no capítulo seguinte será introduzida a temática dos supercondensadores, fazendo referência aos seus fabricantes, às empresas que os comercializam e ao seu modo de funcionamento.



# 3. SUPERCONDENSADORES

Nas últimas décadas devido a inúmeros fatores, mas sobretudo devido à escassez de recursos naturais e ao desenvolvimento tecnológico, o setor da energia tem sofrido profundas mudanças. Este passou a ser visto como um fator determinante na competitividade de praticamente todos os setores industriais e de serviços. De entre estes fatores destacam-se pela sua complexidade os seguintes:

- o aumento do consumo de energia a nível mundial e a diversidade de cargas a ela associadas;
- a regulamentação a nível mundial;
- a implementação de sistemas que produzem energia para consumo próprio;
- o aparecimento de novas tecnologias;
- a crescente preocupação a nível mundial com as questões ambientais.

Com o crescente desenvolvimento dos sistemas elétricos e eletrónicos, foram vários os dispositivos desenvolvidos nestas áreas, nomeadamente os díodos, transístores, microprocessadores, triacs, IGBT, entre outros. Grande parte destes dispositivos permite uma utilização mais eficiente e o controlo de sistemas mais preciso. No entanto, estes

originam perturbações significativas na qualidade da energia, podendo estas provocar a falha ou mesmo a degradação do sistema no qual estão incorporados.

Devido ao crescente uso de cargas não lineares, estes fenómenos têm tendência a atingir proporções desastrosas, num futuro próximo. Deste modo, é evidente a necessidade de uma maior exigência na qualidade dos atuais processos de produção de energia elétrica, para que a competitividade a nível mundial, a crescente sensibilidade dos equipamentos e os lucros inerentes à produção de muitos ramos da indústria e dos serviços, sejam suficientes para garantir a sua sobrevivência.

Algumas das medidas implementadas pelas empresas para garantir a qualidade energética e a viabilidade dos seus sistemas visa a implementação de tecnologias capazes de evitar os cortes de energia de longa duração. No entanto, subsistem os problemas dos cortes de curta duração, uma vez que nem sempre as comutações entre os dispositivos de armazenamento e a rede elétrica são suficientemente rápidos para colmatar eventuais problemas nos sistemas e ainda pelo facto de surgirem nas linhas de transporte fenómenos que não permitem a rápida e eficiente resposta dos dispositivos de prevenção. Estes pequenos cortes, na maioria das vezes inofensivos, podem provocar perdas de produção consideráveis, quer seja por avaria, por custos de reparações, re-arranques dos sistemas ou impactos ambientais, entre outros.

Para minorar o efeito dos fenómenos descritos anteriormente, de seguida são apresentadas algumas das tecnologias que permitem minimizar os efeitos dos cortes de energia elétrica. Assim serão apresentados alguns dispositivos de armazenamento de energia elétrica, com maior enfoque para os supercondensadores, desde a sua constituição, princípio de funcionamento, utilização, vantagens e desvantagens.

### **3.1. CONTEXTUALIZAÇÃO HISTÓRICA – EDLC (SUPERCONDENSADORES)**

A capacidade de armazenar energia elétrica utilizando uma solução eletrolítica e um metal foi estudada por químicos e cientistas desde o século XIX. No entanto a utilização dos condensadores de dupla camada (EDLC) só foi patenteada em 1957 pela General Electric. Esta construiu um condensador usando eléctrodos porosos de carbono para armazenar

energia elétrica, com uma capacidade elevada para a época e um comportamento que poderia ser instável quando o condensador fosse utilizado como bateria.

Mais tarde, em 1966, a empresa “*The Standard Oil Company - SOHIO*” desenvolveu um condensador de dupla camada com uma capacidade mais reduzida, quando comparado com o da General Electric, mas que permitia que este funcionasse como uma bateria. Quatro anos mais tarde, a SOHIO desenvolveu um condensador da mesma família mas de forma circular, utilizando para isso uma pasta de carbono embebida num eletrólito. Em 1971, devido às dificuldades económicas da empresa, a SOHIO foi forçada a abandonar o desenvolvimento e a licença que detinha para a NEC. Esta foi a primeira empresa a comercializar com sucesso os condensadores de dupla camada, condensadores esses que denominou de “supercondensadores”. Estes apresentavam uma resistência interna elevada e foram concebidos para serem utilizados em memórias, permitindo assim realizar *backups* de aplicações.

Até 1980, várias empresas começaram a produzir condensadores eletroquímicos. A Panasonic em 1978 desenvolveu o que denominou de “Gold capacitor”, semelhantes aos produzidos pela NEC (também utilizados em memórias). Em 1987 a empresa ELNA, começou a produzir os seus próprios EDLC, denominados por “Dynacap”. Apenas em 1982 surgiu o primeiro EDLC, de potência elevada, desenvolvido pela PRI. Este, incorporava elétrodos de metal e óxido e destinava-se a aplicações militares (armas com recurso a laser e mísseis telecomandados).

O crescente destaque dado às aplicações militares referidas anteriormente, motivou que em 1992 fosse desenvolvido um estudo pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos, “*United States Department of Energy - (DoE)*”, com o objetivo de integrar esta tecnologia em carros elétricos híbridos, nos laboratórios da Maxwell.

Algumas das empresas responsáveis pelo desenvolvimento e comercialização dos EDLC, ainda hoje fabricam e/ou comercializam os seus EDLC. Na secção 3.13 serão abordados os principais fabricantes e os respetivos mercados de comercialização.

### **3.2. PESQUISA E DESENVOLVIMENTO – OBJETIVOS FUTUROS PARA OS EDLC**

As instituições responsáveis pelo desenvolvimento e pesquisa, têm como grande objetivo, melhorar a densidade energética e a potência dos EDLC. Atualmente os EDLC mais comercializados utilizam a tecnologia de carbono ativo nos seus elétrodos, sendo esta alvo de estudo no que concerne à capacidade e à resistência.

A Universidade Henri Poincaré-Nancy em França desenvolveu uma correlação entre a estrutura dos elétrodos porosos e a sua resistência em série. Por sua vez, o laboratório *Conservatoire National de Arts et Métiers*, confirmou o impacto da distribuição porosa na capacidade dos EDLC. Recentemente a tecnologia de nanotubos de carbono tem sido explorada e várias instituições como a *Poznan University of Technology* na Polónia ou a *Sungkyunkwan University* têm construído elétrodos através da mesma, apresentando uma capacidade mais elevada, comparativamente com a tecnologia que atualmente está mais em voga, os carbonos ativos. A *Chinese Academy of Science* tem efetuado estudos que demonstraram que a tecnologia de nanotubos de carbonos ativos apresenta uma capacidade superior, comparativamente à tecnologia de nanotubos de carbonos normal.

Os progressos alcançados no desenvolvimento de polímeros e metais óxidos têm-se mantido estáveis. A exploração de efeitos pseudo capacitivos para aumentar a capacidade dos EDLC é um denominador comum para a maioria dos investigadores que tencionam assim desenvolver uma próxima geração de EDLC, mais potentes e com maior capacidade para armazenar energia.

Na secção seguinte será abordado e explicado o princípio de funcionamento dos EDLC, e de que forma a sua constituição afeta diretamente a potência de cada um dos supercondensadores.

### 3.3. ARMAZENAMENTO DE CARGA NOS EDLC

Dois dos processos mais comuns utilizados para armazenar energia elétrica são: as baterias e os condensadores. As baterias armazenam energia nos seus elétrodos através de um processo químico, reagindo posteriormente quando uma carga é ligada aos seus terminais.

No caso dos condensadores clássicos, este processo já foi abordado anteriormente na secção 2.9. No entanto e devido às diferenças de construção existentes entre os condensadores clássicos e os EDLC inicialmente será referida a sua constituição.

Os supercondensadores possuem dois elétrodos fabricados com materiais porosos (de dimensões reduzidas), uma área de contacto elevada, desagregados por um separador e imerso sob o eletrólito. A carga é acumulada em micro-poros próximos do material do eléctrodo e do eletrólito, como demonstra a Figura 25.

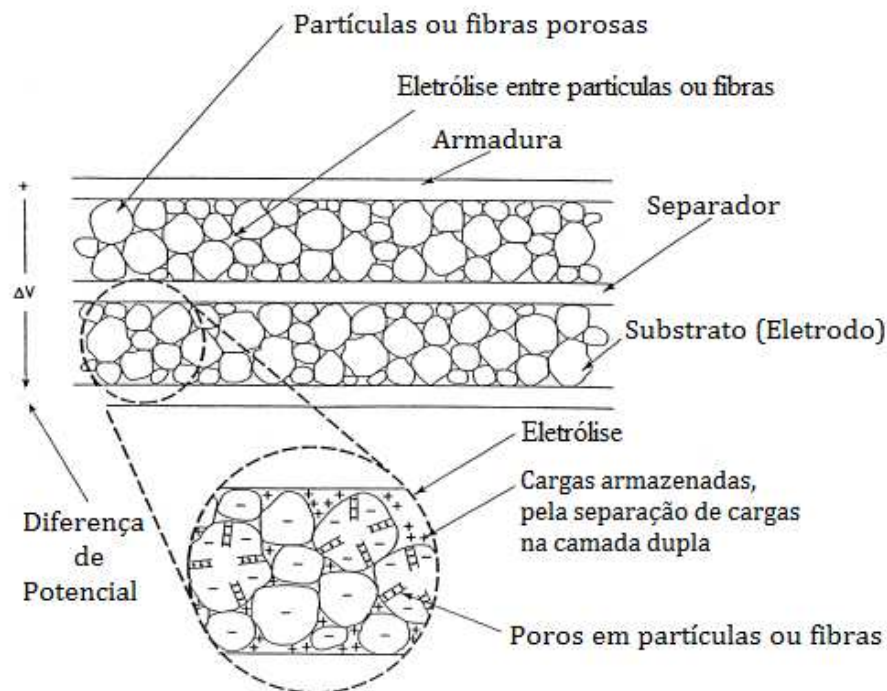


Figura 25 – Constituição de um EDLC e processo de carga [14].

Globalmente as principais características dos EDLC podem ser resumidas em três parâmetros, densidade de energia, densidade de potência e material que compõe o eletrodo. É possível, tal como será abordado em seções seguintes, calcular a densidade energética e a densidade potencial do EDLC. No entanto, o cálculo da capacidade é um processo mais complexo que depende de vários fenômenos relacionados com o seu tipo e construção.

### 3.4. TIPOS DE EDLC

Os EDLC podem ser divididos em três classes: condensadores eletroquímicos, pseudo condensadores e condensadores híbridos. Cada classe é caracterizada por um mecanismo de armazenamento de energia único. Este processo pode ser realizado sem ou com o recurso a um processo químico ou através dos dois. O processo químico é realizado através de reações de oxidação-redução e envolve a troca de cargas entre o eletrodo e o eletrólito. Por sua vez, sem o recurso a este processo não existe o processo de oxidação-redução. A Figura 26 ilustra as três classes enumeradas anteriormente, distinguidas pelo material utilizado no seu eletrodo.

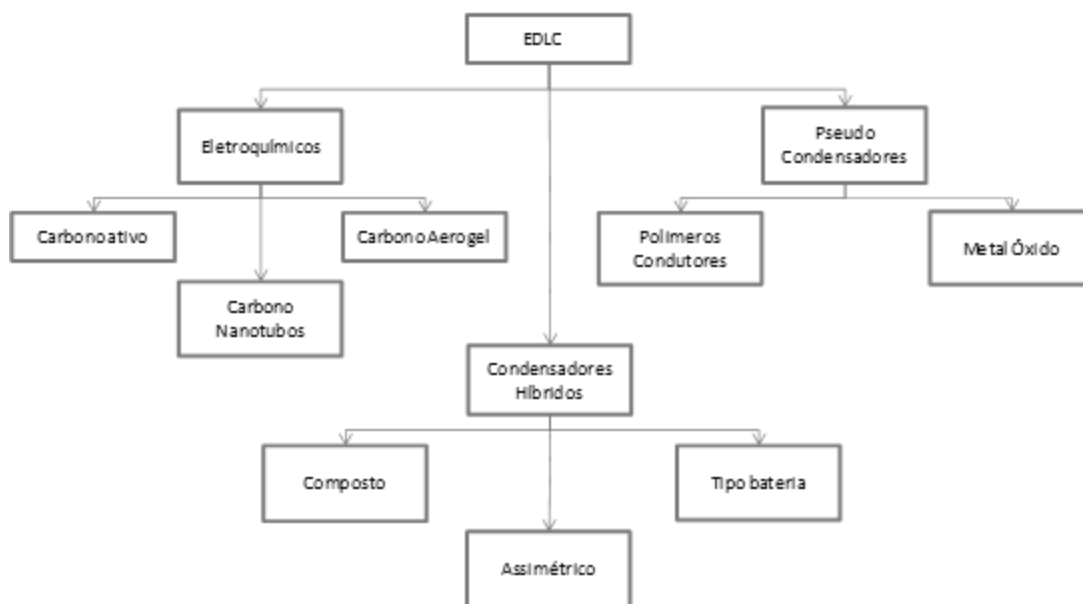


Figura 26 – Tipos de EDLC [15].

### **3.4.1. Eletroquímicos**

Os EDLC eletroquímicos são construídos por dois elétrodos de carbono, um eletrólito e um separador (dielétrico). Tal como os condensadores clássicos, estes acumulam energia electrostática e não existe transferência de cargas entre o eletrodo e o eletrólito. Quando é aplicada uma tensão, as cargas acumulam-se na superfície dos elétrodos, seguindo a atração natural entre cargas, e os iões da eletrólise são difundidos nos poros do eletrodo com carga oposta.

### **3.4.2. Carbonos Ativos**

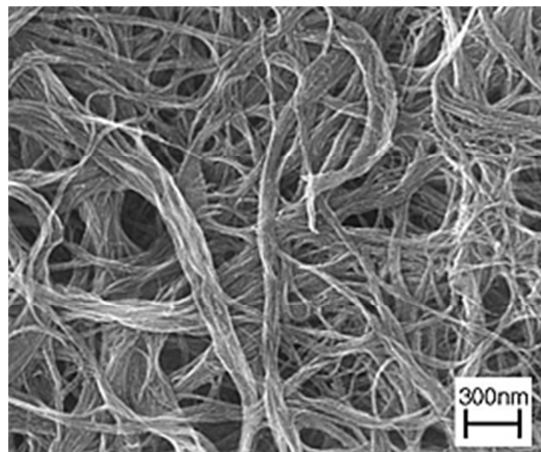
Por representar uma alternativa mais económica e possuir uma área de superfície superior à dos restantes EDLC de carbono, este representa a tecnologia mais utilizada na construção dos elétrodos.

Os EDLC de carbonos ativos utilizam uma estrutura complexa de poros de diferentes tamanhos e embora a capacidade seja diretamente proporcional à área da superfície, no caso dos EDLC de carbono ativo, nem toda a área de superfície contribui para aumentar a capacidade do condensador. Esta alteração estima-se ser causada pelos iões do eletrólito, que apresentam um tamanho superior aos pequenos micro-poros, impedindo assim alguns poros de contribuírem para armazenar mais carga nos terminais do condensador. Algumas pesquisas também sugerem uma relação empírica entre o tamanho dos poros, a densidade energética e a densidade de potência do dispositivo. Enquanto os poros de tamanho superior possuem uma densidade de potência superior, os poros de tamanho mais reduzido apresentam uma densidade energética superior.

Para os investigadores o principal objetivo neste tipo de condensadores, é determinar o tamanho dos poros, em função dos iões do eletrólito, otimizando assim a distribuição dos poros no EDLC durante o processo de fabrico.

### 3.4.3. Carbono – Nanotubos

Recentemente o interesse por este tipo de supercondensador tem aumentado significativamente. Os elétrodos deste são feitos através de nanotubos e uma rede de mesoporos emaranhados. A Figura 27 mostra o elétrodo deste EDLC, visto através do microscópio.



**Figura 27 – Elétrodo de Nanotubos [16].**

Ao contrário dos outros elétrodos de carbono, os mesoporos deste estão todos interligados, permitindo assim uma distribuição mais uniforme, utilizando quase toda a área de superfície disponível. Desta forma, a área é utilizada mais eficientemente e permite receber capacidades superiores, comparativamente com os EDLC baseados em carbono ativo (embora os EDLC de nanotubos apresentem uma área bastante mais reduzida).

Nesta tipologia os iões da eletrólise são mais facilmente difundidos na rede de mesoporos, permitindo assim que estes possuam uma ESR mais pequena que os EDLC de carbono ativo. A eficiência da estrutura emaranhada permite obter uma elevada densidade de energia e a sua reduzida ESR, permite uma elevada densidade de potência.

#### **3.4.4. Carbono – Aerogel**

Os EDLC de carbono de Aerogel são constituídos por nano partículas intercaladas com mesoporos (poros de dimensões intermédias). Estes foram desenvolvidos para possuir uma resistência de série (ESR) inferior à dos EDLC de carbonos ativos. Esta alteração em relação aos condensadores de carbonos ativos, permitiu aumentar a potência dos mesmos, sendo este um dos principais objetivos no processo de investigação.

#### **3.4.5. Condensadores híbridos**

Os condensadores híbridos utilizam dois processos para armazenar energia, o químico e o não químico. Estes condensadores apresentam elevada densidade energética e densidade potencial, sem afetar a estabilidade, no entanto a acessibilidade a este tipo de EDLC, tem limitado o seu sucesso.

A pesquisa neste tipo de EDLC tem sido focalizada essencialmente em três tipos de condensadores híbridos: compostos, assimétricos e tipo bateria.

#### **3.4.6. Composto Híbrido**

Os elétrodos compostos integram a tecnologia baseada em materiais de carbono com polímeros condutores ou metais óxidos e os seus mecanismos de carga são realizados através de processos químicos e físicos num único eletrodo. Os materiais baseados em carbono aumentam a capacidade de carga do condensador e possibilitam obter uma área de contacto superior, aumentando assim o contacto entre os materiais pseudo capacitivos e o eletrólito. Os materiais pseudo capacitivos aumentam a reação do eletrodo composto aos processos químicos.

Os elétrodos compostos constituídos por nanotubos de carbono e polímeros condutores, têm obtido bons resultados. Várias experiências têm demonstrado que o eletrodo é capaz

de receber capacidades superiores, comparativamente com um elétrodo puro de nanotubos de carbono ou de polímeros ativos [17, 18, 19]. Esta transformação deve-se essencialmente ao revestimento uniforme dos polímeros, boa acessibilidade à estrutura emaranhada e uma distribuição tridimensional da carga. No entanto, a integridade da estrutura emaranhada devido ao *stress* mecânico de inserção e remoção de iões tem sido levada até ao limite, não afetando a estabilidade destes EDLC, ao contrário do que acontece nos de polímeros condutores.

### **3.4.7. Assimétricos**

Os EDLC híbridos assimétricos combinam processos químicos e não químicos, acoplando o elétrodo do EDLC com o elétrodo do pseudo condensador. Uma das combinações mais estudadas é baseada no acoplamento de um elétrodo de carbono ativo de carga negativa com polímeros condutores de carga positiva, que é o caso dos polímeros, como já abordado na subsecção 3.4.10. Estes apresentam uma baixa eficiência, quando carregados negativamente. A implementação de carbono ativo, permite solucionar a baixa eficiência dos polímeros condutores. Apesar de os segundos apresentarem capacidades elevadas e baixa ESR estes também apresentam baixos valores máximos de tensão e são mais instáveis. Os EDLC assimétricos com esta combinação no elétrodo, apresentam mais estabilidade do que os pseudo condensadores.

### **3.4.8. Tipo bateria**

Tal como acontece com os condensadores híbridos assimétricos, estes também apresentam dois materiais na composição do seu elétrodo. No entanto estes possuem uma particularidade, já que são os únicos que combinam um elétrodo de um supercondensador com uma bateria. Esta combinação permite obter elevadas densidades energéticas e densidades de potência (devido à bateria utilizada), retirando assim o melhor de cada um,

permitindo ainda identificar a densidade de energia, o ciclo de vida e o número de cargas e descargas do supercondensador e a potência das baterias. Depois de alguns estudos sobre este tipo de EDLC e de alguns resultados promissores, é consensual que este possa representar uma transição entre as baterias e os supercondensadores mas é necessário realizar mais estudos sobre esta topologia de EDLC para determinar o seu potencial efetivo.

#### **3.4.9. Pseudo Condensador**

Neste tipo de condensadores o armazenamento da carga é feito à custa da transferência de cargas entre o eletrodo (feito com polímeros condutores ou metal óxido) e o eletrólito, contrariamente ao que acontece com os EDLC apresentados anteriormente, onde a carga é armazenada electrostaticamente.

Os pseudo condensadores, tal como foi referido no início da secção 3.4, armazenam a carga através do processo químico de oxidação-redução. Este processo possibilita que estes apresentem uma capacidade e uma densidade energética superiores.

#### **3.4.10. Polímeros Condutores**

Comparativamente com os EDLC de carbono ativo, os EDLC com eletrodos de polímeros condutores, apresentam uma capacidade e condutividade superior, assim como uma baixa ESR. Existem dois tipos de configuração, os dopados positivamente (tipo p) e os dopados negativamente (tipo n), apresentando qualquer uma das configurações uma energia potencial e uma densidade energética elevadas.

Contudo, a falta de eficiência essencialmente na configuração do tipo n, tem impedido estes pseudo condensadores de atingir o seu potencial máximo. Acredita-se que o *stress* mecânico nos polímeros condutores, durante a reação de oxidação-redução, afete a estabilidade deste tipo de condensadores durante o processo de carga/descarga. Esta instabilidade tem prejudicado o desenvolvimento e o aperfeiçoamento deste tipo de condensadores.

### **3.4.11. Metal óxido**

Devido à sua elevada condutividade, o metal óxido tem representado um dos materiais mais explorados para a construção de elétrodos. Na maioria das pesquisas o mais utilizado tem sido o óxido de ruténio, uma vez que os restantes não apresentam capacidades semelhantes. A sua capacidade é obtida através da inserção e remoção de protões numa estrutura amórfica, excedendo no estado líquido a capacidade dos EDLC baseados na tecnologia de carbono ativo e dos baseados em polímeros condutores. A sua ESR, neste estado, é inferior aos restantes materiais utilizados para a construção dos elétrodos, possibilitando assim obter uma densidade energética e uma densidade de potência superiores às dos pseudo condensadores de polímeros condutores.

Contudo os custos proibitivos do óxido de ruténio têm limitado o sucesso e a utilização desta tecnologia na construção de elétrodos. Atualmente o principal objetivo dos fabricantes é a redução do custo do óxido de ruténio, sem necessitarem de reduzir o desempenho do EDLC.

## **3.5. PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DOS EDLC**

Ao longo da secção 3.4, foram abordadas e explicadas algumas das principais características dos vários tipos de EDLC disponíveis no mercado. A Tabela 6 apresenta as principais características dos vários tipos de EDLC apresentados.

**Tabela 6 – Resumo das principais características dos vários tipos de EDLC [15].**

<b>EDLC</b>	<b>Densidade energética</b>	<b>Densidade de potência</b>	<b>ESR</b>
<b>Carbono ativo</b>	Razoável	Razoável	Razoável
<b>Carbono Nanotubos</b>	Boa	Boa	Boa
<b>Carbono Aerogel</b>	Razoável	Boa	Boa
<b>Composto híbrido</b>	Boa	Razoável	Razoável
<b>Assimétrico</b>	Boa	Boa	Boa
<b>Tipo Bateria</b>	Boa	Boa	Boa
<b>Polimeros condutores</b>	Boa	Razoável	Razoável
<b>Metal óxido</b>	Boa	Boa	Boa

As densidades de energia e potência vão ser explanadas de seguida.

### **3.6. DENSIDADE ENERGÉTICA**

A densidade energética quantifica a capacidade de armazenamento de energia, nos condensadores, nas baterias ou nos EDLC. Esta pode ser calculada pela seguinte equação:

$$E = \frac{1}{2} CV^2 \quad (31)$$

Na equação (31), o  $C$  representa a capacidade do condensador e o  $V$  a tensão aplicada aos seus terminais (inferior ao  $V_{max}$  do EDLC). Normalmente a densidade energética é expressa em função do seu peso (Wh/kg), ou (J/kg).

### **3.7. DENSIDADE DE POTÊNCIA**

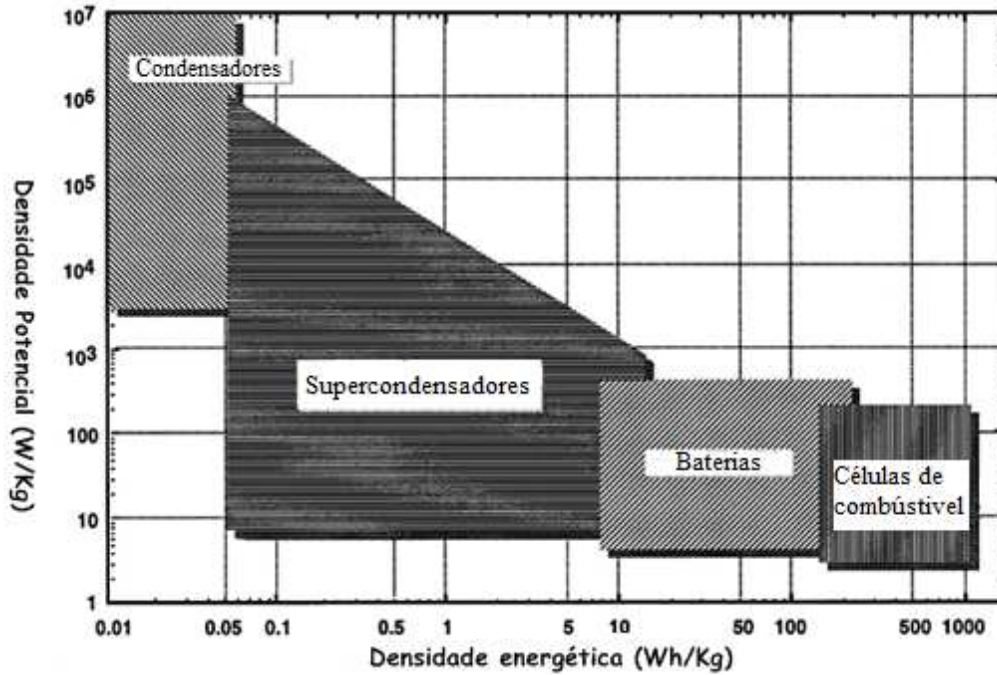
A densidade de potência é utilizada para quantificar a velocidade com que os condensadores, baterias e EDLC podem entregar a sua energia. Esta pode ser calculada pela seguinte equação:

$$P_{max} = \frac{V^2}{4R} \quad (32)$$

na equação (32), o  $V$  representa a tensão aplicada e o  $R$  corresponde ao valor da ESR do EDCL. Normalmente a densidade de potência é expressa em relação ao seu peso (W/kg).

### **3.8. RELAÇÃO ENTRE DENSIDADE ENERGÉTICA E DENSIDADE DE POTÊNCIA**

A relação entre densidade energética e densidade de potência é um dos principais focos de interesse para analisar o desempenho dos supercondensadores. Especialmente depois dos investigadores descobrirem que estes eram capazes de fornecer potências elevadas durante a descarga, enquanto intrinsecamente a sua densidade energética era baixa, cerca de 10 a 15% da densidade atingida pelo mesmo sistema com bateria e com o mesmo volume.



