



Universidade do Minho  
Escola de Engenharia

José Manuel Neves Gonçalves

Desenvolvimento e otimização do projeto  
mecatrónico para um Tribómetro Linear

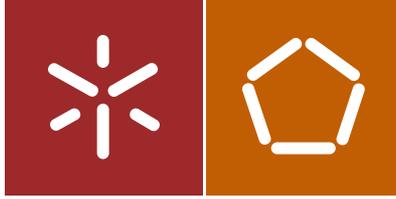
Desenvolvimento e otimização do projeto  
mecatrónico para um Tribómetro Linear

José Manuel Neves Gonçalves

UMinho | 2015

outubro de 2015





Universidade do Minho  
Escola de Engenharia

José Manuel Neves Gonçalves

Desenvolvimento e otimização do projeto  
meatrónico para um Tribómetro Linear

Dissertação de Mestrado  
Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao  
Grau de Mestre em Engenharia Mecânica

Trabalho efectuado sob a orientação do  
Professor Doutor Eurico Augusto Rodrigues de Seabra  
Professor Doutor Luís Fernando de Sousa Ferreira da  
Silva

## DECLARAÇÃO

Nome: José Manuel Neves Gonçalves

Endereço eletrónico: a62080@alunos.uminho.pt    Telefone:918268627

Bilhete de Identidade/Cartão do Cidadão: 14164426

Título da dissertação: Desenvolvimento e otimização do projeto mecatrónico para um Tribómetro Linear

Orientador/a/es:

Professor Doutor Eurico Augusto Rodrigues de Seabra

Professor Doutor Luís Fernando de Sousa Ferreira da Silva

Ano de conclusão: 2015

Mestrado em Engenharia Mecânica

É AUTORIZADA A REPRODUÇÃO INTEGRAL DESTA DISSERTAÇÃO APENAS PARA EFEITOS DE INVESTIGAÇÃO, MEDIANTE DECLARAÇÃO ESCRITA DO INTERESSADO, QUE A TAL SE COMPROMETE.

Universidade do Minho, \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_

Assinatura:

## Agradecimentos

Quero agradecer o contributo prestado a todos os envolventes neste projeto, em especial aos professores Eurico Seabra e Luís Ferreira da Silva pela sua disponibilidade, apoio e pela transmissão de conhecimentos durante todo este trabalho.

De salientar a importância e incentivo dos meus pais e família que sempre me apoiaram e ajudaram ao longo da vida académica, proporcionando as melhores condições possíveis para que este ciclo se encontre terminado.

Por último, mas não menos importante, o apoio dos meus amigos que sempre se disponibilizaram a ajudar-me e apoiar-me, em especial reconhecimento a ajuda do meu colega Luís Costa que me ajudou na concretização dos ensaios realizados no equipamento FricTORQ, fundamentais à validação do tribómetro Linear.



## Resumo

Este projeto consiste no desenvolvimento e otimização de um equipamento existente na Universidade do Minho, denominado tribómetro linear, utilizado para a análise de coeficiente de atrito em materiais flexíveis. Inicialmente é analisado o princípio de funcionamento do equipamento, onde são revistos os conceitos teóricos e todos os seus constituintes. Em seguida é estudada uma possível otimização à parte mecânica, da parte eletrónica e da parte informática (projeto mecatrónico) do tribómetro linear. Para tal, de forma sistemática, foram analisados todos elementos que são necessários para que o tribómetro linear tenha um funcionamento adequado, com precisão e repetibilidade, e efetuado um levantamento dos benefícios da implementação destes. Na parte eletrónica é necessário implementar um sistema de controlo do motor DC (responsável pelo movimento linear da mesa), utilizando uma ponte H, para que seja possível através de uma saída digital regular/ajustar diferentes velocidades de movimentação para a mesa linear. Na parte informática é necessário conceber e desenvolver um programa na plataforma *LabVIEW*, que consiga adquirir, visualizar, tratar e registar os dados e por fim permita realizar o controlo automático do tribómetro linear. Também são realizados ensaios de validação do equipamento utilizando diferentes materiais rígidos e deformáveis, para aferir a sua precisão e repetibilidade na medição do coeficiente de atrito e aferição do seu desgaste se possível.

Palavras-chave: Tribómetro Linear, projeto mecatrónico, *hardware*, *software*



## Abstract

This project consists in the development and optimization of an existing equipment at Universidade do Minho, denominated linear tribometer, used for the analysis of friction coefficient in flexible materials. Initially the analysis is focused on the functioning principles of the equipment, where all its constituents and its theoretical concepts are revised. After the first phase, a possible mechanic, electronic and informatic optimization (mechatronic project) of the linear tribometer are studied. In order to do so, all the necessary elements required for an adequate linear tribometer functioning with precision and repeatability shall be analyzed as well as a study on the benefits of its implementation. The electronic segment require the implementation of a controlling system in the DC engine (responsible for the table's linear movement), using a H bridge, so it is possible through a digital exit regulate/adjust diferent movement speeds for the linear table. The informatic segment require the conception and development of a program using the platform *LabVIEW*, that can acquire, visualize, treat and register the data, ultimately performing the linear tribometer automatic control. It is also intended to perform validation trials resorting to different deformable and rigid materials, in order to assess its precision and repeatability regarding the friction coeficient measurement whilst assessing its wear.

**KEYWORDS:** Linear Tribometer, mechatronic project, hardware, software



## ÍNDICE

Agradecimentos.....	v
Resumo.....	vii
Abstract.....	ix
Lista de Figuras.....	xv
Lista de Tabelas.....	xix
Lista de Abreviaturas, Siglas e Acrónimos.....	xxi
1 Introdução.....	1
1.1 Enquadramento do tema.....	2
1.2 Objetivos do projeto.....	2
1.3 Motivações.....	3
1.4 Estrutura da dissertação.....	3
2 Estado de arte.....	5
2.1 Tribologia.....	5
2.1.1 História da tribologia.....	6
2.1.2 Tribologia aplicada a materiais flexíveis.....	9
2.2 Equipamentos existentes.....	11
2.2.1 Análise dos equipamentos.....	14
2.3 Sistema de processamento e aquisição de dados.....	17
2.3.1 <i>Software</i> LabVIEW.....	18
2.3.2 <i>Hardware</i> a implementar.....	19
2.3.3 Comparação entre as placas analisadas.....	23
2.4 Aplicações eletrónicas.....	25
2.4.1 Amplificador operacional.....	25
2.4.2 Fonte de alimentação.....	29
3 Análise do equipamento existente.....	37
3.1 Aplicação da carga normal.....	38
3.2 Movimento relativo entre amostra e apalpador.....	39
3.3 Gama de velocidades.....	39

3.4	Sistemas de aquisição de dados .....	40
3.4.1	Sistema de aquisição de força .....	42
3.4.2	Sistema de aquisição de rugosidade/enrugamento .....	43
3.5	Discussão do trabalho apresentado.....	44
4	Desenvolvimento do sistema de <i>hardware</i> .....	47
4.1	Controlo do motor .....	47
4.2	Análise dos sinais elétricos a adquirir .....	48
4.2.1	Sinal elétrico proveniente da régua potenciométrica .....	49
4.2.2	Sinal elétrico proveniente do fim de curso.....	51
4.2.3	Sinal elétrico proveniente do sensor laser .....	52
4.2.4	Sinal elétrico proveniente da célula de carga .....	54
4.3	Fonte de alimentação .....	58
4.3.1	Transformador de tensão.....	59
4.3.2	Circuito retificador .....	60
4.3.3	Filtro .....	61
4.3.4	Reguladores .....	62
4.3.5	Esquema geral da fonte de alimentação .....	64
4.4	Conceção da placa eletrónica .....	65
4.5	Montagem, otimização e validação do sistema de <i>hardware</i> .....	69
5	<i>Software</i> do equipamento.....	79
5.1	Fluxograma do <i>software</i> .....	79
5.2	Painel de controlo do <i>software</i> .....	85
6	Calibração do equipamento.....	87
6.1	Calibração da régua potenciométrica .....	87
6.2	Calibração de velocidades .....	88
6.3	Calibração da célula de carga .....	90
6.4	Calibração do sensor laser .....	94
7	Testes de validação do equipamento.....	97
7.1	Protocolo de ensaio.....	98
7.2	Discussão de resultados .....	102

7.2.1	Análise do coeficiente de atrito .....	103
7.2.2	Análise da rugosidade superficial .....	109
8	Conclusão.....	111
8.1	Sumário.....	111
8.2	Conclusões.....	112
8.3	Trabalhos futuros .....	113
9	Bibliografia .....	115
	Anexo I – Datasheet LM 741 .....	117
	Anexo III – Datasheet LM 337 .....	149
	Anexo IV – Esquema da placa eletrónica .....	165
	Anexo V – Resultados de atrito obtidos nos ensaios com o tribómetro linear.....	167
	Anexo VI – Resultados de atrito obtidos nos ensaios com o FricTORQ.....	169
	Anexo VII – Resultados de rugosidade obtidos nos ensaios com o tribómetro linear.....	171



## Lista de Figuras

Figura 2.1 – Redução do atrito na antiguidade.....	6
Figura 2.2 - Mecanismos de Da Vinci para quantificar a força de trito.....	7
Figura 2.3 - Teste à tração.....	10
Figura 2.4 - Teste ao corte tensão .....	10
Figura 2.5 - Teste de flexão.....	10
Figura 2.6 - Teste à compressão.....	11
Figura 2.7 - Teste às propriedades tribológicas.....	11
Figura 2.8 - Tribómetro Bruker UMT-2.....	12
Figura 2.9 - Tribómetro PLINT TE 67/R.....	13
Figura 2.10 - Tribómetro Pino-Disco invertido .....	13
Figura 2.11 - FricTORQ.....	14
Figura 2.12 - Corpo de geometria anelar.....	15
Figura 2.13 - Método linear.....	16
Figura 2.14 - Esquemática de um sistema DAQ.....	17
Figura 2.15 - Placa NI USB 6009 .....	20
Figura 2.16 - Placa NI PCI-6220.....	20
Figura 2.17 - Placa NI PCI 6251 .....	21
Figura 2.18- Placa DAQPad 6015.....	21
Figura 2.19 - Placa Arduino Mega 2560 .....	22
Figura 2.20 - Símbolo de um amplificador operacional.....	26
Figura 2.21 - Configuração do amplificador inversor.....	27
Figura 2.22 - Configuração amplificador somador inversor .....	28
Figura 2.23 - Diagrama de blocos de uma fonte de alimentação para corrente contínua .....	29
Figura 2.24 - Processo desenrolado no transformador .....	30
Figura 2.25 - Curva característica do comportamento de um diodo .....	31
Figura 2.26 - Circuito retificador de meia onda .....	32
Figura 2.27 - Análise do sinal em diversos pontos do circuito retificador de meia onda .....	32
Figura 2.28 - Circuito retificador de onda completa com terminal central .....	33

Figura 2.29 - Análise do sinal em diversos pontos do circuito retificador de onda completa com terminal central.....	33
Figura 2.30 - Circuito retificador de onda completa em ponte .....	34
Figura 2.31 - Análise do sinal em diversos pontos do circuito retificador de onda completa em ponte.....	34
Figura 2.32 - Circuito com regulador de tensão.....	35
Figura 2.33 - Pico de tensão após retificação.....	35
Figura 2.34 - Regulação de um sinal de tensão.....	35
Figura 3.1 - Princípio de funcionamento de um tribómetro linear.....	37
Figura 3.2 - Equipamento montado com sistema inicial.....	38
Figura 3.3 - Aplicação de carga normal .....	38
Figura 3.4 - Fonte de tensão variável .....	40
Figura 3.5 - Velocidades do motor.....	40
Figura 3.6 - Placa NI DAQPad-6015 .....	41
Figura 3.7 - Esquema de montagem dos terminais à placa de aquisição de dados .....	41
Figura 3.8 - Célula de carga WMCP 1000G .....	42
Figura 3.9 - Amplificador da célula de carga.....	42
Figura 3.10 - Sensor laser optoNCDT 1302.....	43
Figura 3.11 - Localização da célula de carga e do sensor laser.....	44
Figura 3.12 - Resultados apresentados após conclusão do equipamento.....	44
Figura 3.13 - Pé regulável .....	45
Figura 3.14 - Aplicação dos pés reguláveis.....	45
Figura 3.15 - Sistema de controlo do motor.....	46
Figura 4.1 - Esquemática do sistema de <i>hardware</i> .....	47
Figura 4.2 - Driver do motor DC.....	48
Figura 4.3 - Divisor de tensão .....	49
Figura 4.4 - Circuito com divisor de tensão para a régua potenciométrica.....	50
Figura 4.5 - Análise do sinal da régua após o seu condicionamento .....	50
Figura 4.6 - Circuito com divisor de tensão para os fins de curso .....	51
Figura 4.7 - Análise do sinal do fim de curso após o seu condicionamento .....	52
Figura 4.8 - Circuito de condicionamento de sinal para sensor laser.....	53
Figura 4.9 - Análise do sinal do sensor laser após o seu condicionamento .....	53
Figura 4.10 - Circuito referente ao condicionamento de sinal da célula de carga .....	55

Figura 4.11 - Análise do sinal da célula de carga após o seu condicionamento .....	56
Figura 4.12 - Circuito retificado para o condicionamento da célula de carga .....	57
Figura 4.13 - Análise do sinal da célula de carga após retificação .....	57
Figura 4.14 - Transformador .....	60
Figura 4.15 - Ponte retificadora utilizada.....	60
Figura 4.16 – Comportamento do sinal após filtragem .....	62
Figura 4.17 - Esquema de montagem do retificador LM 317 .....	62
Figura 4.18 - Dissipadores de calor a aplicar no sistema .....	64
Figura 4.19 - Esquema do circuito da fonte de alimentação .....	64
Figura 4.20 - Concessão do sistema de <i>hardware</i> com uma placa pré-fabricada .....	66
Figura 4.21 - <i>Software Eagle</i> .....	66
Figura 4.22 - Aplicação do plano massa no <i>software Eagle</i> .....	67
Figura 4.23 - <i>Layout</i> da placa a ser impressa .....	68
Figura 4.24 - Placa acabada.....	69
Figura 4.25 - Ligações à placa eletrónica.....	70
Figura 4.26 - Ligações à placa de Arduíno .....	70
Figura 4.27 – Ligação dos equipamentos à placa eletrónica.....	71
Figura 4.28 - Movimento correto do motor.....	72
Figura 4.29 - Movimento incorreto do motor .....	72
Figura 4.30 - Alimentação do motor com ciclo de trabalho a 100% .....	73
Figura 4.31 - Alimentação do motor com ciclo de trabalho a 80% .....	73
Figura 4.32 - Condensador para estabilizar sinal do motor.....	74
Figura 4.33 - Otimização da placa .....	74
Figura 4.34 - Validação do condicionamento do sinal da célula de carga.....	75
Figura 4.35 - Validação do condicionamento do sinal da régua potenciométrica .....	76
Figura 4.36 - Divisor de tensão para os fins de curso .....	76
Figura 4.37 - Sistema de <i>hardware</i> montado .....	77
Figura 5.1 - Fluxograma parte 1 .....	82
Figura 5.2 - Fluxograma parte 2.....	83
Figura 5.3 - Fluxograma parte 3.....	84
Figura 5.4 - Painel de controlo, separador 1 .....	85
Figura 5.5 - Painel de controlo, separador 2 .....	86
Figura 5.6 - Painel de controlo, separador 3 .....	86

Figura 6.1 – Calibração da régua potenciométrica.....	87
Figura 6.2 - Calibração das velocidades.....	89
Figura 6.3 - Polinómio das velocidades .....	90
Figura 6.4 - Diagrama de corpo livre das forças aplicadas no sistema .....	91
Figura 6.5 - Calibração manual da célula de carga .....	91
Figura 6.6 - Calibração da célula de carga .....	92
Figura 6.7 - Resultados da calibração da célula de carga no vidro .....	93
Figura 6.8 - Posicionamento do sensor laser.....	94
Figura 6.9 - Amostra 1 .....	95
Figura 6.10 - Resultados amostra 1 .....	95
Figura 6.11 - Amostra 2 .....	95
Figura 6.12 - Resultados amostra 2.....	95
Figura 7.1 - Amostras a utilizar nos ensaios, (1) viscosa, (2) lençol, (3) poliéster, (4) linho, (5) pano de óculos.....	98
Figura 7.2 - Conexão Arduino/LabVIEW .....	99
Figura 7.3 - Posicionamento da amostra .....	99
Figura 7.4 - Inserir propriedades do ensaio.....	100
Figura 7.5 - Análise gráfica.....	101
Figura 7.6 - Ensaios realizados no tribómetro linear, (a) amostra 1, (b) amostra 2, (c) amostra 3, (d) amostra 4, (e) amostra 5 .....	102
Figura 7.7 - Coeficiente de atrito analisado no FricTORQ .....	103
Figura 7.8 - Resultados da amostra 1 .....	104
Figura 7.9 - Resultados da amostra 2 .....	104
Figura 7.10 - Resultados da amostra 3 .....	105
Figura 7.11 - Resultados da amostra 4 .....	105
Figura 7.12 - Resultados da amostra 5 .....	106
Figura 7.13 - Desvio padrão dos ensaios no Tribómetro Linear .....	106
Figura 7.14 - Ensaio com erros de leitura devido a vibrações .....	107
Figura 7.15 - Comparação entre resultados do Tribómetro Linear e FricTORQ.....	108
Figura 7.16 - Rugosidade média de cada ensaio .....	109
Figura 7.17 - Validação de resultados de rugosidade.....	110

## Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Sistema KES .....	10
Tabela 2.2 - Tabela de valor aplicada nas placas DAQ .....	24
Tabela 4.1 - Necessidades de consumo referentes aos equipamentos do sistema.....	58
Tabela 4.2 - Tensões aplicáveis ao sistema.....	59
Tabela 4.3 - Atribuição de resistências conforme a tensão desejada .....	63
Tabela 4.4 - Condensadores aplicados nas entradas e saídas dos reguladores.....	65
Tabela 5.1 – Descrição das soluções possíveis para o desenvolvimento do <i>software</i> .....	80
Tabela 6.1 - Resultados à calibração do sensor laser .....	95
Tabela 7.1 - Parâmetros de ensaio.....	97
Tabela 7.2 - Coeficiente de atrito médio das diferentes amostras.....	107



## Lista de Abreviaturas, Siglas e Acrónimos

KES – Kawabata Evaluation System;

DC – Corrente Contínua;

AC – Corrente Alternada;

$\mu$  - Coeficiente de Atrito;

$F_{\text{atrito}}$  – Força de Atrito;

N – Carga Normal

T – Temperatura;

v – Velocidade;

DAQ – Data Acquisition;

PCI – Peripheral Component Interconnect;

PWM – Pulse Width Modulation;

$V_{\text{out}}$  – Tensão de saída;

CNC – Comando Numérico Computorizado



# 1 Introdução

A qualidade tornou-se um requisito primordial em todas as áreas de desenvolvimento de produtos, elevando a fasquia dos níveis de exigência e competitividade industrial. Em particular a qualidade da roupa, que é usada em contacto direto com o corpo humano, afeta diretamente tanto a mente como a pele humana. Por essa razão, é essencial ter um sistema que permite ter a precisão e capacidade de avaliar cuidadosamente as características dos têxteis.

A descoberta de novas fibras e diferentes processamentos levaram à produção de tecidos cobrindo um amplo espectro de características de qualidade. Isto, juntamente com a crescente exigência do consumidor, deu origem à necessidade de assegurar propriedades estéticas e de conforto dos tecidos, além da durabilidade. A indústria têxtil e do vestuário usava tradicionalmente avaliações subjetivas, ou seja, de carácter individual realizadas por intermédio do toque humano. Contudo, com o desenvolvimento de novas tecnologias e para garantir os níveis de rigor exigidos pelos consumidores surgem os primeiros testes realizados às superfícies dos tecidos com intuito de quantificar em termos de medidas físicas, avaliando propriedades táteis, como a rugosidade e o coeficiente de atrito. Estas são algumas das propriedades mecânicas que influenciam a estética e a sensação de toque no contacto com a pele humana, sendo de elevada dificuldade conseguir realizar uma caracterização objetiva correspondente.

Em 1970 com base na normalização de valores referentes ao toque humano foi iniciada, por Kawabata e Niwa, a investigação sobre a interação desses valores e as propriedades mecânicas dos tecidos. Em 1972, este trabalho conjunto, juntamente com a visão e habilidade técnica de Kawabata, levou ao desenvolvimento do instrumento KES-F, sendo posteriormente atualizado para KES-FB e aplicado na avaliação de tecidos em primeiro lugar na indústria japonesa e posteriormente no resto do mundo. No desenvolvimento deste instrumento foram escolhidos 16 parâmetros diferentes para efetuar a medição objetiva e é constituído por quatro processos distintos que complementam o resultado final. Todos, ou apenas alguns destes parâmetros podem ser utilizados para definir o comportamento de um tecido, como afeta a sua aparência e/ou desempenho de uma peça de vestuário.

## 1.1 Enquadramento do tema

Este projeto consiste na otimização e desenvolvimento de um tribómetro linear tanto para materiais rígidos como para materiais deformáveis. Nasceu da necessidade de aperfeiçoar um equipamento existente no departamento de Engenharia Mecânica da Universidade do Minho, melhorando a interface utilizador/máquina e simplificar alguns processos de funcionamento.

Uma vez que se trata de um projeto de desenvolvimento contínuo, é necessário estudar todo o trabalho já elaborado e compreender o funcionamento do equipamento. Com a informação recolhida do protótipo, relativa ao estudo do equipamento, será possível perceber quais as falhas integradas e quais as possíveis soluções a serem implementadas para obtenção de um produto final.

Este projeto pretende melhorar alguns inconvenientes do equipamento já existente, onde irá abranger a área mecânica, eletrónica e também o *software* de aquisição de dados.

## 1.2 Objetivos do projeto

Tratando-se de um equipamento em boas condições de funcionamento, o principal objetivo do projeto consiste em melhorar a interface utilizador/máquina.

Na primeira fase do projeto serão abordados os componentes e mecanismos existentes no dispositivo, analisando defeitos e limitações de forma a encontrando soluções que otimizem o equipamento.

Na segunda fase do projeto existe o objetivo de simplificar o sistema eletrónica existente no equipamento, trocando os relés utilizados no funcionamento eletrónico por um sistema mais eficaz e mais simples, outro objetivo será conseguir implementar uma ponte H capaz de realizar o controlo do motor DC.

Na última fase do projeto ocorrerá a otimização do *software* de aquisição de dados, sendo elaborado no programa informático *LabVIEW<sup>tm</sup>*. Atualmente, este é utilizado unicamente para realizar a aquisição de dados. O objetivo desta otimização será tornar este *software* mais multifacetado, ou seja, fazer com que consiga tratar a informação recolhida e armazená-la. Outro objetivo será controlar o sentido e velocidade do motor a partir do mesmo *software*.

Todo o projeto será concebido com a preocupação de realizar uma simplificação e melhoria funcional/operativa, ao nível da interface com o utilizador, de forma a tornar o equipamento de fácil utilização. Após finalizado poderá ser comercializado, tornando-se um elemento fundamental na área têxtil.

### 1.3 Motivações

O estudo tribológico em materiais flexíveis encontra-se com elevada procura devido ao facto de preencher a busca por um maior nível de qualidade e conforto dos materiais. A indústria têxtil é uma das que apresenta maior volume de procura face a este aumento para poder apresentar ao mercado tecidos com menos fricção em contacto com a pele.

Desta forma, existe um elevado interesse em elaborar novos projetos que tragam para o mercado formas fáceis e inovadoras de realizar estudos tribológicos para poder colmatar a elevada procura nesta área, sendo esta, uma área com elevada margem de progressão.

### 1.4 Estrutura da dissertação

A presente dissertação encontra-se estruturada em oito capítulos, a saber:

- No primeiro capítulo é abordada a introdução ao tema, descrevendo o enquadramento, os objetivos e as motivações que levam à concretização do projeto;
- O segundo capítulo retrata o estado de arte, abordando os conceitos teóricos e informação necessária a uma contextualização aprofundada e descrita das aplicações a serem desenvolvidas ao longo do projeto. Relativamente ao conteúdo serão descritos os seguintes tópicos: a contextualização histórica do desenvolvimento tribológico e a aplicação da ciência tribológica em materiais flexíveis, os equipamentos existentes para a análise tribológica de tecidos e a análise dos mesmos, o sistema de processamento e aquisição de dados a onde será analisado o *software* a utilizar e o *hardware* a implementar, por fim serão analisadas aplicações eletrónicas para desenvolver o condicionamento de sinal e uma fonte de alimentação;
- No terceiro capítulo é analisado o equipamento encontrado para perceber as condições iniciais ao desenvolvimento do projeto e conhecer de forma integral todo o equipamento, para tal será abordada a aplicação da carga normal, o movimento relativo entre amostra e apalpador, a gama de velocidades e como as aplicar, os sistemas de aquisição de dados e por fim será realizada uma análise ao trabalho apresentado.

- No quarto capítulo é abordado o sistema de *hardware* a implementar ao equipamento, onde inicialmente será analisado o controlo do motor, seguido dos sinais elétricos a adquirir e possíveis soluções ao seu condicionamento, posteriormente será dimensionada uma fonte de alimentação para o sistema. Neste ponto ainda é apresentada as fases de desenvolvimento de uma placa eletrónica. Por fim é apresentada a montagem, otimização e validação do sistema de *hardware*.
- O quinto capítulo aborda o *software*/aplicação a ser desenvolvida para o equipamento, onde estará presente um fluxograma de forma a esquematizar as sequências algorítmicas programadas. Também será apresentado e descrito a interface de comunicação com o equipamento e todas as suas vertentes.
- Após desenvolvido todo o equipamento é feita a devida calibração do mesmo, abordando as diferentes partes isoladamente, tal como: a régua potenciométrica, as velocidades, a célula de carga e o sensor laser.
- No sétimo capítulo são abordados os testes de validação do equipamento, onde será descrito o protocolo de ensaio e será realizada uma análise aos resultados obtidos.
- Por fim, no capítulo oito é analisado todo o trabalho elaborado e retiradas as conclusões relativas ao mesmo.

## 2 Estado de arte

Neste capítulo são abordados fundamentos teóricos necessários para iniciar o desenvolvimento do projeto, bem como efetuar uma contextualização e familiarização dos conceitos, práticas e instrumentos indispensáveis para a conclusão do projeto.

Ao longo do capítulo é abordada a área tribológica, resumindo os seus conceitos e contextualização histórica, bem como aplicação destes conhecimentos científicos em materiais flexíveis. Ainda no âmbito da tribologia será apresentado alguns dos equipamentos tribológicos existentes nos laboratórios da Universidade do Minho.

Com a necessidade de desenvolver um sistema de processamento e aquisição de dados será analisada a sua constituição e processos de funcionamento, abordando algumas das suas variantes, como o *software* LabVIEW onde será desenvolvida a aplicação informática do sistema e o *hardwer* a implementar para a aquisição de dados e controlo do motor.

Numa última fase de estudo serão analisadas algumas aplicações eletrónicas, onde serão abordadas algumas configurações utilizando amplificadores operacionais (amplificador inversor e amplificador somador inversor) para ajudar a desenvolver um condicionador de sinal e também será retratada a constituição de uma fonte de alimentação bem como as etapas para o seu desenvolvimento.

### 2.1 Tribologia

O estudo da Tribologia, tendo em vista análise do desgaste e fadiga de superfícies em contato inerentes à compreensão do fenómeno de atrito, requer conhecimentos multidisciplinares adquiridos na física, na química, na mecânica e na ciência dos materiais com intuito de explicar e prever o comportamento de sistemas mecânicos.

A Tribologia é a ciência que estuda a interação das superfícies em movimento relativo, as interações resultantes do contato entre as interfaces proporcionam consequências nos materiais nomeadamente, o atrito e o desgaste. Durante o contato entre as interfaces ocorre a transmissão de forças, conversão de energia e a alteração das propriedades mecânicas e químicas incluindo alterações na topografia das superfícies que interagem (Bhushan, 1999) [1]. Compreender a natureza dessas interações e resolver os problemas associados aos fenómenos que ocorrem no contato das interfaces é a essência da Tribologia.

Com estudos desenvolvidos ao longo dos anos sobre os problemas em máquinas mostram que muitas falhas em diverso tipo de equipamentos está relacionado com os efeitos

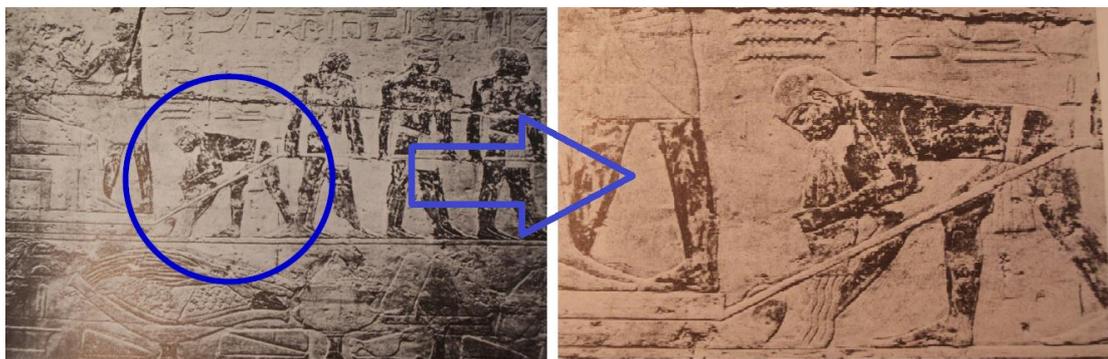
tribológicos exercidos nas superfícies em contacto. A importância económica da tribologia está no facto de que 30% da energia gerada na área industrial é dissipada em processos envolvendo o atrito [2].

### 2.1.1 História da tribologia

A palavra Tribologia foi referenciada pela primeira vez por H. Peter Jost (1966) durante a preparação de um relatório feito para o comité do departamento inglês de educação e ciência, derivada da palavra grega Tribos que significa fricção, e Logos, que significa estudo ou ciência. Neste relatório, o termo foi definido como a *ciência e tecnologia de superfícies interativas em movimento relativo e dos assuntos e praticas relacionados* [3]. Este estudo é considerado o marco de criação da tribologia.

Embora o termo Tribologia seja relativamente recente a aplicação e o interesse nas partes constituintes de Tribologia é mais antiga que a história gravada (Dowson, 1998) [1]. Algumas pinturas rupestres e descobertas arqueológicas testemunham a participação da tribologia na história da humanidade principalmente para a redução do atrito. Dowson fez uma cronologia detalhada da tribologia, definindo os acontecimentos políticos, sociais e desenvolvimentos técnicos gerais [2].

No período da idade da pedra o fogo era gerado pelo atrito de pedaços de madeira ou lascas de pedra. Na antiguidade, os egípcios usavam trenós para transportar uma enorme e pesada estátua. Na figura 2.1, pode ser observado sobre os pés da estátua um homem entornando líquido no caminho para reduzir o atrito e possibilitar o transporte da estátua.



**Figura 2.1 – Redução do atrito na antiguidade**

Após a renascença, Leonardo da Vinci (1452-1519), que pode ser considerado o pai da tribologia moderna, deu importantes contribuições para a interpretação dos fenómenos de atrito

e desgaste. Através de seus estudos, ele mediu forças de atrito em planos horizontais e inclinados, deduziu as leis que regem o movimento de um bloco retangular deslizando sobre uma superfície, onde demonstrou que as forças de atrito são dependentes da força normal ao deslocamento dos corpos e independente da área de contato aparente, introduziu o coeficiente de atrito como sendo proporcional à força normal, ver equação 2.1.

$$\mu = \frac{F_{\text{atrito}}}{N} \quad (2.1)$$

A figura 2.2 mostra os desenhos dos equipamentos desenvolvidos por da Vinci para determinar a força de atrito.

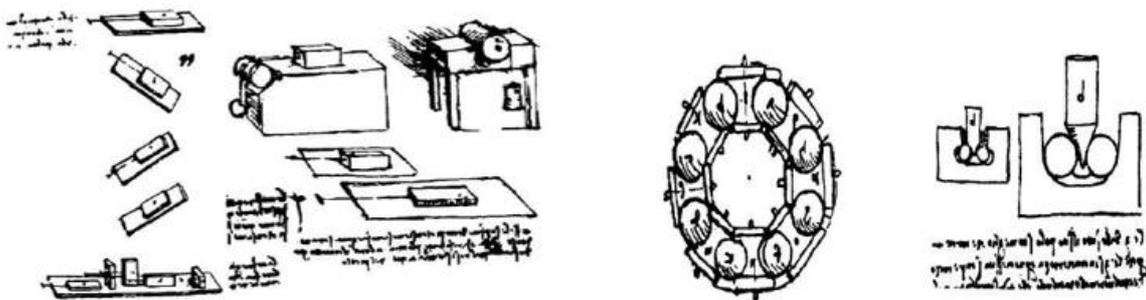


Figura 2.2 - Mecanismos de Da Vinci para quantificar a força de trito

Durante o século XVII, a crescente demanda por energia mecânica serviu como principal força motriz para desenvolver máquinas para a indústria de mineração, ou para moinhos de vento, em relação aos rolamentos de baixo atrito. Conseqüentemente, desenvolvimentos consideráveis foram alcançados na ciência de tribologia durante este século, por Hooke, Newton e Amontons.

Robert Hooke (1635-1703) investigou os processos que ocorriam durante o fenômeno de atrito, por exemplo, a dureza das rodas e a deformação da superfície, bem como a aderência entre a roda e o solo. Hooke apresentou uma sucessão de conceitos de *design* de rolamentos, selos, materiais e lubrificantes.

Em Dezembro de 1699 em Paris, Guillaume Amontons apresentou os detalhes dos seus resultados experimentais e interpretações relativas ao atrito e, conseqüentemente, definiu a primeira e segunda lei de atrito:

- Primeira Lei: A força de atrito é diretamente proporcional à carga aplicada.
- Segunda Lei: A força de atrito é independente da área de contato aparente.

Estas experiências de Amontons só vieram confirmar as teorias de Leonardo da Vinci que tinha relatado essencialmente os mesmos resultados 200 anos antes. Contudo, após estas demonstrações aplicadas nas experiências de Amontons, verificou-se um baixo interesse pelos estudos dos fenómenos tribológicos.

O período entre 1750 e 1850, com o estímulo pelo crescimento da indústria da guerra francesa e pelas rápidas mudanças tecnológicas ocorridas ao lado do desenvolvimento social e económico, surgiram os primeiros estudos matemáticos referentes aos fenómenos de atrito pelo engenheiro e físico francês Charles Augustin Coulomb, onde estabeleceu as leis básicas de atrito como reconheceu o papel da adesão na interação entre superfícies. Durante esta época foram utilizados diversos óleos vegetais e animais.

Entre 1850 e 1945, os estudos tribológicos foram caracterizados por muitos investigadores famosos à procura da sua compreensão. Osborne Reynolds publicou em 1886 trabalhos sobre hidrodinâmica, onde demonstrou que a pressão hidrodinâmica do líquido entre duas superfícies em movimento relativo é suficiente para evitar o contato entre as suas faces, quando sujeito a baixas velocidades. A partir destas experiências de Reynolds, surgiu muito maior interesse de outros investigadores relativamente aos fenómenos de interação das superfícies.

De 1950 até aos nossos dias, ocorreu uma consistente evolução dos conhecimentos sobre fenómenos tribológicos e suas aplicações, representando uma importante área de engenharia, nomeadamente em relação à eficiência de equipamentos e utilização de máquinas. Nesta época, 1950, Bowden e Tabor definiram a área de contato. Percebeu-se que a superfície em contato não é geometricamente perfeita, ou seja, a força normal aplicada é distribuída ao longo dos picos de asperezas sujeitas à deformação. Em 1966, o comité inglês do Departamento de Educação e Ciência, liderado por Peter Jost, produziu o Jost Report onde surgiu pela primeira vez o termo Tribologia, em conjunto com um reconhecimento mundial da importância do desgaste, lubrificação e atrito.

Na Alemanha, durante a década de 1970, a crise energética levou à criação de projetos que visam a poupança de energia através de atividades tribológicas. Durante a década de 1980, um reconhecimento da importância económica da tribologia foi complementada por uma consciência ecológica, com a primeira lubrificação biodegradável.

Ainda nos dias de hoje, em determinados casos, se torna bastante complexo evitar o contato entre superfícies em movimento relativo. Os fenômenos de atrito e desgaste continuam a ter uma elevada importância em quase todas aplicações de engenharia, de que resulta a grande necessidade de os quantificar, ou em última possibilidade controlá-los.

### **2.1.2 Tribologia aplicada a materiais flexíveis**

No campo da tribologia para materiais flexíveis as propriedades superficiais dos tecidos tem sido levadas cada vez mais em atenção, devido ao facto de serem maioritariamente utilizados para peças de vestuário, que por sua vez se encontram em permanente contato com a pele humana. Muitos cientistas têm investigado as propriedades das superfícies dos tecidos, tendo sido desenvolvidos instrumentos e procedimentos para a medição de fenômenos de atrito em materiais flexíveis. O mais reconhecido e fiável é o sistema KES (Kawabata Evaluation System) desenvolvido no Japão pelo professor Kawabata.

O sistema de avaliação de Kawabata (KES) é uma série de instrumentos utilizados para medir as propriedades dos materiais têxteis, permitindo a previsão das qualidades de conforto entendidas pelo toque humano. Os princípios científicos são aplicados na medição e interpretação das propriedades mecânicas relacionadas com a perceção do conforto. Com baixas forças aplicadas, tal como na manipulação dos tecidos, os instrumentos Kawabata definem o papel desempenhado pela tração, compressão, flexão, atrito superficial e rugosidade em sensações tácteis [4]. Este poder analítico, combinado com a capacidade de caracterizar a perda de energia em processos de deformação e recuperação mecânicos, fornece uma ferramenta inigualável para a análise de tecidos. O sistema KES fornece uma capacidade única, não só para prever a resposta humana, mas também para fornecer uma maior compreensão de como as variáveis de fibras, fios, construção de tecidos e acabamentos contribuem para a perceção de conforto [5].

De seguida serão explicados os procedimentos e equipamentos envolventes numa análise segundo o sistema KES. Este processo é constituído por quatro instrumentos, apresentados na tabela 2.1, para a investigação de seis aspetos característicos relacionados com o toque do tecido [6].

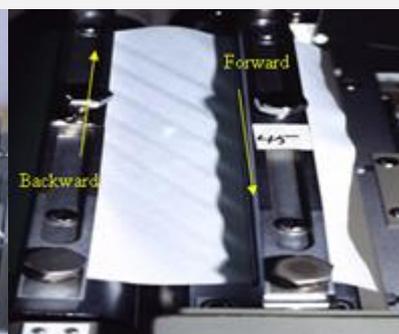
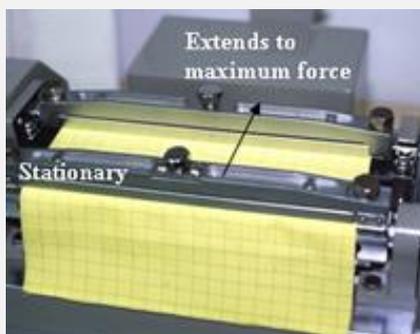
Tabela 2.1 - Sistema KES

**Equipamento**

**Propriedades**

Responsável pela medição das propriedades de tração e corte. No teste de tração (figura2.3) mede os parâmetros de tensão / deformação com uma carga máxima para o tipo de material a ser testado, enquanto no teste de corte (figura 2.4) é aplicada uma pré-tensão à amostra e duas forças opostas, paralelas ao tecido, medindo assim a tensão de corte.

**KES-FB1**

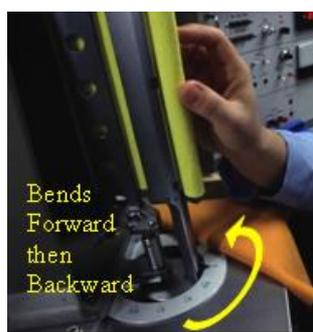


**Figura 2.3 - Teste à tração**

**Figura 2.4 - Teste ao corte tensão**

Responsável pela medição da flexão do material. Mede a força necessária para dobrar o tecido de teste, com uma rotação de 150 graus.

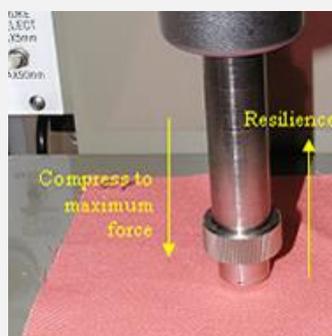
**KES-FB2**



**Figura 2.5 - Teste de flexão**

Responsável pela medição das propriedades de compressão. Mede a compressão da amostra (figura 2.6) por meio de uma força apropriada para cada tipo de tecido.

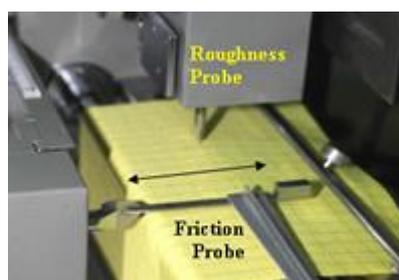
**KES-FB3**



**Figura 2.6 - Teste à compressão**

Responsável pela medição das propriedades tribológicas, atrito e rugosidade superficial (figura 2.7)

**KES-FB4**



**Figura 2.7 - Teste às propriedades tribológicas**

Com base nos equipamentos do sistema KES, surge o grande objetivo de desenvolver um único equipamento capaz de englobar todas estas funcionalidades; com este intuito foram desenvolvidos diversos equipamentos.

## **2.2 Equipamentos existentes**

O tribómetro é um equipamento com elevada importância nos dias de hoje, tendo-lhe sido dada a devida atenção quando se deparou com a necessidade de melhorar as suas funcionalidades e adquirir resultados cada vez mais fiáveis. É um instrumento versátil para medição de propriedades tribológicas, coeficiente de atrito e desgaste, tendo o objetivo de adquirir informação necessária para interpretar a topografia da superfície do material. Com o intuito de adquirir conhecimentos relativos a equipamentos existentes no mercado, procedeu-se a uma pesquisa e análise de equipamentos e suas funcionalidades.

Alguns dos equipamentos pesquisados podem ser encontrados no laboratório de Órgãos de Máquinas e Tribologia do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade do Minho, tais como:

- **Tribómetro Bruker UMT-2** permite realizar ensaios de atrito e desgaste de deslizamento na ausência e na presença de lubrificação (ver figura 2.8). É um dos mais recentes e modernos equipamentos, possuindo as seguintes características:
  - Geometria de teste: pino-disco ou pino-placa;
  - Movimento: Circular contínuo ou linear alternativo;
  - Testes à escala de macrotribologia:  $0.5 \leq N \leq 150$  N,  $0.1 \leq v \leq 3.5$  m/s,  $22^\circ\text{C} \leq T \leq 200^\circ\text{C}$ ;
  - Testes à escala de microtribologia:  $1 \text{ mN} \leq N \leq 0.1$  N,  $0.1 \leq v \leq 3.5$  m/s,  $22^\circ\text{C} \leq T \leq 200^\circ\text{C}$ ;



Figura 2.8 - Tribómetro Bruker UMT-2

- **Tribómetro PLINT TE 67/R** permite realizar ensaios de atrito e desgaste na ausência e na presença de lubrificação (ver figura 2.9). Este equipamento tem a particularidade de se utilizar para cargas mais reduzidas pesos e para cargas mais elevadas um sistema hidráulico. Possui as seguintes características:
  - Geometria de teste: pino-disco ou pino-placa;
  - Movimento: Circular contínuo ou linear alternativo;
  - Gama de funcionamento:  $3 \leq N \leq 1000$  N,  $0.1 \leq v \leq 3.5$  m/s,  $22^\circ\text{C} \leq T \leq 750^\circ\text{C}$
  - Pino ou esfera:  $\varnothing_{\text{max}} = 10$  mm; Disco:  $30 \leq \varnothing \leq 80$  mm, espessura = 5 a 15 mm
  - Placa: 60 x 40 x 4 mm.



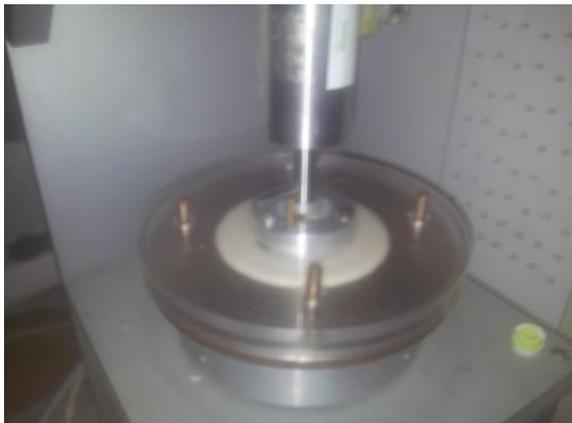
Figura 2.9 - Tribómetro PLINT TE 67/R

- **Tribómetros Pino-Disco invertido**, tem a particularidade de possuir a placa por cima do pino. Esta configuração exerce a vantagem de derramar as partículas formadas no decorrer do ensaio por meio da força gravítica, não influenciando desta forma os resultados pretendidos. Permite a realização de ensaios de atrito e desgaste de deslizamento na ausência e na presença de lubrificação. A figura 2.10 mostra uma vista geral do equipamento que possui as seguintes características:
  - $F_{max} = 100 \text{ N}$ ,  $v_{max} = 3 \text{ m/s}$ , temperatura ambiente;
  - Geometria de teste: pino-disco;
  - Movimento: circular contínuo;
  - Pino:  $\varnothing \text{ max} = 10 \text{ mm}$ , comprimento máximo = 15 mm;
  - Disco:  $\varnothing = 30 \text{ a } 80 \text{ mm}$ , espessura = 5 a 12 mm;



Figura 2.10 - Tribómetro Pino-Disco invertido

- **FricTorq** – é um equipamento desenvolvido na Universidade do Minho, capaz de realizar ensaios no âmbito laboratorial para a medição do coeficiente de atrito de tecidos que possa ser utilizado para a sua caracterização objetiva. Possui um princípio de funcionamento baseado numa atuação rotativa e, conseqüentemente, na medição de um binário reativo gerado pelo movimento de arrasto entre dois corpos. Este equipamento é constituído por um sensor de binário de precisão reativo, um motor de corrente contínua com um redutor de engrenagens e uma corrente dentada para acionar o prato de suporte da amostra inferior e uma aplicação informática que faz a gestão e o controlo de todo o sistema [7]. Na figura 2.11 encontra-se uma vista geral do equipamento com as seguintes características:
  - Pressão de contacto = 2,9 kPa,  $V_{max} = 1,77$  m/s;
  - Geometria de teste: pino-disco;
  - Movimento: circular contínuo;



**Figura 2.11 - FricTORQ**

### 2.2.1 Análise dos equipamentos

Analisando os equipamentos anteriormente referidos encontram-se semelhanças no método de funcionamento, podendo funcionar através de dois métodos distintos, sendo eles o método linear e o método rotativo. De seguida serão abordados este dois métodos em maior detalhe.

## Método rotativo

O método rotativo consiste em utilizar dois corpos com superfícies planas, sendo um com superfície contínua e outro com geometria anelar (ver figura 2.12). Neste último, é aplicado um movimento rotativo segundo seu eixo central, perpendicular à superfície plana, sob a ação de uma determinada força normal,  $P$ . Por meio do contacto existente entre os dois corpos, em movimento relativo, resulta uma pressão de contacto,  $p$ .

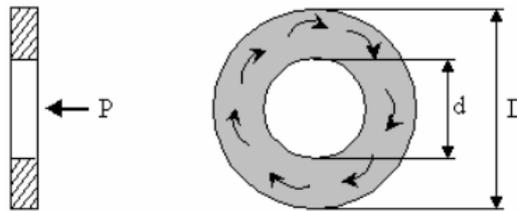


Figura 2.12 - Corpo de geometria anelar

Há assim dois corpos: um corpo fixo e outro rotativo, sendo o corpo de configuração anelar colocado em movimento de rotação, relativamente ao outro, com uma velocidade angular muito baixa e constante. O coeficiente de atrito é então proporcional ao valor do binário exercido na rotação com o segundo corpo [7].

A pressão de contacto entre os dois corpos é constante, sendo dada pelo peso do próprio corpo e pela área de contacto. Neste modelo, o binário  $T$  é dado pela equação 2.2:

$$T = 2 \cdot \pi \cdot \mu \cdot \int_{d/2}^{D/2} p \cdot r^2 \quad (2.2)$$

Onde

- $T$  – Binário ( $N \cdot m$ )
- $\mu$  - Coeficiente de atrito
- $D$  – Diâmetro externo (mm)
- $d$  – Diâmetro interno (mm)
- $p$  – pressão de contacto ( $N/m^2$ )
- $r$  – Raio (mm)

A pressão de contacto ( $p$ ) é determinada pela seguinte equação 2.3:

$$p = \frac{P}{A} = \frac{4 \cdot P}{\pi \cdot (D^2 - d^2)} \quad (2.3)$$

Logo, o coeficiente de atrito é calculado pela seguinte equação 2.4:

$$\mu = \frac{3 \cdot T}{P} \cdot \frac{D^2 - d^2}{D^3 - d^3} \quad (2.4)$$

### Método Linear

O método linear baseia-se segundo a lei de Amontons, fundamento teórico mais antigo da tribologia. A partir deste método ocorreu o desenvolvimento do sistema KES [8]. Consiste no deslizamento de um apalpador, mobilizado numa direção linear, ao longo de uma amostra. Este movimento exercido no apalpador irá provocar o surgimento de uma força de atrito entre o mesmo e a amostra. Podendo ser determinado posteriormente o coeficiente de atrito a partir da razão entre a força normal aplicada e a força de atrito adquirida, equação 2.1.

Na figura 2.13 encontra-se esquematizado o método linear descrito anteriormente.

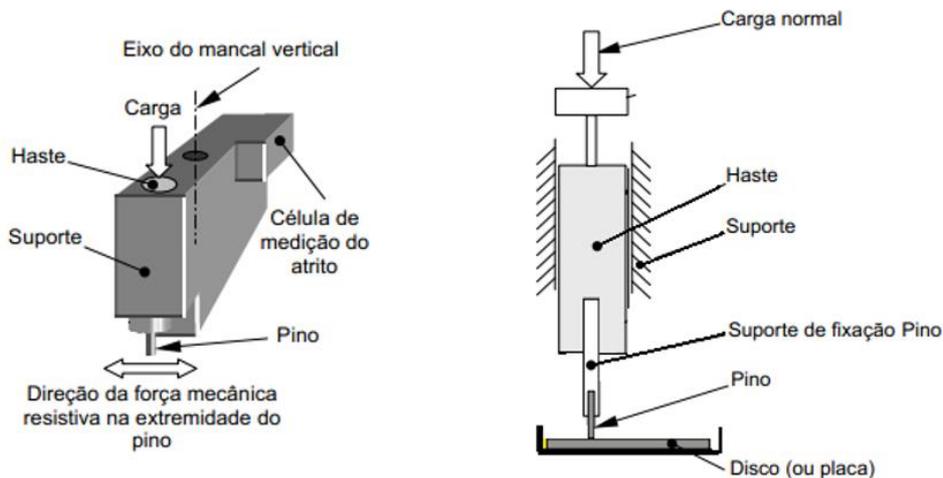


Figura 2.13 - Método linear

Na imagem, pode-se reparar que existe uma força vertical exercida por uma carga normal, uma célula de carga para a aquisição dos valores da força de atrito e encontra-se representada a direção do movimento linear segundo a haste se irá orientar.

## 2.3 Sistema de processamento e aquisição de dados

Um sistema de processamento e aquisição de dados (*Data Acquisition, DAQ*) é fundamental nos dias de hoje, vindo a ser desenvolvido para diferentes áreas de atuação, tanto industriais como científicas. Em vista geral, um sistema DAQ faz a ligação entre os sinais provenientes de sensores com uma unidade que processa e armazena a informação, sendo enviada posteriormente para um computador, por outro lado também terá a capacidade de realizar o controlo de atuadores com ordens inseridas no *software* do computador. A constituição deste sistema, bem como a sua organização, encontra-se esquematizada na figura 2.14.

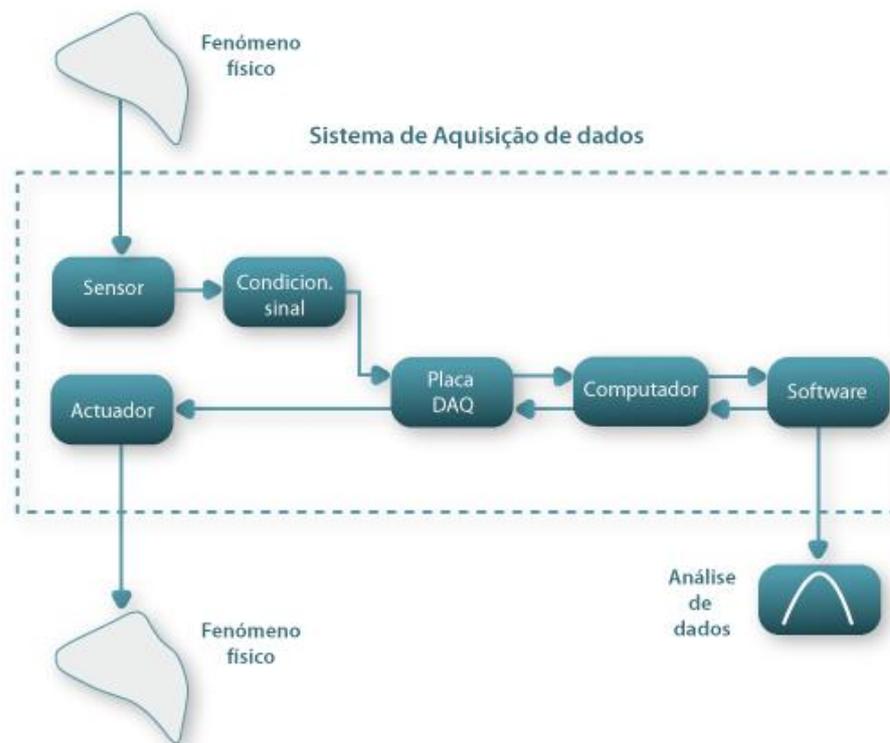


Figura 2.14 - Esquematização de um sistema DAQ

Os sistemas de aquisição/controlo realizam comunicação com a placa DAQ por via de sinais elétricos, na forma analógica (sinais em tensão ou corrente com variação contínua ao longo do tempo) ou digitais (sinais discretos, que assumem apenas dois valores). Assim, da interpretação de grandezas físicas por intermédio de sensores e/ou transdutores provém sinais elétricos que serão conduzidos para a placa DAQ, esta, por sua vez irá converter estes sinais analógicos numa codificação digital, por intermédio de um conversor analógico-digital,

podendo desta forma, serem enviados posteriormente para o computador onde encontrará o *software* definido para a monitorização, processamento e armazenamento de informação. [9]

### 2.3.1 *Software* LabVIEW

A ferramenta informática *LabVIEW* é um *software* da *National Instruments* desenvolvido para aplicações em engenharia. Com a sua sintaxe de programação gráfica, que torna simples visualizar, criar e desenvolver códigos para sistemas de engenharia.

O *LabVIEW* oferece uma ampla variedade de recursos e ferramentas, desde assistentes interativos a interfaces configuráveis definidas pelo usuário. Entretanto, a grande diferenciação deste *software* para outros é sua linguagem de programação gráfica (conhecida como G). A programação em G é feita pela conexão entre ícones gráficos através de fios num diagrama, que é então compilado diretamente em código de máquina para ser executado pelos processadores do computador. Apesar de baseada em representação gráfica em vez de textual, a linguagem G tem os mesmos conceitos de programação encontrados na maior parte das linguagens tradicionais. Por exemplo, a linguagem G possui todas as funções padrão, como tipos de dados, ciclos, tratamento de eventos, variáveis, recursão e programação orientada a objeto.

Uma característica relevante nesta ferramenta informática é a ampla coleção de controladores e indicadores disponíveis para desenvolver a melhor interface do usuário para a sua aplicação específica. Com uma interface de usuário flexível os operadores podem alterar parâmetros, visualizar dados em tempo real e ter os seus resultados analisados em menos tempo do que nos ambientes de programação tradicional.

