

**UNIVERSIDADE DA MADEIRA**

**Centro de Ciências Exactas e da Engenharia**



# Sistema de instrumentação de baixo custo compatível com o LabVIEW

*Francisco José Vieira Dinis*

Nº 2045602

*Tese submetida à Universidade da Madeira para obtenção do grau de  
Mestre em Engenharia de Telecomunicações e Redes*

Docente/Orientador: Prof. Dr. Luís Armando de Aguiar Oliveira Gomes

Novembro de 2010

*Tese realizada sob a supervisão do*  
*Prof. Dr. Luís Armando de Aguiar Oliveira Gomes*  
*Professor Auxiliar do Centro de Ciências Exactas e da Engenharia*  
*da Universidade da Madeira*

*Ao amor da minha vida, Mónica*

*“A alegria está na luta, na tentativa, no sofrimento envolvido.*

*Não na vitória propriamente dita.”*

*Mahatma Gandhi*



# *Agradecimentos*

---

## *Família e Amigos*

*Quero antes de mais agradecer à pessoa que me tornou naquilo que sou hoje e que tem sido, como meu anjo da guarda, uma voz orientadora. Sem o seu apoio, compreensão, amor e carinho nunca me teria formado nem tão pouco escrito esta tese. Obrigado Mónica por tudo aquilo que fizeste e continuas a fazer por mim. Foste, e serás para sempre o amor da minha vida.*

*Aos meus pais quero deixar uma especial mensagem de agradecimento e carinho pelos seus concelhos e lições. Só desejo um dia poder transmitir aos meus filhos tudo aquilo que por vós me foi ensinado. Pai e Mãe, vocês são sem dúvida os verdadeiros heróis da minha vida.*

*Ao meu irmão e irmã por todas as mensagens de carinho e encorajamento. É também por vocês que nunca desisti e continuo a tentar dar o melhor de mim em tudo o que faço.*

*Aos meus cunhados Ruben Sousa e Maria Aldinhas, pela precisa ajuda que me deram. Não me posso esquecer de agradecer a um colega de curso que é uma das pessoas mais especiais que conheci ao longo de todo o meu percurso académico, e cuja entrega ao outro é de louvar. Jorge Lopes foste um verdadeiro companheiro e uma ajuda fundamental no desenvolvimento desta tese. O meu muito Obrigado.*

*Ao Eng. Filipe Santos pela ajuda que este me deu não só no desenvolvimento da tese mas também durante o meu percurso académico.*

*Aos restantes colegas de curso pela ajuda directa e indirecta que me deram, nomeadamente, a Lina Teixeira, o Tiago Braga e o Leonardo Gonçalves e todos os outros que não mencionei mas que também contribuíram.*

*Aos meus verdadeiros amigos e colegas de trabalho que sempre me ajudaram com palavras de incentivo.*

## *Instituições*

*Quero antes de mais agradecer o empenho, esforço e dedicação do Prof. Dr. Luís Gomes. As suas palavras de sabedoria e incentivo foram para mim ajudas preciosas e que nunca mais serão esquecidas. Professores como o Prof. Dr. Luís Gomes são verdadeiras inspirações para futuros Engenheiros formados na Universidade da Madeira.*

*Agradeço à Universidade da Madeira pelo apoio financeiro e pela disponibilidade das instalações.*

*Agradeço também a todo o corpo de docentes do Centro de Ciências Exactas e da Engenharia da Universidade da Madeira, pelo empenho e entrega com que estes desempenham as suas funções.*

*Quero deixar também uma mensagem de apresso à empresa para a qual trabalhei durante o meu percurso académico, nomeadamente a TAMPER Protecção e Segurança S.A. A compreensão e a disponibilidade da gerência face à minha situação de trabalhador-estudante é de louvar e é um exemplo a seguir por todas as outras empresas deste País.*



## Sumário

---

A procura de soluções de baixo custo é hoje em dia, uma exigência quando se fala em aquisição de equipamentos para empresas e instituições. Essa procura torna-se ainda mais premente quando as soluções disponíveis comercialmente são demasiado caras e não traduzem por completo os objectivos para as quais se destinam.

Com o trabalho desenvolvido nesta tese de Mestrado pretendeu-se criar uma versão *low cost* de um sistema de medição de deformações em estruturas, para ser utilizado pelo laboratório de Engenharia Civil da Universidade da Madeira. Fazendo uso da filosofia *low cost* utilizada para o desenvolvimento do sistema de medição, utilizou-se um Arduíno Duemilanove como plataforma de interface com o LabVIEW, em detrimento das dispendiosas placas de aquisição de dados.

De forma a tornar o sistema de medição funcionalmente mais completo, e aproveitando-se a interface criada, bem como os deflectómetros digitais pertencentes à instituição, criou-se um sistema de medição personalizado que consegue medir simultaneamente os dados de três extensómetros e os valores medidos por dois deflectómetros.

Foram efectuados diversos testes no equipamento desenvolvido, permitindo não só a calibração do mesmo, mas também um estudo das suas capacidades e limitações.

Por fim, e de forma a demonstrar a versatilidade da interface criada, procedeu-se a um teste final onde foi possível verificar-se que era possível obter-se uma taxa de amostragem de cerca de 408,3Hz, caso o sistema fosse utilizado para a aquisição de um só valor de tensão analógico.



## *Summary*

---

The demand for low cost solutions is now a requirement when it comes to buying equipment for companies and institutions. This demand becomes even more pressing when the available commercial solutions are too expensive and do not fully reflect the goals for which they are intended.

The work developed in this Master's thesis was intended to create a low cost version of a strain-gauge measurement system, to be used by the laboratory of Civil Engineering of the University of Madeira. Making use of the low cost philosophy used for the development of the measurement system, an Arduino Duemilanove was used as an interface platform, instead of the expensive data acquisition boards.

In order to make the measurement system more functionally complete, and taking advantage of the interface created, as well as the digimatic indicators of the institution, a custom measurement system was created that is capable of reading simultaneously data from two digimatic indicators and three strain-gauge channels.

Testing was undertaken in the developed equipment, allowing not only its calibration, but also a study of its capabilities and limitations.

Lastly, in order to demonstrate the versatility of the interface created, a final test was preceded, where it was possible to obtain a sampling rate of about 408,3Hz, if the system were used to the acquisition of a single analog voltage value.



# Índice

---

Sumário.....	vii
Summary.....	ix
Índice.....	xi
Índice de Ilustrações.....	xiv
Índice de Tabelas.....	xvii
Lista de Abreviaturas.....	xviii
Lista de Símbolos.....	xix
1. Introdução.....	1
1.1 Motivação.....	1
1.2 Trabalho desenvolvido.....	2
1.3 Estrutura da tese.....	2
2. Teoria.....	5
2.1 Amplificadores operacionais.....	5
2.1.1 Introdução aos amplificadores operacionais.....	5
2.1.2 O Amplificador operacional ideal e o amplificador operacional real.....	7
2.2 Conceito de realimentação.....	8
2.2.1 Análise da configuração básica não inversora.....	9
2.2.2 Análise da configuração básica inversora.....	10
2.2.3 Algumas funções passíveis de serem realizadas por um amplificador operacional.....	11
2.2.3.1 Somador de tensões.....	11
2.2.3.2 Amplificador diferencial.....	12
2.3 Amplificadores de instrumentação.....	13
2.3.1 Diferenças entre os amplificadores operacionais e os amplificadores de instrumentação.....	13
2.4 Medição de resistências.....	14
2.4.1 Introdução.....	14
2.4.1.1 Ponte de Wheatstone.....	15
2.4.1.2 Ponte de Wheatstone na vizinhança do equilíbrio.....	16
2.4.1.3 Linearização da ponte com um único braço activo.....	19
2.5 Transdutores.....	21
2.5.1 Introdução.....	21
2.5.2 Extensómetros resistivos.....	23
2.5.3 Transdutores magnéticos.....	26
2.5.4 Transdutores fotosensíveis.....	27
2.5.5 Células fotocondutoras.....	27
2.5.6 Fotodíodos e fototransistores.....	27
2.6 Sistemas e cadeias de medição.....	28
2.6.1 Sistema de medição.....	28
2.6.2 Cadeia de medição.....	29
2.6.2.1 Organização de uma cadeia de medição.....	29
2.6.2.2 Os erros numa cadeia de medição.....	31
2.7 LabVIEW.....	34
2.7.1 Introdução.....	34
2.7.2 Instrumentos virtuais.....	34
2.8 Arduíno.....	35

2.8.1	Hardware .....	35
2.8.1.1	Tipos e quantidades de memória disponíveis.....	37
2.8.1.2	Pins de I/O.....	38
2.8.2	Software.....	40
2.8.2.1	Instalação e utilização .....	40
2.8.2.2	Processo de criação de um programa no Arduino .....	41
2.8.3	Aquisição de sinal – conversão A/D .....	42
2.9	Fibra óptica dopada .....	43
2.9.1	Vidros dopados com terras raras.....	43
2.9.2	Fibras dopadas com Érbio .....	44
3.	Procedimento .....	47
3.1	Taxa de amostragem real de um Arduino Duemilanove .....	47
3.2	Deflectómetros digitais.....	48
3.2.1	Introdução e modo de funcionamento.....	48
3.2.2	Arduino.....	52
3.2.3	LabVIEW.....	55
3.2.3.1	Aplicação de tratamento e registo de medições em tempo real .....	55
3.2.3.2	Aplicação de registo de dados sem tratamento .....	62
3.3	Sistema de medição de extensómetros .....	65
3.3.1	Descrição e análise do sistema da National Instruments.....	65
3.3.2	Descrição do sistema de medição desenvolvido.....	66
3.3.3	Princípio do circuito de medição .....	67
3.3.3.1	Primeiro andar .....	67
3.3.3.2	Segundo andar .....	70
3.3.4	Placa de circuito impresso construída.....	71
3.3.5	Arduino.....	72
3.3.6	LabVIEW.....	73
3.3.6.1	Painel principal e funcionalidades.....	75
3.3.6.2	Tratamento dos dados gravados (média) .....	76
3.4	Medição do tempo de vida do Érbio .....	79
3.4.1	Esquema de montagem.....	79
3.4.2	Código no Arduino e configuração da taxa de amostragem.....	80
3.4.3	LabVIEW.....	80
4.	Testes práticos e discussão dos resultados.....	81
4.1	Taxa de amostragem real de um Arduino Duemilanove .....	81
4.1.1	Taxa de amostragem do Arduino a funcionar isoladamente .....	81
4.1.2	Taxa de amostragem do Arduino comunicando com o LabVIEW .....	82
4.2	Deflectómetros digitais.....	83
4.2.1	Aplicação de tratamento e registo de dados em tempo real .....	83
4.2.2	Aplicação de registo de dados sem tratamento em tempo real.....	86
4.3	Sistema de medição de extensómetros .....	88
4.3.1	Montagem utilizada.....	88
4.3.2	Variação constante de peso.....	91
4.3.3	Variação aleatória da deformação.....	92
4.3.4	Comportamento dos sistemas de medição em repouso.....	95
4.4	Medição do tempo de vida do Érbio .....	99
5.	Conclusões e perspectivas de trabalho futuro.....	103
5.1	Perspectivas de trabalho futuro.....	105
6.	Anexos .....	107

6.1	Código a carregar no Arduíno para a verificação da taxa de amostragem.	107
6.2	Deflectómetro digital.....	108
6.2.1	Código a carregar no Arduíno .....	108
6.2.2	Código desenvolvido no LabVIEW .....	110
6.2.2.1	Código para a aquisição de dados .....	110
6.2.2.2	Tratamento de dados.....	110
6.3	Manual do deflectómetro digital Mitutoyo.....	115
6.4	Sistema de medição de extensómetros .....	116
6.4.1	Circuito desenvolvido .....	116
6.4.2	Placas de circuito impresso criadas.....	117
6.4.3	Código a carregar no Arduíno para a leitura das medições dos três extensómetros .....	119
6.4.4	Código no LabVIEW para a leitura das medições dos três extensómetros .....	120
6.4.4.1	Aquisição .....	120
6.4.4.2	Tratamento dos resultados .....	120
6.4.4.3	Configuração do tempo de leitura .....	121
6.4.4.4	Gravação dos resultados .....	121
6.4.4.5	Configuração do número de medições por segundo.....	121
6.4.4.6	Aquisição dos dados não tratados.....	122
6.4.4.7	Aquisição individual de cada medição .....	122
6.4.4.8	Configuração dos parâmetros das médias.....	123
6.4.4.9	Conversão para um array .....	124
6.4.4.10	Cálculo das médias e dos intervalos de tempo.....	125
6.4.4.11	Painel Principal da aplicação que efectua as médias .....	125
6.5	Medição do tempo de vida do Érbio .....	126
6.5.1	Código a carregar no Arduíno para a leitura do detector óptico.....	126
6.6	Construção de um protótipo de um sistema de medição baseado na técnica do Z-Scan.....	127
6.6.1	A técnica do Z-scan.....	127
6.6.2	Procedimento .....	128
7.	Bibliografia .....	131

# Índice de Ilustrações

---

FIG. 2.1 – SÍMBOLO DE UM AMPLIFICADOR OPERACIONAL: A) SÍMBOLO HABITUAL COM DUAS ENTRADAS E UMA SAÍDA; B) ESQUEMA CONCEPTUAL DE UM AMPLIFICADOR OPERACIONAL ONDE ESTÁ ESQUEMATIZADO O CIRCUITO EQUIVALENTE. ....	6
FIG. 2.2 - ALIMENTAÇÃO DE UM AMPLIFICADOR OPERACIONAL. ....	6
FIG. 2.3 - ESQUEMA DOS PINS DE UM AMPLIFICADOR OPERACIONAL. ....	7
FIG. 2.4 - CONFIGURAÇÃO INVERSORA DO AMPLIFICADOR OPERACIONAL. ....	9
FIG. 2.5 - CONFIGURAÇÃO NÃO INVERSORA DO AMPLIFICADOR OPERACIONAL. ....	10
FIG. 2.6 - ESQUEMA DE UM CIRCUITO SOMADOR DE TENSÃO. ....	11
FIG. 2.7 - CIRCUITO DIFERENCIAL. ....	12
FIG. 2.8 - CONFIGURAÇÃO BÁSICA DE UM AMPLIFICADOR. ....	13
FIG. 2.9 - DIAGRAMA DE CONEXÃO DO AMPLIFICADOR. ....	14
FIG. 2.10 - PONTE DE WHEATSTONE DE CORRENTE CONTÍNUA. ....	15
FIG. 2.11 - A) PONTE DE WHEATSTONE EM DESEQUILÍBRIO; B) EQUIVALENTE DE THÉVENIN DA PONTE DE WHEATSTONE DESEQUILIBRADA. ....	17
FIG. 2.12 - PONTE DE WHEATSTONE COM: A) DOIS BRAÇOS ACTIVOS; B) 4 BRAÇOS ACTIVOS [13]. ....	18
FIG. 2.13 - CIRCUITO DE LINEARIZAÇÃO DE UMA PONTE COM UM ÚNICO BRAÇO ACTIVO [13]. ....	19
FIG. 2.14 - CIRCUITO DE ENTRADA (PONTE E CIRCUITO INTEGRADO CI1) SIMPLIFICADO. ....	20
FIG. 2.15 - EXEMPLOS DE EXTENSÓMETROS [15]. ....	23
FIG. 2.16 - DEFORMAÇÃO DE UM MATERIAL [13]. ....	23
FIG. 2.17 - PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DE UM TRANSDUTOR MAGNÉTICO. ....	26
FIG. 2.18 - CURVA CARACTERÍSTICA DE UM FOTODÍODO EM FUNÇÃO DA INTENSIDADE LUMINOSA. ....	27
FIG. 2.19 - SISTEMA DE MEDIÇÃO EM MALHA ABERTA. ....	28
FIG. 2.20 - SISTEMA DE MEDIÇÃO EM MALHA FECHADA. ....	28
FIG. 2.21 - SISTEMA DIGITAL DE MEDIÇÃO. ....	29
FIG. 2.22 – EXEMPLO DE ORGANIZAÇÃO DE UMA CADEIA DE MEDIÇÃO [13]. ....	30
FIG. 2.23 - FONTES DE ERRO NUM AMPLIFICADOR DE INSTRUMENTAÇÃO NORMAL [13]. ....	32
FIG. 2.24 - DENSIDADE ESPECTRAL DE RÚIDO DE UM AMPLIFICADOR DE INSTRUMENTAÇÃO [14]. ....	33
FIG. 2.25 - ARDUÍNO DUEMILANOVE [18]. ....	36
FIG. 2.26 - EXEMPLO DE UM MICROCONTROLADOR E DOS COMPONENTES QUE O CONSTITUEM [18]. ....	36
FIG. 2.27 - DIAGRAMA DE BLOCOS DO MICROCONTROLADOR ATMEGA328 [18,19]. ....	37
FIG. 2.28 - REPRESENTAÇÃO DE UM IMPULSO PWM. ....	39
FIG. 2.29 - PASSOS EFECTUADOS POR UM CONVERSOR A/D. ....	39
FIG. 2.30 - BANDAS DE TRANSMISSÃO E DE AMPLIFICAÇÃO UTILIZADAS PELOS AMPLIFICADORES DE FIBRA ÓPTICA. ....	44
FIG. 2.31 - DIAGRAMA DOS NÍVEIS DE ENERGIA DO ÉRBIO [25]. ....	44
FIG. 3.1 - DEFLECTÓMETROS DIGITAIS UTILIZADOS NESTA TESE. ....	49
FIG. 3.2 - CABO E CONECTOR DOS DEFLECTÓMETROS DIGITAIS [28]. ....	49
FIG. 3.3 - CONFIGURAÇÃO PULL UP. ....	50
FIG. 3.4 - SEQUÊNCIA DE DADOS E DE CLOCK DE UM DEFLECTÓMETRO DIGITAL, VISTA NUM OSCILOSCÓPIO. ....	51
FIG. 3.5 - PADRÃO DA SEQUÊNCIA DE BITS. ....	51
FIG. 3.6 - DESCRIÇÃO DOS TEMPOS DO CLOCK E DA SEQUÊNCIA DE DADOS [29]. ....	52
FIG. 3.7 - DIAGRAMA DE FLUXOS DO CÓDIGO DESENVOLVIDO NO SOFTWARE DE PROGRAMAÇÃO DO ARDUÍNO. ....	53
FIG. 3.8 - FLUXOGRAMA DA APLICAÇÃO DE AQUISIÇÃO DE DADOS DO DEFLECTÓMETRO NO LABVIEW. ....	56
FIG. 3.9 - CARACTERES LIDOS NO BUFFER DA PORTA SÉRIE. ....	57
FIG. 3.10 - FLUXOGRAMA DO PROCESSO DE AQUISIÇÃO DO VALOR DO DÍGITO D6 (MSD). ....	59
FIG. 3.11 - FLUXOGRAMA DO PROCESSO DE AQUISIÇÃO DO VALOR DO DÍGITO D12 (CASA DECIMAL) E COLOCAÇÃO DA VÍRGULA NA MEDIÇÃO. ....	59
FIG. 3.12 - FLUXOGRAMA DO PROCESSO DE AQUISIÇÃO DO VALOR DO DÍGITO D5 (SINAL) E COLOCAÇÃO DO SINAL ANTES DA MEDIÇÃO. ....	60

FIG. 3.13 - FLUXOGRAMA DO PROCESSO DE AQUISIÇÃO DO VALOR DA UNIDADE DE MEDIDA (D13) E COLOCAÇÃO DA UNIDADE DE MEDIDA DEPOIS DA MEDIÇÃO. ....	60
FIG. 3.14 - PROCESSO DE GRAVAÇÃO DE UMA MEDIÇÃO. ....	61
FIG. 3.15 - PAINEL PRINCIPAL DA APLICAÇÃO EM LABVIEW PARA A LEITURA DAS MEDIÇÕES DE DOIS DEFLECTÓMETROS DIGITAIS. ....	62
FIG. 3.16 - FLUXOGRAMA DO PROCESSO DE LEITURA DE UM FICHEIRO QUE CONTÉM MEDIÇÕES.....	63
FIG. 3.17 - TRATAMENTO INICIAL DA INFORMAÇÃO NÃO TRATADA. ....	64
FIG. 3.18 - IMAGEM DO SISTEMA DA NI. ....	65
FIG. 3.19 - PRIMEIRO ANDAR DO SISTEMA DE MEDIÇÃO (PRIMEIRA FASE). ....	68
FIG. 3.20 - ESQUEMA DO CIRCUITO DO SISTEMA DE MEDIDA (1º ANDAR). ....	69
FIG. 3.21 - ESQUEMA DO CIRCUITO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO. ....	70
FIG. 3.22 - PROTÓTIPO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO CRIADO. ....	72
FIG. 3.23 - DIAGRAMA DE FLUXO DE DADOS DO CÓDIGO DESENVOLVIDO NO ARDUÍNO PARA A COMUNICAÇÃO DOS EXTENSÓMETROS RESISTIVOS COM O LABVIEW. ....	73
FIG. 3.24 - DIAGRAMA DE FLUXO DE DADOS DO CÓDIGO EM LABVIEW DA APLICAÇÃO DESENVOLVIDA PARA RECEPÇÃO E TRATAMENTO DE DADOS DOS TRÊS CANAIS DOS EXTENSÓMETROS.....	74
FIG. 3.25 - PAINEL PRINCIPAL DA APLICAÇÃO EM LABVIEW PARA A LEITURA DAS MEDIÇÕES DE TRÊS EXTENSÓMETROS ATRAVÉS DO ARDUÍNO. ....	75
FIG. 3.26 - ESQUEMA DA STRING DE LEITURA DO FICHEIRO DE DADOS. ....	77
FIG. 3.27 - FLUXOGRAMA DO CÓDIGO EM LABVIEW QUE COLOCA O VALOR DAS MEDIÇÕES NUM ARRAY. ....	78
FIG. 3.28 - FLUXOGRAMA DA OPERAÇÃO DO CÁLCULO DA MÉDIA. ....	78
FIG. 3.29 - FLUXOGRAMA DA APLICAÇÃO EM LABVIEW QUE CALCULA O VALOR DOS INTERVALOS DE TEMPO. ....	79
FIG. 3.30 - ESQUEMA DE MONTAGEM PARA SE MEDIR O TEMPO DE VIDA NUMA FIBRA DOPADA COM ÉRPIO. ....	80
FIG. 4.1 - ESQUEMA DA MONTAGEM DE TESTE DA APLICAÇÃO DE TRATAMENTO E REGISTO DE DADOS DOS DEFLECTÓMETROS EM TEMPO REAL. ....	83
FIG. 4.2 - FOTOGRAFIA DA MONTAGEM DE TESTE DA APLICAÇÃO DE TRATAMENTO E REGISTO DE DADOS DOS DEFLECTÓMETROS EM TEMPO REAL. ....	84
FIG. 4.3 - GRÁFICO DAS MEDIÇÕES REGISTADAS PELA APLICAÇÃO DE TRATAMENTO E REGISTO EM TEMPO REAL. ....	85
FIG. 4.4 - GRÁFICO DAS MEDIÇÕES REGISTADAS PELA APLICAÇÃO DE REGISTO SEM TRATAMENTO DE DADOS.....	87
FIG. 4.5 - ESQUEMA DA MONTAGEM COM A COLOCAÇÃO GRADUAL DE PESOS EM CIMA DA RÉGUA DE PLÁSTICO.....	89
FIG. 4.6 - GRÁFICO DA DEFORMAÇÃO EM FUNÇÃO DO PESO COLOCADO EM CIMA DA RÉGUA. ....	89
FIG. 4.7 - ESQUEMA DA MONTAGEM DOS TESTES AO SISTEMA DE MEDIÇÃO DESENVOLVIDO. ....	90
FIG. 4.8 - FOTOGRAFIA DA MONTAGEM PARA TESTAR O SISTEMA DE MEDIÇÃO CRIADO. ....	90
FIG. 4.9 - GRÁFICO DA VARIAÇÃO DOS VALORES MEDIDOS PELO .....	91
FIG. 4.10 - VARIAÇÃO ALEATÓRIA DA DEFORMAÇÃO (1ª PARTE). ....	93
FIG. 4.11 - VARIAÇÃO ALEATÓRIA DA DEFORMAÇÃO (2ª PARTE). ....	93
FIG. 4.12 - VARIAÇÃO ALEATÓRIA DA DEFORMAÇÃO (3ª PARTE). ....	94
FIG. 4.13 - VARIAÇÃO ALEATÓRIA DA DEFORMAÇÃO (4ª PARTE). ....	95
FIG. 4.14 - DADOS REGISTADOS POR AMBOS OS SISTEMAS COM A RÉGUA EM REPOUSO (MÉDIA A CADA CINCO SEGUNDOS). ....	96
FIG. 4.15 - DADOS REGISTADOS PELO SISTEMA CRIADO COM A RÉGUA EM REPOUSO (MÉDIA A CADA 5 SEGUNDOS).....	96
FIG. 4.16 - DADOS REGISTADOS POR AMBOS OS SISTEMAS COM A RÉGUA EM REPOUSO (MÉDIA A CADA 5 SEGUNDOS). ....	97
FIG. 4.17 - DADOS REGISTADOS POR AMBOS OS SISTEMAS COM A RÉGUA EM REPOUSO (MÉDIA A CADA 5 SEGUNDOS). ....	98
FIG. 4.18 - DADOS REGISTADOS PELO SISTEMA DA NI COM A RÉGUA EM REPOUSO (MÉDIA A CADA 5 SEGUNDOS).....	98
FIG. 4.19 - ESPECTRO DO SINAL COLOCADO NO DETECTOR ÓPTICO. IMAGEM RETIRADA DO OSA.....	99

FIG. 4.20 - GRÁFICO DO TEMPO DE VIDA DA FLUORESCÊNCIA PRESENTE NUMA FIBRA DOPADA COM ÉRBIO. ....	100
FIG. 4.21 - IMAGEM OBTIDA COM UM OSCILOSCÓPIO PARA SE VISUALIZAR O TEMPO DE VIDA DA FLUORESCÊNCIA NUMA FIBRA DOPADA COM ÉRBIO.....	100
FIG. 6.1 - CÓDIGO EM LABVIEW PARA A AQUISIÇÃO DOS DADOS DOS DEFLECTÓMETROS DIGITAIS.....	110
FIG. 6.2 - CÓDIGO EM LABVIEW PARA SE OBTER O VALOR DO DÍGITO 6 (MSD).....	110
FIG. 6.3 - CÓDIGO EM LABVIEW PARA SE OBTER O VALOR DO DÍGITO D7. ....	111
FIG. 6.4 - CÓDIGO EM LABVIEW PARA SE OBTER O VALOR DO DÍGITO D8. ....	111
FIG. 6.5 - CÓDIGO EM LABVIEW PARA SE OBTER O VALOR DO DÍGITO D9. ....	112
FIG. 6.6 - CÓDIGO EM LABVIEW PARA SE OBTER O VALOR DO DÍGITO D10. ....	112
FIG. 6.7 - CÓDIGO EM LABVIEW PARA SE OBTER O VALOR DO DÍGITO D11 (LSD).....	113
FIG. 6.8 - CÓDIGO EM LABVIEW PARA SE OBTER A STRING FINAL COM A INDICAÇÃO DA CASA DECIMAL. ....	113
FIG. 6.9 - CÓDIGO EM LABVIEW PARA SE OBTER O VALOR DO DÍGITO D5 (SINAL DA MEDIÇÃO). ....	114
FIG. 6.10 - CÓDIGO EM LABVIEW PARA SE OBTER O VALOR DO DÍGITO D13 E PARA SE OBTER A STRING FINAL COM AS UNIDADES JÁ COLOCADAS NO FIM. ....	114
FIG. 6.11 - ESQUEMA DO CIRCUITO DESENVOLVIDO PARA A AQUISIÇÃO.....	116
FIG. 6.12 - PLANO DE TOPO A DECALCAR PARA A PLACA.....	117
FIG. 6.13 - PLANO DE FUNDO A DECALCAR PARA A PLACA. ....	117
FIG. 6.14 - PLANO DE TOPO A DECALCAR PARA A PLACA (CIRCUITO AUXILIAR).....	118
FIG. 6.15 - PLANO DE FUNDO A DECALCAR PARA A PLACA (CIRCUITO AUXILIAR). ....	118
FIG. 6.16 - CÓDIGO EM LABVIEW PARA A AQUISIÇÃO DAS MEDIÇÕES FEITAS PELO SISTEMA DE MEDIDA. ....	120
FIG. 6.17 - TRATAMENTO DOS RESULTADOS DAS MEDIÇÕES.....	120
FIG. 6.18 - CONFIGURAÇÃO DO TIMER PARA A LEITURA DO TEMPO ACTUAL EM MILISEGUNDOS. ....	121
FIG. 6.20 - CONFIGURAÇÃO DO NÚMERO DE MEDIÇÕES A EFECTUAR POR SEGUNDO. ....	121
FIG. 6.19 - GRAVAÇÃO DO RESULTADO DAS MEDIÇÕES EFECTUADAS PELO SISTEMA DE MEDIÇÃO.....	121
FIG. 6.21 - LEITURA DO FICHEIRO QUE CONTÉM AS MEDIÇÕES NÃO TRATADAS.....	122
FIG. 6.22 - AQUISIÇÃO DO VALOR DA PRIMEIRA MEDIÇÃO DA STRING QUE CONTÉM TODAS AS MEDIÇÕES.....	122
FIG. 6.23 - AQUISIÇÃO DO VALOR DA PRIMEIRA MEDIÇÃO QUE SE ENCONTRA NA STRING RESTANTE QUE CONTÉM TODAS AS RESTANTES MEDIÇÕES. ....	123
FIG. 6.24 - CONFIGURAÇÃO DOS PARÂMETROS A UTILIZAR PARA O CÁLCULO DA MÉDIA DAS MEDIÇÕES PARA O PROTÓTIPO. ....	123
FIG. 6.26 - CICLO PARA RETIRAR O VALOR INDIVIDUAL DE CADA MEDIÇÃO DA STRING DE MEDIÇÕES E PARA A CONVERSÃO DOS VALORES OBTIDOS NUM ARRAY DE MEDIÇÕES. ....	124
FIG. 6.25 - CONFIGURAÇÃO DOS PARÂMETROS A UTILIZAR PARA O CÁLCULO DA MÉDIA DAS MEDIÇÕES PARA O SISTEMA DA NI.....	124
FIG. 6.27 - CICLOS QUE CALCULAM AS MÉDIAS BEM COMO OS INTERVALOS DE TEMPO.....	125
FIG. 6.28 - PAINEL PRINCIPAL DO PROGRAMA EM LABVIEW QUE CALCULA AS MÉDIAS DAS MEDIÇÕES. ....	125
FIG. 6.29 – TÉCNICA DO Z-SCAN. ESQUEMA DE MONTAGEM.....	128
FIG. 6.30 - ESQUEMA DA MONTAGEM DO LASER EM FIBRA ÓPTICA. ....	129

## *Índice de Tabelas*

---

TABELA 2.1 - CARACTERÍSTICAS DE ALGUNS TIPOS DE RESISTÊNCIAS DE ACORDO COM O SEU MATERIAL DE CONSTRUÇÃO [11].	15
TABELA 2.2 - TIPO DE TRANSDUTORES.	22
TABELA 2.3 - QUANTIDADE DE MEMÓRIA DISPONÍVEL EM CADA MODELO DE MICROCONTROLADOR.	37
TABELA 2.4 - NÚMERO DE PINS I/O DISPONÍVEIS NO ARDUÍNO DUEMILANOVE.	38
TABELA 2.5 – REGISTO ADCSRA [18].	42
TABELA 2.6 - CONTEÚDO DO REGISTO ADCSRA.	43
TABELA 3.1 - CONECTORES DOS DEFLECTÓMETROS DIGITAIS ID-5 DA MITUTOYO [29].	49
TABELA 3.2 - DESCRIÇÃO DAS ENTRADAS DIGITAIS DO ARDUÍNO.	54
TABELA 3.3 - NÚMERO DE MEDIÇÕES DE ACORDO COM A MÉDIA A EFECTUAR.	77
TABELA 4.1 - VALORES REAIS DA TAXA DE AMOSTRAGEM DO ARDUÍNO.	82
TABELA 4.2 - MEDIÇÕES LIDAS NOS DEFLECTÓMETROS NO TESTE DA APLICAÇÃO DE TRATAMENTO E REGISTO DE DADOS EM TEMPO REAL.	84
TABELA 4.3 - MEDIÇÕES LIDAS NOS DEFLECTÓMETROS NO TESTE DA APLICAÇÃO DE REGISTO DE DADOS EM TEMPO REAL MAS SEM TRATAMENTO DAS MEDIÇÕES.	86

# *Lista de Abreviaturas*

---

## **Organizações**

FTDI – Future Technology Devices International Ltd.  
IEEE – Institute of Electrical and Electronic Engineers  
ISO – International Organization for Standardization  
NI – National Instruments

## **Outras Designações**

AC – Corrente alternada (Alternate current)  
AI – Amplificador de instrumentação  
AO – Amplificador operacional  
A/D – Conversão analógico - digital  
DC – Corrente contínua (Direct current)  
FET – Transístor de efeito de campo (Field effect transistor)  
f.e.m. - Força electromotriz  
GND – Massa  
I/O – Input e output (Entrada e saída)  
LSB – Bit menos significativo (Least significant bit)  
LSD - Dígitto menos significativo (Least significant digit)  
OSA – Analisador de espectros óptico (Optical spectrum analyzer)  
RAE – Erro referido à entrada  
RAS – Erro referido à saída  
RMS – Valor eficaz (Root mean square)  
SI – Sistema Internacional  
SMD - Superficial mounting device (Componentes de montagem em superfície)

## **Termos Anglo-saxónicos (Português – Inglês)**

*Aliasing* - Distorção espectral  
*Alternate Current (AC)* - Corrente alternada  
*Baud Rate* - Taxa de transmissão de bits por segundo numa determinada aplicação  
*Bit stream* - Conjunto/ Sequência de bits  
*Bootloader* – Sistema de inicialização do microcontrolador  
*Buffer* - Região de memória temporária utilizada para escrita e leitura de dados;  
*Direct Current (DC)* - Corrente contínua  
*Display* - Mostrador ou Ecrã  
*Duty-cycle* - Ciclo activo  
*Feedback* - Realimentação  
*Gauge factor* - Quantidade de deformação de um corpo devido a uma força que lhe é aplicada  
*Loop* - Ciclo infinito ou Laço  
*Offset* - Desvio  
*Random Access Memory (RAM)* - Memória de acesso aleatório  
*Read Only Memory (ROM)* - Memória apenas de leitura  
*Slew Rate* - Velocidade de varrimento  
*Trigger* - Disparo, sincronismo  
*Virtual Instrument (VI)* - Instrumento virtual

## *Lista de Símbolos*

---

$K$  - Sensibilidade de um extensômetro resistivo

$Q$  - Quantum de um conversor analógico - digital;

$V_F$  - Gama de tensão de entrada de um conversor analógico – digital;

$R_{\text{fonte}}$  - Resistência da fonte de sinal que se encontra em paralelo com a fonte de corrente de ruído.