**Figura 28 – Relação entre densidade energética e densidade potencial para os diversos acumuladores de tensão [20].**

Na Figura 28 é possível identificar a propriedade dos EDLC descrita anteriormente. Em todos os outros acumuladores de tensão, a relação entre a densidade energética e a densidade de potência é proporcional. Para um EDLC com uma densidade energética de 0,05 Wh/kg a densidade de potência pode atingir 10<sup>6</sup> W/kg. No caso das baterias a densidade de potência não excede os 10<sup>3</sup> W/kg.

Os condensadores clássicos, ao contrário dos EDLC, apresentam uma densidade energética reduzida e uma densidade de potência elevada. Devido a esta característica, é possível concluir que os condensadores clássicos não podem armazenar uma quantidade de energia muito elevada, mas possibilitam a entrega da mesma rapidamente, originando assim potências elevadas.

### 3.9. RESISTÊNCIA SÉRIE EQUIVALENTE - ESR

A maioria dos condensadores não possui apenas componente capacitiva (exceto os condensadores a vácuo ou a ar), como seria idealmente expectável. Estes possuem uma componente resistiva, que é designada por resistência série equivalente, ESR, e que é fornecida no manual do fabricante.

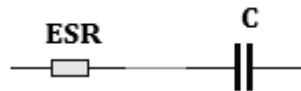


Figura 29 – Exemplo de EDLC real.

No caso dos supercondensadores a ESR possui particular importância, porque limita a potência máxima. Na equação (32),  $R$  corresponde ao valor de ESR e é inversamente proporcional à potência máxima admitida pelo EDLC, ou seja, quanto menor for a ESR do EDLC, maior será a potência máxima fornecida pelo condensador e mais baixa será a constante de tempo do condensador, acontecendo o inverso quando o valor da ESR é mais elevada.

O valor da resistência série pode ser obtido experimentalmente recorrendo a um gerador de sinais e um EDLC. À medida que a frequência aumenta, e como será abordado posteriormente (secção 3.10), a impedância do circuito irá tender para o valor de ESR do EDLC. É importante verificar o seu valor experimental devido à tolerância apresentada no *datasheet* de alguns fabricantes (porque esta limita a potência máxima do EDLC).

### 3.10. MODELAÇÃO DE EDLC

Existem, como já foi referido, vários materiais que podem fazer parte do EDLC sendo que cada um tem as suas características específicas. Assim, e para reduzir o tempo e custo de fabrico, a comunidade científica construiu vários modelos através de processos de

modelação, para aproximar a resposta dos supercondensadores. Este procedimento, denominado por circuito equivalente, permitiu desenvolver e obter desempenhos próximos do limite teórico de cada EDLC e obter relações empíricas entre o tamanho dos poros do eletrodo do condensador, área de superfície, capacidade e ESR. Alguns dos modelos construídos foram usados para determinar os limites teóricos do supercondensador com diferentes estruturas e composições.

### **3.10.1. Modelos equivalentes**

Os modelos equivalentes são modelos matemáticos ou computacionais de componentes elétricos simples, como condensadores ou resistências que são utilizados, para modelar circuitos eletroquímicos complexos. Estes modelos inicialmente foram utilizados para obter a relação entre eletrodos porosos e solução de eletrólise e mais recentemente têm sido utilizados para obter e analisar alguns efeitos em pseudo condensadores. A hierarquia dos circuitos equivalentes é apresentada na Figura 30, esta começa com um simples condensador (figura a)) em que posteriormente são adicionados componentes (figuras b), c) e d)) até ser obtido o circuito modelo de um eletrodo poroso, (figura e)).

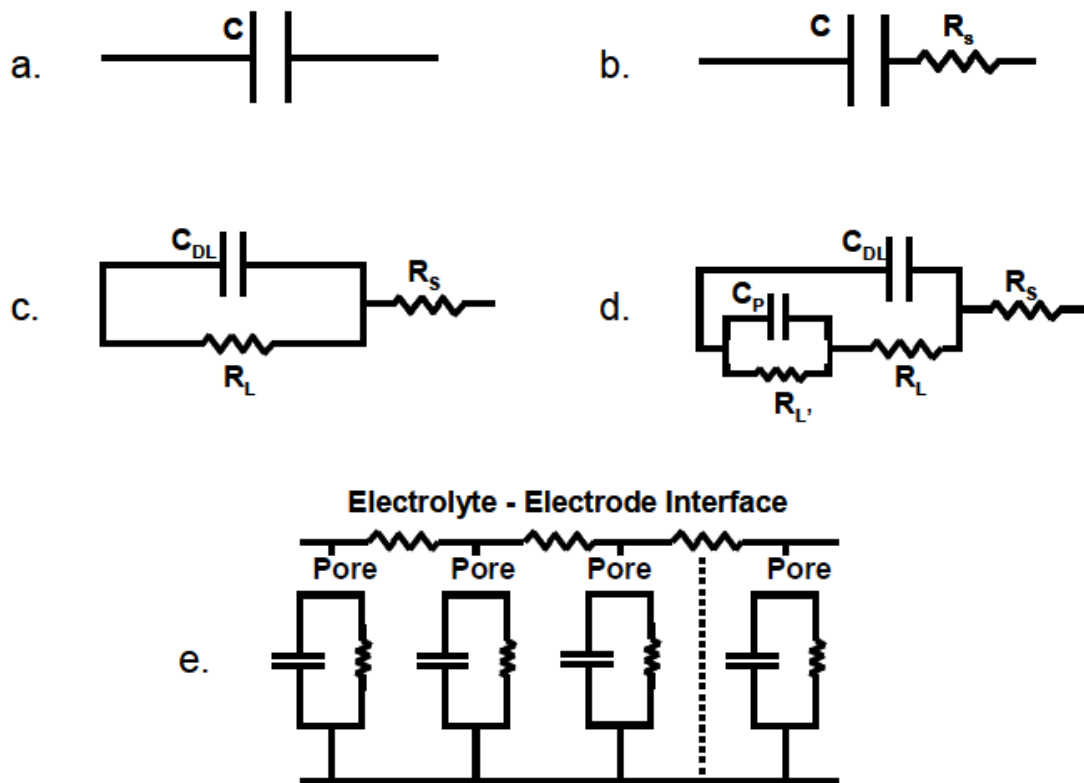


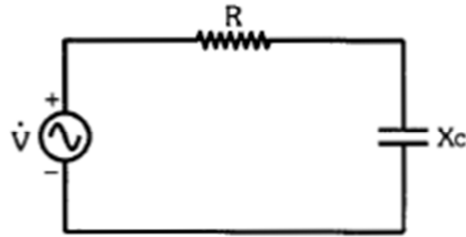
Figura 30 – Hierarquia de circuitos equivalentes [21].

### 3.10.2. Impedâncias em circuitos RC

A impedância  $Z$  representa a oposição total que o circuito impõe à passagem da corrente elétrica, bem como o desfasamento entre a tensão e a corrente. Esta é composta por uma componente real denominada por  $R$  e uma reactância denominada por  $X$ .

- **Circuitos RC Série**

Utilizando um circuito RC simples como o da Figura 31, vai ser de seguida analisada a sua impedância, o seu desfasamento e o diagrama fasorial correspondente.



**Figura 31 – Circuito RC série [22]**

A impedância do circuito, é descrita pela equação (33):

$$Z = R - jX_c \quad (33)$$

sendo  $X_c$ , dado por:

$$X_c = \frac{1}{2\pi f C} \quad (34)$$

Como foi descrito inicialmente nesta secção, o  $R$  da equação (33) representa a componente resistiva do circuito e  $X_c$  a reactância do mesmo.

O cálculo da reactância é definido pela equação (34), sendo  $f$  a frequência aplicada ao circuito e  $C$  a capacidade do condensador, analogamente ao estudo anteriormente realizado para os condensadores clássicos.

Sendo  $Z$  um número complexo, este pode ser reescrito na forma polar (equação (35)), ou na forma retangular (equação (33)):

$$Z = |Z| \angle -\varphi \quad (35)$$

Na equação (35)  $\varphi$  representa o desfasamento entre a corrente e a tensão do circuito e é calculado pela equação (36).

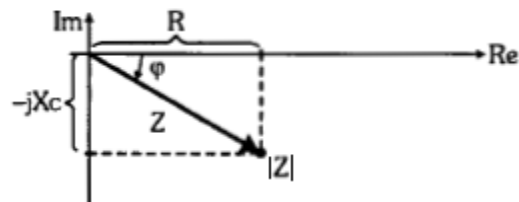
$$\varphi = \arctan\left(-\frac{Xc}{R}\right) \quad (36)$$

O módulo da impedância  $Z$ , é dado pela equação (37).

$$|Z| = \sqrt{R^2 + Xc^2} \quad (37)$$

O digrama complexo do circuito é o da Figura 32.

Pelo diagrama da Figura 32 e recorrendo ao teorema de Pitágoras, é possível deduzir as seguintes expressões para calcular o  $R$  e o  $Xc$ :



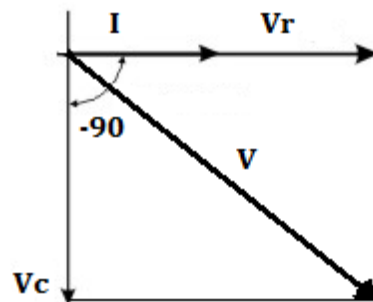
**Figura 32 – Digrama complexo do circuito RC [22].**

$$R = |Z| \cos \varphi \quad (38)$$

e,

$$-jX_C = |Z| \operatorname{sen} \varphi \quad (39)$$

Aplicando a Lei de Kirchoff para as tensões é possível obter o diagrama da Figura 33.



**Figura 33 – Diagrama fasorial do circuito RC.**

No diagrama fasorial da Figura 33, a corrente  $I$  está em fase com a tensão na resistência  $V_R$  enquanto  $V_C$  está desfasado  $90^\circ$  em atraso em relação à corrente  $I$ . Sendo a soma das tensões fasoriais,  $V_R$  e  $V_C$  igual a  $V$ .

O módulo da tensão  $|V|$  por sua vez é obtido pela equação (40):

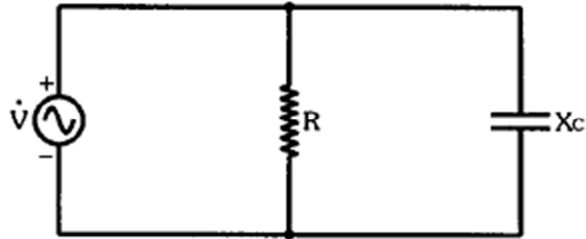
$$|V| = \sqrt{V_R^2 + V_C^2} \quad (40)$$

sendo o seu desfasamento dado por:

$$\varphi = -\arctan\left(\frac{V_C}{V_R}\right) \quad (41)$$

- **Circuitos RC Paralelo**

A impedância no circuito RC paralelo (Figura 34) é obtida por:



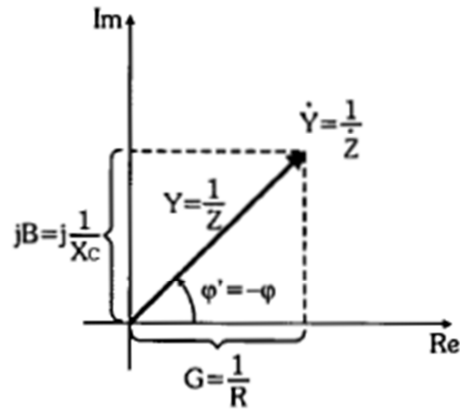
**Figura 34 – Circuito RC paralelo [22].**

$$\frac{1}{Z} = \frac{1}{R} + j \frac{1}{X_C} \quad (42)$$

ou pela equação:

$$Z = \frac{-jRX_C}{R - jX_C} \quad (43)$$

O diagrama complexo deste circuito é dado pela Figura 35.



**Figura 35 – Diagrama complexo do circuito RC paralelo [22].**

A representação da Figura 35, é construída com base na admitância ( $Y=1/Z$ ), condutância ( $G=1/R$ ) e susceptância ( $B=1/X_c$ ) do circuito, ou seja, pelo inverso da impedância, resistência e reatância, respetivamente.

O módulo de  $|Z|$  é dado pela equação (44):

$$\left| \frac{1}{Z} \right| = \sqrt{\frac{1}{R^2} + \frac{1}{X_c^2}} \quad (44)$$

ou pela equação (45),

$$Z = \frac{RX_c}{\sqrt{R^2 + X_c^2}} \quad (45)$$

O desfasamento por sua vez é obtido através de:

$$\varphi = \arctan\left(\frac{X_c}{R}\right) \quad (46)$$

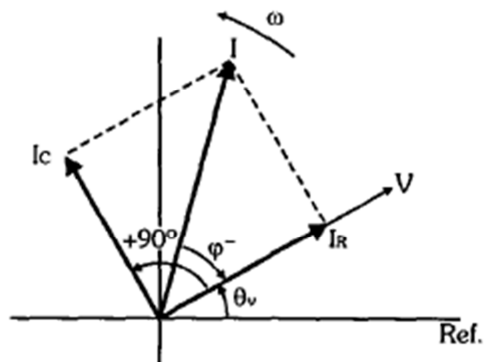
Recorrendo ao teorema de Pitágoras  $R$  e  $X_c$  são obtidos pelas seguintes equações:

$$R = \frac{Z}{\cos\varphi} \quad (47)$$

e,

$$X_C = \frac{Z}{\sin\varphi} \quad (48)$$

Fasorialmente, o diagrama do circuito é dado pela Figura 36, sendo a soma das correntes fasoriais,  $I_R$  e  $I_C$  igual a  $I$ .



**Figura 36 – Diagrama fasorial do circuito RC paralelo [22].**

O módulo da corrente  $I$  pode ser obtido por:

$$|I| = \sqrt{I_R^2 + I_C^2} \quad (49)$$

e o desfasamento entre a tensão e a corrente, pela equação:

$$\varphi = \arctan \frac{I_C}{I_R} \quad (50)$$

Recorrendo às expressões e conceitos abordados ao longo desta subsecção, na subsecção seguinte será abordada a resposta em frequência de cada um dos modelos apresentados na Figura 30.

### 3.10.3. Análise em frequência dos circuitos equivalentes

O modelo A da Figura 37 apresenta idealmente apenas um condensador. Recorrendo ao cálculo da impedância total do circuito é possível traçar o seu diagrama de Nyquist (Figura 37, à direita), variando apenas a sua frequência ( $\omega=2\pi f$ ).

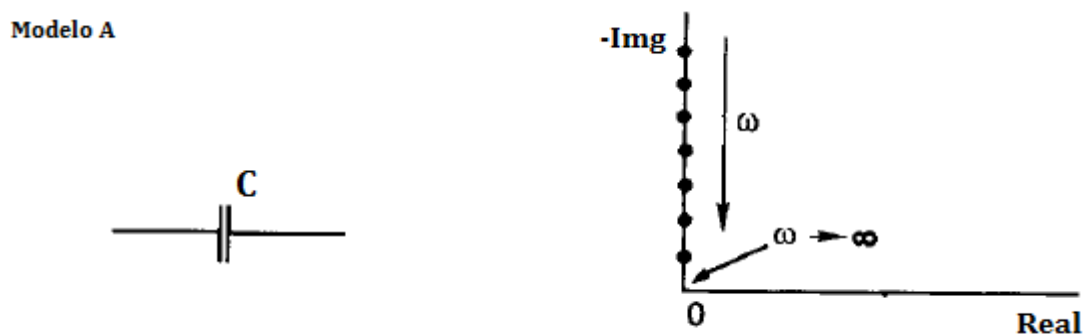


Figura 37 – Diagrama de Nyquist para o modelo A [21].

Diminuindo a frequência do sistema, como a componente resistiva é igual a zero (apenas existe componente imaginária), a impedância total do circuito irá tender para infinito. Por outro lado, aumentando a frequência a impedância total do circuito irá tender para zero, como é possível verificar na Figura 37.

No modelo B da Figura 38, já existe uma componente resistiva, neste caso  $R_s$  (parte real positiva), existindo também desfasamento entre a tensão e a corrente no circuito RC.

Modelo B

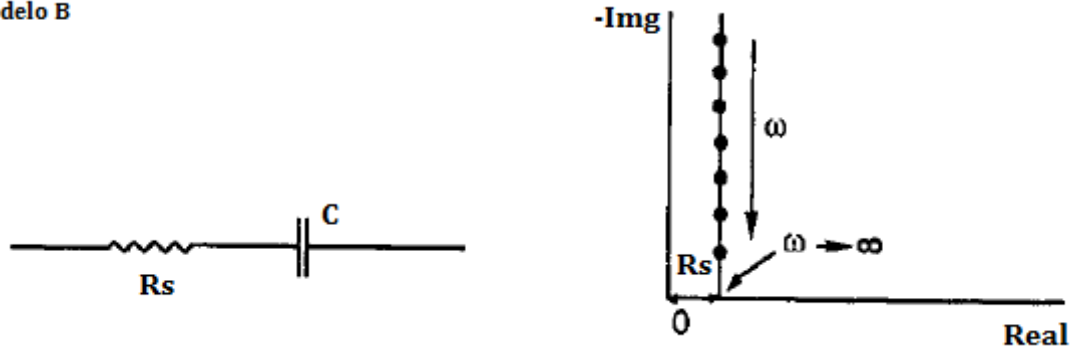


Figura 38 – Diagrama de Nyquist para o modelo B [21].

A variação da frequência neste modelo origina um diagrama de Nyquist (Figura 38 à direita) idêntico ao do modelo A, mas com componente real, que é devida à resistência  $R_s$ . O modelo C da Figura 39 é constituído por uma resistência em série ( $R_s$ ), com um circuito em paralelo constituído por uma resistência  $R$  e um condensador  $C$ .

Modelo C

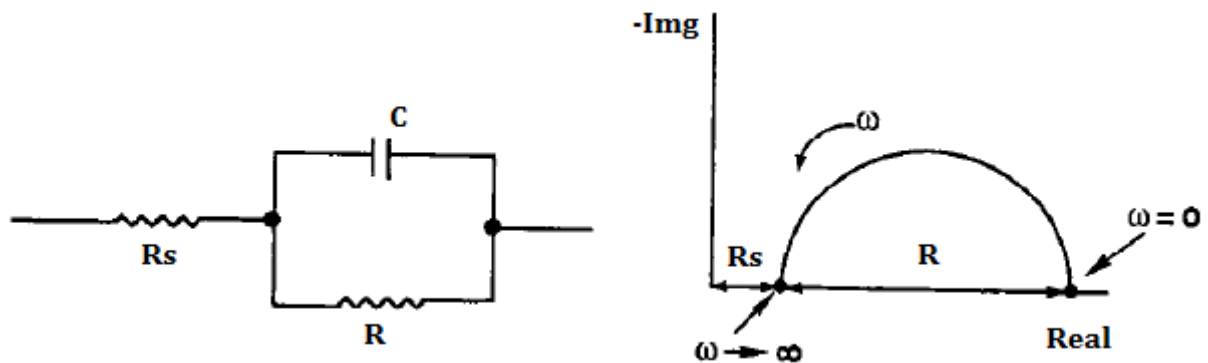
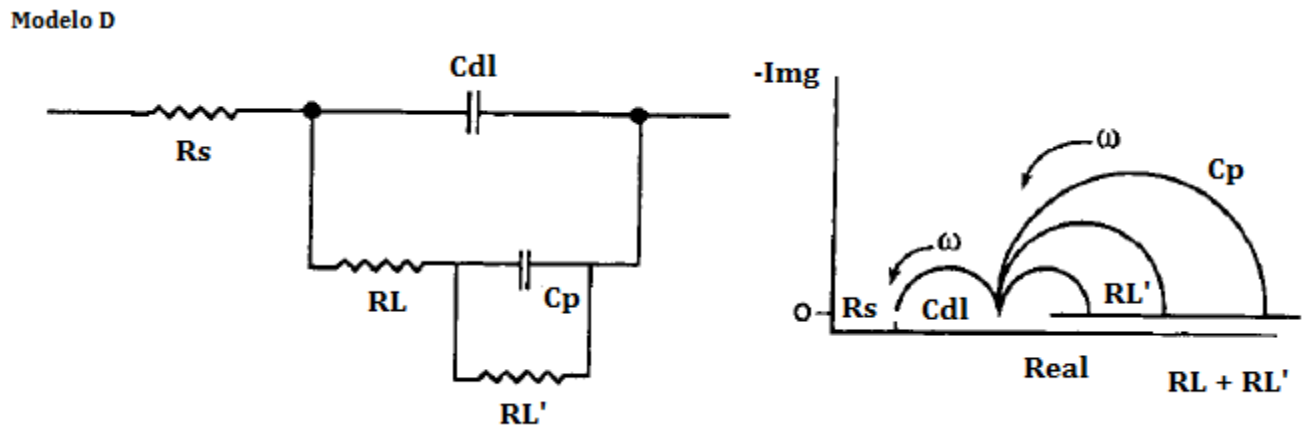


Figura 39 – Diagrama de Nyquist para o modelo C [21].

Neste modelo a variação da frequência origina um semicírculo, sendo que à medida que a frequência aumenta este tende para o valor de  $R_s$ .

O modelo D da Figura 40 é constituído pela associação de um condensador  $C_p$  em paralelo com uma resistência  $R_L$ , em série com uma resistência  $R_L$ , estando todo este conjunto ( $R_L$ ,  $C_p$ ,  $R_L$ ) em paralelo com o condensador  $C_{dl}$  e por último é acrescentada uma resistência de entrada em série  $R_s$ . Este modelo pode ser decomposto e analisado individualmente,

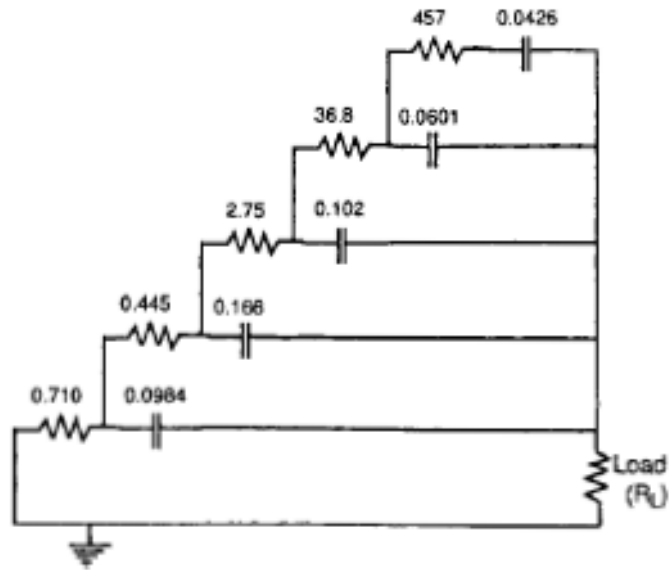
utilizando a mesma metodologia aplicada nos anteriores modelos, tendendo este, à medida que se aumenta a frequência, para o valor da resistência de entrada  $R_s$ .



**Figura 40 – Diagrama de Nyquist para o modelo D [21].**

#### **3.10.4. Modelo de Miller**

Um dos modelos testados por Miller, visa modelar a resposta de um pseudo EDLC de 0,047 F de capacidade. O circuito elaborado foi o da Figura 41.



**Figura 41 – Modelo de Miller [21].**

A capacidade total do circuito, pode ser calculada pelo somatório das capacidades dos condensadores apresentados na Figura 41, sendo a constante de carga de cada um dos condensadores obtida pelo produto do somatório de todas as resistências até à massa do circuito pela capacidade do condensador em causa. Por exemplo, para calcular a constante de tempo do condensador de 0,102F é necessário efetuar os seguintes cálculos (Figura 42).

$$\begin{aligned} \tau &= (R_1 + R_2 + R_3) \times C \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow \tau &= (2,75 + 0,445 + 0,710) \times 0,102 \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow \tau &= 398,31 \text{ ms} \end{aligned}$$

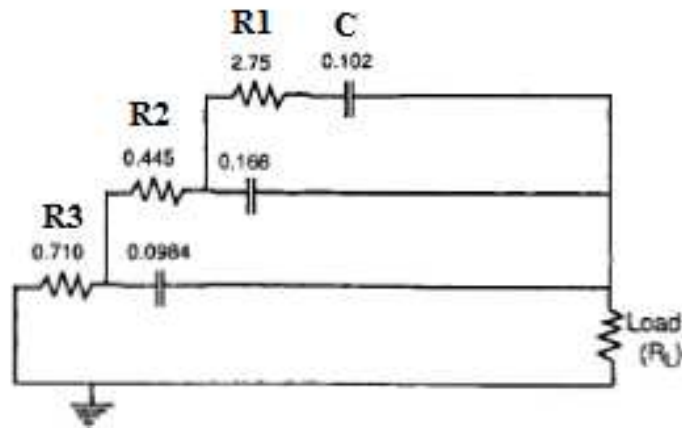


Figura 42 – Cálculo da capacidade parcial do modelo de Miller [21].

### 3.10.5. Relações empíricas

Existem vários estudos na área das relações empíricas nomeadamente no que concerne ao tamanho dos poros, à área de superfície e à capacidade. Como já foi referido anteriormente, a área de contacto e a capacidade, em teoria seriam diretamente proporcionais. No entanto, os resultados obtidos experimentalmente sugerem que estes são não-correlacionáveis.

Foram desenvolvidos dois modelos matemáticos para explicar a discrepância entre a teoria e a prática. O primeiro modelo propunha que a capacidade por micro-poro e a capacidade externa por superfície de área fossem calculadas separadamente. O segundo, mundialmente aceite, sugere que os iões da eletrólise não podem ser difundidos nos poros porque afetam a capacidade do supercondensador. Este estudo foi especialmente relevante para otimizar o tamanho dos poros e a distribuição necessária para maximizar a acessibilidade dos iões. Foi ainda demonstrada uma relação inversa entre o tamanho dos poros e a ESR [13, 23, 24].

### **3.10.6. Limites teóricos**

Modelos quantitativos têm sido usados para determinar os limites teóricos da densidade energética e densidade de potência para os supercondensadores. Com o intuito de otimizar, os investigadores começaram por mostrar interesse no material que constituía o elétrodo do EDLC, no entanto, e através do modelo teórico, rapidamente repararam que a eletrólise e a tensão de fuga é que limitavam a densidade de potência e a densidade energética dos supercondensadores. Assim, e para que os limites teóricos dos EDLC fossem atingidos o material que constitui o elétrodo e o eletrólito passaram a possuir igual importância para a otimização do supercondensador [24].

### **3.10.7. Novas áreas de interesse**

Estudos recentes sugerem que novas áreas vão passar a ser estudadas pelos investigadores, em detrimento do estudo já desenvolvido para otimizar o material que constitui o elétrodo. Em particular, os condensadores híbridos (subsecção 3.4.5.), a resistência em série, a otimização da eletrólise e o processo de auto-descarga.

Os supercondensadores híbridos, como foi abordado, combinam o melhor da tecnologia aplicada nos EDLC com a melhor tecnologia aplicada aos pseudocondensadores num único condensador. Por esse motivo este tipo de condensador lidera o número de estudos desenvolvidos atualmente, com vista à sua otimização.

A ESR dos supercondensadores é a responsável por limitar a densidade de potência dos supercondensadores até próximo do seu limite teórico. Já foram desenvolvidos inúmeros processos para reduzir o valor desta resistência, como o polimento da superfície do coletor, estabelecendo uma ligação química entre o elétrodo e o coletor e utilizando um filme coloidal. Alguns estudos definem uma relação entre o tamanho dos poros e a ESR no material do elétrodo.