A capacidade de analisar, interpretar e manipular dados é fundamental em muitas aplicações da engenharia, tais como, em medição e controle. O *software* LabVIEW oferece uma solução integrada, que permite a aquisição e análise de dados em simultâneo, possuindo uma ampla gama de funções matemáticas e de processamento de sinais, mais de 850 funções, tais como: probabilidade e estatística, álgebra linear, ajuste de curvas, 34 filtros, análise espectral, entre outras [10]. Estas bibliotecas podem ser configuradas para satisfazer muitas das necessidades de análise mais comuns aos utilizadores.

O *software* LabVIEW foi criado para todo o processo de engenharia, integrando funções capazes de guardar dados em disco e criar relatórios profissionais com facilidade. Assim, por meio de funções existentes no programa é possível guardar os dados recolhidos durante um teste ou medição.

### 2.3.2 Hardware a implementar

O *hardware* de um equipamento é fundamental para garantir um bom funcionamento do mesmo. O desempenho de um equipamento pode variar conforme o tipo de *hardware* que seja implementado, a capacidade de resposta aos comandos exigidos, a incerteza na aquisição de valores são fatores que podem prejudicar o desempenho e qualidade do sistema. Mesmo com um bom algoritmo, por si só não é o suficiente para garantir um bom funcionamento do equipamento.

Contudo, bom *hardware* requer um maior investimento no equipamento, desta forma serão pesquisados diferentes *hardwares* com o intuito de escolher um que não comprometa o funcionamento do equipamento, mas por outro lado que não eleve em demasia o valor económico do equipamento.

#### Placa National Instruments

As placas de aquisição de dados da *National Instruments* possuem ótimas capacidades para medições de alta precisão, oferecem diversas opções de conexão entre o *software* e o hardware, tais como: USB, PCI, PCI Express, Ethernet e WiFi. Com estas placas e recorrendo ao driver DAQmx é possível uma fácil configuração da temporização e sincronização nas linguagens LabVIEW, C/C++ e .NET, permitindo uma maior versatilidade nos *softwares* a utilizar [10].

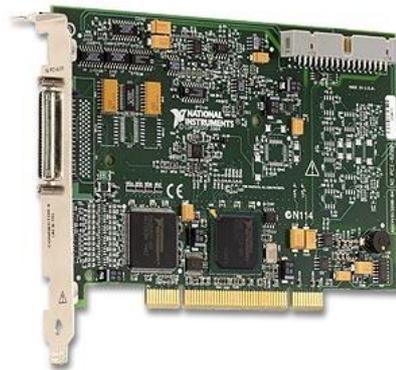
Esta plataforma possui numerosas placas de aquisição de dados, de seguida serão abordadas as que mais interessam no desenvolvimento do projeto:

- **NI USB 6009** – Esta placa é designada pela *National Instruments* como uma placa de aquisição de dados de baixo custo. Oferece funções básicas de aquisição de dados para aplicações simples, tendo a particularidade de ser portátil devido à sua capacidade de desintegração e realiza conexão com o *software* via USB, apresenta-se na figura 2.15. Possui as seguintes especificações técnicas:
  - 8 Entradas analógicas (14 bits, 48 kS/s);
  - 2 Saídas analógicas (12 bits, 150 S/s);
  - 12 Entradas/saídas digitais;
  - Contadores de 32 bits;



**Figura 2.15 - Placa NI USB 6009**

- **NI PCI-6220** – É uma placa multifuncional de aquisição de dados de baixo custo da série M, onde oferece alguns recursos avançados, como um controlador de sistema NI-STC 2, amplificador programável NI-PGIA 2 e a tecnologia de calibração NI-MCal, que proporciona maior desempenho e exatidão. Possui certificados de calibração e mais de 70 opções de condicionamento de sinais. Esta placa possui uma conexão via PCI, tornando o sistema fixo uma vez que obriga à utilização de um computador fixo, apresenta-se na figura 2.16. Possui as seguintes especificações técnicas:
  - 16 Entradas analógicas (16 bits, 250 KS/s);
  - 24 Entradas/saídas digitais;
  - Contadores de 32 bits.



**Figura 2.16 - Placa NI PCI-6220**

- **NI PCI 6251** – É uma placa de multifuncional de aquisição de dados de alta velocidade da série M. Possui a mesma tecnologia da placa de aquisição NI PCI-6220, como os sistemas NI-STC 2, NI-PGIA 2 e NI-MCal. A diferença encontra-se na velocidade de

aquisição, sendo esta superior, a possibilidade de conectar sensores via USB e a existência de canais de saída analógicos, apresenta-se na figura 2.17. Possui as seguintes especificações técnicas:

- 16 Entradas analógicas (16 bits, leitura de 1 canal a 1.25 MS/s, leitura de vários canais a 1 MS/s);
- 2 Saídas analógicas (16 bits, 1 canal a 2.86 MS/s, 2 canais a 2.00 MS/s);
- 24 Entradas/saídas digitais.



**Figura 2.17 - Placa NI PCI 6251**

- **DAQPad 6015** – Esta placa foi desenvolvida para aplicações móveis ou com limitações de espaço, possuindo desta forma conexão via USB. Ideal para um elevado número de aplicações onde a portabilidade e as medições precisas são essenciais, apresenta-se na figura 2.18. Possui as seguintes especificações técnicas:

- 16 Entradas analógicas (16 bits, 200 KS/s);
- 2 Saídas analógicas (16 bits, 300S/s)
- 8 Entradas/saídas digitais;
- 2 Contadores/temporizadores.



**Figura 2.18- Placa DAQPad 6015**

## Placa Arduino

O Arduino é uma plataforma de programação de código aberto baseado em *hardware* e *software*. Placas Arduino são capazes de ler sinais de entrada analógicos, através de um conversor transforma o sinal analógico para digital, onde posteriormente será processado e eventualmente transformado em uma saída. O processamento é realizado através de um microprocessador, onde processa a informação e por meio de um conjunto de instruções, código de programação.

Esta plataforma nasceu no *Interaction Design Institute Ivrea* e graças à sua utilização simples e acessível, nos dias de hoje, tem sido utilizada para diversos projetos e aplicações. Possui a vantagem de ser barata quando comparadas com outras plataformas microcontroladoras, ambiente de programação simples, o *software* Arduino é publicado como uma ferramenta de código aberto e com possibilidade de ser expandido para outras plataformas [11].

No desenvolvimento deste projeto será utilizado o Arduino Mega 2560, apresenta-se na figura 2.19, é uma placa de microcontrolador baseado no ATmega2560. Especificações técnicas:

- 54 Pinos digitais de entrada / saída (dos quais 14 podem ser usados como saídas PWM);
- 16 Entradas analógicas (8 bits, 200 S/s);
- 1 Cristal oscilador de 16 MHz.



**Figura 2.19 - Placa Arduino Mega 2560**

Contudo, esta placa não é o suficiente para realizar a comunicação com o *software* LabVIEW. A comunicação entre o *software* e as placas da *National Instruments* é direta uma vez que estas foram desenvolvidas para essa ferramenta informática em especial. No caso da placa de Arduino é necessário a existência de uma interface capaz de realizar a comunicação com outras plataformas e, sendo esta, uma plataforma de código aberto é possível desenvolver uma linha de código capaz de realizar essa mesma comunicação. Para esse efeito será utilizado

uma interface desenvolvida por colaboradores da *National Instruments*, designada de Linx. Com este *kit* de ferramentas e o software NI LabVIEW é possível controlar e adquirir dados a partir de outras plataformas comuns, tais como, cipKIT, Arduino, NI Myrio, bem como sensores comuns, incluído acelerómetro, sensores de temperatura e sensores de ultrassom à distância.

A comunicação é realizada através de um *firmware* fornecido pelo *kit* Linx, uma vez que a informação se encontra no LabVIEW é possível realizar um algoritmo utilizando todas as potencialidades do *software* bem como as suas bibliotecas. Este *kit* ainda fornece uma biblioteca, de código aberto, com diversos algoritmos pré-programados, tais como, controlo de servo motor através de sinal PWM, leitura e envio de valores digitais e analógicos.

### 2.3.3 Comparação entre as placas analisadas

Tendo em conta as necessidades para desenvolver o projeto foi realizada uma tabela de valor com o intuito de definir a placa a ser implementar. A tabela de valor foi construída com base nos parâmetros exigidos pelo sistema, sendo estes:

- 3 Entradas analógicas;
- 2 Entradas digitais;
- 2 Saídas Digitais;
- 1 Saída com sinal PWM.

Além destes parâmetros principais será analisado a resolução de leitura da placa, a velocidade de aquisição, o tipo de conexão entre o *software* e a placa e por fim o preço de cada placa. Para realizar esta análise foi construída uma tabela de valor apresentada na tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Tabela de valor aplicada nas placas DAQ

	NI USB 6009	NI PCI 6220	NI PCI 6251	DAQPad 6015	Arduíno
<b>Nº de canais de entrada analógicos</b>	8	16	16	16	16
<b>Nº de canais de saída analógicas</b>	2	-	2	2	-
<b>Nº de canais entrada/saídas digitais</b>	12	24	24	8	54
<b>Sinal PWM</b>	-	-	-	✓	✓
<b>Resolução de leitura (bit)</b>	14	16	16	16	8
<b>Velocidade de aquisição</b>	48 KS/s	250 KS/s	1MS/s	200 KS/s	200 S/s
<b>Conexão via USB</b>	✓	-	-	✓	✓
<b>Preço (€)</b>	315	605	1310	2210	42

Analisando a tabela de valor com base nos parâmetros anteriormente exigidos pode-se excluir desde já as três primeiras placas, NI USB 6009, NI PCI 6220 e NI PCI 6251. Devido a estas não possuírem capacidade de emitir sinais PWM, sinal digital de alta frequência responsável pela velocidade do motor DC. Desta forma. Resta a placa da *National Instruments* DAQPad 6015 e a placa de Arduíno, ambas respeitam as exigências relativas ao número de canais digitais e analógicos impostos para o desenvolvimento do projeto, contudo estas duas placas diferenciam-se principalmente no que diz respeito às especificações técnicas, na resolução de leitura de amostras e na velocidade de aquisição de dados, com a vantagem a decair sobre a placa da *National Instruments*. Esta vantagem aqui referida é o fator mais

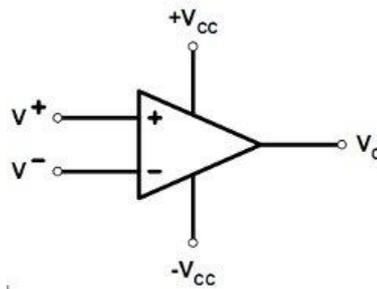
importante quando se fala num sistema de aquisição de dados, principalmente quando se pretende adquirir valores numa gama de resolução muito elevada. Contudo, para o projeto em questão os valores fornecidos pela placa de Arduíno satisfazem as exigências pretendidas e tendo em atenção o fator económico, a placa de Arduíno é aproximadamente 52 vezes mais barata que a DAQPad 6015, é muito mais satisfatório para o projeto a implementação da placa de Arduíno no sistema de aquisição de dados e controlo do motor.

## 2.4 Aplicações eletrónicas

A área de eletrónica é uma das bases de desenvolvimento de um sistema mecatrónico, sendo portanto indispensável a sua abordagem no decorrer deste projeto. A eletrónica é a ciência que estuda e desenvolve circuitos constituídos por componentes elétricos e eletrónicos, com o objetivo de representar, armazenar e processar informações, controlando processos e servo mecanismos [12]. No decorrer do projeto será necessário conceber uma parte do sistema de *hardware* para realizar o condicionamento de sinal e alimentação dos componentes existente no tribómetro linear, para tal, serão explicados alguns componentes eletrónicos utilizados, além das suas configurações específicas que serão desenvolvidas para o desenrolar deste projeto. De seguida, serão abordados amplificadores operacionais, bem como algumas das suas configurações necessárias e por fim será analisado o desenvolvimento de uma fonte de alimentação através de etapas sucessivas.

### 2.4.1 Amplificador operacional

O amplificador operacional é uma fonte de tensão controlada cuja saída é proporcional à diferença de tensão entre as suas entradas, é um circuito analógico muito utilizado atualmente. De notar, que existem duas tensões de alimentação ( $-V_{CC}$ ,  $+V_{CC}$ ), as quais devem ser simétricas e em geral operam com 15 V (valor em módulo). Como existe uma variável de potência por parte do conjunto de transístores, é importante que a tensão seja estabilizada através do acoplamento de condensadores. As suas principais características são o elevado ganho diferencial, a alta taxa de rejeição de sinais de modo comum, impedância de entrada infinita e impedância de saída nula [12]. Na figura 2.20 encontra-se a representação de um amplificador operacional.



**Figura 2.20 - Símbolo de um amplificador operacional**

Todos são representados por um triângulo, com duas entradas e uma saída, não sendo desenhada a alimentação em geral nos esquemas. Uma das entradas é inversora ( $v^-$ ) e a outra é não inversora ( $v^+$ ). A tensão de saída é dada pela seguinte equação:

$$v_0 = (v^+ - v^-) \cdot K \quad (2.5)$$

Onde  $K$  é o ganho diferencial do amp. op. e  $v^+$  e  $v^-$  são as suas entradas.

Se o ganho diferencial tende para infinito, isto é igual a dizer que  $v^+ = v^-$ , e esta relação é válida, quando o amplificador operacional está a trabalhar na região linear. Isto, significa que existe uma realimentação negativa ou que a diferença entre as tensões de entrada é tão pequena, que não ocorre a saturação. Sempre que o amp. op. estiver saturado (saída igual a tensão de alimentação), esta regra não pode ser aplicada, pois a equação 4.4 não é mais válida [13] [14]. Desta forma, a saída do amplificador operacional,  $v_0$ , fica limitada aos valores de tensão fornecidos à alimentação,  $v_0 \in [-V_{CC}, +V_{CC}]$ , esta condição influência todo o sistema a adotar devido ao intervalo máximo de funcionamento na zona estável,  $[-15,15]$  V.

O amplificador operacional possui diversas possibilidades de configuração permitindo realizar diferentes operações, entre as quais se destaca:

- Controlo de processos;
- Amplificação;
- Regulação de sistemas;
- Operações lineares e não lineares;
- Filtragem.

No desenvolvimento deste projeto será utilizada uma configuração de amplificação e outra de operações lineares, estas aplicações serão descritas de seguida.

## Amplificador inversor

O amplificador inversor é uma configuração específica, onde amp. op. é capaz de inverter a polarização de um sinal e aplicar um determinado ganho definido pela relação das resistências aplicadas. Este circuito encontra-se apresentado na figura 2.21.

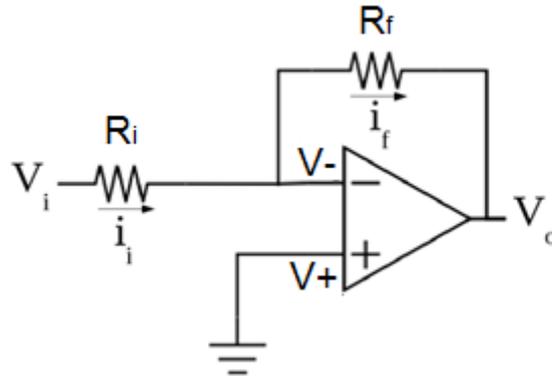


Figura 2.21 - Configuração do amplificador inversor

Esta montagem é utilizada para amplificar/reduzir um sinal. O sinal de entrada é multiplicado por um ganho (negativo), pelo que a polaridade é invertida. O circuito é composto por um amplificador operacional em que a saída se encontra ligada à entrada inversora (V-) por intermédio de uma resistência  $R_f$  e o sinal de entrada ( $V_i$ ) encontra-se ligado a esta mesma entrada por uma resistência  $R_i$ , o terminal não inversor ( $V_+$ ) encontra-se ligado à massa.

Neste caso, considerando o amp. op. como sendo ideal, basta equacionar uma única corrente fluindo através de  $R_i$  e  $R_f$ , tendo em consideração que o potencial na entrada negativa é igual ao potencial na entrada positiva (neste caso igual a zero) [12].

Como  $i_i = \frac{V_i - V_-}{R_i}$ ,  $i_f = \frac{V_- - V_o}{R_f}$  e desde que se tenha em relevo a igualdade referida anteriormente, onde se obtém a relação presente na equação 2.6:

$$i_i = i_f \Leftrightarrow \frac{V_i - V_-}{R_i} = \frac{V_- - V_o}{R_f} \quad (2.6)$$

Como  $V_-$  tem de ser muito próxima de zero. Assim:

$$\frac{V_i}{R_i} = \frac{-V_o}{R_f} \Leftrightarrow V_o = -\frac{R_f}{R_i} V_i \quad (2.7)$$

Através da equação 2.7 temos:

$$K(0 - V_-) = V_o \Rightarrow K = -\frac{R_f}{R_i} \quad (2.8)$$

Partindo da relação encontrada na equação 2.8 torna-se fácil controlar o ganho que se pretende aplicar, sendo unicamente necessário relacionar as resistências envolvidas para ajustar o ganho final.

### Amplificador somador inversor

A utilização desta configuração tem como objetivo somar tensões e caso se pretenda também é possível aplicar um ganho ao somatório realizado. Esta montagem pode ser consultada na figura 2.22.

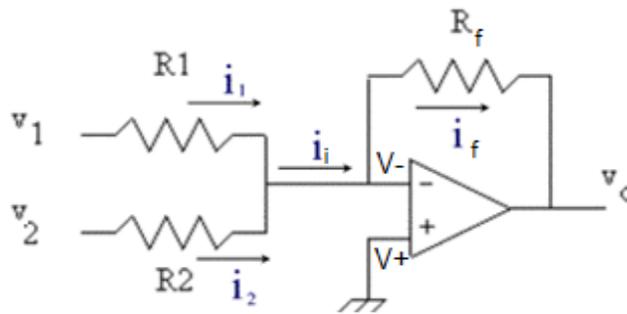


Figura 2.22 - Configuração amplificador somador inversor

Este circuito rege-se pelo mesmo princípio de funcionamento que o amplificador inversor, com a diferença de ter vários ramos na entrada inversora o que faz chegar diferentes correntes,  $i_1$  e  $i_2$ . Isto implica a necessidade de realizar um somatório das referidas correntes antes de se proceder à igualdade referida na equação 2.6 [12], desta forma o valor da corrente na entrada inversora,  $i_i$ , será definido pela equação 2.9:

$$i_i = i_1 + i_2 \Leftrightarrow i_i = \frac{V_1 - V_-}{R_1} + \frac{V_2 - V_-}{R_2} \quad (2.9)$$

Seguindo o mesmo raciocínio realizado para o amplificador inversor, obtém-se a equação 2.10:

$$V_o = -R_f \left( \frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} \right) \quad (2.10)$$

Caso não se pretenda aplicar um ganho ao circuito, realizando somente o somatório, serão utilizadas resistências de igual valor,  $R_f = R_1 = R_2$ , desta dedução resulta equação 2.11:

$$V_o = - (V_1 + V_2) \quad (2.11)$$

Desta forma, é possível realizar o somatório de diversas tensões com um ganho unitário, de notar que a tensão de saída, como no caso do amplificador inversor, terá a polarização invertida.

#### 2.4.2 Fonte de alimentação

As fontes de alimentação são um componente muito importante em quase todos os equipamentos, tendo o objetivo de transformar a tensão fornecida de energia elétrica, 220 V em corrente alternada (AC), numa tensão de corrente contínua (DC) que permita os equipamentos funcionarem.

A conversão de corrente alternada exige a realização de vários processos sequenciais até adquirir corrente contínua, na figura 2.23 encontra-se o condicionamento de sinal ao longo destas etapas representadas num diagrama de blocos juntamente com o condicionamento das formas de onda em cada etapa do seu processo.

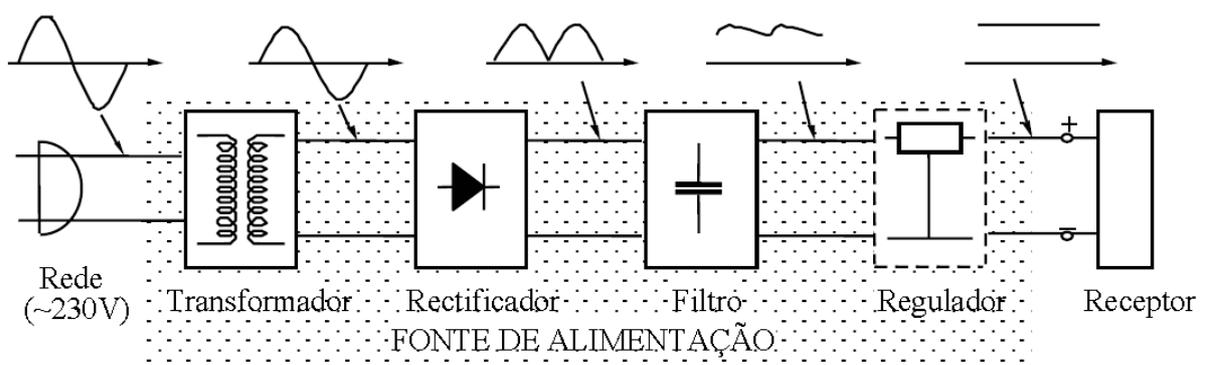
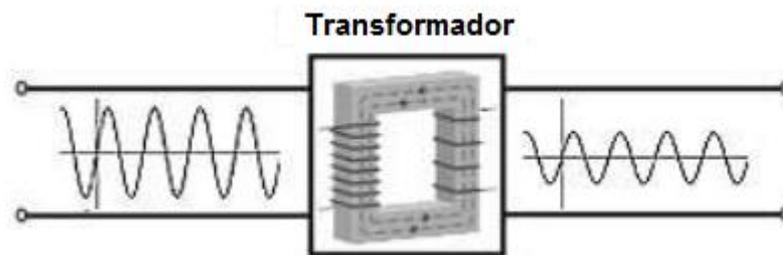


Figura 2.23 - Diagrama de blocos de uma fonte de alimentação para corrente contínua

Desta forma, um projeto de uma fonte linear pretende garantir que o sinal na saída apresente uma tensão contínua pré-determinada, independentemente da corrente de saída, de variações de temperatura ambiental ou distúrbios na tensão da rede alternada de alimentação. De seguida, serão desenvolvidas as diferentes fases responsáveis pela transformação da energia elétrica, fornecida pela rede, através de processos específicos realizados por cada bloco.

O transformador é um dispositivo que converte uma corrente alternada sinusoidal, com uma determinada tensão, numa corrente elétrica sinusoidal de menor tensão, sendo esta transformação realizada por intermédio de um fluxo magnético produzido pelo acoplamento de dois enrolamentos, como se pode verificar na figura 2.24.



**Figura 2.24 - Processo desenrolado no transformador**

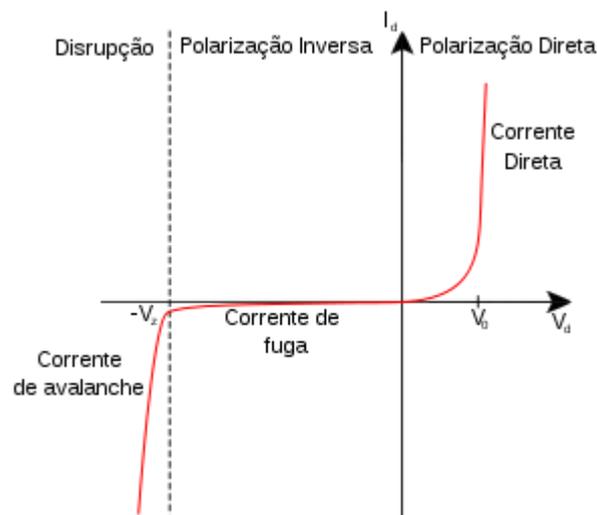
Quando uma corrente alternada é ligada na entrada do transformador, enrolamento primário, é produzido um campo magnético que é proporcional ao número de voltas do fio enrolado no metal e à intensidade da corrente aplicada, por sua vez, o fluxo magnético produzido é conduzido através do metal, normalmente aço laminado, até à saída do transformador, enrolamento secundário. Neste ponto, por indução eletromagnética, cria-se uma corrente elétrica dependente da corrente do enrolamento primário e do número de espiras dos dois enrolamentos, adquirindo-se um novo valor de tensão [15]. Assim, a tensão final estará dependente de uma relação existente entre os dois enrolamentos, consultar equação 2.12.

$$\text{Relação de transformação} = \frac{V_p}{V_s} = \frac{N_p}{N_s} \quad (2.12)$$

Onde:

- $V_p$  – Tensão no enrolamento primário;
- $V_s$  – Tensão no enrolamento secundário;
- $N_p$  – Número de espiras no enrolamento primário;
- $N_s$  – Número de espiras no enrolamento secundário.

Os circuitos retificadores são circuitos eletrônicos desenvolvidos para converter corrente alternada (AC) em contínua (DC), para este processo são utilizados componentes semicondutores, tais como, os díodos e os tirístores [15]. Os mais utilizados para este efeito são os díodos, sendo este um componente não linear que permite a passagem de corrente num sentido e impede a passagem de corrente no sentido contrário, funcionando como um interruptor automático. Para melhor interpretação deste fenômeno encontra-se na figura 2.25 o gráfico que representa a curva característica do comportamento do díodo na sua polarização direta e inversa.



**Figura 2.25 - Curva característica do comportamento de um díodo**

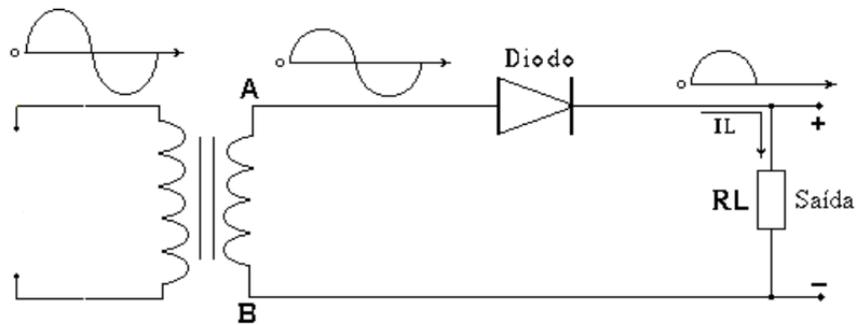
Analisando o gráfico real, uma vez que os díodos fabricados não são ideais, a condução de corrente elétrica no díodo (polarização direta) sofre uma resistência menor que  $1 \Omega$ , podendo ser considerada desprezável. Contudo, neste estado ocorre uma queda de tensão de, aproximadamente,  $0.7 \text{ V}$  (caso do Silício) e  $0.3 \text{ V}$  (caso do germânio), valor indicado no gráfico pela variável  $V_0$ .

Quanto ao bloqueio da corrente elétrica no díodo (polarização inversa) não é total, devido à presença de impurezas acaba por transitar uma pequena corrente na ordem dos  $\mu\text{A}$ , denominada corrente de fuga e podendo ser considerada desprezável [16].

Para desenvolver um circuito retificador existem vários tipos de retificadores e métodos complexos para seu projeto e construção, onde os mais simples são os retificadores de meia onda, onda completa utilizando transformador de derivação central (*tap center*) e onda completa em ponte.

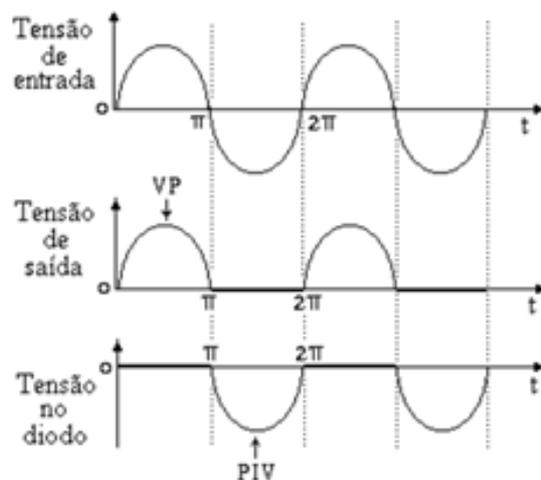
O retificador de meia onda é constituído por um único díodo que permite a passagem parcial do sinal proveniente do transformador, ou seja, autoriza a passagem do semiciclo

positivo do sinal caso o diodo esteja diretamente polarizado, de outra forma, passará o semiciclo negativo do sinal caso esteja inversamente polarizado [17]. Na figura 2.26 encontra-se o circuito de um retificador de meia onda com o diodo diretamente polarizado.



**Figura 2.26 - Circuito retificador de meia onda**

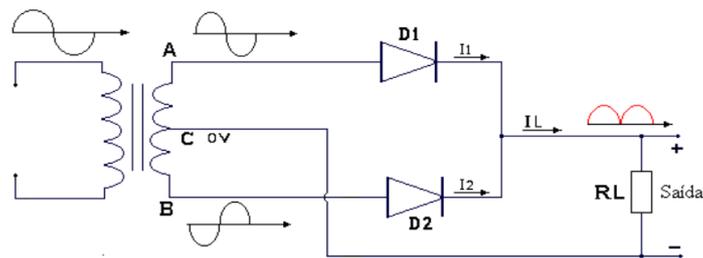
Nestas situações, apesar de ser um sinal pulsante a tensão é contínua pois não há inversão do sentido da corrente, tomando o valor do pico de tensão. Este tipo de sinal não é muito usual, pois ele é prejudicial para os componentes eletrônicos devido à instabilidade do sinal. A frequência do sinal de saída é igual à frequência de entrada, proporcionando uma baixa eficiência. Para maior interpretação deste fenômeno, encontra-se na figura 2.27, uma retificação de um sinal de corrente alternada com um diodo diretamente polarizado.



**Figura 2.27 - Análise do sinal em diversos pontos do circuito retificador de meia onda**

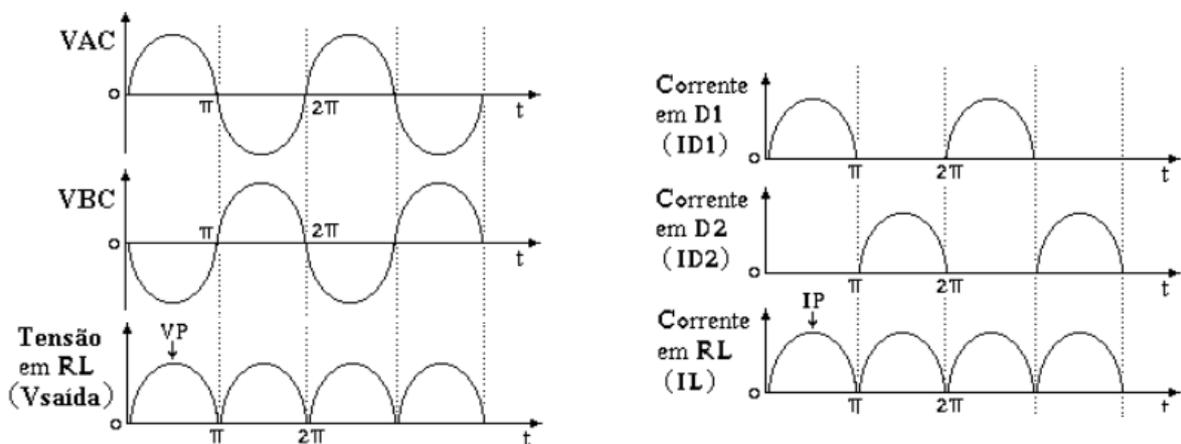
O retificador de onda completa de *center tap* é um circuito que utiliza no enrolamento secundário do transformador um terminal central, de modo a dividir a tensão de saída a meio, proporcionando duas tensões iguais. Esta particularidade provoca um desfasamento de  $180^\circ$

entre as tensões de saída do transformador, como se pode observar no circuito representado na figura 2.28.



**Figura 2.28 - Circuito retificador de onda completa com terminal central**

Nesta situação, devido à forma como o circuito é montado o diodo D1 permite a passagem da parte positiva do sinal de entrada, enquanto D2 permanece fechado durante este processo. Ao passar para a parte negativa do sinal acontece o contrário, o diodo D1 permanece sem conduzir, enquanto D2 conduz novamente e este semiciclo negativo inicial é rebatido para a parte positiva [15]. Assim, para qualquer polaridade de A ou de B a corrente  $I_L$  circula num único sentido em RL [17], sendo possível adquirir a parte positiva e negativa do sinal de entrada em semiciclos positivos na saída, como pode ser observado na figura 2.29.



**Figura 2.29 - Análise do sinal em diversos pontos do circuito retificador de onda completa com terminal central**

O retificador de onda em ponte é um circuito que utiliza quatro díodos no seu funcionamento. Esta configuração não exige a utilização de um transformador, como no caso anterior, a existência de pontes de díodos em um único encapsulamento torna a sua implementação mais fácil, a montagem deste circuito encontra-se representada na figura 2.30.

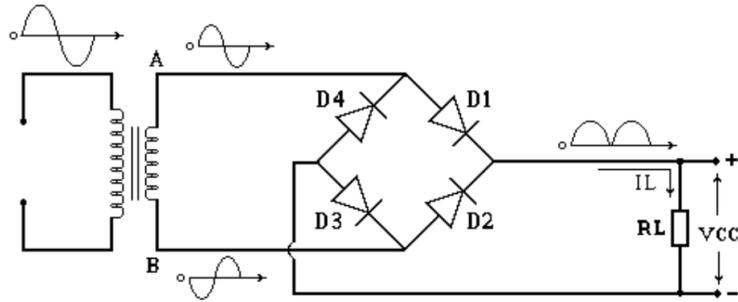


Figura 2.30 - Circuito retificador de onda completa em ponte

Neste circuito, apesar da existência de quatro díodos conduzem somente dois díodos de cada vez. Quando a tensão em A é positiva em relação a B, os díodos D1 e D3 conduzem, bloqueando automaticamente D2 e D4 sem conduzir corrente, criando um caminho de corrente que sai de A passa por D1, RL, D3 e chega ao ponto B. Por outro lado, quando B é positivo em relação a A, os díodos D2 e D4 conduzem, bloqueando automaticamente D1 e D3, criando um caminho de corrente que sai de B passa por D2, RL, D4 e chega ao ponto A [15] [17].

Para qualquer polaridade de A ou de B a corrente  $I_L$  circula num único sentido em RL, proporcionando uma corrente contínua, obtendo-se somente semiciclos positivos na saída, como se pode verificar na figura 2.31.

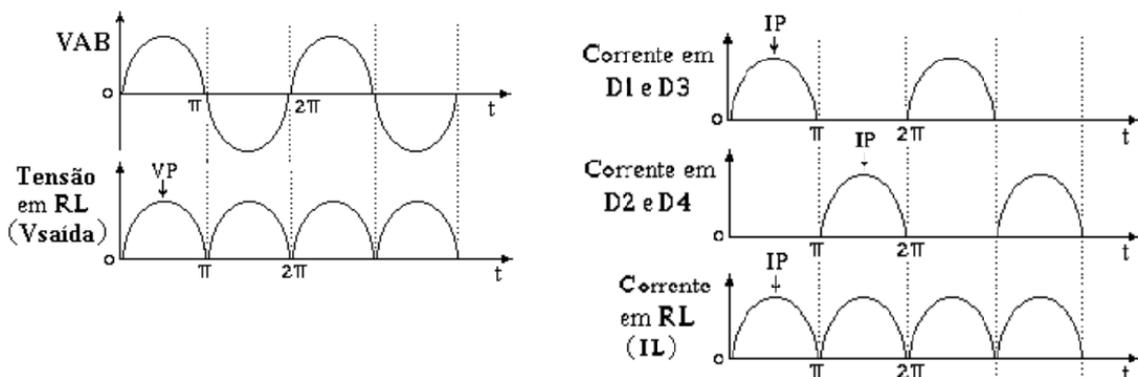
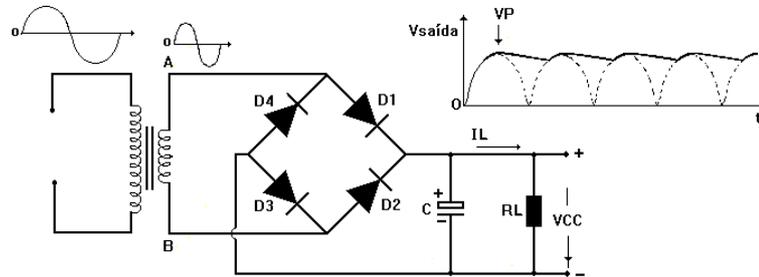


Figura 2.31 - Análise do sinal em diversos pontos do circuito retificador de onda completa em ponte

Após o processo de retificação, o sinal de tensão já se encontra com a polarização definida, contudo ainda necessita de regular o seu sinal pulsante para alimentar os componentes eletrônicos com uma tensão contínua. Para este efeito, são utilizados filtros com o intuito de obter uma tensão o mais constante possível, reduzindo ao máximo o fator de ondulação (*ripple*). O componente utilizado para este efeito é o condensador que armazena uma quantidade limitada de energia e quando a tensão proveniente da ponte retificadora se encontra baixa o condensador

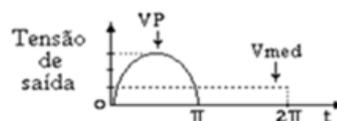
fornece energia ao circuito gradualmente, mantendo a tensão o mais próximo possível de tensão CC. A figura 2.32 é possível observar o comportamento do sinal após aplicado um condensador à saída do circuito.



**Figura 2.32 - Circuito com regulador de tensão**

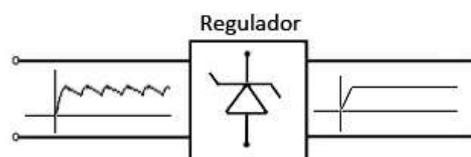
Com a retificação de onda completa em ponte o condensador será recarregado 120 vezes por segundo, enquanto o intervalo de descarregamento de energia é muito menor e com isto a tensão fornecida ao circuito permanece próxima do pico de tensão,  $V_p$ , até que seja novamente carregado [17].

O condensador ao tentar estabilizar o sinal em tensão contínua proporciona um aumento de tensão do circuito, sendo necessário avaliar as tensões que serão aplicadas ao circuito devido ao valor do pico de tensão,  $V_p$ , como se pode reparar pela análise da figura 2.33.



**Figura 2.33 - Pico de tensão após retificação**

A última etapa da fonte de alimentação é a regulação, este constituinte garante que a tensão proveniente da filtragem é linearizada ao máximo, ou seja, mesmo que entre no regulador uma tensão com *ripple* e mesmo que o seu valor seja mais elevado que o desejado, o regulador deve apresentar uma saída com um valor constante e aguentar variações da corrente e temperatura, como se pode verificar na regulação exercida no bloco da figura 2.34.



**Figura 2.34 - Regulação de um sinal de tensão**



### 3 Análise do equipamento existente

O equipamento a estudar e desenvolver ao longo projeto é denominado de tribómetro linear, funciona de acordo com o método linear do tipo pino-placa, no qual a amostra é fixada à base e posteriormente carregada axialmente pelo apalpador, possuindo um sensor de tração/compressão a ele acoplado (célula de carga), realiza um movimento linear alternativo entre eles. Como consequência deste movimento desenvolve-se uma força de atrito contrária ao deslocamento do apalpador, como exemplificado na figura 3.1.

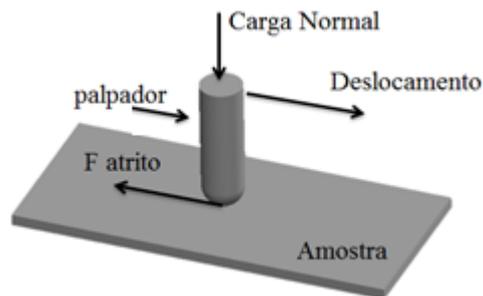


Figura 3.1 - Princípio de funcionamento de um tribómetro linear

A força de atrito obtida pelo contacto entre o apalpador e amostra é registada através da célula de carga, sendo de seguida enviada para um programa de tratamento de dados, desenvolvido no *software* LabVIEW da National Instruments, onde se procede ao tratamento de informação. O algoritmo do programa de tratamento de dados obtém o coeficiente de atrito pelo quociente entre a força de atrito e a carga normal aplicada, equação (2.1).

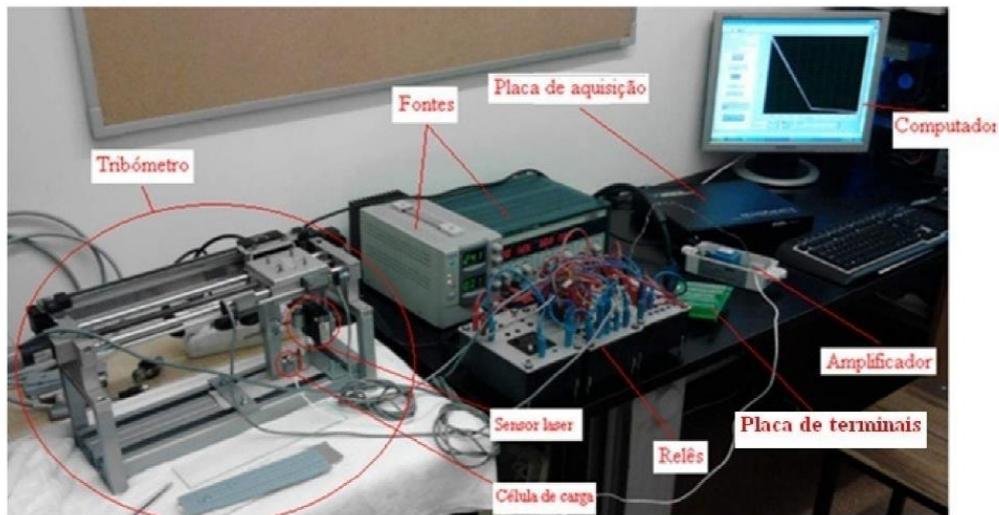
O valor de rugosidade é determinado pelo programa de aquisição de dados, onde o algoritmo adquire os valores provenientes do sensor laser, guarda-os e realiza posteriormente uma média de valores para assim se obter um valor de rugosidade média.

Relativamente às outras funcionalidades como o controlo dos fins de curso, o acionamento do motor responsável pelo movimento da haste do apalpador, são controladas por intermédio de relés.

Para garantir o perfeito funcionamento do tribómetro linear é necessário controlar os seguintes parâmetros:

- Carga normal;
- Velocidade de deslocamento relativo;
- Condições ambientais.

De seguida serão esmiuçadas todas estas particularidades, onde serão explicados os diversos mecanismos e sistemas presentes no tribómetro linear existente, ver imagem 3.2.



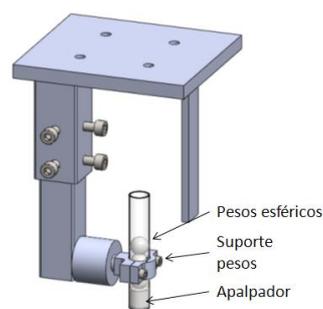
**Figura 3.2 - Equipamento montado com sistema inicial**

Este capítulo será fundamentado segundo a dissertação de mestrado: Estudo, conceção, desenvolvimento e construção de um tribómetro linear para ensaios em superfícies flexíveis [8].

### 3.1 Aplicação da carga normal

O tribómetro linear para funcionar necessita que lhe seja aplicada uma carga normal para realizar a análise tribológica. No equipamento em particular, a variação da carga irá desde o próprio peso do apalpador até uma carga máxima de 1,96 N.

O apalpador é inserido, inicialmente, no interior de um tubo fino de vidro (tubo de ensaio laboratorial), e posteriormente, caso seja necessário, sobre ele são colocados pesos, com 12 mm de diâmetro, até à carga máxima especificada ser atingida, ver figura 3.3.



**Figura 3.3 - Aplicação de carga normal**

### 3.2 Movimento relativo entre amostra e apalpador

O movimento existente entre a amostra e o apalpador é linear alternativo, no qual o elemento motor corresponde ao apalpador e o elemento fixo corresponde à amostra.

A transmissão do movimento é realizada através de uma mesa motorizada (Mesa TLH 300 da *Festo*), iniciando-se num motor elétrico DC, onde seu movimento é convertido em linear alternativo por intermédio de um fuso de esferas, movendo um carrinho a si acoplado e suportado por duas guias. O carrinho está ligado a uma régua potenciométrica (da marca *Festo*, modelo 0592 BD) permitindo verificar com precisão a posição do carrinho relativamente a um ponto inicial.

O equipamento possui ainda duas guias nesta mesa, tendo a função de suportar o carrinho e uma guia extra na estrutura destinada à aplicação de dois sensores de fim-de-curso ajustáveis, permitindo delimitar um deslocamento ao carrinho entre dois pontos ou então serem utilizados como sensores de segurança para impedir a colisão do carrinho com as laterais.

Devido aos sensores de fim de curso o movimento do apalpador acoplado ao carrinho é limitado de 0,02 m até 0,28m entre si. Desta forma, quando o carro da mesa passa pelo sensor o movimento é invertido sendo possível realizar testes em amostras de diferente comprimentos, desde que estejam dentro do intervalo anteriormente referido.

### 3.3 Gama de velocidades

Todo o movimento existente na mesa provém de um motor elétrico que transmite o seu movimento rotativo a um fuso de esferas que, através da acoplação de carro apoiado em duas guias, transforma o movimento rotativo em movimento retilíneo linear. O controlo da velocidade depende da voltagem fornecida ao motor elétrico, podendo adquirir no máximo uma tensão de 24 V, atingindo assim a sua velocidade de rotação máxima. Como a voltagem da rede é de aproximadamente 240V corrente alternada (AC) e a mesa tem um máximo de funcionamento de 24 V corrente continua (DC), é utilizada uma fonte de tensão variável, ver figura 3.4, para reduzir e converter de AC para DC a voltagem da rede, podendo variar a tensão de 5 a 28 DC e intensidade máxima de 5 A.



Figura 3.4 - Fonte de tensão variável

Nesta gama de funcionamento existe uma calibração de velocidades para valores de 5 a 20 V com um intervalos de 2.5 V, ver figura 3.5

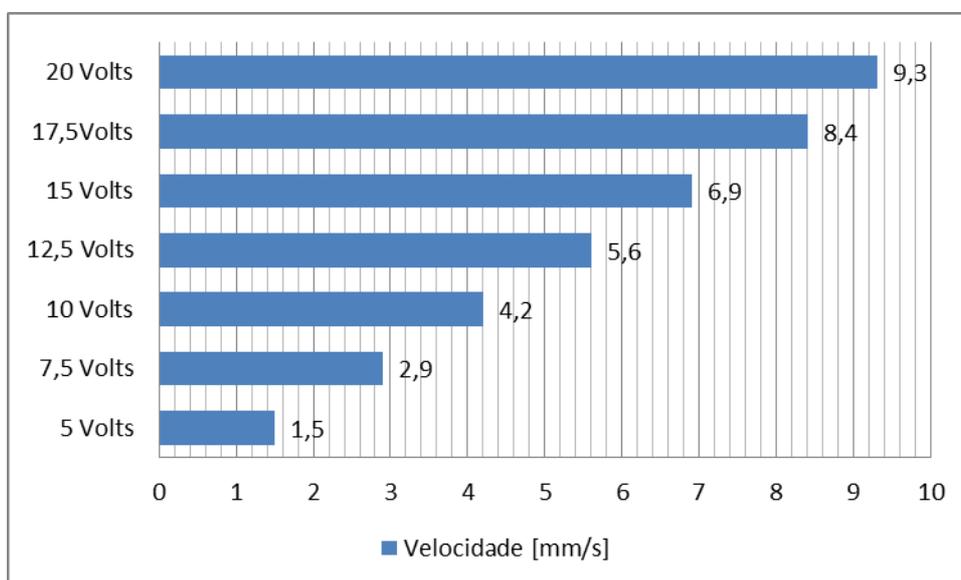


Figura 3.5 - Velocidades do motor

A velocidade mínima é de 1,5 mm/s uma vez que a tensão mínima a fornecer ao motor DC é de 5 V. A partir do gráfico é possível concluir que as variações de velocidade não são uniformemente lineares com as variações de tensão. Contudo, uma vez que o incremento de velocidade ronda quase sempre os mesmos valores, pode-se concluir que existe uma variação linear de 1.3 mm/s, ou seja, a cada variação de 2.5 V ocorre um incremento médio de 1.3 mm/s.

### 3.4 Sistemas de aquisição de dados

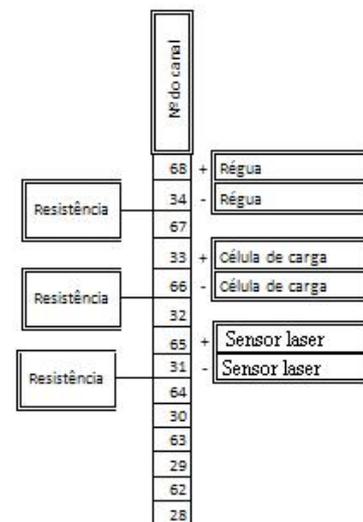
O tribómetro linear possui uma placa de aquisição de dados, NI DAQPad-6015 (apresentada na figura 3.6) com a funcionalidade de adquirir os dados fornecidos pelos sensores

e envia-los para o computador por cabo USB. A placa adquire os valores correspondentes à célula de carga, sensor laser e régua potenciométrica.



**Figura 3.6 - Placa NI DAQPad-6015**

Na figura 3.7 encontra-se representado o esquema de ligação dos componentes anteriormente referidos à placa de terminais, sendo esta posteriormente ligada à placa de aquisição de dados anteriormente referida.



**Figura 3.7 - Esquema de montagem dos terminais à placa de aquisição de dados**

O esquema representa o número do canal a que cada componente se encontra ligado, bem como a sinalização dos cabos positivos e negativos.

### 3.4.1 Sistema de aquisição de força

O coeficiente de atrito é retirado pelo quociente entre a força de atrito e a carga normal (equação 2.1), onde sabendo a carga normal previamente aplicada, é necessário adquirir a força de atrito durante o ensaio. Essa leitura é efetuada por uma célula de carga WMCP 1000G da marca *Interface*, ver figura 3.8, com uma capacidade máxima de leitura de 9.8 N à tração ou compressão.

A célula de carga encontra-se alojada numa haste ligada ao carrinho, onde se encontra acoplado o apalpador; de forma a diminuir o erro de leitura a célula foi colocada o mais perto possível do contacto da amostra com o apalpador.



**Figura 3.8 - Célula de carga WMCP 1000G**

A célula de carga fornece um sinal de tensão correspondente a uma determinada força; este sinal de tensão emitido pela célula de carga é de valores muito reduzidos. Assim, antes de enviar o sinal de tensão para a placa de aquisição, ele é ligado a um amplificador de sinal, ver figura 3.9.



**Figura 3.9 - Amplificador da célula de carga**

Este amplificador irá fornecer novos valores de tensão a variar no intervalo de -10 e 10 V, sendo que para o intervalo de -10 a 0 V corresponde a forças de compressão, enquanto para o intervalo de [0;10] V corresponde a forças de tração.

### 3.4.2 Sistema de aquisição de rugosidade/enrugamento

A leitura do perfil de rugosidade/enrugamento é realizada através de um sensor laser de triangulação da marca *Micro-Epsilon*, modelo optoNCDT 1302, ver figura 3.10.



Figura 3.10 - Sensor laser optoNCDT 1302

O sensor laser possui algumas particularidades relativamente aos outros componentes, este emite um sinal de corrente em vez de sinal de tensão como no caso anterior. Desta forma é utilizada uma resistência entre o terminal de saída do sensor e a massa para se obter a tensão correspondente à corrente emitida pelo sensor. A determinação da resistência utilizada parte da primeira lei de Ohm, onde diz que, para um condutor mantido a temperatura constante a razão entre a tensão em dois pontos e a corrente elétrica é constante, a este valor denomina-se de resistência, equação 3.1.

$$R = \frac{U}{I} \quad (3.1)$$

Desta forma, sabendo que a tensão máxima desejada será de 10 V e que a corrente máxima é de 0.02 A a resistência terá de ser de 500 ohms com o objetivo de adquirir um sinal de tensão a variar num intervalo de 0 a 10 V.

Outra particularidade deste sensor é o seu posicionamento necessitar de uma posição muito específica para conseguir ler a rugosidade com a maior fiabilidade possível. O sensor laser encontra-se no carro posicionado no fuso de esferas, para se movimentar ao mesmo tempo do apalpador e assim conseguir obter um bom nível de rugosidade.

Na figura 3.11 encontra-se apresentado o local onde a célula de carga e do sensor laser se encontram posicionados no tribómetro linear.

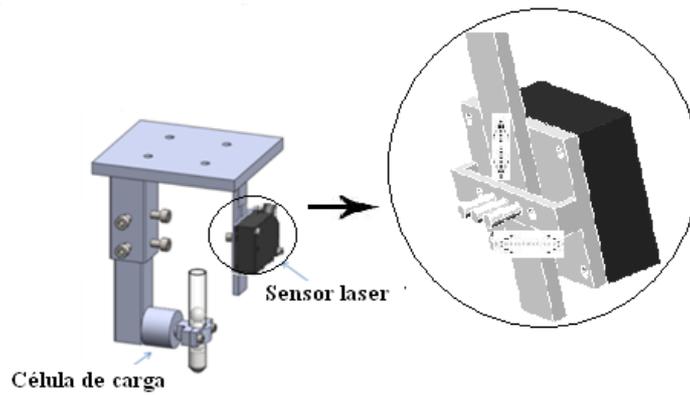


Figura 3.11 - Localização da célula de carga e do sensor laser

### 3.5 Discussão do trabalho apresentado

O equipamento como aqui apresentado encontra-se em funcionamento e testado com diversas amostras, segundo a dissertação de J. Martins, 2013. Os resultados apresentados nos testes realizados foram comparados com valores adquiridos noutra equipamento existente na universidade, FricTorq. Estes resultados podem ser visualizados na figura 3.12, onde a roxo e a vermelho encontra-se o desvio padrão e o coeficiente de atrito adquirido no FricTorq, respetivamente, enquanto a verde e a azul encontra-se o desvio padrão e o coeficiente de atrito adquirido no tribómetro linear, respetivamente.

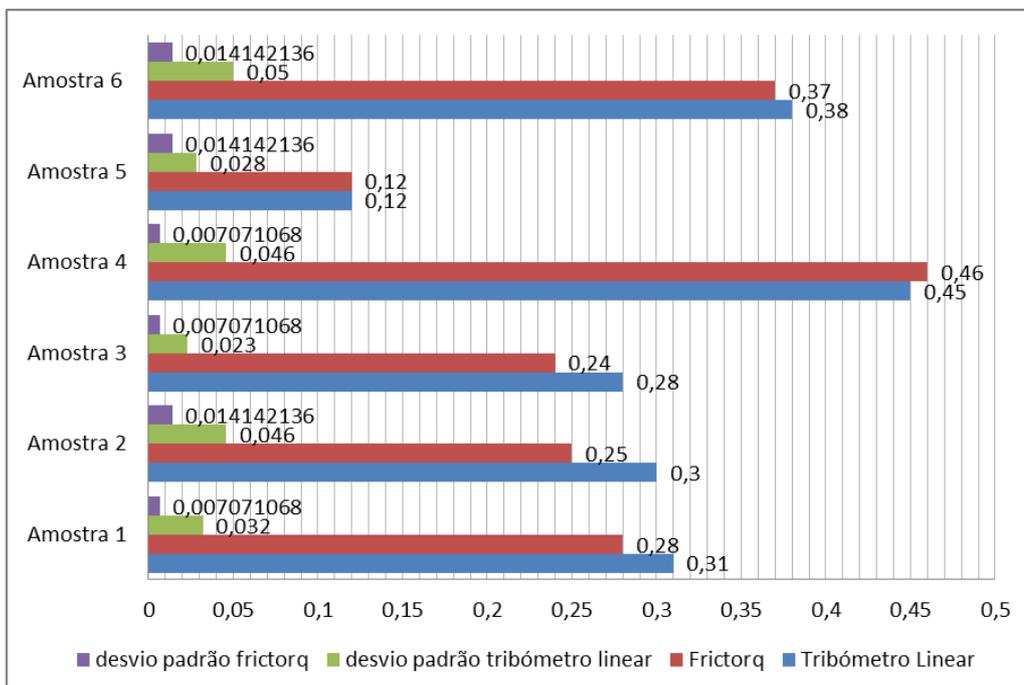


Figura 3.12 - Resultados apresentados após conclusão do equipamento

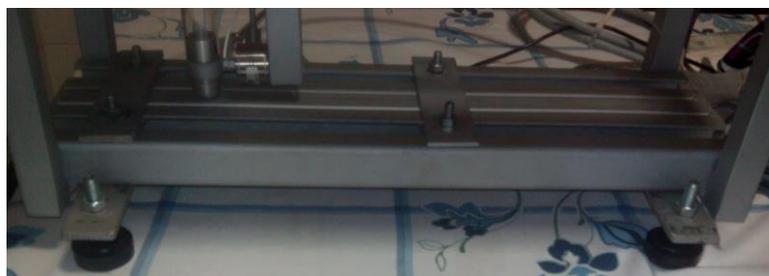
Os testes recorridos para determinar o coeficiente de atrito foram realizados em iguais condições, onde os valores adquiridos no FricTorq, barras vermelhas, e os resultados do tribómetro linear, barras azuis, encontram-se muito próximos tendo uma discrepância na ordem das centésimas de unidade.