$G_V$  - Ganho de tensão de um amplificador

$V_{+IN}$  - Entrada não inversora de um amplificador

$V_{-IN}$  - Entrada inversora de um amplificador

$V_{OUT}$  ou  $V_0$  - Tensão de saída de um amplificador

$f_d$  - Faixa de passagem (Unit-Gain Crossover Frequency)

$S_r$  - Slew Rate

$\varepsilon$  - Extensão

$\mu$  - Coeficiente de Poisson

$\rho$  - Resistividade

$\Delta g_0$  - Variação da resposta de um instrumento de medição

$\Delta g_1$  - Estímulo ou sinal de entrada de um instrumento de medição

Newton (N) - Medida de grandeza utilizada para se medir o peso dos corpos

$r_a$  - Raio de abertura da íris

$\mathcal{S}$  - Transmitância

$\omega_a$  - Cintura do feixe na posição da íris a baixas potências

$\alpha_2$  - Coeficiente de absorção não linear

$L$  - Espessura da amostra

$I_0$  - Intensidade de pico no foco

$C$  - Velocidade da luz no vácuo

$\Delta T_{pv}$  - Variação da transmissão pela fenda



# 1. Introdução

---

No decurso desta tese procurou-se essencialmente desenvolver uma alternativa viável ao sistema de medição de deformações que é actualmente utilizado pelos laboratórios de Engenharia Civil da Universidade da Madeira. Como tal procurou-se, com as ferramentas disponibilizadas pela UMa, criar uma versão *low cost* do sistema actual, tendo sempre como objectivo a implementação de um sistema fiável, com maior taxa de aquisição e também mais cómodo e fácil de utilizar. Procurou-se também integrar na solução encontrada, o programa da National Instruments (NI) denominado LabVIEW, que permite não só controlar o resultado das medições que vão sendo feitas como também efectuar um tratamento personalizado para cada aplicação prática.

Uma vez que o objectivo desta tese foi o desenvolvimento de uma interface *low cost*, em detrimento das soluções comerciais propostas pela NI, foi utilizada uma plataforma de desenvolvimento baseada num microcontrolador, designada Arduino, para se efectuar a comunicação entre o sistema de medição e o LabVIEW. Tendo estes objectivos em mente procurou-se ir um pouco mais além, aproveitando-se a interface com o utilizador do sistema de medição desenvolvido, para a ligação de outros aparelhos de medição, nomeadamente deflectómetros. Estes equipamentos são extremamente úteis, não só em testes de campo como de laboratório, pelo que a integração dos vários dispositivos, resultou numa solução mais prática e simples do que as soluções previamente utilizadas nos laboratórios de Engenharia Civil.

Por fim e como demonstração da versatilidade do Arduino como interface entre o LabVIEW e os aparelhos de medição utilizados normalmente em laboratório, utilizou-se um detector óptico para se tentar efectuar a determinação do tempo de vida da emissão fluorescente de uma fibra dopada com Érbio, quando esta é bombeada por um laser.

## 1.1 Motivação

---

A procura por soluções de engenharia que tornem o quotidiano cada vez mais simples e prático é para os Engenheiros uma constante fonte de inspiração. O elevado custo pago por soluções comerciais que facilitem a recolha de informação sobre o meio é actualmente um problema, que pode ser ultrapassado através da aplicação de plataformas *open source*.

Nesse sentido, refira-se que neste momento a UMa não dispõe de um sistema próprio que permita estudar as deformações em estruturas, o que naturalmente seria extremamente útil para a área da Engenharia Civil. Assim, até agora, e para as aulas de Betão I e II, tem sido utilizado um sistema da NI que pontualmente é emprestado pelo Instituto Superior Técnico, graças aos contactos mantidos pelo Prof. Dr. Paulo França. Por isso e com os recursos disponíveis na Universidade da Madeira, tentou-se obter os mesmos resultados do sistema da NI, com o objectivo sempre claro de se tentar otimizar a solução encontrada para que esta tornasse dispensável o sistema utilizado até hoje.

## 1.2 Trabalho desenvolvido

---

Em primeiro lugar, começou-se por estudar o princípio de funcionamento dos deflectómetros digitais que se encontravam disponíveis na UMa. Após essa fase de estudo, procuraram-se alternativas *low cost* para a sua interface com o LabVIEW, em substituição das placas de aquisição de dados, cujo preço é demasiado elevado.

Uma vez escolhido o Arduino Duemilanove para servir de placa de aquisição de dados, começou-se então a estudar com maior detalhe o seu modo de funcionamento, bem como as diferentes possibilidades de comunicação com o LabVIEW. Após sido estudada a forma de comunicação a utilizar, começou-se então por desenvolver o código a ser utilizado no Arduino, bem como no LabVIEW. Por fim, tentou-se otimizar a interface de aquisição de dados, aumentando a sua taxa de leitura com o desenvolvimento de outras soluções em LabVIEW.

Quanto ao sistema de medição a utilizar, e antes de se começar a realizar qualquer tipo de desenvolvimento, procurou-se estudar as características do sistema da NI, encontrando nele alguns pontos menos bons que pudessem ser otimizados. Uma vez terminado o processo de recolha de informação e delineados os aspectos funcionais do sistema de medição, começou-se por planear, e desenvolver o sistema de medição em si. Uma vez terminado o processo de desenvolvimento do sistema de medição efectuaram-se vários testes, de forma a calibrá-lo de acordo com os resultados do sistema da NI. Finalmente, passou-se para a fase final do trabalho, ou seja, a optimização do sistema de medição, melhorando-se alguns aspectos, nomeadamente a taxa de aquisição de dados.

Por fim, e de forma a demonstrar a versatilidade do Arduino como placa de aquisição de dados, efectuou-se um pequeno teste com um laser e um detector óptico, tentando observar-se o tempo de vida da emissão fluorescente de uma fibra óptica dopada com Érbio.

## 1.3 Estrutura da tese

---

Esta tese encontra-se dividida em 7 capítulos, sendo o último capítulo destinado apenas à apresentação da bibliografia consultada. No primeiro capítulo é apresentada uma breve introdução ao tema desta tese, sendo feita uma breve descrição do trabalho desenvolvido bem como uma breve descrição da estrutura desta tese.

No segundo capítulo é apresentada a teoria por detrás de toda a tese, isto é, é explicada a teoria consultada para o desenvolvimento do sistema de medição, bem como da interface criada entre o LabVIEW e o próprio sistema.

O terceiro capítulo é dedicado à apresentação de todo o procedimento efectuado, nomeadamente à explicação do funcionamento prático dos deflectómetros digitais, ao desenvolvimento e construção do circuito criado para o sistema de medição, bem como a explicação do procedimento utilizado para se medir o tempo de vida da luminescência

da luz presente numa fibra dopada com Érbio, quando esta era excitada por um laser de bombagem.

O quarto capítulo é destinado à apresentação dos resultados práticos. Nesse capítulo é também discutida a calibração efectuada ao sistema de medição utilizado, mediante uma comparação com os resultados medidos pelo sistema da NI.

No quinto capítulo são por fim discutidas as considerações finais desta tese e são igualmente apresentadas as perspectivas para um trabalho futuro.

No sexto capítulo encontram-se, como anexos, os diferentes códigos utilizados, quer no LabVIEW quer no Arduíno, bem como uma pequena descrição de um outro trabalho, que foi iniciado, mas que não foi possível concluir.

Finalmente no sétimo capítulo é apresentada toda a bibliografia que foi consultada para a realização desta tese.



## 2. Teoria

---

Neste capítulo será explicada, em pormenor, toda a teoria por detrás do desenvolvimento desta tese de Mestrado, mostrando-se a dedução das equações e dos circuitos utilizados, bem como os circuitos desenvolvidos durante o processo de criação do protótipo de aquisição de dados, e no tratamento desses mesmos dados.

### 2.1 Amplificadores operacionais

---

Os amplificadores operacionais são dispositivos extremamente versáteis, com uma vasta gama de aplicações em todos os campos da electrónica. Constituídos por circuitos integrados, os actuais amplificadores operacionais são utilizados para toda uma panóplia de aplicações, tendo sempre por base a amplificação de um sinal. Os amplificadores operacionais actuais são capazes de amplificar a corrente ou a tensão ou mesmo a potência, de qualquer sinal, com o mínimo de distorção do sinal original [1].

Esta secção irá começar com uma pequena introdução aos amplificadores operacionais, explicando o seu princípio de funcionamento bem como algumas das suas aplicações, sendo dado maior ênfase às aplicações utilizadas no desenvolvimento desta tese. De seguida será discutido o conceito dos amplificadores de instrumentação, apontando as diferenças entre estes e os amplificadores operacionais. E por fim, será explicado um pouco do conceito da realimentação.

#### 2.1.1 INTRODUÇÃO AOS AMPLIFICADORES OPERACIONAIS

Como introdução a secções mais detalhadas sobre o funcionamento dos amplificadores operacionais, nesta secção serão estudados os conceitos base dos amplificadores operacionais.

Os amplificadores operacionais são utilizados numa vasta gama de aplicações que vão desde o processamento de sinais, à regulação de corrente e tensão, à instrumentação bem como aos sistemas de controlo [2]. Utilizados no controlo, geração de formas de onda e na amplificação de sinais, os amplificadores operacionais são utilizados numa vasta gama de frequências que vai até à casa dos MHz. Sendo a base dos computadores analógicos, os amplificadores operacionais são componentes capazes de efectuar simples operações como a multiplicação, a divisão, a subtracção, a soma, a integração e a diferença entre sinais [3].

Utilizando normalmente a realimentação (*feedback*) para controlar as suas características, os amplificadores operacionais são também denominados de amplificadores de acoplamento directo. Por vezes utilizados para aumentar a potência, corrente ou tensão, os amplificadores operacionais mais comuns servem sobretudo para amplificar os sinais de entrada. Mas antes de se discutirem algumas das aplicações dos amplificadores operacionais é fundamental discutir-se qual o seu princípio de funcionamento, tendo em conta o número de entradas de sinal que se pretendem utilizar.

A decisão de se usar uma ou mesmo as duas entradas do amplificador depende da aplicação que se pretende construir [4].

Um amplificador operacional típico possui duas entradas, normalmente denominadas de “-IN” (entrada inversora) e “+IN” (entrada não inversora), e uma saída denominada de “V<sub>OUT</sub>”. A saída do amplificador depende exclusivamente do valor das suas entradas. Se a diferença entre as duas tensões de entradas for  $\Delta V_{IN} = V_{+IN} - V_{-IN}$ , então a tensão de saída é dada por [3]:

$$V_{OUT} = \Delta V_{IN} \times G_V \quad (2.1)$$

em que  $G_V$  é o valor do ganho de tensão em malha aberta. Dependendo do tipo de amplificador utilizado, o valor do ganho pode ir desde 2 até os 1000.

A figura seguinte (Fig. 2.1) apresenta o símbolo típico de um amplificador operacional, sendo também representado o ganho de tensão.

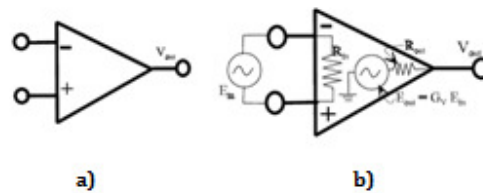


Fig. 2.1 - Símbolo de um amplificador operacional: a) símbolo habitual com duas entradas e uma saída; b) esquema conceptual de um amplificador operacional onde está esquematizado o circuito equivalente.

Convencionalmente só as entradas e saída são representadas nos esquemas dos circuitos e não o seu equivalente, nem as conexões com as fontes de alimentação. A alimentação destes elementos é normalmente efectuada através de duas fontes de tensão, de igual valor absoluto mas de sinais opostos, tal como é descrito na Fig. 2.2.

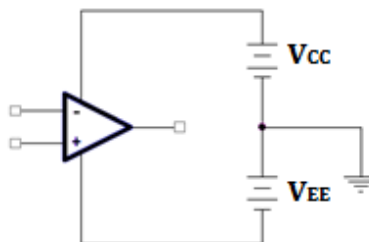


Fig. 2.2 - Alimentação de um Amplificador Operacional.

Na Fig. 2.3 é apresentado o esquema de um amplificador operacional convencional, sendo feita uma breve descrição de cada um dos *pins* do circuito integrado.

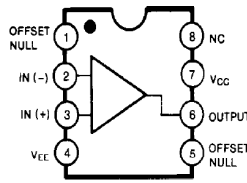


Fig. 2.3 - Esquema dos pins de um amplificador operacional.

Note-se que na figura anterior os *pins* 4 e 7, correspondem à alimentação negativa e positiva. Os *pins* 2 e 3 representam as duas entradas e o *pin* 6 representa a saída. Os *pins* 1 e 7 servem para regular a tensão de *offset*. Refira-se que em algumas aplicações a regulação do *offset* é de grande importância.

### 2.1.2 O AMPLIFICADOR OPERACIONAL IDEAL E O AMPLIFICADOR OPERACIONAL REAL

O conceito de amplificador operacional ideal irá ser estudado nesta secção, não porque existam amplificadores operacionais ideais, mas sim porque os amplificadores utilizados no quotidiano dos laboratórios de electrónica assemelham-se muito aos amplificadores ideais, graças à qualidade que exibem [5]. As propriedades de um amplificador operacional ideal são as seguintes [4]:

- a. Tensão de saída nula se a tensão de entrada for igual a 0V;
- b. Impedância de entrada infinita;
- c. Impedância de saída igual a 0;
- d. Deslocamento de fase igual a 0;
- e. Ganho para tensões diferenciais infinito;
- f. Ganho de tensão em modo comum nulo;
- g. Deriva de tensão nula para variações de temperatura;
- h. Largura de banda infinita;

Quando estudado o comportamento real dos amplificadores operacionais verificam-se desvios em relação a essas propriedades. Para melhor se entenderem esses desvios há que ter em conta alguns conceitos base, tais como a corrente de *offset*, o ganho de tensão em malha aberta, a tensão de *offset*, a largura de banda e o *slew rate*. De seguida serão descritos cada um dos conceitos mencionados anteriormente [4,6]:

Correntes de *offset* Ao contrário dos amplificadores operacionais ideais que possuem uma impedância de entrada infinita, os amplificadores operacionais reais possuem correntes de polarização nas suas entradas. Tais correntes são geralmente as correntes de base dos transístores bipolares que se encontram nas entradas dos amplificadores operacionais ou correntes de fuga na porta do transístor de efeito de campo (FET), em amplificadores que possuem FETs nas suas entradas. Uma vez que na prática, os dispositivos de entrada não são absolutamente iguais, as duas correntes de entrada são também elas diferentes. A diferença entre essas correntes é denominada de correntes de *offset* de entrada.

Tensão de *offset* A saída de um amplificador operacional ideal tem uma tensão de saída igual a 0V, quando as suas entradas estão em curto-circuito. Num amplificador

operacional real a sua saída pode ser diferente de 0V quando as suas entradas estão em curto-circuito. Esta tensão que, normalmente nos amplificadores operacionais comerciais se situa entre os 1 e os 100mV, pode ser compensada/anulada através das entradas de *offset* presentes nos amplificadores operacionais.

Largura de banda Definida de várias formas, a largura de banda ou *Unit-Gain Crossover Frequency* ( $f_d$ ), não é mais do que a frequência em que o ganho de tensão em malha aberta tem valor unitário. O valor de  $f_d$  está situado normalmente entre 1kHz e 100MHz. Outro parâmetro importante nos amplificadores operacionais é a largura de banda de plena potência. Esta gama de frequências, muito menor que  $f_d$ , é definida como sendo a máxima frequência em que uma onda sinusoidal de entrada poderá ter para ser amplificada à saída sem distorção ou com o mínimo de distorção possível.

Slew Rate Este parâmetro define-se como sendo a velocidade de resposta de um amplificador operacional a uma variação da tensão de entrada. Considerado com sendo infinito num amplificador operacional ideal, este parâmetro é responsável pela identificação da máxima frequência de um sinal que pode ser colocado à entrada de um amplificador de modo a que o sinal de saída não possua qualquer distorção.

Além das noções acima descritas importa acrescentar que a impedância de entrada dos amplificadores operacionais não é infinita, mas sim da ordem dos  $10^{12}\Omega$  nos amplificadores cujas entradas possuem FETs, e que as saídas possuem impedâncias na ordem dos  $3k\Omega$  [6].

Para terminar, considere-se agora que um amplificador operacional é alimentado com tensões de  $\pm 15V$ . Com esses valores de tensão seria de supor que a sua tensão de saída fosse no máximo de  $\pm 15V$ . Teoricamente tal suposição tem consistência uma vez que a tensão de saída pode ser igual à tensão com que é alimentado o amplificador.

Mas na prática, e devido às tensões necessárias para se alimentar os componentes internos dos amplificadores, a tensão de saída nunca será igual à tensão de alimentação do amplificador operacional [5]. Logo, há que ter sempre em conta as tensões de saturação do amplificador operacional com que se trabalha, no desenvolvimento de uma aplicação.

## 2.2 Conceito de realimentação

---

Os amplificadores operacionais são amplificadores de alto rendimento/ganho que utilizam quase sempre o conceito de realimentação. O princípio da realimentação é considerado por muitos como sendo uma das invenções mais importantes da história do Século XX [4]. Desenvolvido inicialmente como sendo uma solução para o problema das comunicações da altura, o conceito de realimentação tornou-se uma peça chave de vários sistemas utilizados actualmente [4].

A precisão e flexibilidade dos amplificadores actuais é o resultado directo do conceito de realimentação negativa. Em geral os amplificadores que empreguem esta



$$V_{IN} = V_{+IN} = V_{-IN} = V_{OUT} \times \frac{R_G}{R_G + R_F} \quad (2.2)$$

$$\frac{V_{OUT}}{V_{IN}} = \frac{R_G + R_F}{R_G} = 1 + \frac{R_F}{R_G} \quad (2.3)$$

Ao observarem-se as equações anteriores, verifica-se que o ganho é directamente dependente da relação entre as resistências  $R_F$  e  $R_G$ . Assim, e quanto maior for a diferença entre elas (considerando que  $R_F$  é sempre superior a  $R_G$ ), maior será o ganho e a consequente amplificação do sinal de entrada. Pode-se então concluir que o ganho do amplificador depende exclusivamente do valor das resistências  $R_G$  e  $R_F$ , ou seja, o ganho do amplificador não depende dos parâmetros do amplificador, graças ao processo de realimentação [5].

Se se considerar  $R_G$  muito maior que  $R_F$  tem-se que  $R_F/R_G \rightarrow 0$ . Nesta situação obtém-se um amplificador de ganho unitário, também denominado de *buffer* de tensão ( $V_{OUT}=V_{+IN}=V_{IN}$ ) [5]. Nesses circuitos pode-se retirar a resistência  $R_G$  deixando um circuito-aberto, obtendo-se os mesmos resultados. De igual forma pode também ser retirada a resistência  $R_F$ , se for trocada por um curto-circuito.

Refira-se que alguns amplificadores têm tendência a auto-destruir-se quando a resistência  $R_F$  é retirada do circuito, sendo essa a razão porque alguns *buffers* de ganho unitário possuem esta resistência nos seus circuitos. Quando incluída no circuito, a resistência  $R_F$  serve como um escudo de protecção contra picos de tensão que possam ocorrer [5].

### 2.2.2 ANÁLISE DA CONFIGURAÇÃO BÁSICA INVERSORA

A figura seguinte (Fig. 2.5) ilustra a configuração básica inversora de um amplificador operacional. Como se pode observar, apenas é aplicado um sinal de entrada à porta inversora, enquanto a entrada não inversora é ligada à massa. Uma vez que a corrente que corre quer para a entrada inversora quer para a entrada não inversora é igual a zero, pode-se considerar que a corrente que atravessa a resistência  $R_G$  é a mesma que atravessa a resistência  $R_F$  [5].

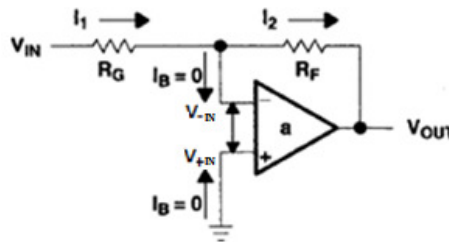


Fig. 2.5 - Configuração não inversora do amplificador operacional.

Considerando novamente que, devido à realimentação, a tensão nas portas inversora e não-inversora será a mesma, neste caso será 0V em ambas, obtêm-se as seguintes equações [5]:

$$I_1 = \frac{V_{-IN}}{R_G} = -I_2 = -\frac{V_{OUT}}{R_F} \quad (2.4)$$

$$\frac{V_{OUT}}{V_{-IN}} = -\frac{R_F}{R_G} \quad \leftrightarrow \quad V_{OUT} = -\frac{R_F}{R_G} \times (V_{-IN}) \quad (2.5)$$

Ao analisarem-se as equações (2.4) e (2.5) pode-se verificar que uma vez mais o ganho do amplificador não depende de nenhum dos parâmetros do amplificador, mas sim do valor das resistências colocadas no circuito. Note-se que a independência do ganho em relação aos parâmetros do amplificador, no caso das configurações inversora e não inversora, só foi possível graças ao processo de realimentação.

### 2.2.3 ALGUMAS FUNÇÕES PASSÍVEIS DE SEREM REALIZADAS POR UM AMPLIFICADOR OPERACIONAL

Sendo dispositivos eléctricos vastamente utilizados nas mais variadas aplicações, os amplificadores operacionais estão presentes no nosso quotidiano nos mais diversos aparelhos electrónicos. Nas subsecções seguintes será demonstrada a versatilidade dos amplificadores operacionais, mostrando-se algumas das funções passíveis de serem implementadas por estes.

#### 2.2.3.1 SOMADOR DE TENSÕES

Em muitas aplicações a entrada inversora de um amplificador operacional é constituída por mais do que uma fonte de tensão. A Fig. 2.6 mostra o esquema de um circuito que ilustra a soma de várias tensões de entrada [6].

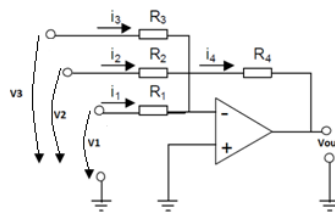


Fig. 2.6 - Esquema de um circuito somador de tensão.

A equação número (2.6) traduz o comportamento do circuito acima esquematizado [5,6].

$$V_{OUT} = -R_4 \times \left( \frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} + \frac{V_3}{R_3} \right) \quad (2.6)$$

Observando a equação anterior e o esquema do circuito, verifica-se que a corrente que percorre a resistência  $R_4$  é igual à soma das correntes nos ramos de entrada da porta inversora. Dessa forma conclui-se que o circuito anterior não é mais do que um amplificador somador, onde cada ramo de entrada trabalha com factores de escala diferentes.

### 2.2.3.2 AMPLIFICADOR DIFERENCIAL

Até agora apenas foi utilizada uma das entradas do amplificador operacional, estando a outra ligada à massa. Se forem utilizadas ambas as entradas do amplificador operacional, obtém-se um circuito muito utilizado na electrónica, denominado de circuito amplificador diferencial (*Differential Amplifier*) [5,6]. Se se colocarem dois valores de tensão, em cada uma das entradas, obtém-se à saída a diferença, amplificada, dos sinais de entrada. A figura seguinte (Fig. 2.7) ilustra o circuito:

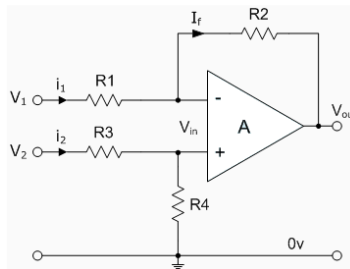


Fig. 2.7 - Circuito diferencial.

A função de transferência do circuito representado pela figura acima, pode ser encontrada através da seguinte expressão [5,6]:

$$V_{OUT} = -\frac{R_2}{R_1} V_1 + \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \left(\frac{R_4}{R_3 R_4}\right) V_2 \quad (2.7)$$

Se  $R_1=R_3$  e  $R_2=R_4$ , a função de transferência pode ser simplificada para a seguinte equação:

$$V_{OUT} = \frac{R_2}{R_1} (V_2 - V_1) \quad (2.8)$$

Se todas as resistências possuírem o mesmo valor, então o circuito torna-se num circuito diferenciador de ganho unitário uma vez que o valor da diferença entre as tensões de entrada será multiplicado por um factor de ganho unitário [5,6]. Se ao circuito da Fig. 2.7 forem adicionadas outras resistências paralelamente às resistências  $R_1$  e  $R_3$ , o circuito resultante será um circuito somador e diferenciador das tensões de entrada.

O circuito diferenciador de tensão é um circuito deveras útil na electrónica, e muito utilizado nas mais diversas aplicações. Uma das aplicações mais usuais deste tipo de configuração é a sua utilização em pontes resistivas, também denominadas de ponte de Wheatstone [6]. Tal configuração será discutida nas secções seguintes com maior pormenor.

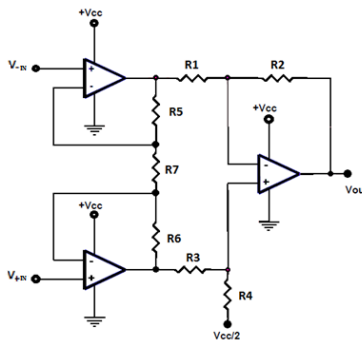
## 2.3 Amplificadores de instrumentação

---

Utilizados em aplicações onde é necessário amplificar um pequeno sinal com o mínimo de distorção possível, os amplificadores de instrumentação são componentes electrónicos de extrema utilidade [7,8].

### 2.3.1 DIFERENÇAS ENTRE OS AMPLIFICADORES OPERACIONAIS E OS AMPLIFICADORES DE INSTRUMENTAÇÃO

Um amplificador de instrumentação não é mais do que um bloco amplificador fechado, cujas entradas possuem valores de impedância extremamente elevadas e como tal correntes de polarização baixas. Normalmente o valor das correntes de entrada de um amplificador de instrumentação é da ordem dos 50nA, e a impedância de entrada na ordem os  $10^9\Omega$  [8]. Caracterizados por serem utilizados como amplificadores diferenciais, os amplificadores de instrumentação lidam normalmente com valores de tensão de entrada razoavelmente altos sendo no entanto a diferença entre eles baixa. A figura seguinte (Fig. 2.8) mostra a tipologia básica de um amplificador de instrumentação:



*Fig. 2.8 - Configuração básica de um amplificador*

Como se pode observar, em geral os amplificadores de instrumentação são constituídos por 3 amplificadores operacionais. Graças à sua configuração base, os amplificadores de instrumentação possuem características superiores às dos amplificadores operacionais, nomeadamente uma melhor estabilidade em relação a variações de temperatura, um melhor desempenho a nível de consumo de energia e uma melhor linearidade [8]. Para além de um melhor desempenho do que a da montagem equivalente com três amplificadores operacionais juntos, os amplificadores de instrumentação possuem também a vantagem de ocuparem menos espaço nos circuitos [8].