O eletrólito é responsável por limitar a densidade de energia do supercondensador, no entanto, e apesar dos vários esforços, ainda não foi possível obter eletrólitos otimizados.

Por esse motivo este continuará a ser um dos focos em destaque em futuros estudos desenvolvidos, tentando promover sinergias entre os eletrólitos e os eletrodos.

O processo de auto-descarga ocorre quando um EDLC carregado inicia o processo de descarga internamente num circuito aberto. Este fenómeno ocorre devido à pressão termodinâmica a que este está sujeito, quando atinge o valor mais elevado de densidade energética. É mais frequente em condensadores de capacidade elevada e deve-se às reações químicas ocorridas, como a oxidação-redução, e às impurezas no material que constitui os eletrodos. Para diminuir a ocorrência deste fenómeno, existe a possibilidade de aumentar a pureza do eletrodo.

### **3.11. EDLC VANTAGENS E LIMITAÇÕES**

Por representarem uma alternativa cada vez mais fiável e utilizada em detrimento das tradicionais baterias, é necessário enumerar as suas principais vantagens e limitações.

- **Vantagens**
- Elevada densidade de energia (4000 Wh/kg);
- Possibilita múltiplos ciclos de carga e descarga;
- Apresenta baixa degradação mesmo depois de milhares de ciclos;
- Os materiais utilizados apresentam valores reduzidos de toxicidade;
- Apresenta tempos de carga e descarga muito baixos, aproximadamente iguais;
- Manutenção praticamente desnecessária;
- Peso reduzido;
- Elevada eficiência (95 % ou superior);
- Funcionam em condições ambientais adversas;

- Reduzido impacto ambiental.

- **Limitações**

- A quantidade de energia armazenada por kg é consideravelmente inferior a uma bateria (30 a 40 Wh/kg para uma bateria e 3 a 5 Wh/kg para um supercondensador);
- A tensão varia com a energia armazenada. Para armazenar energia é necessário um sofisticado controlo eletrónico;
- O material dielétrico apresenta valores mais elevados de absorção.

Outra das vantagens dos EDLC é a sua capacidade de armazenar grandes quantidades de energia (densidade energética), disponibilizando-a de forma rápida (densidade de potência), com perdas reduzidas e sem produzirem resíduos.

Na Tabela 7 são listadas algumas propriedades típicas dos condensadores clássicos, dos EDLC (mais comercializados) e das baterias.

**Tabela 7 – Comparação das propriedades de alguns dispositivos de armazenamento de energia [25].**

	Condensadores Clássicos	Condensadores EDLC	Baterias
<b>Tempo de Carga [s]</b>	$10^{-3} - 10^{-6}$	$0,3 \times 10^{-1} - 0,3 \times 10^{-2}$	$10^3$
<b>Tempo de Descarga [s]</b>	$10^{-3} - 10^{-6}$	$0,3 \times 10^{-1} - 0,3 \times 10^{-2}$	$10^3 - 10^4$
<b>Ciclos de Vida [ciclos]</b>	$10^{10}$	$10^5$	$10^3$
<b>Tempo de Vida [anos]</b>	$0,3 \times 10^2$	$0,3 \times 10^2$	$0,5 \times 10^4$

Observando a tabela anterior, é possível detetar que os EDLC, apresentam ciclos de vida e tempo de vida superiores aos das baterias.

O tempo de vida e a eficiência são dois importantes fatores a considerar, para além dos já referidos anteriormente (densidade de energia e de potencial), antes de selecionar a tecnologia de armazenamento mais adequada a cada situação. Na Figura 43 está presente a

relação entre o tempo de vida-ciclos e a eficiência, para os vários dispositivos de armazenamento de energia.

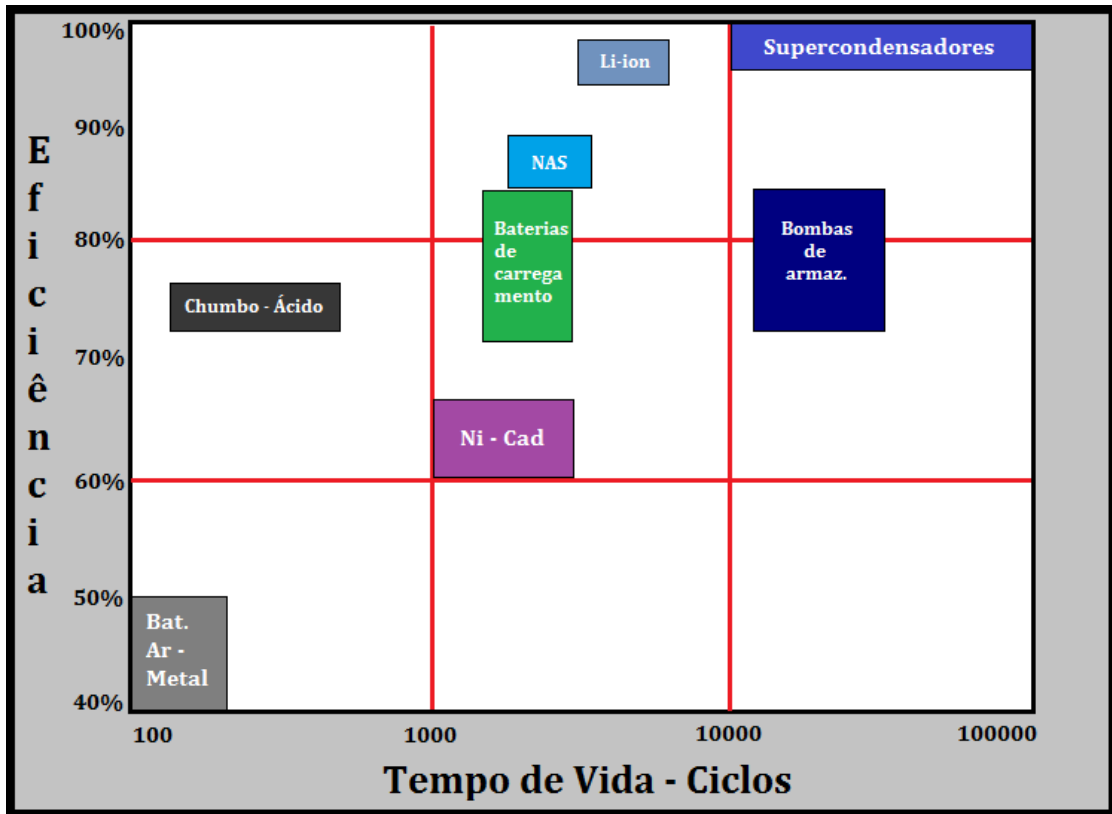


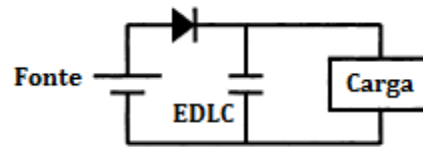
Figura 43 – Eficiência em função do ciclo de vida dos dispositivos de armazenamento [25].

A escolha de um dispositivo de armazenamento de energia com reduzido nível de eficiência aumenta o custo efetivo da energia, porque apenas uma parte dessa energia será utilizada. O baixo ciclo de vida aumenta por sua vez o custo total devido à necessidade de o mesmo ser substituído.

### 3.12. APLICAÇÃO DOS EDLC NO CONTEXTO ATUAL

Atualmente os EDLC continuam a ser mais utilizados para permitir realizar *backups* sendo um exemplo disso as memórias, os microcontroladores e as placas principais de alguns sistemas eletrônicos. Estes possuem uma fonte de alimentação primária, como mostra a

Figura 44 e os supercondensadores apenas entram em funcionamento quando existe uma falha, quer seja por problemas de mau contacto, falta de energia ou por queda abrupta de tensão na fonte primária, entre outras.



**Figura 44 – Sistema de *backup* com EDLC [20].**

Desta forma os EDLC suportam os consumos críticos dos sistemas e asseguram o seu correto funcionamento. Algumas das utilizações mais comuns de EDLC, em equipamentos eletrónicos são:

1. Recetores de TV por satélite, gravadores de vídeo, televisões;
2. Sistemas de áudio para carro, taxímetros;
3. Sistemas de alarme por relógio, máquinas de café;
4. Câmaras de vídeo e máquinas fotográficas;
5. Brinquedos;
6. Relógios e lanternas solares, sinalização rodoviária (sinalização vertical e de pavimento);
7. Transportes públicos e automóveis.

Nos equipamentos referidos nos pontos 1 e 3 os supercondensadores são responsáveis por manter o relógio do sistema a funcionar corretamente, no ponto 2 estes possibilitam realizar *backups* das listas de emisoras de rádio memorizadas e dos programas de taxas dos taxímetros, no ponto 4 os EDLC asseguram o correto funcionamento do sistema até à substituição da bateria (normalmente por alguns minutos), no ponto 5 estes asseguram uma rápida resposta dos brinquedos movidos por motores e no ponto 6, estes em conjunto com painéis solares aumentam o tempo de vida dos sistemas e diminuem as necessidades de manutenção.

Nos veículos a motor referidos no ponto 7, os supercondensadores são utilizados nos motores que funcionam a hidrogénio com células de combustível, como é o caso de alguns veículos já a circular em Portugal (Figura 45). O condensador permite acumular as cargas

produzidas pelas células de combustível ou pelos travões eletromagnéticos e essa carga pode ser fornecida, nos momentos em que for necessário acelerar. Desta forma, não são libertados gases nocivos para a atmosfera, nem são utilizadas baterias com químicos corrosivos.



**Figura 45 – Veículo a hidrogénio [26].**

As vantagens dos EDLC enumeradas na secção 3.11, como o longo ciclo de vida, o elevado número de cargas e descargas possibilitadas, o intervalo de temperaturas sem afetar o seu correto funcionamento, a elevada eficiência e auto descarga reduzida faz dos supercondensadores uma escolha adequada para este tipo de aplicações.

### **3.13. COMERCIALIZAÇÃO E FABRICANTES DE EDLC**

Existem várias empresas em todo o mundo que fabricam e comercializam EDLC. No Japão a NEC e a Panasonic produzem-nos desde os anos 80 e nos Estados Unidos os principais produtores são a Epcos, a ELNA, a AVX e a Cooper.

A Evans e a Maxwell comercializam soluções com módulos de tensão balanceada. A Kold Ban comercializa módulos especificamente para combustão de motores em água fria. A Cap-XX na Austrália assim como a Ness Capacitor Co na Coreia, possuem uma ampla oferta de EDLC. No Canada, a Tavrma produz vários módulos com EDLC, enquanto a

ESMA na Rússia comercializa módulos para aplicação em carros elétricos e em motores com sistemas de combustão interna.

Analisando a Tabela 8, é facilmente perceptível que grande parte da produção de EDLC se encontra nos Estados Unidos e que cada um atribui a sua própria designação para o mesmo produto. A capacidade e a tensão máxima são alguns dos fatores que condicionam a escolha do fabricante e do melhor EDLC para uma situação específica, bem como o material que constitui cada condensador. Este afeta diretamente a potência e a densidade energética do EDLC. Na secção seguinte serão abordados os custos e distribuidores dos EDLC.

**Tabela 8 – Fabricantes de EDLC [15].**

<b>Nome</b>	<b>País</b>	<b>Designação</b>	<b>Capacidade (F)</b>	<b>Tensão (V)</b>	<b>Site</b>
<b>AVX</b>	USA	Bestcap	0,022 – 0,56	3,5 - 12	<a href="http://www.avx.com">www.avx.com</a>
<b>CAP-XX</b>	Austrália	Supercapacitor	0,09 – 2,8	2,25 – 4,5	<a href="http://www.cap-xx.com/">www.cap-xx.com/</a>
<b>Cooper</b>	USA	PowerStor	0,47 – 50	2,3 - 5	<a href="http://www.cooperindustries.com">www.cooperindustries.com</a>
<b>ELNA</b>	USA	Dynacap	0,033 – 100	2,5 – 6,3	<a href="http://www.elna-america.com">www.elna-america.com</a>
<b>ESMA</b>	Rússia	Capacitor modules	100 - 8000	12 - 52	-
<b>Epcos</b>	USA	Ultracapacitor	5 – 5000	2,3 / 2,5	<a href="http://www.epcos.com">www.epcos.com</a>
<b>Evans</b>	USA	Capaterry	0,01 – 1,5	5,5 / 11	<a href="http://www.evanscap.com">www.evanscap.com</a>
<b>KoldBan</b>	USA	KAPower	1000	12	<a href="http://www.koldban.com">www.koldban.com</a>
<b>MaxWell</b>	USA	Boostcap	1,8 - 2600	2,5	<a href="http://www.maxwell.com">www.maxwell.com</a>
<b>NEC</b>	Japão	Supercapacitor	0,01 – 6,5	3,5 - 12	<a href="http://www.nec-tokin.com">www.nec-tokin.com</a>
<b>Ness</b>	Coreia	EDLC	10 – 3500	3	<a href="http://www.nesscap.com">www.nesscap.com</a>
<b>Panasonic</b>	Japão	Gold Capacitor	0,1 - 2000	2,3 – 5,5	<a href="http://panasonic.net">http://panasonic.net</a>
<b>Tavrima</b>	Canadá	Supercapacitor	0,13 - 160	14 - 300	<a href="http://www.tavrima.com">www.tavrima.com</a>

### 3.14. CUSTOS E DISTRIBUIDORES

Nos dias de hoje a aquisição de supercondensadores em lojas tradicionais de referência na área da eletrotécnica, ainda se revela um processo difícil. Isto ocorre, em grande parte, devido ao desconhecimento desta tecnologia. Na *Internet* existem vários *sites* de distribuição em Portugal, como a Digikey (alguns deles sujeitos a quantidade mínima) e a Farnell (a última com representante em Portugal na zona de Coimbra, sem quantidade mínima), sendo ainda possível obter amostras diretamente de alguns fabricantes, como é o caso da Cooper Bussman. No entanto, devido ao seu elevado custo, estes apenas são disponibilizados para empresas, quando devidamente justificados. Em alguns *sites* de compra e venda internacionais, existe também a limitação do número de unidades, no entanto, no Ebay, é possível obter supercondensadores, ainda que dependendo da origem de forma mais demorada, mas sem exigir um número mínimo de unidades.

No dia 26 de Outubro estes eram os preços praticados pelos distribuidores enumerados, para os supercondensadores de valor comercial mais reduzido (Tabela 9).

**Tabela 9 – Preços e quantidades mínimas para alguns distribuidores.**

<b>Origem</b>	<b>Capacidade (F)</b>	<b>Tensão máxima (V)</b>	<b>Preço (€) s/Iva</b>	<b>Nº Mínimo</b>
<b>Farnell</b>	0,015	2,6	0,41	1
<b>Digikey</b>	0,06	3,3	0,23	4000
<b>Ebay</b>	0,047	5,5	1,38	1
<b>AliExpress</b>	2	2,7	0,15	300

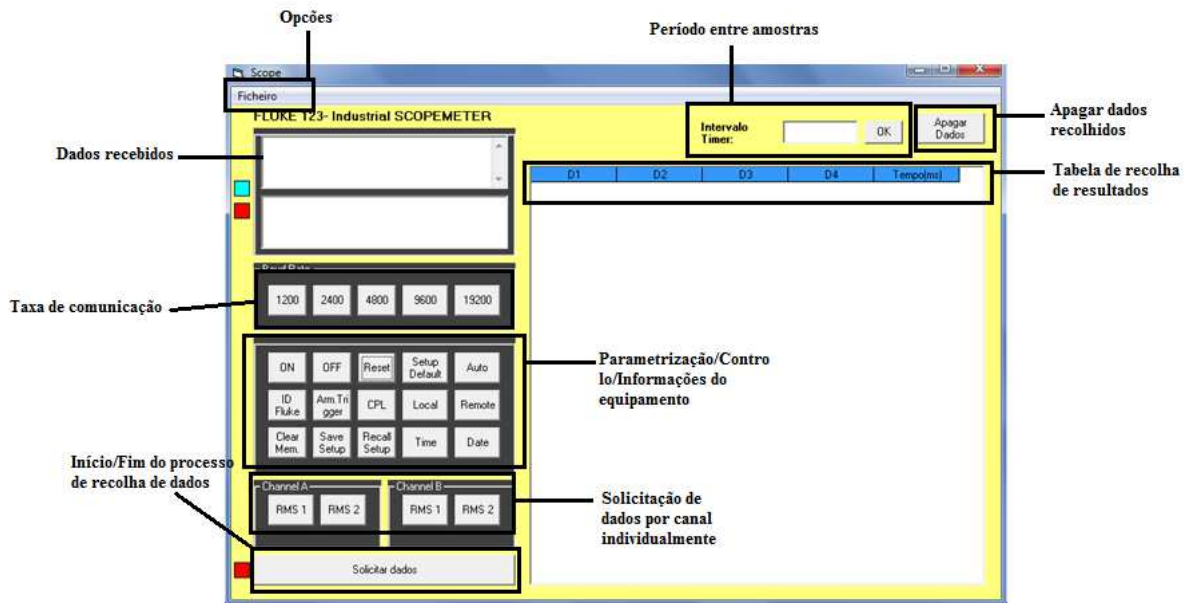


## 4. DESCRIÇÃO DO HARDWARE/SOFTWARE DESENVOLVIDOS

Ao longo deste capítulo serão apresentadas todas as soluções desenvolvidas, que possibilitaram a elaboração deste projeto, entre as quais, uma placa de aquisição de dados (*hardware*), desenvolvida para recolher a resposta dos supercondensadores, e duas aplicações criadas em *Visual Basic* (*software*), utilizadas para controlo e interface entre o utilizador e o computador.

### **4.1. SOFTWARE DE COMUNICAÇÃO E RECOLHA DE DADOS - SCOPEMETER**

Para otimizar o processo de recolha de dados, foi desenvolvido em *Visual Basic* uma interface de comunicação com o *Scopemeter* (Anexo A.- Material Utilizado), apresentada na Figura 46.

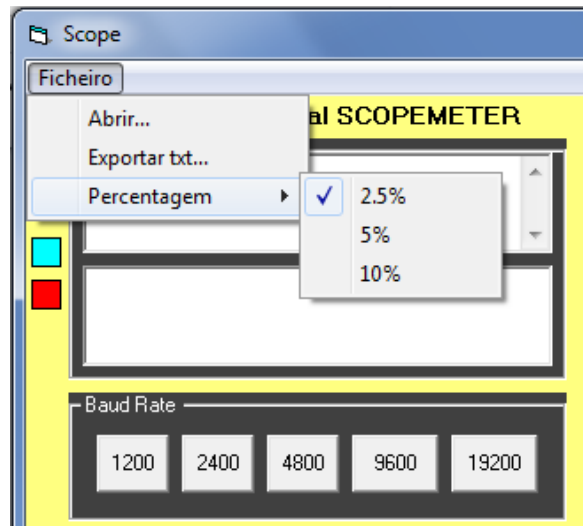


**Figura 46 – Aplicação para recolha de dados através do *Scopemeter*.**

Esta aplicação possibilita controlar através da comunicação RS-232, todas as funcionalidades presentes no *Scopemeter*, entre as quais: taxa de comunicação com o computador, parametrização, *On/Off*, *Reset* e recolha de valores RMS, para os quatro canais do equipamento.

A possibilidade de recolha dos valores RMS foi determinante para a análise em frequência dos condensadores clássicos. Para isso, foi definido que o canal 1 do *Scopemeter* iria ler apenas a frequência, enquanto os restantes seriam para a tensão de entrada, a tensão no condensador e o desfasamento entre a corrente e a tensão no condensador.

No entanto, e devido à precisão do gerador de sinais (0 – Material Utilizado) utilizado, houve a necessidade de definir na aplicação uma percentagem mínima para a variação da frequência (Figura 47). Assegurou-se que só após uma variação no gerador de sinais, superior ao intervalo definido, é que seria preenchida uma nova linha na tabela, recolhendo assim os dados de forma controlada e progressiva.

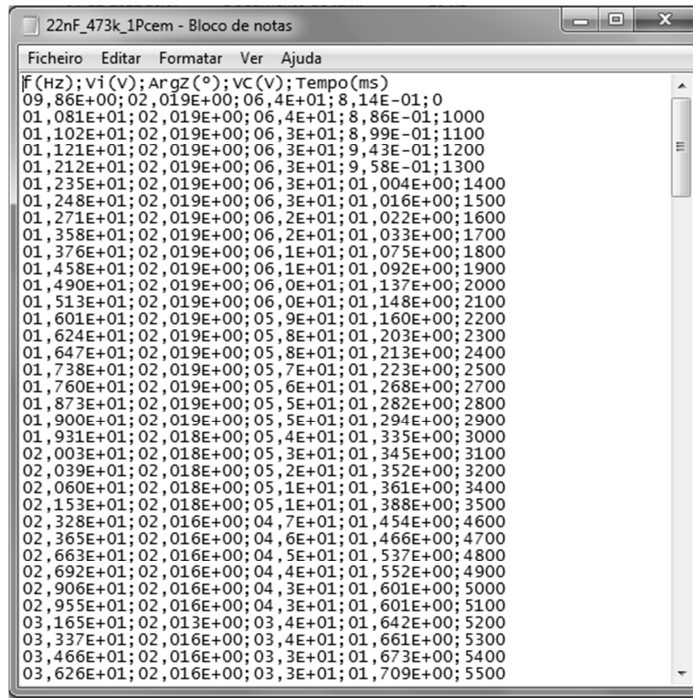


**Figura 47 – Escolha da percentagem mínima entre variações da frequência.**

Depois de recolhidos os dados, a aplicação possibilita ao utilizador:

- exportar os mesmos para um ficheiro Excel ou ficheiro de texto (.txt) para uma análise posterior;
- abrir um ficheiro anteriormente construído pela aplicação e continuar a recolha de dados a partir do ponto onde parou.

Na Figura 48 é apresentado um ficheiro de texto construído pela aplicação.



**Figura 48 – Exemplo de um ficheiro exportado através da aplicação**

Esta ferramenta foi particularmente útil, para a obtenção da resposta em frequência dos condensadores mais comuns.

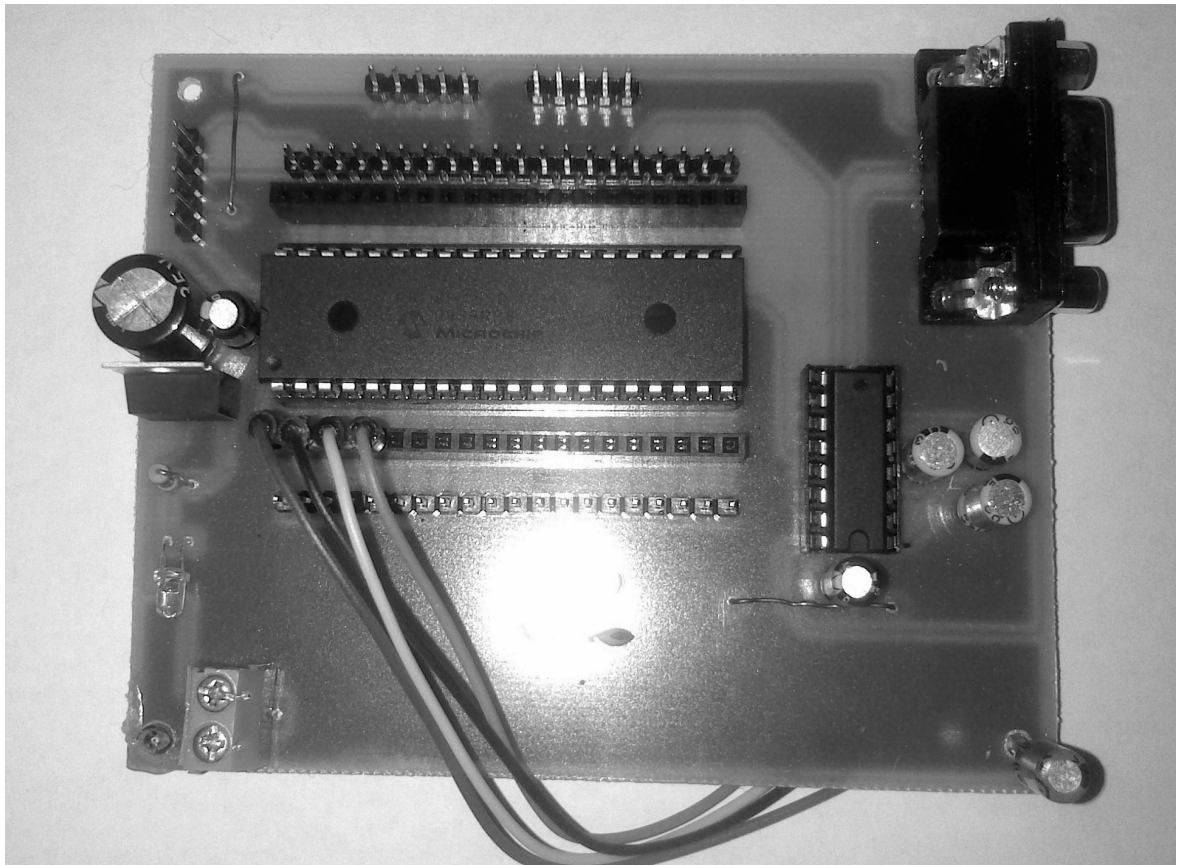
No que diz respeito aos supercondensadores, esta aplicação não foi tão eficaz como no caso dos condensadores clássicos, devido às limitações: quer do *Scopemeter*, quer do gerador de sinais. O *Scopemeter*, apenas consegue auto ajustar leituras de frequência superiores a 6 Hz e o gerador de sinais não apresenta a gama de frequências necessária para obter a resposta dos EDLC (entre 10 mHz e 1Hz).

A constante de carga ( $\tau$ ) dos supercondensadores limita bastante a leitura da década anterior e superior à frequência de corte. Por isso, a alternativa passaria por analisar o comportamento dos supercondensadores, no domínio dos tempos.

Esta análise, não foi possível de ser realizada recorrendo à aplicação desenvolvida para o *Scopemeter*, devido ao período de amostragem. O tempo de comunicação com este aparelho de medida e o protocolo proprietário existente internamente, não permitiu recolher os valores experimentais de carga e descarga dos EDLC no domínio dos tempos. Para contornar esse obstáculo, seria portanto necessário construir de raiz quer o *hardware* quer o *software* que permitisse fazer a recolha dos dados, ou seja, uma placa de aquisição de sinal.

## 4.2. PLACA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

A placa de aquisição de dados foi desenvolvida com o recurso a uma PIC, neste caso a PIC18F4550 devido à sua ampla utilização, quer a nível industrial, quer a nível didático e um módulo de comunicação RS232, fazendo este uso de um MAX232, uma ficha DB9 e um conversor de RS232 para USB. Por uma questão de comodidade, todos os pinos da PIC foram disponibilizados através de conectores fêmea e macho e a sua alimentação foi realizada através de um regulador de tensão, no caso, como esta foi projetada para funcionar a 5 V o 7805 e um transformador de 230 V para 8 V. O Anexo B contém o *layout* da PCB, feito a partir do esquemático que se encontra no CD-ROM, sendo o aspeto real da placa concebida apresentado na Figura 49.