A partir destes valores anteriormente realizados foi possível determinar o ponto de partida deste projeto, considerando a parte mecânica aceitável foi decidido que o principal objetivo seria o desenvolvimento do sistema de aquisição de dados e controlo do equipamento. A nível mecânico será introduzido no equipamento quatro pés reguláveis, consultar figura 3.13, com intuito de aumentar a estabilidade do mesmo e reduzir vibrações que predominam perante o trabalho do motor.



**Figura 3.13 - Pé regulável**

Para aplicar os pés reguláveis foi aparafusada uma base de apoio, utilizando quatro barras de perfil 30x5 mm, perfurada com furo passante de 8 milímetros de diâmetro. Desta implementação obteve-se o resultado apresentado na figura 3.14.



**Figura 3.14 - Aplicação dos pés reguláveis**

O equipamento apesar de ter uma boa estrutura e estando bem dimensionado possui um sistema de controlo e aquisição retrógrado e obsoleto, onde o motor é controlado por relés e a

sua velocidade é ajustada variando o valor de voltagem diretamente na fonte de alimentação, as caixas de relés também tem a função de alimentar os fim de curso, sensor laser e a régua potenciométrica, ver figura 3.15. O algoritmo de tratamento e armazenamento é uma adaptação de um outro *software* de aquisição que se encontra em funcionamento, mas a sua utilização pelo operador é confusa e possui diversas funcionalidades desnecessárias, o que torna o sistema mais lento e menos eficiente.



**Figura 3.15 - Sistema de controlo do motor**

Desta forma, o projeto vai ao encontro de otimizar o sistema de aquisição de dados, desde o sinal proveniente do sensor até ao valor visualizado pelo operador, tentando simplificar todo o processo e tornando-o num sistema ergonómico, ou seja, mais amigável para o utilizador com uma interface homem-máquina mais adequada à prática em questão e uma otimização geral do sistema, trocando a fonte de alimentação por um transformador e as caixas de relés existentes por uma placa eletrónica capaz de alimentar o motor, régua potenciométrica, dois fins de curso e o sensor de rugosidade.

## 4 Desenvolvimento do sistema de *hardware*

Como foi referido no capítulo anterior será necessário reformular todo o *hardware* do equipamento, como o controlo do motor e a implementação de um novo sistema de aquisição de dados. Para este último, será necessário analisar os sinais elétricos provenientes da célula de carga, sensor laser e régua potenciométrica, com o intuito de compreender o tratamento a realizar ao sinal, garantindo posteriormente o seu reconhecimento pela placa a implementar no sistema DAQ, placa de Arduino. A escolha por esta placa encontra-se explicada no capítulo 2.3.3, onde foi realizada uma tabela de valor para comparar diferentes placas e segundo as especificações definidas para este projeto, a placa de Arduino foi a que mais se destacou principalmente devido ao seu baixo custo quando comparada com as outras, fator decisivo e determinante na decisão final.

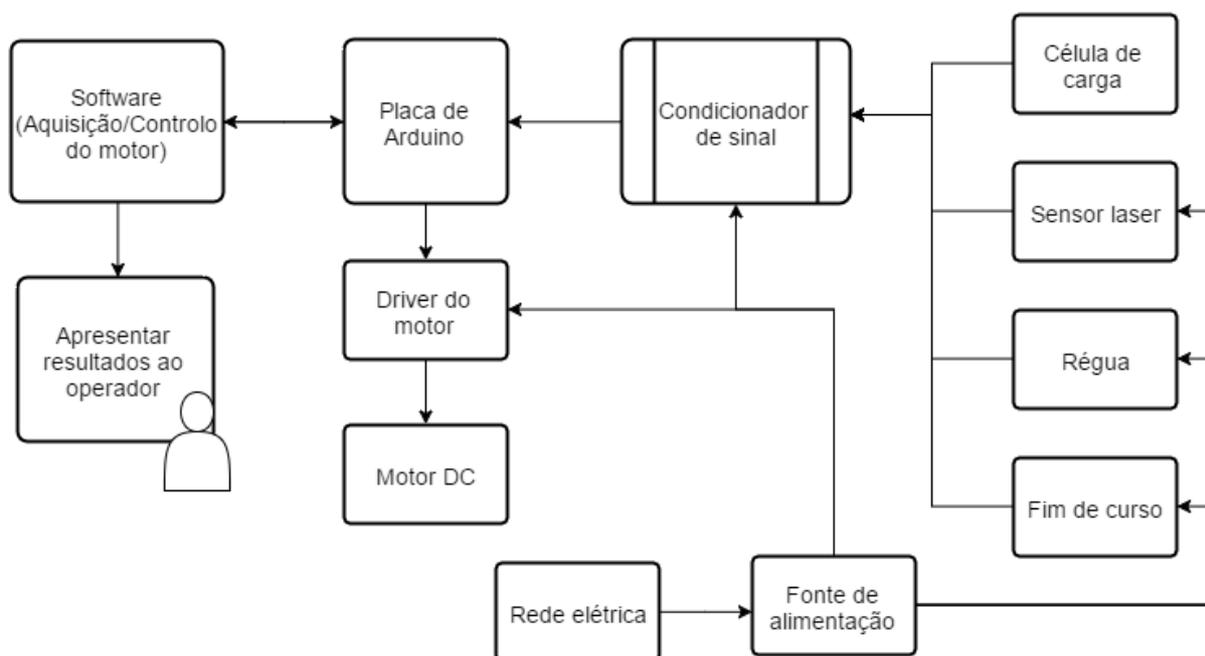


Figura 4.1 - Esquematização do sistema de *hardware*

### 4.1 Controlo do motor

O movimento linear existente no equipamento é proveniente de um motor elétrico DC, onde a sua velocidade de rotação é diretamente proporcional à tensão fornecida, situação descrita no capítulo 3.3. No controlo do motor é pretendido aplicar um *hardware* capaz de criar uma ligação entre o *software* e o motor, proporcionando um controlo de velocidade e de direção

a partir do computador. Para este efeito, foi realizada uma pesquisa de mercado sobre uma placa com estas funcionalidades, sendo escolhida a placa que se encontra na figura 4.2.

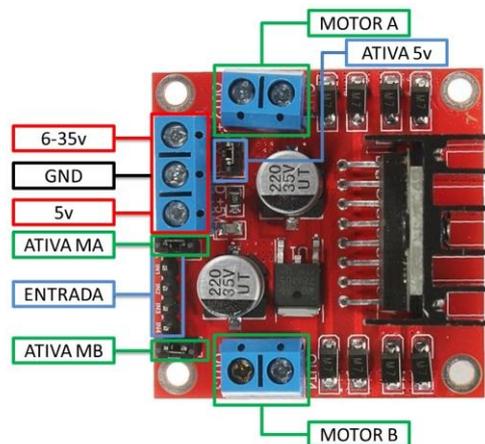


Figura 4.2 - Driver do motor DC

Esta placa é designada por ponte H L298N, a ponte H irá permitir à placa a polarização da corrente conforme a direção aplicada por intermédio do *software*, que por sua vez, emite um sinal digital para a entrada da placa definindo os sentidos de rotação do motor. É capaz de controlar a velocidade do motor por intermédio de um sinal PWM e tem a possibilidade de controlar dois motores DC em simultâneo ou um único motor de passo. A alimentação é externa, podendo variar de 6 a 35 V, neste projeto a alimentação será de 24 V.

## 4.2 Análise dos sinais elétricos a adquirir

No antigo sistema de *hardware*, os sinais elétricos provenientes da célula de carga e da régua potenciométrica podiam ser ligados diretamente à placa de aquisição de dados NI DAQPad 6015, enquanto o sensor laser, como o seu sinal elétrico é emitido em amperagem necessitava de uma resistência de 500 ohm nos terminais de forma a conseguir ler a voltagem num intervalo de 0 a 10 V. Estas ligações diretas eram possíveis uma vez que as características da própria placa da *National Instruments* o permitiam, sistema explicado no capítulo 3.4.

No sistema a implementar é impossível realizar este tipo de ligações diretas, uma vez que a placa de Arduíno só lê valores entre 0 e 5 V, sendo necessário realizar um tratamento para cada sinal elétrico em específico. De seguida, serão analisados todos os sinais elétricos, será encontrada a devida solução para cada um em específico e será realizada a simulação de cada solução encontrada no *software* Multisim, de forma a conferir que os tratamentos aplicados a cada sinal seja o desejado para adquirir todos os valores pretendidos.

#### 4.2.1 Sinal elétrico proveniente da régua potenciométrica

A régua fornece um sinal analógico num intervalo de [0;10] V, o objetivo será converter este sinal para um intervalo de [0;5] V. A solução encontrada foi aplicar um divisor de tensão de forma a dividir o sinal da régua para metade. Um divisor de tensão é construído por duas resistências em série, onde a ponta de uma estará a receber o sinal do sensor, a outra resistência terá uma ponta ligada à massa, 0 V, e das pontas em comum obtém-se o valor de saída, ver figura 4.3.

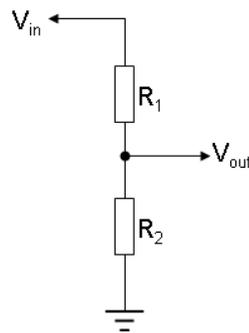


Figura 4.3 - Divisor de tensão

A tensão de saída, V<sub>out</sub>, é dada pela fórmula:

$$V_{out} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{in} \quad (4.1)$$

A partir desta fórmula, fazendo R<sub>1</sub>=R<sub>2</sub>, obtém-se:

$$V_{out} = \frac{V_{in}}{2} \quad (4.2)$$

Assim, conclui-se que o valor de ambas as resistências, R<sub>1</sub> e R<sub>2</sub>, será igual. Desta forma, foram escolhidas resistências de 100 kΩ a serem utilizadas para criar o divisor de tensão, a escolha de resistências de elevado valor decaiu-se sobre o objetivo de dificultar a passagem de corrente para a placa de Arduíno.

## Simulação do circuito

De acordo com os fundamentos teóricos apresentados anteriormente foi realizada uma simulação do circuito de forma a conferir os valores pretendidos. O esquema montado no *software* encontra-se representado na figura 4.4:

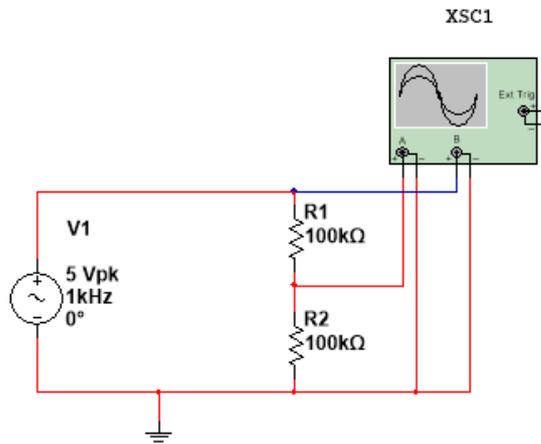


Figura 4.4 - Circuito com divisor de tensão para a régua potenciométrica

O circuito encontra-se montado com um divisor de tensão de resistência de igual valor, 100 kΩ, enquanto para representar a simulação do sinal proveniente da régua potenciométrica foi utilizado um gerador de onda capaz de emitir um sinal sinusoidal a variara no intervalo [0,10] V, ver linha azul do gráfico presente na figura 4.5.

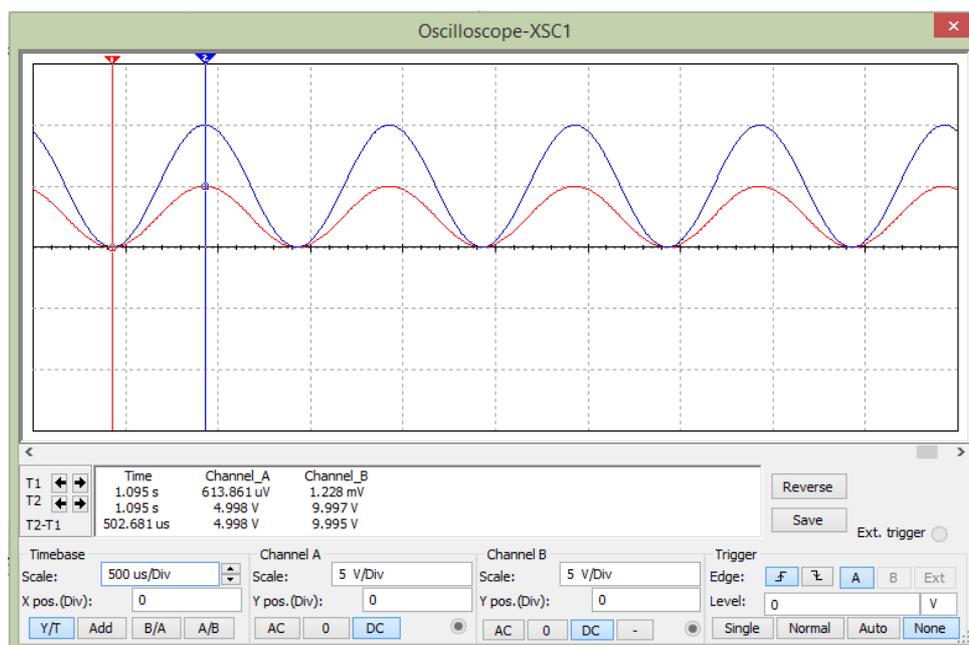


Figura 4.5 - Análise do sinal da régua após o seu condicionamento

A linha vermelha representada no gráfico do osciloscópio representa o sinal devidamente tratado, podendo ser notório a sua estabilidade dentro do intervalo pretendido [0,5] V.

#### 4.2.2 Sinal elétrico proveniente do fim de curso

Os fins de curso fornecem sinais digitais que dependem do valor de tensão a serem alimentados, ou seja, como neste caso serão alimentados a uma tensão de 24 V os valores digitais emitidos serão 0 ou 24 V, significando estar desativo ou ativo, respetivamente.

Neste caso é necessário diminuir o sinal digital quando toma o valor de 24 V para um valor inferior a 5 V, não sendo necessário muita precisão é preciso que esse sinal permanece num valor fixo do intervalo de 4 a 5 V de forma a ser reconhecido pela placa de Arduino. A solução encontrada foi a implementação de outro divisor de tensão, e como no caso anterior será utilizada a equação 4.1 para determinar o valor das resistências a aplicar, sendo estas de 33 k $\Omega$  e 6,8 k $\Omega$ , obtendo um valor de 4,1 V a quando o fim de curso emite os seus 24 V.

#### Simulação do circuito

Como na situação anterior será simulado da mesma forma o divisor de tensão, como pode ser verificado pela figura 4.6.

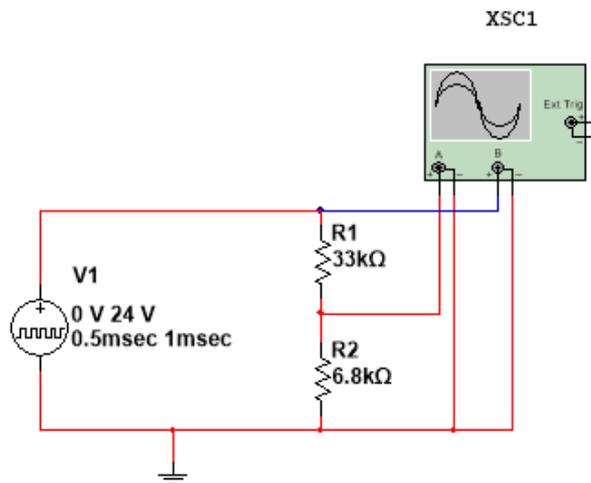
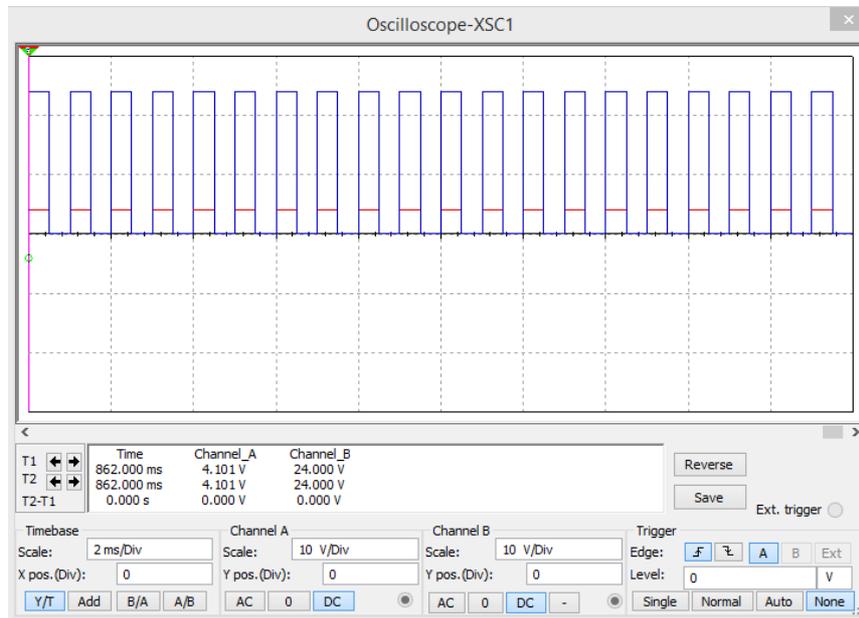


Figura 4.6 - Circuito com divisor de tensão para os fins de curso

A diferença deste esquema para o anterior encontra-se no valor das resistências, sendo estas de 33 k $\Omega$  e de 6,8 k $\Omega$ , e no tipo de onda gerada para a simulação do sinal emitido pelo

fim de curso. Neste caso trata-se de uma onda quadrática com valores 0 e 24 V, estando esta representada pela linha azul no gráfico da figura 4.7.



**Figura 4.7 - Análise do sinal do fim de curso após o seu condicionamento**

Analisando o sinal de saída do divisor de tensão, linha vermelha, é possível concluir que se encontra a funcionar em devidas condições, resultando o valor 0 e 5 V correspondentes aos valores de entrada respetivamente.

De notar, que neste circuito só foi realizada a simulação para um fim de curso, uma vez que o equipamento possui dois fins de curso será necessário a utilização de dois circuitos como aqui representados.

### 4.2.3 Sinal elétrico proveniente do sensor laser

Como referido no capítulo 3.4.2 o sensor laser emite um sinal elétrico em amperagem e para realizar a sua leitura foi utilizada uma resistência entre o terminal de saída e a massa. Neste caso a opção será manter a solução aplicada no sistema anterior, utilizando um potenciómetro devidamente ajustado, de forma a garantir a leitura da tensão no intervalo de 0 a 5 V. O valor para o qual o potenciómetro será ajustado é determinado pela primeira lei de Ohm, equação 3.1, e repetindo o procedimento referido no capítulo 3.4.2 conclui-se que terá de ser ajustado para 250  $\Omega$ .

## Simulação do circuito

Nesta simulação foi escolhido o potenciômetro de  $500\ \Omega$ , uma vez que será o componente de valor mais aproximado ao pretendido. O esquema elétrico encontra-se representado na figura 4.8.

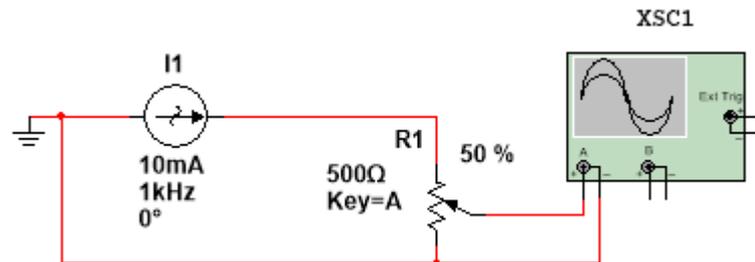


Figura 4.8 - Circuito de condicionamento de sinal para sensor laser

Neste circuito além do potenciômetro calibrado a 50% do seu valor foi utilizado um gerador de sinal capaz de emitir uma onda sinusoidal no intervalo de  $[0,20]$  mA, simulando assim o sinal emitido pelo sensor laser. O valor adquirido encontra-se representado na figura 4.9.

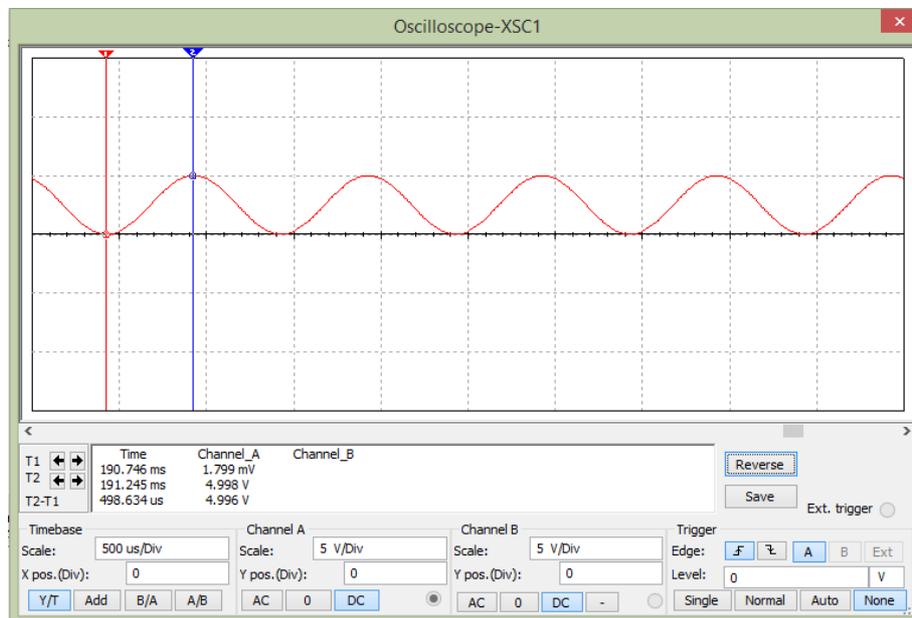


Figura 4.9 - Análise do sinal do sensor laser após o seu condicionamento

Conforme se pode verificar o sinal após o potenciômetro encontra-se no intervalo de  $[0,5]$  V como desejado.

#### 4.2.4 Sinal elétrico proveniente da célula de carga

O sinal proveniente da célula de carga é o mais complexo devido à gama de funcionamento do sensor. Esta célula de carga tem capacidade de reconhecer forças de tração e forças de compressão, o que faz variar o sinal elétrico imitado pelo sensor no intervalo de [-10;10] V, tornando mais complexa a sua conversão para o intervalo de 0 a 5 V.

Para a resolução deste problema foram elaboradas duas relações capazes de fazer a devida transformação ao sinal, sendo elas a equação 4.3 e a equação 4.4:

$$V_{out} = \frac{V_{in}}{4} + 2.5 \quad (4.3)$$

$$V_{out} = (V_{in} + 10) \cdot \frac{1}{4} \quad (4.4)$$

Na primeira equação (4.3) é realizada em primeiro lugar a redução da amplitude do sinal para um quarto do seu valor sendo posteriormente lhe adicionado 2,5 V, enquanto na segunda equação (4.4) é realizado o somatório de 10 V em primeiro lugar e só posteriormente é que a amplitude do sinal será reduzida para um quarto do seu valor. Estas diferenças na ordem de operações serão fulcrais para a decisão do ou dos componentes a serem utilizados, devido às suas próprias características de funcionamento.

Partindo das soluções encontradas foi realizada uma pesquisa sobre componentes eletrónicos com intuito de conseguir aplicar este tratamento de sinal num circuito elétrico. A solução encontrada passa pela utilização de amplificadores operacionais, onde é possível aplicar ganhos de tensão e construir somadores de tensão relacionando resistências de diferentes valores.

Das várias aplicações possíveis dos amplificadores operacionais serão utilizadas duas, amplificação e operações lineares, podendo ser consultada toda a sua validação teórica no capítulo 2.4.1, onde é realizada uma descrição direcionada à implementação das configurações anteriormente referidas com o intuito de montar um circuito capaz de ir ao encontro dos resultados pretendidos.

Com base nos conhecimentos sobre amplificadores operacionais é possível analisar a equação mais viável ao desenvolvimento do projeto. A implementação da equação 4.4 implica a realização do somatório em primeiro lugar, o que irá elevar a amplitude do sinal para um intervalo de [-20,20] V, valores que ultrapassam o máximo aconselhável pelo fornecedor,  $v_0 \in$

$[-V_{CC}, +V_{CC}]$ . Com a solução da equação 4.3 o intervalo máximo de funcionamento será  $[-10,10]$  V, o que é aceitável uma vez que se encontra distante da zona de saturação. Contudo esta solução implica a utilização de um amplificador operacional para cada operação matemática da referida equação, o primeiro irá realizar uma redução do sinal por intermédio de um ganho igual a 0,25 por intermédio da configuração de amplificador inversor, posteriormente o seguinte amp. op. será responsável pela soma de 2,5 V ao sinal utilizando a configuração de amplificador somador inversor. Desta forma, o sinal será configurado para o intervalo de 0 a 5 V por meio de dois amplificadores operacionais em série e em diferentes funções.

O amplificador inversor irá aplicar um ganho definido pelas resistências  $R_i$  e  $R_f$ , segundo a equação 2.8, para um ganho de 0,25 a resistência de entrada,  $R_i$ , terá o valor de 20 k $\Omega$ , enquanto a resistência de realimentação,  $R_f$ , tomará o valor de 80 k $\Omega$ .

Relativamente ao amplificador somador inversor, analisando a equação 2.11 conclui-se que as resistências deverão possuir todas o mesmo valor de forma a garantir um ganho unitário, ou seja, com esta configuração será aplicado ao sistema um ganho igual a um e por consequência o valor de tensão de saída do amplificador operacional será a soma das tensões fornecidas à entrada inversora. Desta forma, foram escolhidas somente resistências de 100 k $\Omega$  para a montagem do circuito.

### Simulação do circuito

A solução integral para este sinal elétrico encontra-se representada na figura 4.10, englobando as duas operações anteriormente referidas num só esquema.

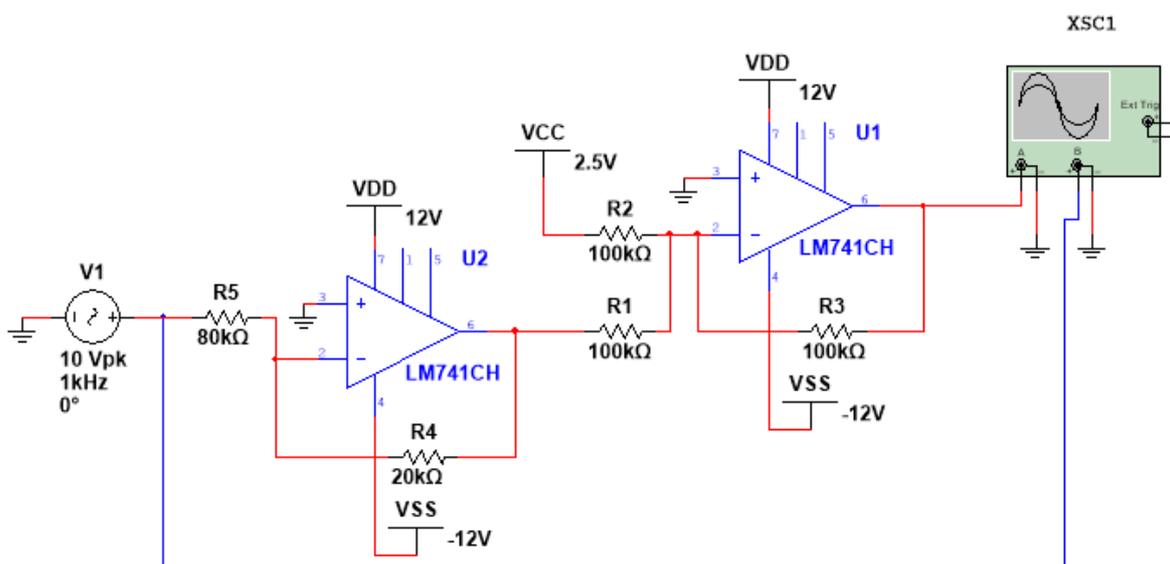
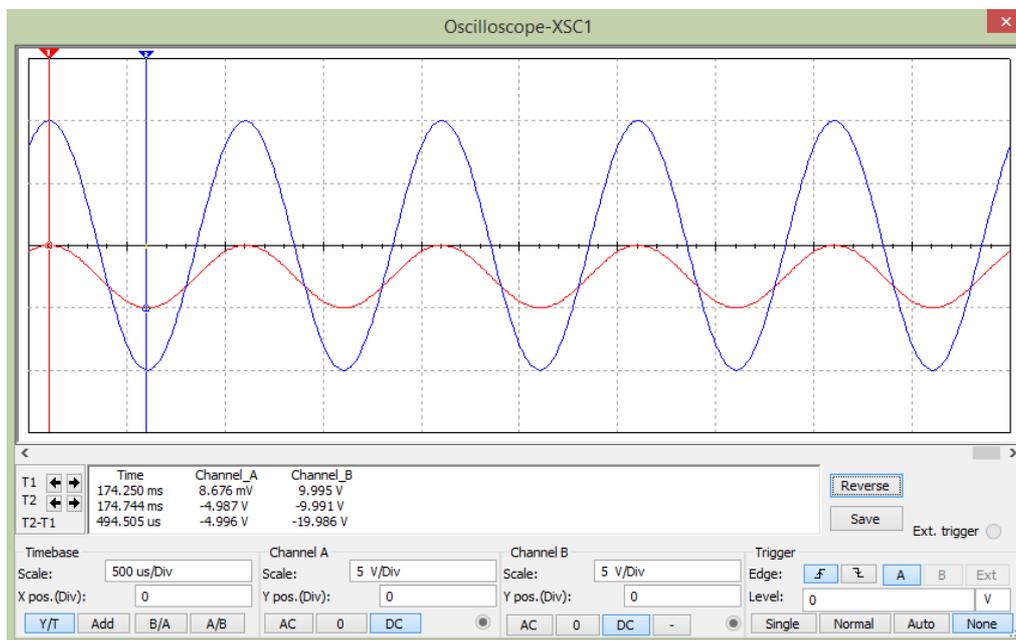


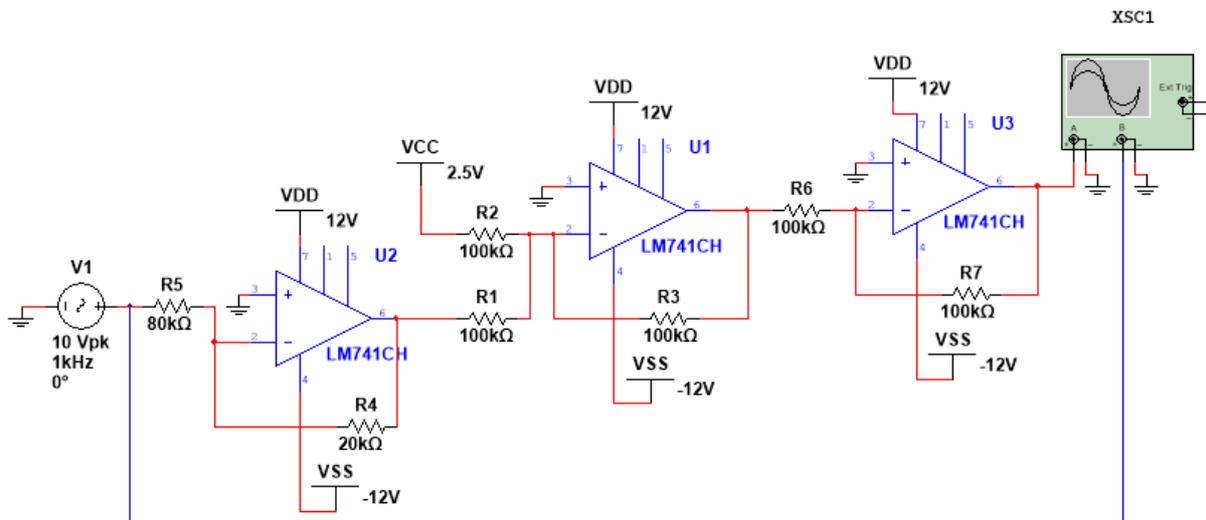
Figura 4.10 - Circuito referente ao condicionamento de sinal da célula de carga

Este circuito possui um gerador de sinal para representar o sinal emitido pela célula de carga no intervalo de  $[-10,10]$  V e dois amplificadores operacionais, cada um com a sua função em específico. Ambos os amplificadores operacionais são alimentados a 12 e -12 V, obrigando a saída do sinal a pertencer a este domínio. O primeiro está a realizar a diminuição da amplitude do sinal, proveniente do gerado de sinais, para um quarto do seu valor por intermédio do ganho aplicado pelas resistências de  $80\text{ k}\Omega$  e  $20\text{ k}\Omega$ , de seguida o segundo amplificador operacional adiciona 2,5 V ao sinal anteriormente reduzido, obtendo-se desta forma o resultado apresentado na figura 4.11.



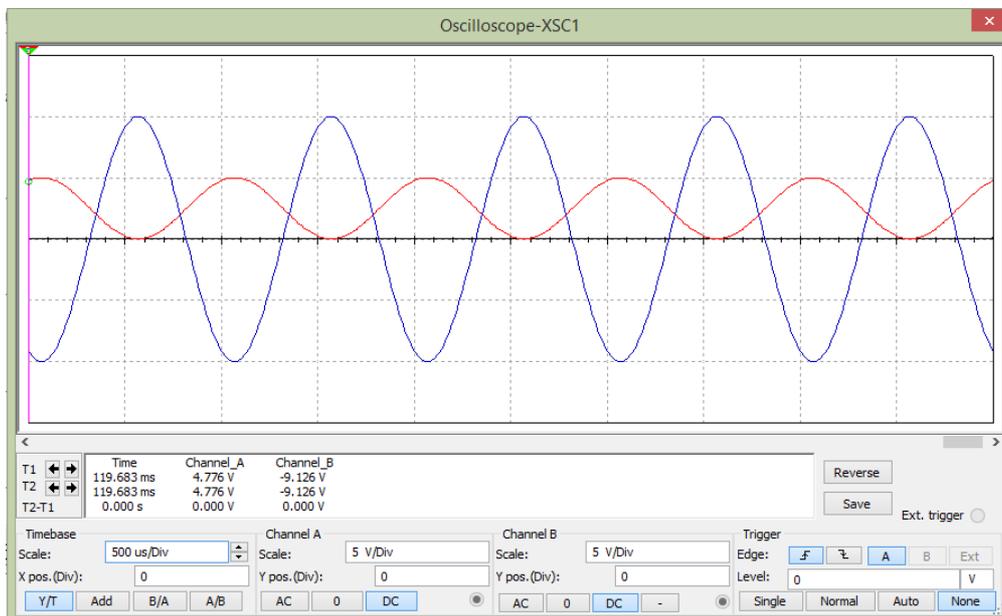
**Figura 4.11 - Análise do sinal da célula de carga após o seu condicionamento**

Analisando a onda proveniente do gerador de sinais, linha azul, e a onda de saída do circuito, linha vermelha, é possível concluir que os valores de saída quando vistos em módulo encontram-se dentro da gama desejada, contudo a sua polarização encontra-se invertida tendo em conta o desejado, ou seja, para o sinal de entrada a variar num intervalo de  $[-10,10]$  o sinal de saída encontra-se dentro do intervalo de  $[-5,0]$  V. Para reverter à polarização desejada será necessário aplicar outro amplificador operacional com ganho unitário de forma a inverter efetivamente a polarização do sinal. Desta forma, o circuito sofreu algumas alterações, como se pode visualizar na figura 4.12.



**Figura 4.12 - Circuito retificado para o condicionamento da célula de carga**

Neste novo esquema elétrico foi acrescentado um novo amplificador operacional, inserido na parte final do circuito, com uma resistência de 100 kΩ na entrada inversora e outra resistência de 100 kΩ na realimentação negativa com objetivo de aplicar um ganho unitário negativo ao sinal, obtendo-se o resultado presente na figura 4.13:



**Figura 4.13 - Análise do sinal da célula de carga após retificação**

Com este novo circuito é possível verificar que o sinal de saída encontra-se dentro do intervalo desejado [0,5] V mas o tratamento final do sinal não obedece à solução encontrada inicialmente, equação 4.3, isso é comprovado pelo resultado obtido no osciloscópio onde o sinal

de saída é desfasado 180° do sinal original. Isto implica que quando o sensor imite o valor de -10 V este será lido na entrada analógica da placa de Arduino como 0 V, por outro lado, quando a célula de carga emite 10 V este será lido na entrada analógica da placa de Arduino como 0 V. Através destas conclusões podemos deduzir uma nova relação, equação 4.5, para este tratamento de sinal, sendo ela:

$$V_{out} = -\frac{V_{in}}{4} + 2.5 \quad (4.5)$$

Este detalhe do circuito não irá influenciar em nada o registo ou a qualidade dos dados, uma vez que por intermédio do *software* a desenvolver será possível corrigir esta descoordenação.

### 4.3 Fonte de alimentação

O desenvolvimento e conceção de uma fonte de alimentação pode não se tornar complexo, caso se tenha em atenção alguns parâmetros. Em primeiro lugar deve-se definir a necessidade de consumo, medindo assim a corrente necessária ao bom funcionamento de todos os componentes a serem alimentados. Na tabela 4.1 encontra-se o consumo elétrico dos constituintes do tribómetro linear.

**Tabela 4.1 - Necessidades de consumo referentes aos equipamentos do sistema**

<b>Componentes</b>	<b>Consumo (A)</b>
<b>Motor</b>	0,13
<b>Fim de curso</b>	0,02
<b>Régua potenciométrica</b>	0,005
<b>TOTAL</b>	<b>0,155</b>

O consumo do sistema será 0,155 A para alimentar todos os componentes, mas devido à perda corrente nas ligações e consumos provocados pelos componentes eletrónicos a utilizar na placa foi definido que seria necessário 0.5 A de forma a garantir uma boa margem de erro.

De seguida será necessário definir as tensões necessárias adquirir por intermédio da fonte de alimentação, para este efeito, encontra-se na tabela 4.2 as tensões necessárias para alimentar cada componente em particular.

**Tabela 4.2 - Tensões aplicáveis ao sistema**

<b>Componentes</b>	<b>Alimentação (V)</b>
<b>Motor</b>	24
<b>Fim de curso</b>	24
<b>Régua potenciométrica</b>	24
<b>Amplificadores operacionais</b>	12/-12
<b>Tensão a somar ao sinal da célula de carga</b>	2,5

Assim, os valores de voltagem a garantir pela fonte de alimentação serão: 24 V, 12 V, -12 V e 2,5 V.

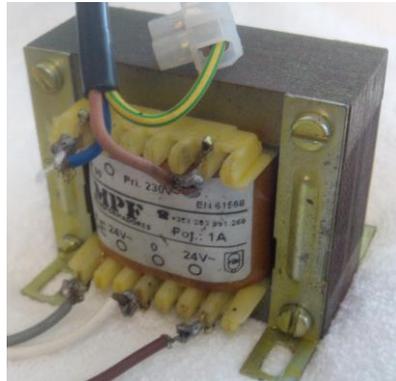
A partir deste ponto, com o valor máximo de consumo e sabendo as tensões necessárias fornecer ao circuito é possível começar a desenhar e dimensionar as diferentes fases de uma fonte de alimentação. A conceção desta fonte de alimentação é baseada nos fundamentos teóricos apresentados no capítulo 2.5.

#### **4.3.1 Transformador de tensão**

O dimensionamento do transformador irá depender da tensão fornecida pela rede elétrica e da tensão de saída do mesmo, esta última poderá ser inferior à tensão máxima necessária para alimentar o sistema, 24 V, devido à retificação posterior do sinal que irá aumentar a tensão final em alguns V. Contudo para delimitar uma maior margem de erro e tendo em conta a pouca diferença económica, foi decidido que o transformador terá um valor igual ao que se pretende alimentar. Outra situação a ter em conta é a necessidade de adquirir um transformador com terminal central, ou seja, é pretendido um transformador que forneça um total de 48 V repartidos por duas frações de igual valor.

Desta forma, partindo da relação aplicada na equação 4.11 é possível dimensionar o transformador, sabendo que a tensão da rede pública é de 230 V e que a tensão máxima necessária é de 48 V, o valor de relação entre os dois enrolamentos será de 4,79, com uma

intensidade de corrente de 0.5 A e um terminal central a dividir a tensão de saída. O transformador utilizado na fonte de alimentação encontra-se na figura 4.14.



**Figura 4.14 - Transformador**

### 4.3.2 Circuito retificador

Analisando os três métodos de retificação de sinal é possível concluir que os circuitos de onda completa são mais eficientes que o circuito retificador de meia onda, visto que utilizam não apenas o semiciclo positivo da onda, mas também o semiciclo negativo, sendo preferível efetuar a montagem com onda completa por uma questão de segurança e para compensar algum pico de tensão do circuito. Dos dois circuitos restantes para aplicar no *hardware* a desenvolver foi escolhido o circuito de onda completa em ponte, devido à vantagem de possuir um encapsulamento, facilitando assim a sua implementação, e o reduzido preço dos díodos. Na figura 4.15 encontra-se a ponte retificadora utilizada.



**Figura 4.15 - Ponte retificadora utilizada**

A implementação deste sistema implica uma queda de tensão, sendo necessário subtrair 1,4 V ao valor de tensão eficaz proveniente do transformador, devido à aplicação de dois díodos em série que provocam uma queda de tensão de 0,7 V cada.

### 4.3.3 Filtro

Como se consegue perceber pela imagem, a tensão máxima do sinal é designada de pico de tensão, onde este, depende do valor de tensão eficaz fornecido pelo transformado, 24 V, e considerando a queda de tensão ocorrida na ponte retificadora de 1,4 V, obtem-se a equação 4.6:

$$V_p = V_{ef} \cdot \sqrt{2} - 1,4 \quad 4.6$$

Aplicando a equação 4.6 obtem-se uma tensão de pico para o circuito de 32,54 V.

A partir do pico de tensão é possível dimensionar o condensador a utilizar, em primeiro lugar sabendo a tensão atinge um valor de aproximadamente 32 V será necessário aplicar um condensador no mínimo de 35 V conforme o padrão de valores adotados pelos fabricantes. Em segundo ponto será necessário determinar a capacidade do condensador por intermédio da equação 4.7:

$$C = \frac{I_{DC}}{f \cdot V_{ond}} \quad (4.7)$$

Onde  $I_{DC}$  é a corrente fornecida pelo transformador,  $f$  a frequência aplicada ao sinal e  $V_{ond}$  corresponde à variação de tensão na saída para um *ripple* de 10%, sendo dado pela equação 4.8:

$$V_{ond} = 0,1 \cdot V_p \quad (4.8)$$

Considerando uma corrente de 500 mA, um pico de tensão de 32,54 V e sabendo-se que a frequência de saída de um retificador de onda completa é o dobro da entrada, esta será de 100Hz devido à frequência da rede pública portuguesa ser de 50Hz. Assim, será necessário a aquisição de um condensador com a capacitância mínima de aproximadamente 1537  $\mu$ F.

Na figura 4.16 é possível analisar teoricamente o comportamento do sinal de saída após a sua filtragem, onde se encontra definido os valores correspondentes à tensão máxima, média e mínima do sinal.

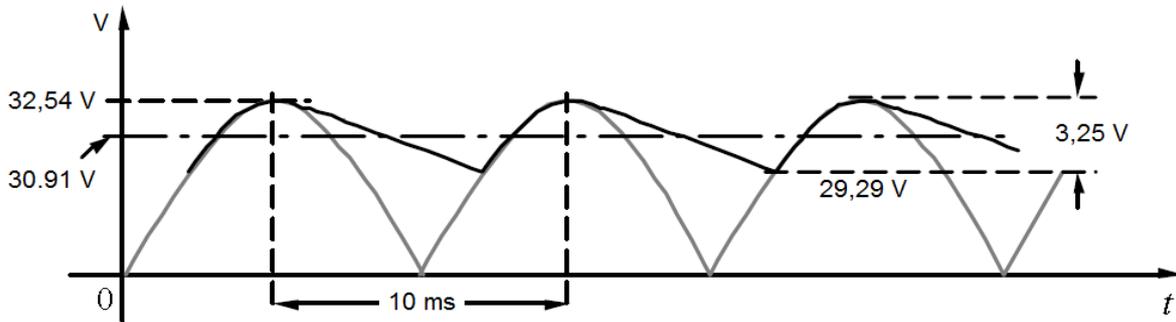


Figura 4.16 – Comportamento do sinal após filtragem

Analisando o gráfico da figura 4.16 é possível conferir uma variação máxima esperada de 3.25 V de tensão que ocorre no sinal após a filtragem.

#### 4.3.4 Reguladores

Nesta fase serão reguladas as tensões necessárias para garantir o funcionamento do circuito desejado, conforme a análise realizada na tabela 4.2, onde será aplicado um regulador para cada tensão pretendida, sendo elas 12 V, -12 V, 2.5 V e 24 V. Para garantir os 12 V e 2,5 V serão utilizados dois reguladores LM 317, enquanto para a tensão negativa de 12 V será necessário um regulador LM 337 e por fim para obter a tensão de 24 V será necessário aplicar um regulador LM 7824.

Os componentes LM 317 e LM 337 são reguladores de tensão ajustáveis, sendo possível adquirir uma tensão desejada entre 1,2 e 37 V através da combinação de diferentes resistências no circuito. A escolha decaiu-se por estes componentes devido a terem uma tensão mínima de entrada, aconselhável, de +28 ou -28 V conforme o respectivo componente. No esquema da figura 4.17 encontra-se representada a montagem básica do regulador ajustável LM 317.

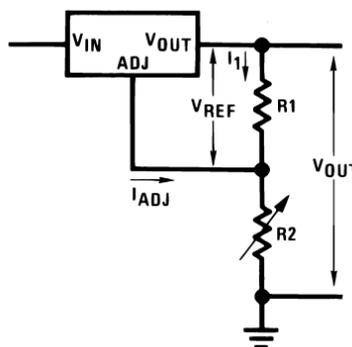


Figura 4.17 - Esquema de montagem do regulador LM 317

Este esquema é proveniente do fabricante, sendo com base nesta montagem que o circuito a desenvolver será realizado. Nesta montagem aqui representada, é aplicado um potenciômetro de forma a controlar a tensão que se deseja obter na saída, contudo, como no caso deste projeto não existe a necessidade de variar a tensão, os potenciômetros serão trocados por resistências com o intuito de obter tensões fixas e não perder potência. Os valores das resistências para as tensões desejadas é dado pela equação 4.9:

$$V_{out} = V_{REF} \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) + I_{ADJ} \cdot R_2 \quad (4.9)$$

O componente é projetado para minimizar a corrente  $I_{ADJ}$  (100  $\mu$ A no máximo) e para mantê-lo constante, podendo-se assim considerar nulo o segundo termo da equação 4.15, onde a tensão  $V_{REF}$  é igual a 1.25 V.

Desta forma, considerando a resistência  $R_1$  de 243  $\Omega$  em todos os casos, isto implica, que a resistência  $R_2$  tome diferentes valores conforme a tensão de saída desejada. Na tabela 4.3 será apresentado o valor para a resistência  $R_2$  mediante a tensão de saída pretendida.

**Tabela 4.3 - Atribuição de resistências conforme a tensão desejada**

Tensão de saída (V)	Resistência $R_2$ ( $\Omega$ )
12	2090
-12	2090
2.5	243

A aplicação de tensões de maior valor implica um aquecimento por parte destes componentes devido à baixa transferência de calor que eles exercem, sendo isto, é necessário aplicar dissipadores de calor, em cada um, para garantir o funcionamento nas condições recomendadas. Os dissipadores de calor aplicados nos componentes são reutilizados de uma placa de um monitor, podendo ser visualizados, já afixados aos componentes, na figura 4.18.

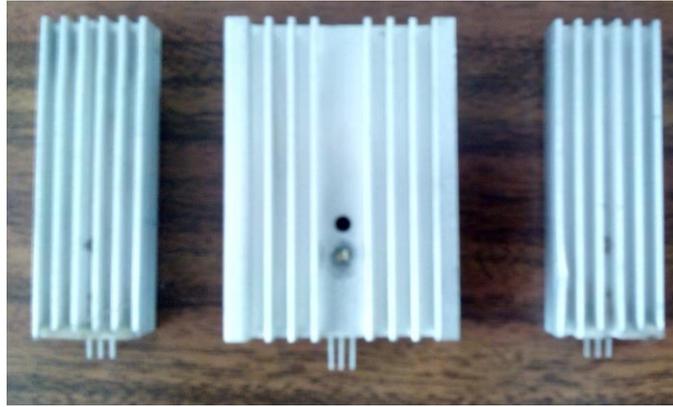


Figura 4.18 - Dissipadores de calor a aplicar no sistema

### 4.3.5 Esquema geral da fonte de alimentação

Tendo em conta a análise realizada anteriormente para as diferentes fases da fonte de alimentação, foi construído um circuito com base nas conclusões retidas. O resultando final encontra-se esquematizado na figura 4.19.

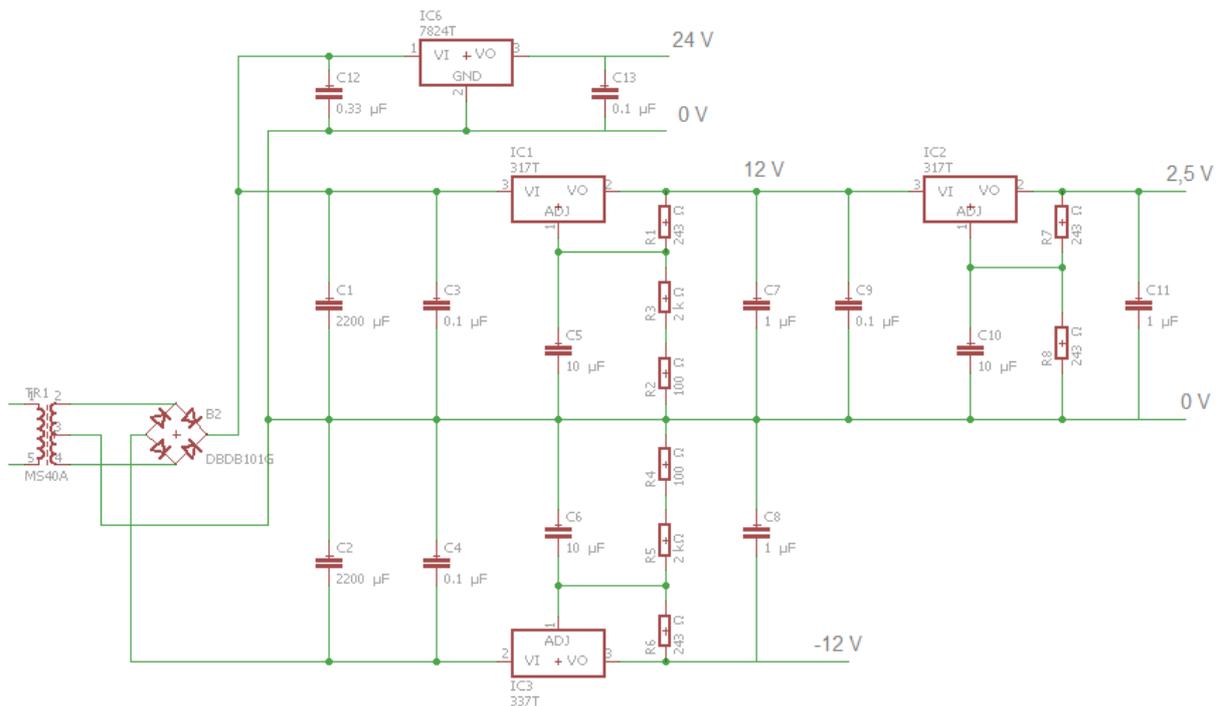


Figura 4.19 - Esquema do circuito da fonte de alimentação

A montagem deste circuito inicia-se com o transformador a fornecer tensão a uma ponte retificadora, sendo de seguida realizada uma filtragem com um condensador de 2200 µF (o valor mínimo necessário seria de 1537 µF, estipulado no capítulo 4.2.3). Posteriormente, ocorre

a regulação do sinal para diversos valores de tensão através de uma ramificação utilizando dois reguladores LM 317, um regulador LM 337 e um regulador LM 7824. Para obter melhores resultados foram aplicados alguns condensadores, recomendados pelos fabricantes, nas entradas e saídas dos reguladores para ajudar a estabilizar o sinal. Os valores de capacitância para cada condensador encontra-se indicado na tabela 4.4.

**Tabela 4.4 - Condensadores aplicados nas entradas e saídas dos reguladores**

	<b>Componente</b>	<b>Capacitância (µF)</b>
<b>LM 7824</b>	Entrada	0.33
	Saída	0.1
<b>LM 317 / LM 337</b>	Entrada	0.1
	Ajustamento	10
	Saída	1

#### 4.4 Conceção da placa eletrónica

O *hardware* é uma parte fundamental de qualquer equipamento, devendo ser projetado com o cuidado de simplificar o sistema e elevar a sua eficiência ao máximo. Com base nas conclusões retidas ao longo do capítulo 4.2 e 4.3, onde foram abordados os sinais elétricos provenientes dos sensores e as características técnicas para desenvolver uma fonte de alimentação, respetivamente, será possível conceber uma placa eletrónica capaz de recolher informação, tratar os sinais conforme as características de cada um, entregar a informação à placa de Arduíno e alimentar todos os componentes envolventes no equipamento.

A conceção da placa eletrónica passou por várias tentativas e pela utilização de diferentes métodos. Na primeira vez, foi utilizado uma placa pré-fabricada (perfurada com linhas de condutividades ao longo da sua extensão) com o objetivo de reduzir custos ao projeto final. Contudo, esta tentativa não produziu os resultados pretendidos, devido ao elevado número de componentes a serem aplicados no circuito e às numerosas ligações externas efetuadas na interligação dos componente, provocavam curto-circuitos e tornavam o sistema instável. Na figura 4.20, pode ser visualizado os componentes relativos à fonte de alimentação já soldados à placa, como se pode verificar nas juntas de solda as linhas de condutividade encontram-se muito próximas umas das outras, provocando assim a possibilidade de curto-circuito e instabilidade do circuito.