Ao contrário dos amplificadores operacionais, cujo ganho é determinado pelo valor das resistências externas ligadas no ramo de realimentação, os amplificadores de instrumentação utilizam, normalmente, as suas resistências internas para fixar o ganho. Em alguns dispositivos é possível configurar o ganho do amplificador de instrumentação através do valor da impedância colocada entre 2 terminais pré-configurados pelo fabricante do amplificador. Em qualquer dos casos, as resistências

que se encontram nas entradas do amplificador de instrumentação nunca são utilizadas para determinar o ganho do amplificador [8]. A Fig. 2.9 mostra o diagrama de conexão de um amplificador de instrumentação AD622 [9].

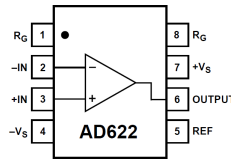


Fig. 2.9 - Diagrama de conexão do amplificador de instrumentação AD622.

O amplificador AD622 é um amplificador de baixo custo com precisão razoável e que apenas precisa de uma resistência externa para determinar o ganho do amplificador. Dependendo do ganho que se pretende, pode-se determinar o valor da resistência  $R_G$  a colocar entre os terminais 1 e 8 do amplificador de instrumentação AD622, através da equação seguinte [9]:

$$R_G = \frac{50,5k\Omega}{G - 1} \quad (2.9)$$

A gama de valores de ganho passíveis de serem implementados neste amplificador de instrumentação vai de 2 a 1000 [9].

## 2.4 Medição de resistências

Nesta secção serão estudados alguns métodos de caracterização e medição de componentes passivos, nomeadamente resistências. Mais concretamente, serão estudados métodos de zero, como os utilizados nas pontes de medição, em que a resistência a medir é comparada com elementos padrão.

Particular detalhe será dado ao estudo do método de medição de resistências através da ponte de Wheatstone, tendo em conta a determinação do valor da resistência variável de transdutores resistivos.

### 2.4.1 INTRODUÇÃO

A resistência eléctrica não é mais do que a capacidade de um corpo se opor à passagem de corrente pelo mesmo, quando lhe é aplicada uma diferença de potencial [10]. Existem muitos métodos para a medição da resistência, sendo o método do voltímetro-amperímetro o mais simples, pois demonstra directamente a lei de Ohm.

As resistências são hoje em dia utilizadas em aplicações como o aquecimento eléctrico, a polarização e o controlo de ganho em amplificadores, em divisores de corrente e de tensão, entre muitas outras aplicações. As resistências comerciais podem possuir valores desde algumas décimas de  $\Omega$  até às centenas de  $M\Omega$ . A tabela seguinte

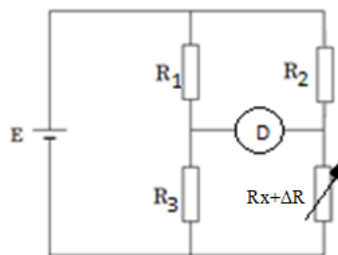
apresenta os vários tipos de resistências disponíveis comercialmente, bem como algumas das suas aplicações [11].

*Tabela 2.1 - Características de alguns tipos de resistências de acordo com o seu material de construção [11].*

Tipo	Gama de valores ( $\Omega$ )	Tolerância (%)	Coefficiente Térmico ( $\%/^{\circ}\text{C}$ )	Potência Máxima (w)	Aplicação
<b>Carvão</b>	1 a 22M	5 a 20	0,1	2	Utilizadas em circuitos electrónicos
<b>Líquido</b>	0,01 a 1	20		>250k	Aplicações de potência elevada
<b>Aço</b>	0,1 a 1	20		250k	Aplicações de potência elevada
<b>Fio Bobinado</b>	1 a 100k	>0,0005	0,0005	200	Aplicações onde seja necessária elevada qualidade, alta dissipação de potência.

#### 2.4.1.1 PONTE DE WHEATSTONE

Utilizada na medição do valor de uma resistência, a ponte de Wheatstone é também um elemento essencial ao condicionamento do sinal em cadeias de medição com transdutores resistivos. Uma ponte de Wheatstone é constituída por quatro braços nos quais são colocadas resistências, ou elementos resistivos, uma fonte de alimentação de corrente contínua ou alternada e um detector de corrente. De acordo com a alimentação, uma ponte de Wheatstone pode ser denominada de ponte de corrente alternada ou ponte de corrente contínua. Nesta secção serão apenas estudadas as pontes de Wheatstone cuja alimentação é efectuada por uma fonte de corrente contínua. A Fig. 2.10 ilustra uma típica ponte de Wheatstone alimentada a corrente contínua [12].



*Fig. 2.10 - Ponte de Wheatstone de corrente contínua.*

Uma ponte de Wheatstone equilibrada é caracterizada por não existir corrente no detector (D), sendo que uma variação no valor da resistência de um dos braços provocará uma alteração nesse equilíbrio. Em consequência dessa variação surgirá no detector uma corrente proporcional à variação de resistência verificada.

A condição de equilíbrio de uma ponte de Wheatstone é alcançada através do ajuste do valor das resistências presentes nos ramos. A condição de equilíbrio de uma ponte de

Wheatstone, baseada na condição de que o produto dos valores das resistências em braços cruzados deverá ser igual, pode ser escrita na forma [12]:

$$R_1(R_x + \Delta R) = R_2R_3 \quad (2.10)$$

em que as resistências  $R_1$ ,  $R_2$  e  $R_3$  são resistências padrão, sendo que o seu valor é conhecido e a resistência  $R_x$  é a resistência que se pretende medir. Assim e segundo a equação anterior, o valor de  $R_x$  depende das outras resistências, pela expressão:

$$R_x + \Delta R = R_2 \frac{R_3}{R_1} \quad (2.11)$$

Nas pontes comerciais, a razão  $R_3/R_1$  é ajustada mediante interruptores, sendo na maior parte das vezes, feito na resistência  $R_2$  o ajuste mais fino da ponte, de modo a colocá-la no ponto de equilíbrio. Apresentando erros na ordem dos 0,1%, as pontes comerciais possuem menor erro, em comparação com outros métodos de medição de resistências, tais como o método do voltímetro-amperímetro e os ohmímetros analógicos.

No cálculo dos erros de medição numa ponte de Wheatstone devem ser incluídos os seguintes parâmetros:

1. Variações no valor das resistências causadas por auto-aquecimento;
2. Os erros na determinação do ponto de equilíbrio da ponte devido à sensibilidade e resolução do detector;
3. As tolerâncias das resistências presentes nos restantes braços da ponte, nomeadamente e tomando como exemplo a Fig. 2.10, nas resistências 1, 2 e 3;
4. As tensões criadas pelo efeito termoelétrico que ocorrem nas junções/contactos entre os diferentes materiais que constituem a ponte;
5. A resistência dos contactos e dos fios que, para a medição de resistências de baixo valor, podem ser significantes;

#### 2.4.1.2 PONTE DE WHEATSTONE NA VIZINHANÇA DO EQUILÍBRIO

Quando se diz que uma ponte de Wheatstone está no ponto de equilíbrio, a corrente no detector é nula e, conseqüentemente, a tensão entre os seus terminais é também nula. De notar que pequenas variações no valor de qualquer uma das resistências que se encontram nos braços da ponte provocam diferenças de potencial entre os terminais do detector, de valor tanto maior quanto maior for a variação. É este portanto o princípio em que se baseia a utilização de uma ponte de Wheatstone enquanto elemento de medição, uma vez que a ponte traduz variações de resistência em variações de tensão [11].

Note-se que uma variação  $\Delta R$  pode ter origem num transdutor (que serão estudados em detalhe na secção seguinte). Para já, e de forma simples, pode-se afirmar que um transdutor traduz uma determinada variação (temperatura, comprimento, etc.) numa variação de resistência.

Por exemplo um extensómetro é um transdutor passivo capaz de converter deformações em variações de resistência. A ponte de Wheatstone é então uma óptima solução para traduzir as variações de resistência provocadas pelos extensómetros em variações de tensão, podendo ser utilizados um ou mais braços da ponte, conforme a aplicação desejada.

#### 2.4.1.2.1 PONTE DE WHEATSTONE COM UM BRAÇO ACTIVO

O circuito base de uma ponte de medição é o circuito ilustrado na Fig. 2.11 a). Neste circuito admite-se que o valor de todas as resistências,  $R$ , é idêntico, estando por isso a ponte em equilíbrio, ou seja, a corrente no detector será nula. É então aplicada uma variação,  $\Delta R$ , apenas a um dos braços da ponte.

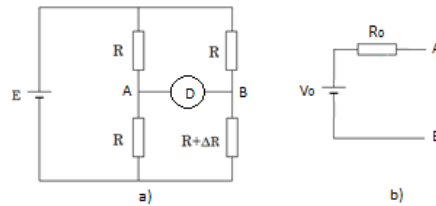


Fig. 2.11 - a) Ponte de Wheatstone em desequilíbrio; b) Equivalente de Thévenin da ponte de Wheatstone desequilibrada.

Na situação de desequilíbrio pode-se substituir a ponte representada na Fig. 2.11 a) pelo seu equivalente de Thévenin aplicado aos terminais do detector, ou seja, aos terminais A e B (Fig. 2.11 b)). Dessa forma, a tensão ( $V_0$ ) e a resistência ( $R_0$ ) de Thévenin podem ser determinadas segundo a seguinte dedução [13]:

$$V_0 = E \frac{R + \Delta R}{2R + \Delta R} - E \frac{R}{2R} = E \frac{\Delta R}{4R + 2\Delta R} \quad (2.12)$$

$$R_0 = \frac{R}{2} + \frac{R(R + \Delta R)}{2R + \Delta R} \quad (2.13)$$

Na condição de que  $\Delta R$  é muito inferior a  $R$ , ou seja,  $\Delta R \ll R$ , as equações anteriores podem ser substituídas pelas seguintes aproximações:

$$V_0 \approx E \frac{\Delta R}{4R} \quad (2.14)$$

$$R_0 \approx R \quad (2.15)$$

Como se pode verificar, a variação da tensão em circuito aberto, nos terminais do detector, é proporcional à variação da própria resistência.

#### 2.4.1.2.2 PONTE DE WHEATSTONE COM VÁRIOS BRAÇOS ACTIVOS

A figura seguinte mostra o esquema de duas pontes de Wheatstone, respectivamente com dois e quatro braços activos:

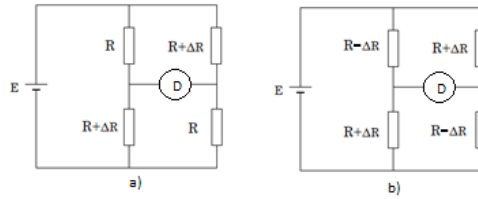


Fig. 2.12 - Ponte de Wheatstone com: a) dois braços activos; b) 4 braços activos [13].

Tal como foi efectuado para o esquema da ponte de Wheatstone com um braço activo, a tensão em circuito aberto vista nos terminais do detector da figura Fig. 2.11 b) pode ser determinada através da seguinte dedução [13]:

$$V_0 = E \frac{R+\Delta R}{2R+\Delta R} - E \frac{R}{2R+\Delta R} = E \frac{\Delta R}{2R+\Delta R} \quad (2.16)$$

Agora se se considerar que  $\Delta R \ll R$ , tal como foi feito anteriormente, a equação (2.16) passa a ser simplificada para a seguinte equação:

$$V_0 \approx E \frac{\Delta R}{2R} \quad (2.17)$$

Como se pode verificar, através duma breve comparação entre as equações (2.14) e (2.17), o valor da tensão de saída para a configuração da ponte de Wheatstone com dois braços activos, é duas vezes superior para a mesma variação de resistência, se E e R forem iguais. Isto é, obtém-se uma sensibilidade duas vezes maior se for utilizada a configuração com dois braços activos.

Finalmente e se se analisar a tensão em circuito aberto nos terminais do detector para a Fig. 2.12 b), ou seja, para a configuração da ponte de Wheatstone com 4 braços activos, obtém-se a seguinte expressão:

$$V_0 = E \frac{R+\Delta R}{2R} - E \frac{R-\Delta R}{2R} = E \frac{\Delta R}{R} \quad (2.18)$$

Uma vez mais comparando as equações da tensão em circuito aberto nos terminais do detector para as diversas configurações acima estudadas, a sensibilidade da ponte com quatro braços activos é quatro vezes superior à configuração com apenas um braço activo. Além disso esta expressão é obtida sem qualquer aproximação, ou seja, não é necessário que  $\Delta R \ll R$ .

Em resumo, a utilização de dois ou mais transdutores nos braços de uma ponte de Wheatstone é fundamentada por duas simples razões:

1. A sensibilidade da medição é substancialmente aumentada conforme o número de transdutores utilizados;
2. Com a utilização de 4 transdutores, um em cada braço da ponte de Wheatstone, conforme exemplificado na Fig. 2.12 b), a variação da tensão em função da variação da resistência torna-se linear;

Uma das desvantagens desta configuração é que os quatro transdutores utilizados têm de ser iguais, e têm de estar sujeitos (2 a 2) a variações simétricas.

### 2.4.1.3 LINEARIZAÇÃO DA PONTE COM UM ÚNICO BRAÇO ACTIVO

Para que a variação da tensão em relação à resistência seja exactamente linear é necessária a utilização de uma ponte de Wheatstone com quatro braços activos e em que dois dos braços estão sujeitos a variações simétricas. Porém nem sempre é possível obter variações de resistência de sinal contrário, sendo nesses casos obrigatória a utilização das configurações de um ou dois braços activos [12].

Tal como foi descrito na secção anterior, a resposta em tensão das configurações com um e dois braços activos em função da variação da resistência, não é linear. Por esse motivo é muitas vezes necessária a utilização de circuitos de linearização da resposta tais como o circuito da Fig. 2.13.

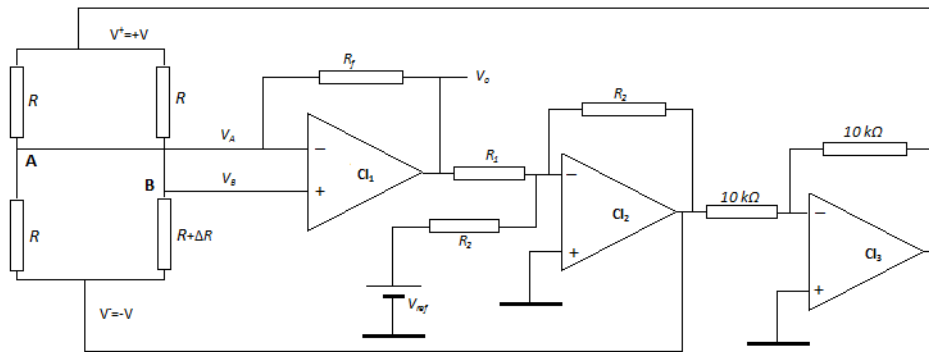


Fig. 2.13 - Circuito de linearização de uma ponte com um único braço activo [13].

Ao observar-se o circuito da Fig. 2.13 verificam-se as seguintes características [13]:

- A ponte de Wheatstone é alimentada através dos amplificadores CI<sub>2</sub> e CI<sub>3</sub> com tensões V<sub>+</sub> e V<sub>-</sub> iguais em módulo;
- A tensão gerada pelo amplificador CI<sub>1</sub> é directamente proporcional de ΔR;

De modo a analisar as tensões de entrada no amplificador CI<sub>1</sub> deve-se uma vez mais utilizar o teorema de Thévenin aplicado a A e B (Fig. 2.13). Dessa forma, a tensão e a resistência de Thévenin aplicadas ao ponto A podem ser deduzidas através da seguinte dedução [10]:

$$V_A = 0V \quad (2.19)$$

$$R_A = \frac{R}{2} \quad (2.20)$$

Ao passo que no ponto B, a tensão e a resistência de Thévenin são respectivamente:

$$V_B = 2V \frac{R+\Delta R}{2R+\Delta R} - V = V \frac{\Delta R}{2R+\Delta R} \quad (2.21)$$

$$R_B = \frac{R(R+\Delta R)}{2R+\Delta R} \quad (2.22)$$

Agora, e uma vez que foi simplificado o circuito da Fig. 2.13, pode-se esboçar o circuito equivalente do circuito de entrada, ou seja, do circuito integrado CI1. O circuito equivalente é então representado pela figura seguinte.

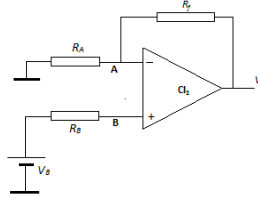


Fig. 2.14 - Circuito de entrada (ponte e circuito integrado CI1) simplificado.

De acordo com a figura anterior, pode-se deduzir o valor da tensão de saída do circuito representado pela figura anterior da seguinte forma [10]:

$$V_O = V_B \left( 1 + \frac{R_f}{R_A} \right) \quad (2.23)$$

Tendo em conta a equação (2.20) e (2.21), pode-se reescrever a equação (2.23) da seguinte forma:

$$V_O = V \frac{\Delta R}{2R+\Delta R} \left( 1 + \frac{2R_f}{R} \right) \quad (2.24)$$

Logo, obtemos a seguinte expressão:

$$V_O = V \frac{\Delta R}{2R+\Delta R} \frac{R_1}{R_2} \quad (2.25)$$

Analisando outra vez o circuito da Fig. 2.13, verifica-se que o valor de  $V_-$  é imposto pela saída do circuito amplificador CI2, tendo o valor de:

$$V_- = -V_O \frac{R_2}{R_1} - V_{ref} \quad (2.26)$$

Repetindo-se a relação anterior e combinando-a com a equação (2.25) obtém-se a seguinte expressão:

$$V_O = \left( V_O \frac{R_2}{R_1} + V_{ref} \right) \frac{\Delta R}{2R+\Delta R} \frac{R_1}{R_2} = V_O \frac{\Delta R}{2R+\Delta R} + V_{ref} \frac{\Delta R}{2R+\Delta R} \frac{R_1}{R_2} \quad (2.27)$$

Que finalmente pode ser simplificada:

$$V_O = \frac{V_{ref} R_1 \Delta R}{2 R_2 R} \quad (2.28)$$

Esta expressão mostra que é possível obter um circuito de linearização que faz com que a tensão de saída,  $V_O$ , varie linearmente com  $\Delta R$ , desde que a relação  $R_1/R_2 = 1 + 2R_F/R$ . A única nota de particular atenção no desenvolvimento destes circuitos de linearização prende-se com o facto de ser necessária uma boa fonte de tensão estabilizada,  $V_{ref}$  [10].

## 2.5 Transdutores

---

Um transdutor é um elemento capaz de traduzir variações de uma grandeza de entrada numa outra grandeza de saída, segundo uma determinada lei Física. Estes versáteis dispositivos são utilizados sempre que é muito difícil ou mesmo impossível analisar directamente uma determinada grandeza. Os transdutores mais utilizados traduzem grandezas físicas, tais como a deformação, a temperatura, a força ou a intensidade luminosa, em grandezas eléctricas tais como a tensão ou a resistência. Há no entanto que prestar especial atenção para o facto de que o sinal captado pelo transdutor ter de ser condicionado de forma correcta, para que os dados captados por este, tenham utilidade prática [14].

Nesta secção serão estudados, de forma particular, os transdutores resistivos, conhecidos por extensómetros resistivos, bem como os transdutores fotosensíveis, muito embora, e a título introdutório, seja estudado o princípio de funcionamento dos extensómetro de uma forma geral, bem como a sua caracterização global.

### 2.5.1 INTRODUÇÃO

Constituídos normalmente por um transdutor e um circuito de condicionamento de sinal, os primeiros andares dos sistemas de medição são a interface entre o mundo exterior e a restante cadeia de medição. Assim os dois primeiros dois andares de uma cadeia de medição são normalmente os mais importantes e aqueles que influenciam em maior percentagem o erro de qualquer sistema de medição [14,15].

Um transdutor é então o primeiro elemento de uma cadeia de medição que traduz na sua saída uma resposta à grandeza física a medir. Os transdutores conseguem traduzir grandezas físicas tais como a temperatura, o deslocamento, o pH, a velocidade e a força, em grandezas eléctricas tais como a corrente, a tensão, a capacidade ou mesmo a resistência.

Refira-se que os transdutores podem ser classificados em função do método de conversão de energia ou da natureza do sinal de saída, entre outras possíveis classificações.

Nesta tese, e de forma a seguir a bibliografia utilizada, o método de classificação utilizado para classificar os transdutores, irá de encontro com a grandeza eléctrica de saída que estes produzem [15].

A tabela seguinte (Tabela 2.2) apresenta vários exemplos de transdutores [14,15].

*Tabela 2.2 - Tipo de Transdutores.*

<b>Parâmetro eléctrico e tipo de transdutor</b>	<b>Princípio de funcionamento e natureza do dispositivo</b>	<b>Aplicação típica</b>
<b>Transdutores que necessitam de alimentação externa</b>		
<i>Capacitivos</i>		
Sensor de capacidade variável	A distância entre duas placas paralelas varia de acordo com a aplicação de uma força	Pressão; Deslocamento
Microfone capacitivo	A pressão sonora varia a capacidade entre um diafragma móvel e uma placa fixa	Voz; Ruído; Música
<i>Indutivos</i>		
Transdutor magnético	Devido à alteração de um circuito magnético, a indução mútua ou a auto-indução de uma bobina alimentada em AC varia	Deslocamento; Pressão
Transformador diferencial	De acordo com a posição de um núcleo magnético, a tensão diferencial entre dois enrolamentos secundários varia	Deslocamento; Vibração; Posição; Pressão
<i>Resistivos</i>		
Potenciómetro	Um movimento externo produz o deslocamento de um cursor que origina a variação de uma resistência	Deslocamento; Pressão
Célula fotoeléctrica	De acordo com a luz incidente, a resistência da célula varia	Relé fotossensível
Extensómetro resistivo	Devido a deflexões externas, a resistência do condutor varia	Deslocamento; Força
Termómetro resistivo	De acordo com a temperatura, o valor da resistência de um condutor varia	Temperatura
<i>Tensão e Corrente</i>		
Células fotossensíveis	A radiação incidente numa placa com propriedades fotoemissoras, provoca a emissão electrónica	Radiação; Luz
Efeito de Hall	Dependendo da direcção do fluxo magnético e da corrente aplicada ao transdutor, existe uma diferença de potencial numa placa semicondutora de germânio	Corrente; Fluxo magnético
<b>Transdutores que não necessitam de alimentação externa</b>		
Bobina móvel	Uma tensão é gerada quando existe movimento de uma bobina móvel	Velocidade; Vibração
Célula fotovoltaica	É gerada uma tensão na junção de um semiconductor quando é irradiada uma energia radiante, na presença de um campo magnético	Medição de luz; Célula solar
Transdutor piezoeléctrico	É gerada uma <i>f.e.m.</i> quando é aplicada uma determinada força sobre materiais cristalinos como o quartzo	Vibração; Som; Aceleração; Variação da pressão

## 2.5.2 EXTENSÓMETROS RESISTIVOS

Compostos por um condutor ou por um semiconductor de pequena secção, colocado sobre um material elástico, os extensómetros convertem uma deformação numa variação de resistência. Na Fig. 2.15 apresentam-se alguns exemplos de extensómetros.

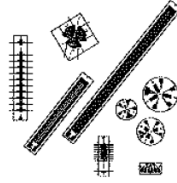


Fig. 2.15 - Exemplos de extensómetros [15].

Como se pode observar na figura anterior existem vários tipos e formatos de extensómetros, sendo que a escolha de um deles depende directamente do objectivo da aplicação, nomeadamente da direcção de deformação que se pretende medir. Colocados sobre a superfície sujeita a esforços mecânicos, os extensómetros devem acompanhar as deformações provocadas sobre essa mesma superfície.

Refira-se que os extensómetros resistivos são sem dúvida os transdutores mais utilizados para medir deformações, não só pela sua exactidão, mas também pelo seu baixo custo, e facilidade de utilização.

Dependendo do tipo de material utilizado, a sensibilidade de um extensómetro resistivo ( $K$ ), é determinada pela razão entre a variação unitária da resistência ( $\Delta R/R$ ) e a variação unitária de comprimento ( $\Delta l/l$ ) [13]:

$$K = \frac{\Delta R/R}{\Delta l/l} \quad (2.29)$$

Refira-se que a variação unitária de comprimento não é mais do que uma deformação relativa, também denominada de extensão, ( $\epsilon$ ) [13]:

$$\epsilon = \frac{\Delta l}{l} \quad (2.30)$$

Esta grandeza adimensional é usualmente expressa em microdeformações ( $\mu\epsilon$ ). De acordo com a Fig. 2.16, verifica-se que ao ser aplicada uma extensão/deformação longitudinal a um determinado material, existe também deformação transversão do material, ou seja, perpendicularmente à força aplicada.

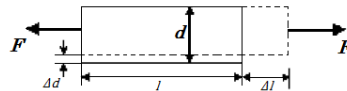


Fig. 2.16 - Deformação de um material [13].

Directamente dependente da força aplicada, a contracção do material é caracterizada pelo coeficiente de Poisson  $\mu$ , definido pelo valor negativo do quociente entre a deformação transversal  $\varepsilon_T$  e a deformação axial,  $\varepsilon_l$ . A expressão seguinte demonstra a relação entre as deformações [11]:

$$\mu = -\frac{\varepsilon_T}{\varepsilon} \quad (2.31)$$

Sendo a variação na direcção da força aplicada  $\Delta l/l$  e na direcção perpendicular  $\Delta d/d$ , o coeficiente de Poisson do material passa a ser descrito pela seguinte expressão:

$$\mu = \frac{\Delta d/d}{\Delta l/l} \quad (2.32)$$

Por outro lado, a expressão da resistência de um condutor de comprimento  $l$ , de secção circular uniforme  $S$ , é dada por [11]:

$$R = \rho \frac{l}{S} = \frac{\rho l}{(\pi/4)d^2} \quad (2.33)$$

onde  $\rho$  é a resistividade do condutor e  $d$  o seu diâmetro. Se forem aplicadas variações em  $l$  e em  $d$ , a resistência do condutor passa a ser expressa pela equação:

$$R_S = \frac{\rho(l+\Delta l)}{(\pi/4)(d-\Delta d)^2} \approx \frac{\rho(l+\Delta l)}{(\pi/4)d^2(1-2\Delta d/d)} \quad (2.34)$$

A expressão da resistência do condutor pode no entanto ser aproximada da seguinte forma:

$$R_S = \frac{\rho l}{(\pi/4)d^2} \frac{1+\Delta l/l}{1-2\Delta d/d} = R \frac{1+\Delta l/l}{1-2\Delta d/d} \quad (2.35)$$

e uma vez mais simplificada para a seguinte expressão:

$$R_S \approx R + \Delta R = R \left[ 1 + (1 + 2\mu) \frac{\Delta l}{l} \right] \quad (2.36)$$

Assim, pode-se dizer que a variação relativa  $\Delta R/R$  é dada por:

$$\frac{\Delta R}{R} = (1 + 2\mu) \frac{\Delta l}{l} \quad (2.37)$$

de onde se conclui que a sensibilidade  $K$  do extensómetro é uma função do coeficiente de Poisson, com a seguinte expressão:

$$K = \frac{\Delta R/R}{\Delta l/l} = 1 + 2\mu \quad (2.38)$$

Combinando agora as equações (2.36) e (2.38), obtêm-se as seguintes equações:

$$R_s \approx R(1 + K\varepsilon) \quad e \quad \frac{\Delta R}{R} = K\varepsilon \quad (2.39)$$

A título de exemplo, para uma liga de platina e tungsténio o valor de K é de 4,0, ao passo que para os semicondutores o valor de K atinge valores na ordem dos 150 [13,15].

A título de exemplo refira-se que a variação da resistência de um extensómetro devido a uma deformação de  $500\mu\varepsilon$  (o que já é um valor razoavelmente elevado), provoca variações de resistência na ordem dos  $0,24\Omega$ , para um extensómetro com uma sensibilidade  $K=4$  e com uma resistência nominal de  $120\Omega$ .

De forma a ser observada a variação da resistência de um extensómetro resistivo, é necessário, tal como foi referido nas secções anteriores, um circuito de condicionamento do sinal. Uma das formas de condicionar o sinal, e ao mesmo tempo traduzir as variações do valor da resistência dos extensómetros para valores de tensão, é utilizando a ponte de Wheatstone, em que, como já foi referido se podem utilizar um, dois ou mesmo quatro transdutores [16].

Tal como já foi descrito nas secções anteriores deste capítulo, a utilização de mais braços sensores na ponte de Wheatstone (uns colocados à tracção e outros à compressão, de modo a que se possam obter variações de resistência no sentido positivo e negativo) é justificada por duas simples razões:

1. A sensibilidade aumenta com o número de sensores;
2. Com quatro transdutores, dois à tracção e dois à compressão, a variação da tensão à saída da ponte, em relação à variação da resistência nos sensores, é linear.

Como já foi anteriormente referido, a relação entre a variação da tensão de saída e a variação da resistência, quando apenas um braço da ponte de Wheatstone possui um transdutor, é dada pela expressão:

$$V_0 = E \frac{\Delta R}{4R + 2\Delta R} \approx E \frac{\Delta R}{4R} = \frac{KE}{4} \varepsilon \quad (2.40)$$

Como se pode observar através da equação anterior, a variação entre  $V_0$  e  $\Delta R$  não é linear. Contudo, esta pode ser considerada linear se  $\Delta R \ll R$ . Se tais condições forem verificadas, na equação (2.40) a tensão  $V_0$  torna-se directamente proporcional à deformação  $\varepsilon$  através da expressão [11]:

$$V_0 \approx \frac{KE}{4} \varepsilon \quad (2.41)$$

A sensibilidade da ponte de Wheatstone com um único braço activo  $S_1$ , é então:

$$S_1 = \frac{V_0}{\varepsilon} = \frac{KE}{4} \quad (2.42)$$

Ou seja, a sensibilidade da ponte é directamente proporcional à sensibilidade, K, do extensómetro e ao valor da tensão de alimentação, E. Para a configuração com dois braços activos, a tensão de saída é dada através da seguinte expressão:

$$V_0 = E \frac{\Delta R}{2R + \Delta R} \approx E \frac{\Delta R}{2R} = \frac{KE}{2} \varepsilon \quad (2.43)$$

Mais uma vez considerando que a variação da resistência do extensómetro/sensor é muito inferior à resistência do próprio sensor, ou seja,  $\Delta R \ll R$ , obtém-se uma sensibilidade dupla ( $S_2 = KE/2$ ) em relação à configuração com apenas um braço activo. Isto implica que a tensão de saída,  $V_0$ , irá ser duas vezes superior à da configuração da ponte com apenas um braço activo [16].