**Figura 49 – Placa de aquisição de dados.**

Em termos genéricos, esta foi projetada para comunicar a 115200 bps, otimizando e reduzindo desta forma o tempo de envio necessário entre cada comunicação. Esta placa

possui quatro entradas analógicas para leitura dos valores de tensão, sendo para isso utilizado o A/D (conversor analógico-digital) de 10 *bits* da própria PIC.

De seguida, são apresentadas algumas das especificações da PIC18F4550 consideradas fundamentais para a elaboração do trabalho.

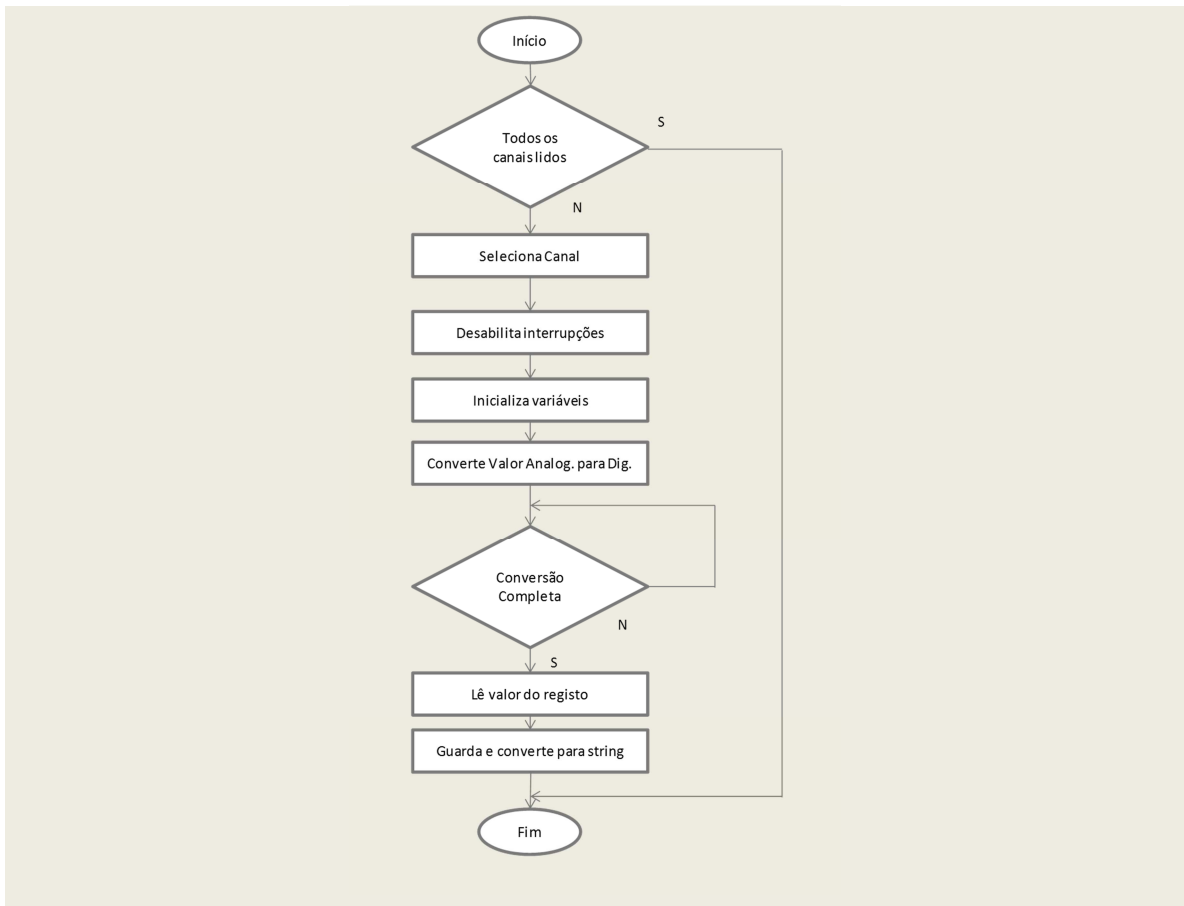
#### **4.2.1. Especificações**

##### **4.2.1.1. CONVERSOR A/D**

O A/D da PIC18F4550 é um registo de 10 *bits*, neste caso, configurado para ler tensões entre 0 e 5 V. Para 5 V, o valor do registo corresponde ao valor máximo (1023) e o valor 0 corresponde ao valor mínimo (o 0) do registo do A/D.

Como referido, foram configuradas quatro entradas analógicas (AN0, AN1, AN2 e AN3) e por isso, apesar de a leitura ser realizada no mesmo ciclo, é necessário alterar o canal de leitura através do registo da configuração do A/D, ADCON0.

O fluxograma da Figura 50 ilustra o procedimento de leitura do A/D.



**Figura 50 – Fluxograma da função de leitura do A/D.**

Para agilizar todo o processo, durante a rotina de comunicação apenas são enviadas as entradas solicitadas pelo utilizador. Conforme refere o *datasheet*, para que o A/D funcione corretamente é necessário configurar *bit a bit* os seguintes registos [27]:

1. *A/D Control Register 0* (ADCON0)
2. *A/D Control Register 1* (ADCON1)
3. *A/D Control Register 2* (ADCON2)

O registo ADCON0 permite seleccionar a entrada analógica a ler e controlar o processo de conversão, o ADCON1 define o número de entradas analógicas e as entradas/saídas digitais. No ADCON1 são ainda definidos os valores de referência para o A/D, neste caso entre 0 e 5 V. O ADCON2 possibilita definir o tempo de aquisição (2 TAD) e a frequência de relógio do A/D ( $F_{osc}/64$ ).

Na subsecção seguinte será abordado o módulo de comunicação e a sua configuração.

#### 4.2.1.2. COMUNICAÇÃO RS-232

O tipo de comunicação escolhido foi a comunicação assíncrona, com um *start bit*, 8 *bits* de dados e um *stop bit*, tal como representado na Figura 51.



Figura 51 – Comunicação assíncrona [28].

Para o envio de 1 *byte*, ou seja 8 *bits*, com os respetivos *stop* e *start bit* a 115200 bps o tempo de transmissão é o seguinte:

$$t_{byte} = \frac{8 \text{ bits}}{115200} \Leftrightarrow t_{byte} = 69,44 \mu s$$

$$t_{bit} = \frac{69,44 \mu s}{8} \Leftrightarrow t_{bit} = 8,6 \mu s$$

$$t_{trans} = 8,6 \mu s + 69,44 \mu s + 8,6 \mu s$$

$$t_{trans} = 86,64 \mu s$$

Comparativamente com uma das taxas mais comuns, 9600 bps, é possível verificar a importância deste fator no resultado final.

A taxa de 115200 bps é a taxa de transmissão máxima para a PIC18F4550 e para a configurar é preciso definir os seguintes registos [27]:

1. *Transmit Status and Control* (TXSTA)
2. *Receive Status and Control* (RCSTA)
3. *Baud Rate Control* (BAUDCON)

O registo TXSTA permite configurar o número de *bits* a enviar (neste caso 8 *bits*), o tipo de comunicação (assíncrona), a velocidade de comunicação (elevada ou reduzida) e por último ativar ou desativar o envio através da UART. Por sua vez, o registo RCSTA é o responsável pela configuração do número de *bits* a receber (8 *bits*), ativar ou desativar a receção de dados e ativar ou desativar o processo de comunicação RS232.

O BAUDCON é configurado com o número de *bits* do gerador de *baud rate* (8 *bits*). Para concluir o processo de configuração é necessário ainda configurar o registo SPBRG. Este depende diretamente dos *bits* configurados nos registos TXSTA e RCSTA.

Utilizando a fórmula referenciada no *datasheet*, o SPBRG é calculado pela seguinte equação:

$$\text{Baud rate} = \frac{F_{osc}}{16(\text{SPBRG} + 1)} \quad (51)$$

O *Baud rate* da equação (51) representa a taxa de comunicação escolhida e a  $F_{osc}$  representa a frequência da PIC. Neste caso, devido à utilização de um cristal de 20 MHz, esta frequência é de 48 MHz. Calculando o valor do registo é possível obter o seguinte resultado:

$$115200 = \frac{48 \times 10^6}{16(\text{SPBRG} + 1)} \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow \text{SPBRG} = 25$$

O valor encontrado não corresponde a nenhum dos valores tabelados, porque a frequência da PIC é superior ao máximo apresentado, assim não será possível calcular o desvio em percentagem originado pela taxa de comunicação escolhida, no entanto e observando o valor para 40 MHz, este será inferior a 1%.

Depois de concluído todo o processo de configuração é importante testar a comunicação para verificar se tudo funciona como o esperado. A Figura 52 mostra o teste realizado com o auxílio do *Hyperterminal*.



**Figura 52 – Teste de comunicação realizado através do *Hyperterminal*.**

Por último é necessário verificar, com a ajuda de um LED e do *Scopemeter*, o tempo máximo que a PIC irá demorar a enviar os valores de tensão lidos pelo A/D, com os devidos separadores e o valor do temporizador, tendo-se obtido o período de 5,5 ms.

Assim, e para assegurar que não haverá perda de dados, o período de amostragem nunca será inferior a 10 ms e a receção de dados será assegurada através de interrupções de alta prioridade. Para isso, basta apenas configurar os registos PIE1 e IPR1 [26]. O primeiro é responsável pelas interrupções da UART e o segundo define o grau de prioridade, alta ou baixa. Desta forma, é possível iniciar e terminar o processo de aquisição de dados, definir o período de amostragem de acordo com o modelo a analisar e eliminar todos os valores definidos pelo utilizador, carregando os valores por omissão.

Na subsecção seguinte será abordado o *Timer* configurado para o envio dos dados desejados.

#### **4.2.1.3.     *TIMER***

O temporizador utilizado foi o Timer0, sendo ativado no início da aquisição de dados e posteriormente incrementado por intervalos de tempo constantes até gerar *overflow* ou atingir o período de amostragem escolhido. O tempo de cada incremento está diretamente relacionado com a  $F_{osc}$  e o *prescaler* configurado. Este tempo pode ser calculado da seguinte forma:

$$f_{t0} = \frac{F_{osc}}{4} \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow f_{t0} = \frac{48}{4} \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow f_{t0} = 12 \text{ MHz}$$

$$T = \frac{1}{f} \Leftrightarrow T = 83,33 \text{ ns} \times \text{Prescaler}$$

$$\Leftrightarrow T = 83,33 \text{ ns} \times 256 \Leftrightarrow T = 21,33 \mu\text{s}$$

O valor do *Prescaler* é definido na configuração dos registos do Timer0, como será abordado posteriormente. Depois de calculado o tempo de cada incremento é necessário definir o valor para comparação, do período de amostragem pretendido.

Por exemplo, para um período de amostragem de 1 s serão necessários 46876 incrementos. Este cálculo é realizado da seguinte forma:

$$n_{ticks} = \frac{T_{amostragem}}{T_{tick}} \Leftrightarrow n_{ticks} = \frac{1}{21,33 \mu\text{s}} \Leftrightarrow n_{ticks} = 46876$$

Para esta placa de aquisição de dados foram definidos os seguintes períodos de amostragem: 10 ms, 25 ms, 50 ms, 100 ms, 250 ms, 0,5 s e 1 s. A Tabela 10 apresenta os resultados calculados para todos os períodos de amostragem definidos.

**Tabela 10 – Correspondência entre período de amostragem e número de incrementos.**

<b>Período de amostragem (ms)</b>	<b>Número de incrementos necessários</b>
<b>10</b>	468
<b>25</b>	1171
<b>50</b>	2343
<b>100</b>	4687
<b>250</b>	11719
<b>500</b>	23441
<b>1000</b>	46876

Relativamente aos registos a configurar, neste caso é preciso definir [27]:

1. *Timer0 Control Register (T0CON)*
2. *Interrupt Control Register (INTCON)*

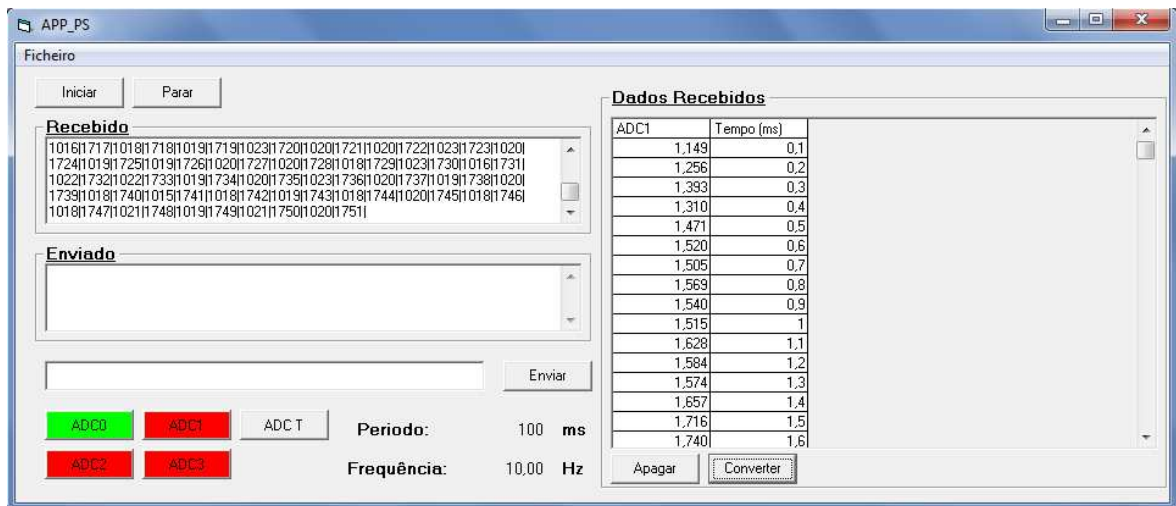
O registo T0CON é responsável por ativar/desativar o *timer*, permite definir o número de *bits* do registo do *timer* (neste caso definido como 8 *bits*), o incremento de relógio (neste caso ativado), se é utilizado *prescaler* e qual o seu valor (1:256). O registo INTCON é um registo de interrupção e permite ativar o *overflow* e a *flag* que indica que foi gerado um *overflow* no registo do *timer*.

Utilizando o mesmo método que foi enunciado na comunicação RS232, foi usado um LED e o *Scopemeter* para verificar se o *timer* foi configurado corretamente, o que se confirmou.

### **4.3. SOFTWARE DE RECOLHA DE DADOS**

O *software* desenvolvido, tal como aconteceu anteriormente com o de comunicação com o *Scopemeter*, foi desenvolvido em *Visual Basic*. Este permite ao utilizador configurar a placa de aquisição de dados (período de amostragem), através de RS232, recolher os resultados e exportá-los para um ficheiro Excel ou com outra extensão.

A Figura 53 mostra o *layout* definido, assim como alguns dos dados recolhidos durante as simulações.



**Figura 53 – Aplicação para recolha de resultados.**

As diferentes cores para os canais, indicam os que foram solicitados pelo utilizador. A vermelho encontram-se os canais inativos e a verde os canais ativos.

Os dados exportados serão posteriormente analisados através do MATLAB, para uniformizar todo o processo. No capítulo seguinte serão explicados todos os processos utilizados para obter as respostas temporais e no domínio das frequências dos condensadores; é também aqui apresentada a modelação que foi implementada.

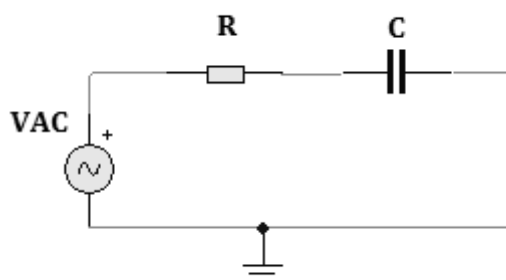


# 5. MODELAÇÃO E ANÁLISE DOS SUPERCONDENSADORES

Neste capítulo serão recolhidas as respostas temporais e no domínio das frequências dos condensadores, para posteriormente e com o auxílio do MATLAB, se realizar a modelação das várias entradas aplicadas ao sistema.

## 5.1. CONDENSADORES CLÁSSICOS – ANÁLISE EM FREQUÊNCIA

Devido às limitações referidas anteriormente (na secção 4.2 do Capítulo 4), no que concerne à placa de aquisição de dados, a análise dos condensadores clássicos foi realizada no domínio das frequências. Para tal, foi efetuada a montagem de um circuito RC série, com diferentes tipos de condensadores e capacidades, um gerador de sinais e várias gamas de resistências, Figura 54. Para recolher os valores experimentais foi utilizada a aplicação descrita na secção 4.1. do Capítulo 4.



**Figura 54 – Circuito RC série.**

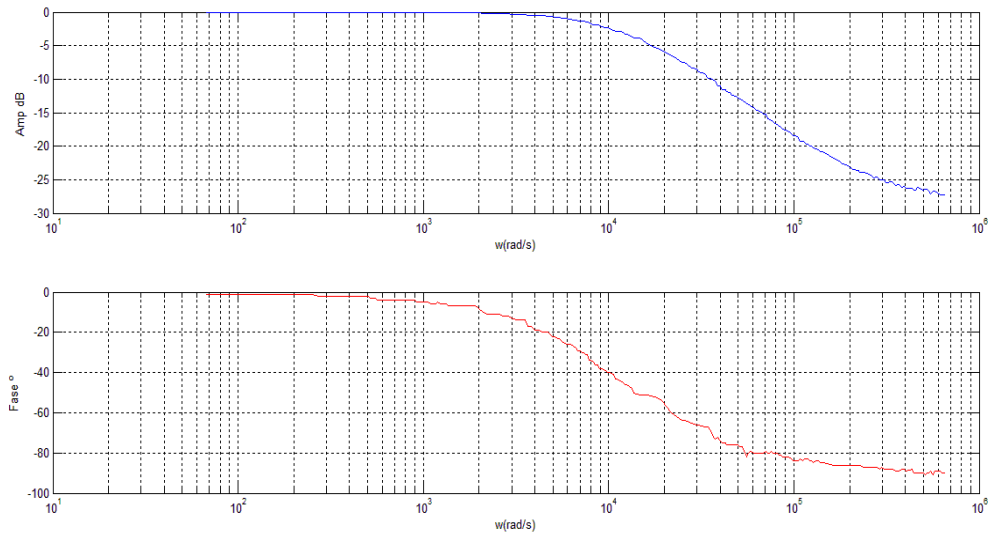
Todavia devido às limitações do gerador de sinais (a gama de frequências disponíveis não possibilitavam obter o diagrama de bode do sistema), apenas foi possível obter experimentalmente a resposta em frequência de alguns condensadores, os quais se encontram listados na Tabela 11.

**Tabela 11 – Ensaios realizados com condensadores clássicos.**

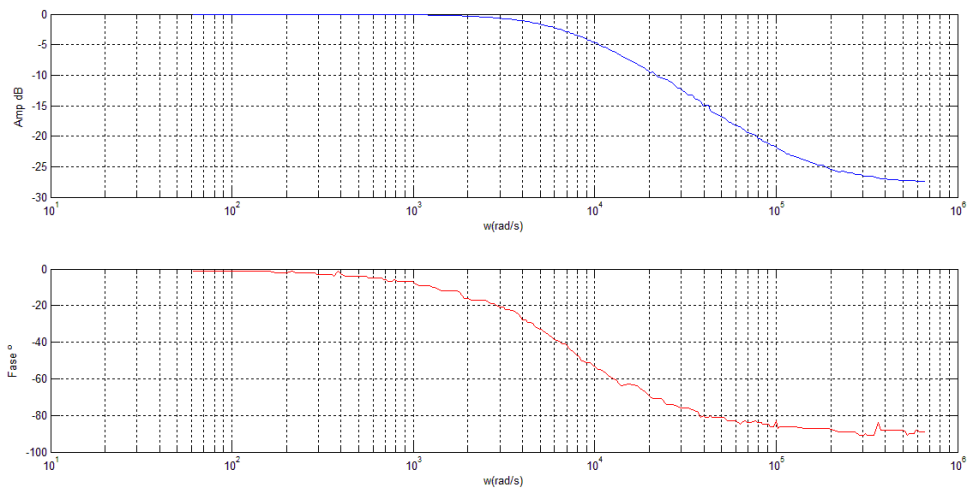
Ensaios realizados			
ID	R(k $\Omega$ )	C (nF)	$\tau$ ( $\mu$ s)
1	3,8	22,57	85,76
2	3,8	36,22	137,64

Para o ensaio com os condensadores ID1 e ID2, foram recolhidos através do *Scopemeter* os valores de tensão aos terminais do condensador, a frequência aplicada ao circuito, a tensão de entrada e o respetivo desfasamento entre a tensão no condensador e a tensão de entrada. Posteriormente foram traçados os diagramas de Bode da amplitude e da fase para cada um dos ensaios e comparados com os diagramas teoricamente esperados (secção 2.15. do Capítulo 2).

Os diagramas de Bode da amplitude e da fase dos ensaios com os condensadores ID1 e ID2, são os apresentados nas Figura 55 e Figura 56, respetivamente:



**Figura 55 – Diagramas de Bode com o condensador ID1.**



**Figura 56 – Diagramas de Bode com o condensador ID2.**

## 5.2. VALIDAÇÃO DOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS

Graficamente os diagramas de Bode para os condensadores ID1 e ID2 correspondem ao esperado para um circuito RC série. A amplitude inicia em 0 dB e depois começa a decrescer a partir da frequência dos pólos do sistema, ( $p_1 = -11660$ ,  $p_2 = -7262$ ) à qual corresponde uma fase de  $-45^\circ$ , caindo posteriormente até  $-90^\circ$  para as altas frequências (secção 2.15).

Os cálculos teóricos também validam os ensaios realizados, sendo a função de transferência para os ensaios ID1 e ID2 dadas respetivamente pelas equações:

$$H_1(s) = \frac{1}{1 + 85,76 * 10^{-6}s} \quad (52)$$

$$H_2(s) = \frac{1}{1 + 137,64 * 10^{-6}s} \quad (53)$$

As frequências de corte de  $H_1(s)$  e de  $H_2(s)$  são de 1855 Hz ( $\omega = 11649$  rad/s) e 1156 Hz ( $\omega = 7260$  rad/s) respetivamente. Como é possível verificar pelas Figura 55 e Figura 56, estas encontram-se dentro do intervalo de valores esperados.

O gerador de sinais não permitiu obter corretamente a resposta dos outros condensadores, devido às limitações de frequência, por isso alguns foram simulados com o recurso ao *software* Pspice.

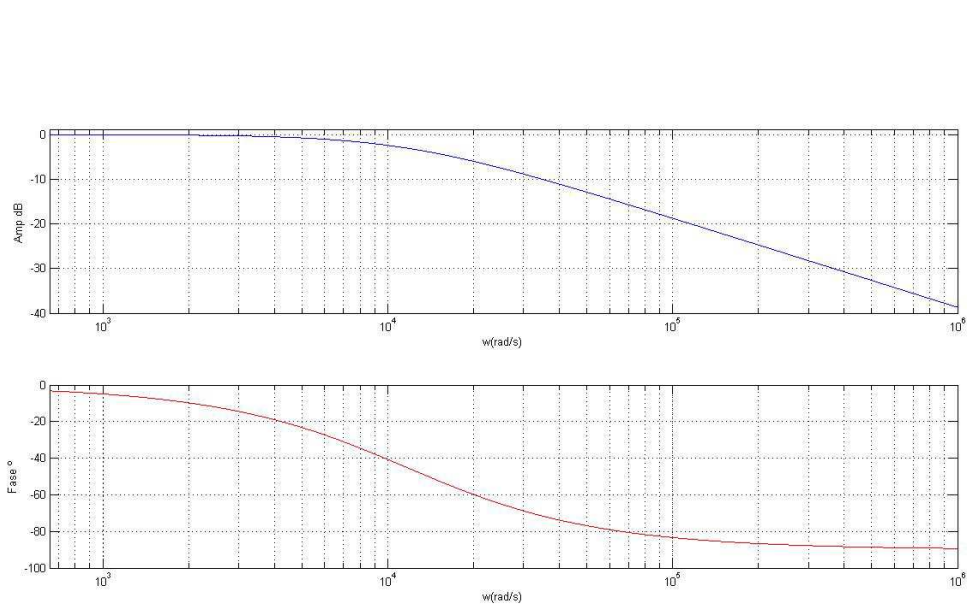
### 5.2.1. Simulações no Pspice

Para os ensaios em Pspice, foram definidos os ensaios ID3 e ID4 com os valores de  $R$  e de  $C$ , apresentados na Tabela 12.

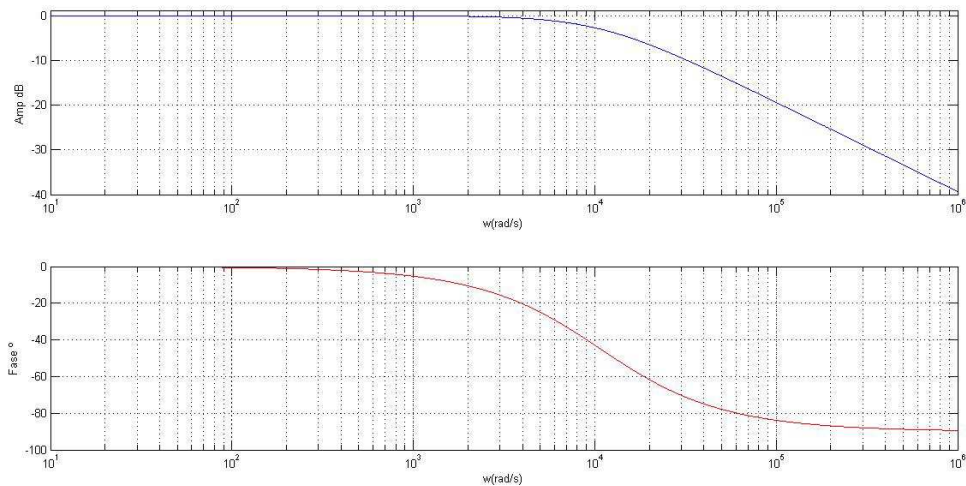
**Tabela 12 – Constantes de tempo utilizadas no Pspice.**

<b>Ensaio Pspice</b>			
<b>ID</b>	<b>R (<math>\Omega</math>)</b>	<b>C (<math>\mu\text{F}</math>)</b>	<b><math>\tau</math> (<math>\mu\text{s}</math>)</b>
3	3,9	22	85,8
4	4,2	33	138,6

Os diagramas de Bode correspondentes encontram-se ilustrados nas Figura 57 e Figura 58, respetivamente para os ensaios ID3 e ID4.