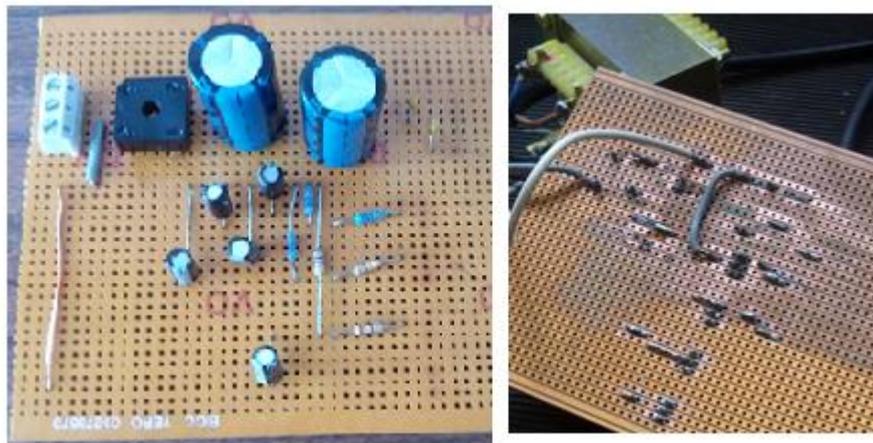


Figura 4.20 - Concessão do sistema de *harware* com uma placa pré-fabricada

Uma vez que este último método não produziu resultados pretendidos surgiu a ideia de conceber a placa por circuito impresso, para tal, foi utilizado o *software Eagle*. O circuito foi inicialmente desenhado no *software* indicado, a montagem do circuito deve ser cuidadosa para não haver posteriormente ligações indesejadas, também se deve ter em atenção a escolha dos componentes, mais especificamente, o seu tamanho e corresponder a distância entre furos na placa à distância entre os pinos do componente real. Na figura 4.21, encontra-se uma imagem retirada do *software Eagle*, onde se está a seleccionar uma resistência com 10 milímetros de distância entre furos e é possível compara o componente seleccionado com o real através da escala referenciada, por último, relativamente às ligações dos componentes as linhas do esquema só se encontram conectadas se no seu cruzamento existir um ponto de junção.

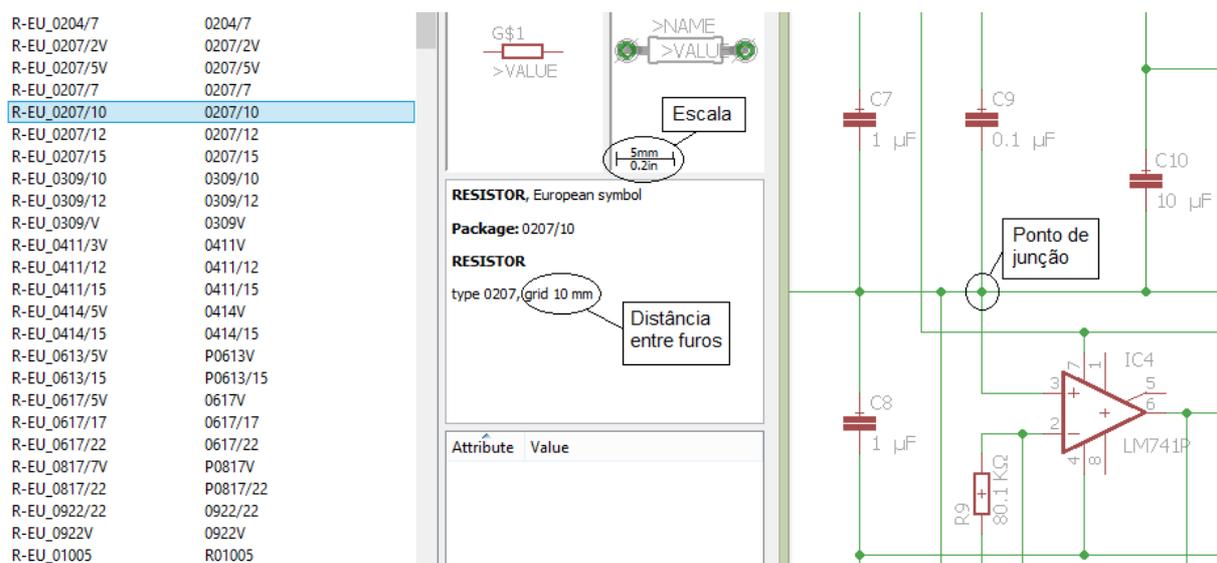
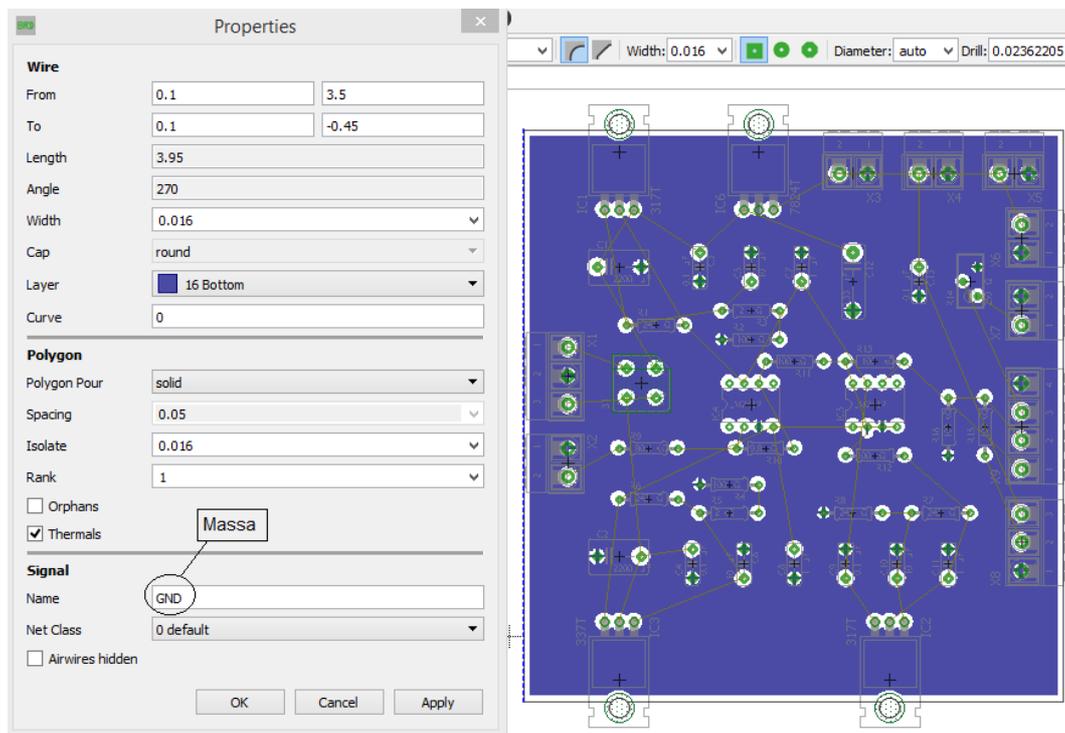


Figura 4.21 - *Software Eagle*

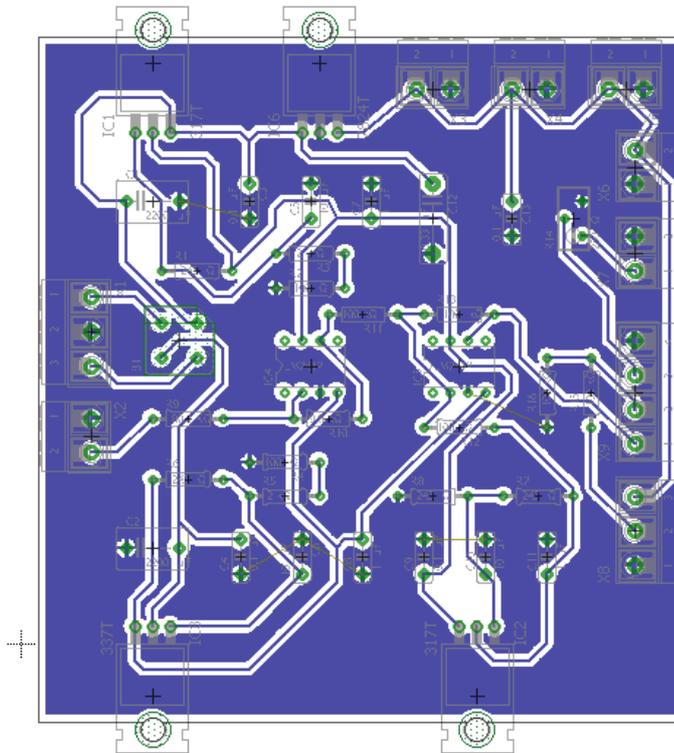
Concluído o desenho do circuito (pode ser encontrado no anexo A), é realizado o posicionamento de cada componente na placa, sendo nesta fase que as linhas responsáveis pela conexão entre os diversos componentes são tracejadas. Após o posicionamento dos componentes no local desejado, será corrido o plano massa, ou seja, será considerado que toda a face da placa estará conectada à massa, como se pode verificar pela figura 4.22.



**Figura 4.22 - Aplicação do plano massa no software Eagle**

A técnica de aplicar o plano de massa é utilizada para diminuir o custo da placa, sendo desnecessário realizar o desbaste quase integral da face, pelo que o único desbaste a ser realizado será o isolamento entre as linhas de conexão dos componentes e o plano de massa.

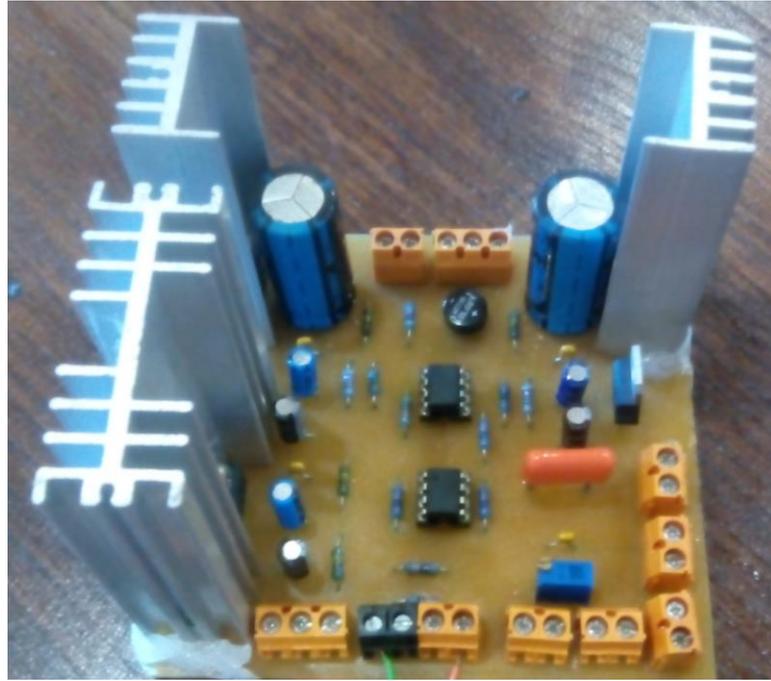
O passo seguinte será desenhar na placa os trajetos das linhas de conexão, devendo ser cuidadosamente pensados para garantir que as ligações não se cruzem e que sejam realizadas no menor espaço possível. Na figura 4.23, encontram-se desenhados todos os trajetos a serem impressos na placa final.



**Figura 4.23 - Layout da placa a ser impressa**

Com base neste esquema, o *software* cria ficheiros com linhas de código correspondentes aos trajetos a realizar durante o processo de desbaste e indica as posições dos furos a serem concebidos por intermédio de uma fresadora CNC. Após criar os ficheiros, desenvolvidos no *software Eagle*, foram entregues a um técnico das oficinas do departamento de Engenharia Eletrónica da Universidade do Minho para realizar a impressão do circuito.

Obtendo-se a placa impressa, iniciou-se a montagem dos componentes nos seus respetivos lugares. Para concretizar esta etapa foram utilizados alguns utensílios de soldadura, tais como: ferro de soldar, solda (estanho), pasta de solda e um sugador de solda para remover soldas indesejadas. Assim, com a ajuda destes utensílios foi possível fixar os componentes na placa por intermédio de soldadura. Após a conclusão do processo de soldadura obteve-se a placa representada na figura 4.24.



**Figura 4.24 - Placa acabada**

#### **4.5 Montagem, otimização e validação do sistema de *hardware***

O desenvolvimento do sistema de *hardware* entra a fase final com a sua montagem e devida validação. Na figura 4.25 encontra-se a placa eletrónica devidamente legendada, apresentando as indicações necessárias para realizar as conexões aos componentes existentes no tribómetro linear, onde é indicado a alimentação tendo em atenção os polos positivos e negativos dos mesmos e o sinal de saída de cada um quando lhe é aplicado.

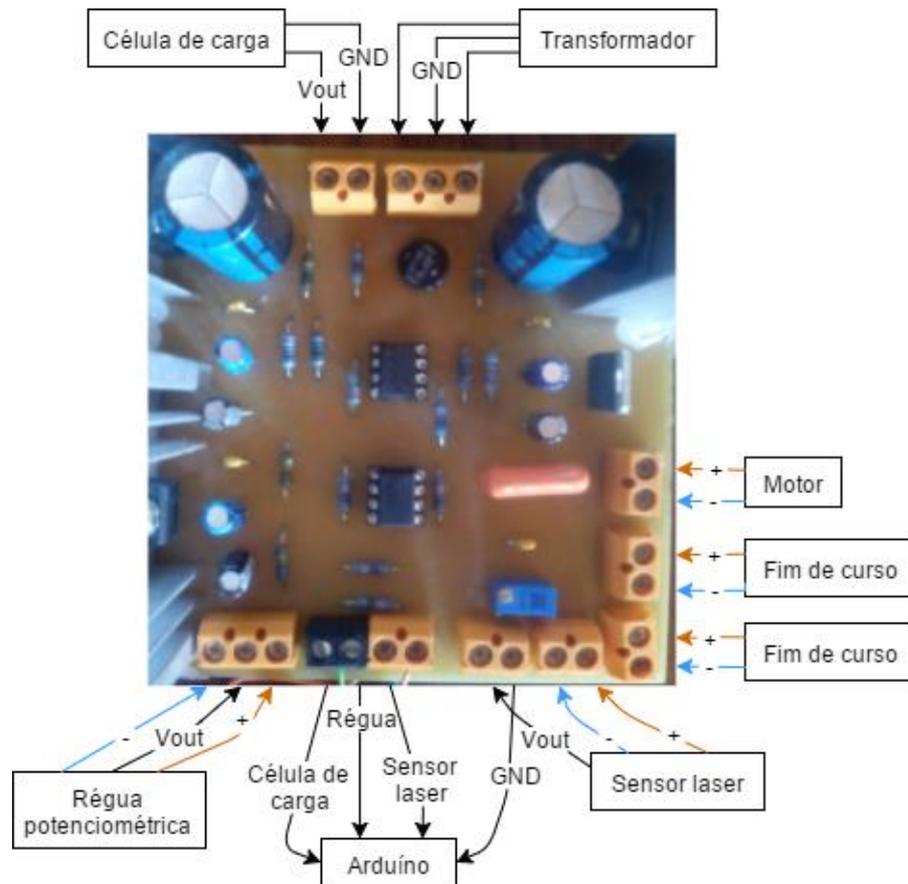


Figura 4.25 - Ligações à placa eletrônica

Para completar as ligações será necessário conectar as saídas do condicionamento de sinal à placa de Arduino, o esquema de ligação ao Arduino e sua pinagem encontra-se representado na figura 4.26.

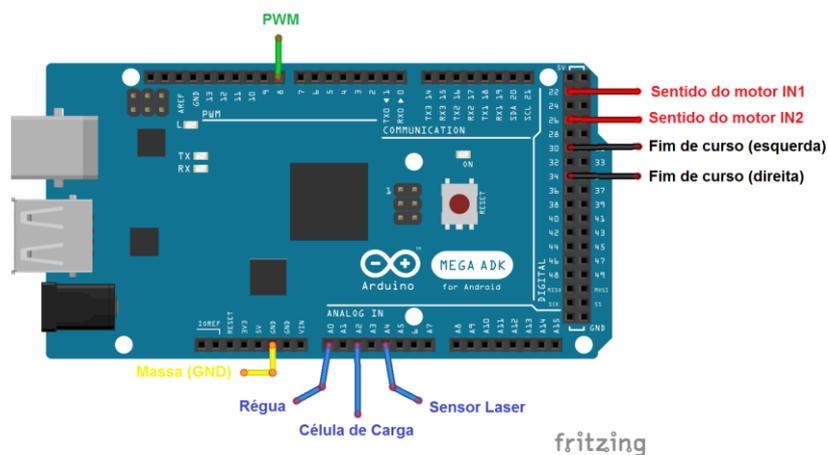
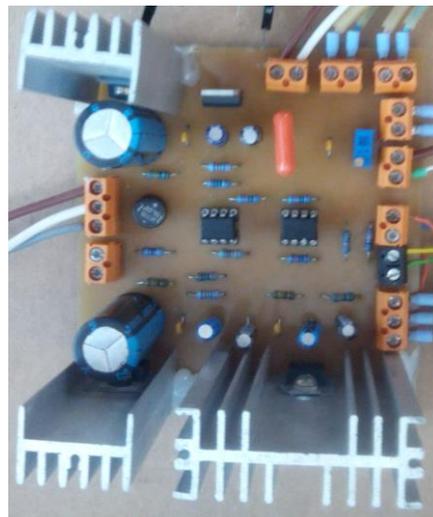


Figura 4.26 - Ligações à placa de Arduino

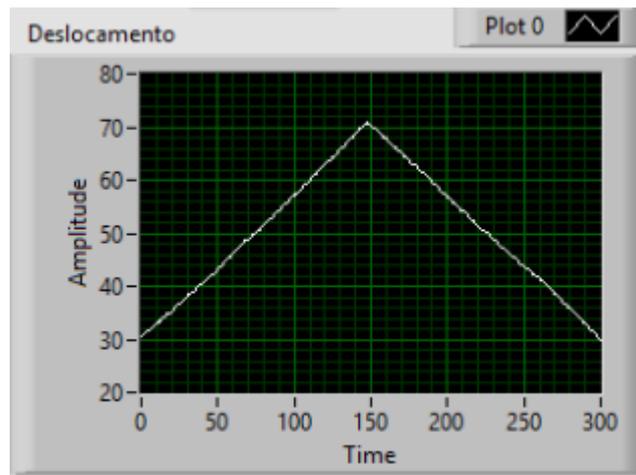
As ligações encontram-se referenciadas com cores diferentes para distinguir os diferentes conectores, onde a verde ocorre a ligação da saída PWM (canal 8) e juntamente com as ligações a vermelho, que definem o sentido do motor (canais digitais 22 e 24), é realizado o controlo do motor por intermédio de um driver, consultar capítulo 4.1. A ligação de cor amarela representa a conexão à massa da placa eletrónica, a preto são as ligações para ler o sinal proveniente dos fins de curso que garantem a segurança do sistema e por fim a cor azul são conectados os sinal analógicos provenientes do condicionamento de sinal realizado na placa eletrónica.

A montagem iniciou-se pela alimentação do motor, régua potenciométrica, sensor laser e fins de curso, onde se verificou que a tensão fornecida pela fonte alimentação desenvolvida é de 23,7 V, valor muito perto dos 24 V desejados. Na figura 4.27, encontra-se a ligação dos componentes referidos anteriormente à placa eletrónica.



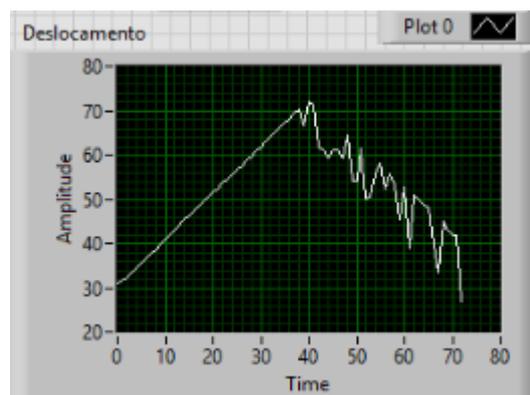
**Figura 4.27 – Ligação dos equipamentos à placa eletrónica**

De seguida, deu-se início à validação do condicionamento de sinal efetuado pela placa eletrónica. O primeiro componente a ser avaliado foi o motor, onde se verificou um bom funcionamento para um ciclo de trabalho a 100% do sinal PWM. Nesta situação, o seu movimento corresponde ao desejado, como se pode verificar na figura 4.28, o motor realiza um movimento contínuo da posição 30 à posição 70 e quando inverte o seu movimento mantém a sua linearidade.



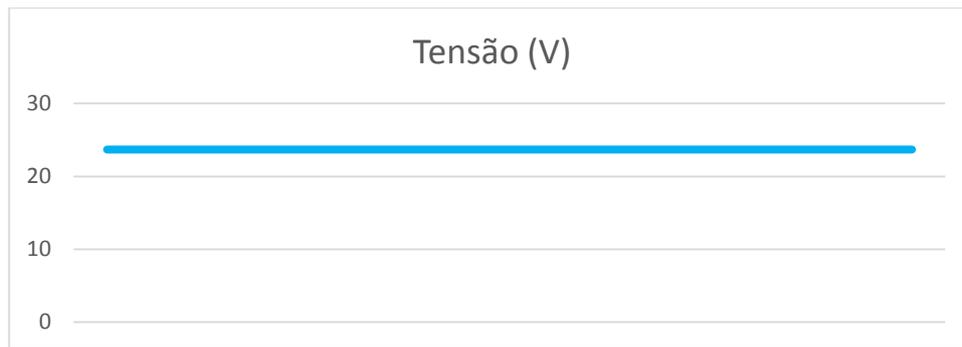
**Figura 4.28 - Movimento correto do motor**

Contudo, quando é pedido ao motor para se movimentar mais devagar, ou seja, para um sinal de alimentação com um ciclo de trabalho inferior aos 100 %, o seu deslocamento não é linear, ver figura 4.29.



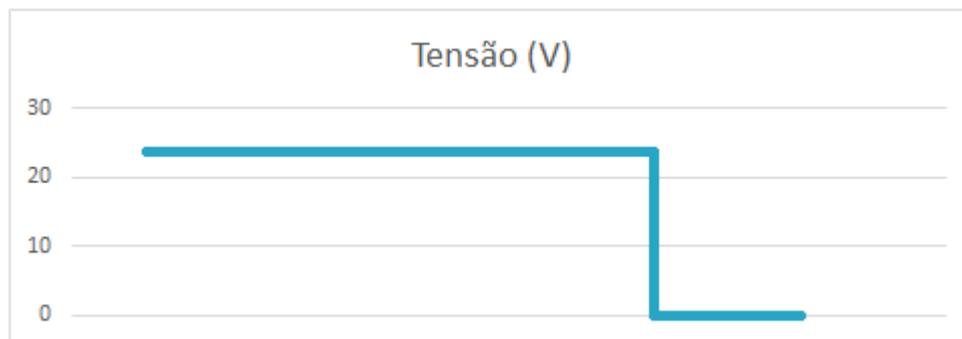
**Figura 4.29 - Movimento incorreto do motor**

O motor apesar de realizar um movimento aparentemente correto numa direção, quando inverte o movimento o seu deslocamento é realizado por impulsos provocando um mau funcionamento do mesmo. Analisando estes factos, conclui-se que o problema encontra-se na tensão fornecida ao motor, isto porque a tensão de alimentação do motor é contínua quando o sinal PWM é máximo, ou seja, o sinal PWM com ciclo de trabalho de 100 % garante que a tensão de 23.7 V que chega à ponte H é reencaminhada para a saída da mesma, realizando a alimentação do motor com toda a tensão que lhe é fornecida, como se pode verificar pelo gráfico da figura 4.30.



**Figura 4.30 - Alimentação do motor com ciclo de trabalho a 100%**

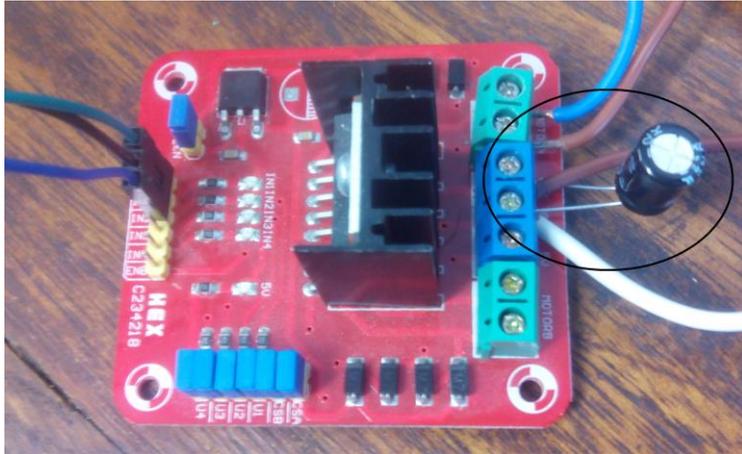
Contudo, quando se define um ciclo de trabalho inferior a 100 % para o sinal de PWM a tensão que chega ao motor deixa de ser contínua e passa a variar entre 23.7 V e 0 V fazendo o motor trabalhar sofre efeito de impulsos, ver figura 4.31.



**Figura 4.31 - Alimentação do motor com ciclo de trabalho a 80%**

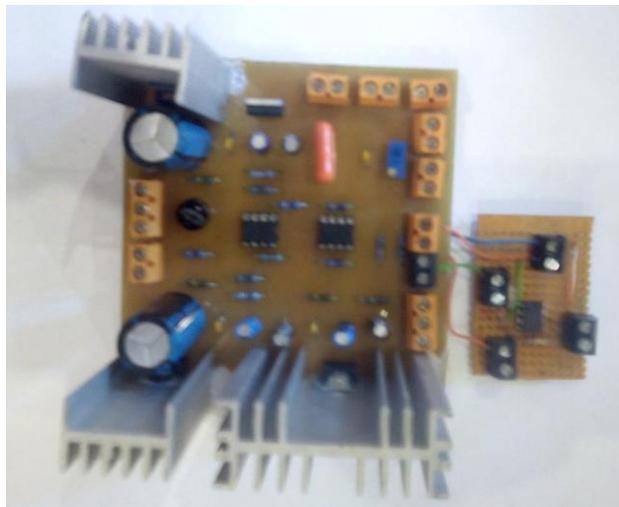
Como esta variação é muito rápida, na casa dos milissegundos, torna-se praticamente impercetível ao olho nu mas pode ser analisado com a régua potenciométrica, como já referenciado anteriormente na figura 4.29.

Para solucionar este problema foi inserido um condensador eletrolítico (não polarizado) na alimentação da ponte H para ajudar a garantir a estabilidade do sinal que chega ao motor, consultar figura 4.32.



**Figura 4.32 - Condensador para estabilizar sinal do motor**

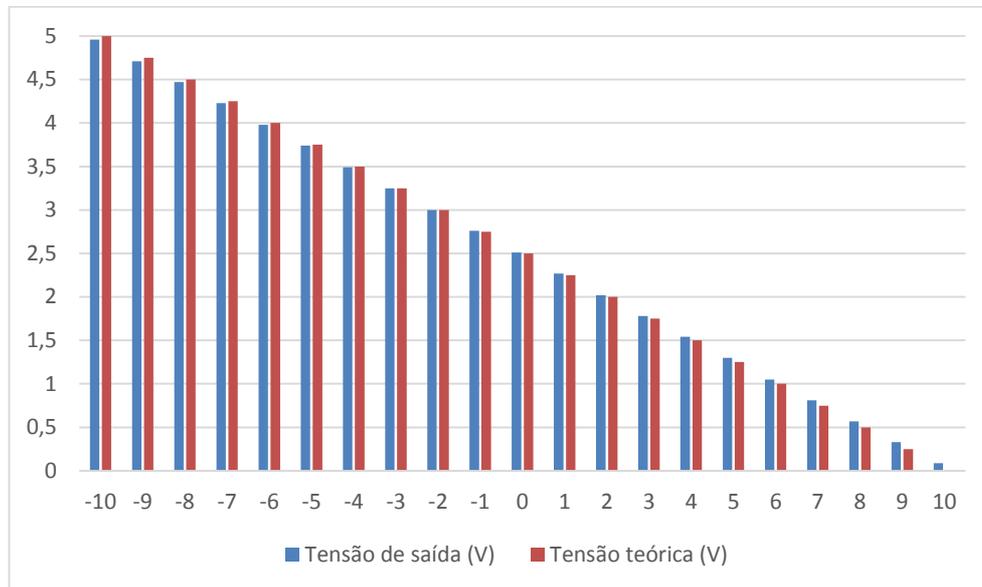
Após solucionar o problema da alimentação do motor e validar positivamente a alimentação de todos os outros componentes, foi montado o resto do *hardware* ligando as saídas dos sensores na placa eletrônica. Com o sistema devidamente montado segundo a figura 4.26, foi realizada a validação do condicionamento de sinal proveniente da célula de carga, onde foi necessário efetuar uma extensão à placa para acrescentar um amplificador operacional capaz de inverter a polarização do sinal de saída, consultar figura 4.33.



**Figura 4.33 - Otimização da placa**

Partindo desta otimização do sistema foi possível avaliar o sinal de saída através de variações de tensão de entrada provocadas por uma fonte de alimentação externa. O condicionamento do sinal encontra-se representado na figura 4.34 para diversos valores de

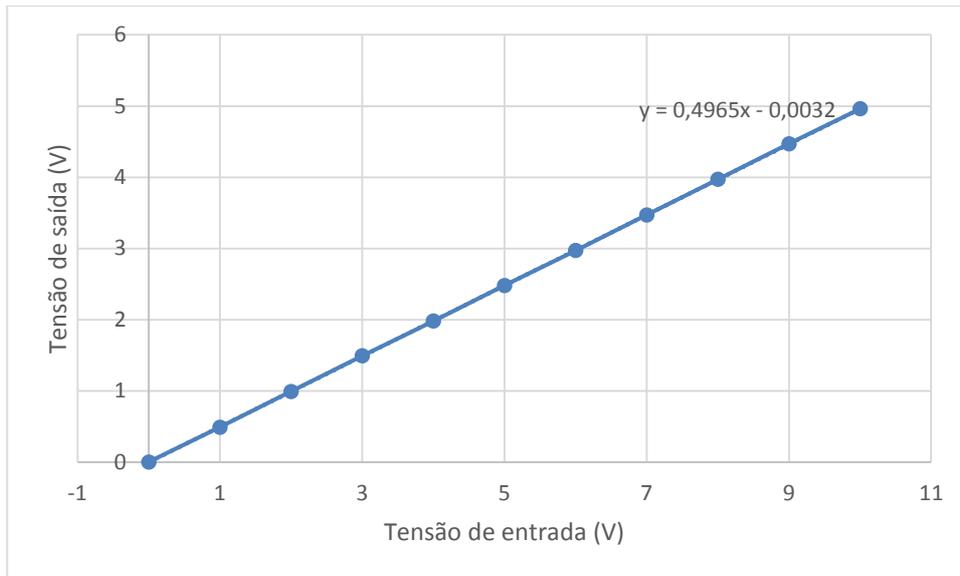
tensão, podendo ser avaliada a tensão de saída quando comparada com a tensão teórica definida pela equação 4.5.



**Figura 4.34 - Validação do condicionamento do sinal da célula de carga**

É possível concluir que a tensão de saída vai ao encontro do espectável quando comparado com os valores teóricos fornecidos pela equação 4.5, sendo que, o erro de leitura tende a diminuir para valores de entrada próximos de 0 V e aumentado de valor até 0.084 V ao aproximar-se dos 10 V de tensão de entrada. Contudo, tendo em conta esta pequena diferença resultante do condicionamento de sinal este erro de leitura será considerado desprezável.

A validação da placa ficará concluída com a análise do sinal proveniente da régua potenciométrica que será condicionado por um divisor de tensão referido no capítulo 4.2.1, onde o sinal será reduzido a metade como traduz a equação 4.2. Os resultados provenientes da validação deste processo encontram-se representados no gráfico presente na figura 4.35.



**Figura 4.35 - Validação do condicionamento do sinal da régua potenciométrica**

Analisando os resultados obtidos, equação 4.10, retira-se que o declive é de aproximadamente 0.5, o que traduz a conversão das tensões de entrada para metade do seu valor, podendo-se considerar o erro existente desprezável devido à reduzida influência no resultado final.

$$V_{out} = 0.4965V_{in} - 0.0032 \quad (4.10)$$

Validando assim a tensão de saída como sendo diretamente proporcional à tensão de entrada, isto significa que o sistema se encontra em pleno funcionamento e de acordo com os requisitos definidos inicialmente.

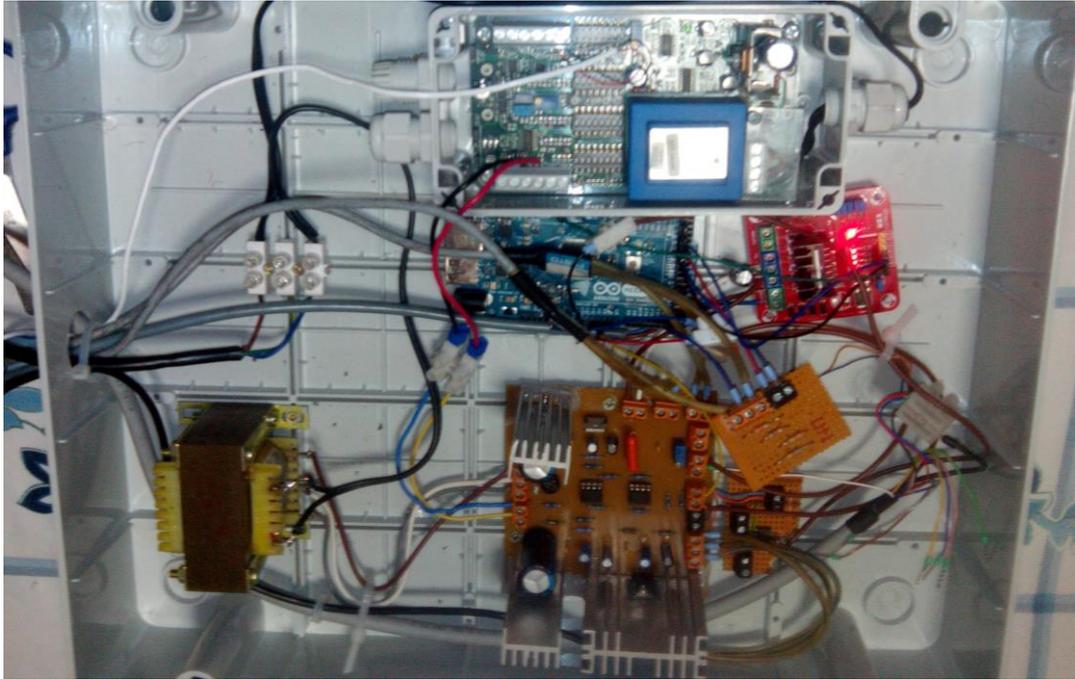
Após a validação da placa eletrónica o sistema de *hardware* é concluído com desenvolvimento de dois divisores de tensão responsáveis por converter o sinal digital dos fins de curso em valores capazes de serem reconhecidos pela placa de Arduino, este processo encontra-se descrito no capítulo 4.2.2. A sua concretização encontra-se na figura 4.36.



**Figura 4.36 - Divisor de tensão para os fins de curso**

Após montado o circuito dos divisores de tensão foi realizado um teste de validação, onde o valor de 24 V proveniente do fim de curso, quando ativo, é transformado em 4,1 V pelo divisor de tensão, permitindo a sua leitura por parte da placa de Arduino.

Por fim, o sistema de *hardware* encontra-se concluído e validado, onde as diversas partes referidas ao longo deste capítulo encontram-se assimiladas num único conjunto apresentado na figura 4.37.



**Figura 4.37 - Sistema de *hardware* montado**



## 5 *Software* do equipamento

O *software* é uma sequência de instruções programadas podendo ser executadas num computador ou máquina. Atualmente, no desenvolvimento de um equipamento é fulcral garantir um sistema automatizado capaz de responder com a maior eficácia possível e com elevada fiabilidade, assim, isto só é exequível se o *software* do equipamento se encontrar devidamente definido e ajustado para a aplicação desejada, tendo em conta todas as variáveis possíveis.

O *software* do Tribómetro Linear deve ser um sistema capaz de controlar um motor DC e realizar a aquisição de diversos sinais, sendo ainda capaz de realizar posteriormente o tratamento de sinal correspondente à conversão de cada sinal na sua grandeza física e apresentar esses valores ao utilizador. O desenvolvimento do *software* será realizado no programa *LabVIEW* da *National Instruments*, a escolha decaiu-se sobre esta ferramenta informática devido à sua sintaxe de programação gráfica, que torna simples visualizar, criar e desenvolver códigos para sistemas de engenharia. O *LabVIEW* oferece uma ampla variedade de recursos e ferramentas, desde assistentes interativos a interfaces configuráveis definidas pelo usuário. O esclarecimento relativo a este programa encontra-se descrito no capítulo 2.4.1, onde é explicado o seu funcionamento e suas aplicações.

### 5.1 Fluxograma do *software*

A conceptualização do *software* foi realizada com base em muitos testes de validação devido ao facto de se estar a utilizar um *kit* de ferramentas desenvolvido recentemente para realizar a comunicação entre a ferramenta informática *LabVIEW* e a placa de Arduino. A utilização destas duas plataformas em conjunto exige um maior esforço de investigação para compreender o seu funcionamento devido ao facto de não haver muita informação sobre esta aplicação. Assim, para se conseguir atingir o objetivo pretendido foram elaboradas diferentes estruturas algorítmicas para se conjugar o controlo do motor e aquisição de dados, pretendendo estudar o melhor esquema que venha garantir a maior eficiência entre estas duas plataformas. Na tabela 5.1 podemos analisar as diferentes soluções encontradas, onde é apresentada a sua descrição e características de funcionamento.

**Tabela 5.1 – Descrição das soluções possíveis para o desenvolvimento do *software***

<b>Solução</b>	<b>Descrição</b>	<b>Taxa de aquisição (Hz)</b>
<b>Tudo num ciclo</b>	Engloba o controlo do motor e a aquisição de dados num único ciclo	43
<b>2 Ciclos com uma taxa de aquisição</b>	Controla o motor num ciclo e realiza toda a aquisição num outro ciclo a funcionar em simultâneo	84
<b>2 Ciclos com duas taxas de aquisição</b>	Controla o motor e a aquisição do deslocamento num ciclo e realiza o resto da aquisição num outro ciclo a funcionar em simultâneo	94

Analisando esta tabela conclui-se que a solução de dois ciclos com duas taxas de aquisição seria mais eficiente devido a possuir uma maior taxa de aquisição de amostras, contudo, ao testar este ciclo revelou-se que a aquisição em ciclos diferentes possui a desvantagem de proporcionar uma dessincronização entre as aquisições. Desta forma, foi escolhida a solução de dois ciclos com uma taxa de aquisição devido a ser uma solução mais viável.

Após a definição da estrutura algorítmica foi desenvolvida a versão final do *software*, estando este dividido em oito módulos diferentes, cada um com uma função específica. No primeiro é realizada a conexão do *software* com a placa de Arduino, na segunda fase é confirmada a posição de referência, situada junto ao fim de curso mais distante do motor, onde por ordem do *software* o motor inicia um movimento na direção pretendida e quando atinge o sinal do fim de curso o software dá ordem para o motor parar.

No terceiro módulo são introduzidas as propriedades do ensaio, sendo elas, a carga normal aplicada no apalpador (N), a velocidade que o apalpador se irá movimentar (mm/s), a taxa de aquisição (amostras/s), o número de ciclos, a posição inicial (mm) e o percurso correspondente ao deslocamento do apalpador (mm). Quando o utilizador dá ordem de validação, o *software* irá pegar em cada propriedade e, sequencialmente, vai verificar se o valor introduzido pelo operador se encontra dentro dos parâmetros exigidos pelo sistema.

O quarto módulo inicia-se quando o utilizador pressiona o botão *Iniciar Aquisição*, dando ordem ao motor para se movimentar e por consequência começar a adquirir valores

provenientes dos sensores, este módulo funciona de acordo com as conclusões retiradas da tabela 5.1, dois ciclos a funcionar em simultâneo e uma única taxa de aquisição para todos os valores adquiridos, garantindo o sincronismo entre amostras e o início do movimento do motor.

Após a aquisição estar concluída é realizado no módulo cinco o tratamento de dados, onde é efetuada a média para o coeficiente de atrito e para a rugosidade. De seguida é perguntado ao utilizador se pretende guardar os dados num ficheiro, caso a resposta seja *não* avança diretamente para o módulo sete, onde é dada ao utilizador a possibilidade de realizar novo ensaio ou encerrar programa com ou sem a reposição do motor para a posição de referência. Por fim, caso se pretenda encerrar o programa é realizada no módulo oito a desconexão com a placa de Arduíno.

Para melhor compreensão do *software* será apresentado um fluxograma a descrever todas as fases e processos desenvolvidos no mesmo, tendo como intuito a esquematização do funcionamento integrando os diferentes módulos anteriormente referidos, consultar figura

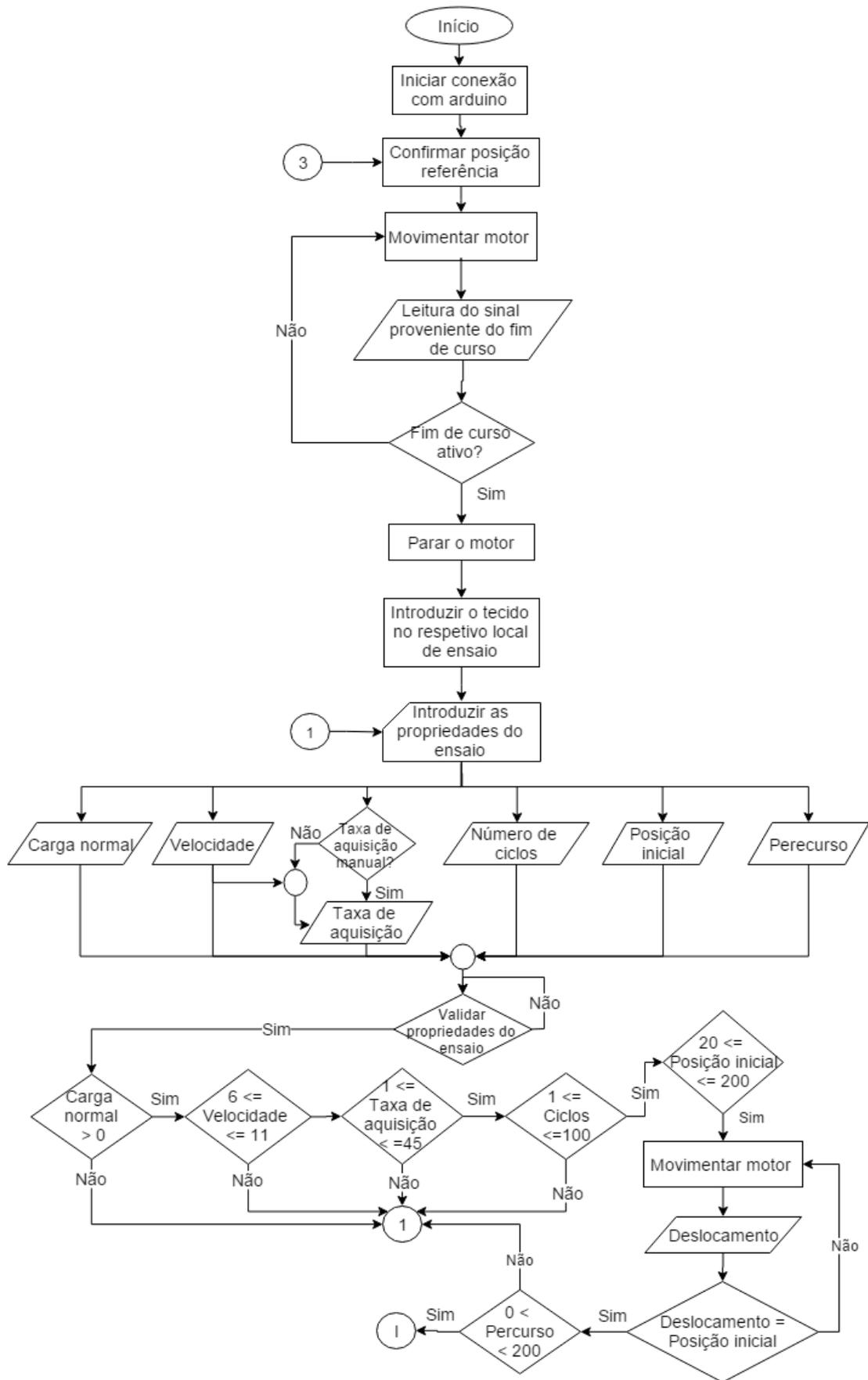


Figura 5.1 - Fluxograma parte 1

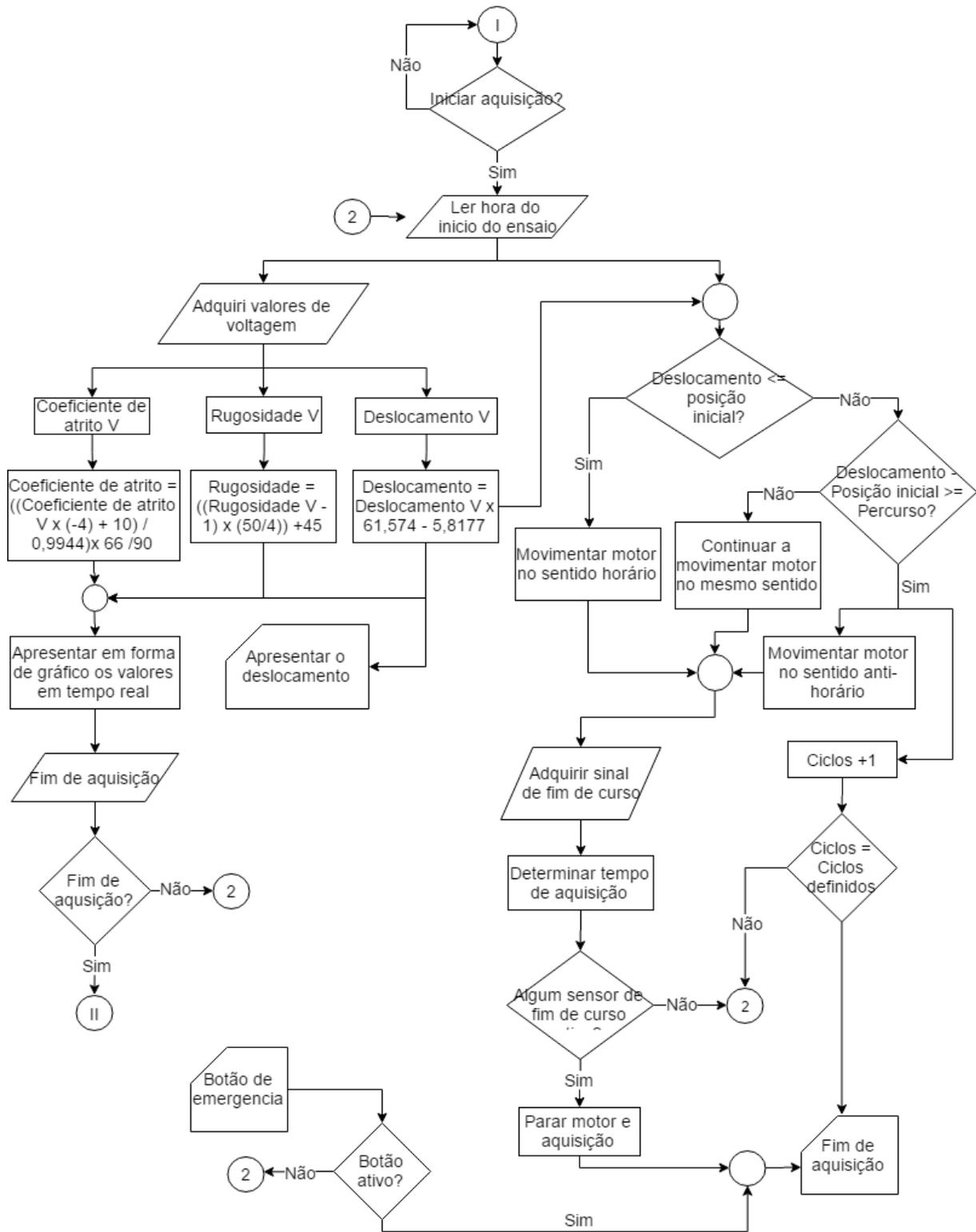


Figura 5.2 - Fluxograma parte 2

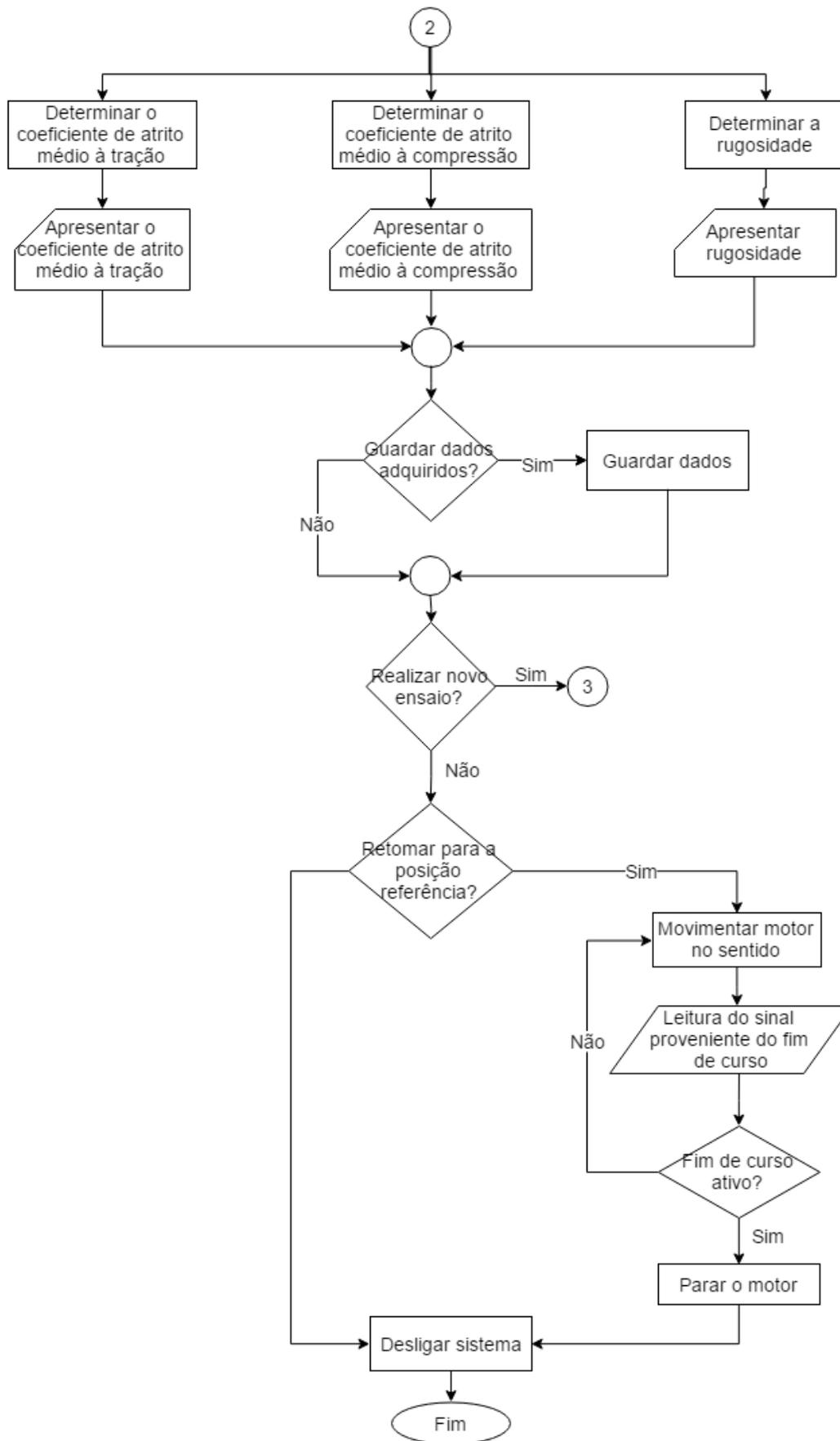


Figura 5.3 - Fluxograma parte 3

## 5.2 Painel de controlo do *software*

A par do algoritmo existe uma interface para o utilizador comunicar com o equipamento, neste painel é possível inserir as propriedades do ensaio e acompanhar a aquisição em tempo real. Para a monitorização de toda a informação foi criado um menu com três separadores, no primeiro é possível controlar o sistema, o segundo é utilizada para introduzir as propriedades do ensaio e por fim o último é utilizado para realizar uma análise gráfica de cada sinal isoladamente. Além deste menu existe um gráfico sempre visível independentemente do separador selecionado, representando o deslocamento, coeficiente de atrito e variação superficial ao longo do tempo, por baixo do gráfico é possível visualizar o coeficiente de atrito médio à tração, compressão e a rugosidade de cada ensaio.

Na figura 5.4 encontra-se apresentada a primeiro separador onde se dá a ordem para iniciar a aquisição pressionando o botão *INICIAR AQUISIÇÃO*, é possível visualizar a direção em que o motor se movimenta, o número de ciclos realizados, o tempo decorrido desde o início do ensaio, a frequência de aquisição atualizada, surge um LED ligado quando a aquisição é finalizada, é possível para a aquisição a qualquer momento pressionando o botão *PARAR AQUISIÇÃO* e também é possível visualizar erros que possam surgir no *software*.

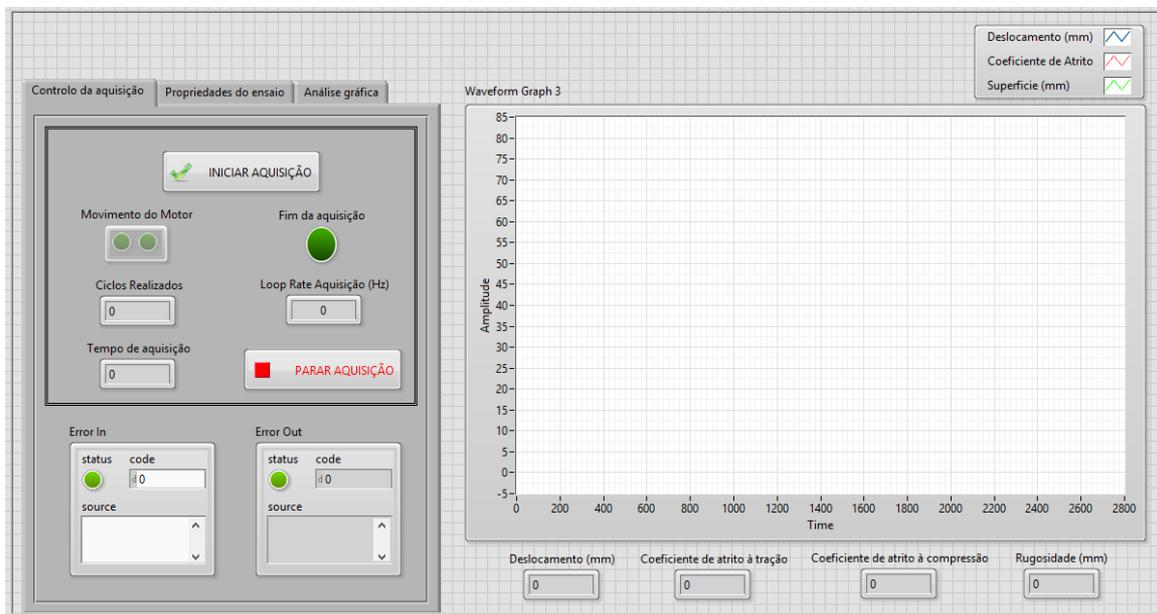


Figura 5.4 - Painel de controlo, separador 1

No seguinte separador surge o local respetivo à introdução das propriedades de ensaio, onde é introduzido a carga normal aplicada, o nome do tecido, a taxa de aquisição, o número

de ciclos, a velocidade, a posição inicial e o percurso. Neste separador existe um botão para validar as propriedades no fim de estarem inseridas consultar figura 5.5.