Na configuração com quatro braços activos, a tensão de saída será dada por:

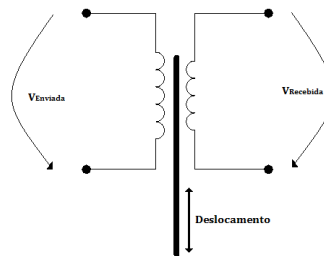
$$V_0 = E \frac{\Delta R}{R} = KE\varepsilon \quad (2.44)$$

Note-se que a variação da tensão  $V_0$  é independente da relação entre  $\Delta R$  e  $R$  e é proporcional a  $\varepsilon$ . Uma outra observação que pode ser retirada desta dedução é que a sensibilidade da ponte com quatro braços activos,  $S_4 = KE$ , é quatro vezes superior à sensibilidade com apenas um único braço activo. Um dos inconvenientes da configuração com quatro braços activos é o facto de todos os extensómetros terem de possuir valores de resistência exactamente iguais. Hoje em dia tal é possível, uma vez que no mercado já é possível adquirir conjuntos de quatro extensómetros, ou mais, sujeitos às mesmas condições de fabrico e como tal com valores de resistência praticamente iguais [14].

Dessa forma e de modo a garantir a fiabilidade das medições, os restantes componentes do sistema de medição utilizado, têm de ser de boa qualidade de modo a garantir o mínimo de ruído possível.

### 2.5.3 TRANSDUTORES MAGNÉTICOS

Os transdutores magnéticos, tal como o próprio nome indica, operaram segundo o princípio da indução magnética. Observe-se a figura seguinte (Fig. 2.17) que mostra o esquema típico de um transdutor indutivo.



*Fig. 2.17 - Princípio de funcionamento de um transdutor magnético.*

Como se pode verificar, à entrada do circuito é colocada uma tensão de referência denominada de  $V_{\text{Enviada}}$ . Conhecido o valor da tensão de entrada e sabendo-se que, segundo o princípio da indução magnética, o valor da tensão no segundo enrolamento depende da posição do núcleo magnético, se este se deslocar, o valor da tensão de saída (descrita na figura anterior como sendo  $V_{\text{Recebida}}$ ) irá alterar-se.

Desta forma, sendo conhecido o valor da tensão de saída em função da posição do núcleo magnético, torna-se fácil perceber-se o funcionamento dos aparelhos que seguem este princípio, como por exemplo alguns tipos de deflectômetros digitais.

#### 2.5.4 TRANSDUTORES FOTOSENSÍVEIS

Os transdutores fotosensíveis possuem sensores que reagem à energia que neles incide, cobrindo uma grande área do espectro de frequências. Alguns exemplos destes transdutores fotosensíveis são as células fotocondutoras, os fototransistores e os fotodíodos.

#### 2.5.5 CÉLULAS FOTOCONDUTORAS

As células fotocondutoras são sensores resistivos nos quais a sua resistência interna aumenta ou diminui com o aumento ou diminuição da luminosidade. Constituídas por um material fotocondutor, as células fotocondutoras são normalmente construídas com sulfureto de cádmio [16].

Uma das muitas aplicações deste tipo de transdutor, uma vez que a sua resposta espectral aproxima-se à da retina do olho humano, reside no controlo da iluminação pública. Isto é, através do uso destas células é possível ligar ou desligar a iluminação pública consoante a luminosidade das ruas.

#### 2.5.6 FOTODÍODOS E FOTOTRANSISTORES

Os fotodíodos são componentes que apenas deixam passar uma pequena corrente quando se encontram inversamente polarizados e quando não existe luz incidente. No entanto, quando a luminosidade incidente aumenta a corrente no díodo aumenta de forma proporcional. A Fig. 2.18 mostra a curva característica típica de um fotodíodo.

Utilizado em aplicações semelhantes às das células fotocondutoras, os fotodíodos possuem um tempo de resposta muito inferior, o que os torna superiores em aplicações onde a luminosidade varia mais rapidamente [16].

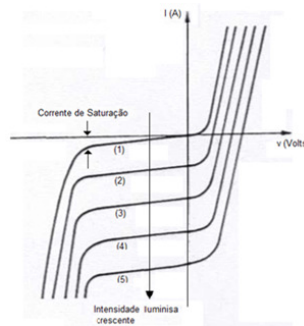


Fig. 2.18 - Curva característica de um fotodíodo em função da intensidade luminosa.

Como se pode observar na Fig. 2.18, na ausência de iluminação o fotodíodo possui um comportamento normal como o de um diodo, o que corresponde à curva (1). Com o

aumento da intensidade luminosa a sua curva característica tende a alterar-se, passando, por exemplo, de (1) para (2).

Com um princípio de funcionamento semelhante, os fototransistores apresentam uma sensibilidade de detecção substancialmente superior à dos fotodíodos. Assim e para uma dada iluminação, a corrente produzida por um fototransistor é muito superior aquela produzida por um fotodíodo. No entanto, e porque o fotodíodo possui menor tempo de resposta, em aplicações de alta frequência, este continua a ser o mais utilizado [16].

## 2.6 Sistemas e cadeias de medição

Embora muitas vezes sejam confundidos, um sistema de medição e uma cadeia de medição são duas definições diferentes. Um sistema de medição é definido de acordo com o método utilizado para se efectuar uma medição bem como com o tipo de sinais utilizados durante o processo de medição e tratamento, ao passo que uma cadeia de medição relaciona os aspectos funcionais de cada elemento que nela está inserido.

### 2.6.1 SISTEMA DE MEDIÇÃO

Classificados de acordo com diversos critérios, os sistemas de medição podem por exemplo ser classificados como sistemas em malha aberta ou sistemas em malha fechada. Uma outra forma de classificar os sistemas de medição divide-os em sistemas digitais e sistemas analógicos [13].

Num sistema de medição em malha aberta não existe normalmente nenhuma função de controlo, limitando-se o sistema de medição apenas a apresentar e/ou gravar as variações do sinal de entrada. Na figura seguinte (Fig. 2.19) é apresentado o diagrama de blocos de um sistema de medição em malha aberta.

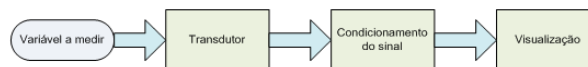


Fig. 2.19 - Sistema de medição em malha aberta.

Num sistema em malha fechada as medições efectuadas são utilizadas para controlo de todo o sistema. O processo de realimentação, descrito na figura seguinte (Fig. 2.20), é o que distingue a configuração de um sistema de medição de malha aberta ou fechada.

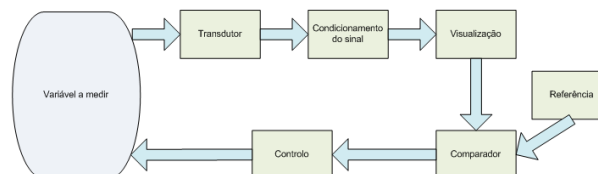
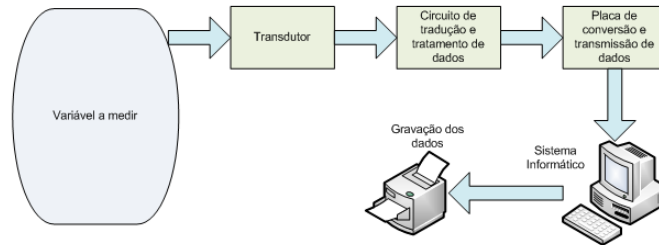


Fig. 2.20 - Sistema de medição em malha fechada.

Refira-se que o avanço tecnológico da informática e da electrónica teve um maior impacto no campo dos sistemas digitais do que nos analógicos. Como consequência, os sistemas de medição digitais tornaram-se cada vez mais complexos e com maiores capacidades de processamento, utilizando-se muitas vezes, sistemas informáticos para apoiar os sistemas de aquisição de dados [13].

Nos sistemas de medição digitais, as variáveis a medir são convertidas em formato digital antes de se proceder à sua visualização. A Fig. 2.21 ilustra um sistema de medição digital.



*Fig. 2.21 - Sistema Digital de Medição.*

A placa de conversão e transmissão de dados efectua a conversão dos dados analógicos em dados digitais, ao mesmo tempo que os transmite para o sistema informático que irá fazer o tratamento das medições efectuadas, a programação dos instrumentos de medição (no caso dos sistemas de medição em malha fechada) e o encaminhamento dos dados para um sistema de visualização e registo.

## 2.6.2 CADEIA DE MEDIÇÃO

Uma cadeia de medição, na sua forma mais básica, é uma sucessão de elementos de um sistema de medição, que explica o trajecto do sinal de medição desde a sua entrada à sua saída [13]. O sinal de entrada de um sistema de medição (ou de um instrumento de medição) é normalmente analógico, sendo habitualmente convertido para um sinal de saída digital, devido sobretudo ao aumento da utilização de computadores nos processos de medição [14].

Esta secção tem um duplo objectivo, primeiro a identificação dos principais componentes de uma cadeia de medição, e em seguida a análise dos erros provocados por estes no conjunto final, ou seja, no próprio sistema de medição.

### 2.6.2.1 ORGANIZAÇÃO DE UMA CADEIA DE MEDIÇÃO

Uma cadeia de medição tem por finalidade a junção de vários componentes para que seja possível medir uma determinada grandeza de entrada. Assim, uma cadeia de medição é normalmente constituída por transdutores, circuitos de condicionamento/linearização, conversores A/D e por sistemas de visualização, registo ou armazenamento de dados. A Fig. 2.22 mostra um exemplo de uma típica cadeia de medição.

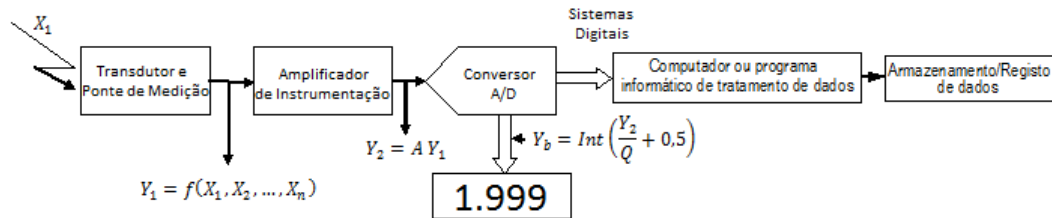


Fig. 2.22 - Exemplo de organização de uma cadeia de medição [13].

Tal como referido anteriormente, uma cadeia de medição típica é constituída pelos seguintes elementos [14]:

1. Um transdutor e um circuito de linearização, que têm como principal função a conversão de uma determinada grandeza física, normalmente não eléctrica, num determinado padrão eléctrico (tal como uma corrente ou uma tensão), de forma a simplificar o tratamento dos dados medidos. Se se considerar X como sendo o valor da grandeza a ser medida, a equação de saída é do tipo  $Y_1=f(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n)$ , onde Y é o valor de tensão à saída do circuito de linearização. Se se considerar o exemplo de uma ponte de Wheatstone com transdutores resistivos, a saída será então uma tensão Y1, e X1, X2, serão os parâmetros intrínsecos à ponte e aos transdutores.
2. Um amplificador de instrumentação, que tem como objectivo a amplificação do sinal de saída do circuito de linearização, para valores adequados aos andares seguintes. O sinal à entrada e à saída do amplificador são relacionados da seguinte forma  $Y_2=A.Y_1$ , onde A é o valor do ganho do amplificador.
3. Um conversor analógico-digital (A/D), que tem por objectivo a conversão dos sinais analógicos à saída do amplificador para sinais digitais, de modo a que estes possam ser traduzidos e observados num mostrador digital ou mesmo enviados para um computador.
4. Um sistema informático, para analisar e tratar os dados recebidos de acordo com as necessidades/características inerentes a cada sistema de medição. Note-se que a utilização de um sistema computadorizado num sistema de medição é actualmente quase uma obrigatoriedade, devido não só ao desenvolvimento da informática, mas também devido às necessidades actuais de resposta cada vez mais rápida, nomeadamente em relação à necessidade de processamento “personalizado” para cada tipo de medição.
5. Outra razão para a utilização de sistemas informáticos de apoio aos sistemas de medição prende-se com o processo de recolha e armazenamento de dados, uma vez que o torna muito mais rápido e cómodo para o utilizador do sistema.

Desta forma, uma cadeia de medição pode ser caracterizada por duas únicas equações. A equação analógica, que traduz as medições analógicas que são efectuadas e que são colocadas à entrada do conversor A/D, e uma equação digital que indica as características do conversor utilizado. Essas duas equações serão do tipo [14]:

$$Y_2 = A f(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (2.45)$$

e

$$Y_b = \text{Int} \left( \frac{Y_2}{Q} + 0,5 \right) = \text{Int} \left( 2^n \frac{Y_2}{V_F} + 0,5 \right) \quad (2.46)$$

onde  $Y_b$  é a representação binária, ou digital, do sinal de saída do conversor A/D, e  $n$ ,  $Q$  e  $V_F$  são respectivamente o número de *bits*, o *quatum* e a gama de tensão de entrada do conversor. O tema do conversor A/D será discutido em pormenor na secção 2.8.3 desta tese.

Por fim, e aquando a criação de um sistema de medição, deve-se caracterizar o problema em análise, estabelecendo todas as dependências funcionais que forem possíveis de identificar, bem como fazer o dimensionamento de todos os componentes da cadeia [13]. Para tal, deve-se logo à partida responder a algumas questões, nomeadamente:

1. Qual a gama dinâmica da grandeza de entrada, bem como qual a gama da grandeza eléctrica de saída correspondente aos blocos iniciais? Uma vez respondida esta questão outras questões iniciais têm de ser respondidas nomeadamente qual a sensibilidade do primeiro andar.
2. Qual o ganho dos amplificadores utilizados? De notar que o ganho do amplificador deve ser directamente dependente do valor máximo à entrada do conversor A/D. Como tal não se deve confundir este valor com o valor de fim de escala do conversor A/D, pois podem não ser coincidentes. Assim e uma vez determinado o valor máximo e mínimo da saída do primeiro bloco pode então ser determinada a amplificação necessária.
3. Qual o número de *bits* a utilizar no conversor A/D?

As respostas a estas questões irão determinar as especificações do sistema de medição, bem como a escolha dos elementos que o constituem. Estas questões, embora muito gerais, servem de guia para o desenvolvimento de uma cadeia de medição. No entanto, e conhecidas as restrições impostas pelo mercado, nomeadamente em relação aos transdutores, aos dispositivos electrónicos (amplificadores de instrumentação e operacionais), bem como aos conversores existentes, há que ter noção do seu custo e como tal da viabilidade de todo o projecto. Ultrapassadas todas estas questões é então possível dimensionar todo o sistema de medição do ponto de vista técnico, ou seja, de um ponto de vista electrónico.

#### 2.6.2.2 OS ERROS NUMA CADEIA DE MEDIÇÃO

No desenvolvimento de um sistema de medição há que ter noção de que todos os seus componentes introduzem um determinado erro, que irá condicionar directamente o erro global da medição. Nesta secção será estudado com maior pormenor o erro dos amplificadores operacionais, uma vez que são estes os principais causadores de erro de um sistema de medição [13].

Uma vez que normalmente são utilizados em aplicações de baixa frequência, os erros provocados pelos amplificadores de instrumentação a estudar nesta secção serão os erros de baixa frequência, as correntes de polarização e as suas respectivas derivas térmicas, bem como os desvios de tensão provocados por erros no zero [14].

Antes de se estudarem as diversas fontes de erro, deve-se em primeiro lugar proceder à explicação de alguns conceitos básicos que, geralmente, induzem alguma confusão. Uma vez que em qualquer dispositivo, com um ganho superior à unidade, o valor absoluto do erro à entrada (RAE) é inferior ao erro absoluto à saída do dispositivo (RAS), é preciso relaciona-los em função do seu ganho [14]. A equação seguinte ilustra o conceito descrito:

$$RAE = \frac{RAS}{A} \quad (2.47)$$

Note-se que os erros de entrada considerados na equação anterior estão directamente relacionados com os primeiros andares de um sistema de medição. Tomando-se como exemplo um transdutor de medição e uma ponte de Wheatstone, os erros de entrada de um amplificador de instrumentação, utilizado como circuito de linearização, serão os erros provocados pela própria ponte de Wheatstone, bem como pelo próprio transdutor. Na figura seguinte podem-se visualizar as diferentes fontes de erro do exemplo anteriormente referido [13].

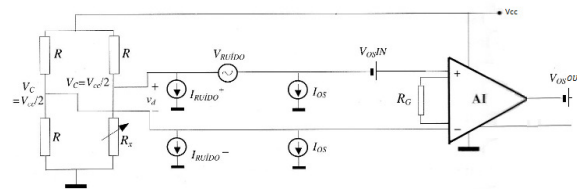


Fig. 2.23 - Fontes de erro num amplificador de instrumentação normal [13].

As fontes de erros do sistema anterior estão representadas por fontes de tensão, colocadas em série com o sinal, uma vez que estas possuem um efeito aditivo no sinal, ou por fontes de corrente, colocadas em paralelo entre as linhas de sinal e de massa [13]. Note-se que o valor das fontes de corrente pode ser transformado num valor de tensão equivalente, se for multiplicado o valor da corrente pela resistência que se encontra em paralelo com a fonte.

As diversas fontes de erro podem então ser divididas em dois grupos distintos:

- Os erros sistemáticos, responsáveis por desvios constantes de tensão ou de corrente à saída. Estes erros são caracterizados por fontes DC de tensão ( $V_{OSIN}$  e  $V_{OSOUT}$ ) e por fontes de corrente ( $I_{OS}$ ), representadas na figura anterior. Os erros de ganho podem também ser divididos em dois grupos, sendo eles os erros devido à tolerância da resistência externa  $R_G$  e os erros internos do amplificador de instrumentação, descritos normalmente pelo fabricante.
- Os erros de natureza aleatória, onde está incluído o ruído. O ruído por sua vez também pode ser dividido em dois grupos distintos, denominados de ruído de

corrente ( $I_{RUÍDO}$ ) e o ruído de tensão ( $V_{RUÍDO}$ ). O ruído de corrente está representado na figura anterior como uma fonte de corrente. O ruído de tensão por sua vez está representado por uma fonte de tensão associada em série com o sinal. Uma vez que a natureza de todo e qualquer ruído é aleatória, este não pode ser compensado, sendo a única solução o estabelecimento de um intervalo de valores de incerteza para a medição, o que por sua vez irá afectar a resolução da medida.

A Fig. 2.24 representa o exemplo de uma curva da densidade espectral do ruído de tensão de um amplificador, sendo a curva da densidade de ruído de corrente muito semelhante a essa mesma figura.

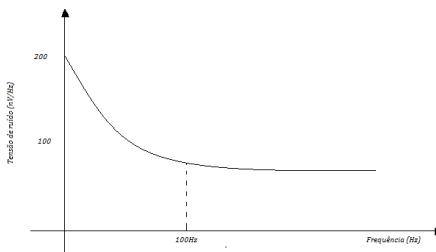


Fig. 2.24 - Densidade espectral de ruído de um amplificador de instrumentação [14].

Como podemos verificar através da figura anterior, este tipo de ruído aumenta com a diminuição da frequência, sendo por isso também denominado de ruído  $1/f$ , uma vez que a curva da sua densidade espectral para baixas frequências possui uma evolução inversamente proporcional à da frequência. Este tipo de ruído é normalmente considerado constante, e muitas vezes desprezível, para aplicações que utilizem frequências superiores a 100Hz [13].

Uma vez que os ruídos de tensão e de corrente não são relacionáveis, o valor total do erro, em tensão, é determinado através da seguinte equação:

$$V_{Total} = \sqrt{V_{RUÍDO}^2 + R_{fonte}^2 \times I_{RUÍDO}^2} \quad (2.48)$$

onde  $R_{fonte}$  é a resistência da fonte de sinal que se encontra em paralelo com a fonte de corrente de ruído.

Outros tipos de ruído têm de ser considerados num sistema de medição, nomeadamente os erros de linearidade, bem como as derivas térmicas correspondentes. Assim o valor total do erro de uma cadeia de medição é a soma do valor absoluto dos vários erros parciais de cada componente, ou seja,

$$\delta_{TOTAL} = \delta_{PONTE+TRANSDUTOR} + \delta_{AMPLIFICADOR} + \delta_{A/D} \quad (2.49)$$

Agora, e agregando-se estes erros às equações (2.45) e (2.46) obtém-se as seguintes equações:

$$Y_2 = A[f(X_1, X_2, \dots, X_n)] \pm (\delta_{PONTE+TRANSDUTOR} + \delta_{AMPLIFICADOR}) \quad (2.50)$$

e

$$Y_b = \text{Int} \left( 2^n \frac{Y_2}{V_F} + 0,5 \right) \pm \delta_{A/D} \quad (2.51)$$

Note-se que na equação (2.50) estão referidos os erros à entrada do amplificador ao passo que os erros da saída do amplificador estão supramencionados na equação (2.51).

## 2.7 LabVIEW

---

O LabVIEW é um software de instrumentação virtual desenvolvido pela NI. É importante referir que a versão utilizada no desenvolvimento desta tese foi a versão 2009, disponibilizada pelo INESC Porto.

### 2.7.1 INTRODUÇÃO

Pode-se considerar um instrumento virtual como sendo um computador com um software apropriado instalado e uma placa de aquisição de dados que, em conjunto, substituem um sistema de medição tradicional.

Os instrumentos virtuais actualmente representam uma mudança fundamental no campo da instrumentação, na medida em que substituem a instrumentação tradicional por sistemas centrados em software, que exploram a capacidade computacional das máquinas onde são instalados. Para além de explorarem a capacidade de processamento dos computadores onde estão instalados, a instrumentação virtual faz uso de outros recursos dos computadores actuais, tais como a placa de rede (de modo a partilhar informação), a memória do próprio computador (para guardar dados e também para processá-los), bem como os periféricos a que este possa estar ligado tais como impressoras e monitores.

Com os avanços recentes no campo computacional, a instrumentação virtual tem vindo a ganhar terreno em relação à instrumentação tradicional, uma vez que o software oferece maior flexibilidade e facilidade de adaptação que a instrumentação tradicional. Assim, e com instrumentos virtuais, a comunidade científica pode desenvolver sistemas de medição e automação que satisfaçam exactamente as suas necessidades, em vez de estarem limitados pelos instrumentos tradicionais, com funções fixas que são oferecidas/vendidas pelos fornecedores. A instrumentação virtual pode ser aplicada aos mais diversos ambientes tais como o design, a prototipagem ou mesmo na implementação em sistemas reais.

### 2.7.2 INSTRUMENTOS VIRTUAIS

Denominados de instrumentos virtuais (*VI, virtual instruments*), os programas criados com o LabVIEW “imitam” instrumentos físicos, tais como amperímetros, voltímetros, osciloscópios, etc. Cada uma das funções dos instrumentos virtuais

manipula os dados que recebe à entrada, em função da sua aplicação/programação, apresentando o resultado da operação na sua saída.

Cada instrumento virtual possui 3 componentes básicos. São eles o painel principal, o diagrama de blocos e um ícone ou conector. O painel frontal serve para interagir com o usuário enquanto o diagrama de blocos contém o código que define o funcionamento do VI. Por seu lado o ícone, ou conector, identifica o instrumento virtual de modo a que este possa ser utilizado num outro VI. Um instrumento virtual implementado dentro de um outro VI é denominado de subVI. Ou seja, e em linguagem de programação baseada em texto, passa a ser denominado de subrotina.

## 2.8 Arduíno

---

O Arduíno é uma ferramenta de desenvolvimento *open source* que pode ser associada ao conceito de *physical computing*, ou seja, ao conceito da criação de sistemas físicos, através de hardware e software, que interagem e respondem a entradas (*inputs*) do mundo real [17].

Constituído por uma peça de hardware e um software de desenvolvimento, um Arduíno é muito mais do que isso. Devido à enorme comunidade de utilizadores/seguidores em todo o Mundo, pode-se dizer que o Arduíno representa uma enorme comunidade. Existem várias razões para o seu incrível sucesso sendo algumas delas o seu baixo custo (dadas as funcionalidades que este pode realizar), a capacidade de interação com diversos sistemas operativos (nomeadamente o Windows, o Linux e o Macintosh), bem como a simplicidade de utilização [18].

Antes de se poder trabalhar com esta plataforma de desenvolvimento é necessário perceber-se o seu funcionamento. Para tal, nesta secção, serão estudados os principais conceitos, a começar pelo seu funcionamento a nível de hardware e software, tomando como exemplo o Arduíno Duemilinue que será utilizado posteriormente como placa de aquisição e conversão de dados.

### 2.8.1 HARDWARE

Fabricadas pela companhia italiana Smart Projects, existem actualmente cerca de 11 versões diferentes do mesmo dispositivo, cada uma das quais com o seu tipo de microcontrolador e funcionalidades específicas. O Arduíno Duemilinue (Fig. 2.25) é comercializado no mercado com dois tipos de microcontrolador, o ATmega168 e o ATmega328. O preço de compra deste dispositivo ronda os 20 a 25 euros.

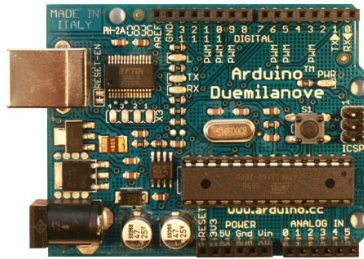


Fig. 2.25 - Arduíno Duemilanove [18].

Mas antes de se abordar outros temas é necessário discutir um pouco as diferenças entre um microprocessador e um microcontrolador. A compreensão dessas diferenças é importante para a compreensão das subsecções seguintes.

Um microprocessador é constituído por um circuito integrado capaz de efectuar instruções, sendo a sua velocidade de processamento determinada através do seu tempo de *clock*. O tempo de *clock* é normalmente descrito em função da frequência e não em função do tempo.

A capacidade de processamento de um determinado microprocessador é influenciada pelas suas características, isto é, pela sua arquitectura, o tipo de instruções que é capaz de efectuar, o número de *bits* que utiliza, etc. Outro parâmetro de grande importância no desempenho de um microprocessador é ainda a memória externa, onde são armazenados todos os programas que serão executados por este.

Ao contrário de um microprocessador, um microcontrolador é construído de forma a integrar todos os componentes externos num único circuito integrado, permitindo que este tenha constante acesso e controlo de todos os periféricos.

A figura seguinte apresenta o exemplo de um microcontrolador, explicitando todos os componentes que nele poderão ser inseridos.

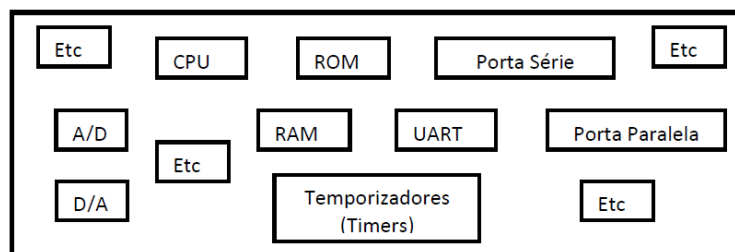


Fig. 2.26 - Exemplo de um microcontrolador e dos componentes que o constituem [18].

Através da análise da figura anterior torna-se óbvia a quantidade de componentes que podem constituir um microcontrolador, e a diferença em relação a um microprocessador.

A figura seguinte mostra o diagrama de blocos do microcontrolador ATmega328, sendo possível identificar todos os seus componentes.

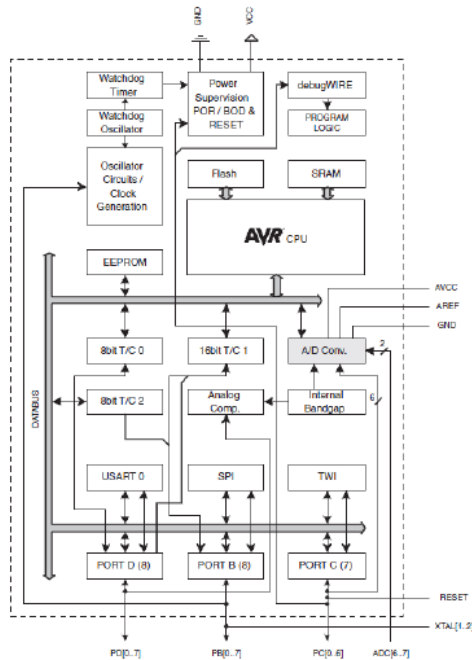


Fig. 2.27 - Diagrama de blocos do microcontrolador ATmega328 [18,19].

A análise pormenorizada deste microcontrolador não é necessária para a compreensão do seu funcionamento, e como tal não será um dos objectivos desta tese.

### 2.8.1.1 TIPOS E QUANTIDADES DE MEMÓRIA DISPONÍVEIS.

A grande diferença entre os vários modelos de Arduínos disponíveis no mercado reside na memória do microcontrolador uma vez que esta é uma das suas características mais importantes, e como tal determinante no seu desempenho [18]. A tabela seguinte ilustra os vários tipos de memória que possuem os microcontroladores dos Arduínos disponíveis actualmente no mercado.

Tabela 2.3 - Quantidade de memória disponível em cada modelo de microcontrolador.

	ATmega1280	ATmega328	ATmega168
<b>Flash</b>	128kBytes (4 kBytes Bootloader)	32kBytes (2 kbytes Bootloader)	16KBytes (2 kBytes Bootloader)
<b>SRAM</b>	8192 Bytes	2048 Bytes	1024 Bytes
<b>EEPROM</b>	4096 Bytes	1024 Bytes	512 Bytes

Através de uma breve análise da tabela anterior verifica-se claramente que o microcontrolador ATmega1280 é superior a nível de memória em relação aos outros modelos, sendo por isso utilizado na versão MEGA do Arduino.

Refira-se que a memória Flash é utilizada para o armazenamento do programa que é carregado no microcontrolador para ser executado, bem como para o armazenamento do *bootloader*, ao passo que a memória SRAM (*Static Random Access Memory*) funciona basicamente de forma idêntica à memória RAM (*Random Access Memory*) dos

computadores pessoais. Isto é, é nessa memória que os dados presentes na memória Flash são processados/modificados pelo microcontrolador. Note-se que tal como nos computadores pessoais, os dados contidos na memória SRAM são apagados sempre que é cortada a alimentação ao Arduino, ao contrário da informação que se encontra na memória EEPROM (*Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory*). A memória EEPROM é responsável pelo armazenamento de constantes (como por exemplo o número  $\pi$ ) que podem ser acedidas através do uso de bibliotecas próprias [18].