**Figura 57 – Diagrama de Bode do ensaio 3.**

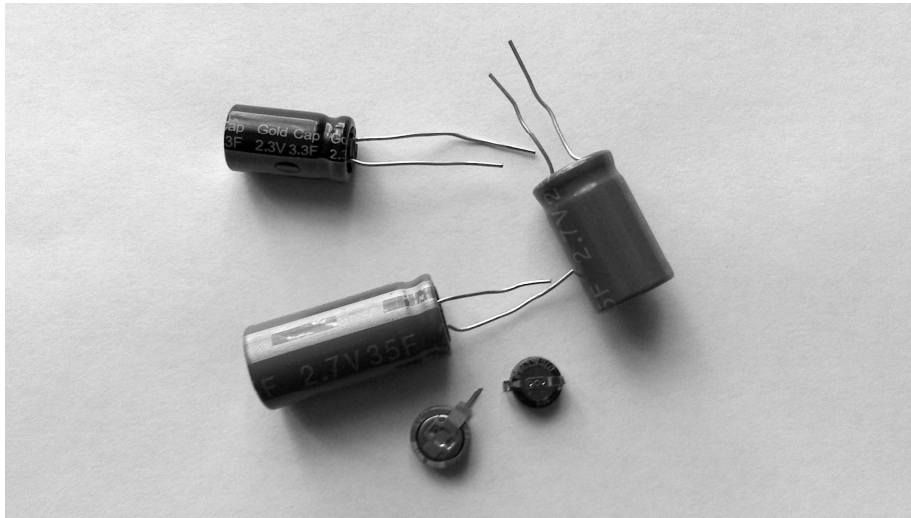


**Figura 58 – Diagrama de Bode do ensaio 4.**

Tal como aconteceu com os ensaios anteriores o diagrama de Bode está de acordo com o previsto teoricamente. Como as constantes de tempo são diferentes a amplitude da resposta começa a decrescer 20 dB / dec a partir de frequências de corte diferentes, face ao ensaio considerado.

### **5.3. EDLC E ESPECIFICAÇÕES**

A capacidade dos EDLC utilizados foi escolhida mediante a acessibilidade ao produto, o preço e o material de fabrico. A Figura 59 mostra os EDLC que foram utilizados no trabalho. Os supercondensadores seleccionados foram os apresentados na Tabela 13.



**Figura 59 – EDLC utilizados.**

**Tabela 13 – EDLC utilizados.**

Capacidade (F)	Tolerância da capacidade (%)	Material	Tensão de funcionamento (V)	ESR ( $\Omega$ )	Fabricante	Custo unidade (€)
0,022	$\pm 30$	Polímeros condutores	5,5	$\leq 150$	PANASONIC	1,71
0,22	-20 até +80	Aerogel	2,5	2	COOPER BUSSMANN	1,54
0,33	-20 até +80	Alumínio	5,5	75	VISHAY	1,37
3,3	-20 até +40	Carbonos ativos	2,3	0,3	PANASONIC	3,26
25	-10 até +30	Aerogel	2,7	0,027	COOPER BUSSMANN	Amostra
35	-10 até +30	Aerogel	2,7	0,02	COOPER BUSSMANN	Amostra

Nesta tabela são apresentadas todas as informações relevantes dos supercondensadores utilizados, nomeadamente a capacidade e a respetiva tolerância, o material, a tensão de funcionamento, a resistência interna (ESR), o fabricante e por último o respetivo custo. A tensão de funcionamento, como será descrito mais à frente, tem um peso muito importante

na análise da resposta dos EDLC. Na Tabela 14 é apresentada a densidade energética e de potência para os condensadores utilizados.

**Tabela 14 – Densidade de energia e potência dos EDLC utilizados.**

<b>Capacidade (F)</b>	<b>Densidade Energética máxima (J/kg)</b>	<b>Densidade de Potência máxima (W/kg)</b>
<b>0,022</b>	0,33	0,21
<b>0,22</b>	0,69	0,32
<b>0,33</b>	4,99	0,10
<b>3,3</b>	8,73	4,41
<b>25</b>	91,13	67,50
<b>35</b>	128,58	91,13

Os valores calculados têm por base os valores apresentados pelos fabricantes. Observando a Tabela 14 é possível verificar que os EDLC apresentam uma densidade energética superior em todas as gamas à densidade de potência. Entre todos os EDLC apresentados, é possível destacar o EDLC de 0,33 F por possuir uma densidade energética sete vezes superior ao EDLC de 0,22 F (da mesma gama).

#### **5.4. ANÁLISE NO DOMÍNIO DOS TEMPOS**

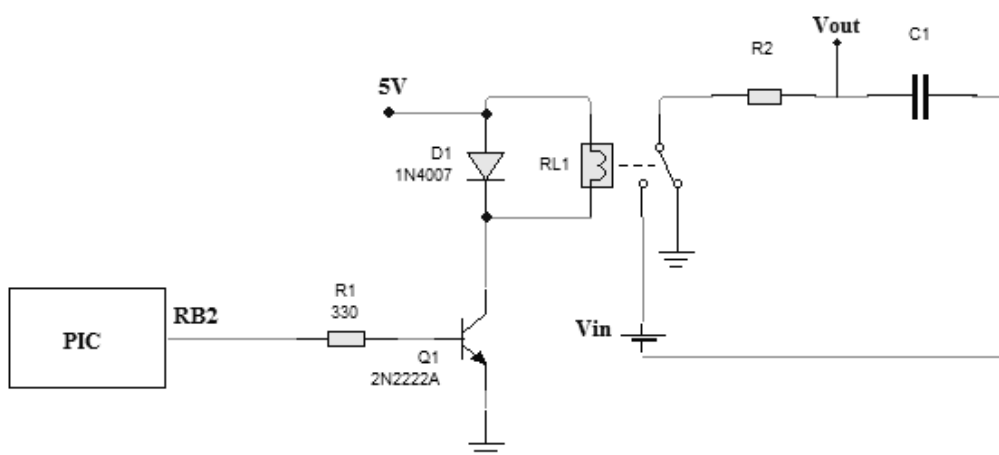
Devido à impossibilidade de analisar a resposta dos EDLC no domínio das frequências, foi necessário encontrar uma alternativa viável, para obter a resposta dos mesmos. Assim e devido às várias condicionantes, optou-se numa fase inicial por analisar os EDLC no domínio dos tempos, e fixar a constante de tempo em aproximadamente 60 s. A Tabela 15

apresenta as constantes de tempo para cada um dos pares de combinação EDLC / resistências.

**Tabela 15 – Constantes de tempo definidas.**

Capacidade (F)	R ( $\Omega$ )	$\tau$ (s)
0,022	2650	58,30
0,22	266	58,52
0,33	175,9	58,05
3,3	18,3	60,39
25	2,4	60
35	1,8	63

Após algumas experiências, verificou-se que a potência fornecida pela placa de aquisição não seria suficiente para carregar os supercondensadores, em particular os de capacidade superior. Assim, foi necessário repensar toda a montagem, recorrendo à utilização de um transístor como unidade de controlo do sistema e um relé para fechar o circuito acoplado a uma fonte de alimentação regulável. A montagem realizada está ilustrada na Figura 60.



**Figura 60 – Circuito utilizado para recolher a resposta no domínio dos tempos.**

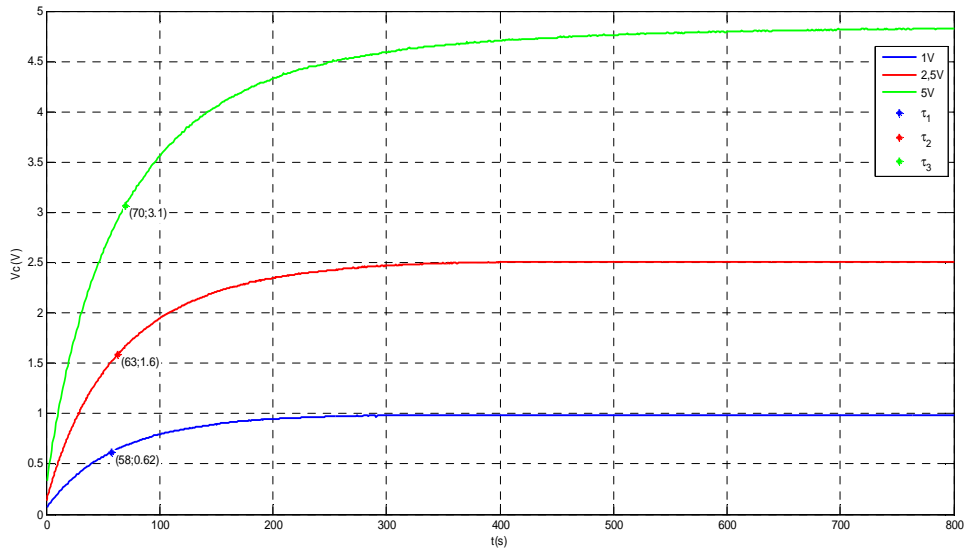
Na Figura 60, *R2* e *C1* representam o circuito série a simular e *Vin* a tensão da fonte de alimentação regulável. No instante em que a saída RB2 da PIC é ativada através da comunicação, o relé fecha o circuito e é iniciada a carga do EDLC e recolhida a resposta do sistema no domínio dos tempos. Quando esta é desativada, o relé abre o circuito e inicia-se o processo de descarga do supercondensador.

Depois de ultrapassada esta dificuldade, para cada um dos EDLC foram escolhidas três tensões de entrada diferentes, de acordo com as suas limitações, segundo a informação fornecida pelo fabricante, para posteriormente se elaborar a modelação da resposta obtida ao degrau recorrendo ao MATLAB. As tensões *Vin* aplicadas (em degrau) foram as apresentadas na Tabela 16.

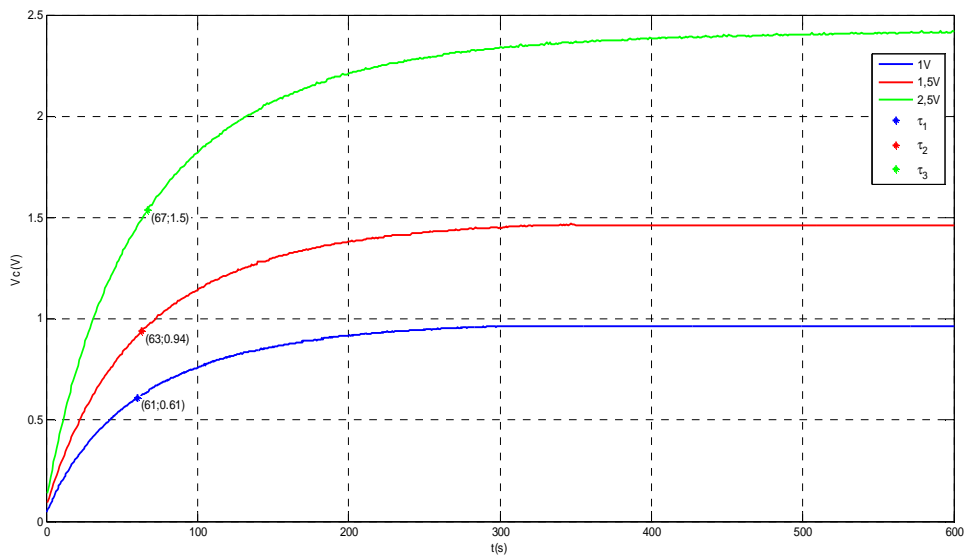
**Tabela 16 – Tensões de entradas aplicadas (em degrau).**

<b>Condensador (F)</b>	<b>Vin (V)</b>		
<b>0,022</b>	1	2,5	5
<b>0,22</b>	1	1,5	2,5
<b>0,33</b>	1	2,5	5
<b>3,3</b>	1	1,5	2,3
<b>25</b>	1	1,5	2,7
<b>35</b>	1	1,5	2,7

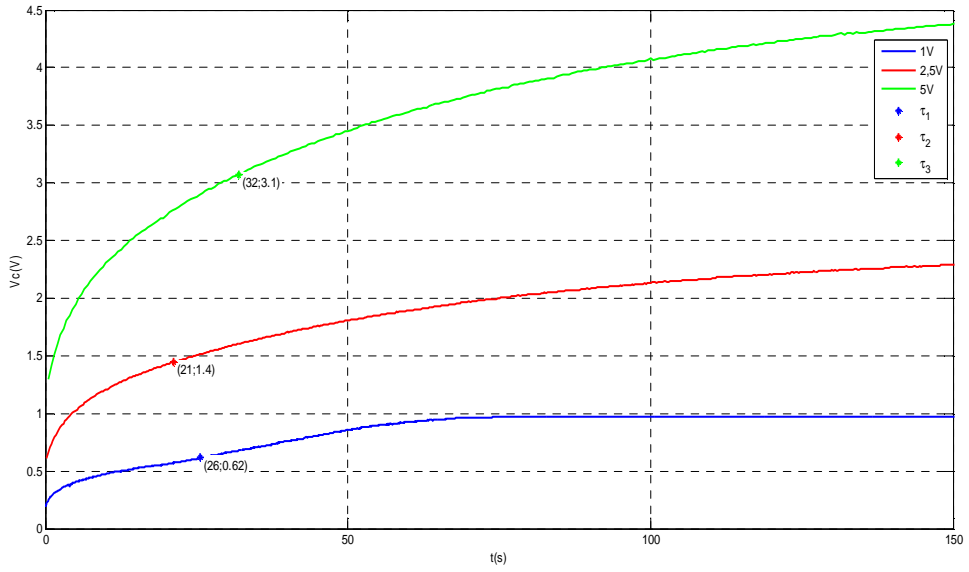
As Figuras 61 – 66, apresentam a resposta ao degrau dos EDLC de: 0,022F, para as amplitudes da tensão de entrada de 1, 2,5 e 5V; 0,22F, para as amplitudes da tensão de entrada de 1 V, 1,5 V e 2,5 V; 0,33 F para as amplitudes da tensão de entrada de 1 V, 2,5 V e 5 V; 3,3 F para as amplitudes da tensão de entrada de 1 V, 1,5 V e 2,3 V; 25 F para as amplitudes da tensão de entrada de 1 V, 1,5 V e 2,7 V; 35 F para as amplitudes da tensão de entrada de 1 V, 1,5 V e 2,7 V.



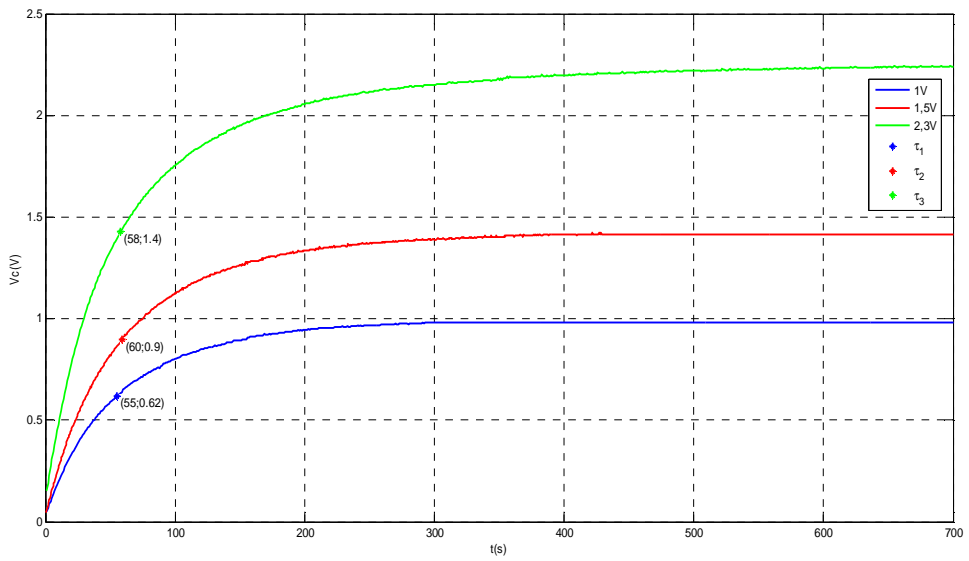
**Figura 61 – Resposta ao degrau do EDLC de  $0,022\text{ F}$ .**



**Figura 62 – Resposta ao degrau do EDLC de  $0,22\text{ F}$ .**



**Figura 63 – Resposta ao degrau do EDLC de 0,33 F.**



**Figura 64 – Resposta ao degrau do EDLC de 3,3 F.**

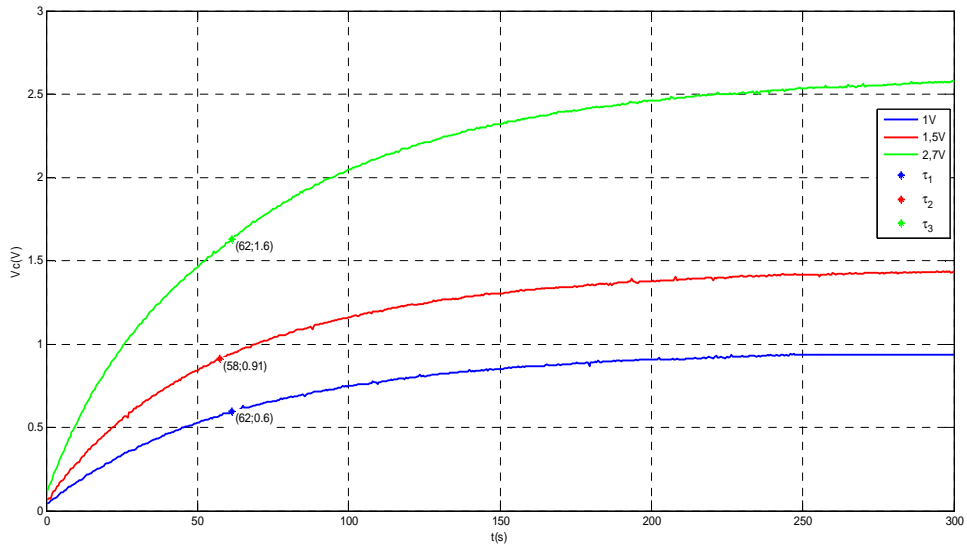


Figura 65 – Resposta ao degrau do EDLC de 25 F.

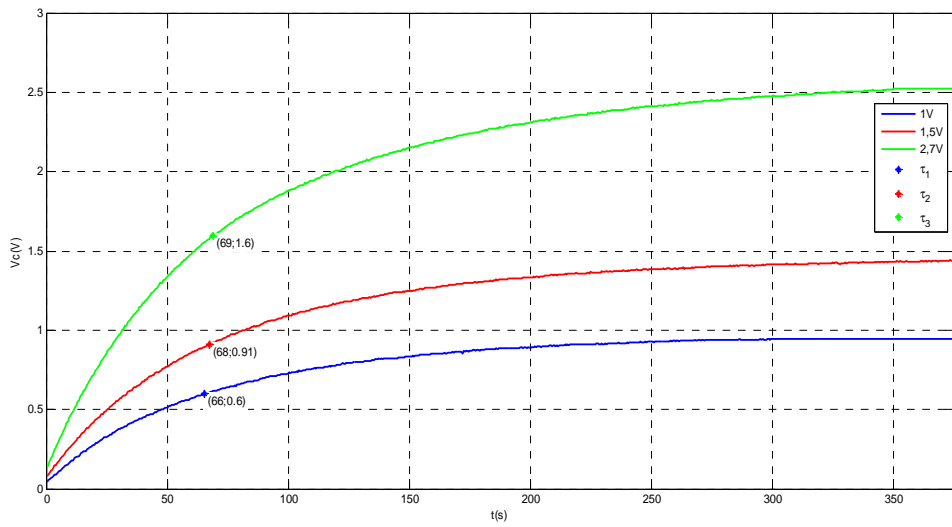


Figura 66 – Resposta ao degrau do EDLC de 35 F.

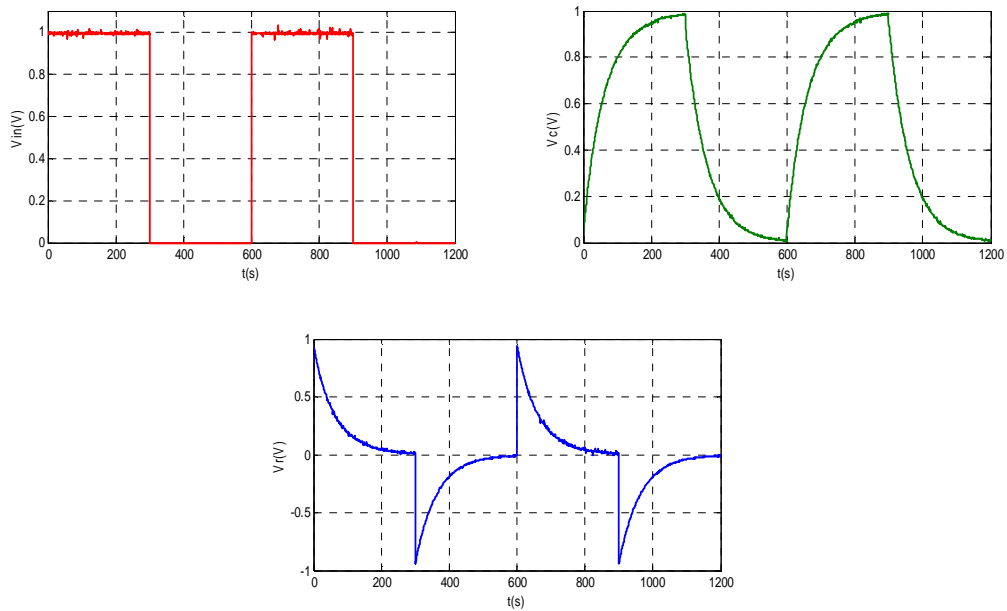
As constantes de tempo ( $\tau$ ) obtidas para os diversos ensaios estão apresentadas na Tabela 17.

**Tabela 17 – Constantes de tempo obtidas.**

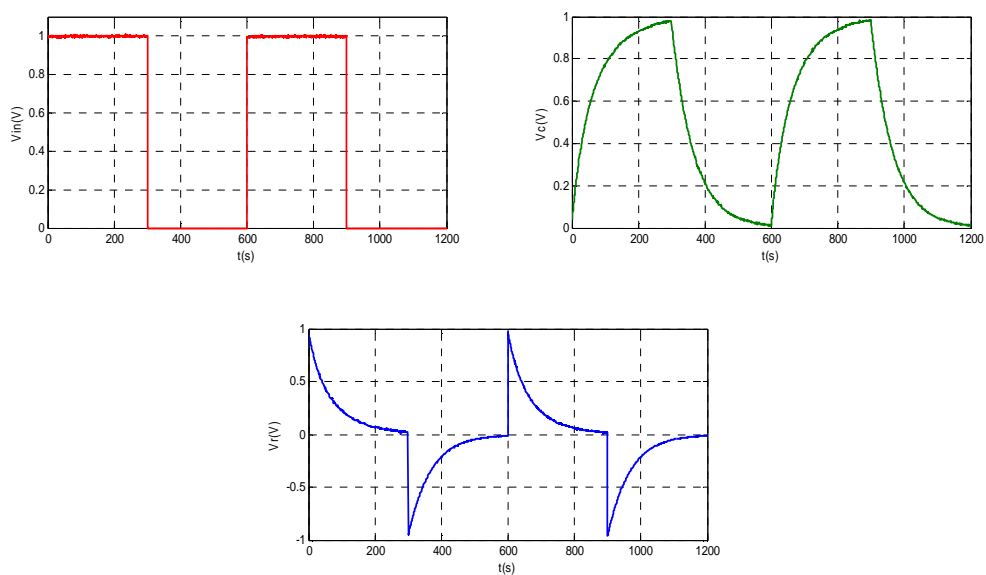
<b>Capacidade (F)</b>	<b>Tensão de Entrada (V)</b>	<b><math>\tau</math>(s)</b>	<b>Desvio (%)</b>
<b>0,022</b>	1	58	0,51
	2,5	62	5,97
	5	69	15,51
<b>0,22</b>	1	61	4,07
	1,5	63	7,11
	2,5	67	12,66
<b>0,33</b>	1	25	56,93
	2,5	16	72,44
	5	32	44,88
<b>3,3</b>	1	55	8,92
	1,5	60	0,65
	2,3	63	4,32
<b>25</b>	1	62	3,22
	1,5	58	3,33
	2,7	62	3,22
<b>35</b>	1	66	4,54
	1,5	68	7,35
	2,7	69	8,70

De seguida foi analisada a resposta dos EDLC mas agora aplicando uma onda quadrada de amplitude 1 V à entrada do sistema ( $T=600$  s). Visando perceber se o sistema se comporta de igual forma em resposta a diferentes tipos de sinais de entrada. Os resultados obtidos estão ilustrados nas Figuras 67 – 72 para os condensadores testados da Tabela 17.

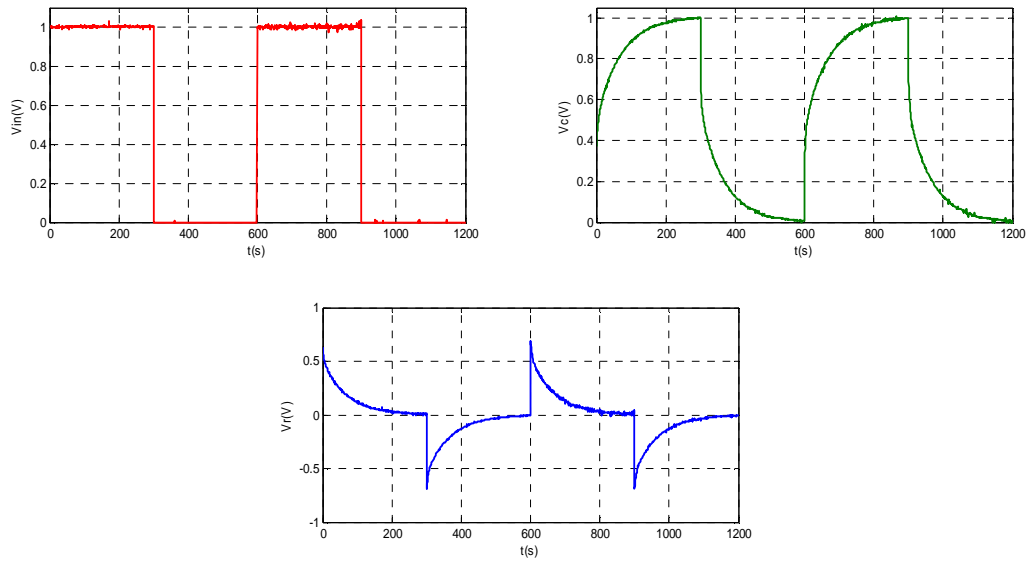
Nas Figuras apresentadas, o gráfico a vermelho representa a entrada aplicada ao sistema, o gráfico a verde a variação da tensão no condensador e o gráfico a azul a variação da tensão na resistência.