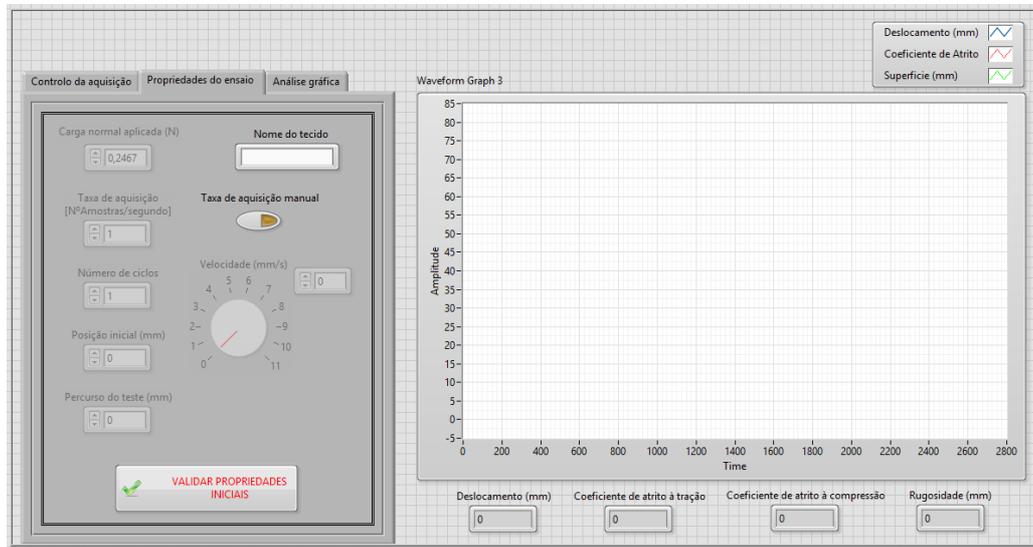


Figura 5.5 - Painel de controlo, separador 2

No terceiro separador o *software* possibilita a análise isolada de cada característica a estudar, onde é necessário selecionar a que se pretende visualizar no selecionador acima do gráfico, estando este pré-definido para visualizar o deslocamento. Este separador pode ser consultado durante e após ter terminado o ensaio, caso se pretenda visualizar esta informação após o ensaio ter terminado é necessário pressionar o botão FINALIZAR ANÁLISE GRÁFICA para prosseguir, consultar figura 5.6.

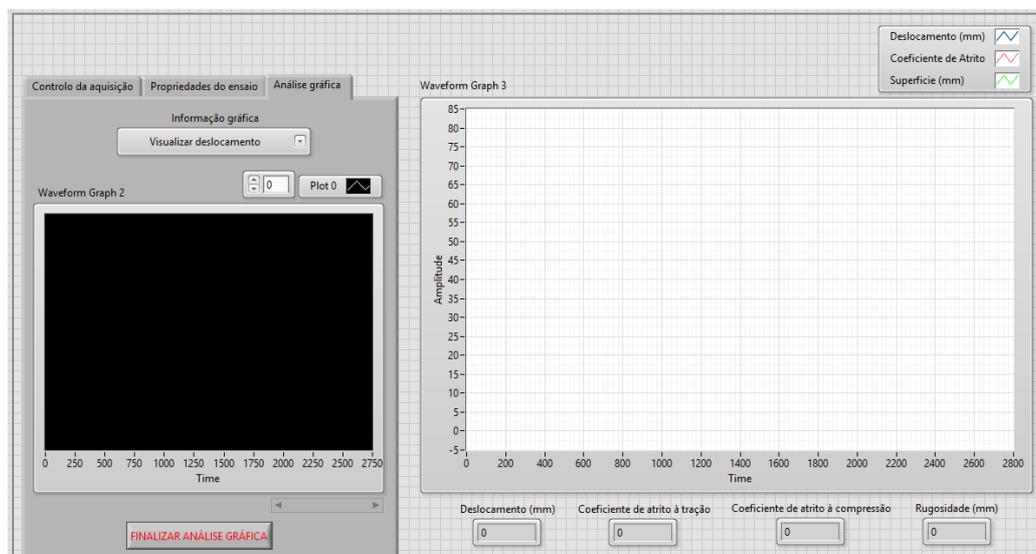


Figura 5.6 - Painel de controlo, separador 3

## 6 Calibração do equipamento

A calibração é uma etapa fundamental para um bom funcionamento de um equipamento de medição, onde por intermédio de procedimentos experimentais, sob condições específicas, num primeiro passo, estabelece a relação entre os valores da grandeza de medição proveniente de padrões e as indicações correspondentes associadas e num segundo passo, usa esta informação para estabelecer uma relação para obter o resultado de medição de uma indicação [19].

Ao longo deste capítulo serão calibrados os diferentes sensores através de um ajuste mecânico dos transdutores e por intermédio da aplicação desenvolvida no capítulo 5. De referi que será abordado a calibração da régua potenciométrica, as velocidades do motor DC, da célula de carga e por fim do sensor laser com base nas calibrações já efetuadas no projeto de “Estudo, Conceção, Desenvolvimento e Construção de um Tribómetro Linear para ensaios em superfícies flexíveis” [8].

### 6.1 Calibração da régua potenciométrica

Com a calibração deste componente pretende-se obter uma equação que traduza os valores de voltagem provenientes da régua em deslocamento do motor, para ser empregue no *software* desenvolvido no capítulo 5. Para isso, com ajuda do *software Excel* foi produzido um gráfico com base em informação recolhida em ensaios, onde para os primeiros 12 centímetros da régua foram verificados alguns pontos de voltagem e correspondente medida em milímetros, os resultados apresentam-se no gráfico da figura 6.1.

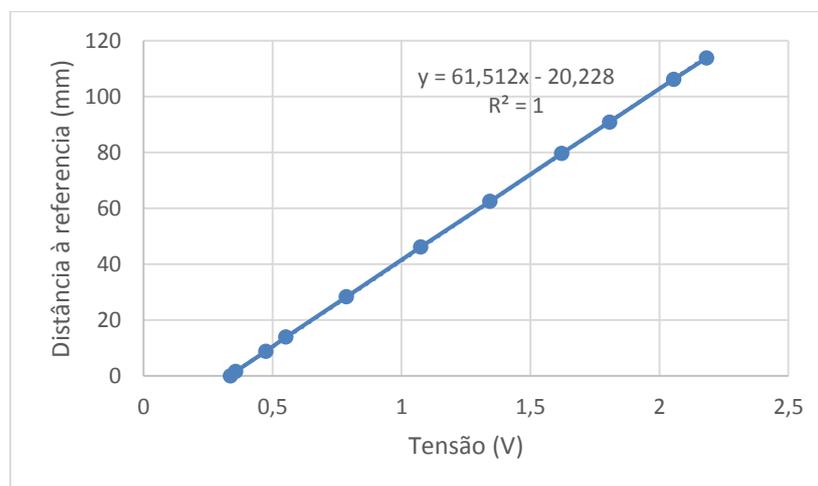


Figura 6.1 – Calibração da régua potenciométrica

Só foram recolhidos valores dentro da gama referida anteriormente devido à utilização de um paquímetro (possui uma pequena gama de medição), com intuito de conseguir maior precisão quando comparado a uma régua. Contudo, esta última foi utilizada para validar o resto da régua potenciométrica, onde se verificou a continuidade da linearidade apresentada na figura 6.1.

Com base no gráfico da figura 6.1 obteve-se uma equação por intermédio de interpolação linear, traduzindo o deslocamento do motor em milímetros,  $y$ , com base na voltagem proveniente da régua,  $x$ , esta relação encontra-se na equação 6.1.

$$y = 61,512x - 20,228 \quad (6.1)$$

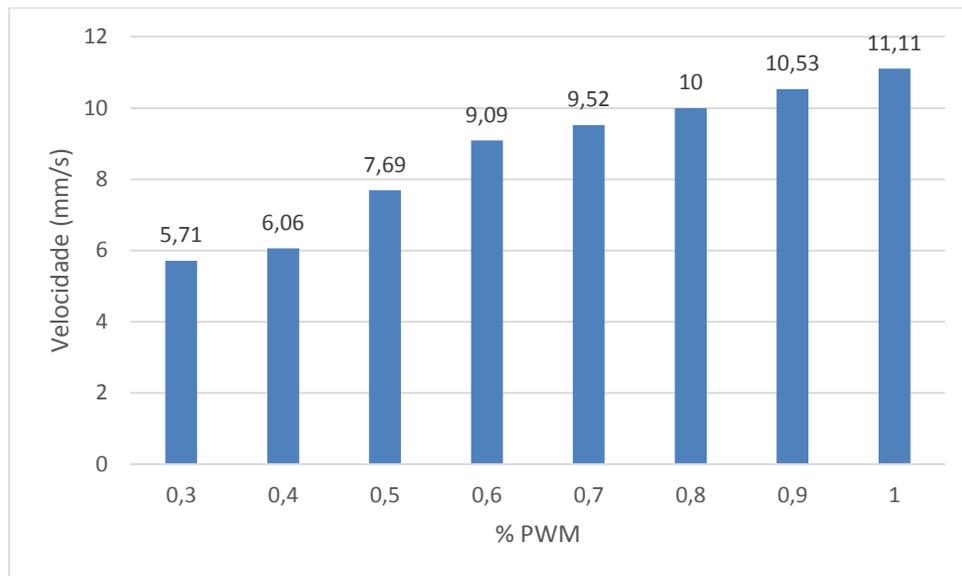
Na calibração da régua surgiram alguns problemas na obtenção das tensões devido ao ruído existente no sinal proveniente do fornecimento de corrente.

## 6.2 Calibração de velocidades

O controlo de velocidade é dependente da voltagem que se fornece ao motor DC e esta controlada pela carga de trabalho do sinal de PWM. Desta forma, foi necessário realizar diversos testes com diferentes percentagens de carga de trabalho e em cada teste calcular a velocidade média do motor. Para isso recorreu-se ao *software LabVIEW* para realizar o controlo do motor em diferentes cargas de trabalho do sinal PWM e contar o tempo de ensaio, onde foi definido um percurso de teste igual a 200 milímetros para todos os ensaios. Partindo destes dados, a velocidade média (mm/s) de cada ensaio, equação 6.2, é determinada pelo quociente entre o deslocamento (mm) e o tempo de ensaio (s) para cada carga de trabalho, onde o deslocamento é controlado pela régua da mesa, equação 6.1.

$$y = \frac{\text{Deslocamento (mm)}}{\text{Tempo de ensaio (s)}} \quad (6.2)$$

Com ajuda do *software Excel* foi realizado um gráfico com diferentes velocidades adquiridas nos diversos ensaios, consultar figura 6.2.

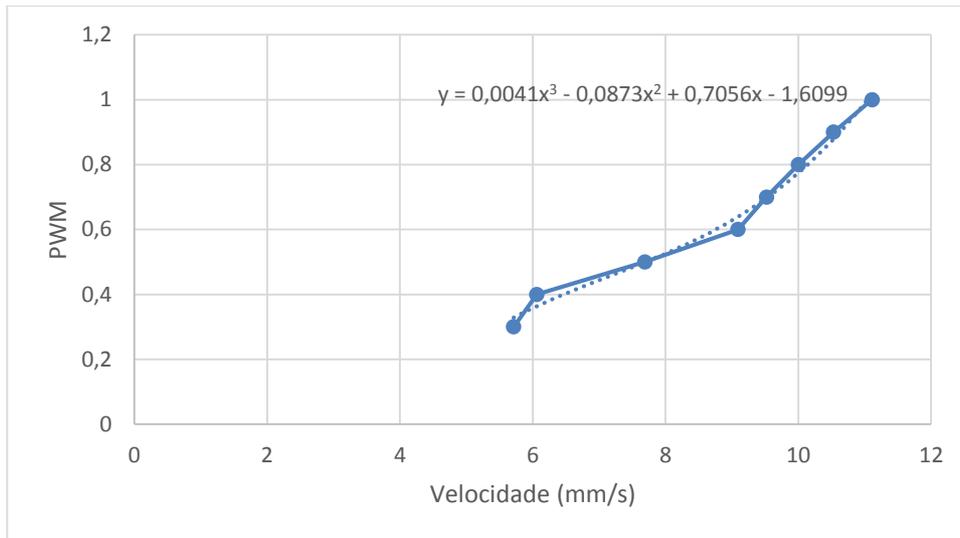


**Figura 6.2 - Calibração das velocidades**

Como pode-se verificar calibrou-se oito velocidades de 30 a 100% de carga de trabalho, onde para valores inferiores a 30% o motor respondia com esforço ao movimento solicitado devido à falta de alimentação, considerando-se assim 5,71 mm/s como velocidade mínima a aplicar ao motor.

No entanto ao realizar esta calibração observou-se uma linearidade entre os 60% e os 100% de carga de trabalho, com uma variação média de 0,5 mm/s a cada 10% de carga de trabalho. Para valores abaixo dos 60% de carga de trabalho não se verifica a relação anteriormente referida, apresentando-se uma queda mais acentuada, aproximadamente de 3 mm/s, nas variações de 60% para 40% de carga de trabalho, já na última variação de carga de trabalho a resposta do motor volta a distinguir-se das últimas duas situações, onde apresenta uma queda de velocidade a rondar os 0,35 mm/s.

Analisada a variação de velocidade e concluindo que esta não apresenta uma linearidade constante, foi definida uma equação que traduzisse uma aproximação aos resultados apresentados anteriormente relacionando a velocidade com a carga de trabalho, esta correspondência será apresentada na figura 6.3.



**Figura 6.3 - Polinómio das velocidades**

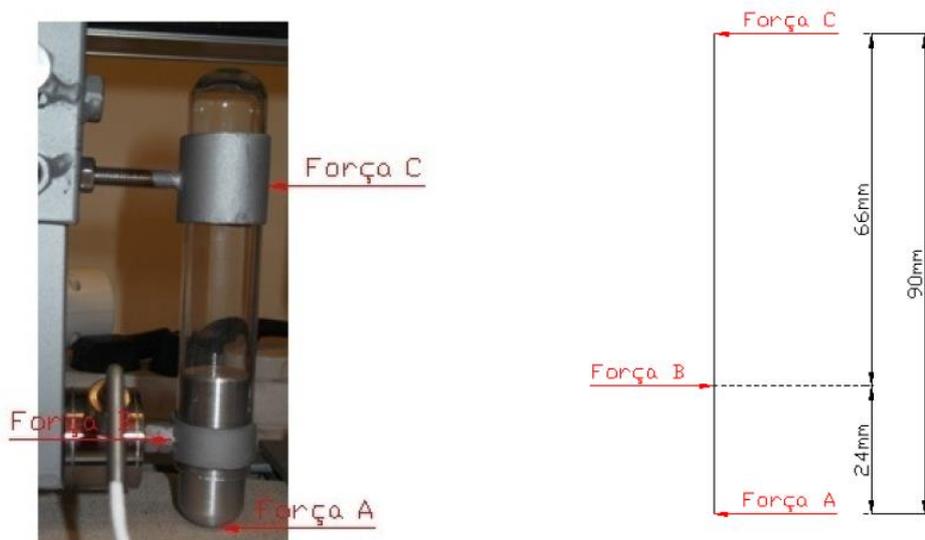
Partindo dos resultados práticos obtidos definiu-se a equação 6.3, representada a traço interrompido na figura 6.3. Esta relação presente é baseada num polinómio de terceiro grau, onde  $y$  corresponde ao coeficiente percentual da carga de trabalho e a variável  $x$  corresponde à velocidade do motor a ser introduzida pelo operador.

$$y = 0,0041x^3 - 0,0873x^2 + 0,7056x - 1,6099 \quad (6.3)$$

### 6.3 Calibração da célula de carga

Devido à elevada sensibilidade deste equipamento não foi possível realizar no Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade do Minho a sua devida calibração, por isso, foi utilizada a curva da calibração fornecida pelo fabricante [8].

A calibração deste sensor foi baseada no procedimento efetuado quando desenvolvido o equipamento, sendo um processo completamente manual onde se pretende efetuar um equilíbrio de forças resultante do sistema mecânico implementado. Na figura 6.4 encontra-se representada uma esquematização das forças aplicadas na situação referida.



**Figura 6.4 - Diagrama de corpo livre das forças aplicadas no sistema**

Tendo em conta o diagrama de corpo livre foi realizado um estudo ao somatório dos momentos de força em relação ao ponto C, onde o somatório dos momentos é igual a zero. Da análise efetuada resultou a equação 6.4.

$$F_A = \frac{F_B \times dB}{dA} \quad (6.4)$$

Onde:

$F_A$  = Força A (N)

$F_B$  = Força B (N)

$dA$  = Distância do ponto C a A (mm)

$dB$  = Distancia do ponto C a B (mm)

De seguida, tendo em atenção os resultados anteriormente obtidos, equação 6.4, foi realizada a calibração manual do sensor, em tempo real, segundo a leitura do sinal emitido pelo próprio em V, consultar figura 6.5.



**Figura 6.5 - Calibração manual da célula de carga**

O resultado desta calibração pode ser consultado na figura 6.6, onde é apresentado sob forma de gráfico a tensão da célula de carga após condicionamento de sinal em função do tempo. O valor desejado para esta calibração é 2,5 V que correspondem aos 0 V antes do condicionamento de sinal realizado pela equação 4.5, deduzida no capítulo 4.2.4.

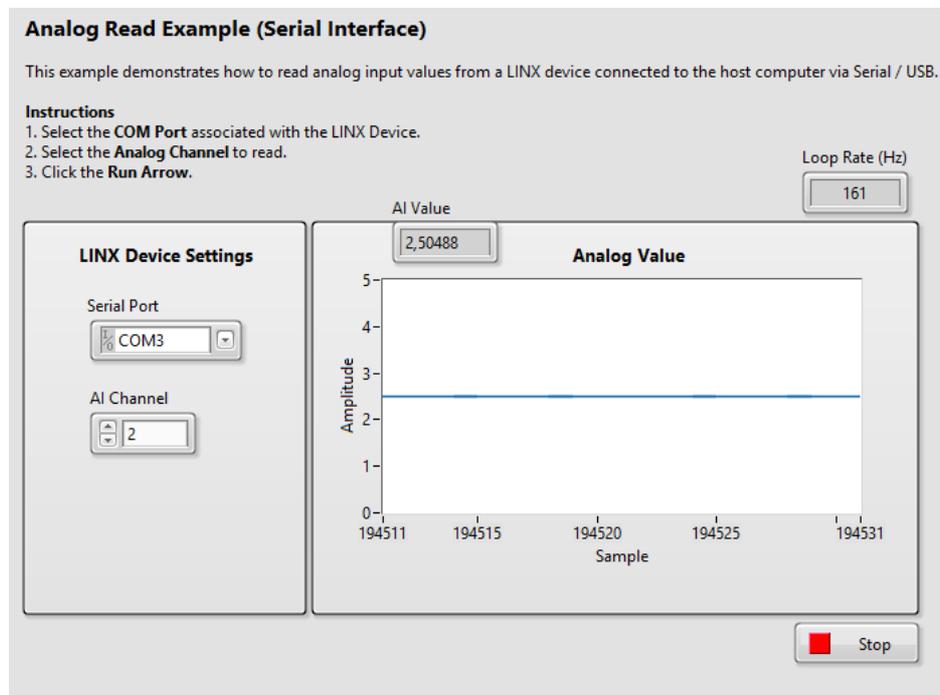


Figura 6.6 - Calibração da célula de carga

Perante os resultados presentes é possível concluir que o sensor encontra-se perfeitamente calibrado e estável, tendo-se conseguido obter 2,50 V de tensão como pretendido, podendo ser desprezado o ruído existente.

Para finalizar a calibração deste transdutor foi realizada no *software* a conversão do sinal de tensão proveniente da célula de carga para o coeficiente de atrito. Esta transformação inicia-se por reverter o condicionamento de sinal aplicado pela equação 4.5 por intermédio da equação 6.5, onde  $y$  corresponde à tensão antes do condicionamento do sinal e  $x$  corresponde à tensão após condicionamento de sinal.

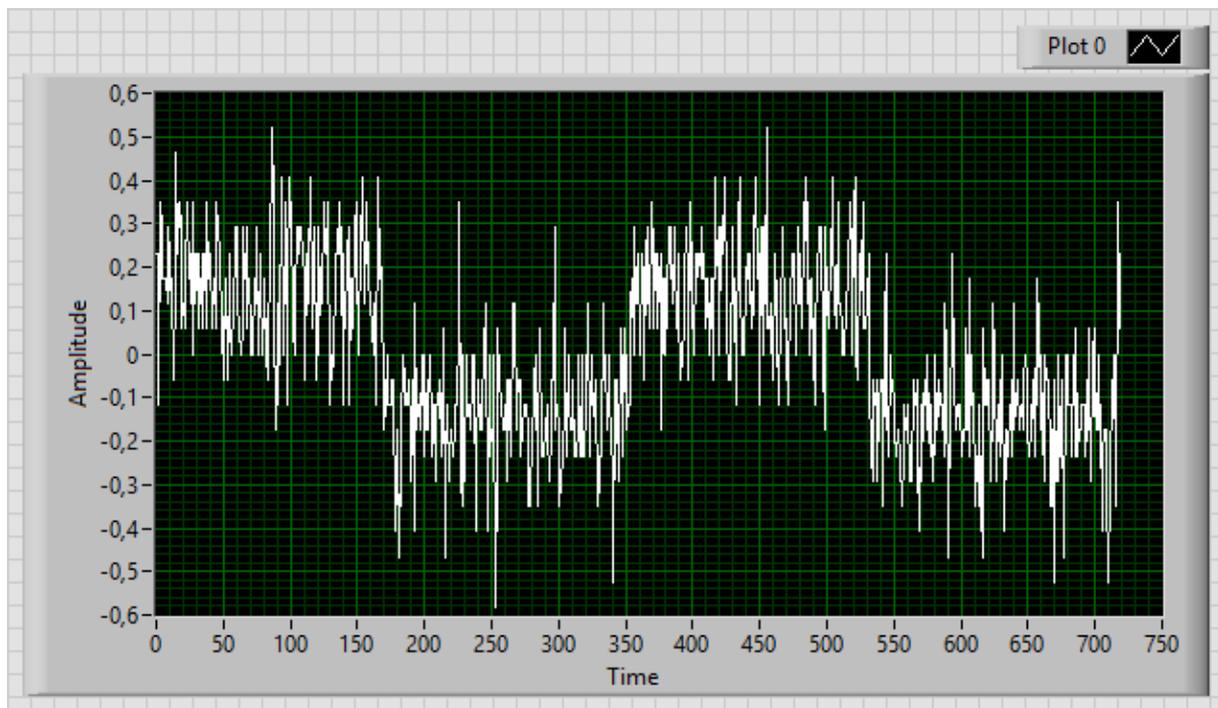
$$y = -4x - 10 \quad (6.5)$$

Após este descondicionamento é realizado a conversão do sinal de tensão em volts para força de atrito em Newton, obtendo-se a força correspondente à tensão emitida pela célula de carga, por intermédio da equação 6.4 é calculada a força de atrito e por fim é determinado o

coeficiente de atrito segundo a equação 2.1, onde N corresponde à força normal aplicada, nesta situação o próprio peso do apalpador, 0,245 N.

$$\mu = \frac{F_{atrito}}{N} \quad (2.1)$$

Para verificar a fiabilidade desta calibração foi realizado um ensaio sob uma amostra de vidro devido ao seu baixo coeficiente de atrito, o resultado apresenta-se na figura 6.7.



**Figura 6.7 - Resultados da calibração da célula de carga no vidro**

O resultado encontra-se dentro do espetável atingindo um coeficiente de atrito médio de 0,153 e de 0,145 quando em tração ou compressão, respetivamente. Podendo-se considerar estes resultados são bastante aceitáveis.

## 6.4 Calibração do sensor laser

Devido à alta sensibilidade deste equipamento, não existem condições para calibrar este equipamento no Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade do Minho, por isso, foi utilizada a curva de calibração fornecida pelo fabricante [8].

A calibração deste componente encontra-se diretamente relacionada com o posicionamento do mesmo, consultar figura 6.8. Assim, este foi posicionado de forma a apontar o feixe laser para o percurso do apalpador e garantir a distância recomendada pelo fornecedor dentro do intervalo de medição.



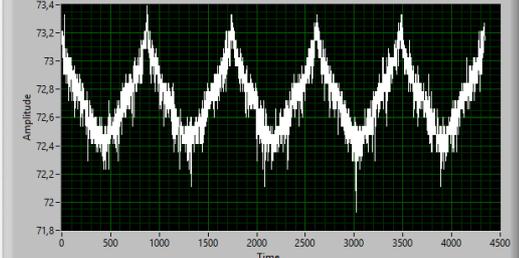
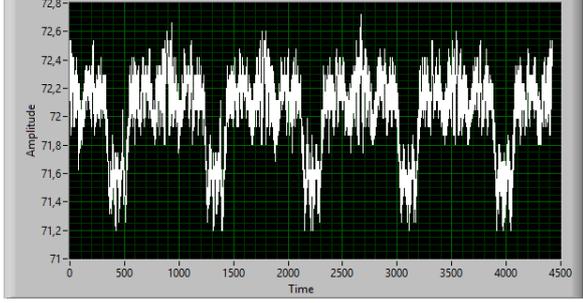
**Figura 6.8 - Posicionamento do sensor laser**

De seguida, foi realizada a conversão do sinal de tensão emitido pelo sensor em milímetros, onde este valor corresponde à distância da superfície da amostra à posição de referência de medição, esta posição encontra-se a 45 mm abaixo do sensor. Desta forma, será necessário no *software* adicionar 45 mm ao valor obtido na leitura. Relativamente à conversão, esta será realizada conforme a informação fornecida pelo fabricante onde 1 V corresponde a 0 mm e 5 V correspondem a 50 mm, seguindo esta linearidade e tendo em atenção a posição de referência à medição, obtém-se a equação 6.5. Onde,  $y$  corresponde à distância em milímetros e  $x$  corresponde à tensão de leitura do sensor.

$$y = (x - 1) \cdot \frac{50}{4} + 45 \quad (6.5)$$

A calibração deste sensor é finalizada com um ensaio sobre duas amostras de tecido (figura 6.9 e figura 6.11) com características superficiais distintas, os resultados encontram-se na tabela 6.1 segundo as imagens 6.10 e 6.12.

**Tabela 6.1 - Resultados à calibração do sensor laser**

Amostra	Análise superficial
	
Figura 6.9 - Amostra 1	Figura 6.10 - Resultados amostra 1
	
Figura 6.11 - Amostra 2	Figura 6.12 - Resultados amostra 2

Os resultados encontram-se dentro do esperado, apesar da existência de algum ruído, é de notar que a análise superficial de cada amostra vai de encontro às características do próprio tecido. No primeiro caso com uma amostra mais suave pode-se denotar uma baixa variação na rugosidade superficial, já na segunda amostra a rugosidade característica do tecido encontra-se bem destacada. Também é importante salientar a repetibilidade em ambos os ensaios perante os resultados no decorrer dos 5 ciclos efetuados.



## 7 Testes de validação do equipamento

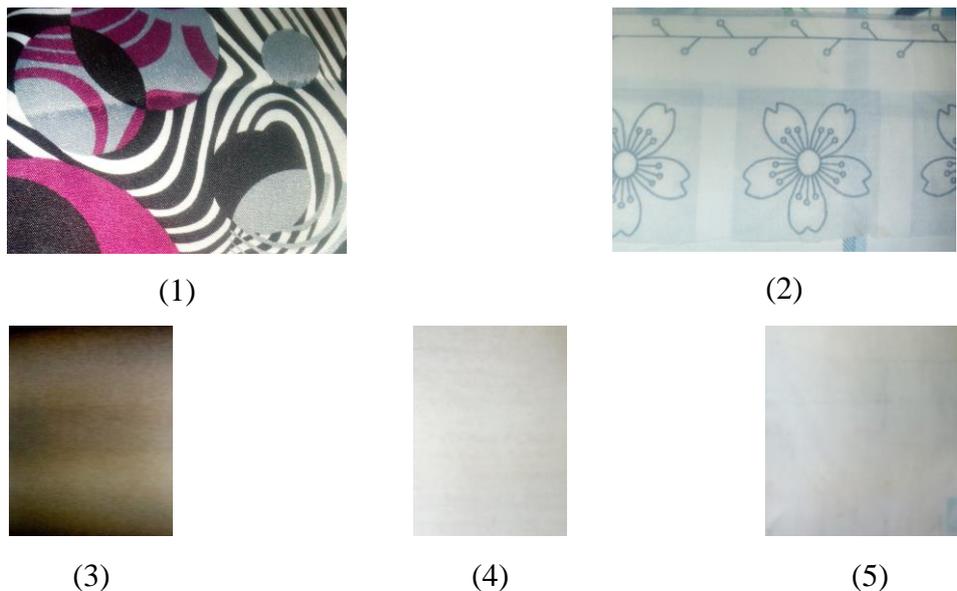
Neste capítulo serão abordados testes de validação do equipamento, realizando diversos ensaios com objetivo de autenticar os procedimentos operacionais, processos e verificar se o sistema se encontra operacional de forma a fornecer resultados credíveis e válidos. Para realizar estes testes será utilizado um protocolo de ensaio que será descrito ao longo deste capítulo, descrevendo os testes e critérios de aceitação.

Para comprovar que o sistema desenvolvido fornece dados fiáveis, estes serão comparados com dados obtidos noutra equipamento existente na Universidade do Minho, FricTORQ (análise a este equipamento encontra-se descrita no capítulo 2.2). Os ensaios serão realizados sob os mesmos parâmetros e critérios, determinados com base no número de amostras recolhidas no equipamento FricTORQ. Assim, definindo 830 amostras para cada ensaio realizado no FricTORQ para vinte segundos de ensaio e como este só analisa o tecido num único sentido, foi deduzida a taxa de aquisição, velocidade e percurso correspondente ao Tribómetro Linear, considerando 830 amostras quando a célula de carga se encontra sujeita à tração e outras tantas quando se encontra à compressão. Nesta análise também foi tido em atenção o comprimento das amostras que influencia o percurso máximo do ensaio. Após conjugar diversos valores considerou-se os parâmetros presentes na tabela 7.1 para todos os ensaios.

**Tabela 7.1 - Parâmetros de ensaio**

<b>Velocidade (mm/s)</b>	<b>Percurso (mm)</b>	<b>Ciclos</b>	<b>Taxa de aquisição (amostras/s)</b>
8	80	3	28

Os ensaios no FricTORQ e no tribómetro linear foram realizados utilizando as mesmas amostras, estando estas representadas na figura 7.1 Dentro das condições possíveis foram recolhidas amostras com diferentes propriedades para tentar realçar essas mesmas diferenças a nível tribológico. Desta forma, a amostra 1 é um tecido de viscose estampada, o segundo é uma amostra de tecido liso, a terceira é um poliéster, a quarta amostra é linho e a última será uma amostra com maior grau de elasticidade.

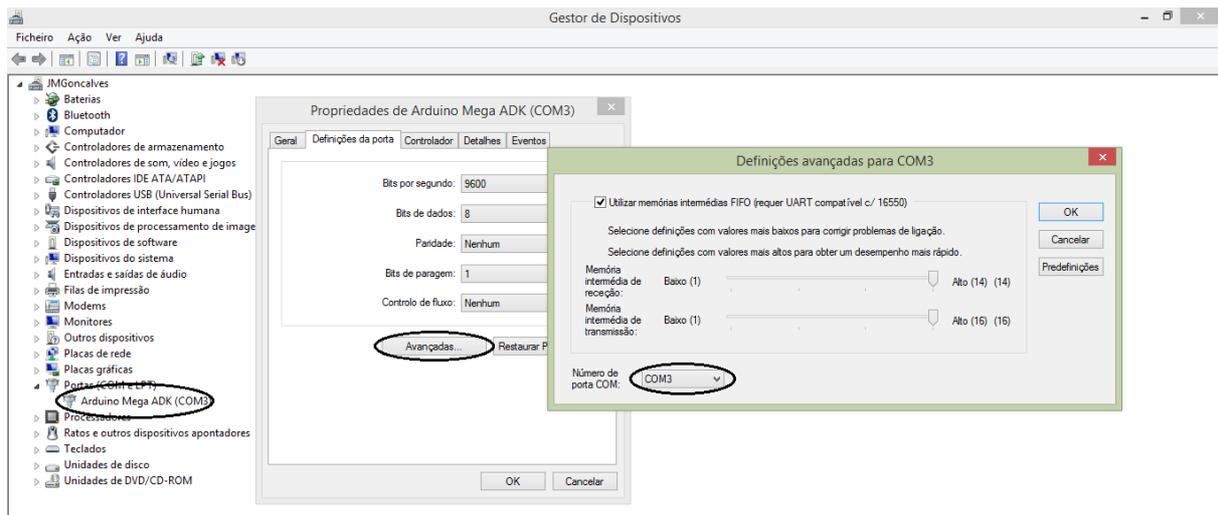


**Figura 7.1 - Amostras a utilizar nos ensaios, (1) viscose, (2) lençol, (3) poliéster, (4) linho, (5) pano de óculos**

## 7.1 Protocolo de ensaio

O protocolo de ensaio corresponde a um procedimento normalizado onde são referenciadas as diferentes etapas para concretizar um ensaio válido, desde a conexão do computador à placa de Arduino, introdução dos parâmetros de ensaio, até à conclusão do ensaio e gravação dos dados obtidos.

Os ensaios podem ser realizados em qualquer computador desde que possuam o *software* desenvolvido para o equipamento, caso isto se verifique é necessário averiguar qual a porta que se encontra em conexão com a placa de Arduino, para tal é necessário ir à seguinte localização: Painel de Controlo\Sistema e Segurança\Sistema. De seguida será escolhida a opção Gestor de Dispositivos e na secção PORTA COM e LPT seleccionar as propriedades da placa de Arduino. Na figura 7.2 encontra-se representado e circunscrito os passos seguintes para verificar o número da porta COM de conexão, esta deve estar seleccionada como porta COM3, caso contrário deve ser alterada.



**Figura 7.2 - Conexão Arduino/LabVIEW**

Após verificar a conexão poderá ser iniciada a aplicação, estando esta estruturada em diferentes etapas, a primeira indicação a surgir é referente à verificação da posição de referência.

Quando o motor se encontrar na posição de referência irá surgir outra informação no ecrã a indicar que introduza a amostra de tecido na posição correta. A amostra deve ser colocada debaixo do apalpador e mantida sobre uma tensão de forma a evitar amarrotamento do tecido, como se pode verificar na figura 7.3.



**Figura 7.3 - Posicionamento da amostra**

Após inserir o tecido no respetivo local deve ser validada esta etapa, pressionando o botão *OK*. De seguida surge outra indicação no ecrã a informar para introduzir as propriedades do ensaio, estas características devem ser inseridas no respetivo menu indicado na figura 7.4.



**Figura 7.4 - Inserir propriedades do ensaio**

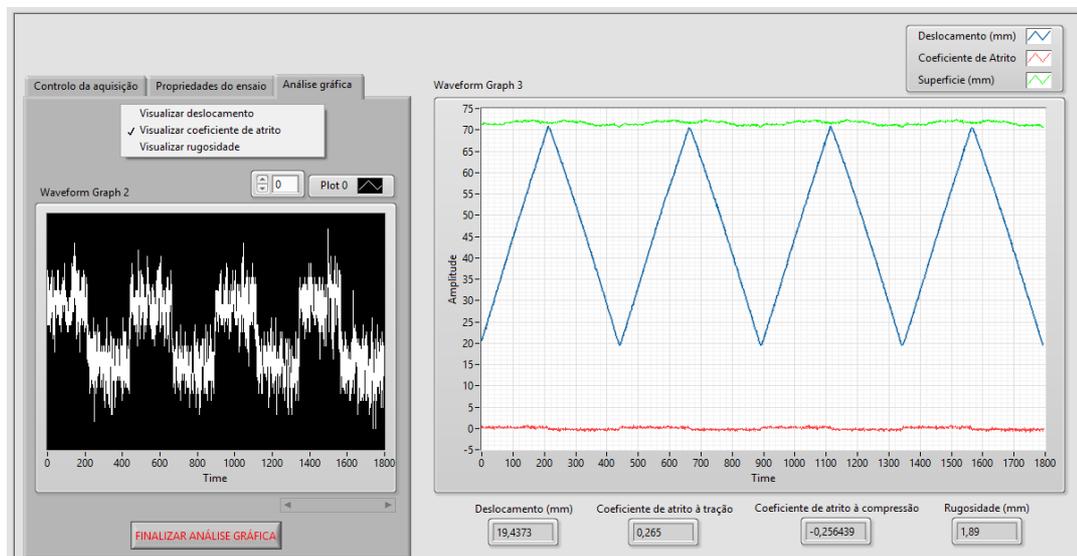
Este menu é dirigido especificamente para introduzir as propriedades do ensaio, tais como:

- Carga normal aplicada – Valor pré-estabelecido de acordo com o peso do apalpador;
- Identificação da amostra – Caso se pretenda guardar os dados no final, o nome aqui atribuído será guardado juntamente com os dados;
- Velocidade – Velocidade linear desejada para o ensaio, podendo variar no intervalo de [5;11] mm/s;
- Taxa de aquisição – Esta propriedade pode ser atribuída automaticamente ou manualmente conforma a indicação dada no botão *Taxa de aquisição manual*. Caso este botão se encontre ativo os valores são introduzidos pelo utilizador, com um valor máximo de 40 amostras/segundo), caso contrário é atribuído um valor conforme a velocidade selecionada, mantendo sempre uma taxa de 4 amostra/milímetro;

- Número de ciclos - Esta propriedade define o número de ciclos pretendidos pelo utilizador, tendo como valor máximo 100 ciclos;
- Posição inicial – Aqui é definido a posição inicial para começar o ensaio, este valor deve pertencer ao intervalo de 0 a 200 milímetros;
- Percurso do teste – Esta propriedade define o comprimento do percurso a aplicar ao ensaio; este valor deve se encontrar entre a posição inicial e os 300 milímetros (percurso máximo do motor).

Após introduzir todas as propriedades do ensaio é necessário carregar no botão *VALIDAR PROPRIEDADES INICIAIS* para verificar se as características se encontram em conformidade com os requisitos do equipamento. Caso alguma propriedade não se encontre válida deve ser introduzido um novo valor, em caso afirmativo volta-se ao menu inicial para dar início à aquisição, pressionando o botão *INICIAR AQUISIÇÃO*.

Durante o ensaio é possível visualizar os dados recolhidos em tempo real pelo gráfico presente. Caso se pretenda analisar com maior rigor a variação de cada aquisição isoladamente, deve de escolher no menu a opção *ANÁLISE GRÁFICA*, como se pode verificar na figura 7.5.



**Figura 7.5 - Análise gráfica**

Finalizado o ensaio irá surgir o coeficiente de atrito da amostra analisada quando sujeita a tração e compressão por parte da célula de carga. Nesta fase do ensaio é possível continuar a analisar os gráficos isoladamente na opção *ANÁLISE GRÁFICA*. Para avançar à seguinte fase é necessário selecionar o botão *FINALIZAR ANÁLISE GRÁFICA* no menu *ANÁLISE GRÁFICA*, consultar figura 7.4.

Por fim irá surgir informação no ecrã a perguntar se pretende guardar os dados, caso responda sim será reencaminhado para uma janela onde poderá guardar os dados em qualquer local, caso contrário avança para a próxima etapa onde surgirá outra informação a perguntar se pretende realizar novo ensaio, caso responda sim irá realizar de novo este procedimento, caso contrário irá finalizar a aplicação com a possibilidade de retomar o motor à posição de referência.

## 7.2 Discussão de resultados

Neste capítulo serão analisados e discutidos os resultados adquiridos nos ensaios realizados, onde será estudado em primeiro lugar o coeficiente de atrito e de seguida a rugosidade de cada amostra e relações que possam existir com o coeficiente de atrito.

Para melhor interpretação dos ensaios realizados no tribómetro linear encontra-se na figura 7.6 uma ilustração do momento inicial aos ensaios no tribómetro linear.



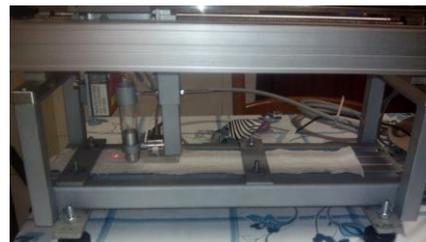
(a)



(b)



(c)



(d)

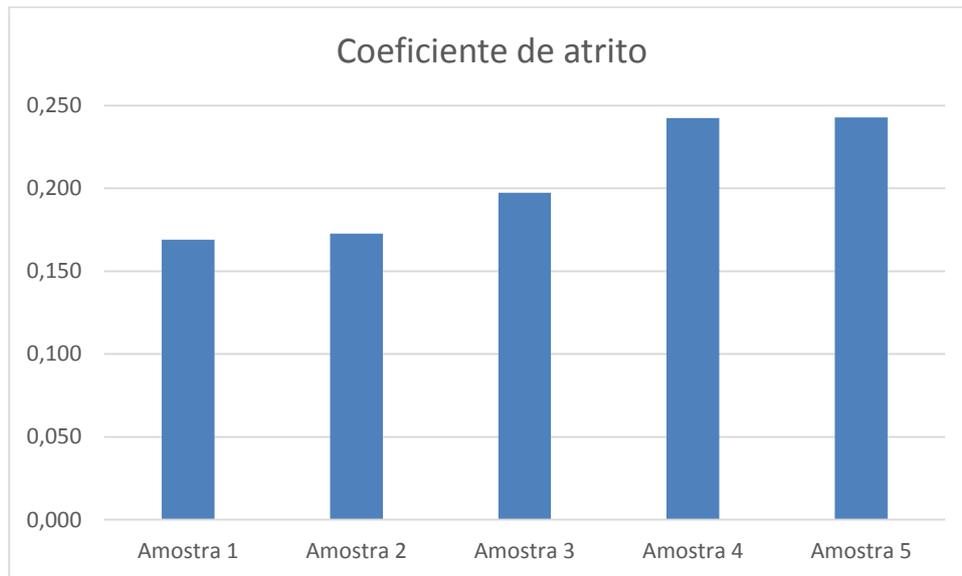


(e)

**Figura 7.6 - Ensaios realizados no tribómetro linear; (a) amostra 1; (b) amostra 2; (c) amostra 3; (d) amostra 4; (e) amostra 5**

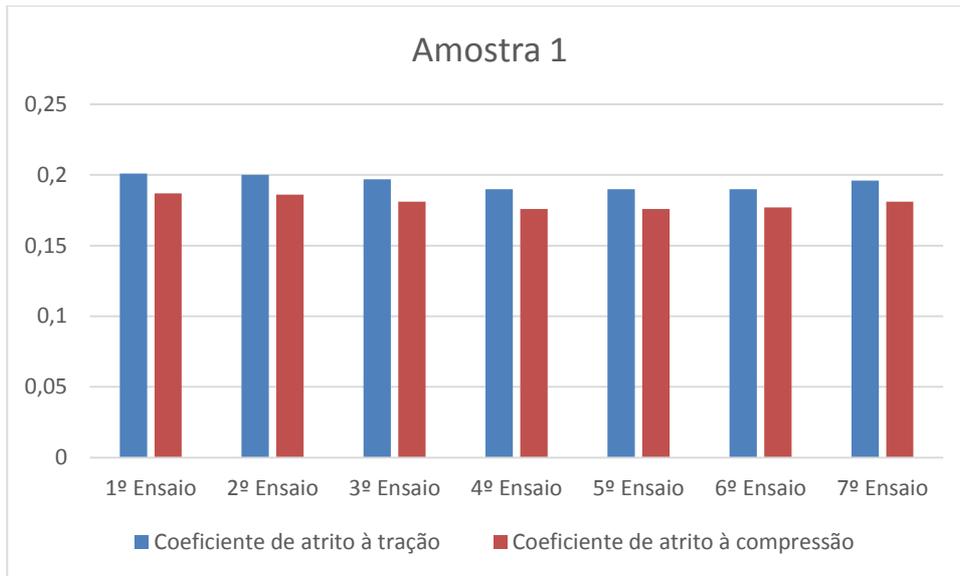
### 7.2.1 Análise do coeficiente de atrito

Foram realizados em primeiro lugar ensaios no equipamento FricTORQ, onde se obteve o correspondente coeficiente de atrito para cada amostra. Os testes foram concretizados nas mesmas condições, com uma taxa de aquisição de 42 amostras/segundo durante 20 segundos, adquirindo-se os resultados que se encontram na figura 7.7.

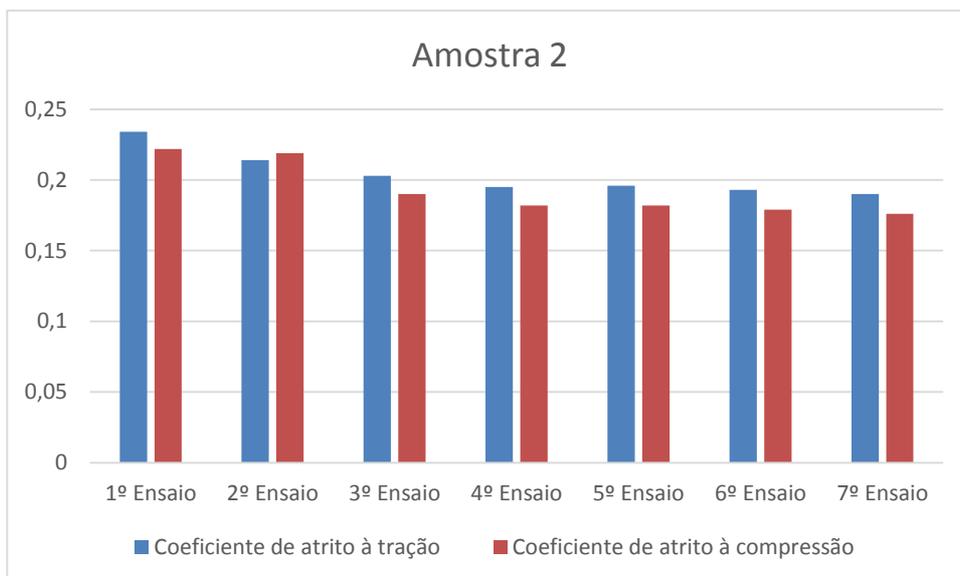


**Figura 7.7 - Coeficiente de atrito analisado no FricTORQ**

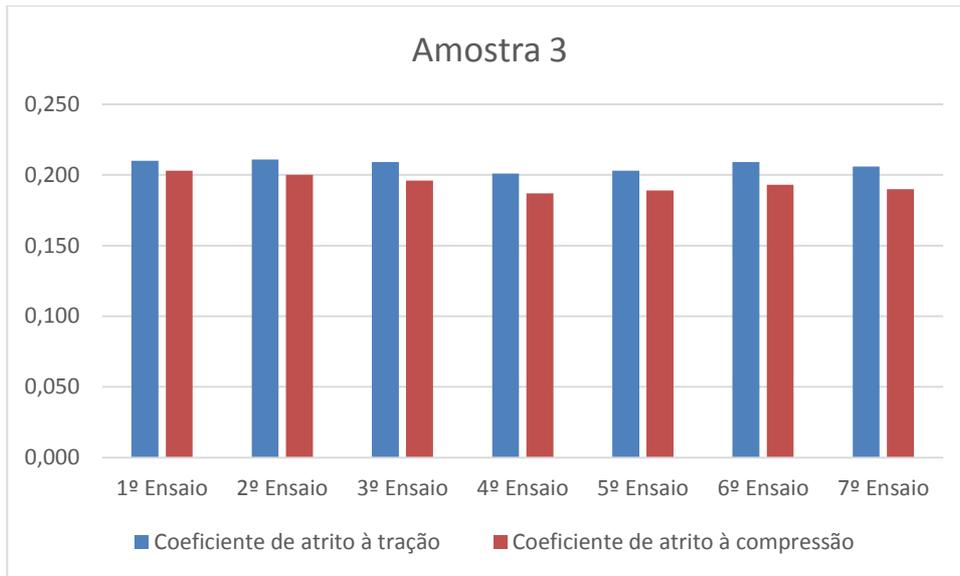
De seguida, foram realizados ensaios com as mesmas amostras, no equipamento Tribómetro Linear, segundo os parâmetros apresentados na tabela 7.1, foram utilizadas as mesmas condições dos ensaios realizados no FricTORQ, onde foram efetuados sete ensaios para cada amostra. Os resultados da amostra 1, 2, 3, 4 e 5 encontram-se presentes na figura 7.8, figura 7.9, figura 7.10 e figura 7.11, respetivamente.



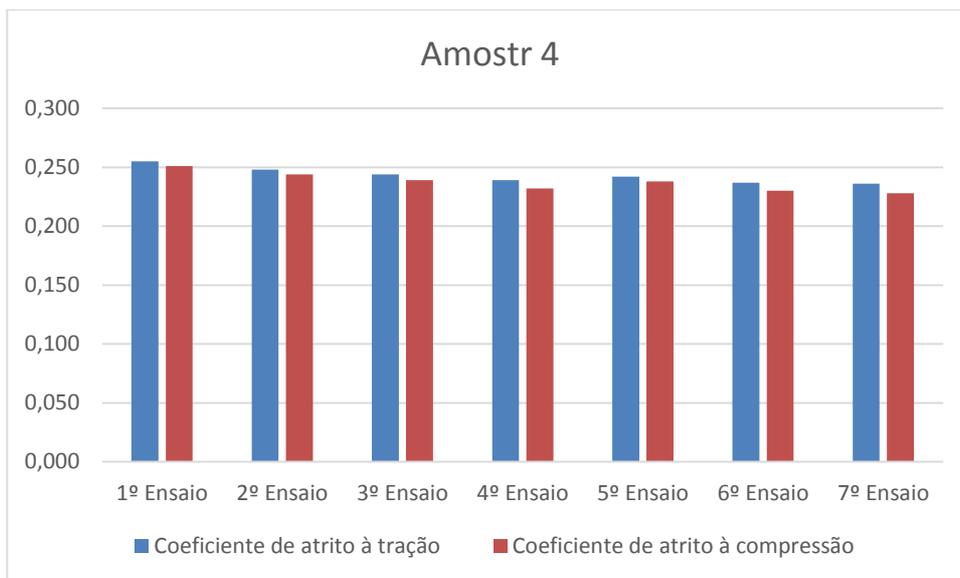
**Figura 7.8 - Resultados da amostra 1**



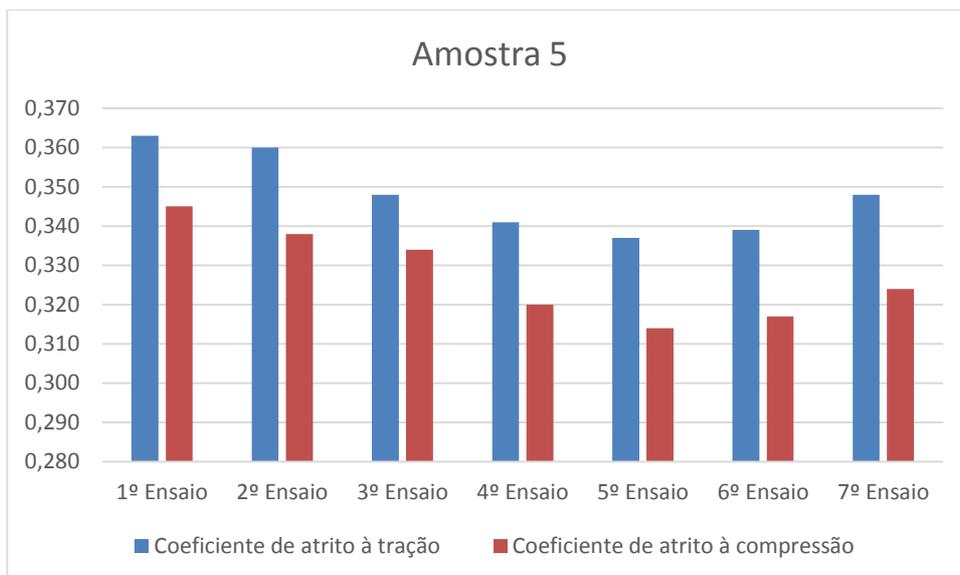
**Figura 7.9 - Resultados da amostra 2**



**Figura 7.10 - Resultados da amostra 3**

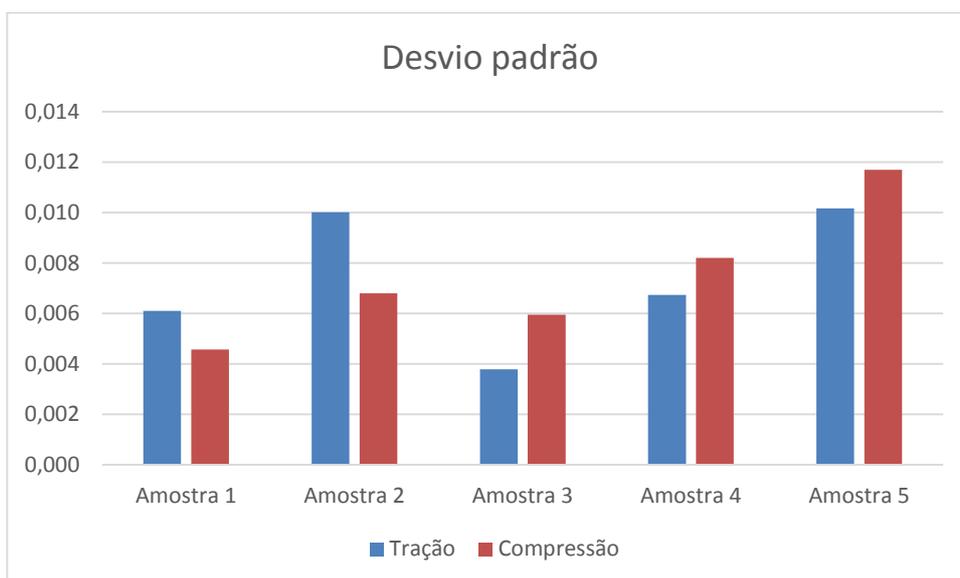


**Figura 7.11 - Resultados da amostra 4**



**Figura 7.12 - Resultados da amostra 5**

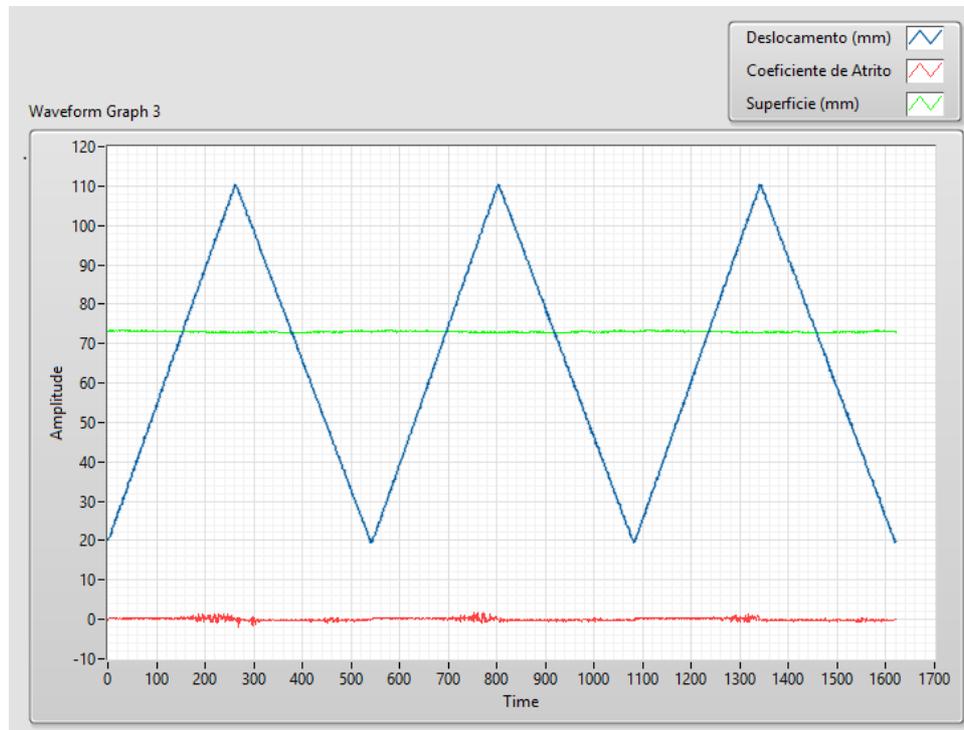
Partindo da informação recolhida, será possível realizar uma análise mais aprofundada aos resultados obtidos, calculando o valor do coeficiente de atrito médio de cada amostra e respetivo desvio padrão correspondente. A análise do desvio padrão encontra-se na figura 7.13.



**Figura 7.13 - Desvio padrão dos ensaios no Tribómetro Linear**

Com base no desvio padrão é possível concluir que os resultados em geral apresentam uma baixa variação em relação ao seu valor médio. Contudo, é de notar que por vezes surgem ensaios que apresentam valores com uma distribuição mais alargada, como se pode reparar na amostra 2. Esta situação ocorre devido ao facto de existirem vibrações no equipamento, sendo

mais notório em algumas zonas das guias e também no momento do motor inverter o sentido de rotação, como se pode verificar pela figura 7.14.