### 2.8.1.2 PINS DE I/O

Nesta subsecção serão descritas os vários tipos de entrada e de saída de sinais num Arduino Duemilanove. Tal descrição é fundamental pois descreve o tipo de sinais (analógicos e digitais) com que este pode trabalhar. A tabela seguinte mostra o resumo em termos de *pins* I/O disponíveis [18]:

*Tabela 2.4 - Número de Pins I/O disponíveis no Arduino Duemilanove..*

<i>Pins</i> de I/O digitais	14 (Sendo que 6 deles possuem PWM ( <i>Pulse Wide Modulation</i> ))
<i>Pins</i> de I analógicos	6
<i>Pins</i> de massa/ground (GND)	3
<i>Pins</i> de reset	1
<i>Pins Analog Reference</i> (AREF)	1
<i>Pins</i> de 3,3V	1
<i>Pins</i> de 5V	1

Importa referir que a corrente suportada por cada *pin* analógico ou digital é de apenas 40mA, à excepção da saída de tensão de 3,3V cuja corrente máxima pode ir até aos 50mA [18]. Nas subsecções seguintes serão abordados alguns temas relacionados com estas entradas

#### 2.8.1.2.1 MODULAÇÃO PWM

A modulação PWM (*Pulse Width Modulation*) é utilizada quando se pretende obter uma tensão analógica a partir de um sinal digital, isto é, através de um sinal que assume exclusivamente o estado lógico 1 (5V) ou 0 (0V). De forma a analisar-se o conceito de um sinal PWM, observe-se a seguinte equação [20]:

$$V_{dc} = \int_0^T V(t)dt \quad (2.52)$$

em que  $V_{dc}$  é a tensão média,  $V(t)$  representa a tensão em função do tempo, ao passo que  $T$  representa o período. Um sinal PWM pode ser representado através da seguinte expressão:

$$V(t) = \begin{cases} V_{pulso} & \Rightarrow 0 \leq t \leq t_p \\ 0 & \Rightarrow t_p < t \leq T \end{cases} \quad (2.53)$$

em que  $t_p$  representa a duração do impulso e  $V_{pulso}$  representa a tensão do impulso do sinal PWM. A figura seguinte mostra a representação de um impulso PWM.

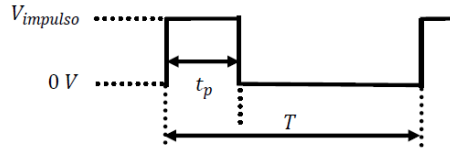


Fig. 2.28 - Representação de um impulso PWM.

Aplicando-se agora a equação (2.53) à equação (2.52), obtém-se a seguinte expressão:

$$V_{dc} = \left( \int_0^{t_p} V_{impulso} dt + \int_{t_p}^T 0 dt \right) \quad (2.54)$$

O que simplificando resulta em:

$$V_{dc} = \frac{t_p}{T} \times V_{impulso} \quad (2.55)$$

Através da análise da equação anterior verifica-se que a tensão média é directamente proporcional ao *duty cycle* do sinal PWM. Este facto permite que se possa variar a tensão média de saída, numa saída digital, entre os 0 e os 5V (Níveis de tensão utilizados pelo Arduino) [20].

#### 2.8.1.2.2 CONVERSÃO ANALÓGICA-DIGITAL (A/D)

Para se efectuar a conversão de um sinal analógico para um sinal digital deve-se utilizar um conversor A/D. O conversor A/D efectua 3 passos na conversão. São eles a amostragem, a quantificação e a codificação [21]. Os 3 passos descritos anteriormente estão representados na figura seguinte.

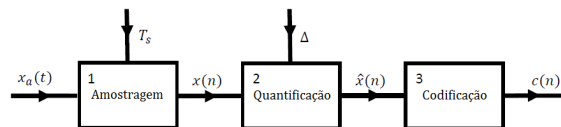


Fig. 2.29 - Passos efectuados por um conversor A/D.

No primeiro bloco é efectuada a amostragem do sinal analógico  $x_a(t)$ , sendo o resultado dessa operação um sinal discreto,  $x(n)$ , que não é mais do que uma sequência discreta criada a partir dos valores de  $x_a(t)$  medidos em intervalos de tempo constantes,  $T_s$ . A taxa de amostragem utilizada deve estar directamente relacionada com a frequência do sinal analógico de entrada, ou seja, e segundo o Teorema de Nyquist, a

frequência de amostragem,  $f_a$ , tem de ser pelo menos duas vezes maior que a frequência do sinal a amostrar [21]. Se essa relação for respeitada, o sinal original poderá ser integralmente recuperado.

Após a amostragem do sinal analógico de entrada, é necessário quantificar os valores de amplitude obtidos segundo os valores possíveis de amplitude, também eles discretos. Os valores de amplitude estão divididos em intervalos, determinados em função do número de *bits* e da tensão de referência utilizados na conversão. Note-se que quanto maior o número de *bits* maior precisão se irá obter em relação ao valor real.

A terceira e última fase do processo de conversão digital é a fase em que é atribuída a respectiva sequência binária para cada valor amostrado e quantificado.

Uma vez que o Arduino Duemilanove tem a capacidade de converter os sinais analógicos, recebidos através de 6 *pins*, para digitais, torna-se necessário que se fale um pouco sobre como essa conversão é efectuada. Refira-se que o conversor A/D do Arduino Duemilanove é um conversor de 10 *bits*, pelo que existirão  $2^{10}=1024$  níveis de tensão [18].

Tendo em conta que o nível de referência do referido conversor A/D é 5V, resulta uma resolução de  $5/1024 \approx 5\text{mV}$  para as medições analógicas. O valor da resolução irá determinar o valor mínimo de tensão que pode ser detectado pelo Arduino, ou seja, um Arduino só conseguirá detectar variações de tensão superiores a 5mV.

Para situações em que seja necessária uma resolução menor, pode-se recorrer ao *pin* de entrada designado de *Analog Reference* ( $A_{REF}$ ). Este *pin* de entrada do Arduino Duemilanove permite mudar a referência analógica do valor standard de 5V. Isto é, e tomando como exemplo um sinal de 2V colocado na entrada  $A_{REF}$ , obtém-se uma resolução de 2mV, mas ficando naturalmente a gama de medições limitada a 2V.

## 2.8.2 SOFTWARE

Nesta secção será feita uma pequena descrição de como instalar e utilizar o software de desenvolvimento do Arduino. Chama-se a atenção para o facto que a leitura deste tópico não dispensa a consulta do site do fornecedor, que se encontra na bibliografia desta tese [18], uma vez que o software está constantemente a ser actualizado.

A última versão do programa estará sempre disponível no site, na página de download. A versão mais recente aquando da elaboração desta tese de Mestrado era a versão 19.

### 2.8.2.1 INSTALAÇÃO E UTILIZAÇÃO

Após ter sido efectuado o *download* da plataforma de desenvolvimento do Arduino o passo seguinte consiste em instalar os *drivers* FTDI da placa, de modo a que seja possível a conversão USB para porta série. Para tal, devem-se utilizar os *drivers* que se encontram na pasta que se descarregou anteriormente ou então fazer *download* dos *drivers* mais actualizados do site da FTDI [22], sendo esta última opção a mais aconselhável [18].

Em seguida, deve-se configurar a porta série a ser utilizada, bem como o modelo de Arduino que se pretende utilizar. Para se efectuar esta configuração deve-se aceder ao separador *Tools* da plataforma de desenvolvimento

Finalmente o utilizador do Arduino poderá escrever o seu programa, também denominado de *Sketch*, compilá-lo e, caso não existam erros, carrega-lo para o Arduino. Para carregar o programa no Arduino o utilizador deverá carregar no botão de acesso rápido cuja descrição é *upload*.

#### 2.8.2.2 PROCESSO DE CRIAÇÃO DE UM PROGRAMA NO ARDUÍNO

O processo de criação de um programa no ambiente de desenvolvimento de software do Arduino obedece a determinadas regras. Os passos a seguir para a construção de um programa, bem como algumas das regras que devem ser seguidas para o bom funcionamento de um programa, são as seguintes [17]:

- A. Em primeiro lugar devem ser declaradas as variáveis globais a serem utilizadas ao longo de todo o programa. Note-se que embora seja possível declarar variáveis ao longo de cada ciclo do programa, estas não poderão ser acedidas por ciclos externos ao ciclo onde estas se encontram. Desse modo, é aconselhável a declaração das variáveis globais que irão ser utilizadas por todos os ciclos no princípio do programa. Normalmente, e se for criada uma aplicação que receba dados através de qualquer um dos terminais do Arduino (analógico ou digital), é no princípio do programa que são declaradas as portas que irão ser utilizadas.
- B. Logo após a declaração das variáveis globais é necessário informar quais as portas de entrada e/ou saída. Este passo é efectuado dentro de um ciclo de configuração que é obrigatoriamente incluído em qualquer aplicação do Arduino, mesmo que este não possua nenhuma informação lá dentro. O ciclo referido anteriormente é o ciclo de *setup*. Neste ciclo, é também configurada e inicializada a comunicação para o exterior das informações tratadas na aplicação do Arduino, como por exemplo através da comunicação por porta série.
- C. De seguida é criada toda a aplicação dentro de um outro ciclo que irá correr constantemente até que a aplicação do Arduino seja terminada. Esse ciclo, chamado de *loop*, é o ciclo que normalmente contém a maior parte das linhas de código pois é aí que são colocadas as instruções/funções que se pretendem criar. É também neste ciclo que podem ser introduzidos interruptores (chamadas para outros ciclos quando um determinado acontecimento ocorre), muito embora seja aconselhável a sua introdução no ciclo de *setup*, referido anteriormente. Note-se que com o Arduino Duemilanove, utilizado nesta tese de Mestrado, apenas é possível configurar dois interruptores em cada aplicação, sendo que as portas utilizados para accionar esses mesmos interruptores são as portas digitais 2 e 3.
- D. Por fim, podem-se declarar outros ciclos, de apoio ao ciclo *loop* principal, como por exemplo funções que são chamadas sempre que um determinado interruptor é activado.

Como foi possível verificar através da explicação dada sobre o processo de criação de um programa no Arduino, a estrutura utilizada é muito idêntica à da linguagem C. De facto, a linguagem utilizada para programar o Arduino é uma versão da linguagem C, sendo utilizadas algumas funções já previamente programadas na memória do Arduino, de forma a facilitar a criação de programas adaptados ao próprio microcontrolador, muito embora a restante sintaxe utilizada seja a mesma da programação em C.

### 2.8.3 AQUISIÇÃO DE SINAL – CONVERSÃO A/D

Como já referido na secção 2.8.1.2.2, o microcontrolador do Arduino Duemilanove possui um conversor A/D de 10 *bits*. Tendo em conta que as entradas analógicas do Arduino possuem valores de tensão que variam entre os 0 V e os 5 V, a correspondência binária para esses valores será entre o 0000000000 e o 1111111111. Dessa forma, e tal como foi referido na subsecção 2.8.1.2.2, ter-se-á uma resolução na ordem dos 5mV, o que implica que variações de tensão inferiores a esse valor não serão distinguidas pelo conversor [19].

Refira-se que o Arduino Duemilanove na conversão da primeira amostra que lê demora 25 ciclos de *clock* ao passo que para as restantes conversões demora apenas 13 ciclos de *clock*. Tal diferença deve-se à inicialização do conversor A/D. Como tal, e ignorando-se a conversão inicial, pode-se determinar o número de amostras que este efectua por segundo, ou seja, a sua taxa de amostragem. Para isso considere-se, por exemplo, um *clock* do sistema de 1MHz. Nesse caso o tempo de amostragem será [18]:

$$T_{amostragem} = \frac{10^6}{13} \cong 77000 \text{ amostras/segundo} \quad (2.56)$$

Analisando-se agora a taxa de amostragem obtida em função do teorema de Nyquist referido anteriormente, chega-se facilmente à conclusão de que a frequência máxima do sinal analógico que se pode colocar à entrada do Arduino, se este possuir um *clock* do sistema de 1 MHz, não deverá ser superior a 38,5kHz.

Refira-se que o Arduino Duemilanove possui um *clock* de sistema de 16MHz, muito embora não seja esse o *clock* utilizado no seu conversor. O *clock* usado no conversor A/D é apenas uma fracção do *clock* do sistema, uma vez que este é dividido por um factor de divisão também denominado de *Prescale*. É possível configurar o valor do *Prescale*, fazendo variar os *bits* ADPS0, ADPS1 e ADPS2. Estes *bits* fazem parte do registo ADCSRA presente na memória EEPROM do Arduino. O registo ADCSRA é constituído da seguinte forma [18,23]:

Tabela 2.5 – Registo ADCSRA [18].

<i>Bit</i>	7	6	5	4	3	2	1	0
(0x7A)	ADEN	ADSC	ADATE	ADIF	ADIE	ADPS2	ADPS1	ADPS0
<b>Read/Write</b>	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W
<b>Valor Inicial</b>	0	0	0	0	0	0	0	0

Existem várias combinações possíveis dos *bits* referidos anteriormente. Cada combinação altera o factor de divisão ou seja, o valor de *Prescale*. Uma vez que o valor do *clock* de entrada do conversor A/D é directamente dependente do valor do factor de

divisão, pode-se relacioná-los com o valor do *clock* de sistema através da equação seguinte [18,23]:

$$f_{\text{clock conversor A/D}} = \frac{f_{\text{Clock de sistema}}(16 \text{ MHz})}{\text{factor de divisão (Prescaler)}} \quad (2.57)$$

A tabela seguinte resume as combinações possíveis dos *bits* anteriormente referidos bem como o correspondente factor de divisão e *clock* do conversor A/D [18].

*Tabela 2.6 - Conteúdo do Registo ADCSRA.*

ADPS2	ADPS1	ADPS0	Factor de divisão	Clock do ADC (MHz)
0	0	0	2	8
0	0	1	2	8
0	1	0	4	4
0	1	1	8	2
1	0	0	16	1
1	0	1	32	0,5
1	1	0	64	0,25
1	1	1	128	0,125

Através da análise da tabela anterior, pode-se facilmente chegar à conclusão de que quanto menor for o factor de multiplicação maior será a frequência do sinal de *clock* do conversor A/D. Por exemplo e sabendo-se que o Arduino Duemilanove efectua 13 ciclos de *clock* para cada conversão digital, e sabendo-se também que este vem por definição com um factor de divisão de 128, torna-se fácil perceber que a frequência do sinal do conversor A/D é de 9,6kHz. Há que ter no entanto atenção para o facto de que estes são apenas valores teóricos e como tal podem não se verificar na prática.

## 2.9 Fibra óptica dopada

As fibras ópticas revolucionaram as comunicações desde a sua invenção nos anos 60 do século passado. Na década de 80 verificou-se uma nova evolução significativa, com o aparecimento dos amplificadores em fibra óptica dopada com terras raras.

Neste trabalho de Mestrado não se pretende estudar a fundo esta questão, mas apenas utilizar o sistema de medição desenvolvido para a medição do tempo de vida da luminescência de uma fibra dopada com Érbio, pelo que de seguida se fará uma breve introdução ao tema.

### 2.9.1 VIDROS DOPADOS COM TERRAS RARAS

Divididos em 2 grandes grupos com, 14 elementos cada, as terras raras estão agrupadas segundo o número atómico dos seus elementos. Com números atómicos entre 57 e 71 encontram-se os lantanídeos, ao passo que entre 89 e 103 encontram-se os actinídeos. Muito embora tenham em comum grande parte das suas propriedades, o grupo dos lantanídeos é mais utilizado em aplicações ópticas, uma vez que a sua estrutura atómica é mais indicada para este tipo de aplicações [24].

Desde há vários anos que o vidro usado nas fibras ópticas tem sido dopado com terras-raras, sendo os mais estudados e utilizados os vidros dopados com Érbio (Er), Túlio (Tm), Neodímio (Nd) e Itérbio (Yb). A utilização de dopantes no vidro é uma tentativa de desenvolver características especiais nas fibras ópticas, baseando-se o seu funcionamento em processos de absorção e emissão estimulada e espontânea da luz [25]. A principal razão para a utilização dos elementos acima referidos é o facto deles emitirem luz, nas faixas de frequência utilizadas nas comunicações ópticas, quando excitados por lasers de bombagem [25]. As aplicações mais comuns que utilizam fibras dopadas são sem dúvida os amplificadores ópticos com fibra dopada com Érbio.

A figura seguinte (Fig. 2.30) ilustra a posição espectral dos dopantes mais utilizados na amplificação de sinais ópticos, bem como a sua posição na curva do coeficiente de atenuação da fibra óptica. Podemos também observar as várias bandas de transmissão utilizadas nas telecomunicações [26].

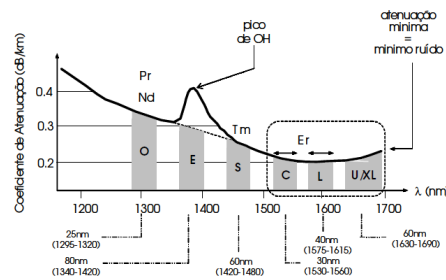


Fig. 2.30 - Bandas de transmissão e de amplificação utilizadas pelos amplificadores de fibra óptica.

Na próxima subsecção são apresentadas com maior pormenor as fibras ópticas dopadas com Érbio.

### 2.9.2 FIBRAS DOPADAS COM ÉRBIO

O Érbio é um elemento pertencente ao grupo dos lantanídeos que possui bandas de absorção espectral na zona do ultravioleta até ao infravermelho. A figura seguinte (Fig. 2.31) ilustra o diagrama de níveis de energia do Érbio, quando colocado numa matriz de sílica [25].

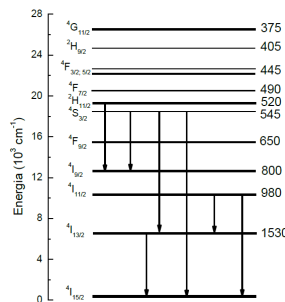


Fig. 2.31 - Diagrama dos níveis de energia do Érbio [25].

Note-se que à direita de cada nível de energia do Érbio se encontra o comprimento de onda (em nanômetros) de emissão desde esse nível até ao seu estado fundamental.

Como se pode verificar, a transição do nível  $^4I_{13/2}$  para o nível  $^4I_{15/2}$  emite a 1550nm, ou seja, exactamente na chamada 3ª janela das telecomunicações. Refira-se que o nível  $^4I_{13/2}$  é um nível meta-estável, ou seja, os átomos podem permanecer nesse nível durante algum tempo, antes de decaírem espontaneamente para o nível fundamental. O tempo de vida desse nível é da ordem dos 8ms [25,27].



## 3. Procedimento

---

Neste capítulo pretende-se apresentar todas as etapas de desenvolvimento prático desta tese, bem como o modo como foram ultrapassados os problemas, à medida que estes foram surgindo.

No princípio deste capítulo será feita uma pequena referência ao modo como foi testada a taxa de amostragem do Arduino Duemilanove, pois só assim seria possível conhecer-se complementemente o potencial desta plataforma de desenvolvimento.

Na secção seguinte irá ser estudado o modo de funcionamento de um defleómetro digital bem como a forma como funcionam as suas entradas e saídas de sinal, uma vez que foi também um dos objectivos desta tese a demonstração da versatilidade da aquisição de qualquer tipo de dados (neste caso em particular dados digitais) através de um Arduino. Uma vez que os defleómetros existentes apresentavam muito pouca informação sobre o seu funcionamento, é feita neste capítulo uma pequena introdução ao seu modo de funcionamento, nomeadamente em relação ao modo de transmissão das medições efectuadas. Refira-se que os defleómetros digitais utilizados foram os que se encontravam disponíveis nos laboratórios de Eng. Civil da Uma, não sendo portanto possível escolher-se outro modelo, com maior ou menor desempenho e custo.

Serão também descritos neste capítulo todos os passos efectuados no desenvolvimento do protótipo do sistema de medição, bem como as dificuldades e soluções encontradas no processo de criação de todo o sistema.

Uma vez que foram utilizados dois ambientes de programação, e que foi criado um circuito electrónico adequado a cada aplicação, os seguintes subcapítulos serão divididos em três secções distintas. São elas a criação do circuito electrónico, a programação em texto no Arduino e a programação em ambiente gráfico no LabVIEW.

Por fim, deve-se mencionar que o código desenvolvido neste trabalho, bem como o esquema do circuito criado para esta tese, se encontram nos anexos, sendo que neste capítulo apenas se far-se-á uma alusão ao modo como foram desenvolvidos. A explicação e o procedimento utilizado na criação dos programas, bem como do circuito impresso, serão feitos através de pequenos fluxogramas, que irão explicar os passos mais importantes.

### 3.1 Taxa de amostragem real de um Arduino Duemilanove

---

Tal como já foi abordado na secção 2.8.3, a taxa de conversão A/D do Arduino Duemilanove depende de vários factores, pelo que foi testada na prática a sua taxa máxima de amostragem, de forma a delinear limites, no que diz respeito à frequência máxima dos sinais analógicos que poderiam ser lidos.

Note-se que para se obter uma boa estimativa do valor da taxa de amostragem é necessário efectuar-se a média de algumas centenas de valores de intervalos de tempo de leitura. Para esse efeito foi criada uma rotina, no ambiente de desenvolvimento do Arduíno, que se encontra no anexo 6.1. Essa rotina é então capaz de alterar o valor do registo ADCSRA e de testar o tempo que leva o Arduíno Duemilanove a efectuar 1000 leituras de um sinal analógico, e a convertê-las em formato digital.

Desta forma foi então possível, alterando-se o valor do registo ADCSRA, chegar-se à taxa de amostragem do Arduíno Duemilanove, para diferentes valores de *prescale*.

## 3.2 Deflectómetros digitais

---

Um deflectómetro digital não é mais do que um pequeno aparelho que mede as variações do deslocamento da ponta metálica que nele está embutida, na direcção de um só eixo. Operando segundo o princípio teórico descrito pela secção 2.5.3, este pequeno e versátil aparelho pode ser colocado numa qualquer estrutura de forma a medir as variações/deflexões sofridas por esta, fazendo uso de um simples transdutor magnético. Desta forma, este tipo de equipamento torna-se um aliado importante no campo do estudo das estruturas, em particular no campo da Engenharia Civil, uma vez que permite medir com precisão e rigor variações que poderia não ser perceptíveis aos seres Humanos.

Nesta secção, serão em primeiro lugar apresentados os passos efectuados no laboratório, de forma a perceber-se como é que os deflectómetros digitais disponíveis funcionam, ou seja, como se processa o envio de informações através dos cabos de transferência de dados que vieram incluídos aquando da sua aquisição pela Universidade da Madeira.

Na segunda parte desta secção, será explicado o processo de desenvolvimento do programa no ambiente de desenvolvimento do Arduíno, enquanto na terceira parte irá ser explicado o processo de tratamento dos dados, efectuado no LabVIEW, de forma a reconstruir a informação transmitida pelos deflectómetros.

Por fim, e na quarta parte desta secção, serão descritos alguns dos testes efectuados com este sistema, bem como o circuito impresso criado para a ligação dos equipamentos, e aquisição dos dados enviados pelos deflectómetros.

### 3.2.1 INTRODUÇÃO E MODO DE FUNCIONAMENTO

A Fig. 3.1 mostra os dois deflectómetros digitais ID-5 da Mitutoyo utilizados no desenvolvimento desta tese [28]. Embora tenham um aspecto um pouco diferente um do outro, o seu modo de funcionamento e características técnicas (resolução, precisão, etc.) são exactamente iguais.



Fig. 3.1 - Deflectômetros digitais utilizados nesta tese.

Estes deflectômetros possuem um *display* digital de 6 dígitos, com a possibilidade de escolha entre duas unidades de medida, ou seja, é possível visualizar-se o valor das deflexões em milímetros ou em polegadas, sendo que a escolha da unidade de medida a utilizar é realizada através do pressionar de um botão.

Alimentados através de uma pilha, estes deflectômetros digitais possuem uma enorme vantagem em relação dos seus semelhantes analógicos, uma vez que apresentam os resultados das medições com maior comodidade (formato digital) e com uma resolução que pode ir até os 0,01 milímetros ou 0,0005 polegadas [29].

A capacidade de transmissão dos dados medidos em formato digital é outra das vantagens que estes possuem. A figura seguinte ilustra o cabo que é ligado ao deflectómetro digital, bem como o terminal que este utiliza para conectar a um instrumento de leitura.

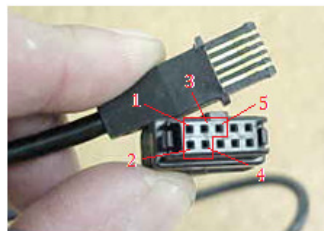


Fig. 3.2 - Cabo e conector dos deflectômetros digitais [28].

Como se pode observar na figura anterior, o terminal do cabo de ligação do deflectómetro possui 10 terminais, sendo que apenas 5 deles servem para a transmissão ou recepção de dados. A função de cada terminal de I/O pode ser observada na tabela seguinte:

Tabela 3.1 - Conectores dos deflectômetros digitais ID-5 da Mitutoyo [29].

Terminal	Tipo de sinal	I/O
1	GND	-
2	DATA	O
3	CLOCK	O
4	N.C. (no connection)	-
5	Request	I

Como se pode verificar na tabela anterior, estes defletores digitais possuem duas saídas e uma entrada, sendo que apenas com a configuração correcta dos terminais é que é possível obter os dados enviados pelos defletores. Um dos parâmetros de configuração mais importantes a ter em conta é o tipo de sinal a ser colocado no terminal de *Request*, uma vez que este terminal é o responsável pela inicialização da transmissão do sinal de *clock* e dos dados do defletor. Segundo a descrição que é fornecida no site do fabricante, esta entrada funciona com o valor lógico negado, ou seja, para que o *Request* fique activo é necessário conectá-lo à massa (GND) do Arduino, que deverá ser a mesma do defletor. Quando isso ocorre o defletor começa a transmissão do sinal de *clock* e dos dados. Uma vez que os terminais 1 e 4 do defletor não necessitam de estar conectados (Tabela 3.1), estes foram colocados em circuito aberto.

Uma vez percebido o funcionamento dos terminais dos defletores digitais, e tendo em conta que estes serão directamente conectados às entradas digitais do Arduino, há que ter especial atenção ao valor de tensão medido à saída dos defletores, pois será esse o valor de tensão que irá determinar o valor lógico do *bit* a medir/ler, tanto para as entradas de dados como para as entradas de *clock*.

Uma vez que se está a trabalhar com dois instrumentos digitais, que operam com valores de tensão diferentes (os defletores digitais são alimentados por pilhas de 1,5V), há que garantir que a interface entre estes dois dispositivos seja capaz de traduzir as diferenças de tensão (*bit* 0 ou 1) do defletor para o Arduino. Assim, e de forma a garantir que num estado *high* (valor lógico 1) o valor de tensão medido numa das portas digitais no Arduino seja superior ao nível de decisão (para poder ser lido o *bit* como sendo 1), recorreu-se a uma técnica extremamente simples, mas de grande utilidade, denominada de resistência de *pull up*. A figura seguinte (Fig. 3.3) ilustra a configuração utilizada para garantir que uma vez enviado o *bit* 1 pelo defletor, o valor de tensão medido na porta lógica do Arduino seja aproximadamente igual a 5V (valor de tensão que traduz a recepção de um *bit* 1 no Arduino), ou seja, igual ao valor de tensão da fonte de tensão do Arduino que alimenta o circuito *pull up*.

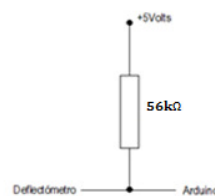


Fig. 3.3 - Configuração *pull up*.

Como se pode verificar através da figura anterior, no caso de o defletor transmitir o *bit* 0, o valor de tensão medido pelo Arduino será igual a 0V, o que significa que o valor recebido será o *bit* 0. No caso de o defletor transmitir o valor lógico 1, a tensão enviada por este será “puxada” (*pull up*) para 5V, o que faz com que o Arduino interprete esse valor de tensão como o envio de um *bit* 1. A resistência a colocar entre o Arduino/Defletor e a fonte de tensão foi escolhida de acordo com testes práticos.

Uma vez ultrapassada a questão dos diferentes níveis de tensão do Arduino e dos deflectómetros digitais, pôde-se visualizar o sinal recebido nos terminais 2 e 3 do deflectómetro digital, quando estes estavam ligados directamente aos canais 1 e 2 de um osciloscópio:

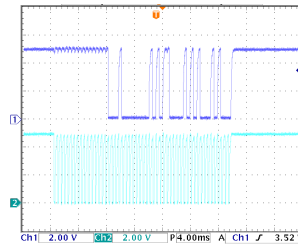


Fig. 3.4 - Sequência de dados e de clock de um deflectómetro digital, vista num osciloscópio.

Como se pode observar na figura anterior, as escalas de ambos os canais do osciloscópio são iguais, sendo o valor das mesmas, em relação à amplitude de 2V/divisão e em relação ao tempo de 4ms/divisão.

Como se pode verificar através da Fig. 3.4, o *stream* de *bits* enviados pelo terminal 2 (DATA), segue um padrão de 52 *bits*, sendo que os primeiros 16 *bits* estão sempre no valor *high*, ou seja, apresentam o valor lógico 1. Os restantes elementos do *stream* de 52 *bits* contêm os valores da medição, ou seja, contêm a informação que se encontra no *display* digital do deflectómetro. De acordo com a informação fornecida pelo fabricante, esse padrão segue o esquema da figura seguinte [29]:

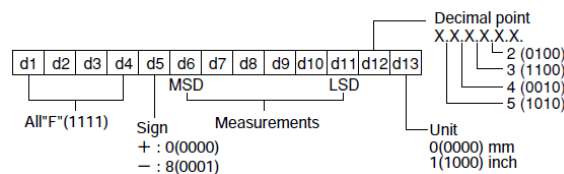


Fig. 3.5 - Padrão da sequência de bits.

Como se pode verificar, o *stream* de *bits* enviado pelo deflectómetro digital possui 52 *bits* divididos em 13 conjuntos de 4 *bits*, podendo cada conjunto possuir uma gama de valores em formato digital de 0 a 15. Tal como foi referido anteriormente, os 16 *bits* iniciais de cada medição estão sempre no estado lógico 1. Tal configuração serve de cabeçalho a cada medição, uma vez que separa cada medição enviada pelo deflectómetro.

Pode-se também visualizar no esquema da figura anterior algumas das informações anteriormente referidas, nomeadamente que o *display* do deflectómetro possui 6 dígitos (do D6 ao D11), sendo também possível visualizar-se o sinal da medição (D5), e a unidade de medida utilizada (D13). Outra informação que pode ser retirada da figura anterior é a da posição do ponto decimal na medição, que é definida pelo conjunto de *bits* denominado de D12. Note-se que a ordem individual de cada conjunto de *bits* está invertida, ou seja, quando é suposto aparecer na *stream* de *bits* o valor 0001, que

supostamente corresponde ao valor decimal 1, aparece na *stream* de *bits* o valor 1000. Esta característica do envio da informação pelo deflectómetro será discutida nas secções seguintes, ou seja, no desenvolvimento do programa de tratamento de dados no LabVIEW.

Como se pode observar na Fig. 3.5, o conjunto D5, responsável pela definição do sinal da medição, apresenta dois valores possíveis, o valor 0000 que corresponde ao valor zero em formato decimal e o valor 0001, que invertido (1000), corresponde ao valor 8 em formato decimal. O conjunto responsável pela definição da unidade de medida a ser utilizada apresenta também dois valores possíveis, sendo neste caso o valor de 0 (para o caso dos milímetros) e 1 (para o caso das polegadas).