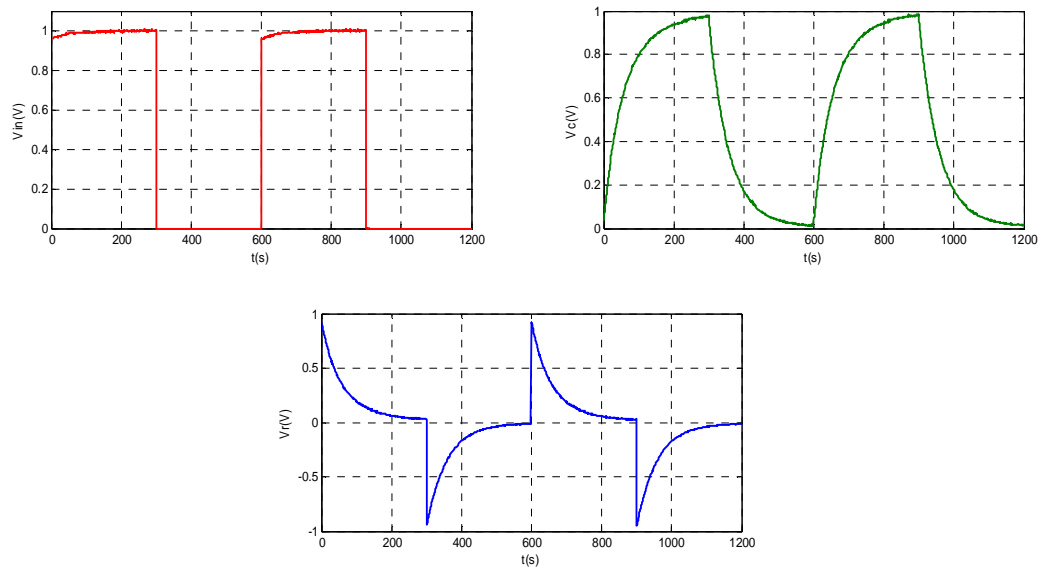
**Figura 67 – Resposta do EDLC de 0,022 F, aplicando uma onda quadrada com amplitude de 1 V.**



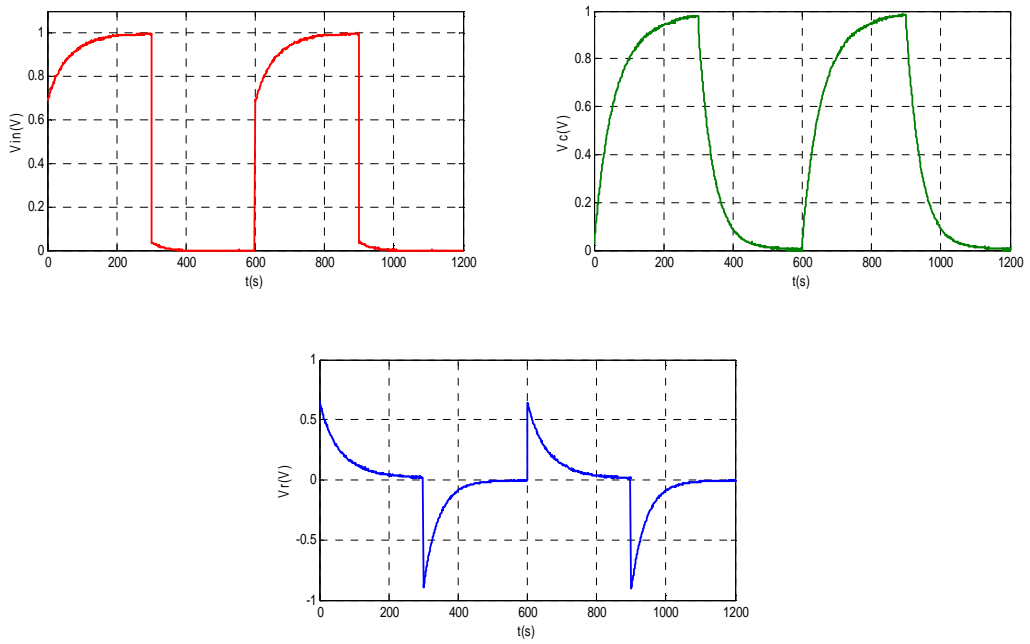
**Figura 68 – Resposta do EDLC de 0,22 F, aplicando uma onda quadrada com amplitude de 1 V.**



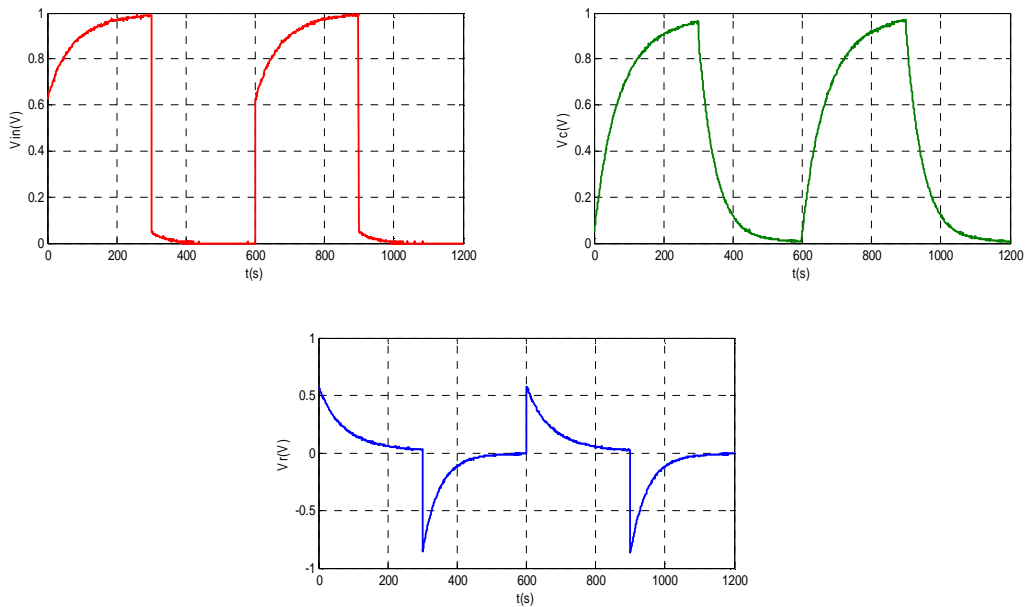
**Figura 69 – Resposta do EDLC de 0,33 F, aplicando uma onda quadrada com amplitude de 1 V.**



**Figura 70 – Resposta do EDLC de 3,3 F, aplicando uma onda quadrada com amplitude de 1 V.**

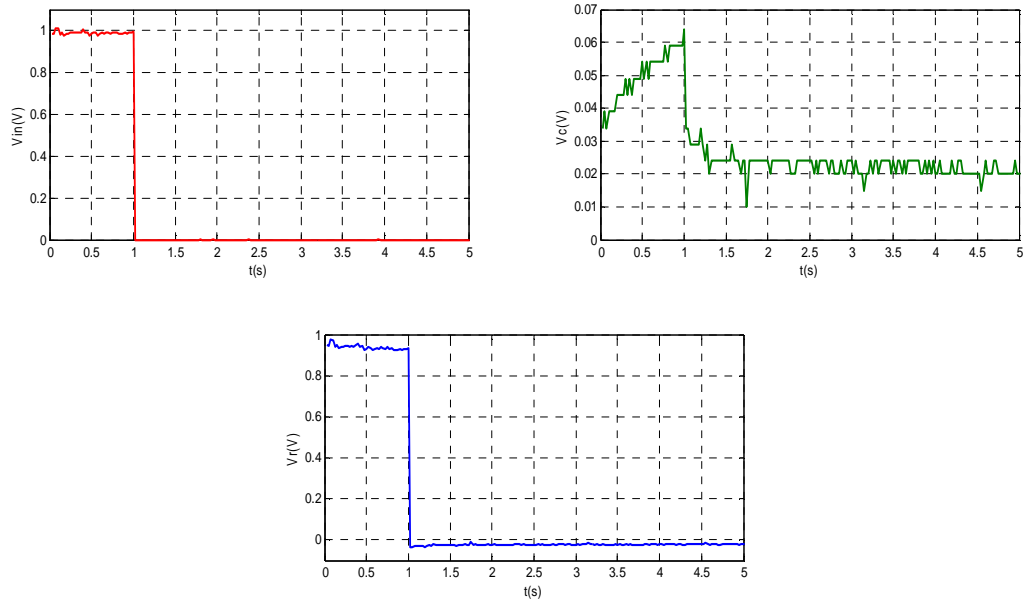


**Figura 71 – Resposta do EDLC de 25 F, aplicando uma onda quadrada com amplitude de 1 V.**

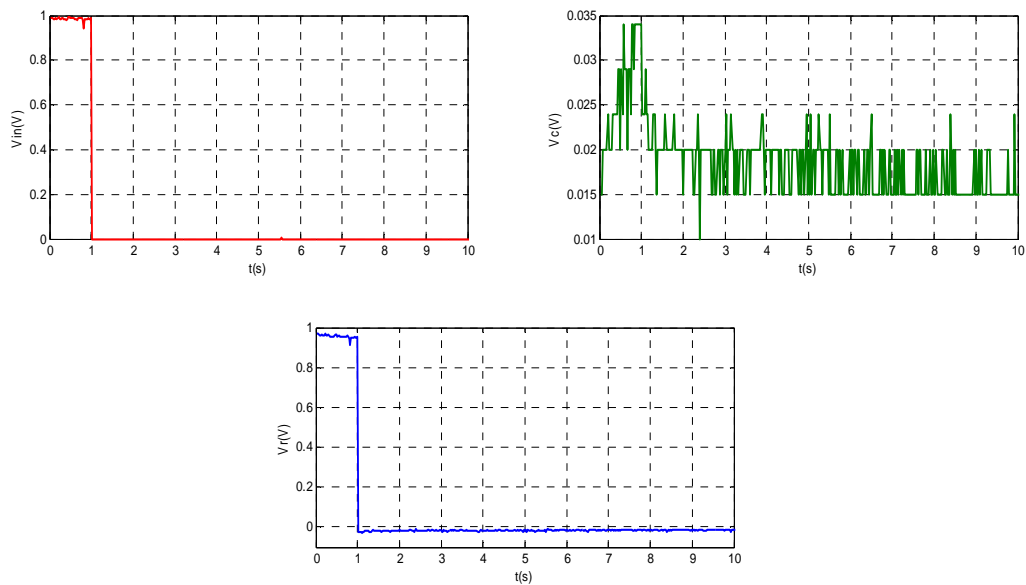


**Figura 72 – Resposta do EDLC de 35 F, aplicando uma onda quadrada com amplitude de 1 V.**

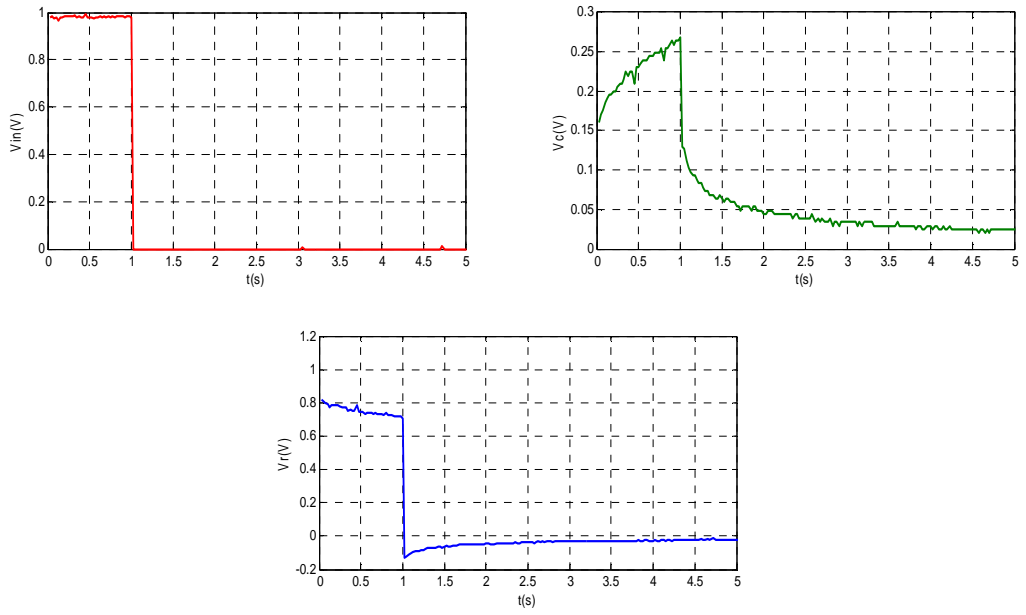
Por fim foi ainda analisada a resposta impulsional para cada um dos supercondensadores estudados anteriormente, obtendo os resultados das Figuras 73 - 78.



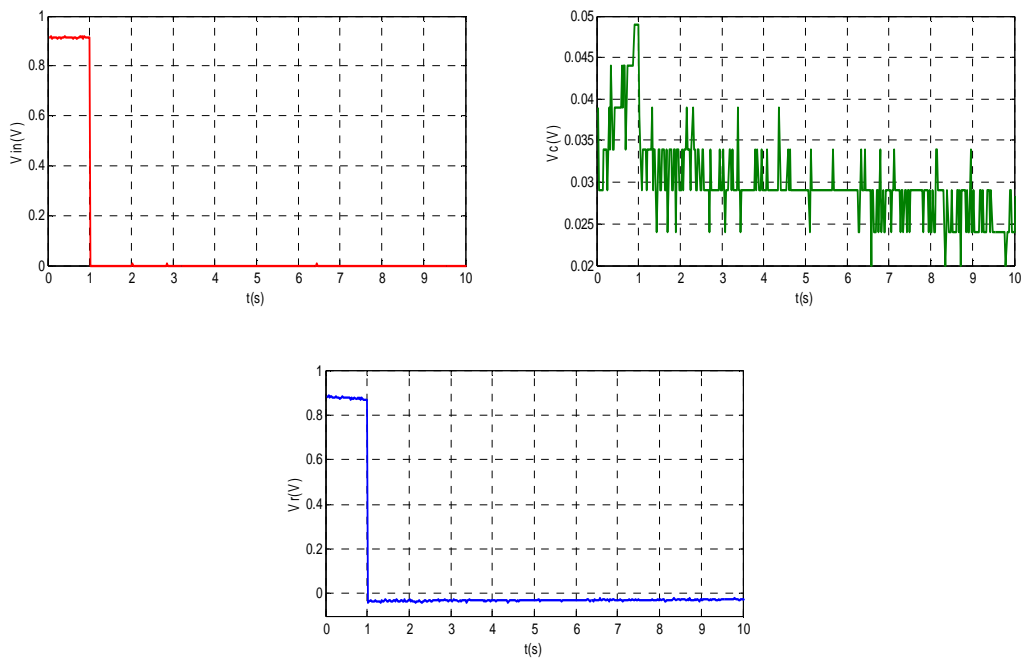
**Figura 73 – Resposta impulsional do EDLC de 0,022 F.**



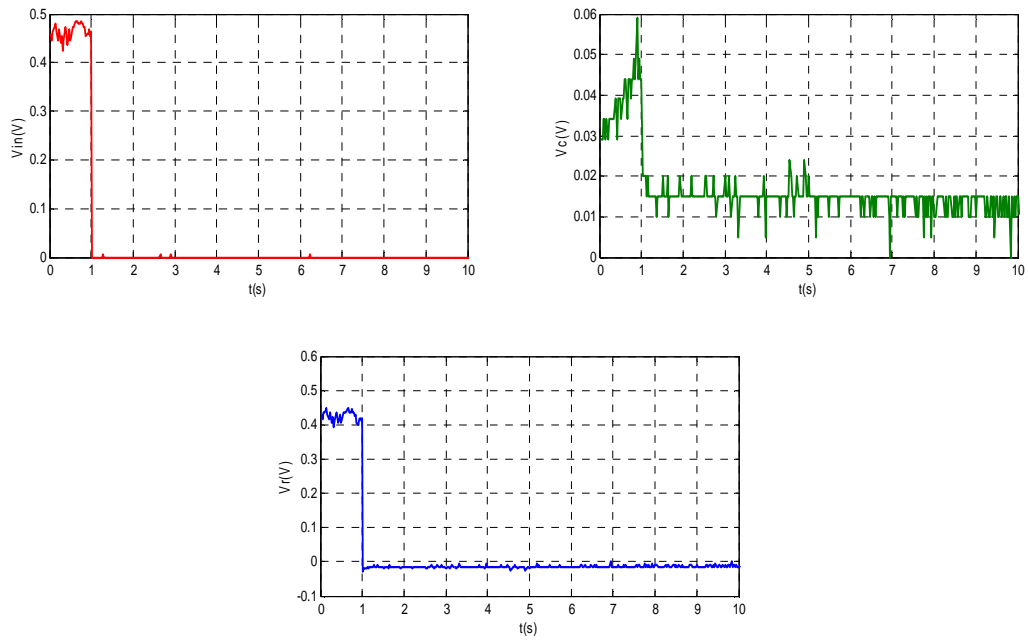
**Figura 74 – Resposta impulsional do EDLC de 0,22 F.**



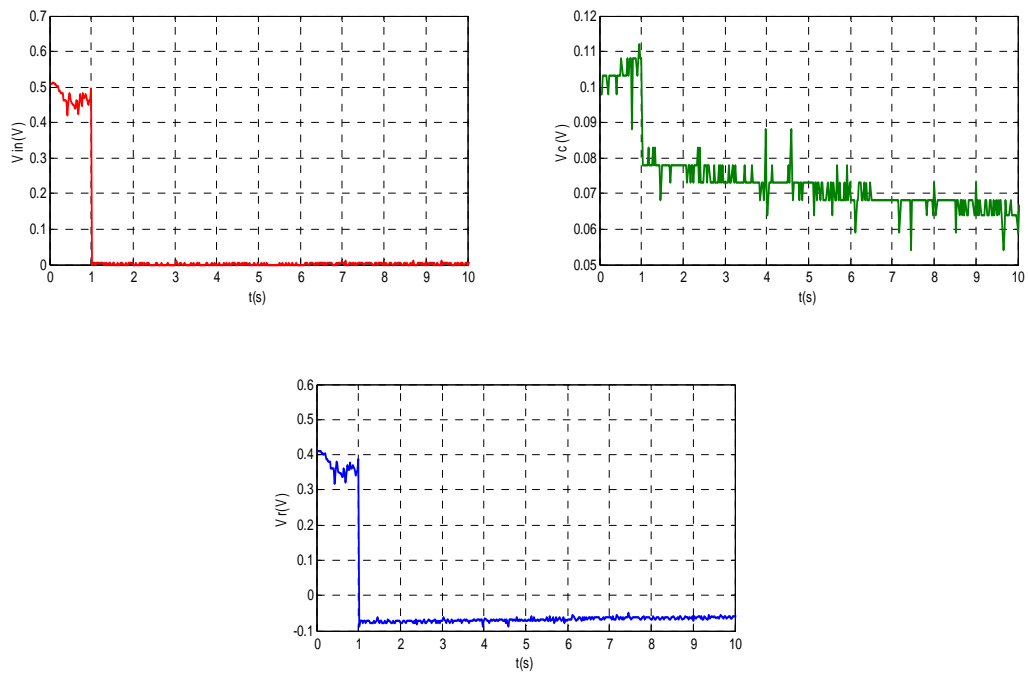
**Figura 75 – Resposta impulsional do EDLC de 0,33 F.**



**Figura 76 – Resposta impulsional do EDLC de 3,3 F.**



**Figura 77 – Resposta impulsional do EDLC de 25 F.**



**Figura 78 – Resposta impulsional do EDLC de 35 F.**

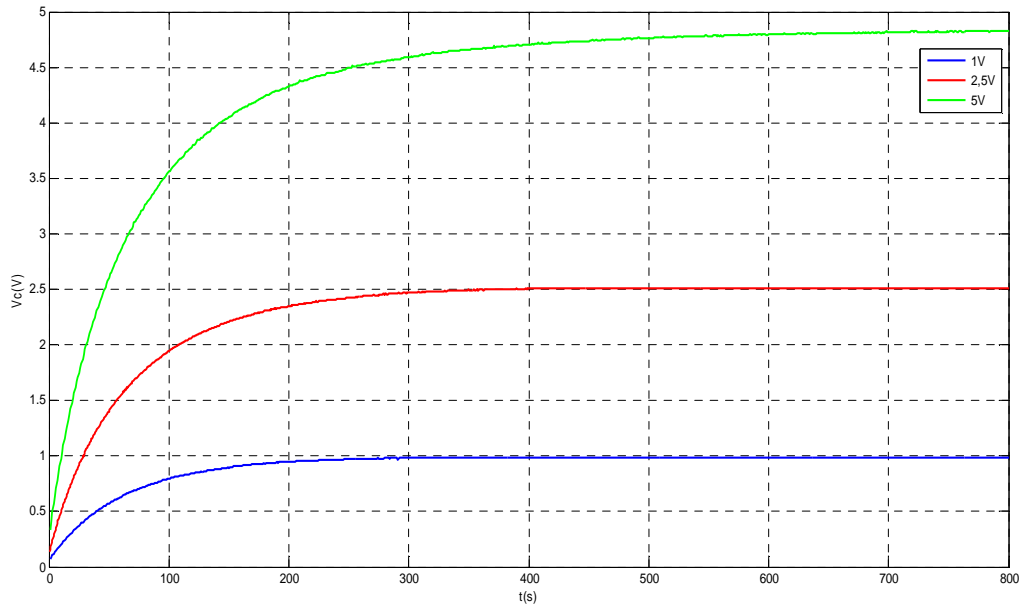
Analisando os resultados obtidos, começando pela resposta em degrau, é possível verificar que o EDLC de 0,33 F não apresenta uma resposta semelhante aos restantes, sendo esta justificada pela sua construção (alumínio) e densidade energética elevada. De facto, verificou-se experimentalmente que por mais reduzido que fosse o período de amostragem, a sua resposta mantinha-se inalterável, assim, e por esse motivo, este EDLC não será alvo de modelação. Os restantes supercondensadores, apresentam uma resposta dentro do expectável, no entanto a sua constante de tempo em alguns casos apresenta um desvio considerável. Este desvio deve-se a vários fatores que não foram possíveis de anular tais como, as resistências utilizadas e as suas tolerâncias, a resistência interna da fonte de alimentação, a resistência interna de cada supercondensador e a sua tolerância (identificada no *datasheet*) e a potência da fonte de energia. Este último fator é o mais notório na resposta dos EDLC, nomeadamente quando é aplicada uma onda quadrada à sua entrada, ou um pulso. Nestes dois casos, a fonte de alimentação, para os condensadores de capacidade superior, demora algum tempo a atingir a tensão para a qual foi regulada. Este fator poderia ter sido minimizado, recorrendo a alguns diodos e condensadores, no entanto, se assim fosse seriam a introduzidas mais perturbações no sistema. Na resposta dos EDLC à onda quadrada é possível verificar todo o processo de carga e descarga dos supercondensadores, sendo estes semelhantes para o circuito apresentado na Figura 60. Na resposta impulsional é ainda mais notório o efeito da fonte de alimentação, chegando a resposta a ser cerca de 50% do sinal aplicado.

Em suma, a resposta obtida, até pelos meios disponíveis não é a ideal, no entanto possibilita a construção de um modelo, o qual será apresentado na secção seguinte.

## **5.5. LINEARIDADE DOS EDLC**

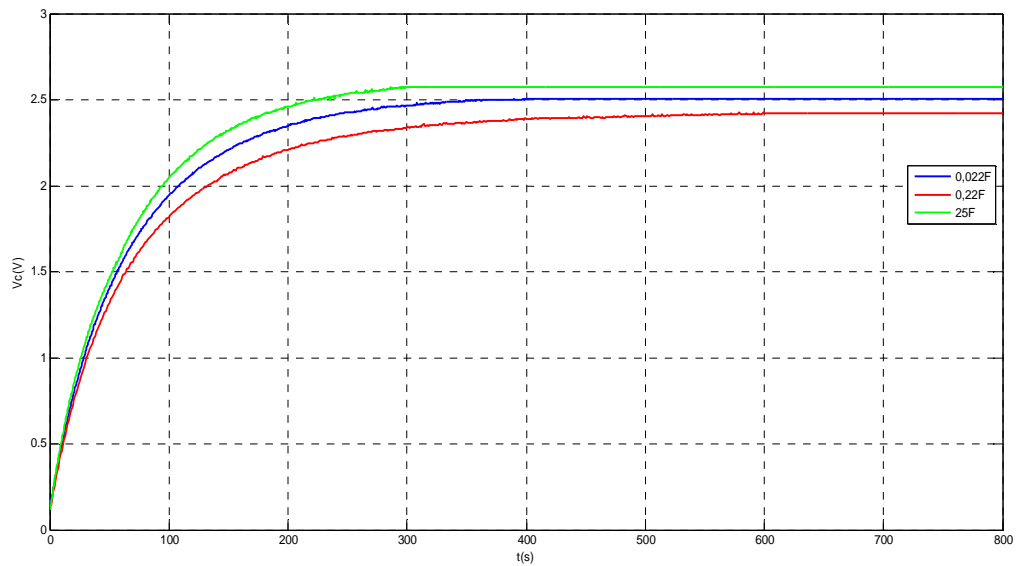
Considerando a resposta dos EDLC, quando aplicado um degrau à sua entrada, é possível identificar a sua linearidade. De facto, para o supercondensador de 0,022 F a resposta obtida para as diferentes amplitudes do sinal de entrada foi a da Figura 79.

Como se pode constatar, a resposta para às várias amplitudes é linear, ou seja, é possível traçar a resposta do EDLC para uma tensão intermédia a partir das curvas (Figura 79).



**Figura 79 – Resposta no domínio dos tempos, aplicando três degraus de entrada de diferentes amplitudes ao EDLC de 0,022 F.**

Esta linearidade também se verifica entre supercondensadores de diferentes capacidades, como é o caso dos EDLC de 0,022 F, 0,22 F e 25 F. A Figura 80 ilustra essa linearidade.



**Figura 80 – Linearidade entre supercondensadores de diferentes capacidades.**

Aos supercondensadores de 0,022 F e 0,22 F, foi aplicada uma tensão de entrada de 2,5 V enquanto ao EDLC de 25 F, foi aplicada uma tensão de aproximadamente 2,7 V (segundo as especificações apresentadas na Tabela 16), verificando-se também aqui a linearidade da resposta. Os diferentes supercondensadores apresentam uma resposta semelhante, chegando mesmo a se sobreporem.

Na secção seguinte serão construídos os vários modelos equivalentes selecionados para realizar a modelação dos EDLC.

## 5.6. CONSTRUÇÃO DO MODELO EQUIVALENTE

### 5.6.1. Determinação da Função de transferência do sistema

A função de transferência representa um passo intermédio para a construção do modelo equivalente. De facto, é a partir desta que são dimensionadas as resistências e os condensadores clássicos necessários para aproximar à resposta temporal dos supercondensadores.

As funções de transferência dos circuitos apresentados, podem ser obtidas, recorrendo às Leis de Kirchoff e à Transformada de Laplace, ou calculando a tensão nos vários pontos do circuito através de divisores de tensão. A função de transferência traduz a relação entre a tensão de saída  $V_{out}$  e a tensão de entrada  $V_{in}$ , nos modelos a seguir apresentados. Assim para o circuito da Figura 81, a função de transferência é dada por (já calculada na secção 2.15):

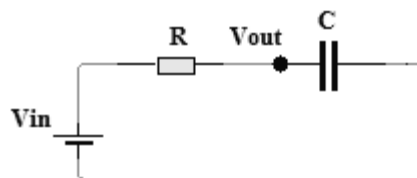


Figura 81 – Circuito RC série.

$$G_1 = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{1}{RCs + 1} \quad (54)$$

A função de transferência do circuito apresentado na Figura 82, pode ser obtida, calculando inicialmente a impedância do paralelo entre  $C_1$  e  $R_2$ , obtendo-se  $Z_t$

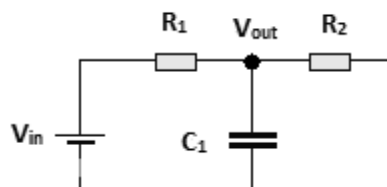
$$Z_t = \frac{Z_{R2} \times Z_{C1}}{Z_{R2} + Z_{C1}} \quad (55)$$

e de seguida, aplica-se a fórmula do divisor de tensão para  $V_{out}$ ,

$$V_{out} = \frac{Z_t}{Z_{R1} + Z_t} \times V_{in} \quad (56)$$

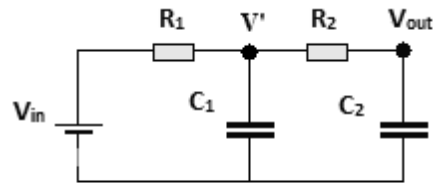
Aplicando a transformada de Laplace e substituindo  $Z_{C1} = \frac{1}{C_1s}$ ,  $Z_{R1} = R_1$  e  $Z_{R2} = R_2$ , é possível obter a função de transferência do sistema:

$$G_2 = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{R_2}{R_1R_2C_1s + R_1 + R_2} \quad (57)$$



**Figura 82 – Circuito misto com um condensador e duas resistências.**

Para o circuito misto, composto por duas resistências e dois condensadores (Figura 83), a função de transferência pode ser obtida, recorrendo a dois divisores de tensão, através dos seguintes passos.