**Figura 7.14 - Ensaio com erros de leitura devido a vibrações**

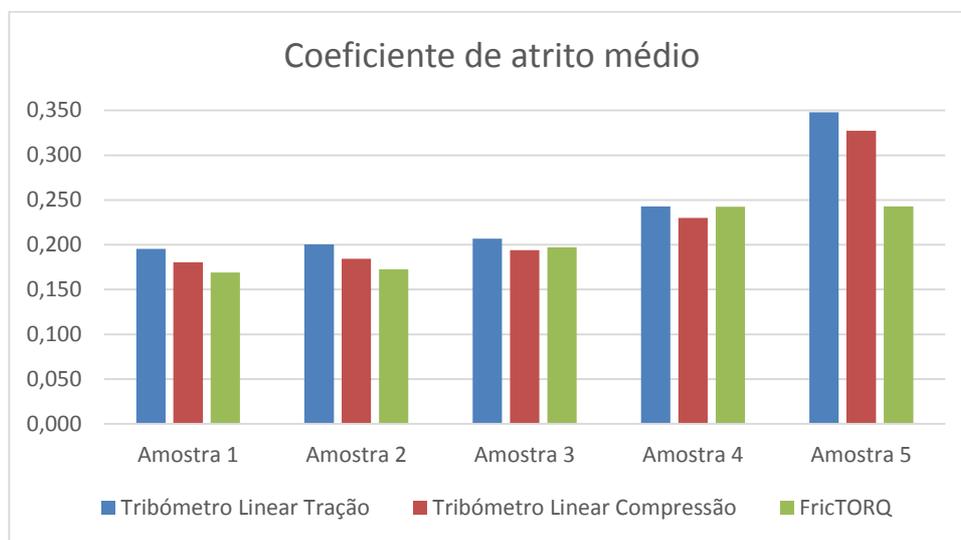
Estas vibrações podem levar a alguns erros de leitura, contudo devido ao facto de se realizar uma média de valores em cada ensaio, este erro tende a diminuir quando é apresentado o resultado final da amostra.

Para completar a análise aos resultados foi efetuada uma média para cada amostra, presente na tabela 7.2.

**Tabela 7.2 - Coeficiente de atrito médio das diferentes amostras**

Coeficiente de atrito médio no Tribómetro Linear		
	Tração	Compressão
<b>Amostra 1</b>	0,196	0,181
<b>Amostra 2</b>	0,201	0,184
<b>Amostra 3</b>	0,207	0,194
<b>Amostra 4</b>	0,243	0,230
<b>Amostra 5</b>	0.348	0.327

Com base nesta informação é possível comparar os resultados obtidos com os dados recolhidos do FricTORQ, tabela 7.2. Desta análise surgiu o gráfico presente na figura 7.15.



**Figura 7.15 - Comparação entre resultados do Tribómetro Linear e FricTORQ**

Analisando o gráfico da figura 7.15, onde se encontra o coeficiente de atrito médio para cada amostra, representados a azul e a vermelho os ensaios no tribómetro linear quando o tecido sujeito à tração e à compressão, respetivamente. A verde encontram-se os coeficientes de atrito médio dos ensaios realizados no equipamento FricTORQ.

Numa primeira leitura é notória a disparidade dos valores recolhidos sobre a amostra 5, contudo é possível explicar esta diferença pelas características do próprio tecido (pano com maior grau de elasticidade). Quando o ensaio é realizado no FricTORQ é possível aplicar uma tensão uniforme e superior à aplicada no tribómetro linear. Isto irá afetar todo o ensaio devido à amostra possuir um elevado nível elástico, explicando assim o motivo para esta discrepância de valores. Desta forma, para analisar o equipamento será descartada a amostra 5 devido a não se enquadrar nas mesmas condições de ensaios para ambos os equipamentos.

Com base nestas analogias é possível reter algumas conclusões relativas ao funcionamento do equipamento, considerando estes testes fiáveis e válidos quando comparados com os mesmos do FricTORQ, tendo em conta as amostras válidas. De notar que nos ensaios do tribómetro linear ocorre uma distinção, onde os valores referentes à tração são sempre superiores aos valores quando o tecido é sujeito à compressão.

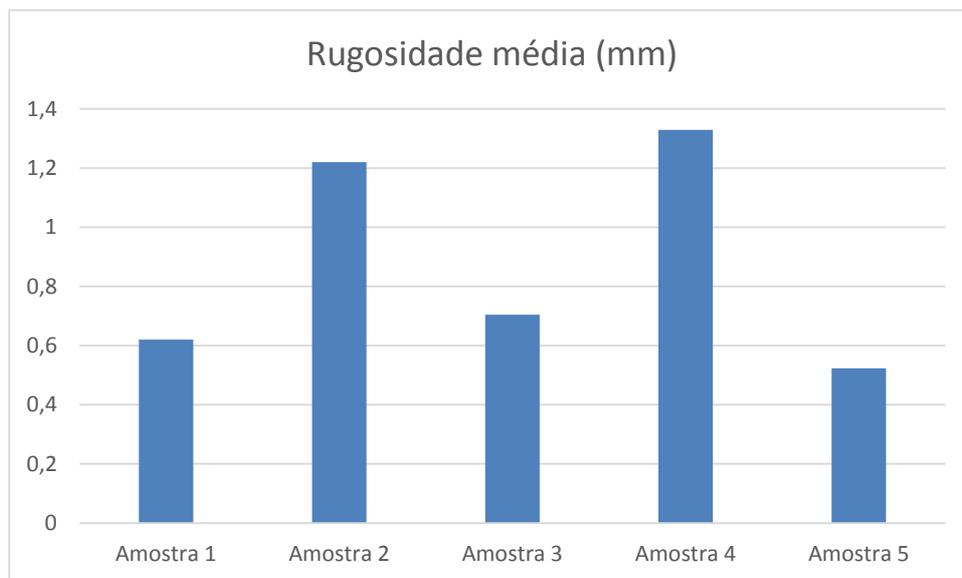
Comparando os valores com os adquiridos no FricTORQ, conclui-se que estes se encontram bastante próximos, sendo a maior distinção variar aproximadamente 0,028 na

amostra 2, seguida de uma variação de 0,027 na amostra 1, uma variação de 0,012 na amostra 4 e por fim uma variação de 0,01 na amostra 3.

Estes resultados apresentados são bastante satisfatórios devido a se encontrarem muito próximos dos valores do FricCTORQ, este utiliza um sistema de medição diferente, com base no método rotativo, o que se torna numa particularidade do seu sistema de medição. Este fator é de elevada importância uma vez que pode influenciar a analogia presente, tendo em conta que o tribómetro linear apresenta um método de funcionamento completamente distinto.

## 7.2.2 Análise da rugosidade superficial

Com os ensaios realizados nas amostras anteriormente referidas também foi possível recolher os valores de rugosidade superficial em cada uma. Desta forma foi realizada uma média dos valores de rugosidade recolhidos ao longo dos ensaios, obtendo-se os resultados apresentados na figura 7.15.



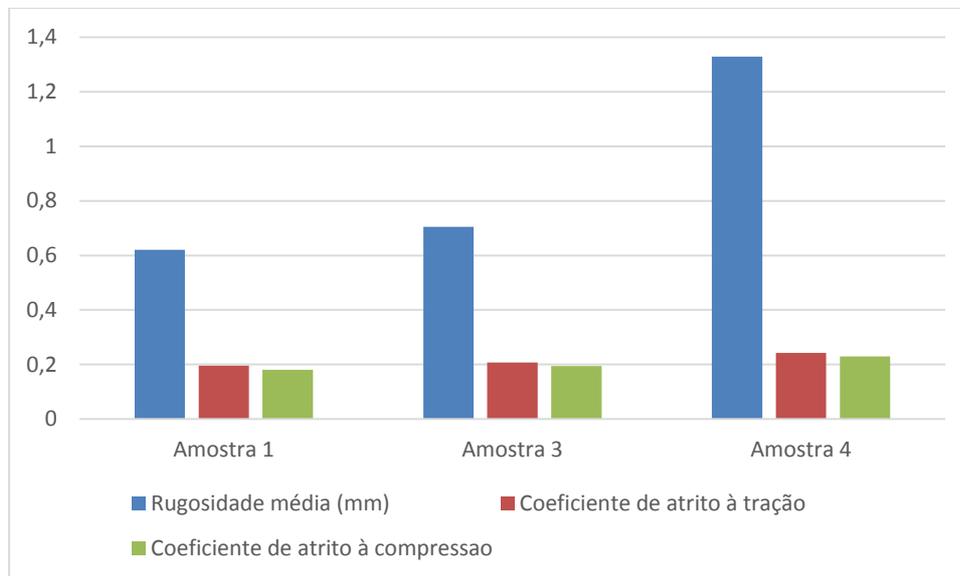
**Figura 7.16 - Rugosidade média de cada ensaio**

Uma vez que não existe forma de comparar estes valores com uma referência, os valores serão analisados tendo em conta os resultados obtidos para o coeficiente de atrito, sendo possível reter algumas conclusões.

Relativamente à amostra 5, esta não será analisada devido ao seu coeficiente de atrito não ter sido válido. Contudo, isto não invalida que o valor de rugosidade esteja incorreto. Na amostra 2 o valor de rugosidade varia em demasia quando comparado com variação dos valores

do coeficiente de atrito, este acontecimento pode ser explicado pela existência de linhas soltas e de borbotos. Desta forma, a amostra 2 será descartada da análise final.

Analisando as amostras 1, 3 e 4 é possível concluir que existe relações entre os valores de rugosidade e os valores de coeficiente de atrito, como pode ser verificado na figura 7.16.



**Figura 7.17 - Validação de resultados de rugosidade**

Analisando a figura 7.16 é possível reter que existem correlações entre os valores de coeficiente de atrito e valores de rugosidade, concluindo-se que para valores de coeficiente de atrito mais elevados a rugosidade tende a ser superior.

Esta correlação só foi efetuada para as amostras 1, 3 e 4, devido à dificuldade de concretizar ensaios sem serem influenciados por condições externas, como linhas soltas, aparecimento de borbotos, ruído do equipamento e pela falta de uniformidade dos tecidos.

## 8 Conclusão

Ao longo deste capítulo é analisado todo trabalho elaborado neste projeto, onde são descritas as conclusões retidas e são propostos trabalhos futuros que possam melhorar a eficiência e adicionar valor acrescentado ao equipamento.

### 8.1 Sumário

Esta dissertação iniciou-se por uma pesquisa com intuito de contextualizar o projeto e de recolher informação necessária ao seu desenvolvimento. Com base na informação recolhida foi possível analisar com maior detalhe o equipamento em questão, descrevendo as suas funcionalidades e limitações de forma a conhecer o seu comportamento e se necessário corrigi-lo. Os assuntos abordados acerca deste equipamento foram a carga normal aplicada, o movimento relativo entre amostras e o apalpador, a gama de velocidade e os sistemas de aquisição de dados.

Seguidamente efetuou-se o desenvolvimento do sistema de *hardware*, onde foi apresentada inicialmente a constituição do mesmo, explicando as diferentes etapas de processamento e feita referencia à plataforma Arduíno como placa de aquisição de dados devido ao facto de as suas características satisfazerem o necessário e ao baixo custo apresentado. Foram analisados os sinais elétricos provenientes dos sensores e encontradas soluções para o seu condicionamento, de forma a poderem ser recolhidos pela placa de Arduíno. Nesta etapa também foi realizado o dimensionamento de uma fonte de alimentação capaz de alimentar o motor DC, a régua potenciométrica, os fins de curso e o sensor laser. Por fim nesta fase, com base na informação analisada foi concebida uma placa eletrónica que engloba o condicionamento de sinal e a fonte de alimentação.

Com o *hardware* concluído iniciou-se a fase de desenvolvimento do *software* no programa LabVIEW da *National Instruments*. Esta aplicação desenvolvida tem como objetivo a simplificação do controlo do motor e acréscimo de funcionalidades ao nível de tratamento de dados.

Após concluídos todos os processos relativos a um projeto mecatrónico, foi realizada uma validação ao sistema concebido para verificar a sua fiabilidade e desenvolvido um protocolo de ensaio de forma a garantir a repetibilidade dos processos de ensaio.

## 8.2 Conclusões

Com o estudo e desenvolvimento desta dissertação foi possível alargar os conhecimentos nas diferentes áreas relativas a um projeto mecatrónico, envolvendo a área mecânica, eletrónica e sistemas de informação. Foi dado um particular destaque às últimas duas, devido a serem os sistemas mais desatualizados e retrógrados, desde do sinal emitido pelo sensor ao conjunto de resultados apresentados ao utilizador.

A nível de *hardware* ocorreu uma renovação em todo o sistema, alterando por completo o sistema existente e aplicando um sistema elétrico desenvolvido, capaz de responder com maior eficácia aos requisitos pretendidos e remover as suas limitações. Com o novo sistema a alimentação é realizada numa única fonte e foi adicionada uma *drive* para realizar o controlo do motor DC, por intermédio do sentido e velocidade de rotação. A placa eletrónica desenvolvida ainda tem a capacidade de funcionar como um condicionador de sinal para a informação recolhida nos transdutores.

Relativamente ao *software* desenvolvido para o equipamento foi concebida uma nova aplicação com base na existente, adicionando novas funcionalidades e melhorando a sua interface homem/máquina. Com esta otimização é possível a partir de qualquer computador realizar a conexão ao equipamento e efetuar ensaios no tribómetro linear. Foi concebido com objetivo de facilitar a utilização do equipamento, estando o algoritmo organizado por etapas sequenciais apresentadas no protocolo de ensaio. A utilização desta nova aplicação irá permitir controlar o ensaio e visualizar a informação recolhida em tempo real.

A calibração do sistema foi ajustada com a ajuda do *software*, onde foi possível concluir que os valores adquiridos pela aplicação são fiáveis quando comparados com a antiga calibração existente, realizada na altura do desenvolvimento do equipamento.

A validação do equipamento foi realizada com sucesso, onde foram utilizadas quatro amostras e realizados sete ensaios em cada uma. A validação do tribómetro linear foi conferida com ensaios realizados no FricTORQ utilizando as mesmas amostras em ambos os equipamentos. Assim, tendo um padrão para consumir a validação do equipamento foi realizada uma comparação entre valores, onde os resultados obtidos se enquadram nos valores recolhidos nos ensaios no FricTORQ, levando à aprovação do equipamento.

Ao longo do projeto foram encontradas algumas dificuldades, principalmente, no desenvolvimento do sistema de *hardware*, tendo demorado mais tempo que o esperado até se encontrar concluído. Estas dificuldades foram derivadas da falta de experiência e de conhecimentos específicos na área de eletrónica durante a conceção da placa eletrónica. Outra

dificuldade a salientar foi encontrada no desenvolvimento do *software*, mais especificamente, no controlo dos ciclos efetuados durante os ensaios; esta dificuldade surge devido à existência de ruído na leitura do deslocamento o que prejudicava a contagem dos ciclos. Contudo, todas estas dificuldades foram ultrapassadas através da insistência e da procura incessante de soluções que levaram à conclusão do projeto.

Em suma, todo o trabalho foi realizado de acordo com o definido inicialmente, dando-se agora por terminado com sucesso. Este projeto foi muito enriquecedor, permitindo adquirir e aplicar conhecimentos em áreas distintas. A sua vertente prática foi de elevado valor para concretizar as teorias estudadas e soluções desenvolvidas, respetivamente na aplicação de circuitos eletrónicos.

### **8.3 Trabalhos futuros**

A nível de trabalhos futuros, existe sempre espaço para melhorar, uma vez que nunca nenhum equipamento se encontra por terminado. Desta forma, serão apresentadas algumas situações onde é necessário continuar a otimização do equipamento:

- Remover/diminuir as vibrações presentes no equipamento durante os ensaios;
- Criar uma aplicação capaz de ler o ficheiro onde são gravados os dados e realizar um tratamento de dados mais eficaz, aplicando filtros de forma a remover o ruído existente;
- Melhorar a estrutura do equipamento, ao ponto de garantir uma maior calibração da célula de carga;
- Desenvolver um sistema capaz de permitir a aplicação de uma tensão definida na amostra, de modo a garantir uma maior uniformidade ao longo da amostra e aumentar a repetibilidade do sistema.



## 9 Bibliografia

- [1] B. Bhushan, Principles and applications of tribology, 1999.
- [2] D. Dowson, History of Tribology, 1998.
- [3] H. Jost, “Lubrification-tribology, Education and research,” London, 1996.
- [4] B. A. Bakar, SUBJECTIVE AND OBJECTIVE EVALUTION OF FABRIC HANDLE CHARACTERISTICS, 2004.
- [5] M. Akgun, B. Becerir e H. Alpay, “A review on fabric surface roughness measurements,” Turquia.
- [6] Tactile Pressure Indicating Sensor Film ([http://www.sensorprod.com/news/white-papers/2009\\_fah/](http://www.sensorprod.com/news/white-papers/2009_fah/) consultado a 14-09-2015).
- [7] M. Lima, L. F. Silva, R. Vasconcelos, J. Martins e L. Hes, “FRICTORQ, Tribómetro para Avaliação Objectiva de Superfícies Têxteis,” 2005.
- [8] J. Martins, “Estudo, conceção, desenvolvimento e construção de um tribómetro linear para ensaios em superfícies flexíveis.,” 2013.
- [9] Portal de Laboratórios Virtuais de Processos Químicos ([http://labvirtual.eq.uc.pt/siteJoomla/index.php?Itemid=166&id=72&option=com\\_content&task=view](http://labvirtual.eq.uc.pt/siteJoomla/index.php?Itemid=166&id=72&option=com_content&task=view) consultada a 22/09/2015).
- [10] National Instruments (<http://portugal.ni.com/> consultada a 22-09-2015).
- [11] Arduíno (<https://www.arduino.cc/> acedido a 23-09-2015).
- [12] wikipédia (<https://pt.wikipedia.org/wiki/Eletrônica> acedido a 04/11/2015).
- [13] F. F. Ferreira, “Eletrónica I - Amplificadores Operacionais,” FEUP, Setembro de 1998.
- [14] KLEINKE, MAURÍCIO, Introdução a eletrônica e dispositivos semicondutores <http://www.ifi.unicamp.br/~kleinke/f540/f540.htm#AmpOp> (acedido em 28 de Novembro de 2013).

- [15] COSTA, Eletrônica Linear,  
<http://eel.ufsc.br/~costa/EEL7300/Textos/EletronicaLinear052823.pdf> (Acedido em 11 de Dezembro de 2013).
- [16] A. L. E. d. Reis, J. T. A. Vianna, L. M. F. d. Melo, L. P. Vieira e R. V. d. Santos, “Teoria geral das fontes de alimentação,” Minas Gerais, Setembro de 2011.
- [17] Wikipedia ([https://pt.wikipedia.org/wiki/Diodo\\_semicondutor](https://pt.wikipedia.org/wiki/Diodo_semicondutor) acedida a 03/06/2015).
- [18] P. Corradi, Eletrônica Básica - Circuitos retificadores ([www.corradi.junior.nom.br](http://www.corradi.junior.nom.br)).
- [19] “Alguns conceitos básicos de metrologia,” *Sociedade Portuguesa de Metrologia*.

## **Anexo I – Datasheet LM 741**



## LM741 Operational Amplifier

Check for Samples: [LM741](#)

### FEATURES

- **Overload Protection on the Input and Output**
- **No Latch-Up When the Common Mode Range is Exceeded**

### DESCRIPTION

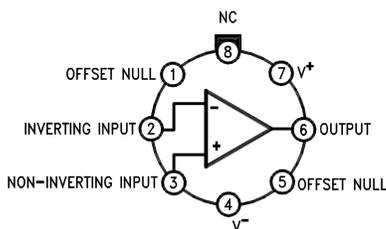
The LM741 series are general purpose operational amplifiers which feature improved performance over industry standards like the LM709. They are direct, plug-in replacements for the 709C, LM201, MC1439 and 748 in most applications.

The amplifiers offer many features which make their application nearly foolproof: overload protection on the input and output, no latch-up when the common mode range is exceeded, as well as freedom from oscillations.

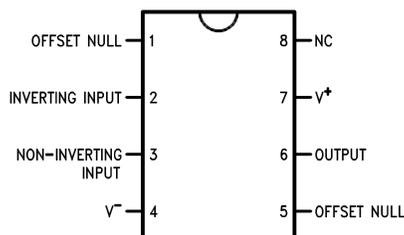
The LM741C is identical to the LM741/LM741A except that the LM741C has their performance ensured over a 0°C to +70°C temperature range, instead of –55°C to +125°C.

### Connection Diagrams

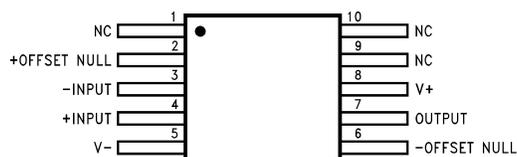
LM741H is available per JM38510/10101



**Figure 1. TO-99 Package**  
See Package Number LMC0008C



**Figure 2. CDIP or PDIP Package**  
See Package Number NAB0008A, P0008E



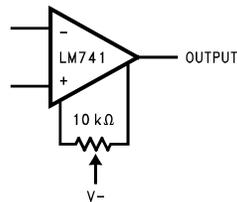
**Figure 3. CLGA Package**  
See Package Number NAD0010A



Please be aware that an important notice concerning availability, standard warranty, and use in critical applications of Texas Instruments semiconductor products and disclaimers thereto appears at the end of this data sheet.

All trademarks are the property of their respective owners.

## Typical Application



**Figure 4. Offset Nulling Circuit**



These devices have limited built-in ESD protection. The leads should be shorted together or the device placed in conductive foam during storage or handling to prevent electrostatic damage to the MOS gates.

## Absolute Maximum Ratings<sup>(1)(2)(3)</sup>

	LM741A	LM741	LM741C
Supply Voltage	±22V	±22V	±18V
Power Dissipation <sup>(4)</sup>	500 mW	500 mW	500 mW
Differential Input Voltage	±30V	±30V	±30V
Input Voltage <sup>(5)</sup>	±15V	±15V	±15V
Output Short Circuit Duration	Continuous	Continuous	Continuous
Operating Temperature Range	-55°C to +125°C	-55°C to +125°C	0°C to +70°C
Storage Temperature Range	-65°C to +150°C	-65°C to +150°C	-65°C to +150°C
Junction Temperature	150°C	150°C	100°C
Soldering Information			
P0008E-Package (10 seconds)	260°C	260°C	260°C
NAB0008A- or LMC0008C-Package (10 seconds)	300°C	300°C	300°C
M-Package			
Vapor Phase (60 seconds)	215°C	215°C	215°C
Infrared (15 seconds)	215°C	215°C	215°C
ESD Tolerance <sup>(6)</sup>	400V	400V	400V

- (1) "Absolute Maximum Ratings" indicate limits beyond which damage to the device may occur. Operating Ratings indicate conditions for which the device is functional, but do not ensure specific performance limits.
- (2) For military specifications see RETS741X for LM741 and RETS741AX for LM741A.
- (3) If Military/Aerospace specified devices are required, please contact the TI Sales Office/Distributors for availability and specifications.
- (4) For operation at elevated temperatures, these devices must be derated based on thermal resistance, and  $T_j$  max. (listed under "Absolute Maximum Ratings").  $T_j = T_A + (\theta_{JA} P_D)$ .
- (5) For supply voltages less than ±15V, the absolute maximum input voltage is equal to the supply voltage.
- (6) Human body model, 1.5 kΩ in series with 100 pF.

## Electrical Characteristics<sup>(1)</sup>

Parameter	Test Conditions	LM741A			LM741			LM741C			Units
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
Input Offset Voltage	$T_A = 25^\circ\text{C}$ $R_S \leq 10\text{ k}\Omega$ $R_S \leq 50\Omega$		0.8	3.0		1.0	5.0		2.0	6.0	mV
	$T_{AMIN} \leq T_A \leq T_{AMAX}$ $R_S \leq 50\Omega$ $R_S \leq 10\text{ k}\Omega$			4.0			6.0			7.5	mV
Average Input Offset Voltage Drift				15							$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$

- (1) Unless otherwise specified, these specifications apply for  $V_S = \pm 15\text{V}$ ,  $-55^\circ\text{C} \leq T_A \leq +125^\circ\text{C}$  (LM741/LM741A). For the LM741C/LM741E, these specifications are limited to  $0^\circ\text{C} \leq T_A \leq +70^\circ\text{C}$ .

**Electrical Characteristics<sup>(1)</sup> (continued)**

Parameter	Test Conditions	LM741A			LM741			LM741C			Units
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
Input Offset Voltage Adjustment Range	$T_A = 25^\circ\text{C}$ , $V_S = \pm 20\text{V}$	$\pm 10$					$\pm 15$			$\pm 15$	mV
Input Offset Current	$T_A = 25^\circ\text{C}$		3.0	30		20	200		20	200	nA
	$T_{AMIN} \leq T_A \leq T_{AMAX}$			70		85	500			300	
Average Input Offset Current Drift				0.5							nA/°C
Input Bias Current	$T_A = 25^\circ\text{C}$		30	80		80	500		80	500	nA
	$T_{AMIN} \leq T_A \leq T_{AMAX}$			0.210			1.5			0.8	$\mu\text{A}$
Input Resistance	$T_A = 25^\circ\text{C}$ , $V_S = \pm 20\text{V}$	1.0	6.0		0.3	2.0		0.3	2.0		M $\Omega$
	$T_{AMIN} \leq T_A \leq T_{AMAX}$ , $V_S = \pm 20\text{V}$	0.5									
Input Voltage Range	$T_A = 25^\circ\text{C}$							$\pm 12$	$\pm 13$		V
	$T_{AMIN} \leq T_A \leq T_{AMAX}$				$\pm 12$	$\pm 13$					
Large Signal Voltage Gain	$T_A = 25^\circ\text{C}$ , $R_L \geq 2\text{ k}\Omega$ $V_S = \pm 20\text{V}$ , $V_O = \pm 15\text{V}$ $V_S = \pm 15\text{V}$ , $V_O = \pm 10\text{V}$	50									V/mV
	$T_{AMIN} \leq T_A \leq T_{AMAX}$ , $R_L \geq 2\text{ k}\Omega$ , $V_S = \pm 20\text{V}$ , $V_O = \pm 15\text{V}$ $V_S = \pm 15\text{V}$ , $V_O = \pm 10\text{V}$	32			25			15			V/mV
	$V_S = \pm 5\text{V}$ , $V_O = \pm 2\text{V}$	10									
Output Voltage Swing	$V_S = \pm 20\text{V}$ $R_L \geq 10\text{ k}\Omega$ $R_L \geq 2\text{ k}\Omega$	$\pm 16$ $\pm 15$									V
	$V_S = \pm 15\text{V}$ $R_L \geq 10\text{ k}\Omega$ $R_L \geq 2\text{ k}\Omega$				$\pm 12$ $\pm 10$	$\pm 14$ $\pm 13$		$\pm 12$ $\pm 10$	$\pm 14$ $\pm 13$		V
Output Short Circuit Current	$T_A = 25^\circ\text{C}$ $T_{AMIN} \leq T_A \leq T_{AMAX}$	10 10	25	35 40		25			25		mA
Common-Mode Rejection Ratio	$T_{AMIN} \leq T_A \leq T_{AMAX}$ $R_S \leq 10\text{ k}\Omega$ , $V_{CM} = \pm 12\text{V}$ $R_S \leq 50\Omega$ , $V_{CM} = \pm 12\text{V}$	80	95		70	90		70	90		dB
Supply Voltage Rejection Ratio	$T_{AMIN} \leq T_A \leq T_{AMAX}$ , $V_S = \pm 20\text{V}$ to $V_S = \pm 5\text{V}$ $R_S \leq 50\Omega$ $R_S \leq 10\text{ k}\Omega$	86	96		77	96		77	96		dB
Transient Response	$T_A = 25^\circ\text{C}$ , Unity Gain	Rise Time	0.25	0.8		0.3			0.3		$\mu\text{s}$
		Overshoot	6.0	20		5			5		%
Bandwidth <sup>(2)</sup>	$T_A = 25^\circ\text{C}$	0.437	1.5								MHz
Slew Rate	$T_A = 25^\circ\text{C}$ , Unity Gain	0.3	0.7			0.5			0.5		V/ $\mu\text{s}$
Supply Current	$T_A = 25^\circ\text{C}$					1.7	2.8		1.7	2.8	mA
Power Consumption	$T_A = 25^\circ\text{C}$		80	150							mW
	$V_S = \pm 20\text{V}$ $V_S = \pm 15\text{V}$					50	85		50	85	

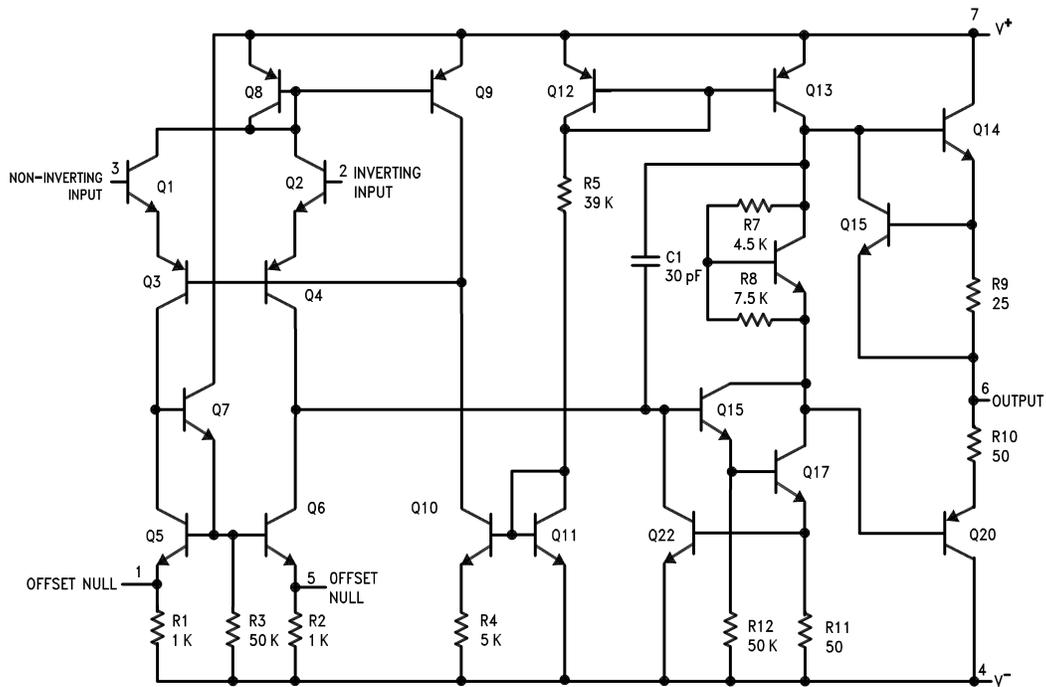
 (2) Calculated value from: BW (MHz) = 0.35/Rise Time ( $\mu\text{s}$ ).

**Electrical Characteristics<sup>(1)</sup> (continued)**

Parameter	Test Conditions	LM741A			LM741			LM741C			Units
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
LM741A	$V_S = \pm 20V$ $T_A = T_{AMIN}$ $T_A = T_{AMAX}$			165							mW
LM741	$V_S = \pm 15V$ $T_A = T_{AMIN}$ $T_A = T_{AMAX}$					60 45	100 75				mW

Thermal Resistance	CDIP (NAB0008A)	PDIP (P0008E)	TO-99 (LMC0008C)	SO-8 (M)
$\theta_{JA}$ (Junction to Ambient)	100°C/W	100°C/W	170°C/W	195°C/W
$\theta_{JC}$ (Junction to Case)	N/A	N/A	25°C/W	N/A

**SCHEMATIC DIAGRAM**



---

**REVISION HISTORY**

<b>Changes from Revision B (March 2013) to Revision C</b>	<b>Page</b>
<hr/> <ul style="list-style-type: none"><li>• Changed layout of National Data Sheet to TI format .....</li></ul> <hr/>	<hr/> <b>4</b> <hr/>

**PACKAGING INFORMATION**

Orderable Device	Status (1)	Package Type	Package Drawing	Pins	Package Qty	Eco Plan (2)	Lead/Ball Finish	MSL Peak Temp (3)	Op Temp (°C)	Top-Side Markings (4)	Samples
LM741CH	ACTIVE	TO-99	LMC	8	500	TBD	Call TI	Call TI	0 to 70	LM741CH	<a href="#">Samples</a>
LM741CH/NOPB	ACTIVE	TO-99	LMC	8	500	Green (RoHS & no Sb/Br)	POST-PLATE	Level-1-NA-UNLIM	0 to 70	LM741CH	<a href="#">Samples</a>
LM741CN	ACTIVE	PDIP	P	8	40	TBD	Call TI	Call TI	0 to 70	LM 741CN	<a href="#">Samples</a>
LM741CN/NOPB	ACTIVE	PDIP	P	8	40	Green (RoHS & no Sb/Br)	SN	Level-1-NA-UNLIM	0 to 70	LM 741CN	<a href="#">Samples</a>
LM741H	ACTIVE	TO-99	LMC	8	500	TBD	Call TI	Call TI	-55 to 125	LM741H	<a href="#">Samples</a>
LM741H/NOPB	ACTIVE	TO-99	LMC	8	500	Green (RoHS & no Sb/Br)	POST-PLATE	Level-1-NA-UNLIM	-55 to 125	LM741H	<a href="#">Samples</a>
LM741J	ACTIVE	CDIP	NAB	8	40	TBD	Call TI	Call TI	-55 to 125	LM741J	<a href="#">Samples</a>
U5B7741312	ACTIVE	TO-99	LMC	8	500	TBD	Call TI	Call TI	-55 to 125	LM741H	<a href="#">Samples</a>
U5B7741393	ACTIVE	TO-99	LMC	8	500	TBD	Call TI	Call TI	0 to 70	LM741CH	<a href="#">Samples</a>
U9T7741393	ACTIVE	PDIP	P	8	40	TBD	Call TI	Call TI	0 to 70	LM 741CN	<a href="#">Samples</a>

(1) The marketing status values are defined as follows:

**ACTIVE:** Product device recommended for new designs.

**LIFEBUY:** TI has announced that the device will be discontinued, and a lifetime-buy period is in effect.

**NRND:** Not recommended for new designs. Device is in production to support existing customers, but TI does not recommend using this part in a new design.

**PREVIEW:** Device has been announced but is not in production. Samples may or may not be available.

**OBSELETE:** TI has discontinued the production of the device.

(2) Eco Plan - The planned eco-friendly classification: Pb-Free (RoHS), Pb-Free (RoHS Exempt), or Green (RoHS & no Sb/Br) - please check <http://www.ti.com/productcontent> for the latest availability information and additional product content details.

**TBD:** The Pb-Free/Green conversion plan has not been defined.

**Pb-Free (RoHS):** TI's terms "Lead-Free" or "Pb-Free" mean semiconductor products that are compatible with the current RoHS requirements for all 6 substances, including the requirement that lead not exceed 0.1% by weight in homogeneous materials. Where designed to be soldered at high temperatures, TI Pb-Free products are suitable for use in specified lead-free processes.

**Pb-Free (RoHS Exempt):** This component has a RoHS exemption for either 1) lead-based flip-chip solder bumps used between the die and package, or 2) lead-based die adhesive used between the die and leadframe. The component is otherwise considered Pb-Free (RoHS compatible) as defined above.

**Green (RoHS & no Sb/Br):** TI defines "Green" to mean Pb-Free (RoHS compatible), and free of Bromine (Br) and Antimony (Sb) based flame retardants (Br or Sb do not exceed 0.1% by weight in homogeneous material)

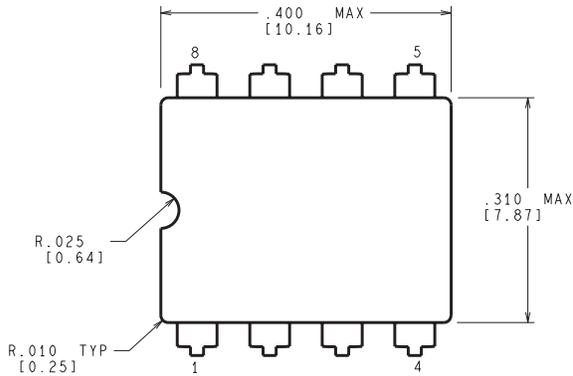
<sup>(3)</sup> MSL, Peak Temp. -- The Moisture Sensitivity Level rating according to the JEDEC industry standard classifications, and peak solder temperature.

<sup>(4)</sup> Multiple Top-Side Markings will be inside parentheses. Only one Top-Side Marking contained in parentheses and separated by a "~" will appear on a device. If a line is indented then it is a continuation of the previous line and the two combined represent the entire Top-Side Marking for that device.

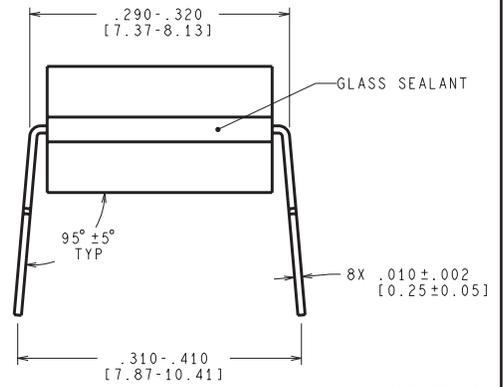
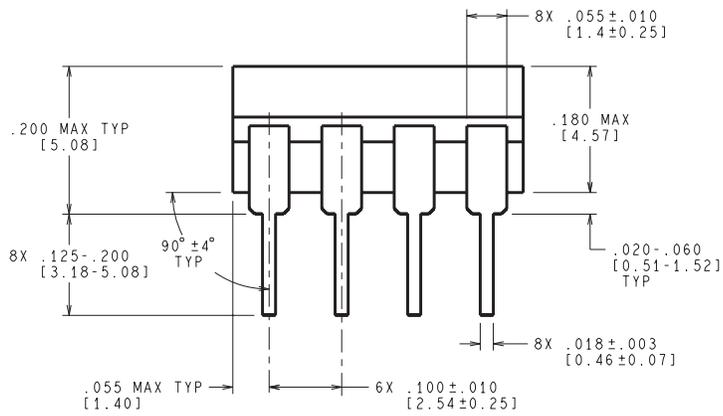
**Important Information and Disclaimer:**The information provided on this page represents TI's knowledge and belief as of the date that it is provided. TI bases its knowledge and belief on information provided by third parties, and makes no representation or warranty as to the accuracy of such information. Efforts are underway to better integrate information from third parties. TI has taken and continues to take reasonable steps to provide representative and accurate information but may not have conducted destructive testing or chemical analysis on incoming materials and chemicals. TI and TI suppliers consider certain information to be proprietary, and thus CAS numbers and other limited information may not be available for release.

In no event shall TI's liability arising out of such information exceed the total purchase price of the TI part(s) at issue in this document sold by TI to Customer on an annual basis.

NAB0008A



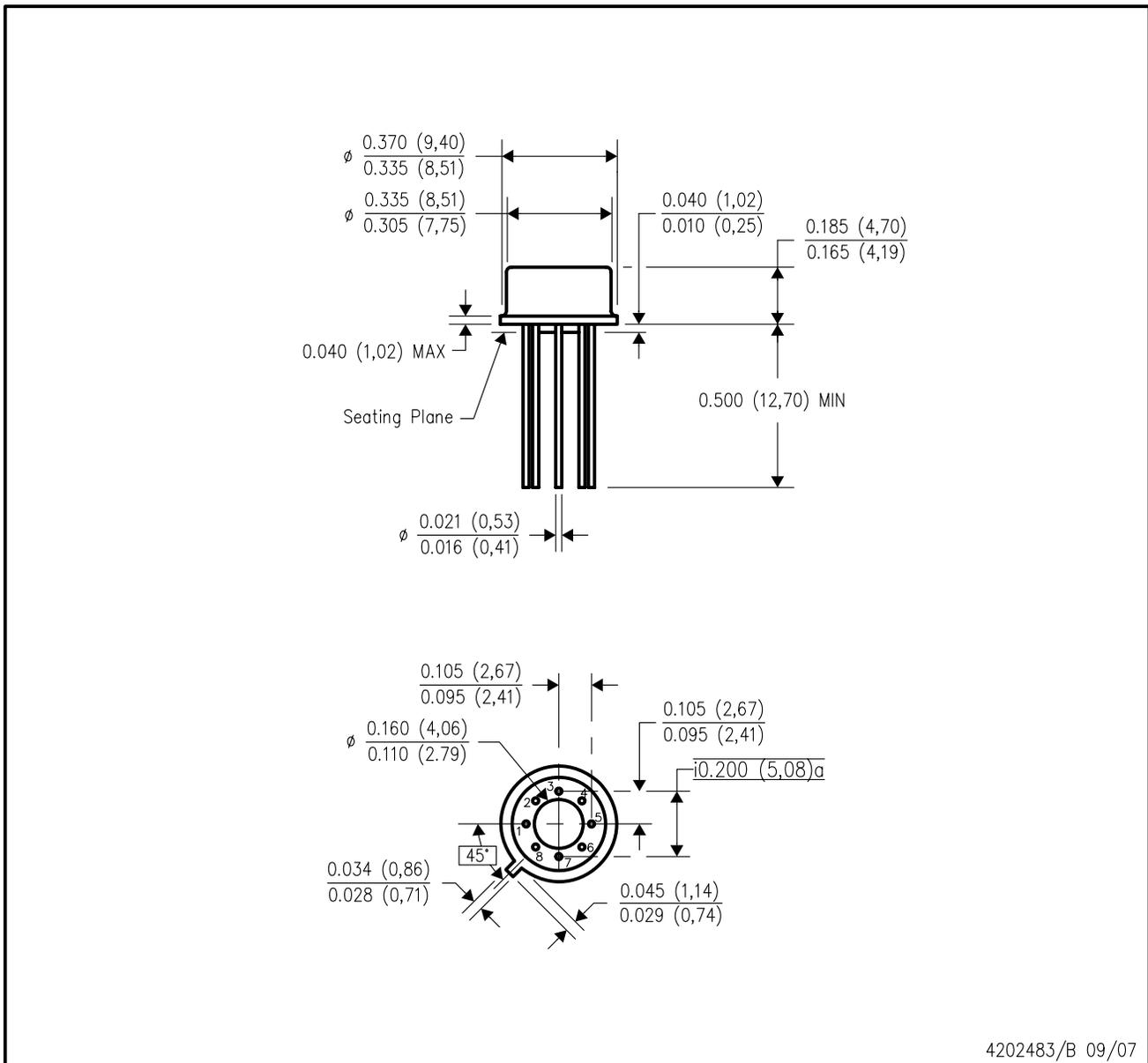
CONTROLLING DIMENSION IS INCH  
VALUES IN [ ] ARE MILLIMETERS



J08A (Rev M)

LMC (O-MBCY-W8)

METAL CYLINDRICAL PACKAGE

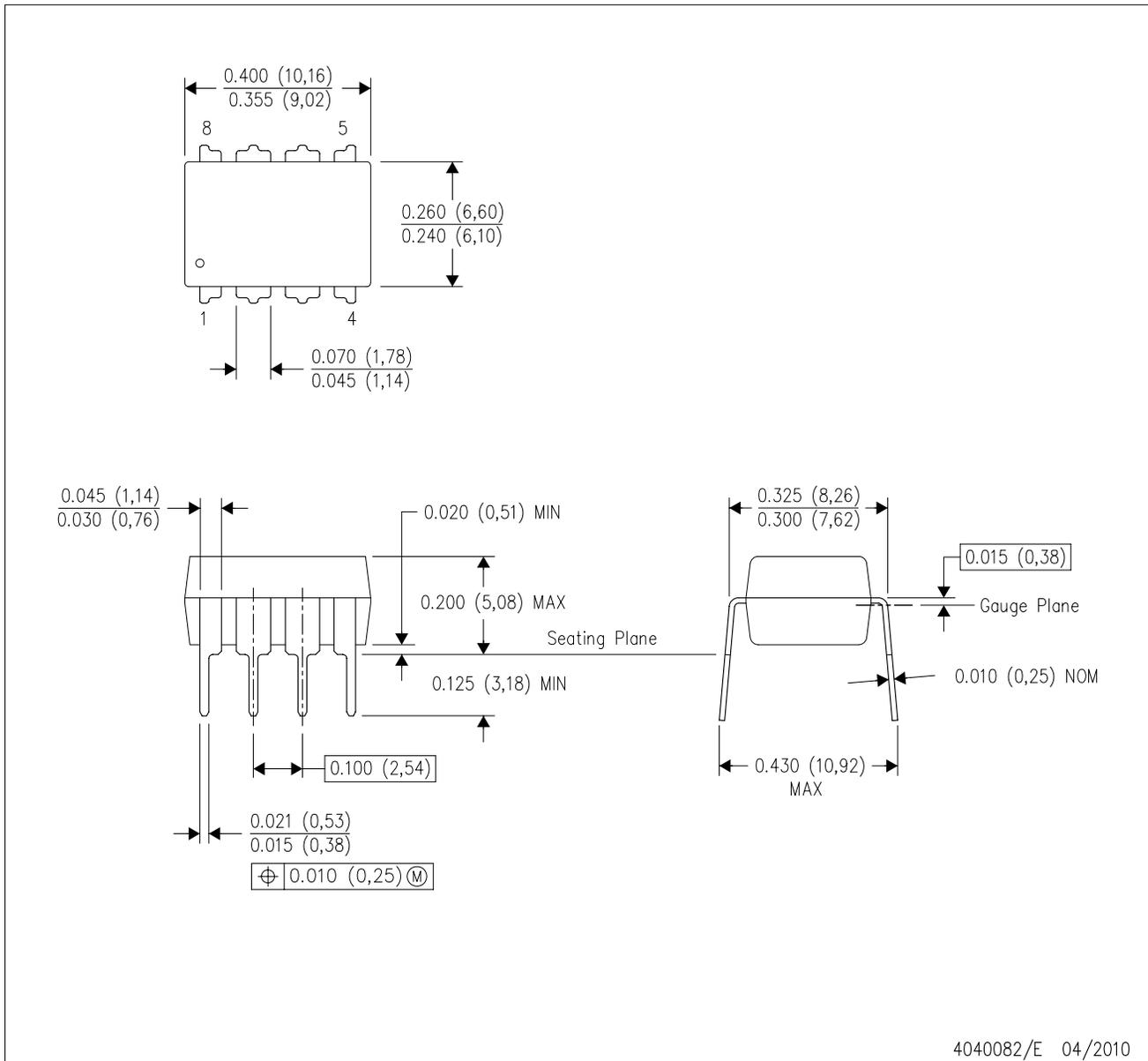


4202483/B 09/07

- NOTES:
- A. All linear dimensions are in inches (millimeters).
  - B. This drawing is subject to change without notice.
  - C. Leads in true position within 0.010 (0,25) R @ MMC at seating plane.
  - D. Pin numbers shown for reference only. Numbers may not be marked on package.
  - E. Falls within JEDEC MO-002/TO-99.

P (R-PDIP-T8)

PLASTIC DUAL-IN-LINE PACKAGE



4040082/E 04/2010

- NOTES:
- A. All linear dimensions are in inches (millimeters).
  - B. This drawing is subject to change without notice.
  - C. Falls within JEDEC MS-001 variation BA.

## IMPORTANT NOTICE

Texas Instruments Incorporated and its subsidiaries (TI) reserve the right to make corrections, enhancements, improvements and other changes to its semiconductor products and services per JESD46, latest issue, and to discontinue any product or service per JESD48, latest issue. Buyers should obtain the latest relevant information before placing orders and should verify that such information is current and complete. All semiconductor products (also referred to herein as "components") are sold subject to TI's terms and conditions of sale supplied at the time of order acknowledgment.

TI warrants performance of its components to the specifications applicable at the time of sale, in accordance with the warranty in TI's terms and conditions of sale of semiconductor products. Testing and other quality control techniques are used to the extent TI deems necessary to support this warranty. Except where mandated by applicable law, testing of all parameters of each component is not necessarily performed.

TI assumes no liability for applications assistance or the design of Buyers' products. Buyers are responsible for their products and applications using TI components. To minimize the risks associated with Buyers' products and applications, Buyers should provide adequate design and operating safeguards.

TI does not warrant or represent that any license, either express or implied, is granted under any patent right, copyright, mask work right, or other intellectual property right relating to any combination, machine, or process in which TI components or services are used. Information published by TI regarding third-party products or services does not constitute a license to use such products or services or a warranty or endorsement thereof. Use of such information may require a license from a third party under the patents or other intellectual property of the third party, or a license from TI under the patents or other intellectual property of TI.

Reproduction of significant portions of TI information in TI data books or data sheets is permissible only if reproduction is without alteration and is accompanied by all associated warranties, conditions, limitations, and notices. TI is not responsible or liable for such altered documentation. Information of third parties may be subject to additional restrictions.

Resale of TI components or services with statements different from or beyond the parameters stated by TI for that component or service voids all express and any implied warranties for the associated TI component or service and is an unfair and deceptive business practice. TI is not responsible or liable for any such statements.

Buyer acknowledges and agrees that it is solely responsible for compliance with all legal, regulatory and safety-related requirements concerning its products, and any use of TI components in its applications, notwithstanding any applications-related information or support that may be provided by TI. Buyer represents and agrees that it has all the necessary expertise to create and implement safeguards which anticipate dangerous consequences of failures, monitor failures and their consequences, lessen the likelihood of failures that might cause harm and take appropriate remedial actions. Buyer will fully indemnify TI and its representatives against any damages arising out of the use of any TI components in safety-critical applications.

In some cases, TI components may be promoted specifically to facilitate safety-related applications. With such components, TI's goal is to help enable customers to design and create their own end-product solutions that meet applicable functional safety standards and requirements. Nonetheless, such components are subject to these terms.

No TI components are authorized for use in FDA Class III (or similar life-critical medical equipment) unless authorized officers of the parties have executed a special agreement specifically governing such use.

Only those TI components which TI has specifically designated as military grade or "enhanced plastic" are designed and intended for use in military/aerospace applications or environments. Buyer acknowledges and agrees that any military or aerospace use of TI components which have **not** been so designated is solely at the Buyer's risk, and that Buyer is solely responsible for compliance with all legal and regulatory requirements in connection with such use.

TI has specifically designated certain components as meeting ISO/TS16949 requirements, mainly for automotive use. In any case of use of non-designated products, TI will not be responsible for any failure to meet ISO/TS16949.

### Products

Audio	<a href="http://www.ti.com/audio">www.ti.com/audio</a>
Amplifiers	<a href="http://amplifier.ti.com">amplifier.ti.com</a>
Data Converters	<a href="http://dataconverter.ti.com">dataconverter.ti.com</a>
DLP® Products	<a href="http://www.dlp.com">www.dlp.com</a>
DSP	<a href="http://dsp.ti.com">dsp.ti.com</a>
Clocks and Timers	<a href="http://www.ti.com/clocks">www.ti.com/clocks</a>
Interface	<a href="http://interface.ti.com">interface.ti.com</a>
Logic	<a href="http://logic.ti.com">logic.ti.com</a>
Power Mgmt	<a href="http://power.ti.com">power.ti.com</a>
Microcontrollers	<a href="http://microcontroller.ti.com">microcontroller.ti.com</a>
RFID	<a href="http://www.ti-rfid.com">www.ti-rfid.com</a>
OMAP Applications Processors	<a href="http://www.ti.com/omap">www.ti.com/omap</a>
Wireless Connectivity	<a href="http://www.ti.com/wirelessconnectivity">www.ti.com/wirelessconnectivity</a>

### Applications

Automotive and Transportation	<a href="http://www.ti.com/automotive">www.ti.com/automotive</a>
Communications and Telecom	<a href="http://www.ti.com/communications">www.ti.com/communications</a>
Computers and Peripherals	<a href="http://www.ti.com/computers">www.ti.com/computers</a>
Consumer Electronics	<a href="http://www.ti.com/consumer-apps">www.ti.com/consumer-apps</a>
Energy and Lighting	<a href="http://www.ti.com/energy">www.ti.com/energy</a>
Industrial	<a href="http://www.ti.com/industrial">www.ti.com/industrial</a>
Medical	<a href="http://www.ti.com/medical">www.ti.com/medical</a>
Security	<a href="http://www.ti.com/security">www.ti.com/security</a>
Space, Avionics and Defense	<a href="http://www.ti.com/space-avionics-defense">www.ti.com/space-avionics-defense</a>
Video and Imaging	<a href="http://www.ti.com/video">www.ti.com/video</a>

### TI E2E Community

[e2e.ti.com](http://e2e.ti.com)

## **Anexo II – Datasheet LM 317**



## 1.2V TO 37V VOLTAGE REGULATOR

- OUTPUT VOLTAGE RANGE: 1.2 TO 37V
- OUTPUT CURRENT IN EXCESS OF 1.5A
- 0.1% LINE AND LOAD REGULATION
- FLOATING OPERATION FOR HIGH VOLTAGES
- COMPLETE SERIES OF PROTECTIONS: CURRENT LIMITING, THERMAL SHUTDOWN AND SOA CONTROL

### DESCRIPTION

The LM117/LM217/LM317 are monolithic integrated circuit in TO-220, TO-220FP, TO-3 and D<sup>2</sup>PAK packages intended for use as positive adjustable voltage regulators.

They are designed to supply more than 1.5A of load current with an output voltage adjustable over a 1.2 to 37V range.

The nominal output voltage is selected by means of only a resistive divider, making the device exceptionally easy to use and eliminating the stocking of many fixed regulators.