### 3.2.2 ARDUÍNO

Uma vez compreendido o funcionamento da transmissão de dados por parte do deflectómetros digitais, foi necessário desenvolver o programa no Arduino, responsável pela leitura dos *streams* de dados enviados pelos dois deflectómetros ao mesmo tempo.

Como foi explicado anteriormente, ao Arduino foram ligados dois sinais digitais de cada um dos dois deflectómetros. Eram eles, o sinal de *clock* (que servirá para sincronizar as leituras) e o sinal de dados (que continha o *stream* de 52 *bits* de cada medição).

Uma vez que foi tomada a decisão de ligar constantemente o sinal de *Request* (terminal 5 dos cabos dos deflectómetros) de cada um dos deflectómetros, ou seja, esses terminais foram ligados permanentemente à massa (GND) do Arduino, os deflectómetros estavam constantemente a enviar dados, sendo que estes iam mudando de valor à medida que as medições se iam alterando.

Dessa forma, no desenvolvimento do programa no ambiente Arduino, foi tido em consideração que era necessário desenvolver um ciclo de leitura durante um determinado período de tempo, para cada um dos deflectómetros. A determinação do valor do período de tempo durante o qual o Arduino lê os dados de cada um dos deflectómetros foi efectuada tendo em conta o valor do período do sinal de *clock* dos deflectómetros. A figura seguinte ilustra a única descrição do tempo de *bit* de cada dos sinais de saída do deflectómetro.

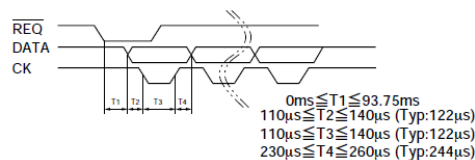


Fig. 3.6 - Descrição dos tempos do clock e da sequência de dados [29].

Através da análise da figura anterior pode-se concluir que o período de um *bit* de dados corresponde a duas variações do valor lógico do sinal de *clock*, ou seja, corresponda a dois bits de *clock*. Assim sendo, e tendo em conta o período de um *bit* de

dados, foi tomada a decisão de configurar o tempo de um ciclo de leitura, para cada um dos deflectómetros, como sendo de 150ms.

Refira-se que a decisão de configurar o tempo de cada ciclo de leitura para 150ms resultou da observação prática de que era necessário obter-se pelo menos duas medições inteiras de cada deflectómetro, de forma a simplificar o tratamento dos dados no LabVIEW, uma vez que os 16 bits com o valor lógico de 1 poderiam servir de delimitadores de cada medição.

A figura seguinte (Fig. 3.7) ilustra o diagrama de blocos do programa desenvolvido no ambiente de programação do Arduino, que mostra como todo o ciclo de leitura e envio de dados para o computador, via porta série, funciona. O código desenvolvido pode ser consultado no anexo 6.2.1.

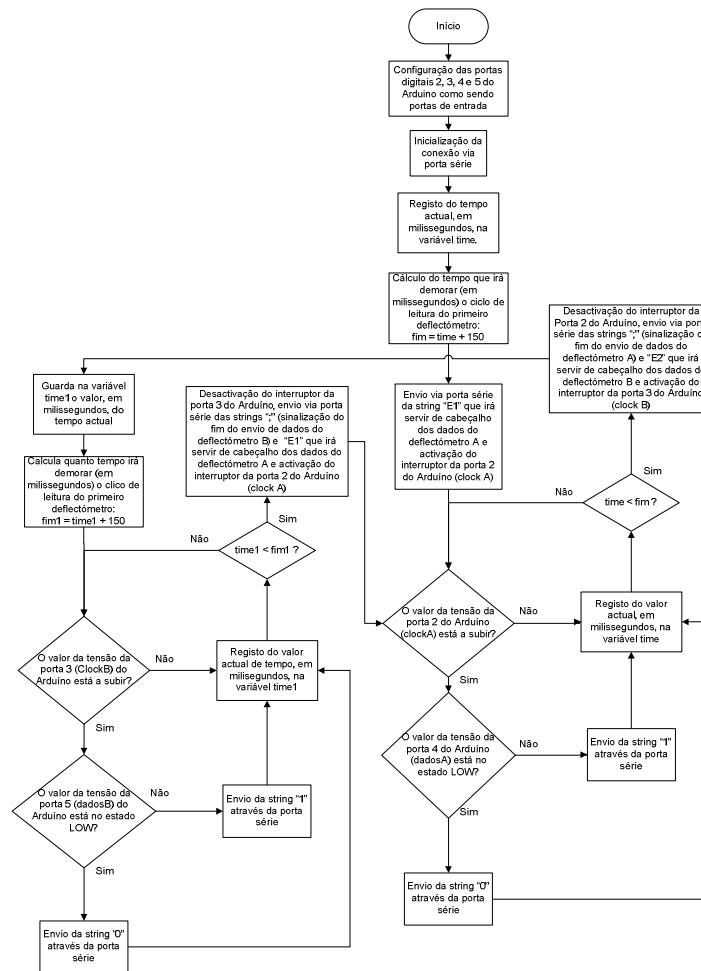


Fig. 3.7 - Diagrama de fluxos do código desenvolvido no software de programação do Arduino.

Como se pode observar através da figura anterior, logo após o início do programa, são declaradas as entradas digitais 2, 3, 4 e 5 do Arduino como sendo as saídas digitais dos deflectómetros. A tabela seguinte (Tabela 3.2) ilustra o significado de cada uma das entradas acima descritas.

*Tabela 3.2 - Descrição das entradas digitais do Arduino.*

<b>Entradas digitais do Arduino</b>	<b>Saídas dos deflectómetros</b>
<b>2</b>	ClockA
<b>3</b>	ClockB
<b>4</b>	DadosA
<b>5</b>	DadosB

Após a configuração das portas utilizadas no Arduino é necessária a inicialização da conexão via porta série, de forma a poder ser transmitida a informação para um computador (através de um cabo USB que é ligado ao Arduino). Neste passo é configurada a taxa de transmissão de dados para o computador, sendo que o valor colocado apenas influenciará o tamanho da informação que é colocada no *buffer* da porta série de cada vez.

Uma vez que a aplicação desenvolvida precisa apenas de uma simples conexão, que transmita apenas a quantidade de informação necessária à leitura de pelo menos duas medições de cada deflectómetro, utilizou-se um *baud rate* de 9600bits/s. Outros valores foram ensaiados, nomeadamente os valores de 19200, 38400 e 57600, todos eles aconselhados pelos fabricantes do Arduino, bem como pelo controlador das portas USB do computador utilizado. No entanto não se verificou nenhuma alteração no desempenho da aplicação, o que se pensa ficar-se a dever ao facto da aplicação em causa ser razoavelmente leve, e como tal não necessita de velocidades de transmissão superiores.

Continuando a analisar o fluxograma da Fig. 3.7, de seguida, e de forma a ser controlado o tempo de leitura de cada um dos sinais de dados colocados nas entradas do Arduino, era registado o valor inicial do tempo, em milissegundos, calculando-se depois o tempo final, acrescentando-se 150ms ao tempo inicial.

Depois, e de forma a distinguirem-se as medições pertencentes a cada um dos deflectómetros, era enviado, via porta série, um cabeçalho identificativo antes de se enviarem os dados propriamente ditos, sendo que no final da transmissão era enviada também uma *string* (“;”) que sinalizava o seu fim. Seguidamente era configurado um interruptor para a porta 2 do Arduino, que iria correr um ciclo de leitura e envio (via porta série) do valor lógico do sinal de dados (colocado na porta 3), se o valor da porta 2 estivesse a subir de intensidade. Ou seja, e tendo em conta que se estava a trabalhar com sinais digitais, se o sinal recebido na porta 2 (sinal de *clock* do Arduino A) passasse do valor lógico 0 para o 1 iria realizar-se a leitura da porta série 3 e esse *bit* seria enviado para a porta série. Como se pode observar através da Fig. 3.6, tal configuração do interruptor permite que o ciclo de leitura seja activado precisamente a meio da transmissão de um *bit* de dados do deflectómetro A, o que fornece à aplicação desenvolvida menor sensibilidade a erros de leitura.

Posteriormente ao envio do valor de cada *bit* de dados do deflectómetro A, o valor da variável *time* era actualizado sendo depois comparado com o valor do tempo final do ciclo de leitura. Se o valor do *time* fosse igual ou superior ao tempo de finalização o ciclo de leitura terminava e o interruptor do sinal de *clock* A era desligado. De seguida todo este processo repetia-se para o deflectómetro B, sendo sempre ligado o interruptor do sinal de *clock* de cada deflectómetro quando o seu ciclo de leitura começava.

Por fim resta apenas realçar um ponto, que embora possa passar despercebido, é uma peça fundamental no sucesso desta aplicação, o facto de apenas serem enviados dados se existir de facto sinal de *clock* e consequentemente sinal de dados. Tal configuração permite que falsas informações ou erros de processamento não sejam recebidos no computador, uma vez que apenas é transmitida informação se ela de facto existir.

### 3.2.3 LABVIEW

O tratamento de toda a informação enviada pelo Arduíno foi realizado no LabVIEW, sendo que o programa desenvolvido ia de encontro às configurações referidas na secção anterior. Esta secção, devido à sua extensão e à complexidade dos passos efectuados, estará dividida em 7 partes, sendo que cada parte representa um passo importante do programa final de recepção e tratamento de dados.

#### 3.2.3.1 APLICAÇÃO DE TRATAMENTO E REGISTO DE MEDIÇÕES EM TEMPO REAL

##### 3.2.3.1.1 AQUISIÇÃO

Uma vez que a informação enviada pelo Arduíno apenas contém a leitura dos terminais de dados do deflectómetro, torna-se necessário separar e agrupar a informação que chega ao computador, uma vez que a questão do sincronismo e da correcta leitura dos dados do deflectómetros foi já discutida e tratada nas secções anteriores (Secção 3.2.2).

Dessa forma e em primeiro lugar, é necessário configurar-se o LabVIEW para a leitura da porta série correcta, bem como dos parâmetros de leitura da mesma. O fluxograma da aplicação desenvolvida em ambiente gráfico LabVIEW encontra-se representado na figura seguinte (Fig. 3.8), enquanto o código se encontra na Fig. 6.1 do anexo 6.2.2.1.

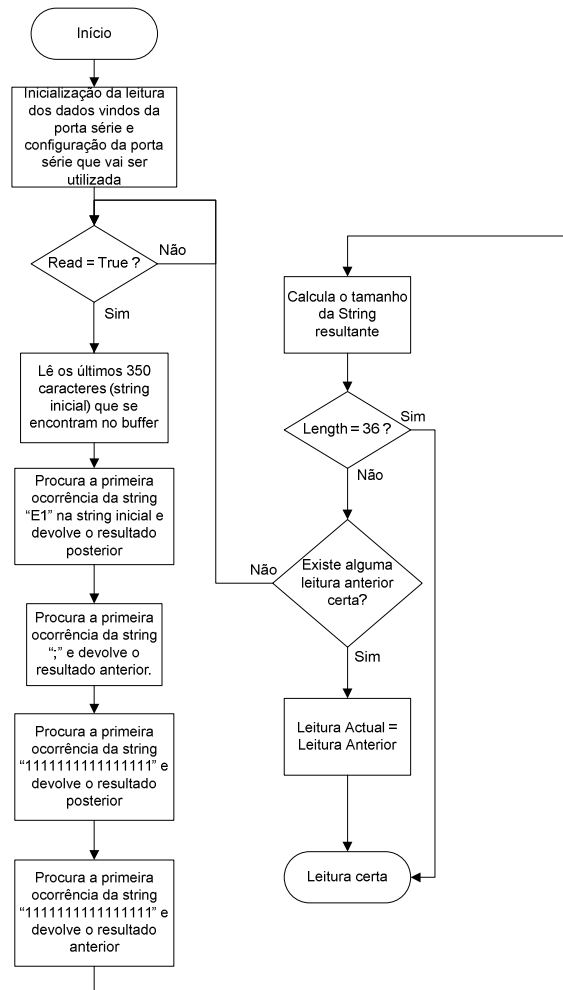


Fig. 3.8 - Fluxograma da aplicação de aquisição de dados do deflectómetro no LabVIEW.

Após a configuração da porta série utilizada pelo Arduino, e de forma a fornecer ao utilizador da aplicação algum nível de controlo, foi criado um interruptor no painel frontal da aplicação que inicializa o ciclo de leitura da informação. Para tal e no diagrama de blocos do LabVIEW, foi criado um ciclo *while* de forma a correr continuamente a leitura, após ser clicado o interruptor referido anteriormente, e até que este volte a ser pressionado.

Logo após ser inicializada a leitura o LabVIEW começa por ler os últimos 350 caracteres que se encontram no *buffer*, pois dessa forma é sempre garantido que serão lidas pelo menos duas medições de cada deflectómetro. O facto de serem lidos caracteres e não *bits* no *buffer* está directamente relacionado com o processo de envio de dados por parte do Arduino. Essa decisão foi tomada de forma a simplificar todo o processo de separação de cada conjunto de *bits* (ex: D2, D3, D4, etc.). Uma vez que a configuração do número de caracteres a ler no *buffer* apenas permite a leitura dos últimos caracteres que são enviados pela porta série, foi tomada a decisão de ler pelo menos 350 caracteres.



Foram testadas outras configurações mas sem sucesso, uma vez que o padrão de distorção do valor da medição era completamente aleatório. Este foi então um dos maiores problemas enfrentados no processo de transferência do valor medido por um deflectómetro para o computador, através de um Arduíno.

### 3.2.3.1.2 TRATAMENTO

Uma vez recebida uma medição correcta, era necessário submetê-la a um processo de separação e tratamento, de forma a simplificar todo o processo. De seguida serão demonstrados os passos efectuados para a correcta leitura de uma medição, utilizando-se como exemplo apenas um dos extensómetros, uma vez que o tratamento da medição dos dois deflectómetros é análogo.

A ordem pela qual irá ser explicado o processo de tratamento dos dados adquiridos não está relacionada com a ordem dos diversos conjuntos da *stream* inicial, uma vez que só assim é possível obter-se uma leitura correcta da *stream* de 36 *bits* enviado pelo Arduíno.

#### 3.2.3.1.2.1 DÍGITOS DA MEDIÇÃO

Em primeiro lugar e como a informação da medição está contida numa só *string* de 36 caracteres, é necessário separá-la em 9 conjuntos de 4 caracteres, para que a informação contida em cada conjunto seja analisada separadamente. Note-se que esta operação, em vez de ser efectuada de uma só vez, era efectuada separadamente e a cada conjunto de 4 *bits*.

Como foi referido nas secções anteriores (Secção 3.2.1), a informação contida em cada conjunto de 4 *bits* estava representada de forma inversa. Assim, e uma vez obtido cada conjunto de 4 caracteres, era necessário inverter a sua ordem, antes mesmo de se proceder à sua análise.

Após a inversão da ordem de cada conjunto de caracteres e de forma a analisar-se o seu conteúdo, foi necessário converter-se a informação binária, que estava descrita na *string* de 4 *bits* de cada conjunto, para formato decimal. Para tal o LabVIEW possui uma função/bloco que efectua essa mesma conversão de forma imediata.

Os 6 conjuntos de 4 caracteres que representam o valor absoluto da medição estão representados pelos conjuntos D6 (*MSD*), D7, D8, D9, D10 e D11 (*LSD*). A informação contida em cada conjunto era convertida separadamente para formato decimal e só depois junta, de forma a se obter uma *string* decimal com o valor que aparecia no *display* do deflectómetro. A figura seguinte (Fig. 3.10) mostra o diagrama de blocos do processo descrito anteriormente e adaptado somente à aquisição do dígito D6 (*MSD*) uma vez que o processo utilizado para os restantes dígitos é semelhante.

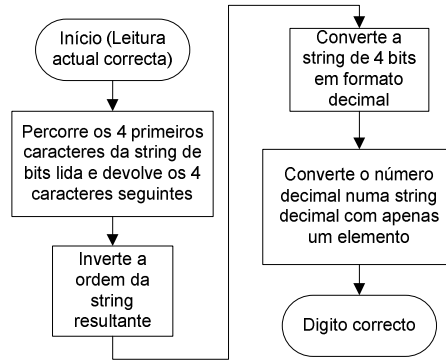


Fig. 3.10 - Fluxograma do processo de aquisição do valor do dígito D6 (MSD).

Este procedimento pode ser visualizado através dos códigos em LabVIEW representados pelas figuras do anexo 6.2.2.2.1. Note-se que cada uma das figuras descritas anteriormente corresponde ao processo de aquisição de cada dígito do *display* do deflectómetro digital.

### 3.2.3.1.2.2 COLOCAÇÃO DA CASA DECIMAL

De seguida tratou-se da *string* D12 que representa a posição onde está colocada a casa decimal. Uma vez determinado valor decimal representado pela *string* de *bits* do conjunto D12, resta apenas dividir a *string* que contém o conjunto de números decimais do *display* determinada anteriormente, no ponto que representa o número decimal D12. Para facilitar a compreensão de como este processo se desenrolava, observe-se a figura seguinte (Fig. 3.11).

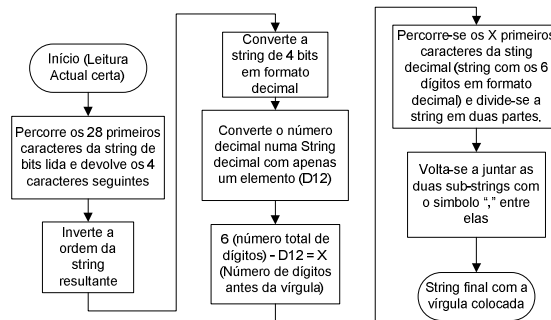


Fig. 3.11 - Fluxograma do processo de aquisição do valor do dígito D12 (casa decimal) e colocação da vírgula na medição.

O código em LabVIEW do processo de aquisição do valor da casa decimal e do tratamento da medição encontra-se representado pela Fig. 6.8 do anexo 6.2.2.2.2.

### 3.2.3.1.2.3 OBTENÇÃO DO SINAL DA MEDIÇÃO

O primeiro conjunto de 4 bits (D5 da Fig. 3.5) da *string* de 36 caracteres determina o sinal da medição, ou seja, se está a receber uma medição positiva ou negativa. Dessa forma, se o seu valor for igual a 0, significa que a medição é positiva ao passo que se o valor de D5 for igual a 8, a medição será negativa. Assim, se o valor fosse negativo, era acrescentado o sinal de menos (“-“) à medição. A figura seguinte (Fig. 3.12) ilustra todo o processo descrito anteriormente.

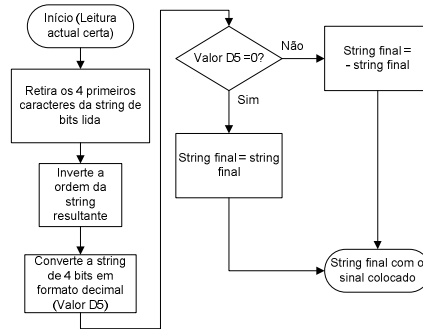


Fig. 3.12 - Fluxograma do processo de aquisição do valor do dígito D5 (Sinal) e colocação do sinal antes da medição.

O procedimento representado pelo diagrama de fluxos da figura anterior representa a programação efectuada em LabVIEW para a aquisição do valor do sinal da medição, e que pode ser consultada através da Fig. 6.9 que se encontra no anexo 6.2.2.2.3.

### 3.2.3.1.2.4 UNIDADE DE MEDIDA

Finalmente, restava apenas a determinação do valor do conjunto D13 (último conjunto da *stream* de 36 bits). A figura seguinte (Fig. 3.13) mostra o processo de aquisição e tratamento da unidade de medida utilizada pelo deflectómetro digital.

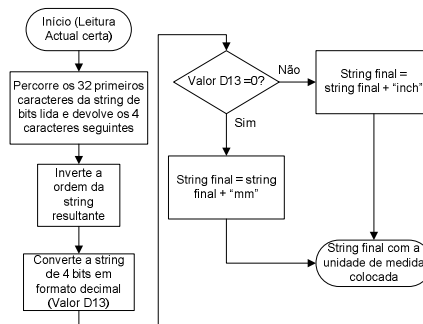


Fig. 3.13 - Fluxograma do processo de aquisição do valor da unidade de medida (D13) e colocação da unidade de medida depois da medição.

O código desenvolvido em LabVIEW que efectua o procedimento descrito pelo fluxograma da figura anterior está representado pela Fig. 6.10 que se encontra no anexo 6.2.2.2.4.

### 3.2.3.1.3 GRAVAÇÃO

Por fim foi também criada na aplicação do LabVIEW, uma opção que permitia a gravação do valor da medição num ficheiro com a extensão “.xls” (Excel) no disco rígido do computador. Ao valor de cada medição era acrescentado o registo do tempo em milissegundos em que a medição foi efectuada, para que o utilizador final da aplicação possa efectuar um estudo temporal dos valores medidos pelo extensómetro, sem que esteja presente durante as medições. Finalmente, e pensando-se na visualização em tempo real dos valores obtidos, foi criada uma representação gráfica dos valores medidos pelos deflectómetros. Assim, um utilizador pode utilizar o sistema para visualizar em tempo real as variações medidas pelos dois deflectómetros ao mesmo tempo, e também registar os valores medidos para serem estudados posteriormente.

Em termos de programação o diagrama representado na figura seguinte (Fig. 3.14) mostra o procedimento por detrás da gravação de cada medição.

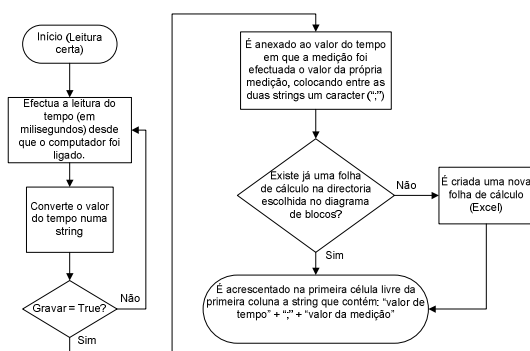


Fig. 3.14 - Processo de gravação de uma medição.

Duas notas importantes devem ser retiradas da análise da figura anterior. Em primeiro lugar deve-se ter sempre em atenção que, se entre dois ensaios não forem alteradas as directorias dos ficheiros de gravação, ou mais simplesmente retirado o ficheiro da primeira sessão de gravação de dados da directoria inicial antes do inicio da gravação da segunda, os dados da segunda sessão serão acrescentados ao ficheiro da primeira sessão.

Outra nota é de que no final, deve ser também colocada a extensão do ficheiro, ou seja, devem ser acrescentadas as letras “.xls” no final do nome do ficheiro.

O programa desenvolvido no LabVIEW pode ser consultado na Fig. 6.19 que se encontra no anexo 6.4.4.4 desta tese de Mestrado.

### 3.2.3.1.4 PAINEL PRINCIPAL E FUNCIONALIDADES

A figura seguinte (Fig. 3.15) ilustra o painel principal da aplicação desenvolvida em LabVIEW e que permite configurar a porta série a ser utilizada, bem como a interpretação e gravação dos dados lidos.

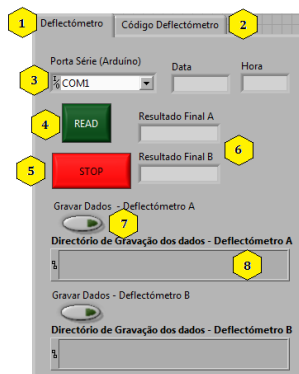


Fig. 3.15 - Painel principal da aplicação em LabVIEW para a leitura das medições de dois deflectómetros digitais.

#### Legenda:

1. Separador onde se encontram todos os controlos da aplicação criada;
2. Separador onde se encontra o código a ser carregado no Arduíno para a leitura dos dados dos deflectómetros;
3. Configuração da porta série (Arduíno);
4. Botão para iniciar a leitura dos deflectómetros;
5. Botão de Stop (parar a leitura dos dados no *buffer*);
6. Apresentação do valor das medições lidas para os deflectómetros A e B;
7. Botões de gravação de dados (Note-se que foi desenvolvido um código de gravação individual para cada deflectómetro);
8. Caixa de texto para a colocação do directório de gravação dos ficheiros de dados (note-se que cada deflectómetro possui a sua própria caixa de texto);

Por fim, e em relação à apresentação dos dados lidos, falta referir que no ecrã principal são também apresentados 2 gráficos, em tempo real, um para cada deflectómetro, com a unidade de medida em milímetros ou em polegadas.

### 3.2.3.2 APLICAÇÃO DE REGISTO DE DADOS SEM TRATAMENTO

Uma vez desenvolvida a aplicação que permitia a leitura e a apresentação das medições efectuadas pelos dois deflectómetros digitais, em tempo real, e a gravação de dados, foi então desenvolvida uma outra aplicação que, dividida em duas partes, efectuava a gravação dos dados recebidos em bruto (formato binário), para uma posterior análise e tratamento.

Tal aplicação foi criada com o intuito de se tentar ler uma maior quantidade de dados por segundo, uma vez que a aplicação referida na secção anterior efectuava bastante processamento, para o tratamento da informação enviada pelo deflectómetro.

### 3.2.3.2.1 RECEPÇÃO E GRAVAÇÃO

O objectivo desta primeira aplicação era o de separar a informação dos deflectómetros, transmitida através do Arduino, gravando as medições lidas numa folha de cálculo Excel, em formato binário, ou seja, sem que fosse efectuado qualquer tipo de tratamento da informação recebida.

Uma vez que nenhuma alteração foi efectuada na forma como os dados eram transmitidos pelo Arduino, o código em LabVIEW para a aquisição e tratamento inicial da informação era exactamente igual ao código explicado na secção 3.2.3.1.1.

Após a recepção e tratamento inicial da informação recebida pelo Arduino, esta era gravada numa folha de cálculo (Excel). Isto é, eram gravados os dados em formato binário no ficheiro Excel, sendo apenas acrescentando o valor do tempo. O procedimento de gravação dos dados era exactamente igual ao procedimento descrito na secção 3.2.3.1.3.

### 3.2.3.2.2 LEITURA E TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO

Antes de se proceder ao tratamento da informação, que se encontrava nos ficheiros gravados anteriormente, era necessário antes de mais efectuar-se a sua leitura. O processo de leitura pode ser observado na figura seguinte (Fig. 3.16), que mostra um fluxograma da operação que se desenrolava no LabVIEW.

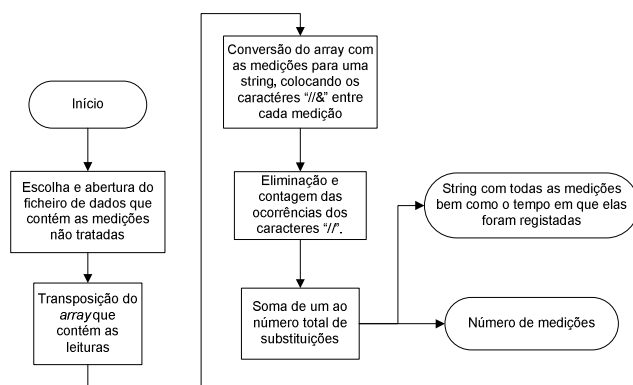


Fig. 3.16 - Fluxograma do processo de leitura de um ficheiro que contém medições.

Note-se que na figura anterior é descrito o processo de leitura dos dados gravados de apenas um dos deflectómetros digitais. Para a leitura de outros ficheiros dever-se-á recorrer ao mesmo processo. O código da aplicação descrita pela figura anterior, e desenvolvido no LabVIEW, pode ser visto em pormenor através da Fig. 6.21 que se encontra no anexo 6.4.4.6 desta tese.

Uma vez lidos os dados era necessário proceder-se ao tratamento inicial da informação lida. A figura seguinte (Fig. 3.17) ilustra o fluxograma que traduz o processamento efectuado em LabVIEW.

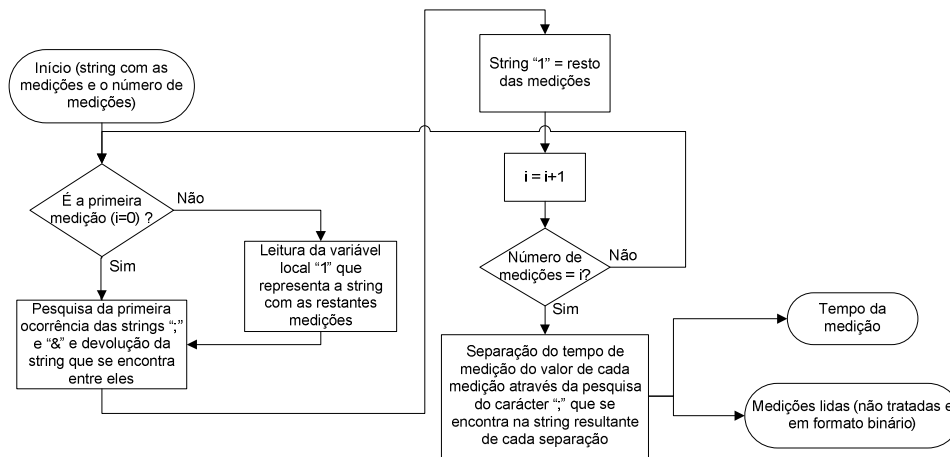


Fig. 3.17 - Tratamento inicial da informação não tratada.

Durante o processo de leitura de um ficheiro que contém as medições não tratadas, são devolvidos dois parâmetros, ou seja, uma *string* que contém todas as medições bem como o número de medições contidas na *string*. Uma vez que é efectuado apenas uma vez o processo de leitura do ficheiro e sabendo-se que à medida que corre o ciclo de tratamento, são retiradas uma a uma as medições da *string*, esta é então guardada numa variável local “1”, entre cada medição. De seguida e sabendo-se que o registo de cada medição contém o tempo da medição bem como a medição em si (separados por um “;”), é efectuada nova pesquisa a fim de separar ambos os valores.

Nas Fig. 6.22 e Fig. 6.23, que se encontram no anexo 6.4.4.7, estão representadas as secções do código que traduzem o diagrama de blocos representado pela figura anterior. Note-se que as figuras referidas anteriormente embora representem a mesma parte do código, representam diferentes estágios da estrutura de casos que verifica se a leitura actual é a primeira leitura a ser lida.

Uma vez recebido o valor de cada leitura, o procedimento de tratamento da *string* de 36 *bits* é análogo ao procedimento descrito na secção 3.2.3.1.2.

Finalmente, e após terem sido tratadas as medições restavam apenas registá-las novamente para uma nova folha de cálculo. O processo que descreve o procedimento de gravação de dados foi já discutido na secção 3.2.3.1.3, não sendo por isso efectuada nenhuma referência sobre esse assunto nesta secção. Resta apenas referir o facto de que o valor do tempo da medição, que será anexo à medição tratada, será o mesmo valor que havia sido lido no processo descrito na Fig. 3.17.