**Figura 83 – Circuito misto com dois condensadores e duas resistências.**

A tensão no ponto  $V'$  é dada por:

$$V' = \frac{Z_{C1}}{Z_{C1} + Z_{R1}} \times V_{in} \quad (58)$$

sendo a tensão  $V_{out}$  dada por:

$$V_{out} = \frac{Z_{C2}}{Z_{C2} + Z_{R2}} \times V' \quad (59)$$

substituindo  $V'$  na equação anterior, é possível obter:

$$V_{out} = \frac{Z_{C2}}{Z_{C2} + Z_{R2}} \times \frac{Z_{C1}}{Z_{C1} + Z_{R1}} \times V_{in} \quad (60)$$

Aplicando a transformada de Laplace e sabendo que  $Z_{C1} = \frac{1}{C_1 s}$ ,  $Z_{C2} = \frac{1}{C_2 s}$ ,  $Z_{R1} = R_1$  e  $Z_{R2} = R_2$  é possível obter a função de transferência do sistema:

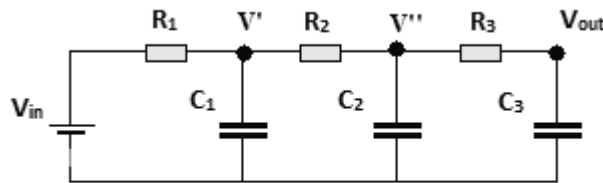
$$G_3 = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2 s^2 + s(R_1 C_1 + R_2 C_2) + 1} \quad (61)$$

A função de transferência do circuito da Figura 84 pode ser obtida, tendo por base a função de transferência calculada para o circuito da Figura 83:

$$V_{out} = \frac{Z_{C2}}{Z_{C2} + Z_{R2}} \times \frac{Z_{C1}}{Z_{C1} + Z_{R1}} \times V_{in} \quad (62)$$

e calculando a tensão no ponto  $V''$ , obtém-se a equação (63):

$$V_{out} = \frac{Z_{C3}}{Z_{C3} + Z_{R3}} \times \frac{Z_{C2}}{Z_{C2} + Z_{R2}} \times \frac{Z_{C1}}{Z_{C1} + Z_{R1}} \times V_{in} \quad (63)$$



**Figura 84 – Circuito misto com três condensadores e três resistências.**

Pela transformada de Laplace e sabendo que  $Z_{C1} = \frac{1}{C_1 s}$ ,  $Z_{C2} = \frac{1}{C_2 s}$ ,  $Z_{C3} = \frac{1}{C_3 s}$ ,  $Z_{R1} = R_1$ ,  $Z_{R2} = R_2$  e  $Z_{R3} = R_3$  é possível obter a função de transferência do sistema:

$$G_4 = \frac{V_{out}}{V_{in}} \quad (64)$$

$$= \frac{1}{R_1 R_2 R_3 C_1 C_2 C_3 s^3 + s^2(R_1 R_3 C_1 C_3 + R_2 R_3 C_2 C_3 + R_1 R_2 C_1 C_2) + s(R_3 C_3 + R_1 C_1 + R_2 C_2) + 1}$$

### 5.6.2. Modelação em Matlab

A modelação foi realizada no MATLAB com recurso à função *fminunc* [29] e aproxima a resposta no domínio dos tempos do EDLC, devolvendo a função de transferência do modelo. Esta é representada através da equação de primeira ordem:

$$G = \frac{K}{As + B} \quad (65)$$

onde  $K$  representa o ganho da função de transferência,  $A$  o produto de  $RC$  e  $B$  o fator independente.

Variando a parametrização e repetindo o processo de modelação, os resultados obtidos foram os apresentados na Tabela 18. A Tabela 18, contém os valores devolvidos pelo MATLAB, para um sistema de primeira ordem, como é o caso do sistema da Figura 81.

Para as restantes circuitos, houve a necessidade de alterar o programa por forma a que este devolvesse os valores otimizados de  $R$  e  $C$ , em vez do produto destes fatores.

**Tabela 18 – Resultados obtidos na modelação por MATLAB, para um sistema de 1ª ordem.**

Capacidade (F)	Vin (V)	K	A	B
0,022	1	0,05	2,98	0,05
	2,5	0,36	9,11	0,14
	5	0,29	4,31	0,06
0,22	1	0,08	4,98	0,08
	1,5	0,17	7,22	0,12
	2,5	0,25	7,00	0,11
3,3	1	0,33	18,75	0,35
	1,5	0,24	10,38	0,18
	2,3	0,51	13,67	0,23
25	1	0,22	14,64	0,24
	1,5	0,35	13,71	0,24
	2,7	0,51	11,79	0,20
35	1	0,17	11,68	0,18
	1,5	0,36	16,83	0,26
	2,7	0,12	3,24	0,05

As Tabelas 17, 18 e 19 apresentam os valores obtidos para os modelos  $G_1$ ,  $G_2$  e  $G_3$ , considerando um EDLC de 0,022 F, respetivamente.

**Tabela 19 – Valores obtidos para a modelação do EDLC de 0,022 F, com um circuito misto de duas resistências e um condensador.**

Capacidade (F)	Vin (V)	R <sub>1</sub> (Ω)	R <sub>2</sub> (Ω)	C <sub>1</sub> (F)
0,022	1	22000	270000	2400 $\times 10^{-6}$

**Tabela 20 – Valores obtidos para a modelação do EDLC de 0,022 F, com um circuito misto de duas resistências e dois condensadores.**

Capacidade (F)	Vin (V)	R <sub>1</sub> (Ω)	R <sub>2</sub> (Ω)	C <sub>1</sub> (F)	C <sub>2</sub> (F)
0,022	1	10000	18000	177 × 10 <sup>-9</sup>	3300 × 10 <sup>-6</sup>

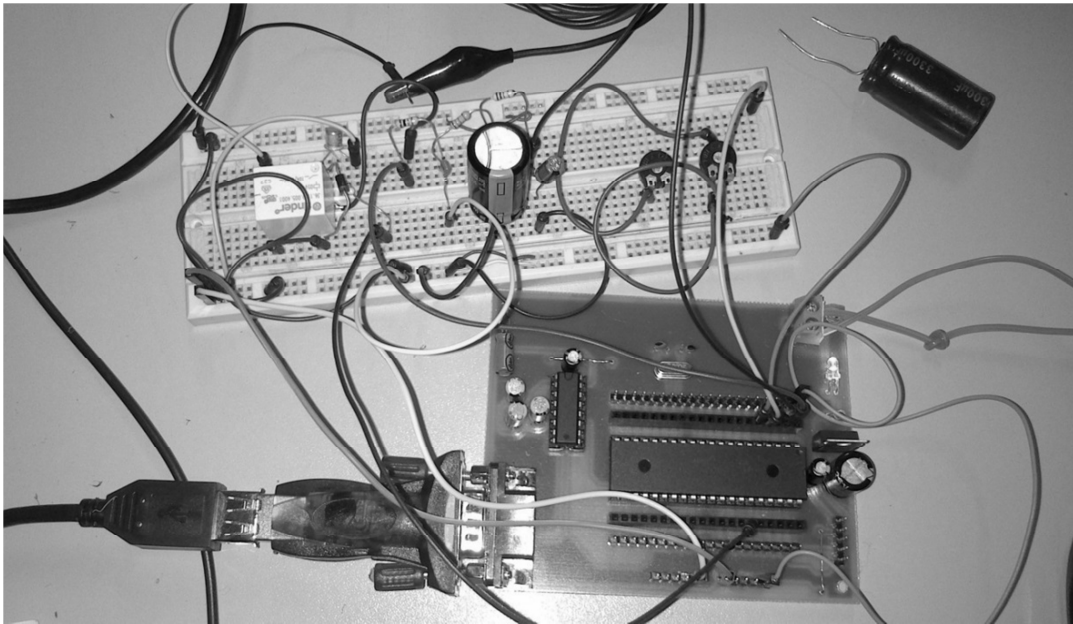
**Tabela 21 – Valores obtidos para a modelação do EDLC de 0,022 F, com um circuito misto de três resistências e três condensadores.**

Capacidade (F)	Vin (V)	R <sub>1</sub> (Ω)	R <sub>2</sub> (Ω)	R <sub>3</sub> (Ω)	C <sub>1</sub> (F)	C <sub>2</sub> (F)	C <sub>3</sub> (F)
0,022	1	10000	18000	22000	9.17 × 10 <sup>-6</sup>	2777 × 10 <sup>-6</sup>	33 × 10 <sup>-6</sup>

Os resultados da modelação permitem concluir que os valores das resistências e dos condensadores são muito próximos dos comercializados, pelo que é possível concluir que a escolha dos modelos foi acertada.

### 5.6.3. Implementação do Modelo equivalente

Depois de obtidos os parâmetros para cada sistema, o passo seguinte foi a implementação de um modelo com resistências e condensadores clássicos para o supercondensador que apresenta menor desvio na sua resposta ao degrau, no caso o EDLC de 0,022 F. A Figura 85 mostra uma fotografia do sistema montado para o efeito, onde se pode ver a placa de aquisição de sinal e a *breadboard* com o circuito do modelo G<sub>3</sub>, como exemplo.



**Figura 85 – Placa de aquisição e modelo equivalente implementado.**

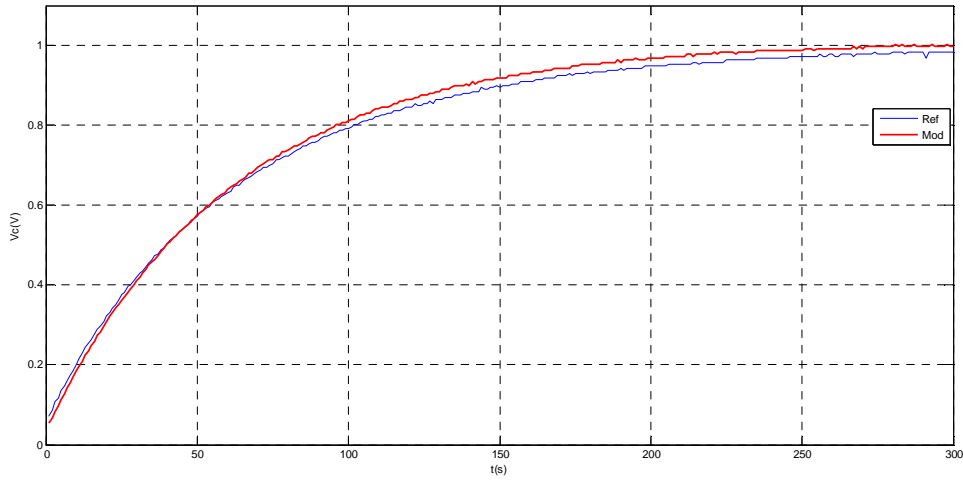
Para isso foram utilizados os modelos equivalentes apresentados na subsecção 5.6.1, começando pelo mais simples, o circuito da Figura 81 – Circuito RC série. Neste modelo foram utilizados dois condensadores, de capacidades diferentes, nomeadamente 2200  $\mu\text{F}$  e 3300  $\mu\text{F}$  e calculadas as respetivas resistências para que o produto se adequasse ao devolvido pela modelação em MATLAB. Os resultados obtidos para o EDLC de 0,022 F foram os obtidos na Tabela 22.

**Tabela 22 – Condensadores utilizados para obtenção do modelo.**

EDLC (F)	$V_{in}$ (V)	Condensadores Clássicos ( $\mu\text{F}$ )	R ( $\text{k}\Omega$ )
0,022	1	2200	27
		3300	18

De referir que os valores dos condensadores clássicos escolhidos, teve por base as gamas comercializáveis para estes componentes elétricos e disponíveis no ISEP.

Para o caso do EDLC de 0,022 F,  $V_{in}=1$ ,  $C=2200 \mu\text{F}$  e  $R=26,5 \text{ k}\Omega$  a resposta foi a apresentada na Figura 86.



**Figura 86 – Modelo equivalente  $G_1$  para o EDLC de 0,022 F e entrada em degrau unitário, com um condensador clássico de 2200  $\mu\text{F}$ .**

Para efeitos de comparação foram utilizados os índices de desempenho do integral do erro quadrático (ISE) e o integral do erro absoluto (IAE) definidos pelas seguintes equações:

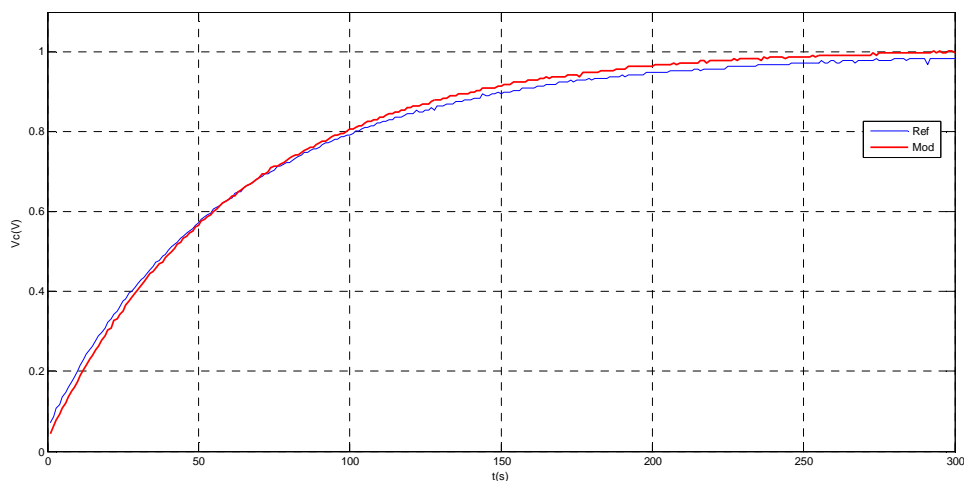
$$ISE = \sum_{i=1}^N ((V_{Ref} - V_{Mod})^2) \quad (66)$$

$$IAE = \sum_{i=1}^N (abs(V_{Ref} - V_{Mod})) \quad (67)$$

em que  $N$  é o número de amostras consideradas do sinal.

Os valores de ISE e IAE para o modelo da Figura 86, foram de 0,09 e 4,92, respetivamente.

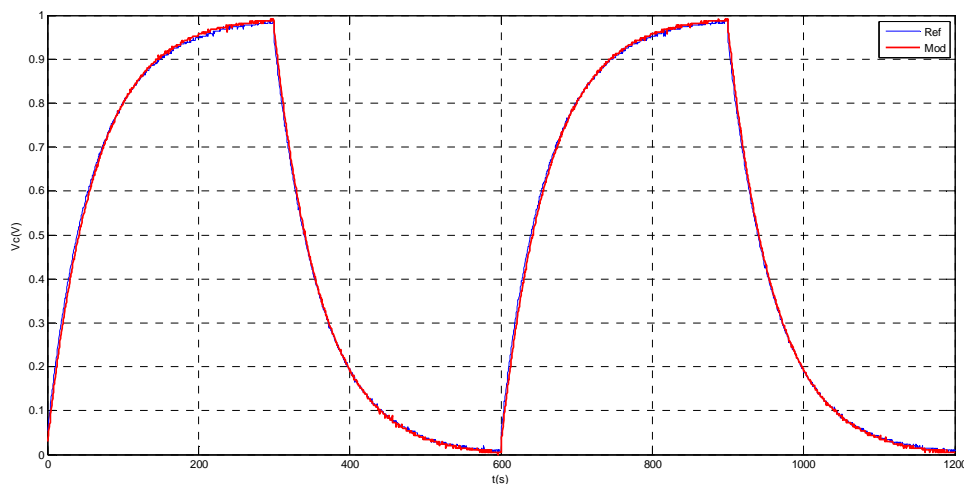
Para o EDLC de 0,022 F,  $V_{in}=1$  V,  $C=3300$   $\mu\text{F}$  e  $R=17,78$   $\text{k}\Omega$  a resposta foi a da Figura 87.



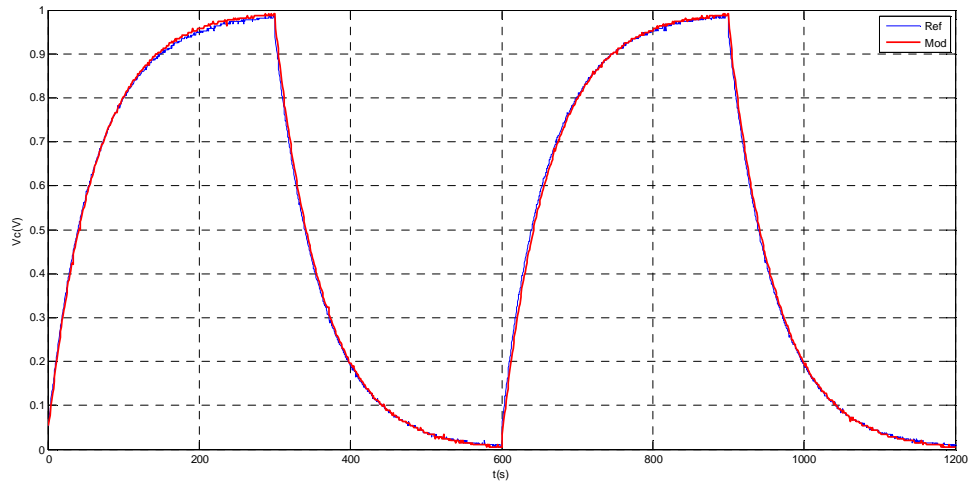
**Figura 87 – Modelo equivalente  $G_1$  para o EDLC de 0,022 F e entrada em degrau unitário, com um condensador clássico de 3300  $\mu\text{F}$ .**

Os valores de ISE e IAE para o modelo da Figura 87, foram de 0,07 e 4,50 respetivamente.

As Figuras 88 e 89 mostram as respostas a uma entrada em onda quadrada de amplitude unitária e período de 600 s para o EDLC de 0,022 F, com o  $C=2200 \mu\text{F}$ ,  $R=27 \text{ k}\Omega$  e  $C=3300 \mu\text{F}$ ,  $R=18 \text{ k}\Omega$ , respetivamente.

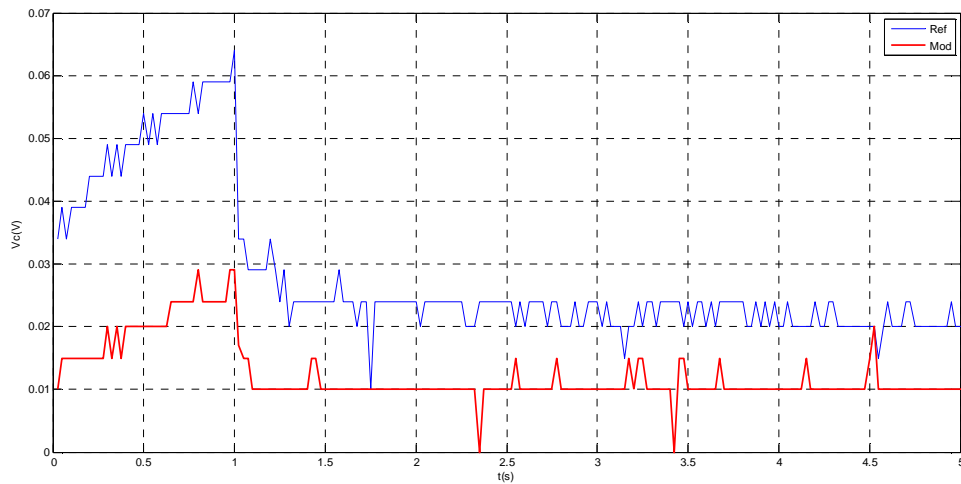


**Figura 88 – Modelo equivalente  $G_1$  para o EDLC de 0,022 F com um condensador clássico de 2200  $\mu\text{F}$  e entrada em onda quadrada.**

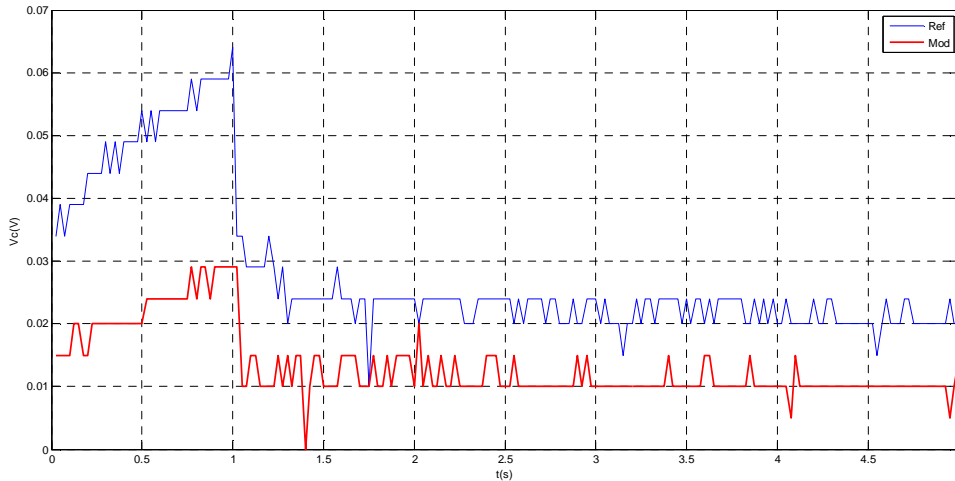


**Figura 89 – Modelo equivalente  $G_1$  para o EDLC de 0,022 F com um condensador clássico de 3300  $\mu\text{F}$  e entrada em onda quadrada.**

As Figuras 90 e 91 mostram a resposta a um pulso com duração de 1 s e amplitude de 1 V para o EDLC de 0,022 F, com os condensadores de 2200  $\mu\text{F}$  e 3300  $\mu\text{F}$ , respetivamente.



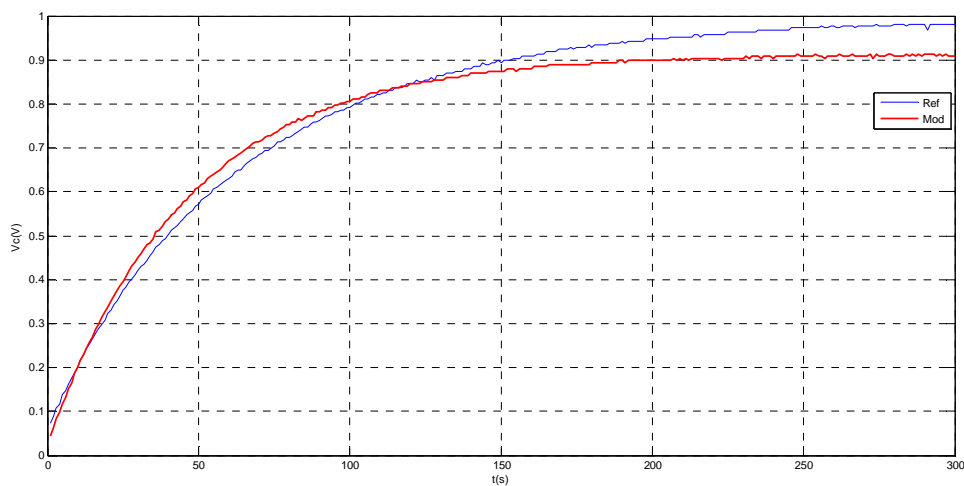
**Figura 90 – Resposta ao pulso para o EDLC de 0,022 F, do condensador de 2200  $\mu\text{F}$ .**



**Figura 91 – Resposta ao pulso para o EDLC de 0,022 F, do condensador de 3300  $\mu$ F.**

O erro obtido é bastante reduzido, nomeadamente para o integral do erro quadrático (ISE=0,09 e ISE=0,07). A resposta à onda quadrada e pulso, também se aproxima do esperado, o que valida o modelo equivalente. Assim, de seguida será analisado o modelo  $G_2$ .

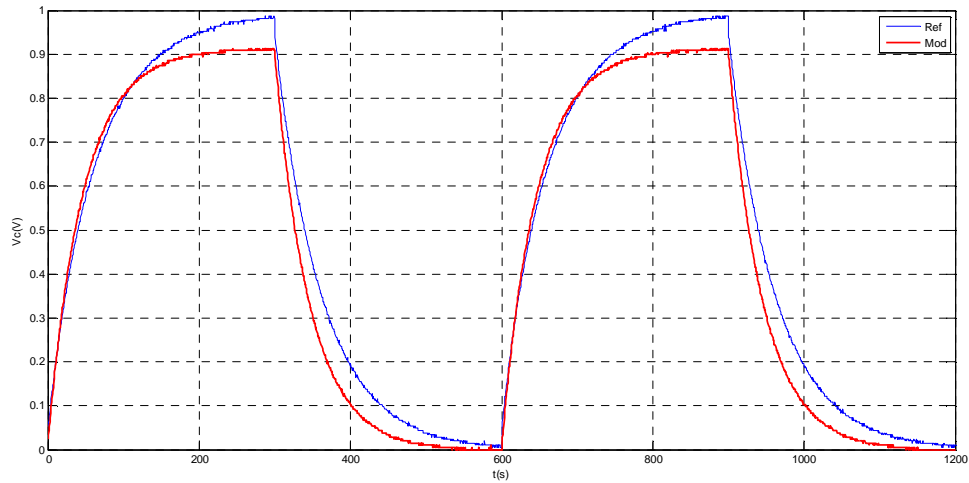
A resposta ao degrau para o EDLC de 0,022 F,  $V_{in}=1$  V,  $C_1=2200$   $\mu$ F e  $R_1=22$  k $\Omega$  e  $R_2=269$  k $\Omega$  é a apresentada na Figura 92.



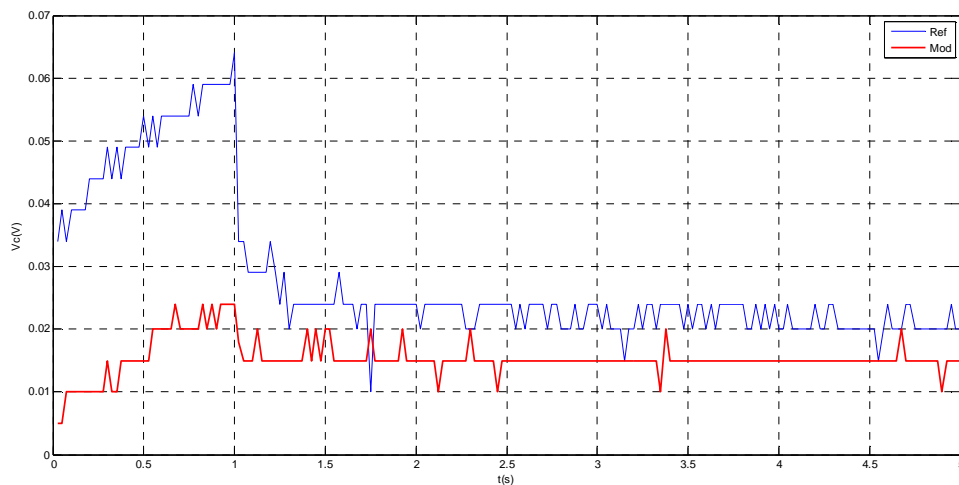
**Figura 92 – Resposta ao degrau para o EDLC de 0,022 F, através do modelo equivalente  $G_2$ .**

Os valores de ISE e IAE para o modelo da Figura 92, foram de 0,54 e 11,03 respetivamente.