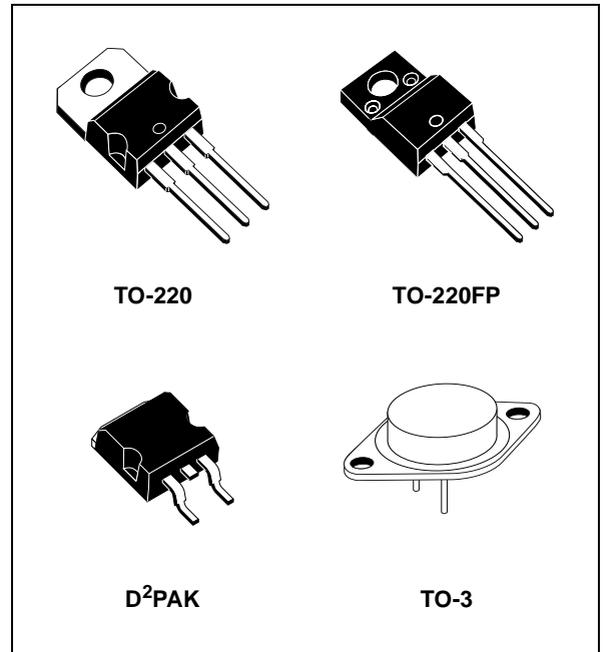
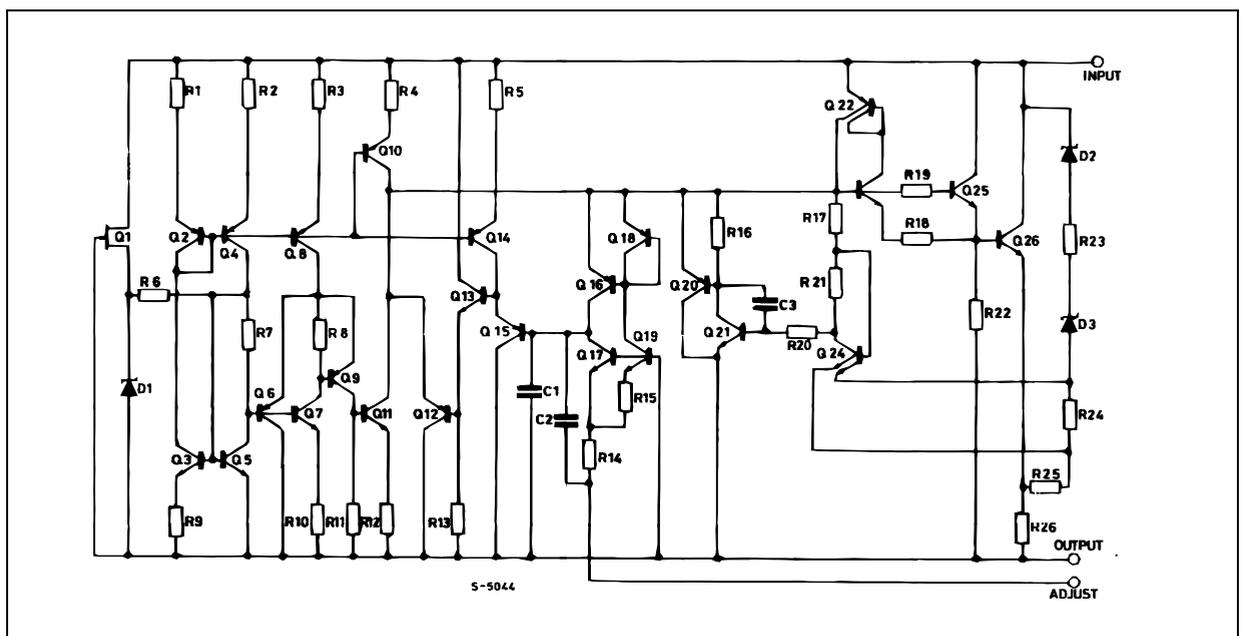


Figure 1: Schematic Diagram



**Table 1: Absolute Maximum Ratings**

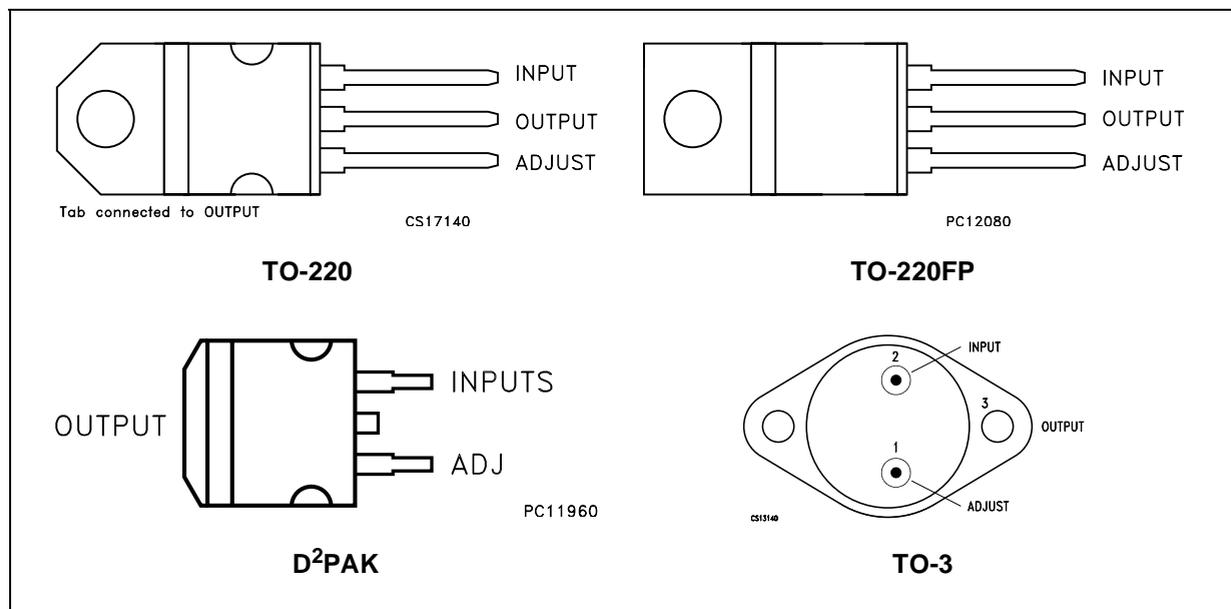
Symbol	Parameter	Value	Unit
$V_I - V_O$	Input-Reference Differential Voltage	40	V
$I_O$	Output Current	Internally Limited	
$T_{op}$	Operating Junction Temperature for:	LM117	-55 to 150
		LM217	-25 to 150
		LM317	0 to 125
$P_{tot}$	Power Dissipation	Internally Limited	
$T_{stg}$	Storage Temperature	-65 to 150	°C

Absolute Maximum Ratings are those values beyond which damage to the device may occur. Functional operation under these condition is not implied.

**Table 2: Thermal Data**

Symbol	Parameter	D <sup>2</sup> PAK	TO-220	TO-220FP	TO-3	Unit
$R_{thj-case}$	Thermal Resistance Junction-case Max	3	3	5	4	°C/W
$R_{thj-amb}$	Thermal Resistance Junction-ambient Max	62.5	50	60	35	°C/W

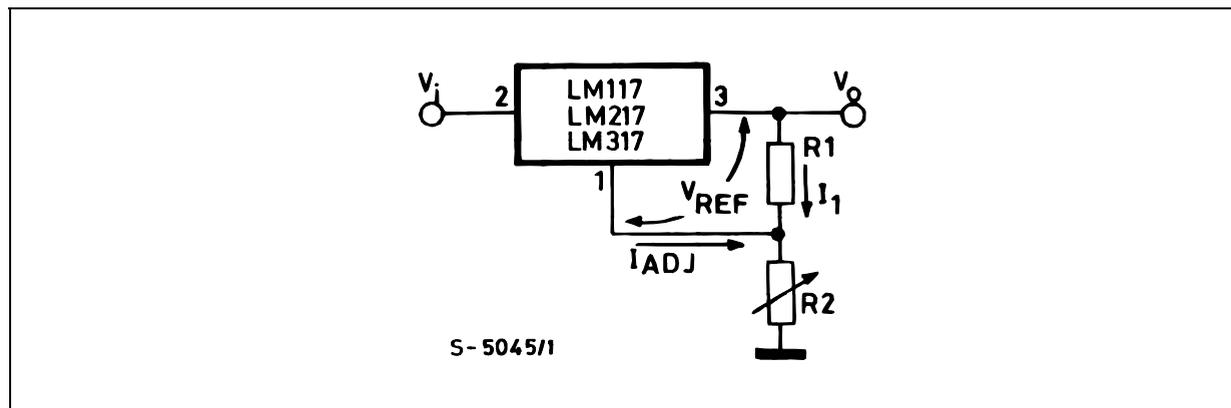
**Figure 2: Connection Diagram (top view)**



**Table 3: Order Codes**

TYPE	TO-220	D <sup>2</sup> PAK	TO-220FP	TO-3
LM117				LM117K
LM217	LM217T	LM217D2T		LM217K
LM317	LM317T	LM317D2T	LM317P	LM317K

Figure 3: Basic Adjustable Regulator



**Table 4: Electrical Characteristics For LM117/LM217** ( $V_I - V_O = 5\text{ V}$ ,  $I_O = 500\text{ mA}$ ,  $I_{MAX} = 1.5\text{ A}$  and  $P_{MAX} = 20\text{ W}$ ,  $T_J = -55\text{ to }150^\circ\text{C}$  for LM117,  $T_J = -25\text{ to }150^\circ\text{C}$  for LM217, unless otherwise specified).

Symbol	Parameter	Test Conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
$\Delta V_O$	Line Regulation	$V_I - V_O = 3\text{ to }40\text{ V}$	$T_J = 25^\circ\text{C}$	0.01	0.02	%V
				0.02	0.05	
$\Delta V_O$	Load Regulation	$V_O \leq 5\text{ V}$ $I_O = 10\text{ mA to }I_{MAX}$	$T_J = 25^\circ\text{C}$	5	15	mV
				20	50	
		$V_O \geq 5\text{ V}$ $I_O = 10\text{ mA to }I_{MAX}$	$T_J = 25^\circ\text{C}$	0.1	0.3	%
				0.3	1	
$I_{ADJ}$	Adjustment Pin Current			50	100	$\mu\text{A}$
$\Delta I_{ADJ}$	Adjustment Pin Current	$V_I - V_O = 2.5\text{ to }40\text{ V}$ $I_O = 10\text{ mA to }I_{MAX}$		0.2	5	$\mu\text{A}$
$V_{REF}$	Reference Voltage (between pin 3 and pin 1)	$V_I - V_O = 2.5\text{ to }40\text{ V}$ $I_O = 10\text{ mA to }I_{MAX}$ $P_D \leq P_{MAX}$	1.2	1.25	1.3	V
$\Delta V_O/V_O$	Output Voltage Temperature Stability			1		%
$I_{O(min)}$	Minimum Load Current	$V_I - V_O = 40\text{ V}$		3.5	5	mA
$I_{O(max)}$	Maximum Load Current	$V_I - V_O \leq 15\text{ V}$ $P_D < P_{MAX}$	1.5	2.2		A
		$V_I - V_O = 40\text{ V}$ $P_D < P_{MAX}$		0.4		
		$T_J = 25^\circ\text{C}$				
eN	Output Noise Voltage (percentage of $V_O$ )	$B = 10\text{ Hz to }100\text{ KHz}$ $T_J = 25^\circ\text{C}$		0.003		%
SVR	Supply Voltage Rejection (*)	$T_J = 25^\circ\text{C}$ $f = 120\text{ Hz}$	$C_{ADJ} = 0$	65		dB
			$C_{ADJ} = 10\mu\text{F}$	66	80	

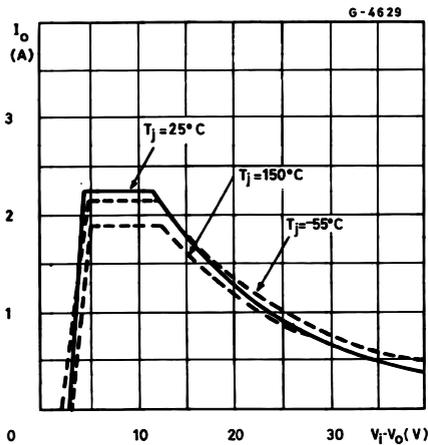
(\*)  $C_{ADJ}$  is connected between pin 1 and ground.

**Table 5: Electrical Characteristics For LM317** ( $V_I - V_O = 5\text{ V}$ ,  $I_O = 500\text{ mA}$ ,  $I_{MAX} = 1.5\text{ A}$  and  $P_{MAX} = 20\text{ W}$ ,  $T_J = 0\text{ to }125^\circ\text{C}$ , unless otherwise specified).

Symbol	Parameter	Test Conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
$\Delta V_O$	Line Regulation	$V_I - V_O = 3\text{ to }40\text{ V}$	$T_J = 25^\circ\text{C}$	0.01	0.04	%V
				0.02	0.07	
$\Delta V_O$	Load Regulation	$V_O \leq 5\text{ V}$ $I_O = 10\text{ mA to }I_{MAX}$	$T_J = 25^\circ\text{C}$	5	25	mV
				20	70	
		$V_O \geq 5\text{ V}$ $I_O = 10\text{ mA to }I_{MAX}$	$T_J = 25^\circ\text{C}$	0.1	0.5	%
				0.3	1.5	
$I_{ADJ}$	Adjustment Pin Current			50	100	$\mu\text{A}$
$\Delta I_{ADJ}$	Adjustment Pin Current	$V_I - V_O = 2.5\text{ to }40\text{ V}$ $I_O = 10\text{ mA to }I_{MAX}$		0.2	5	$\mu\text{A}$
$V_{REF}$	Reference Voltage (between pin 3 and pin 1)	$V_I - V_O = 2.5\text{ to }40\text{ V}$ $I_O = 10\text{ mA to }I_{MAX}$ $P_D \leq P_{MAX}$	1.2	1.25	1.3	V
$\Delta V_O/V_O$	Output Voltage Temperature Stability			1		%
$I_{O(min)}$	Minimum Load Current	$V_I - V_O = 40\text{ V}$		3.5	10	mA
$I_{O(max)}$	Maximum Load Current	$V_I - V_O \leq 15\text{ V}$ $P_D < P_{MAX}$	1.5	2.2		A
		$V_I - V_O = 40\text{ V}$ $P_D < P_{MAX}$ $T_J = 25^\circ\text{C}$		0.4		
eN	Output Noise Voltage (percentage of $V_O$ )	$B = 10\text{ Hz to }100\text{ KHz}$ $T_J = 25^\circ\text{C}$		0.003		%
SVR	Supply Voltage Rejection (*)	$T_J = 25^\circ\text{C}$ $f = 120\text{ Hz}$	$C_{ADJ} = 0$	65		dB
			$C_{ADJ} = 10\mu\text{F}$	66	80	

(\*)  $C_{ADJ}$  is connected between pin 1 and ground.

**Figure 4: Output Current vs Input-output Differential Voltage**



**Figure 5: Dropout Voltage vs Junction Temperature**

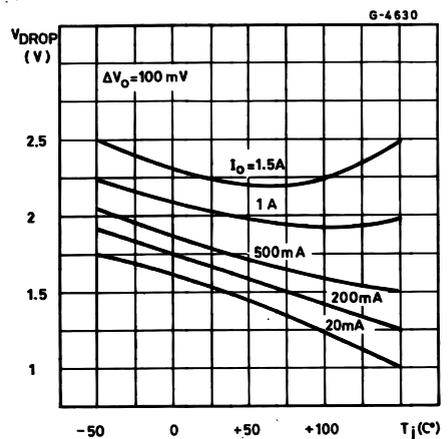


Figure 6: Reference Voltage vs Junction

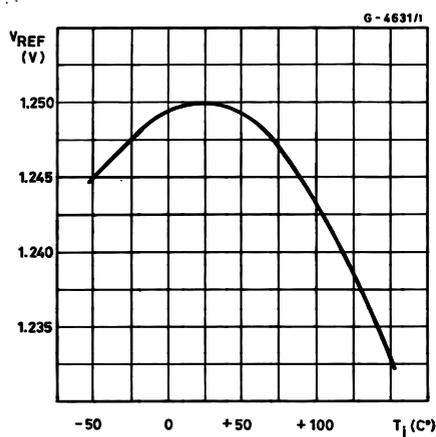
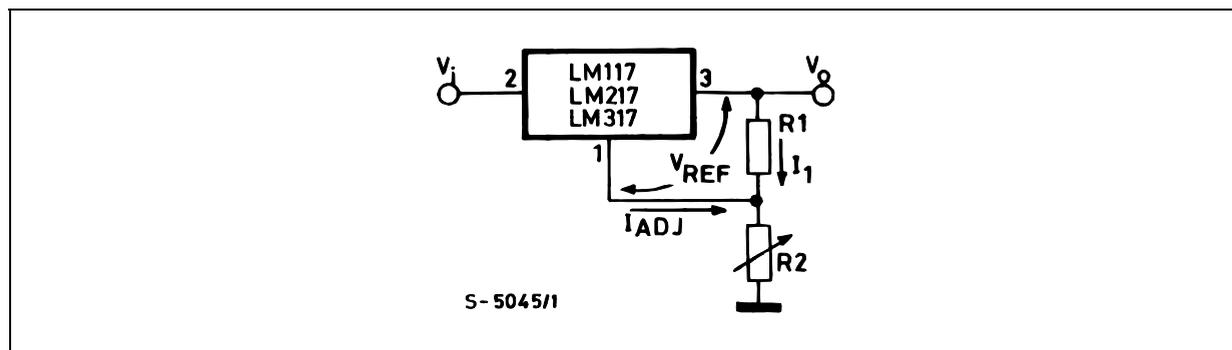


Figure 7: Basic Adjustable Regulator



## APPLICATION INFORMATION

The LM117/217/317 provides an internal reference voltage of 1.25V between the output and adjustments terminals. This is used to set a constant current flow across an external resistor divider (see fig. 4), giving an output voltage  $V_O$  of:

$$V_O = V_{REF} (1 + R_2/R_1) + I_{ADJ} R_2$$

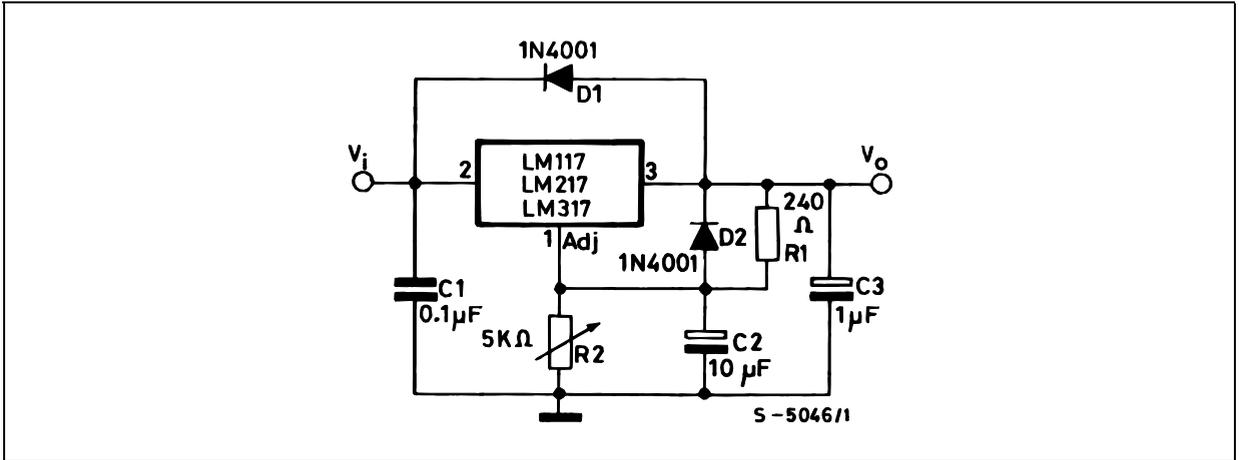
The device was designed to minimize the term  $I_{ADJ}$  (100 $\mu$ A max) and to maintain it very constant with line and load changes. Usually, the error term  $I_{ADJ} \times R_2$  can be neglected. To obtain the previous requirement, all the regulator quiescent current is returned to the output terminal, imposing a minimum load current condition. If the load is insufficient, the output voltage will rise. Since the LM117/217317 is a floating regulator and "sees" only the input-to-output differential voltage, supplies of very high voltage with respect to ground can be regulated as long as the maximum input-to-output differential is not exceeded. Furthermore, programmable regulator are easily obtainable and, by connecting a fixed resistor between the adjustment and output, the device can be used as a precision current regulator. In order to optimize the load regulation, the current set resistor  $R_1$  (see fig. 4) should be tied as close as possible to the regulator, while the ground terminal of  $R_2$  should be near the ground of the load to provide remote ground sensing. Performance may be improved with added capacitance as follow:

An input bypass capacitor of 0.1 $\mu$ F

An adjustment terminal to ground 10 $\mu$ F capacitor to improve the ripple rejection of about 15 dB ( $C_{ADJ}$ ).

An 1 $\mu$ F tantalum (or 25 $\mu$ F Aluminium electrolytic) capacitor on the output to improve transient response. In addition to external capacitors, it is good practice to add protection diodes, as shown in fig.5. D1 protect the device against input short circuit, while D2 protect against output short circuit for capacitance discharging.

Figure 8: Voltage Regulator with Protection Diodes



D1 protect the device against input short circuit, while D2 protects against output short circuit for capacitors discharging.

Figure 9: Slow Turn-on 15V Regulator

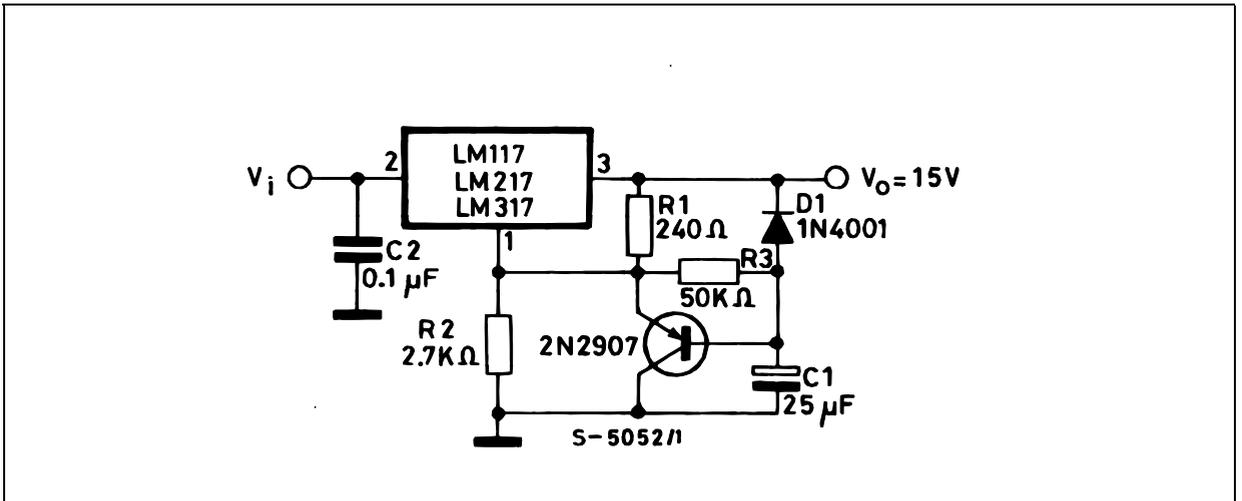


Figure 10: Current Regulator

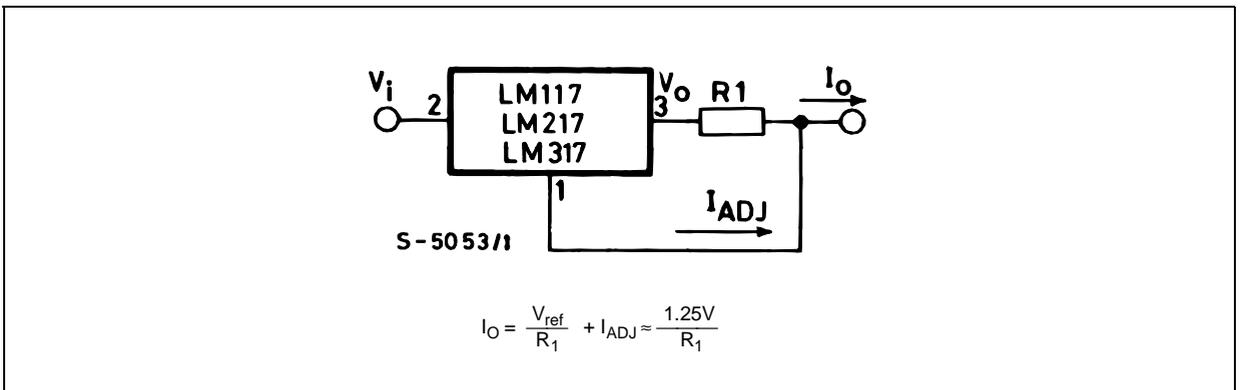


Figure 11: 5V Electronic Shut-down Regulator

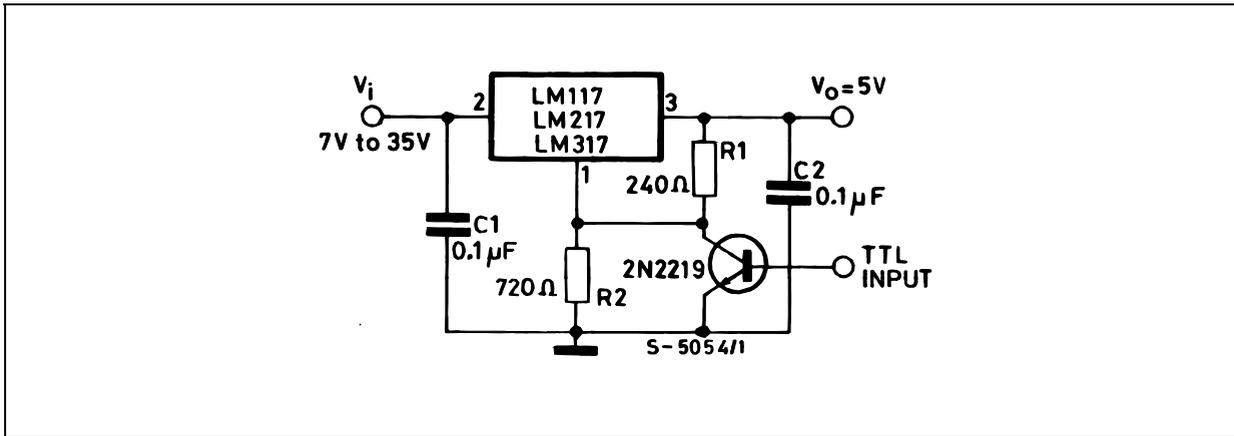
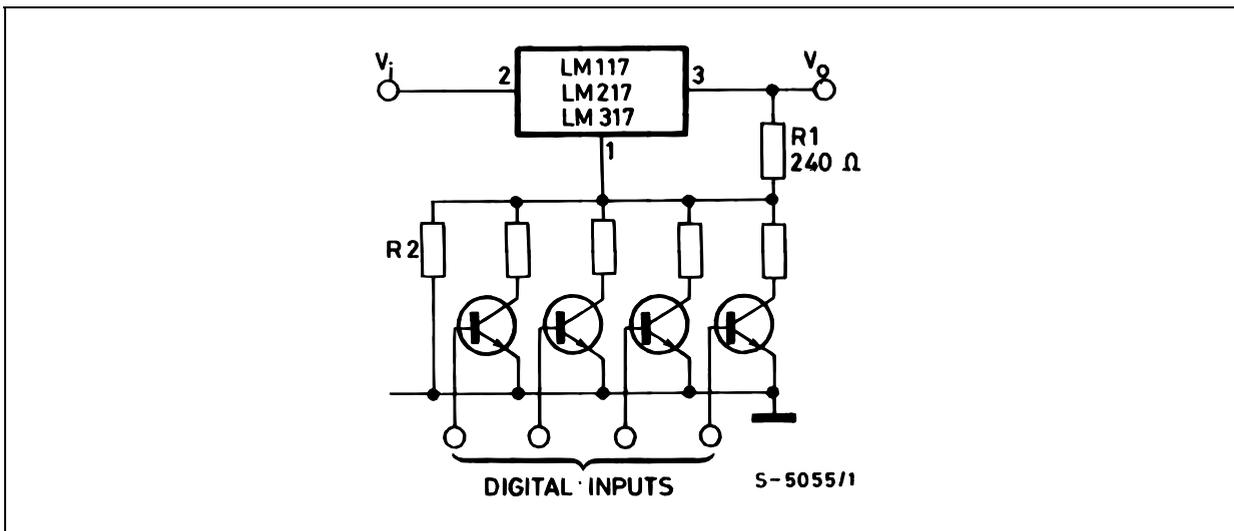
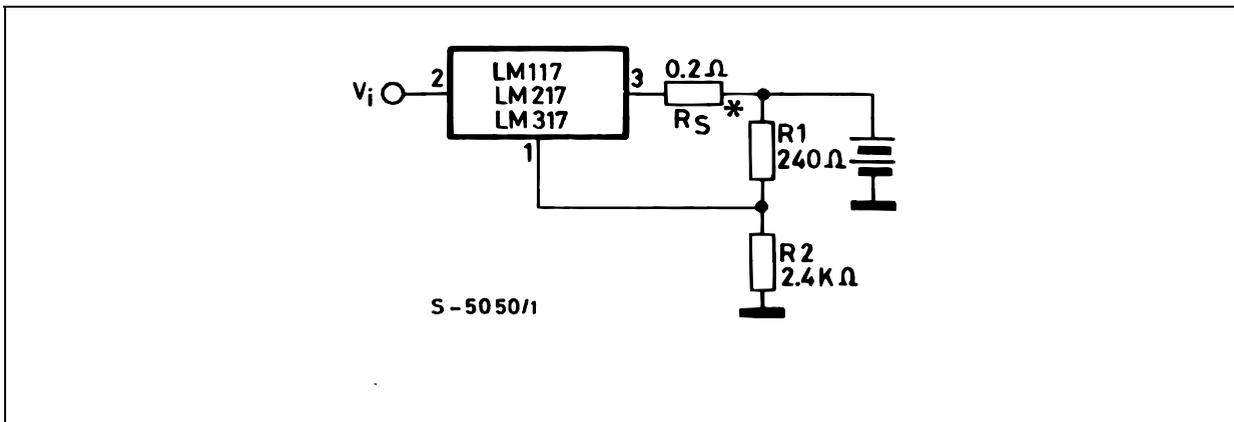


Figure 12: Digitally Selected Outputs



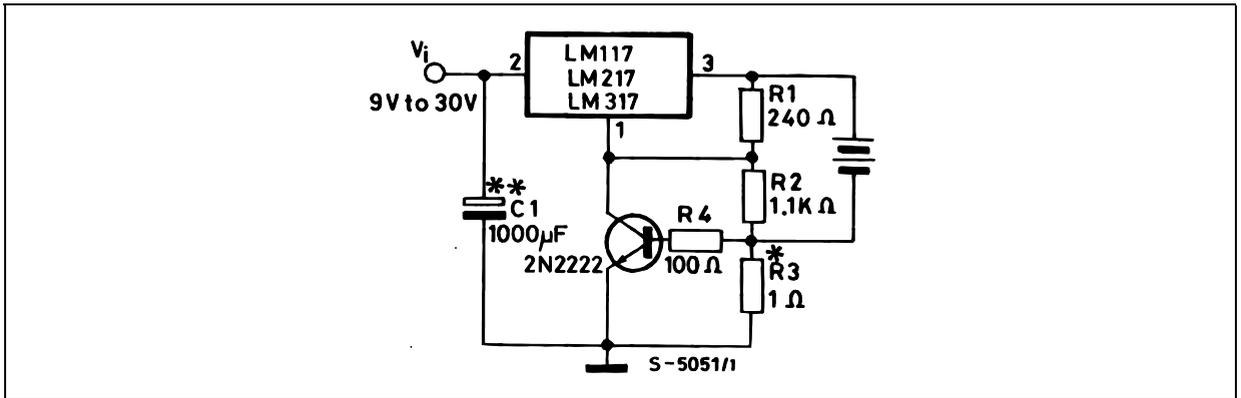
(R<sub>2</sub> sets maximum V<sub>O</sub>)

Figure 13: Battery Charger (12V)



\* R<sub>S</sub> sets output impedance of charger  $Z_O = R_S (1 + R_2/R_1)$ . Use of R<sub>S</sub> allows low charging rates whit fully charged battery.

Figure 14: Current Limited 6V Charger

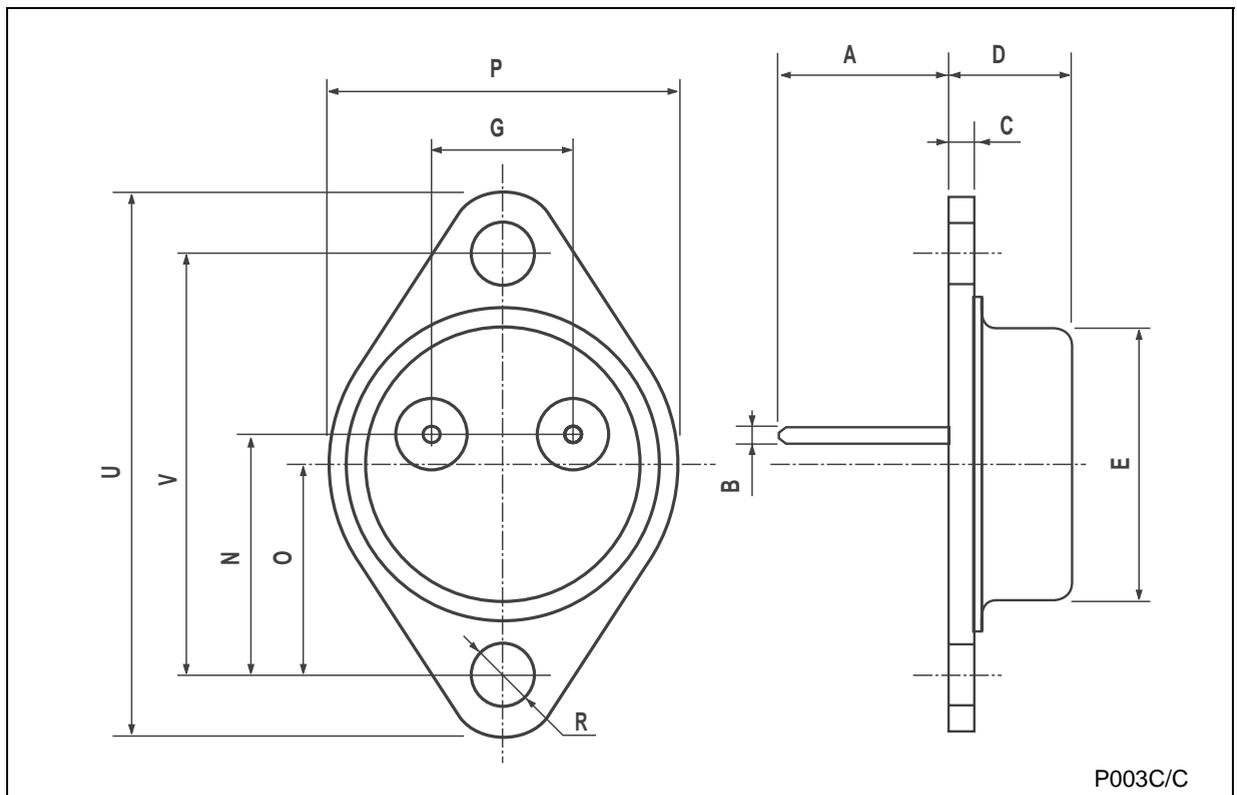


\*  $R_3$  sets peak current (0.6A for 1  $\Omega$ ).

\*\*  $C_1$  recommended to filter out input transients

### TO-3 MECHANICAL DATA

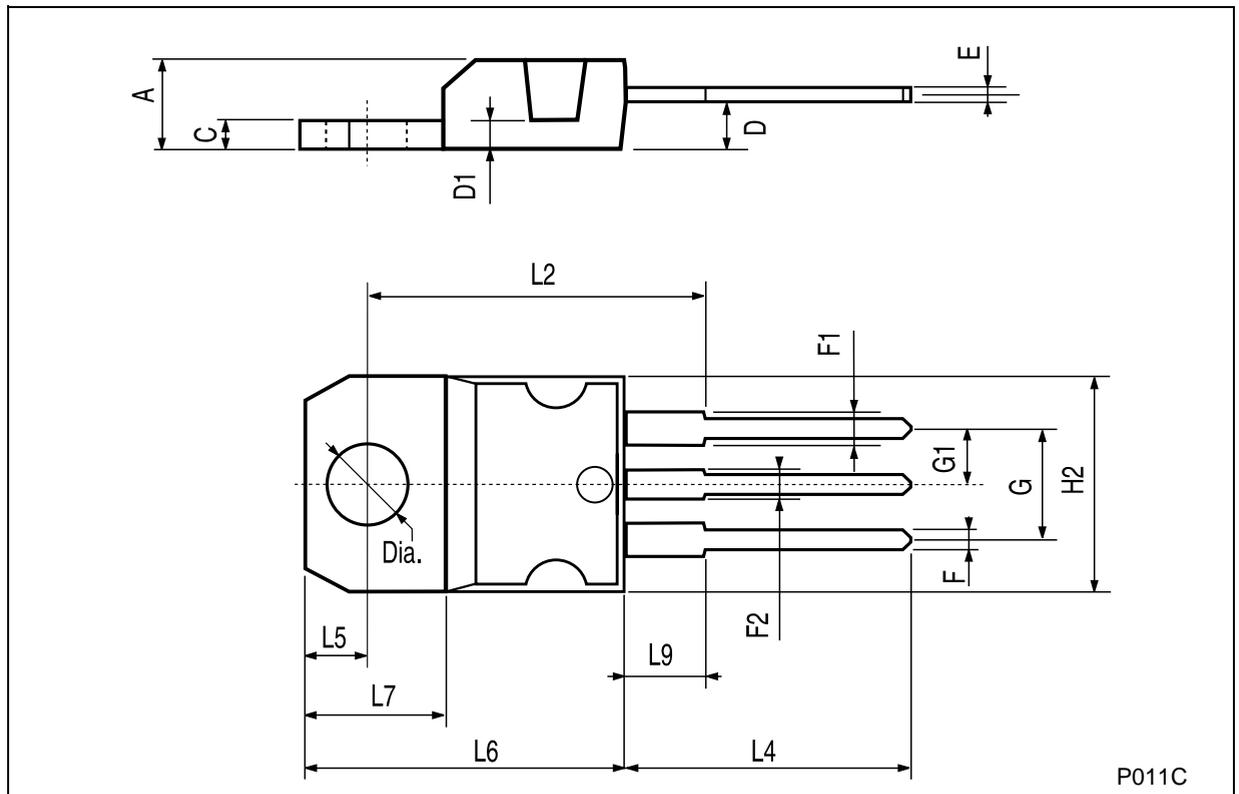
DIM.	mm.			inch		
	MIN.	TYP	MAX.	MIN.	TYP.	MAX.
A		11.85			0.466	
B	0.96	1.05	1.10	0.037	0.041	0.043
C			1.70			0.066
D			8.7			0.342
E			20.0			0.787
G		10.9			0.429	
N		16.9			0.665	
P			26.2			1.031
R	3.88		4.09	0.152		0.161
U			39.5			1.555
V		30.10			1.185	



P003C/C

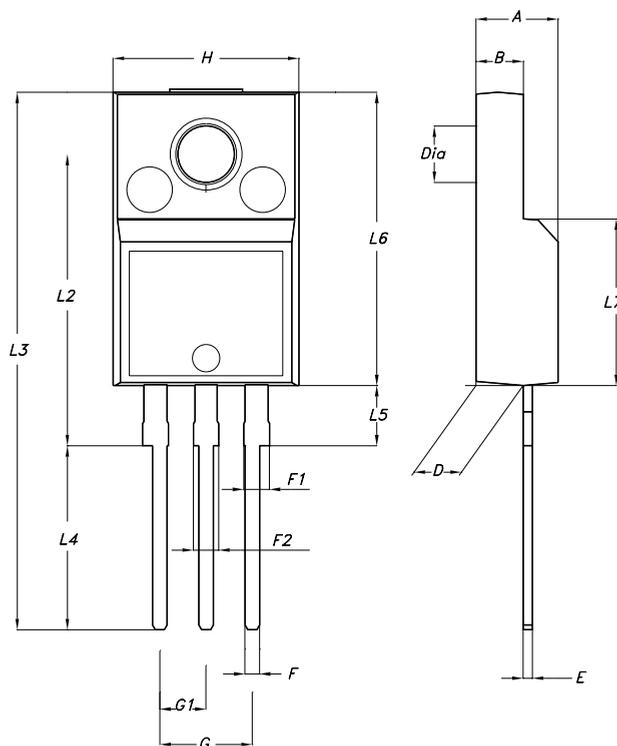
## TO-220 MECHANICAL DATA

DIM.	mm.			inch		
	MIN.	TYP.	MAX.	MIN.	TYP.	MAX.
A	4.40		4.60	0.173		0.181
C	1.23		1.32	0.048		0.051
D	2.40		2.72	0.094		0.107
D1		1.27			0.050	
E	0.49		0.70	0.019		0.027
F	0.61		0.88	0.024		0.034
F1	1.14		1.70	0.044		0.067
F2	1.14		1.70	0.044		0.067
G	4.95		5.15	0.194		0.203
G1	2.4		2.7	0.094		0.106
H2	10.0		10.40	0.393		0.409
L2		16.4			0.645	
L4	13.0		14.0	0.511		0.551
L5	2.65		2.95	0.104		0.116
L6	15.25		15.75	0.600		0.620
L7	6.2		6.6	0.244		0.260
L9	3.5		3.93	0.137		0.154
DIA.	3.75		3.85	0.147		0.151



## TO-220FP MECHANICAL DATA

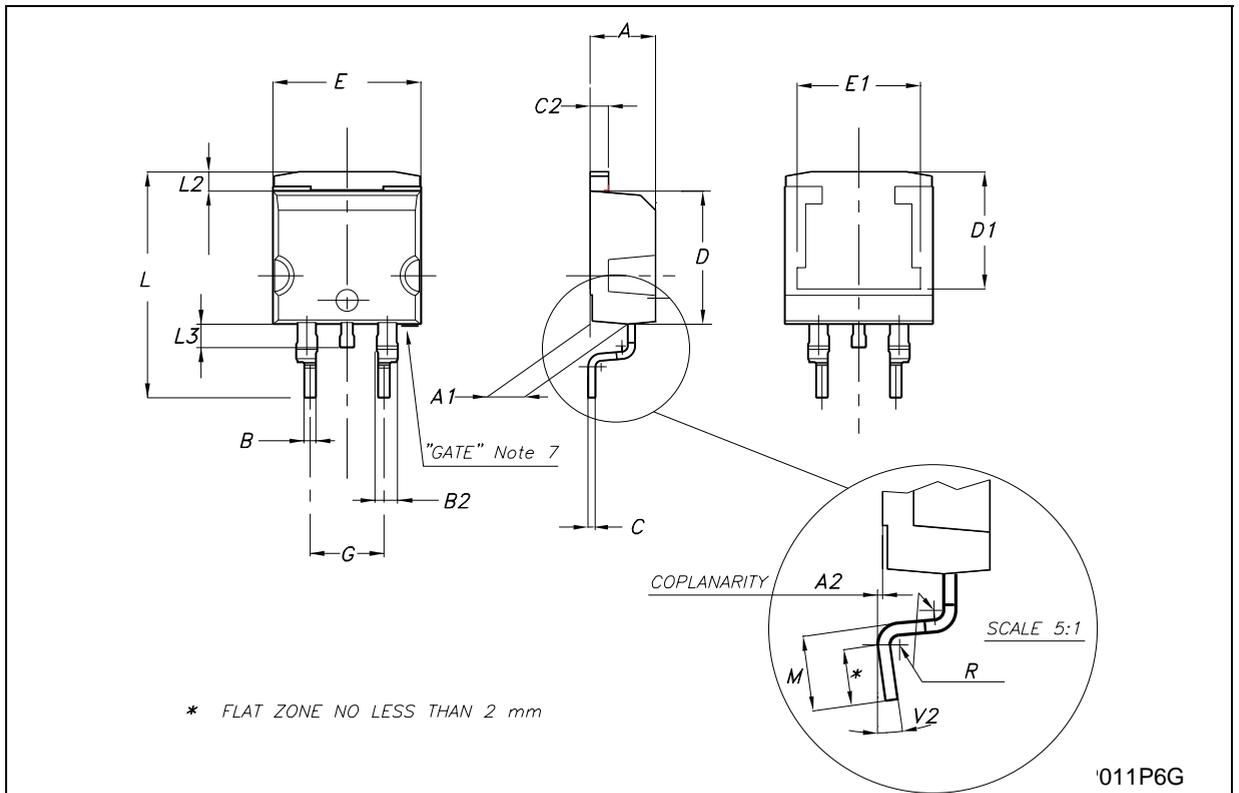
DIM.	mm.			inch		
	MIN.	TYP.	MAX.	MIN.	TYP.	MAX.
A	4.40		4.60	0.173		0.181
B	2.5		2.7	0.098		0.106
D	2.5		2.75	0.098		0.108
E	0.45		0.70	0.017		0.027
F	0.75		1	0.030		0.039
F1	1.15		1.50	0.045		0.059
F2	1.15		1.50	0.045		0.059
G	4.95		5.2	0.194		0.204
G1	2.4		2.7	0.094		0.106
H	10.0		10.40	0.393		0.409
L2		16			0.630	
L3	28.6		30.6	1.126		1.204
L4	9.8		10.6	0.385		0.417
L5	2.9		3.6	0.114		0.142
L6	15.9		16.4	0.626		0.645
L7	9		9.3	0.354		0.366
DIA.	3		3.2	0.118		0.126



7012510A-H

D<sup>2</sup>PAK MECHANICAL DATA

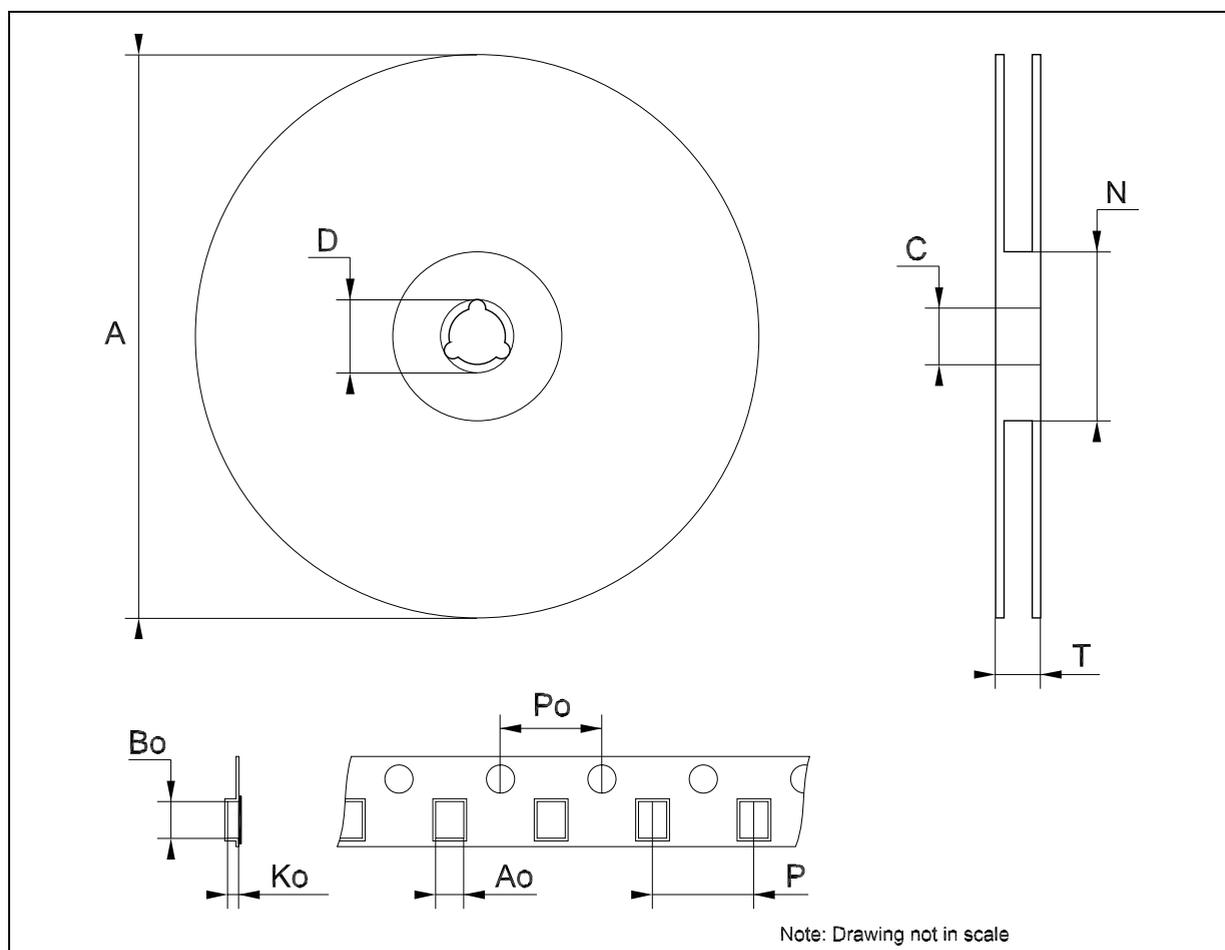
DIM.	mm.			inch		
	MIN.	TYP	MAX.	MIN.	TYP.	MAX.
A	4.4		4.6	0.173		0.181
A1	2.49		2.69	0.098		0.106
A2	0.03		0.23	0.001		0.009
B	0.7		0.93	0.027		0.036
B2	1.14		1.7	0.044		0.067
C	0.45		0.6	0.017		0.023
C2	1.23		1.36	0.048		0.053
D	8.95		9.35	0.352		0.368
D1		8			0.315	
E	10		10.4	0.393		0.409
E1		8.5			0.335	
G	4.88		5.28	0.192		0.208
L	15		15.85	0.590		0.624
L2	1.27		1.4	0.050		0.055
L3	1.4		1.75	0.055		0.068
M	2.4		3.2	0.094		0.126
R		0.4			0.016	
V2	0°		8°	0°		8°



'011P6G

## Tape & Reel D<sup>2</sup>PAK-P<sup>2</sup>PAK-D<sup>2</sup>PAK/A-P<sup>2</sup>PAK/A MECHANICAL DATA

DIM.	mm.			inch		
	MIN.	TYP	MAX.	MIN.	TYP.	MAX.
A			180			7.086
C	12.8	13.0	13.2	0.504	0.512	0.519
D	20.2			0.795		
N	60			2.362		
T			14.4			0.567
Ao	10.50	10.6	10.70	0.413	0.417	0.421
Bo	15.70	15.80	15.90	0.618	0.622	0.626
Ko	4.80	4.90	5.00	0.189	0.193	0.197
Po	3.9	4.0	4.1	0.153	0.157	0.161
P	11.9	12.0	12.1	0.468	0.472	0.476



**Table 6: Revision History**

Date	Revision	Description of Changes
01-Sep-2004	10	Mistake $V_{REF} \Rightarrow V_O$ , tables 1, 4 and 5.

Information furnished is believed to be accurate and reliable. However, STMicroelectronics assumes no responsibility for the consequences of use of such information nor for any infringement of patents or other rights of third parties which may result from its use. No license is granted by implication or otherwise under any patent or patent rights of STMicroelectronics. Specifications mentioned in this publication are subject to change without notice. This publication supersedes and replaces all information previously supplied. STMicroelectronics products are not authorized for use as critical components in life support devices or systems without express written approval of STMicroelectronics.

The ST logo is a registered trademark of STMicroelectronics

All other names are the property of their respective owners

© 2004 STMicroelectronics - All Rights Reserved

STMicroelectronics group of companies

Australia - Belgium - Brazil - Canada - China - Czech Republic - Finland - France - Germany - Hong Kong - India - Israel - Italy - Japan - Malaysia - Malta - Morocco - Singapore - Spain - Sweden - Switzerland - United Kingdom - United States of America

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

This datasheet has been download from:

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

Datasheets for electronics components.

## **Anexo III – Datasheet LM 337**

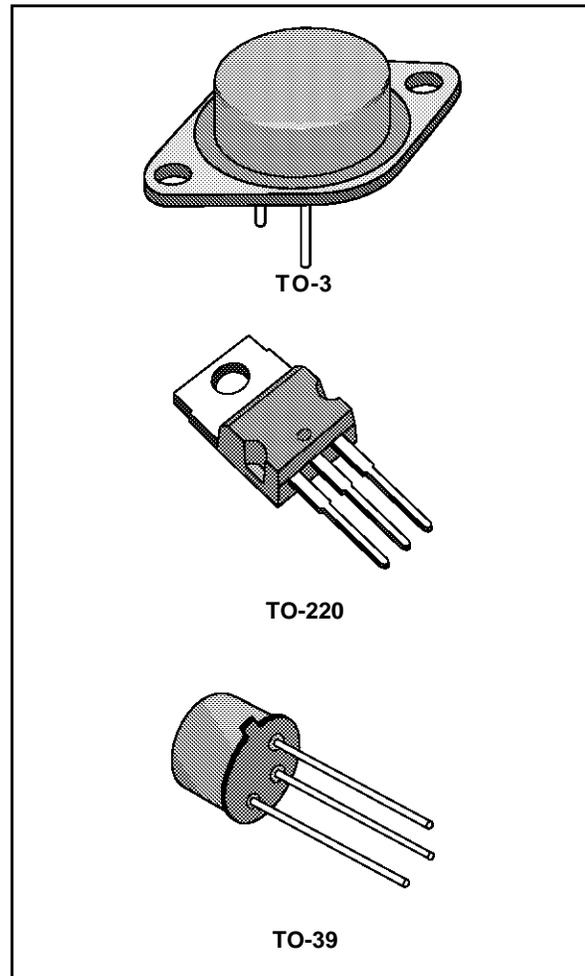


## THREE-TERMINAL ADJUSTABLE NEGATIVE VOLTAGE REGULATORS

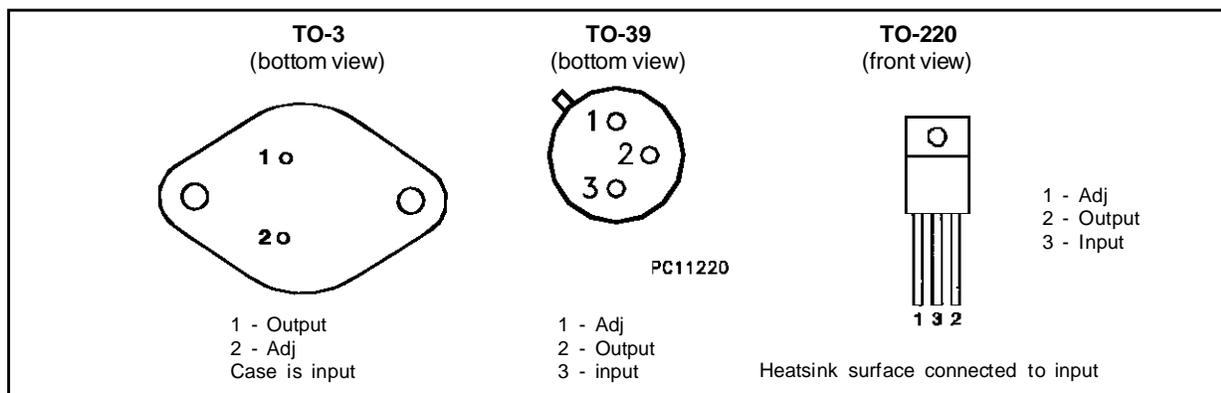
- OUTPUT VOLTAGE ADJUSTABLE DOWN TO  $V_{ref}$
- 1.5A GUARANTEED OUTPUT CURRENT
- 0.3%/V TYPICAL LOAD REGULATION
- 0.01%/V TYPICAL LINE REGULATION
- CURRENT LIMIT CONSTANT WITH TEMPERATURE
- RIPPLE REJECTION : 77dB
- STANDARD 3-LEAD TRANSISTOR PACKAGES
- EXCELLENT THERMAL REGULATION: 0.002%/V
- 50ppm/°C TEMPERATURE COEFFICIENT

### DESCRIPTION

The LM137 series are adjustable 3-terminal negative voltage regulators capable of supplying in excess- 1.5A over a - 1.2 to - 37V output voltage range. They are exceptionally easy to use and require only two external resistors to set the output voltage. Further, both line and load regulation are better than standard fixed regulators. Also, LM137 regulators are supplied in standard transistor packages which are easily mounted and handled. In addition to higher performance than fixed regulators, the LM137 series offer full overload protection available only in integrated circuits. Included on the chip are current limit, thermal overload protection and safe area protection. All overload protection circuitry remains fully functional even if the adjustment terminal is disconnected.