### 3.3 Sistema de medição de extensómetros

---

#### 3.3.1 DESCRIÇÃO E ANÁLISE DO SISTEMA DA NATIONAL INSTRUMENTS

Pretendeu-se com esta tese de Mestrado desenvolver um sistema de medição de deformações em estruturas que permitisse efectuar medições simultâneas de diversos extensómetros, tal como o sistema da National Instruments que actualmente é utilizado no laboratório de Engenharia Civil. Refira-se novamente que esse sistema não pertence à UMA, o que naturalmente limita a sua disponibilidade e a sua utilização. Para iniciar-se o desenvolvimento de um sistema próprio procurou-se antes de mais perceber como funcionava o actual sistema. A Fig. 3.18 mostra uma imagem do sistema da NI.



*Fig. 3.18 - Imagem do sistema da NI.*

Após uma análise ao sistema, verificaram-se as seguintes características:

1. O sistema utiliza como elementos sensores extensómetros resistivos de  $120\Omega$ , que alteram o valor da sua impedância à medida que estes sofrem deformações;
2. Para analisar o valor das deformações é utilizado o conceito descrito na secção 2.4, ou seja, são utilizadas pontes de Wheatstone, para traduzir as variações da resistência em variações de tensão;
3. Para enviar os dados das medições para um computador o sistema utiliza um cabo de rede;
4. O sistema é capaz de suportar 8 canais simultâneos, sendo possível utilizar-se um ou 2 braços activos em cada ponte de Wheatstone (a utilização de dois braços activos permite a utilização de células de carga que são utilizadas para medir o peso de blocos de betão com várias toneladas). É no entanto importante referir que, muito embora o sistema seja capaz de suportar a leitura de 8 canais ao mesmo tempo, apenas três estão configurados para trabalhar com os extensómetros resistivos;
5. É utilizado o LabVIEW da *National Instruments*, descrito na secção 2.7, para efectuar o tratamento e apresentação dos dados no computador, sendo que o programa foi desenvolvido e optimizado pelo Prof. Dr. Paulo França;

6. O sistema é capaz de efectuar duas medições por segundo, o que é suficiente para uma análise a longo prazo das deflexões sofridas pelos materiais, mas insuficiente para uma análise de deflexões rápidas;
7. A alimentação do sistema é feita através de uma tomada normal, ou seja, da alimentação da rede pública;
8. O sistema foi criado apenas para a medição de deflexões de extensómetros resistivos bem como de células de carga, não sendo possível utilizar a sua interface com o computador para interligar outros aparelhos, tais como os deflectómetros digitais, que são peças fundamentais num teste real;
9. O sistema mede as deformações dos transdutores resistivos na unidade de medida mV/V. Uma vez que o resultado final a apresentar será dado em função da deformação, cuja unidade de medida é o  $\mu\epsilon$  deve-se multiplicar o valor lido por uma constante, que é calculada em função do tipo de extensómetro e do tipo de ponte utilizado. Para o cálculo da constante, e uma vez que se trabalha apenas com um quarto da ponte de Wheatstone (apenas um braço activo) deve-se utilizar a seguinte equação [30]:

$$constante = 1000 \times \frac{-4}{GF} \quad (3.1)$$

onde GF é o factor de deformação também denominado de *gauge factor*.

10. Em relação aos aspectos físicos do sistema, este para além de volumoso (o que dificulta o seu transporte), é sensível à posição de repouso, uma vez que se não estiver numa posição horizontalmente correcta, o encaixe dos módulos torna-se deficiente e como tal, não será possível efectuar medições.

### 3.3.2 DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO DESENVOLVIDO

Uma vez que era objectivo desta tese a criação de um sistema de medição capaz de rivalizar com o sistema de medição da NI, foram definidos os seguintes objectivos principais.

- A. Criar um sistema de medição capaz de medir as deformações sentidas pelos extensómetros resistivos mais vulgarmente utilizados pelos Engenheiros Civis nos teste de campo que estes realizam;
- B. Criar um sistema de medição mais leve e compacto que facilite o seu transporte e uso em testes de campo;
- C. Criar um sistema autónomo, em termos energéticos, ou seja, desenhar um sistema de medição que por exemplo, faça uso das entradas USB do computador portátil ao qual irá estar ligado, para poder alimentar todo o sistema de medição;

- D. Criar um sistema que seja capaz de efectuar um elevado número de medições por segundo, para que se possam realizar testes em tempo real, com maior capacidade de resposta;
- E. Criar um sistema mais completo a nível funcional, ou seja, com uma única interface entre o utilizador e os diversos instrumentos de medição, que normalmente são utilizados em testes de campo;
- F. A criação de um sistema mais robusto e com menor nível de sensibilidade à posição onde este se encontra;
- G. A criação de um sistema de medição que possa ser, ao longo do tempo, e em qualquer teste de campo, calibrado e ajustado de forma a adaptar-se às condições e ao estado dos elementos transdutores a serem utilizados;
- H. A criação de um sistema de medição que permita a personalização de todo o processamento dos dados recebidos no computador;
- I. A criação de um sistema economicamente viável;
- J. A criação de um sistema que esteja calibrado, para que as variações da deformação possam fornecer dados relevantes;

Após terem sido definidos os objectivos do sistema de medição a ser desenvolvido, começou-se por idealizar o sistema a nível funcional, ou seja, a definir-se o modo de funcionamento de todo o sistema.

Antes de mais, e de forma a tornar o sistema de medição economicamente viável, procurou-se encontrar uma solução para a interface do sistema de medição a ser desenvolvido, uma vez que módulos de aquisição de dados (*data acquisition modules*) próprios para o LabVIEW são extremamente caros. Assim, adquiriu-se um Arduino Duemilanove, utilizando-se este dispositivo como interface de ligação entre o sistema de medição e o LabVIEW.

### 3.3.3 PRINCÍPIO DO CIRCUITO DE MEDIÇÃO

Uma vez resolvida a questão da interface com o computador, começou-se a desenhar o sistema de medição propriamente dito.

#### 3.3.3.1 PRIMEIRO ANDAR

Sendo os extensómetros resistivos de  $120\Omega$  os transdutores mais vulgarmente utilizados para a medição das deformações de estruturas físicas, começou-se antes de mais por verificar-se a gama da variação da resistência, à medida que estes sofriam deformações positivas e negativas (para cima ou para baixo).

Após alguns testes práticos, verificou-se que os transdutores resistivos utilizados possuem uma gama de variação de resistência de cerca de  $0,8\Omega$ . Isto é, sendo o valor médio da resistência dos extensómetros resistivos de aproximadamente  $121,4\Omega$ , no máximo da deflexão positiva estes possuíam o valor de  $121,8\Omega$ , ao passo que no máximo da deflexão negativa, o valor da resistência dos extensómetros resistivos era de aproximadamente  $121\Omega$ .

Estudados os transdutores resistivos, começou-se então a idealizar as técnicas de medição a utilizar, uma vez que era necessária a tradução da variação de  $0,8\Omega$  para

valores de tensão entre 0 e 5V (gama de tensão utilizada pelo conversor A/D do Arduino Duemilanove).

Assim, optou-se por adoptar o mesmo princípio de medição do sistema da NI, ou seja a utilização de uma ponte de Wheatstone (estudada na secção 2.4.1.1), para a tradução da variação da resistência do extensómetro em valores de tensão, e a utilização de um amplificador de instrumentação para a linearização da variação da tensão. A figura seguinte (Fig. 3.19) ilustra o circuito montado, sendo possível visualizar-se a ponte de Wheatstone, bem como o amplificador de instrumentação utilizado.

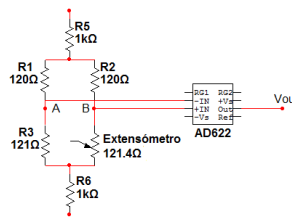


Fig. 3.19 - Primeiro andar do sistema de medição (primeira fase).

Note-se na figura anterior que apenas foi utilizado um dos braços da ponte de Wheatstone. Outra observação que pode ser efectuada através da análise da figura anterior é que existem duas resistências de 1kΩ no topo e no fundo da ponte, de forma a limitar a corrente que a atravessa. Tal configuração permite também que não ocorram erros de leitura devido ao sobreaquecimento do transdutor resistivo, evitando igualmente danos no próprio dispositivo.

Por fim, e como última observação, deve-se referir que o valor da resistência utilizada no braço oposto ao do extensómetro era de 121Ω, de forma a equilibrar ao máximo a ponte de Wheatstone. Testes práticos revelaram que muito embora o valor da queda de tensão entre A e B não fosse nulo, o valor de tensão medido era muito baixo. Este resultado pode ser explicado devido ao facto de se estar a trabalhar com resistências que, muito embora possuam já uma tolerância baixa, continuam a apresentar valores ohmicos ligeiramente diferentes, o que invariavelmente provoca o desequilíbrio da ponte.

Uma vez que um dos objectivos do sistema de medição a criar era o de desenvolver um sistema de medição que fosse autónomo, em termos energéticos, e sabendo-se que o Arduino, uma vez conectado ao computador, possui um terminal com uma fonte de tensão de 5V, foi desenvolvido um circuito inversor de tensão, de forma a se poder alimentar o circuito de linearização, ou seja o amplificador de instrumentação AD622.

O circuito inversor criado faz uso de um conversor e regulador de tensão, denominado de LT1054, que, na configuração descrita pelo *datasheet* do fornecedor consegue fornecer ao circuito uma tensão negativa de 5V (DC), se, na sua entrada for colocada uma tensão positiva, DC, de 5V [31].

O circuito criado para a tradução de deformações em tensão, bem como para a linearização do sinal de tensão, que representa o primeiro andar do sistema de medição, pode ser observado na sua totalidade, através da figura seguinte (Fig. 2.20):

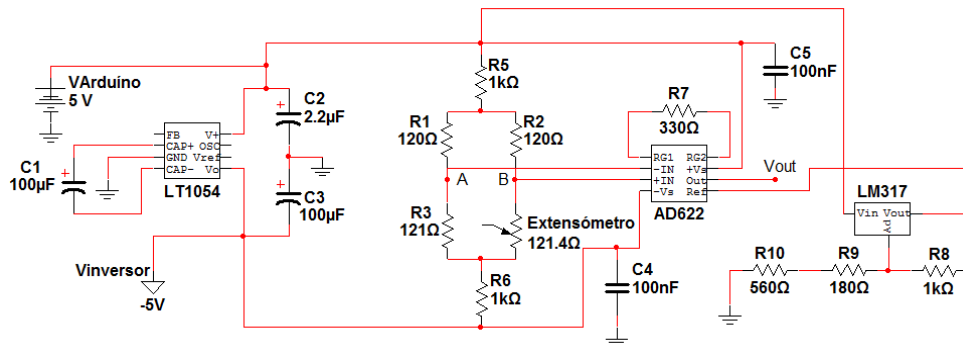


Fig. 3.20 - Esquema do circuito do sistema de medida (1ª Andar).

Devem ser feitas algumas observações importantes sobre este circuito:

- Os condensadores de 100nF colocados entre as entradas de alimentação do amplificador de instrumentação AD622 e a massa ( $C_4$  e  $C_5$ ) servem de filtros genéricos, uma vez que filtram os ruídos provocados pela alimentação do circuito;
- O valor da tensão de referência colocada à entrada do amplificador operacional era de cerca de 2,5V. Uma vez que os extensómetros resistivos utilizados traduzem deformações positivas e negativas, era necessário estipular um valor médio de tensão, ou seja, o valor da tensão quando o extensómetro não estava a ser sujeito a nenhuma deformação. Como o valor de referência colocado à entrada do amplificador de instrumentação não é mais do que o valor de tensão em torno do qual as variações de tensão irão ocorrer, e uma vez que o Arduino lê valores de tensão entre os 0 e os 5V, configurou-se o valor da tensão de referência como sendo de 2,5V, de forma a equilibrar a saída. Refira-se que a configuração do circuito utilizado para fornecer um valor fixo de 2,5V foi encontrada no *datasheet* do fornecedor do componente LM317, sendo apenas ajustados os valores das resistências que se encontram entre o terminal *Adj* e a massa, de forma a ajustar o valor de tensão [32].
- De acordo com o fabricante, a resistência  $R_7$ , que controla o ganho do amplificador de instrumentação poderia ter um valor mínimo de 51,1Ω (correspondendo, de acordo com a equação (2.9) a um ganho de 1000). Após alguns testes práticos verificou-se que a variação da tensão à saída do amplificador operacional AD622, para um valor de ganho máximo, era de apenas 1,2V. Como era possível ao Arduino ler variações de tensão entre os 0 e os 5V, concluiu-se que o circuito de linearização e amplificação do valor de tensão à saída da ponte de Wheatstone era insuficiente para traduzir correctamente as variações de tensão necessárias, logo era necessária a utilização de mais um andar de amplificação de forma a amplificar o sinal de

saída. Por esse motivo resolveu-se diminuir o ganho do amplificador de instrumentação para 153, usando-se para isso uma resistência de 330Ω.

A decisão de diminuir o ganho do amplificador para 153 deveu-se única e exclusivamente ao facto de, após testes práticos no laboratório (já com o segundo andar de amplificação montado), se terem obtido melhores resultados em termos de sensibilidade e de máxima excursão dos valores de tensão de saída do sistema de medição desenvolvido.

### 3.3.3.2 SEGUNDO ANDAR

Como foi referido na secção anterior, e uma vez que a tensão de saída do circuito de linearização do primeiro andar era insuficiente para traduzir as variações de deflexão em variações de tensão entre os 0 e os 5V suportadas pelas entradas analógicas do Arduino, montou-se mais um andar de amplificação, conforme ilustra a figura seguinte (Fig. 3.21):

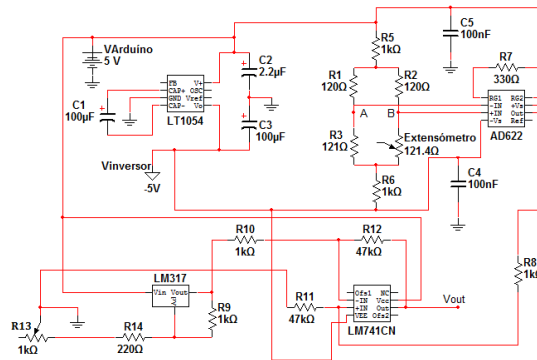


Fig. 3.21 - Esquema do circuito do sistema de medição.

Na figura anterior podem-se observar alguns pormenores:

- É novamente utilizado um regulador de tensão LM317 para regular a tensão de entrada na entrada não inversora do amplificador operacional.
- O circuito integrado utilizado para amplificar o sinal de tensão proveniente do primeiro andar do circuito é o amplificador operacional LM741, cujas características podem ser consultadas através da bibliografia [33]. Este amplificador operacional apresenta no circuito da figura anterior, a configuração de um amplificador diferencial, já discutido na secção 2.2.3.2 da teoria. Assim e se  $R_{11}=R_{12}$  e  $R_8=R_{10}$ , pode-se utilizar a equação (2.8) que diz que:

$$(2.8) \quad V_{OUT} = \frac{47k\Omega}{1k\Omega} \times (V_{+IN} - V_{-IN}) \Leftrightarrow V_{OUT} = 47(V_{+IN} - V_{-IN})$$

Note-se que o amplificador operacional amplificava o valor da diferença entre a tensão que era colocada na porta não inversora (tensão à saída do segundo regulador de tensão LM317) e a tensão na porta inversora (a tensão à saída do primeiro andar) do amplificador operacional.

Uma vez que o sinal de tensão à saída do segundo andar de amplificação dependia do valor de tensão fornecida pelo regulador de tensão LM317, era possível calibrar todo o sistema de medição, permitindo que este se ajustasse às condições da medição que se pretendia efectuar, e também ao próprio estado do transdutor resistivo. Isto é, regulando a resistência do potenciômetro de  $1k\Omega$  (R13) era possível controlar a tensão que era colocada na entrada não inversora do amplificador operacional LM741, para que na saída do circuito se tivesse, na condição de equilíbrio (sem deflexões), um valor de tensão igual a 2,5V. Esta condição vem de encontro outro dos objectivos desta tese, ou seja, a criação de um sistema que pudesse ser calibrado em função das condições da estrutura onde será colocado o extensómetro resistivo, bem como em função do próprio estado do extensómetro (curvaturas e dobras já existentes).

A configuração do segundo LM317, tal como no primeiro andar, obedece a indicações do fabricante, sendo que apenas foi alterado o valor das resistências  $R_9$ ,  $R_{14}$  e  $R_{13}$ , de acordo com as necessidades do circuito, ou seja, de acordo com a configuração presente na Fig. 3.21. Assim, na prática, conseguiam obter valores de tensão na saída do LM317 entre os 1,884V e 2,968V que era suficiente para ajustar o valor médio do sinal à saída, tal como se pretendia.

Em relação ao ganho do segundo andar, resta apenas referir que este foi escolhido, na prática, para que os pontos de máxima deformação/deflexão dos extensómetros resistivos correspondessem a variações na tensão de saída da ordem dos 5V.

### 3.3.4 PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO CONSTRUÍDA

Uma vez concluída a análise do sistema de medição de um canal, e sendo um dos objectivos do trabalho a criação de um sistema de medição capaz de efectuar a leitura de vários transdutores resistivos, passou-se para o desenvolvimento de um circuito que fosse capaz de suportar três transdutores resistivos a trabalharem ao mesmo tempo. O circuito criado consistia basicamente na repetição do circuito da Fig. 3.21, e pode ser observado através da Fig. 6.11, que se encontra nos anexos.

Uma vez desenvolvido o circuito a montar, foi criado, a partir do programa Ultiboard 11.0 da National Instruments, um *layout* para ser transferido para uma placa de circuito impresso. Sendo um dos objectivos desta tese a utilização de Arduínos não só para servir de interface entre o sistema de medição a criar, mas também para outros sistemas já previamente construídos, e que fossem essenciais durante um ensaio de campo, anexou-se ao esquema do circuito impresso um conjunto de 4 resistências de  $56k\Omega$  (duas para os terminais de *clock* e duas para os terminais de dados dos deflectómetros digitais) na configuração *pull up*, discutida na secção 3.2.1. Uma vez desenvolvido o circuito, e de forma a decalcar o *layout* para a placa de circuito impresso, utilizaram-se os esquemas das Fig. 6.12 e Fig. 6.13, que se encontram no anexo 6.4.2.

Construído e montado o circuito, decidiu-se fornecer ao utilizador final do protótipo uma melhor interacção com o sistema. Para tal construiu-se uma outra placa de circuito que foi posteriormente montada por cima do circuito principal. Nas Fig. 6.14 e Fig. 6.15, que se encontram no anexo 6.4.2, é possível observar-se o desenho do esquema a decalcar na placa de circuitos impresso.

Essa placa extra, colocada sobre o circuito principal, fornece maior comodidade ao utilizador final, uma vez que esta possui já os terminais de encaixe dos deflectómetros digitais, bem como os terminais de ligação ao Arduino e aos extensómetros resistivos.

Resta apenas referir o facto de que o processo de desenvolvimento das duas placas de circuito impresso foi em tudo análogo à construção de qualquer outra placa de circuito impresso nos laboratórios de Engenharia da UMa, não sendo por isso feita nenhuma referência nesta tese de Mestrado ao processo de desenvolvimento prático das placas em laboratório.

A figura seguinte (Fig. 3.22) ilustra o sistema completo, depois de montado, podendo-se visualizar-se os diferentes componentes.

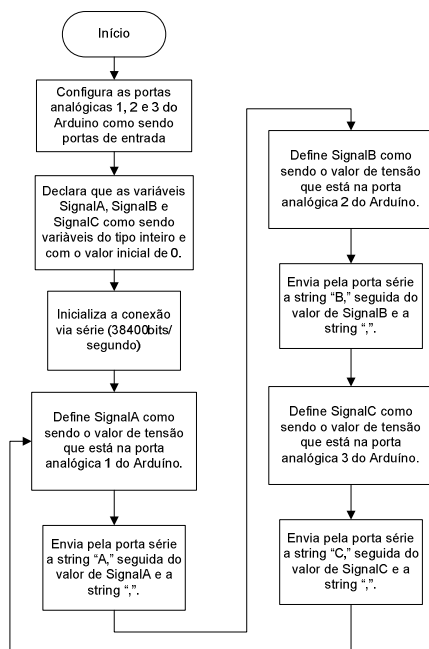


*Fig. 3.22 - Protótipo do sistema de medição criado.*

### 3.3.5 ARDUÍNO

Uma vez desenvolvidos os dois primeiros componentes da cadeia de medição, era necessário desenvolver-se o código no Arduino que iria ser responsável pela interacção do sistema de medição com o computador.

Foi então desenvolvido o código que pode ser observado através do anexo 6.4.3. A figura seguinte (Fig. 3.23) mostra o diagrama de fluxo de dados do código mencionado anteriormente.



*Fig. 3.23 - Diagrama de fluxo de dados do código desenvolvido no Arduino para a comunicação dos extensômetros resistivos com o LabVIEW.*

Como se pode verificar através de uma breve análise da figura anterior, a comunicação via porta série entre o Arduino e o LabVIEW realiza-se a uma taxa de transferência de  $38400\text{bits/segundo}$ . Esta taxa de transmissão foi escolhida pois, através de testes práticos, foi aquela que melhores resultados apresentou, a nível de velocidade de transmissão e de taxa de erros.

Finalmente, pode-se também verificar que o processo de transmissão da informação do valor da tensão de cada canal de medição é feito de forma análoga, mudando somente a primeira letra do cabeçalho de cada medição.

### 3.3.6 LABVIEW

Desenvolvido o código que garante a transmissão dos valores de tensão de cada canal, do circuito de medição para o computador via porta série, é necessário desenvolver-se a aplicação no LabVIEW responsável pela interpretação e tratamento dos dados provenientes da porta série.

Assim, e de forma a explicar em pormenor como foi desenvolvida a aplicação no LabVIEW, observe-se o diagrama de fluxos de dados representado pela figura seguinte (Fig. 3.24). Uma vez que o princípio de programação é análogo para todos os canais de medição, apenas será explicado o funcionamento para um canal.

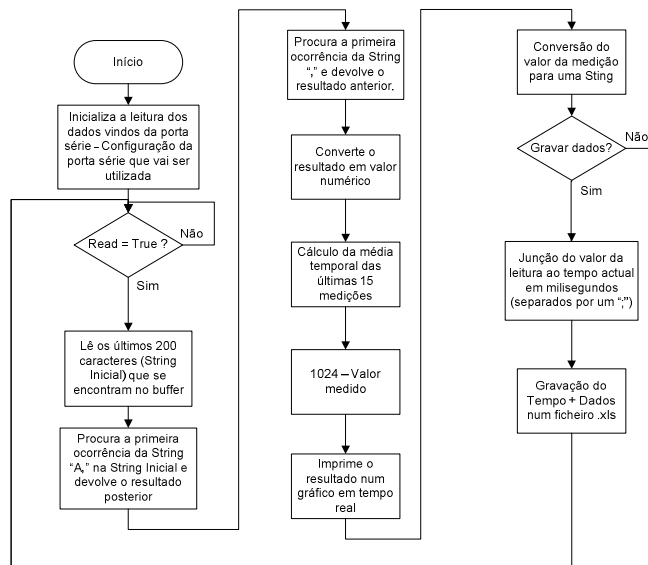


Fig. 3.24 - Diagrama de fluxo de dados do código em LabVIEW da aplicação desenvolvida para recepção e tratamento de dados dos três canais dos extensómetros.

No princípio da aplicação o LabVIEW começa por inicializar a comunicação via porta série, através da configuração da porta que era utilizada. A programação da configuração da porta série pode ser visualizada através da Fig. 6.16 que se encontra no anexo 6.4.4.1 desta tese de Mestrado. De seguida, e se o botão de leitura estiver activado, o LabVIEW começa a ler os últimos 200 caracteres que se encontravam no *buffer*. Uma vez testadas diferentes velocidades de transmissão, bem como diferentes números de caracteres a ler no *buffer*, foi tomada a decisão de ler os últimos 200 caracteres, de forma a poder ser lida pelo menos uma medição de cada deflectómetro de cada vez.

Recebidas as medições dos três canais de medição era necessário proceder-se à leitura da informação de cada um deles separadamente. Para tal e uma vez que o Arduino envia antes de cada medição um cabeçalho que os distingue, era necessário proceder-se à pesquisa do cabeçalho de cada canal, devolvendo o resultado da medição que se entrava após o cabeçalho e antes do terminador (“;”).

Uma vez encontrada a *string* com a informação da medição era necessária a sua conversão para o formato decimal. Após vários testes verificou-se que muito embora o sistema estivesse a fornecer informação sobre as deformações a que os transdutores resistivos estavam sujeitos, essa informação estava corrompida por ruído, e apresentava valores contrários (em sinal) aos da deformação medida pelo sistema da NI.

Assim e de forma a atenuar-se o ruído detectado pelo sistema de medição, implementou-se um bloco de programação em LabVIEW que efectuava uma média das últimas 15 medições efectuadas. Dessa forma foi possível filtrar a maior parte do ruído e conseguir-se a estabilização do sistema de medição. Quanto ao sinal contrário das deflexões, e uma vez que o conversor analógico-digital do Arduino possui 1024 níveis de quantização, os quais correspondem à gama de valores de tensão de 0 a 5V,

subtraiu-se a 1024 o valor da medição recebida, obtendo-se assim o seu inverso e correspondentemente o valor correcto. A calibração do protótipo do sistema de medição será discutida no capítulo 4, onde serão também discutidos os testes práticos efectuados.

Uma vez tratados os dados recebidos, a aplicação desenvolvida no LabVIEW imprime o resultado num gráfico em função do tempo, mostrando assim as deflexões sofridas pelos transdutores. A programação em ambiente gráfico LabVIEW de todo o tratamento da informação que é lida no *buffer* da porta série pode ser visualizada através da Fig. 6.17, que se encontra no anexo 6.4.4.2 desta tese.

De seguida, o utilizador da aplicação, através do pressionar de um botão de gravação, pode gravar o resultado das medições à medida que estas estão a ser lidas, num ficheiro com a extensão .xls, juntamente com a informação do tempo (em milisegundos) em que a medição foi efectuada. No ficheiro de registo dos valores lidos, o valor do tempo encontra-se sempre antes da medição, sendo que os valores encontram-se separados por um delimitador que neste caso é o “;”. O valor do tempo registado é sempre o valor do tempo em milisegundos desde que o computador foi iniciado, uma vez que este registo permite que valores de medições diferentes possuam valores de tempo iguais.

### 3.3.6.1 PAINEL PRINCIPAL E FUNCIONALIDADES

Desenvolvida a aplicação responsável pela leitura e tratamento dos dados provenientes do Arduino, construiu-se um painel principal de forma a controlar toda a aplicação desenvolvida, bem como a visualização das medições recebidas. A figura seguinte (Fig. 3.25) ilustra o painel principal da aplicação desenvolvida.

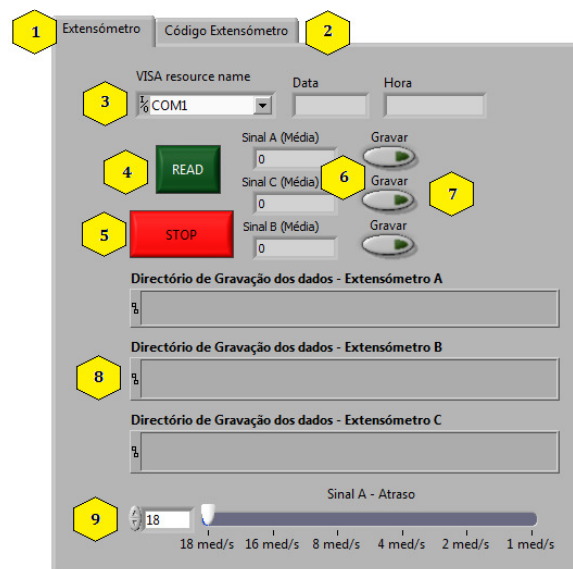


Fig. 3.25 - Painel principal da aplicação em LabVIEW para a leitura das medições de três extensómetros através do Arduino.

### Legenda:

1. Separador onde se podem encontrar todos os controlos da aplicação
2. Separador onde se pode encontrar o código a ser carregado no Arduíno antes de colocar o programa a correr;
3. Escolha da porta série (Arduíno) a ser utilizada;
4. Botão para inicializar a leitura dos dados que se encontram no *buffer*;
5. Botão de Stop (terminar a leitura dos dados);
6. Dados recebidos. Atenção: Os dados que aqui se encontram possuem já o tratamento (média) discutido anteriormente;
7. Gravação das medições (note-se que cada canal de medição possui o seu próprio botão e aplicação de gravação de dados);
8. Escolha do directório onde será gravado o ficheiro com as medições efectuadas;
9. Controlo do número de medições a efectuar por segundo;

Refira-se que no painel principal pode também ser consultado, através de gráficos em tempo real, as deformações dos extensómetros à medida que estas ocorrem, de forma a ser possível visualizar o comportamento da estrutura à qual estão ligados os transdutores resistivos.

Por fim resta apenas mencionar que após testes efectuados com o sistema de medição, notou-se que este era capaz de efectuar em média, 18,8 medições por segundo (aproximadamente uma medição a cada 55ms). Assim, e de forma a colocar no painel de controlo uma função que permitisse o controlo do número de medições a efectuar por segundo, introduziu-se no diagrama de blocos da aplicação uma função que atrasava as medições em intervalos de tempo múltiplos de 55ms. Na secção 4.3.1 voltar-se-á a discutir este assunto com maior pormenor. Como se pode observar pela figura anterior (Fig. 3.25), as taxas de amostragem escolhidas para o painel principal da aplicação foram 18, 16, 8, 4, 2 e 1 medições por segundo.

#### 3.3.6.2 TRATAMENTO DOS DADOS GRAVADOS (MÉDIA)

Por vezes o processo de leitura dos dados enviados pelos extensómetros pode ser longo e exaustivo, durando mesmo várias horas. Uma vez que o sistema desenvolvido era capaz de efectuar no máximo 18 medições por segundo, os gráficos que traduzam variações muito longas poderão se tornar demasiado grandes. Por esse motivo, foi pensada uma nova forma de abordar o problema, desenvolvendo-se uma aplicação separada, que efectuava uma média das leituras efectuadas em função de um determinado período de tempo.

Uma vez que o sistema da NI também utiliza o LabVIEW para programar a leitura e a análise dos dados recebidos, optou-se também por adaptar a aplicação de tratamento dos dados, ao sistema da NI, de acordo com o modo de gravação de dados utilizado. Assim e antes de mais começou-se por definir o número de leituras a ler de acordo com o tempo utilizado para cada média. A tabela seguinte (Tabela 3.3) define o número de medições a ler de acordo com o tempo de cada média.

Tabela 3.3 - Número de medições de acordo com a média a efectuar.