A resposta a uma onda quadrada com amplitude de 1 e com um período de 600 s está ilustrada na Figura 93, enquanto a resposta ao pulso está apresentada na Figura 94.

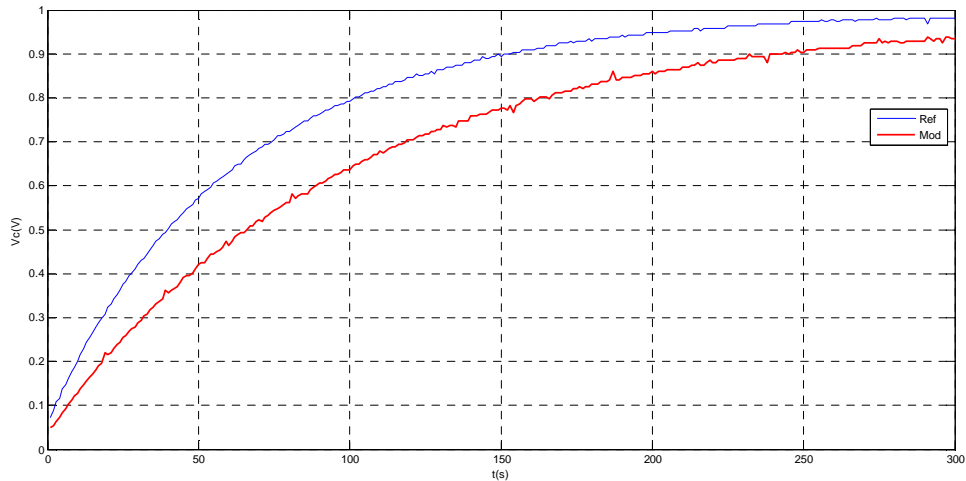


**Figura 93 – Resposta à onda quadrada para o EDLC de 0,022F, através do modelo equivalente  $G_2$ .**



**Figura 94 – Resposta ao pulso para o EDLC de 0,022 F, através do modelo equivalente  $G_2$ .**

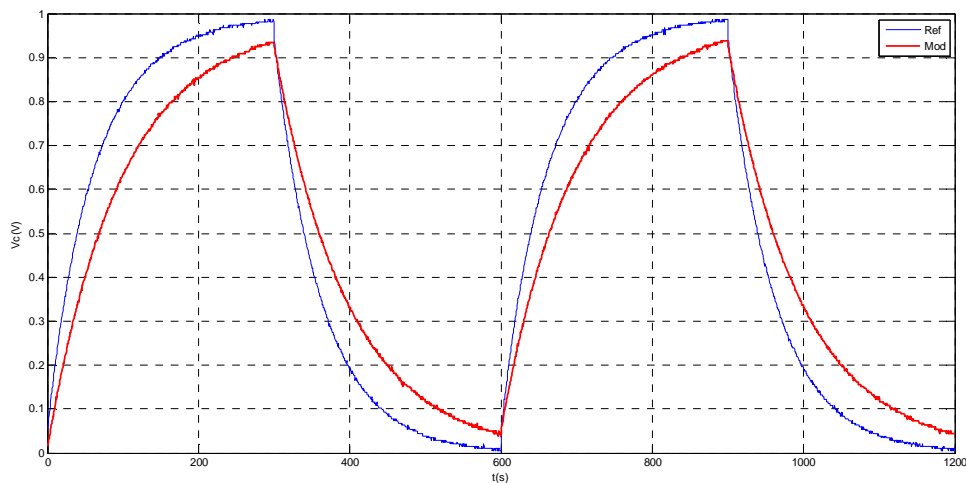
Para o modelo equivalente  $G_3$ , com  $R_1=9,87 \text{ k}\Omega$ ,  $R_2=17,78 \text{ k}\Omega$ ,  $C_1=177 \text{ nF}$  e  $C_2=3300 \text{ }\mu\text{F}$  a resposta à entrada em degrau é mostrada na Figura 95.



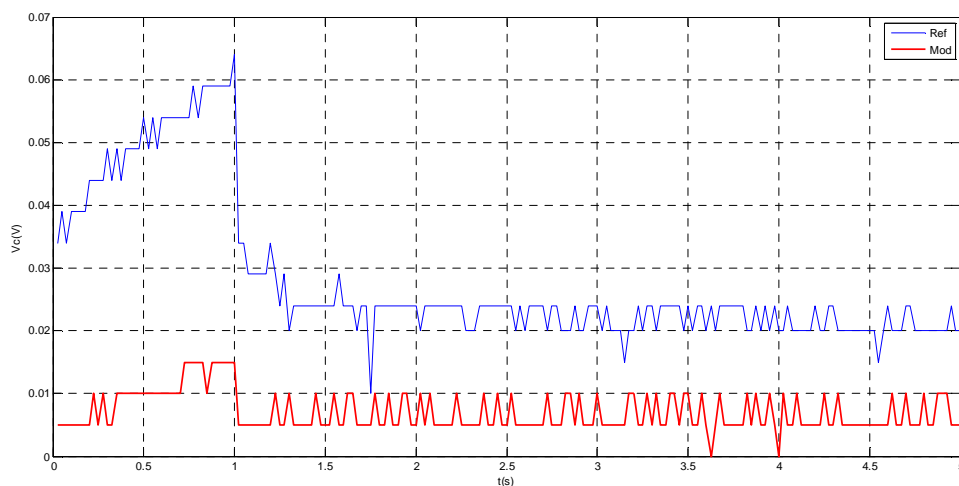
**Figura 95 – Modelação do EDLC de 0,022 F, através do modelo equivalente  $G_3$  e aplicando à sua entrada um degrau unitário.**

Os valores de ISE e IAE para o modelo  $G_3$ , foram de 3,94 e 32,32, respetivamente.

A resposta a uma onda quadrada com um período de 600 s e amplitude de 1 V é apresentada na Figura 96, enquanto a Figura 97 mostra a resposta ao pulso de duração de 1 s, com amplitude de 1 V.



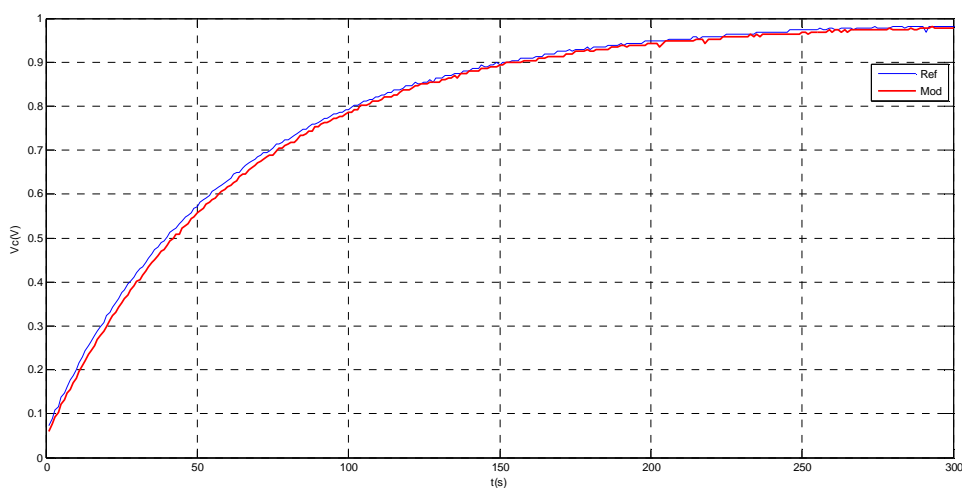
**Figura 96 – Modelação do EDLC de 0,022 F, através do modelo equivalente  $G_3$  e aplicando à sua entrada uma onda quadrada.**



**Figura 97 – Modelação do EDLC de 0,022 F, através modelo equivalente  $G_3$  e aplicando à sua entrada um pulso.**

A resposta obtida apresenta um erro bastante acentuado para as diversas entradas aplicadas ao sistema, por esse motivo foi substituído o condensador  $C_2$  por um condensador clássico de 2200  $\mu\text{F}$ . Os resultados obtidos com este condensador foram os apresentados a seguir.

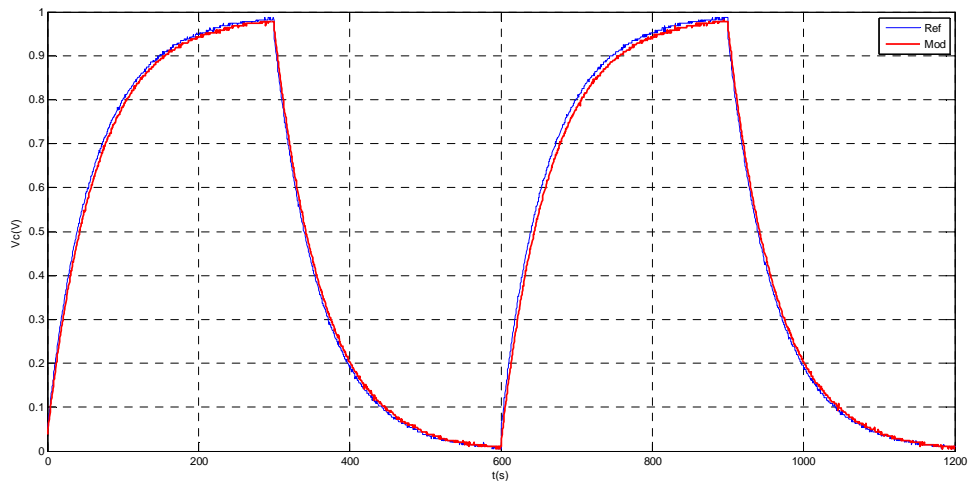
Para o modelo equivalente  $G_3$ , com  $R_1=9,87 \text{ k}\Omega$ ,  $R_2=17,78 \text{ k}\Omega$ ,  $C_1=177 \text{ nF}$  e  $C_2=2200 \mu\text{F}$  a resposta à entrada em degrau é mostrada na Figura 98.



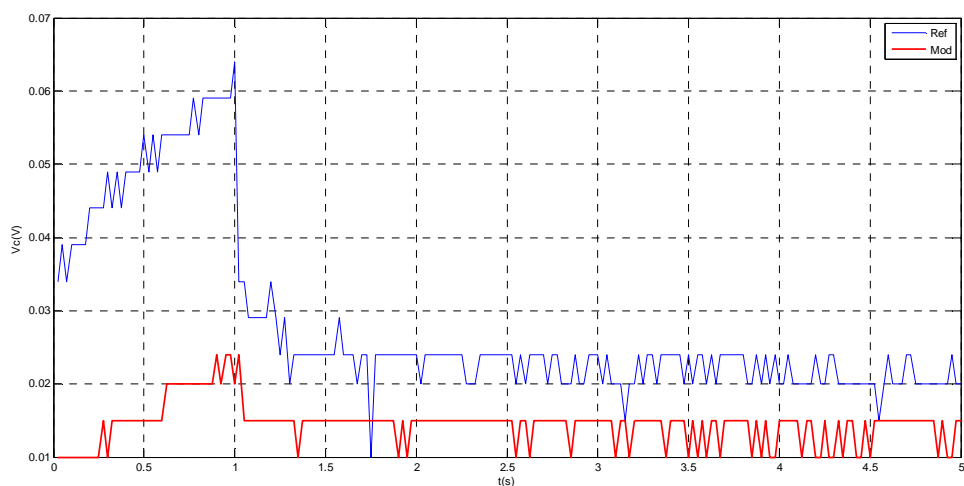
**Figura 98 – Modelação do EDLC de 0,022 F, através do modelo equivalente  $G_3$ , aplicando à sua entrada um degrau unitário e  $C_2=2200 \mu\text{F}$ .**

Os valores de ISE e IAE para o modelo  $G_3$ , após a substituição de  $C_2$ , foram de 0,03 e 2,77, respectivamente.

A resposta a uma onda quadrada com um período de 600 s e amplitude de 1 V é apresentada na Figura 99, enquanto a Figura 100 mostra a resposta ao pulso de amplitude de 1 V com duração de 1 s.



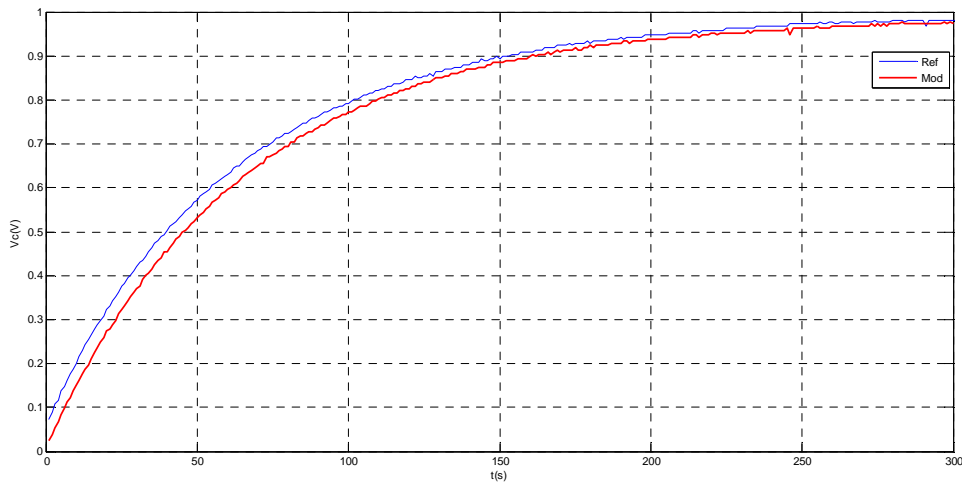
**Figura 99 – Modelação do EDLC de 0,022 F, através do modelo equivalente  $G_3$ , aplicando à sua entrada uma onda quadrada e  $C_2=2200 \mu\text{F}$ .**



**Figura 100 – Modelação do EDLC de 0,022 F, através do modelo equivalente  $G_3$ , aplicando à sua entrada um pulso e  $C_2=2200 \mu\text{F}$ .**

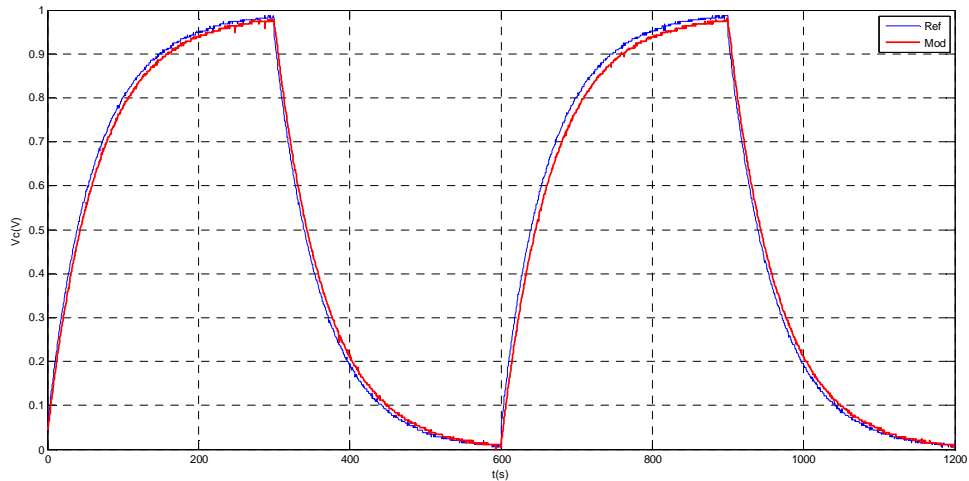
As respostas obtidas, com a substituição do condensador  $C_2$ , apresentam um erro menor em relação à resposta do condensador de  $3300 \mu\text{F}$ , validando por isso o modelo construído com recurso a um circuito misto de dois condensadores clássicos e duas resistências. De seguida foi realizada a modelação para o  $G_4$ .

Para o modelo equivalente  $G_4$ , com  $R_1=9,87 \text{ k}\Omega$ ,  $R_2=17,78 \text{ k}\Omega$ ,  $R_3=21,5 \text{ k}\Omega$ ,  $C_1=177 \text{ nF}$ ,  $C_2=2200 \mu\text{F}$  e  $C_3=33 \mu\text{F}$  a resposta à entrada em degrau está ilustrada na Figura 101.

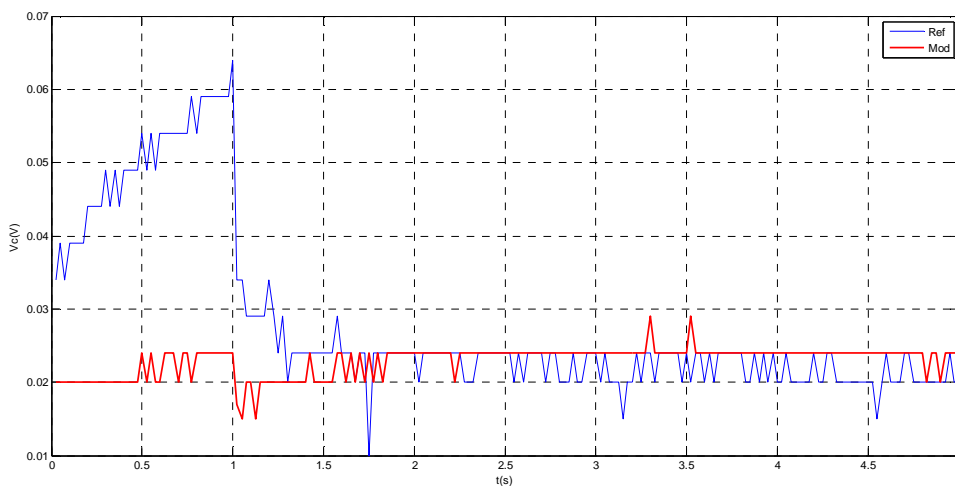


**Figura 101 – Modelação do EDLC de  $0,022 \text{ F}$ , através do modelo equivalente  $G_4$  e aplicando à sua entrada um degrau unitário.**

Os valores de ISE e IAE para o modelo  $G_4$ , foram de 0,20 e 6,29 respetivamente. A resposta a uma onda quadrada com um período de  $600 \text{ s}$  é apresentada na Figura 102, enquanto a Figura 103 mostra a resposta ao pulso com duração de  $1 \text{ s}$ .



**Figura 102 – Modelação do EDLC de 0,022 F, através do modelo equivalente  $G_4$  e aplicando à sua entrada uma onda quadrada.**



**Figura 103 – Modelação do EDLC de 0,022 F, através do modelo equivalente  $G_4$  e aplicando à sua entrada um pulso.**

As respostas obtidas para o modelo de um circuito misto de três condensadores clássicos e três resistências, apresentam um erro reduzido em relação à resposta do EDLC de 0,022 F, validando-o por isso.

Os erros obtidos ao longo da modelação constam na Tabela 23.

**Tabela 23 – Erros ISE e IAE obtidos.**

<b>Modelo</b>	<b>Capacidade (<math>\mu\text{F}</math>)</b>	<b>ISE</b>	<b>IAE</b>
<b>G<sub>1</sub></b>	2200	0,09	4,92
	3300	0,07	4,50
<b>G<sub>2</sub></b>	2200	0,54	11,03
<b>G<sub>3</sub></b>	3300	3,04	32,32
	2200	0,03	2,77
<b>G<sub>4</sub></b>	2200	0,20	6,29

Analisando a Tabela 23, é possível concluir que as modelações realizadas com o recurso a um circuito RC série apresentam um erro menor que por exemplo um circuito misto do tipo G<sub>2</sub>. No entanto, o modelo equivalente que apresentou menor erro ISE e IAE foi o modelo G<sub>3</sub>, depois de substituído o condensador C<sub>2</sub>. Assim, e apesar dos restantes modelos não apresentarem erros significativos, o modelo G<sub>3</sub> foi o melhor modelo construído.



## 6. CONCLUSÕES

Devido à especificidade e características dos supercondensadores, foi necessário ultrapassar inúmeras limitações, que ao longo de todo o trabalho foram surgindo. Com a fixação da constante de carga próxima de 60 s e a obtenção da resposta dos EDLC no domínio dos tempos, foi possível, com recurso ao MATLAB, realizar a modelação dos supercondensadores, recorrendo a resistências e condensadores clássicos. De facto para os diversos modelos equivalentes abordados ao longo deste trabalho, os resultados foram satisfatórios para as diversas entradas aplicadas ao sistema (degrau, onda quadrada e pulso). Os erros obtidos foram reduzidos para o EDLC de 0,022 F e permitem afirmar que os modelos escolhidos aproximam com sucesso a resposta do EDLC, nomeadamente o modelo  $G_3$  com dois condensadores e duas resistências (visto este ter apresentado o menor erro ISE e IAE).

Existem vários aspetos que poderiam ser otimizados, tais como: o período de amostragem da placa de aquisição construída, o tipo de comunicação entre a placa e o PC, o gerador de sinais (permitindo colocar sinais com frequência inferior a 1 Hz, com precisão), os aparelhos de medição disponíveis (possibilitando obter leituras abaixo de 6 Hz de forma automática) ou a fonte de alimentação (para condensadores de capacidade superior, a fonte de alimentação demora algum tempo até atingir a tensão desejada).

Desta forma seria possível obter a ESR do supercondensador e a sua capacidade real, já que a segunda não pode ser medida recorrendo ao *Scopemeter* e normalmente apresenta valores de tolerância elevados, comparando-os com os especificados pelo fabricante.

Apesar de todas as dificuldades, os objetivos foram atingidos e serviram para aprofundar conhecimentos em áreas como: o eletromagnetismo, a programação, o desenvolvimento de *hardware* (nomeadamente em PIC) e a teoria de sistemas (modelação de sistemas).

## *Referências Documentais*

- [1] Lei de Coulomb, <http://wwwttest.ck12.org/book/CK-12-Peoples-Physics-Concepts/r12/section/12.2/>, visitada em 20/10/2012.
- [2] 1933, Pollack, Gerard L. and Stump, Daniel R., “Eletromagnetism”, Addison Wesley, San Francisco, USA.
- [3] Garrafa de Leyden, <http://www.oocities.org/br/saladefisica9/biografias/hertz.htm>, visitada em 21/10/2012.
- [4] Robert L. Boylestad, “Introdução à Análise de Circuitos”, 1997.
- [5] Jesus, Isabel, “Supercondensadores”, 2010.
- [6] Condensador de mica, [http://www.technologyuk.net/electronics/electrical\\_principles/the\\_capacitor.shtml](http://www.technologyuk.net/electronics/electrical_principles/the_capacitor.shtml), visitada em 21/10/2012.
- [7] Condensador eletrolítico, <http://kiev.zakupka.com/p/663836-kondensatory-elektroliticheskie-k50-35/>, visitada em 21/10/2012.
- [8] Condensador variável, <http://brodtec.com/modificando-o-seu-r-dio>, visitada em 05/02/2013.
- [9] Condensador de placas planas, [http://people.physics.carleton.ca/~watson/Physics/1000\\_level/1008\\_Magnetism/1008\\_Magnetic\\_force.html](http://people.physics.carleton.ca/~watson/Physics/1000_level/1008_Magnetism/1008_Magnetic_force.html), visitada em 22/10/2012.
- [10] Condensador cilíndrico, <http://electroblog.com.ar/page/2/>, visitada em 22/10/2012.
- [11] Condensador esférico, [http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica\\_/elecmagnet/condensador/esfera1/esfera1.html](http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica_/elecmagnet/condensador/esfera1/esfera1.html), visitada em 22/10/2012.
- [12] Martins, Ernesto, “Circuitos Eléctricos – Resistências e Condensadores”, 2008.

- [13] Curva de carga e descarga do condensador, <http://www.ebah.com.br/content/ABAAABTqUAD/capacitor-corrente-continua?part=2>, visitado em 03/12/2012
- [14] Andrew Burke, "Ultracapacitors: why, how and where is the technology", 2000.
- [15] 2003, Namisnyk, Adam Marcus, "A survey of electrochemical supercapacitor technology".
- [16] EDLC de Nanotubos, [http://portal.surrey.ac.uk/portal/page?\\_pageid=822,2408713&\\_dad=portal&\\_schema=PORTAL](http://portal.surrey.ac.uk/portal/page?_pageid=822,2408713&_dad=portal&_schema=PORTAL), visitado em 15/12/2012.
- [17] 2001, Frackowiak, E., K. Jurewicz, et al. "Nanotubular materials for supercapacitors." Journal of Power Sources.
- [18] 2005, Frackowiak, E., V. Khomenko, et al. "Supercapacitors based on conducting polymers/nanotubes composites." Journal of Power Sources.
- [19] 2001, Jurewicz, K., S. Delpoux, et al. "Supercapacitors from nanotubes/polypyrrole composites." Chemical Physics Letters
- [20] R. Kotz, M. Carlen, "Principles and applications of electrochemical capacitors", 1999.
- [21] Conway, B. E. "Electrochemical Supercapacitors: Scientific Fundamentals and Technological Applications", 1999.
- [22] Markus, Marco, "Circuitos Elétricos: Corrente Contínua e Corrente Alternada", 2001.
- [23] 2001, Pell, W. G. and B. E. Conway (2001). "Analysis of power limitations at porous supercapacitor electrodes under cyclic voltammetry modulation and dc charge." Journal of Power Sources.
- [24] 2001, Endo, M., T. Maeda, "Capacitance and pore-size distribution in aqueous and nonaqueous electrolytes using various activated carbon electrodes." Journal of the Electrochemical Society.
- [25] Jesus, Isabel, "Supercondensadores", 2010.
- [26] Veículo movido a hidrogénio, <http://hlagido.wordpress.com/tag/hidrogenio/>, visitada em 14/12/2012
- [27] 1996, Microchip, PIC18F2455/2550/4450/4550 DataSheet.

- [28] Comunicação assíncrona,  
<http://www.cinelformacao.com/tda/files/ud1/ud1cap1p2.htm>, visita em  
18/12/2012.
- [29] Função `fminunc`, <http://www.mathworks.com/help/optim/ug/fminunc-unconstrained-minimization.html>.
- [30] 2012, Fluke Corporation – ScopeMeter 120 and 190 Series Datasheet.
- [31] 1996, Topward – 8110 Function Generator Operation Manual Datasheet.



## Anexo A. Material Utilizado

O *Scopemeter* é um aparelho de medida, que possibilita a leitura de quatro valores RMS em simultâneo, entre os quais se salientam: frequência, desfasamento, tensão, corrente e capacidade entre outros. Este pode ainda ser ligado ao computador, através do seu módulo de comunicação RS232, possibilitando exportar para o mesmo os gráficos obtidos.



**Figura 104 – Scopemeter – Fluke 123 [30]**

O gerador de sinais apresentado na Figura 105, possibilita:

- variar a frequência de 1 Hz até 1MHz;
- definir o sinal de saída desejado (onda quadrada, sinusoidal ou onda triangular);
- variar a amplitude
- definir ou não componente DC no sinal desejado.



**Figura 105 – Gerador de sinais TopWard 8110 [31]**

## Anexo B. – *Layout* da placa de aquisição de dados