### PIN CONNECTIONS



## LM137-LM237-LM337

### ABSOLUTE MAXIMUM RATING

Symbol	Parameter	Value	Unit
$V_I - V_O$	Input Output Voltage Differential	40	V
$I_O$	Output Current	TO-220/TO-3 TO-39	A
$T_{oper}$		LM137	-55 to 150
		LM237	-25 to 150
		LM337	0 to 125
$T_{stg}$		-65 to 150	$^{\circ}C$
$P_{tot}$		Internally Limited	W

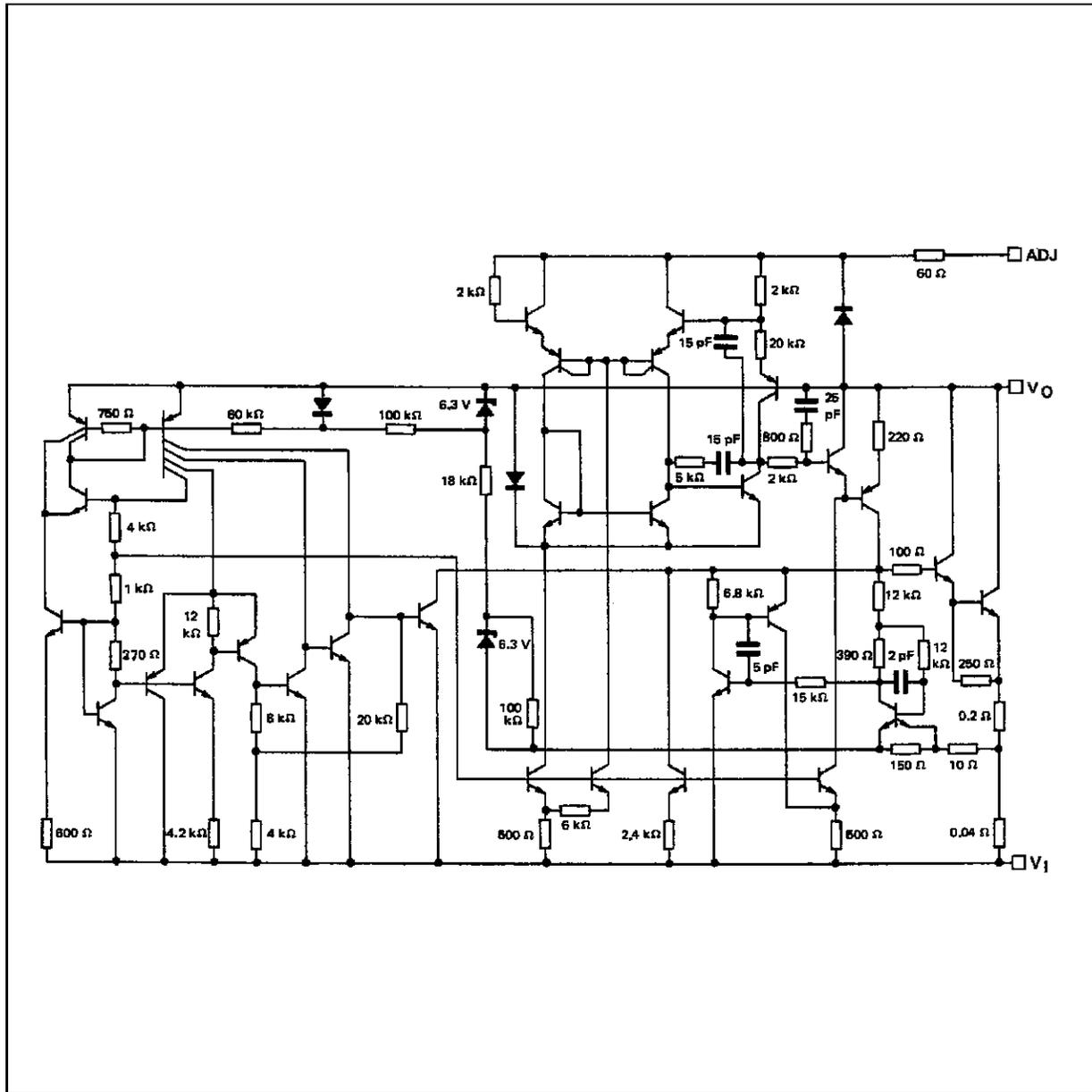
### THERMAL CHARACTERISTICS

Symbol	Parameter	Typ.	Max.	Unit
$R_{thj-case}$	Junction-case Thermal Resistance	TO-3	4	$^{\circ}C/W$
		TO-220	3	
		TO-39	15	
$R_{thj-amb}$	Junction-ambient Thermal Resistance	TO-3	35	$^{\circ}C/W$
		TO-220	70	
		TO-39	160	

### ORDER CODES

PART NUMBER	TEMPERATURE RANGE	PACKAGE		
		TO-3	TO-220	TO-39
LM137	-55 to 150 $^{\circ}C$	LM137K		LM137H
LM237	-25 to 150 $^{\circ}C$	LM237K	LM237SP	LM237H
LM337	0 to 125 $^{\circ}C$	LM337K	LM337SP	LM337H

SCHEMATIC DIAGRAM



## LM137-LM237-LM337

### ELECTRICAL CHARACTERISTICS

LM137:  $-55\text{ }^{\circ}\text{C} < T_j < 150\text{ }^{\circ}\text{C}$

LM237:  $-25\text{ }^{\circ}\text{C} < T_j < 150\text{ }^{\circ}\text{C}$

LM337:  $0\text{ }^{\circ}\text{C} < T_j < 150\text{ }^{\circ}\text{C}$

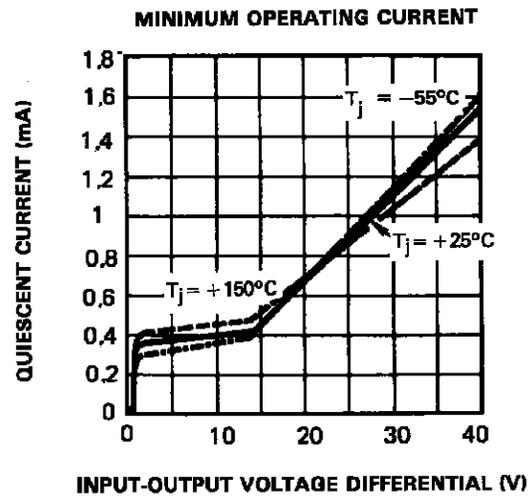
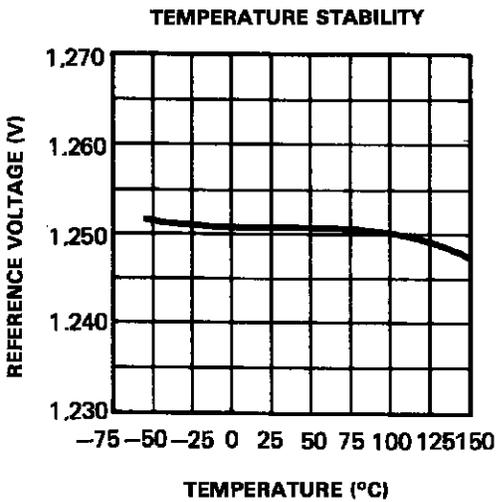
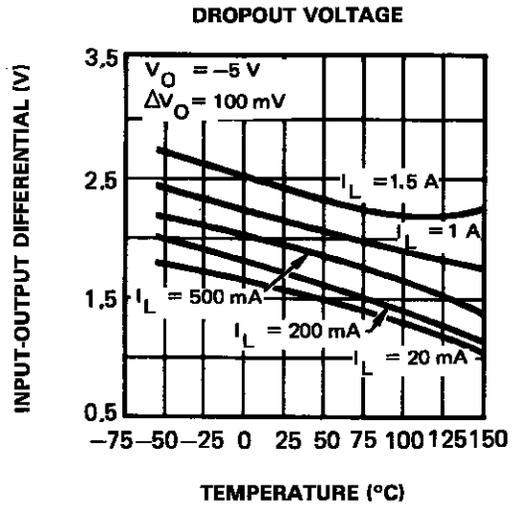
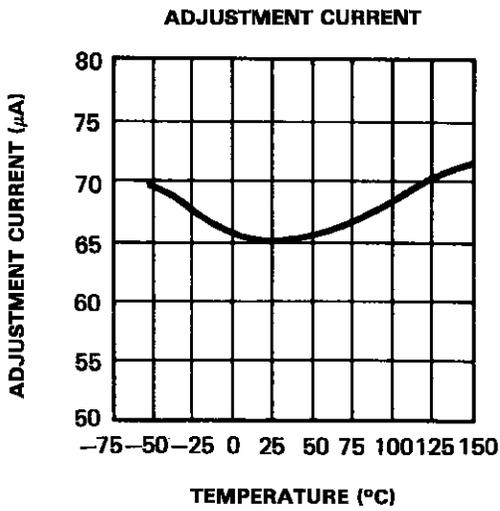
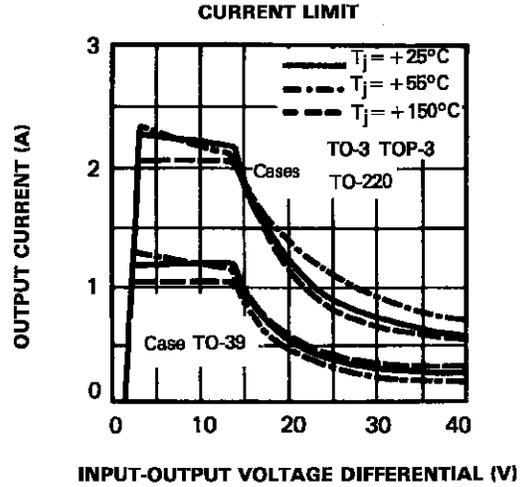
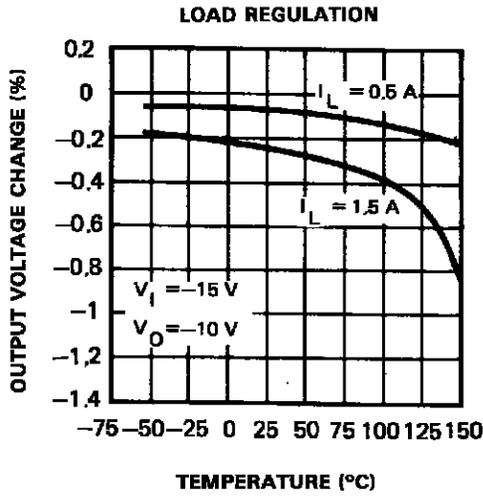
$V_I - V_O = 5\text{V}$ ,  $I_O = 0.5\text{ A}$  (unless otherwise specified)

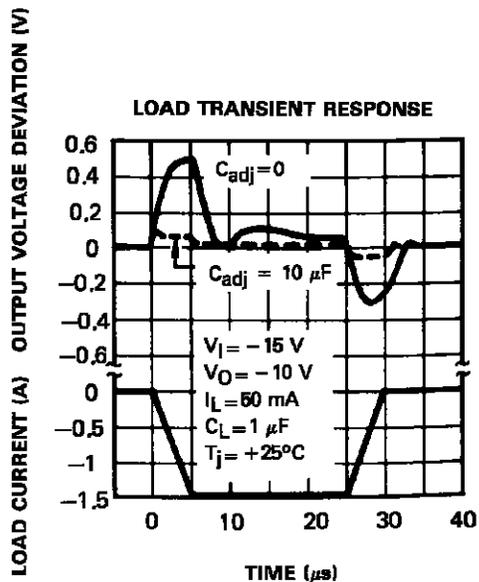
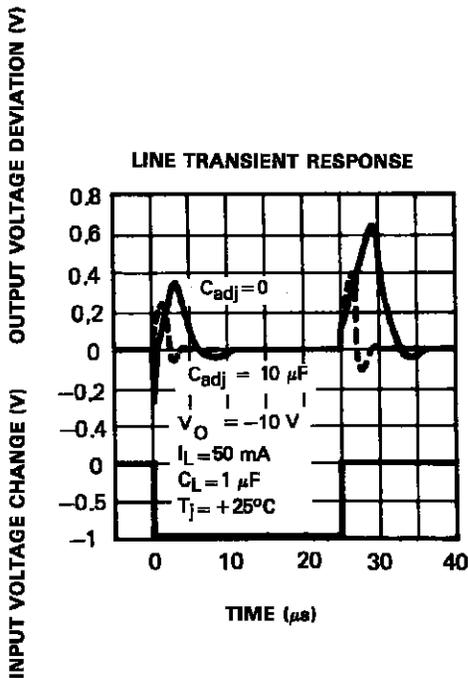
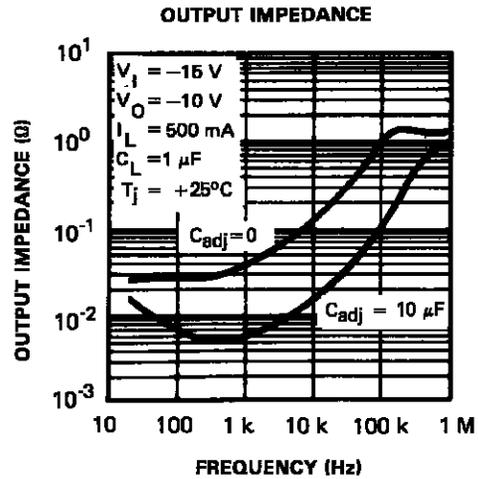
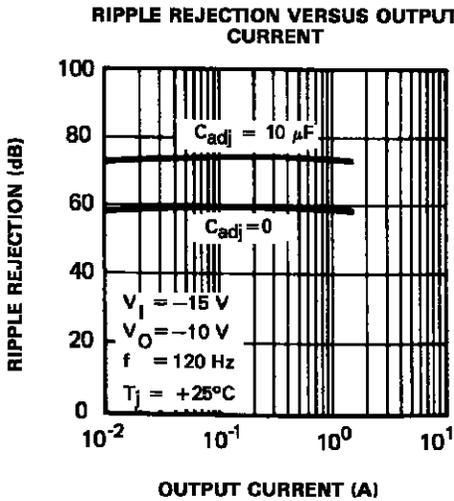
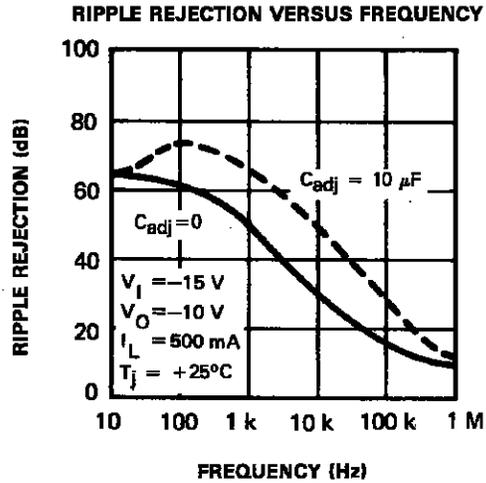
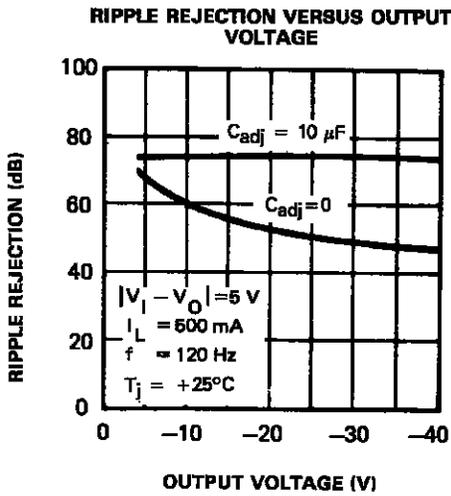
Symbol	Parameter	LM137/LM237			LM337			Unit
		Min.	Typ.	Max.	Min.	Typ.	Max.	
$V_{ref}$	Reference Voltage $T_{amb} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ $T_{min} \leq T_j \leq T_{max}$ $3\text{V} \leq  V_I - V_O  \leq 40\text{V}$ , $10\text{mA} \leq  I_O  \leq  I_{O(max)} $ $P \leq P_{max}$	-1.225	-1.25	-1.275	-1.213	-1.25	-1.287	V
$K_{VI}$	Line Regulation ( $T_{amb} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ , $3\text{V} \leq  V_I - V_O  \leq 40\text{V}$ ) - Note 2 $I_O = 0.1\text{ A}$ $I_O = 20\text{ mA}$		0.01 0.01	0.02 0.02		0.01 0.01	0.04 0.04	%/V %/V
$K_{VO}$	Load Regulation ( $T_{amb} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ , $10\text{mA} \leq  I_O  \leq  I_{O(max)} $ ) - Note 2 $ V_O  \leq 5\text{V}$ $ V_O  \geq 5\text{V}$		15 0.3	25 0.5		15 0.3	50 1	mV %
	Thermal Regulation ( $T_{amb} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ , pulse 10 ms)		0.002	0.02		0.003	0.04	%/W
$I_{adj}$	Adjustment Pin Current		65	100		65	100	$\mu\text{A}$
$\Delta I_{adj}$	Adjustment Pin Current Change ( $T_{amb} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ , $10\text{mA} \leq  I_O  \leq  I_{O(max)} $ , $3\text{V} \leq  V_I - V_O  \leq 40\text{V}$ )		2	5		2	5	$\mu\text{A}$
$K_{VI}$	Line Regulation ( $3\text{V} \leq  V_I - V_O  \leq 40\text{V}$ ) - Note 2		0.02	0.05		0.02	0.07	%/V
$K_{VO}$	Load Regulation ( $10\text{mA} \leq  I_O  \leq  I_{O(max)} $ ) - Note 2 $ V_O  \leq 5\text{V}$ $ V_O  \geq 5\text{V}$		20 0.3	50 1		20 0.3	70 1.5	mV %
$ I_{O(min)} $	Minimum Load Current $ V_I - V_O  \leq 40\text{V}$ $ V_I - V_O  \leq 10\text{V}$		2.5 1.2	5 3		2.5 1.5	10 6	mA mA
$I_{OS}$	Short Circuit Output Current $ V_I - V_O  \leq 15\text{V}$ (TO-3 and TO-220) $ V_I - V_O  \leq 15\text{V}$ (TO-39) $ V_I - V_O  = 40\text{V}$ , $T_j = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ (TO-3 and TO-220) $ V_I - V_O  = 40\text{V}$ , $T_j = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ (TO-39)	1.5 0.5 0.24 0.15	2.2		1.5 0.5 0.15 0.1	2.2		A A A A
$V_{NO}$	RMS Output Noise (% of $V_O$ ) $T_{amb} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ , $10\text{Hz} \leq f \leq 10\text{KHz}$		0.003			0.003		%
$R_{vf}$	Ripple Rejection Ratio $V_O = -10\text{ V}$ , $f = 120\text{ Hz}$ $C_{adj} = 10\text{ }\mu\text{F}$	66	60 77		66	60 77		dB dB
$K_{VT}$	Temperature Stability		0.6			0.6		%
$K_{VH}$	Long Term Stability ( $T_{amb} = 125\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 1000H)		0.3	1		0.3	1	%

Notes : 1. Although power dissipation is internally limited, these specifications are applicable for power dissipation of :

- 2W for TO-39
- 15W for TO-220
- 20W for TO-3 Package
- $I_{O(max)}$  is :
  - 1.5A for TO-3 and TO-220
  - 0.5A for TO-39

2. Regulation is measured at constant junction temperature, using pulse testing with a low duty cycle. Changes in output voltage due to heating effects are covered under the specification for thermal regulation.





**THERMAL REGULATION**

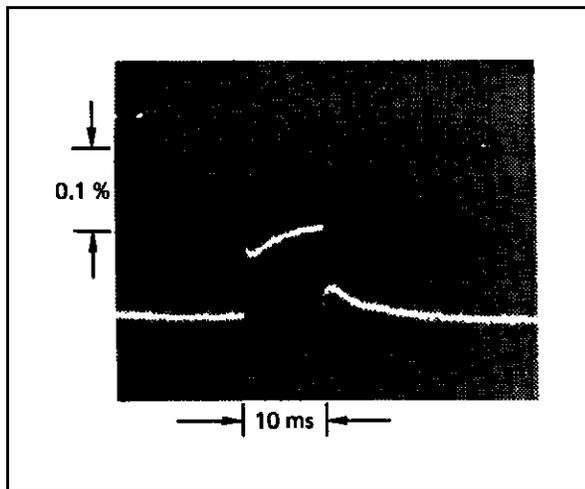
When power is dissipated in an IC, a temperature gradient occurs across the IC chip affecting the individual IC circuit components. With an IC regulator, this gradient can be especially severe since power dissipation is large.

Thermal regulation is the effect of these temperature gradients on output voltage (in percentage output change) per watt of power change in a specified time. Thermal regulation error is independent of electrical regulation or temperature coefficient, and occurs within 5ms to 50ms after a change in power dissipation. Thermal regulation depends on IC layout as well as electrical design. The thermal regulation of a voltage regulator is defined as the percentage change of  $V_O$ , per watt, within the first 10ms after a step of power, is applied.

The LM137 specification is 0.02 %/W max. In figure 1, a typical LM337's output drifts only 3mV for 0.03% of  $V_O = -10V$  when a 10W pulse is applied for 10ms. This performance is thus well inside the specification limit of  $0.02\%/W \times 10W = 0.2\%$  max. When the 10W pulse is ended the thermal regulation again shows a 3mV step as the LM137 chip cools off. Note that the load regulation error of about 8mV (0.08%) is additional to the thermal regulation error.

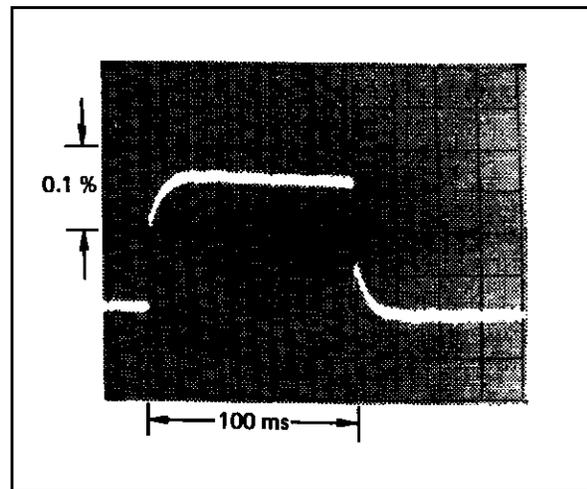
In figure 2, when the 10W pulse is applied for 100ms, the output drifts only slightly beyond the drift in the first 10ms and the thermal error stays well within 0.1% (10mV).

**Figure 1.**



LM 337,  $V_O = -10V$   
 $V_I - V_O = -40V$   
 $I_L = 0A \rightarrow 0.25A \rightarrow 0A$   
 Vertical sensitivity 5mV/div.

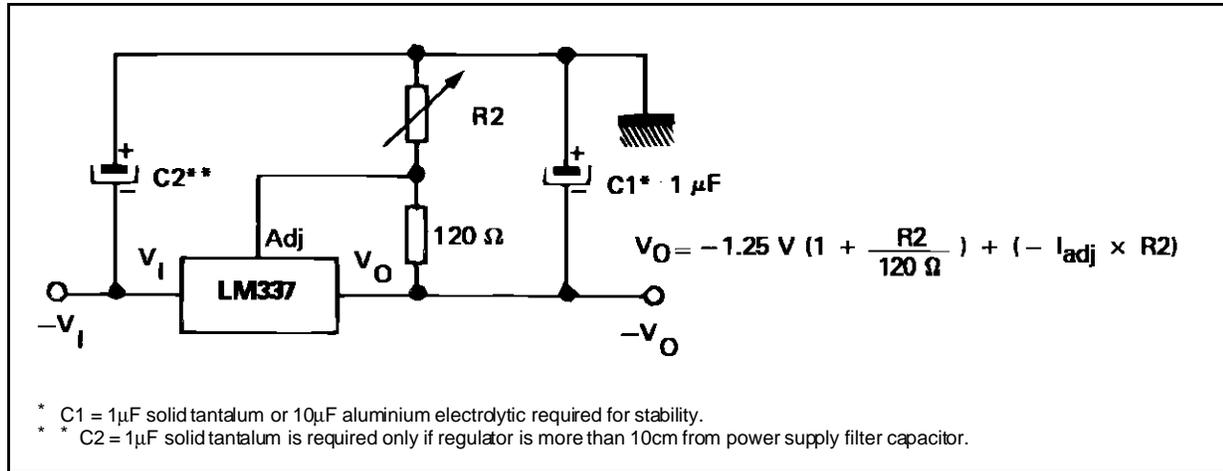
**Figure 2.**



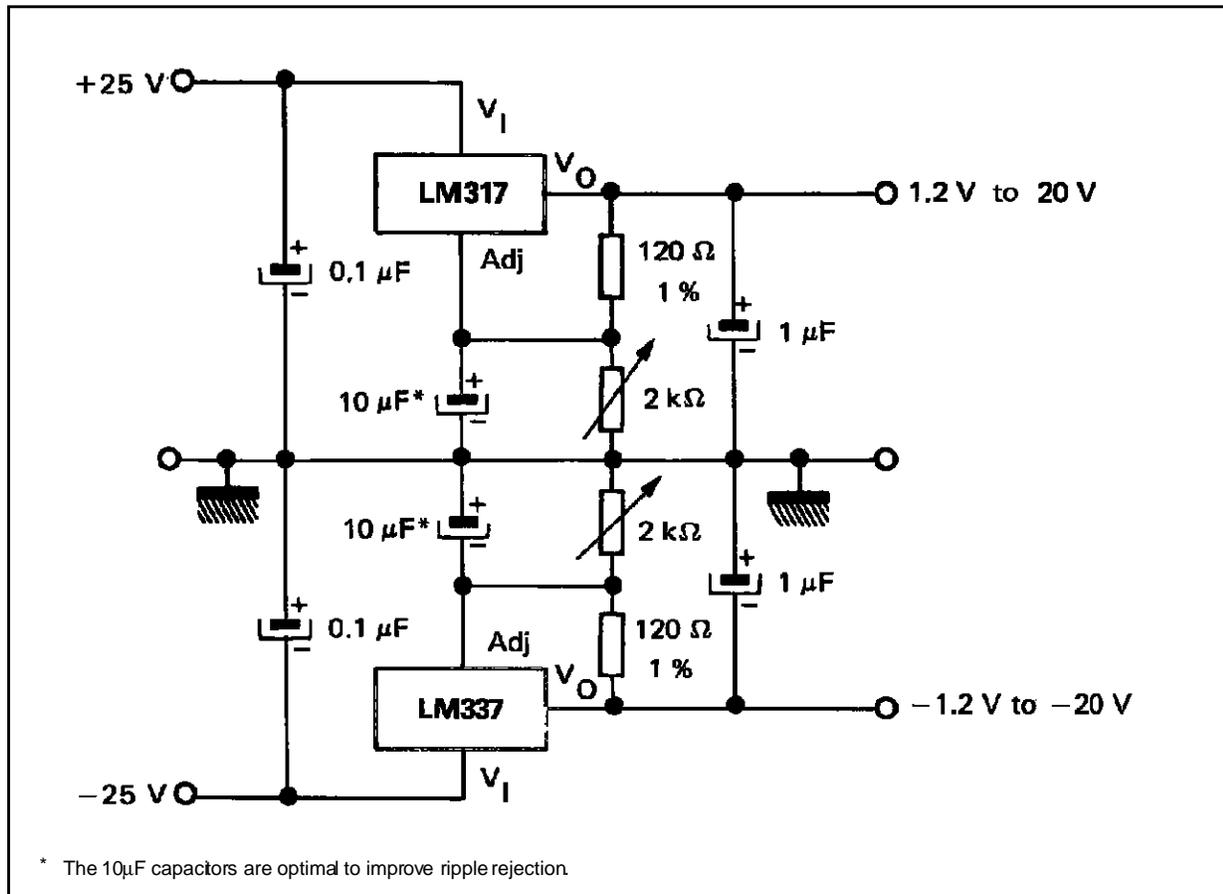
LM 337,  $V_O = -10V$   
 $V_I - V_O = -40V$   
 $I_L = 0A \rightarrow 0.25A \rightarrow 0A$   
 Horizontal sensitivity 20msN/div.

TYPICAL APPLICATIONS

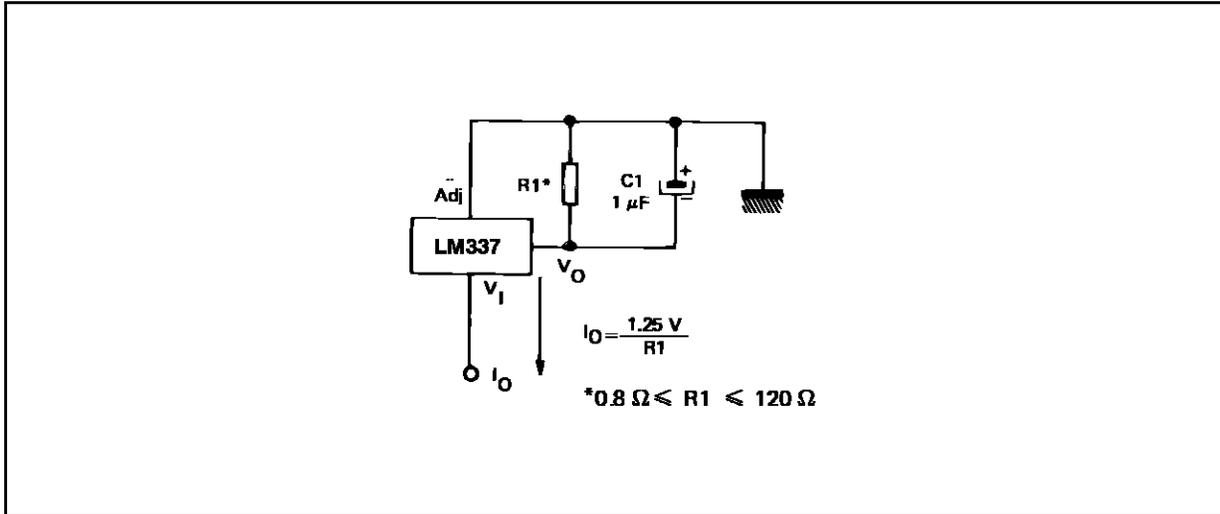
ADJUSTABLE NEGATIVE VOLTAGE REGULATOR



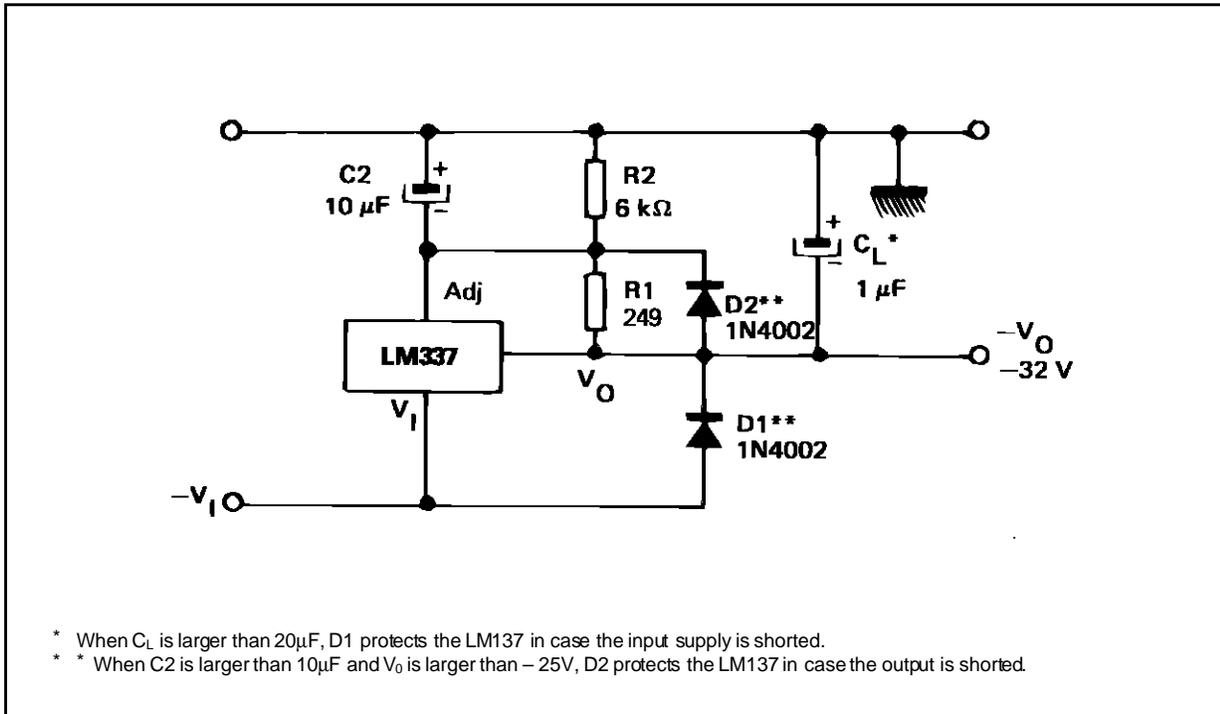
ADJUSTABLE LAB VOLTAGE REGULATOR



CURRENT REGULATOR

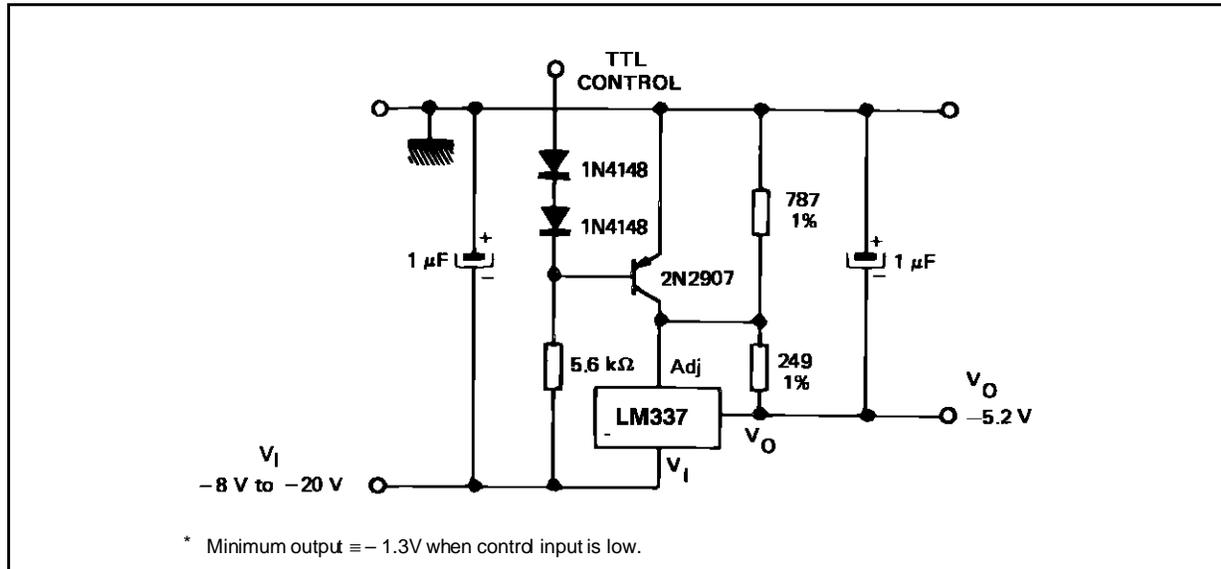


NEGATIVE REGULATOR WITH PROTECTION DIODES

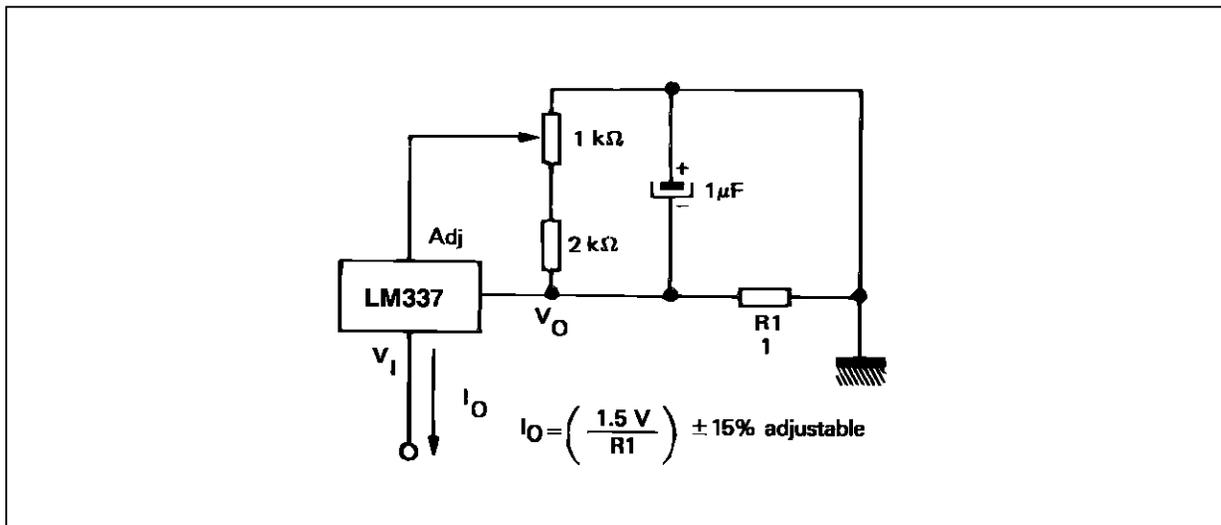


## LM137-LM237-LM337

\* -5.2V REGULATOR WITH ELECTRONIC SHUTDOWN

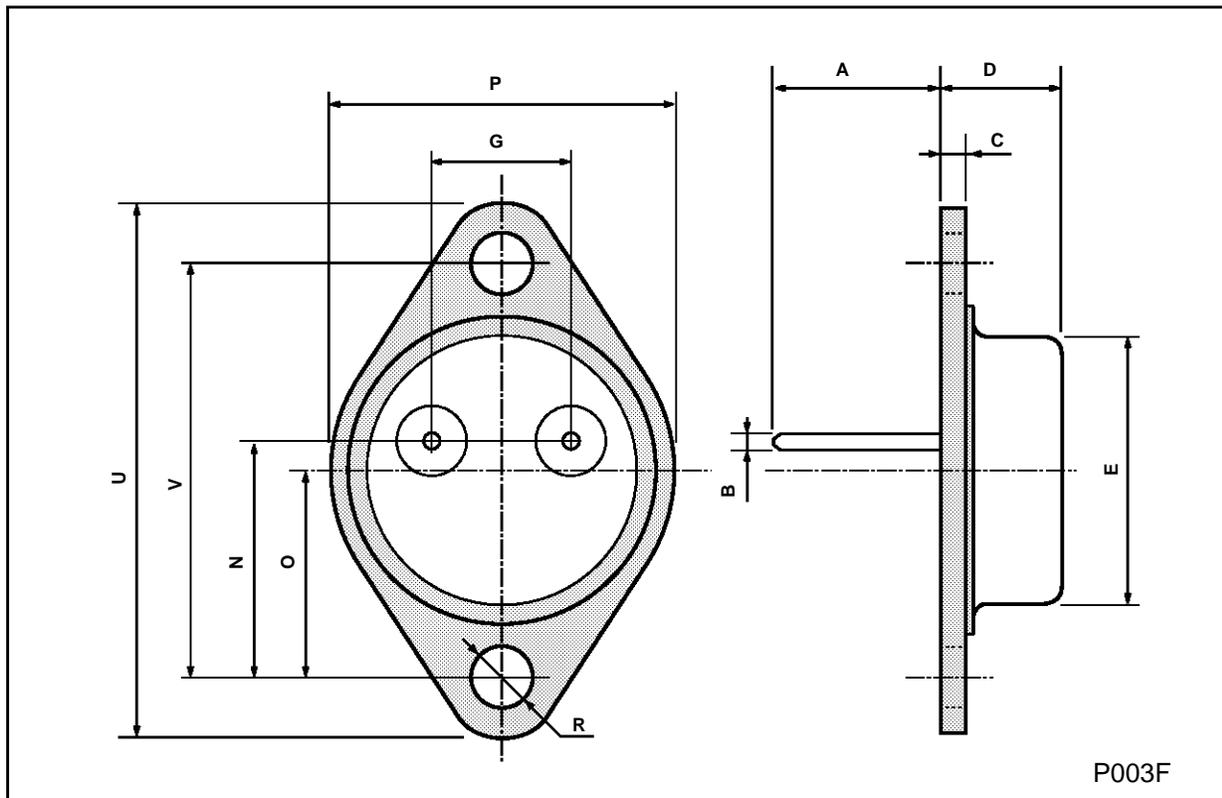


ADJUSTABLE CURRENT REGULATOR



**TO-3 MECHANICAL DATA**

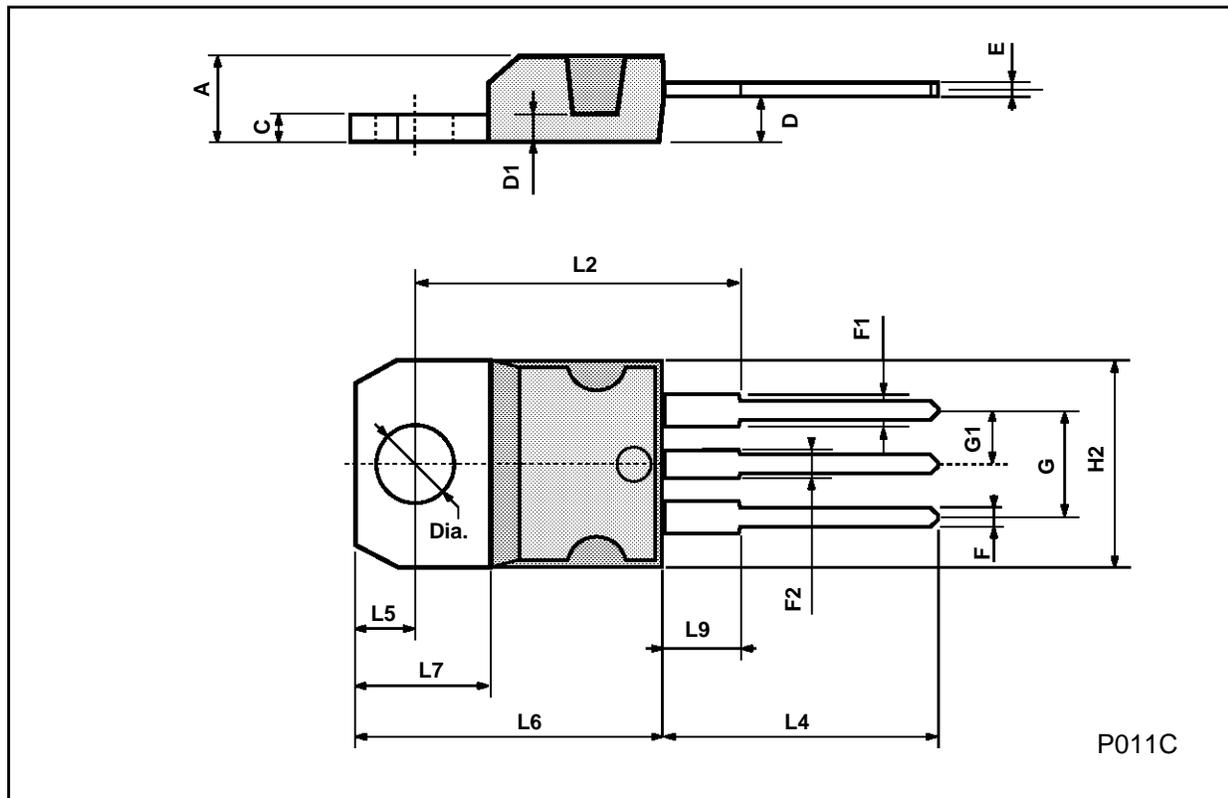
DIM.	mm			inch		
	MIN.	TYP.	MAX.	MIN.	TYP.	MAX.
A	11.00		13.10	0.433		0.516
B	0.97		1.15	0.038		0.045
C	1.50		1.65	0.059		0.065
D	8.32		8.92	0.327		0.351
E	19.00		20.00	0.748		0.787
G	10.70		11.10	0.421		0.437
N	16.50		17.20	0.649		0.677
P	25.00		26.00	0.984		1.023
R	4.00		4.09	0.157		0.161
U	38.50		39.30	1.515		1.547
V	30.00		30.30	1.187		1.193



P003F

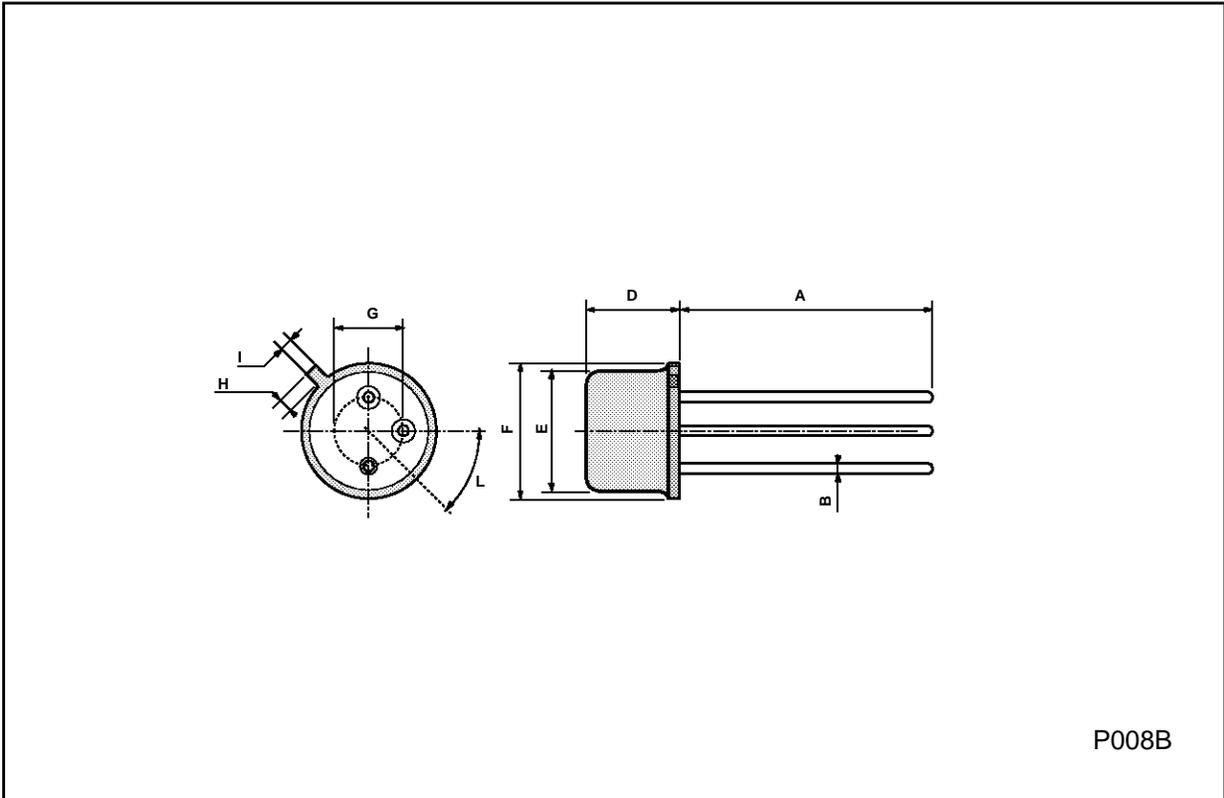
**TO-220 MECHANICAL DATA**

DIM.	mm			inch		
	MIN.	TYP.	MAX.	MIN.	TYP.	MAX.
A	4.40		4.60	0.173		0.181
C	1.23		1.32	0.048		0.051
D	2.40		2.72	0.094		0.107
D1		1.27			0.050	
E	0.49		0.70	0.019		0.027
F	0.61		0.88	0.024		0.034
F1	1.14		1.70	0.044		0.067
F2	1.14		1.70	0.044		0.067
G	4.95		5.15	0.194		0.203
G1	2.4		2.7	0.094		0.106
H2	10.0		10.40	0.393		0.409
L2		16.4			0.645	
L4	13.0		14.0	0.511		0.551
L5	2.65		2.95	0.104		0.116
L6	15.2		15.9	0.598		0.625
L7	6.2		6.6	0.244		0.260
L9	3.5		4.2	0.137		0.165
DIA.	3.75		3.85	0.147		0.151



**TO39 MECHANICAL DATA**

DIM.	mm			inch		
	MIN.	TYP.	MAX.	MIN.	TYP.	MAX.
A	12.7			0.500		
B			0.49			0.019
D			6.6			0.260
E			8.5			0.334
F			9.4			0.370
G	5.08			0.200		
H			1.2			0.047
I			0.9			0.035
L	45° (typ.)					



P008B

Information furnished is believed to be accurate and reliable. However, SGS-THOMSON Microelectronics assumes no responsibility for the consequences of use of such information nor for any infringement of patents or other rights of third parties which may result from its use. No license is granted by implication or otherwise under any patent or patent rights of SGS-THOMSON Microelectronics. Specifications mentioned in this publication are subject to change without notice. This publication supersedes and replaces all information previously supplied. SGS-THOMSON Microelectronics products are not authorized for use as critical components in life support devices or systems without express written approval of SGS-THOMSON Microelectronics.

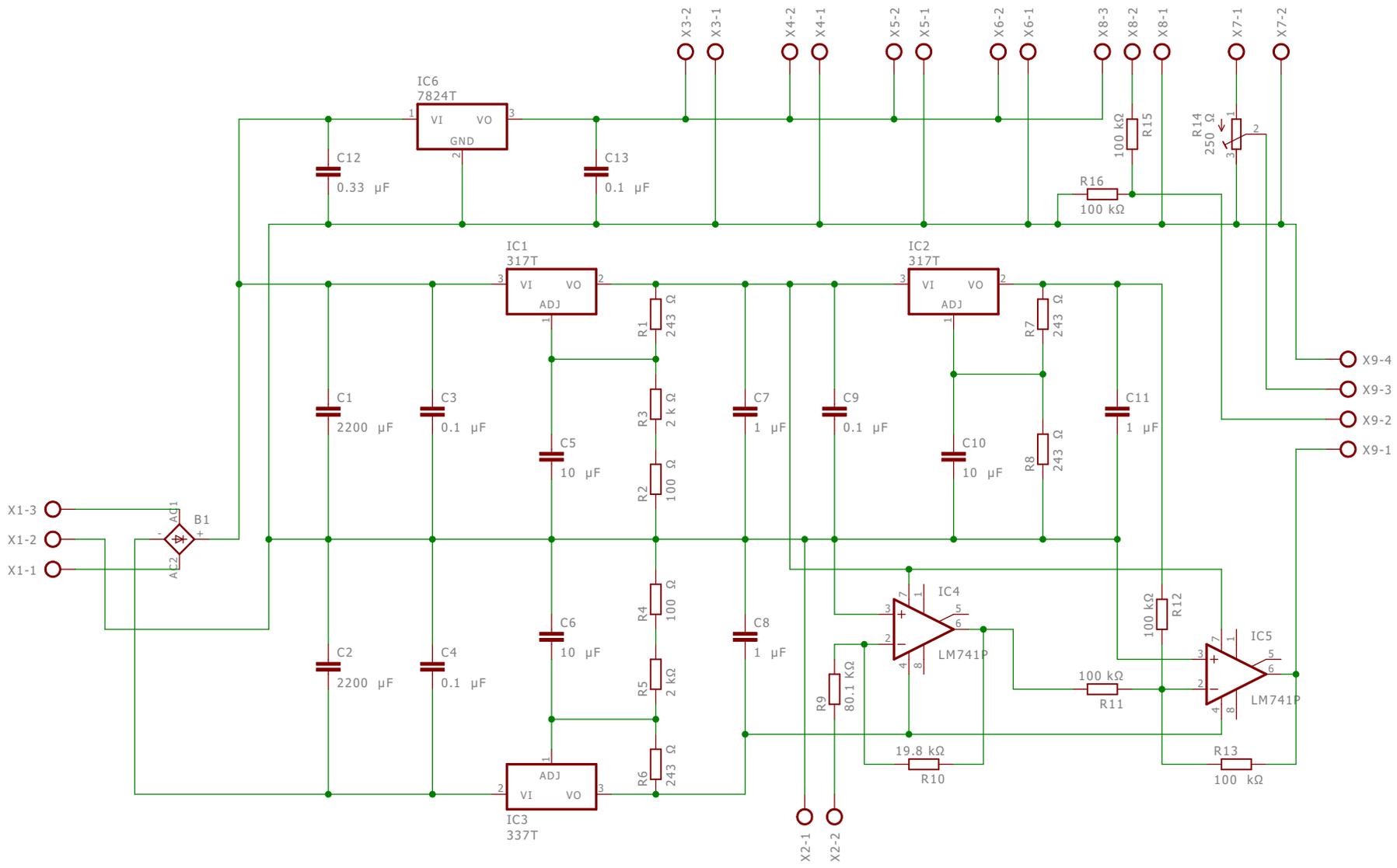
© 1994 SGS-THOMSON Microelectronics - All Rights Reserved

SGS-THOMSON Microelectronics GROUP OF COMPANIES

Australia - Brazil - France - Germany - Hong Kong - Italy - Japan - Korea - Malaysia - Malta - Morocco - The Netherlands -  
Singapore - Spain - Sweden - Switzerland - Taiwan - Thailand - United Kingdom - U.S.A

## **Anexo IV – Esquema da placa eletrónica**





## Anexo V – Resultados de atrito obtidos nos ensaios com o tribómetro linear

Amostra 1	Coefficiente de atrito à tração	Coefficiente de atrito à compressão
1º Ensaio	0,206	0,187
2º Ensaio	0,200	0,186
3º Ensaio	0,197	0,181
4º Ensaio	0,190	0,176
5º Ensaio	0,190	0,176
6º Ensaio	0,190	0,177
7º Ensaio	0,196	0,181
média	0,196	0,181
desvio padrão	0,006	0,005

Amostra 2	Coefficiente de atrito à tração	Coefficiente de atrito à compressão
1º Ensaio	0,218	0,196
2º Ensaio	0,209	0,190
3º Ensaio	0,203	0,185
4º Ensaio	0,195	0,182
5º Ensaio	0,196	0,182
6º Ensaio	0,193	0,179
7º Ensaio	0,190	0,176
média	0,201	0,184
desvio padrão	0,010	0,007

Amostra 3	Coefficiente de atrito à tração	Coefficiente de atrito à compressão
1º Ensaio	0,210	0,203
2º Ensaio	0,211	0,200
3º Ensaio	0,209	0,196
4º Ensaio	0,201	0,187
5º Ensaio	0,203	0,189
6º Ensaio	0,209	0,193
7º Ensaio	0,206	0,190
média	0,207	0,194
desvio padrão	0,004	0,006

Amostra 4	Coeficiente de atrito à tração	Coeficiente de atrito à compressão
1º Ensaio	0,255	0,251
2º Ensaio	0,248	0,244
3º Ensaio	0,244	0,239
4º Ensaio	0,239	0,232
5º Ensaio	0,242	0,238
6º Ensaio	0,237	0,230
7º Ensaio	0,236	0,228
média	0,243	0,230
desvio padrão	0,007	0,008

Amostra 5	Coeficiente de atrito à tração	Coeficiente de atrito à compressão
1º Ensaio	0,363	0,345
2º Ensaio	0,360	0,338
3º Ensaio	0,348	0,334
4º Ensaio	0,341	0,320
5º Ensaio	0,337	0,314
6º Ensaio	0,339	0,317
7º Ensaio	0,348	0,324
média	0,348	0,327
desvio padrão	0,010	0,012

## Anexo VI – Resultados de atrito obtidos nos ensaios com o FricTORQ

	Coeficiente de atrito				
	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Amostra 5
Ensaio 1	0,176	0,19	0,202	0,252	0,255
Ensaio 2	0,168	0,182	0,208	0,248	0,245
Ensaio 3	0,164	0,176	0,197	0,245	0,243
Ensaio 4	0,17	0,169	0,197	0,243	0,24
Ensaio 5	0,168	0,166	0,206	0,241	0,238
Ensaio 6	0,174	0,164	0,186	0,237	0,243
Ensaio 7	0,163	0,162	0,185	0,231	0,236

	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Amostra 5
Coef. Atrito	0,169	0,173	0,197	0,242	0,243
Desvio padrão	0,0048	0,0104	0,0091	0,0070	0,0062



## Anexo VII – Resultados de rugosidade obtidos nos ensaios com o tribómetro linear

Amostra 1	Rugosidade do tecido
1º Ensaio	0,7
2º Ensaio	0,67
3º Ensaio	0,61
4º Ensaio	0,54
5º Ensaio	0,54
6º Ensaio	0,67
7º Ensaio	0,61
Média	0,62

Amostra 2	Rugosidade do tecido
1º Ensaio	1,34
2º Ensaio	1,4
3º Ensaio	1,04
4º Ensaio	1,22
5º Ensaio	1,26
6º Ensaio	1,18
7º Ensaio	1,1
Média	1,22

Amostra 3	Rugosidade do tecido
1º Ensaio	0,73
2º Ensaio	0,67
3º Ensaio	0,85
4º Ensaio	0,61
5º Ensaio	0,61
6º Ensaio	0,73
7º Ensaio	0,73
Média	0,704

Amostra 4	Rugosidade do tecido
1º Ensaio	1,78
2º Ensaio	1,42
3º Ensaio	1,34
4º Ensaio	1,22
5º Ensaio	1,22

6º Ensaio	1,16
7º Ensaio	1,16
Média	1,33

Amostra 5	Rugosidade do tecido
1º Ensaio	0,67
2º Ensaio	0,48
3º Ensaio	0,48
4º Ensaio	0,55
5º Ensaio	0,48
6º Ensaio	0,48
7º Ensaio	0,52
Média	0,523