Sistema NI		Protótipo	
Tempo (segundos)	Número de medições	Tempo (segundos)	Número de medições
1	2	0,5	9
2	4	1	18
4	8	2	36
5	10	4	72
		5	90

A programação por detrás da definição do número de medições a ler, de acordo com a média a efectuar, pode ser observada através da Fig. 6.24 e Fig. 6.25 que se encontram no anexo 6.4.4.8 desta tese de Mestrado.

Após ser configurado o tipo de média a efectuar era necessário configurar-se os ciclos de leitura e de cálculo do valor das médias. O ciclo de leitura dos ficheiros a serem tratados pode ser observado através do fluxograma da Fig. 3.16 que se encontra na secção 3.2.3.2.2. Uma vez lidos os dados obtém-se então uma *string* que contém as medições efectuadas bem como o tempo (em milissegundos) de quando estas foram efectuadas. A figura seguinte (Fig. 3.26) ilustra uma parte da *string* referida anteriormente:

```
result string
4680949;483,00000&4681028;485,
50000&4681068;497,
```

Fig. 3.26 - Esquema da string de leitura do ficheiro de dados.

Como se pode verificar através da figura anterior, o tempo da medição vem sempre antes do valor da medição, sendo depois colocado o terminador “&”.

Depois de ser carregado o ficheiro de dados, torna-se conhecido o número de medições que este contém, sendo obtida uma *string* que contém todas as medições registadas. Não é no entanto possível identificar de forma fácil o número de ordem à qual corresponde cada medição. Uma vez que já se sabe já quantas medições serão utilizadas para a média (através da selecção dos dados no painel de controlo), torna-se assim fácil calcular o número de médias que teremos de efectuar fazendo a simples divisão do número de medições (que se encontram no ficheiro de dados) pelo número de medições utilizadas para a média. Refira-se que apenas é necessário o resultado inteiro desta divisão sendo que o resultado fraccionário pode ser desprezado. A Fig. 6.26 que se encontra no anexo 6.4.4.9 mostra como foi efectuada a programação deste passo no LabVIEW.

Uma vez que a *string* que contém as medições contém também o valor do tempo de cada medição, torna-se necessário separar esses mesmos valores. Para tal, e uma vez que apenas é necessário o valor de cada medição, foi desenvolvido um ciclo, no LabVIEW capaz de retirar o valor individual de cada medição, colocando o valor lido num *array*. A figura seguinte (Fig. 3.27) ilustra o fluxograma do ciclo criado em LabVIEW, uma vez que o código encontra-se representado na Fig. 6.26, que se encontra no anexo 6.4.4.9.

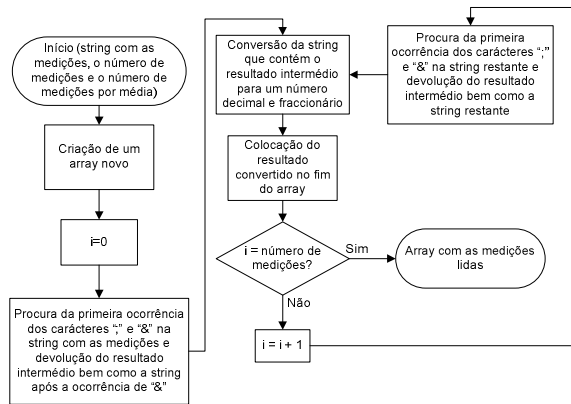


Fig. 3.27 - Fluxograma do código em LabVIEW que coloca o valor das medições num array.

Uma vez obtido o *array* que contém as medições lidas, torna-se fácil efectuar a média das medições durante um determinado intervalo de tempo, uma vez que este está configurado com sendo um certo número de medições. Uma vez que o intervalo de tempo a colocar no valor da média efectuada vai de acordo com a taxa de leitura de dados, pré-definida pelo utilizador no painel principal da aplicação, não são necessários os valores de tempo anexos a cada medição. Assim, os intervalos de tempo colocados no registo de cada média serão calculados de acordo com a taxa de leitura de dados. A programação em LabVIEW desta parte da aplicação (cálculo da média e dos intervalos de tempo) pode ser consultada na Fig. 6.27, que se encontra no anexo 6.4.4.10. O fluxograma da aplicação que efectua a média das medições a partir do *array* que contém as médias pode ser consultado através da figura seguinte (Fig. 3.28).

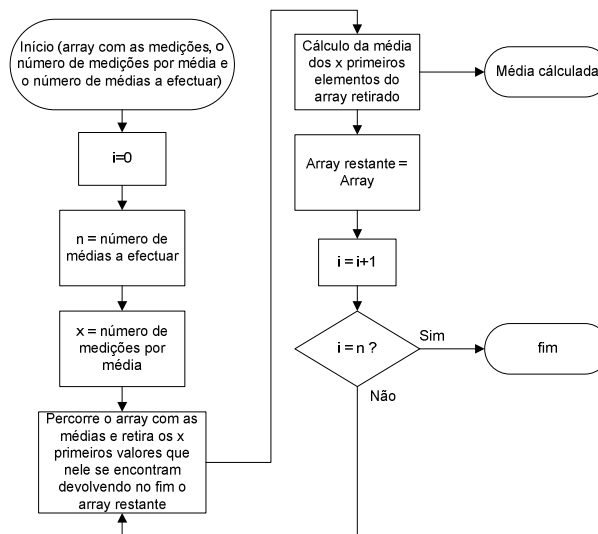


Fig. 3.28 - Fluxograma da operação do cálculo da média.

Uma vez calculada a média era necessário calcular-se os intervalos de tempo para cada média, para que posteriormente esses dois resultados fossem juntos uns aos outros. A figura seguinte (Fig. 3.29) ilustra o diagrama de fluxos da programação efectuada.

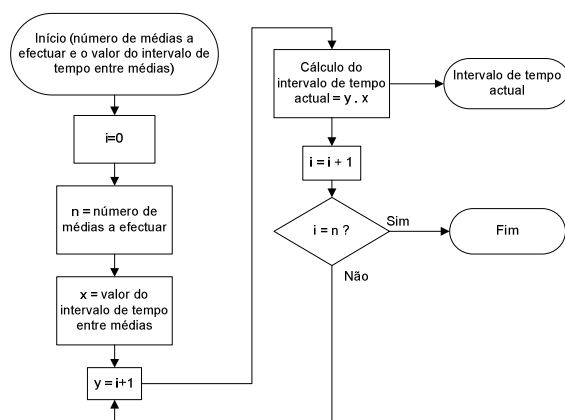


Fig. 3.29 - Fluxograma da aplicação em LabVIEW que calcula o valor dos intervalos de tempo.

Calculadas as médias, bem como os seus intervalos de tempo, é necessária sua gravação num ficheiro de dados. O directório que contém o endereço onde irão ser guardados os dados, bem com a extensão do ficheiro, deve ser colocado no painel principal da aplicação. A Fig. 6.28 que se encontra no anexo 6.4.4.11 mostra o painel principal da aplicação criada. Note-se que no nome do ficheiro a criar deve ser já colocada a extensão do ficheiro, não esquecendo que o ficheiro criado será compatível com o Excel. O processo que efectua a gravação de ficheiros foi já discutido na secção 3.2.3.1.3.

## 3.4 Medição do tempo de vida do Érbio

Sendo um dos objectivos desta tese a demonstração da versatilidade do Arduino como placa de aquisição de dados, procurou-se nesta secção a demonstração dos conceitos referidos anteriormente na secção 2.9.2. Isto é, pretendia-se a medição do tempo de vida da luminescência numa fibra dopada com Érbio, quando esta era bombeada por um laser de 980nm.

### 3.4.1 ESQUEMA DE MONTAGEM

A montagem para esta simples experiência pode ser observada através da figura seguinte (Fig. 3.30). Note-se que para a realização deste esquema de montagem foram utilizados um laser de bombagem a 980nm, um driver de controlo da corrente fornecida ao laser, um WDM de 980/1550nm, um pedaço de fibra dopada com Érbio de aproximadamente 10m, e um detector óptico conectado a uma das entradas analógicas do Arduino.

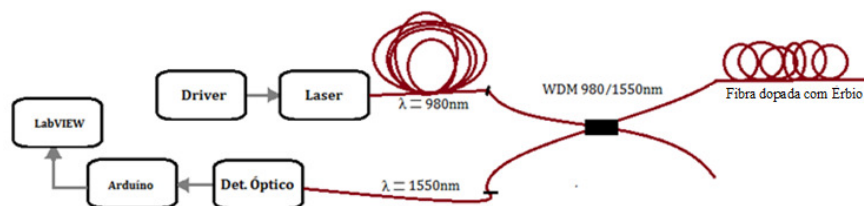


Fig. 3.30 - Esquema de montagem para se medir o tempo de vida numa fibra dopada com Érbio.

Refira-se que o detector óptico utilizado pertence à Universidade da Madeira. As suas especificações técnicas podem ser consultadas através da bibliografia indicada no capítulo 6 [34]. Em particular pode-se referir que a gama de tensões à saída do detector é de 0V a 10V, sendo a sua resistência interna à saída de 50Ω.

Assim e uma vez que o Arduino apenas lê valores de tensão entre 0V e 5V, montou-se um divisor de tensão à saída do detector, utilizando-se a resistência interna da saída e uma resistência de 50Ω colocadas em série, baixando assim gama de tensões à saída do detector para 0 a 5V.

### 3.4.2 CÓDIGO NO ARDUÍNO E CONFIGURAÇÃO DA TAXA DE AMOSTRAGEM

Uma vez que se pretendia visualizar um decaimento de cerca de 8ms, tornava-se necessária a manipulação do registo ADCSRA de forma a aumentar a frequência do ciclo do *clock* utilizado pelo Arduino, esperando-se com isso aumentar a taxa de amostragem do sinal analógico a ler.

O código desenvolvido no ambiente de programação do Arduino é um código extremamente simples e que pode ser consultado através do anexo 6.5.1. Uma nota importante que deve ser registada é que não foi possível configurar-se o factor de *prescale* para 2, uma vez que com tal configuração apenas foi lido ruído na aplicação em LabVIEW. Assim o factor de *prescale* utilizado foi de 4. Refira-se também que a velocidade de transmissão de dados utilizada para a comunicação entre o Arduino e o LabVIEW através da porta série foi de 38400bits/s, pois só assim foi possível obter-se uma taxa de amostragem média de uma leitura a cada 2,4ms.

### 3.4.3 LABVIEW

A aplicação desenvolvida no LabVIEW é uma aplicação bastante simples e que faz uso de algumas partes do código já comentadas e demonstradas. Isto é, foi utilizado o código do anexo 6.2.2.1 para se efectuar a aquisição dos dados através da porta série, e foi utilizada uma pequena pesquisa para se separar o valor das medições, uma vez que estas eram enviadas através da porta série separadas por uma vírgula. Após a leitura das medições o valor lido era colocado num gráfico em função do tempo. Finalmente era também utilizada a aplicação, já discutida na secção 3.2.3.1.3, para a gravação dos valores lidos no detector, e cujo código pode ser observado através da Fig. 6.19 do anexo 6.4.4.4.

## 4. Testes práticos e discussão dos resultados

---

Uma vez terminado o processo de desenvolvimento do sistema de medição e da interface com o computador, procedeu-se a uma série de testes práticos.

Em primeiro lugar começou-se por testar a comunicação entre o Arduino e o LabVIEW, efectuando-se vários testes, a fim de se perceber qual a taxa de amostragem máxima suportada.

Para os deflectómetros digitais, e uma vez que apenas foi desenvolvida uma interface entre os aparelhos e o LabVIEW, não sendo por isso necessário efectuar-se nenhum tipo de calibração, procedeu-se apenas a um simples teste, a fim de se verificar o tempo de resposta do sistema bem como a sua operacionalidade.

Em relação ao sistema de medição dos extensómetros, os testes desenvolvidos foram inicialmente no sentido de se testar o tempo de resposta do sistema, para posteriormente se tratar de calibrar o protótipo desenvolvido, usando como referência o sistema da NI utilizado actualmente nos laboratórios de Engenharia Civil.

Em relação à montagem óptica desenvolvida, efectuou-se apenas um pequeno teste com vista à determinação do tempo de vida da fluorescência da luz numa fibra dopada com Érbio, quando esta era bombeada por um laser.

### 4.1 Taxa de amostragem real de um Arduino Duemilanove

---

Tal como foi referido na sessão 2.8.3, a taxa de conversão A/D de um Arduino depende de diversos factores. Através de dois simples testes práticos foi testada, a taxa de amostragem real do Arduino Duemilanove, alterando-se para isso o respectivo valor do registo ADCSRA.

#### 4.1.1 TAXA DE AMOSTRAGEM DO ARDUÍNO A FUNCIONAR ISOLADAMENTE

Neste primeiro teste foi criada uma rotina no ambiente de programação do Arduino que contou o tempo que o Arduino demorou a ler e a converter 1000 medições de um sinal analógico que foi colocado à entrada. O código escrito para este ensaio pode ser consultado no anexo 6.1.

A tabela seguinte (Tabela 4.1) ilustra os valores obtidos para cada valor de *prescale* utilizado.

Tabela 4.1 - Valores reais da taxa de amostragem do Arduíno.

Factor de <i>prescale</i>	Tempo para ler 1000 medições (ms)	Média para cada medição (ms)	Frequência de amostragem (kHz)
2	4,972	0,004972	201
4	6,528	0,006528	153
8	10,048	0,010048	99,5
16	17,072	0,017072	58,6
32	30,124	0,030124	33,2
64	56,152	0,056152	17,8
128	112,104	0,112104	8,92

Como se pode observar através da tabela anterior, é possível obter-se no máximo uma frequência de amostragem de aproximadamente 201kHz, com o valor de *prescale* de 2.

Sabendo-se o valor teórico da frequência de *clock* para um factor de *prescale* de 2 e sabendo-se também que na conversão de um sinal analógico para um sinal digital o Arduíno efectua normalmente 13 ciclos, chega-se à conclusão que a frequência de amostragem teórica de um sinal analógico é de aproximadamente 615,38kHz para um factor de *prescale* de 2.

Comparando-se o valor teórico com o valor real obtido, chega-se à conclusão que o valor real é mais de 3 vezes inferior ao teórico. Note-se que os valores obtidos foram única e exclusivamente através do Arduíno, não sendo activado nenhum tipo de comunicação com mais nenhum dispositivo.

#### 4.1.2 TAXA DE AMOSTRAGEM DO ARDUÍNO COMUNICANDO COM O LABVIEW

De seguida e de forma a verificar se os valores obtidos na subsecção anterior correspondiam aos valores obtidos quando existia comunicação entre o Arduíno e o LabVIEW, testou-se a taxa de amostragem para vários factores de *prescale* e várias taxas de transferência de dados.

Após vários testes, chegou-se a duas conclusões no mínimo interessantes. A primeira foi de que não era possível configurar-se um factor de *prescale* de 2 no Arduíno com a comunicação com o LabVIEW a funcionar. A segunda foi de que a melhor taxa de amostragem possível era de 408,3Hz, para uma taxa de transferência da porta série (*baud rate*) de 38400bits/s, ou seja, o Arduíno apenas era capaz de processar e enviar uma medição de um sinal analógico a cada 2,45ms para o LabVIEW.

Conclui-se assim que os valores teóricos referentes à taxa de amostragem do Arduíno não correspondem minimamente à realidade. Pensa-se que este facto se deve ao processamento adicional que o microcontrolador realiza, para poder enviar os dados através da porta série.

## 4.2 Deflectómetros digitais

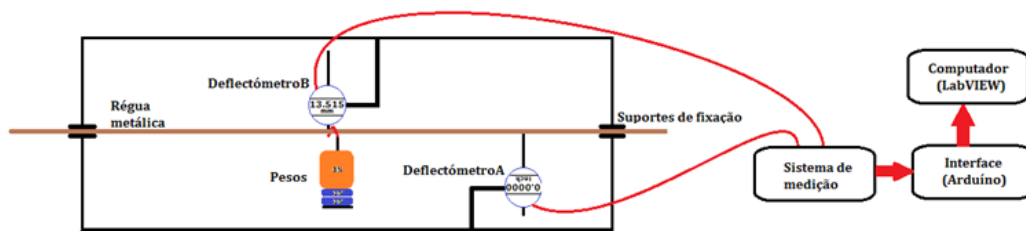
Uma vez que em relação aos deflectómetros digitais apenas foi objectivo desta tese o desenvolvimento da sua interface para o LabVIEW, o teste realizado em laboratório teve por base a verificação do tempo de resposta da interface em relação às alterações dos valores que apareciam nos *displays* dos aparelhos. Pretendia-se também registar os valores que eram recebidos, utilizando-se para isso a aplicação desenvolvida em LabVIEW que efectua o tratamento, a apresentação dos dados (em formato gráfico e num *display*) e o seu registo, em tempo real.

Uma vez que a taxa de aquisição de dados obtida no primeiro teste foi de apenas duas medições por segundo, no segundo teste procedeu-se ao registo dos dados que eram enviados pelos deflectómetros, tal como foi explicado na secção 3.2.3.2. Foi então possível comparar-se as diferentes taxas de amostragem dos dados registados, comparando-se as duas aplicações desenvolvidas.

Refira-se que a utilização da segunda aplicação não trouxe grandes vantagens, uma vez que a taxa de aquisição de dados obtida mostrou ser da mesma ordem de grandeza que a da primeira aplicação.

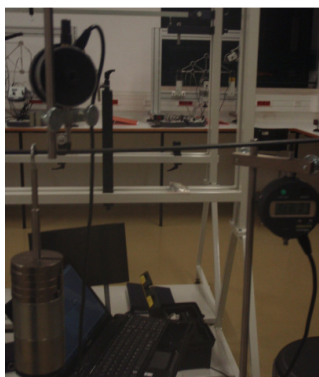
### 4.2.1 APLICAÇÃO DE TRATAMENTO E REGISTO DE DADOS EM TEMPO REAL

Neste primeiro teste ao sistema criado foi utilizada a aplicação discutida na secção 3.2.3.1 que efectuava a leitura das medições enviadas pelos dois deflectómetros, e ao mesmo tempo fazia o tratamento e apresentação dos resultados em formato gráfico. O esquema da montagem pode ser visualizado através da figura seguinte (Fig. 4.1).



*Fig. 4.1 - Esquema da montagem de teste da aplicação de tratamento e registo de dados dos deflectómetros em tempo real.*

A figura seguinte (Fig. 4.2) mostra uma fotografia da montagem aquando da realização do teste.



*Fig. 4.2 - Fotografia da montagem de teste da aplicação de tratamento e registo de dados dos deflectómetros em tempo real.*

Após se verificar que tudo estava correctamente ligado, colocou-se o deflectómetro A numa posição em que era possível ler o valor de 0,00000 polegadas, para que à medida que a régua metálica se dobrasse, o valor lido aumentasse. Para o deflectómetro B, e sabendo-se que à medida que a régua metálica se dobrasse, esta iria afastar-se dele, colocou-se o deflectómetro numa posição onde fosse possível ler-se um valor elevado (13,5150 mm iniciais), sendo que este valor iria diminuir à medida que eram colocados pesos na régua.

Configuradas as posições dos deflectómetros colocou-se então a aplicação a correr. Os pesos colocados na régua possuíam valores pré-calibrados de 1N e 5N, o que corresponde a cerca de 100 e 500gr, respectivamente. Note-se que o suporte no qual eram acrescentados os pesos possuía um peso de 100 gr. A tabela seguinte (Tabela 4.2) indica os pesos colocados no suporte que, como se pode visualizar através das duas figuras anteriores (Fig. 4.1 e Fig. 4.2), ficou colocado ao lado do deflectómetro B, ou seja, aproximadamente a meio da régua metálica. Na tabela seguinte podem-se também observar as leituras registadas através da simples visualização dos valores que eram lidos nos *displays* dos deflectómetros digitais.

*Tabela 4.2 - Medições lidas nos deflectómetros no teste da aplicação de tratamento e registo de dados em tempo real.*

<b>Pesos (N)</b>	<b>Deflectómetro A (polegadas)</b>	<b>Deflectómetro B (mm)</b>
<b>0N (sem peso)</b>	0,0000	13,515
<b>6N</b>	0,0880	8,1320
<b>11N</b>	0,1485	3,9810
<b>12N</b>	0,1545	3,4410
<b>13N</b>	0,1635	2,6700
<b>14N</b>	0,1690	2,1700
<b>16N</b>	0,1835	0,8790
<b>17N</b>	0,1885	0,3050
<b>18N</b>	0,1915	0,0000

Como se pode verificar através da tabela anterior, e tal como previsto, o valor das medições apresentadas pelo deflectómetro A tende a subir, à medida que eram colocados mais pesos no suporte, enquanto no deflectómetro B os valores visualizados tendiam a descer.

De forma a comparar-se o que foi visualizado com o que foi registado, abriu-se então o ficheiro de registo e elaborou-se o gráfico da figura seguinte (Fig. 4.3).

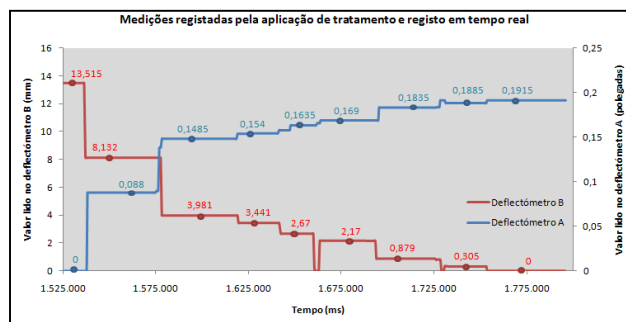


Fig. 4.3 - Gráfico das medições registadas pela aplicação de tratamento e registo em tempo real.

Através da análise da figura anterior pode-se observar que o tempo das medições não começa a partir dos 0 milissegundos, mas sim a partir dos 1525000ms, aproximadamente. Uma vez que o *timer* do LabVIEW, em milissegundos, começa a correr mal é aberto o programa, o tempo inicial do registo de uma aplicação nunca será igual a 0ms. No entanto, e desde que seja registado com rigor o tempo decorrido entre cada medição, torna-se irrelevante se estes começam a zero ou não.

Outra observação que pode ser feita é o facto de que, no gráfico anterior, é possível visualizar as alterações dos valores à medida que eram acrescentados os pesos. Esse facto é mais notório na passagem do peso de 13N para 14N, no gráfico do deflectómetro B.

Em relação ao tempo de amostragem, e após ter sido calculada a média da diferença de tempo entre medições, verificou-se que, para o deflectómetro B, o valor médio do tempo entre leituras era de aproximadamente 500,462ms, ao passo que para o deflectómetro A, o valor do tempo médio entre leituras era de 500,549ms. Como se pode verificar, o tempo médio de leitura nos dois deflectómetros é aproximadamente igual.

Pôde-se então concluir que o sistema criado era capaz de efectuar em média duas leituras por segundo, se fossem utilizados os dois deflectómetros ao mesmo tempo.

Resta acrescentar que a aplicação desenvolvida foi criada a pensar na utilização dos dois deflectómetros em simultâneo, sendo por isso realizado apenas testes rigorosos com essa configuração.

Como curiosidade, foi no entanto testado o sistema colocando-se apenas um deflectómetro ligado ao sistema, sendo que os resultados obtidos vão de encontro aos resultados discutidos anteriormente, nomeadamente em termos de tempo médio entre medições. Esse resultado pode ser explicado pelo facto de, como foi referido anteriormente, embora se tivesse apenas um deflectómetro ligado, o sistema e a programação utilizados foram desenvolvidos tendo em vista a utilização de dois

deflectómetros ao mesmo tempo, sendo por isso gasto o tempo do ciclo de leitura do segundo deflectómetro.

#### 4.2.2 APLICAÇÃO DE REGISTO DE DADOS SEM TRATAMENTO EM TEMPO REAL

Tal como foi referido na secção 3.2.3.2, a aplicação de registo de dados sem tratamento era composta por duas partes, a gravação das leituras, sem que lhes fosse efectuado nenhum tratamento, e o tratamento e nova gravação já com os dados gravados correctamente. Dessa forma, e uma vez que nenhum tratamento é realizado aquando da leitura das medições, era de esperar que a velocidade de leitura dos dados recebidos fosse superior à da aplicação da secção anterior.

Uma vez que o processo de recolha de dados era idêntico ao da secção anterior, a montagem efectuada foi igual, utilizando-se também os mesmos pesos. Para não se repetir a mesma experiência foi efectuada uma alteração na forma como eram efectuadas as leituras, isto é, foi-se aumentando os pesos da mesma maneira que na secção anterior, alterando-se no final o sinal do deflectómetro B. Em seguida, retiraram-se os pesos mantendo a ordem, mas de forma inversa.

A tabela seguinte (Tabela 4.3) mostra como foi efectuada a colocação dos pesos, bem como o ponto em que foi alterado o sinal do deflectómetro B. Na tabela seguinte podem-se também encontrar os valores registados no local através da visualização dos valores apresentados pelos deflectómetros A e B, à medida que se iam trocando os pesos.

*Tabela 4.3 - Medições lidas nos deflectómetros no teste da aplicação de registo de dados em tempo real mas sem tratamento das medições.*

<b>Pesos (N)</b>	<b>Deflectómetro A (polegadas)</b>	<b>Deflectómetro B (mm)</b>
<b>0N (sem peso)</b>	0,0000	13,515
<b>6N</b>	0,0845	7,955
<b>11N</b>	0,1705	2,996
<b>12N</b>	0,1820	2,409
<b>13N</b>	0,1875	2,058
<b>14N</b>	0,1965	1,587
<b>16N</b>	0,2140	0,629
<b>17N</b>	0,2210	0,249
<b>18N</b>	0,2255	-0,001
<b>Mudança do sinal do deflectómetro B</b>		
<b>18N</b>	0,2255	0,001
<b>17N</b>	0,2245	-0,131
<b>16N</b>	0,2150	-0,601
<b>14N</b>	0,2005	-1,412
<b>13N</b>	0,1930	-1,838
<b>12N</b>	0,1835	-2,343
<b>11N</b>	0,1760	-2,763
<b>6N</b>	0,0940	-7,457
<b>0N (sem peso)</b>	0,0000	-13,515

Através de uma simples observação da tabela anterior pode-se facilmente concluir que os valores registados visualmente, não são idênticos aos valores da Tabela 4.2. Tal

disparidade de valores pode ser explicada devido ao facto do suporte dos pesos poder não ter ficado exactamente na mesma posição que na montagem da secção anterior. Outra observação que pode ser retirada da tabela anterior é de que quando foi colocado um peso de 18N sobre a régua, o valor exibido no deflectómetro B passa a ser negativo.

Uma vez registados os valores com a aplicação desenvolvida e, sem qualquer tipo de tratamento, efectuou-se então o seu tratamento, utilizando-se a segunda parte da aplicação desenvolvida e explicada na secção 3.2.3.2.2. Os dados tratados podem ser visualizados através da figura seguinte (Fig. 4.4), que mostra a evolução dos valores de ambos os deflectómetros nas duas partes da experiência.

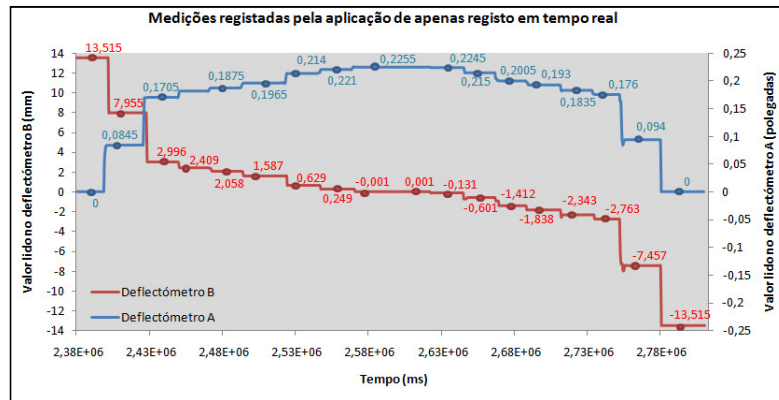


Fig. 4.4 - Gráfico das medições registadas pela aplicação de registo sem tratamento de dados.

Como se pode concluir através da análise da figura anterior, as medições registadas e depois tratadas correspondem realmente às medições visualizadas no *display* dos deflectómetros digitais e registadas na Tabela 4.3, estando por isso as aplicações criadas a funcionar correctamente.

Em relação ao valor do tempo médio de leitura e registo dos valores lidos dos deflectómetros sem que se tenha efectuado nenhum tipo de tratamento, pode-se referir que para o deflectómetro B o valor calculado foi de aproximadamente 499,498ms, ao passo que para o deflectómetro A o valor calculado foi de aproximadamente 499,494ms. Ou seja, verificou-se novamente que as médias dos tempos de medição de ambos os deflectómetros eram aproximadamente iguais.

Em relação à comparação entre os valores das médias dos tempos de leitura, para a aplicação de leitura, tratamento e gravação de dados e a aplicação de leitura e gravação de dados, pode-se concluir que para a segunda aplicação as médias calculadas foram inferiores, tal como previsto no início desta secção, muito embora a diferença entre elas tenha sido mínima (aproximadamente 1ms).

Assim e uma vez testadas as duas aplicações desenvolvidas, torna-se óbvio que a utilização da primeira aplicação deve ser preferencial pois, muito embora demore em média mais 1ms a efectuar uma leitura, esse valor torna-se insignificante comparado

com a possibilidade de se visualizar, no painel de controlo da primeira aplicação, as variações dos valores lidos nos dois deflectómetros em tempo real e em formato gráfico.

### 4.3 Sistema de medição de extensómetros

---

Passou-se de seguida para os testes com o sistema de medição de extensómetros. Inicialmente realizaram-se testes com o objectivo de calibrar o sistema desenvolvido, por comparação com o sistema da NI. Em seguida efectuaram-se testes para averiguar a estabilidade e a repetibilidade dos resultados.

#### 4.3.1 MONTAGEM UTILIZADA

Antes de se começar a efectuar qualquer tipo de medições começou-se por preparar a montagem a utilizar em todas elas. Para tal montou-se, em cima de uma mesa do laboratório de Engenharia Civil, uma régua de plástico (para ser mais maleável), de 50cm, fixa nas duas extremidades, de modo a que esta estivesse afastada do plano da mesa cerca de 10cm.

Após a montagem, procedeu-se à fixação dos extensómetros à régua de plástico. Note-se que os dois extensómetros que iam registar as deflexões da régua de plástico foram colados ao lado um do outro, a meio da régua, de modo que estes registassem os mesmos valores de deformação. Para colar os extensómetros à régua foi utilizada uma cola de contacto própria, fornecida pelo Prof. Dr. Paulo França, sendo estes depois isolados com fita isoladora. Um desses extensómetros foi ligado ao sistema da NI, sendo o outro ligado ao protótipo desenvolvido.

Para iniciar as medições era necessário efectuar-se o ajuste a zero dos dois sistemas de medição. Isto é, após conectar os dois extensómetros aos respectivos canais de medição, era necessário inicializar as aplicações em LabVIEW de cada um deles e ajustar a zero (ponto sem deflexão) os valores que estavam a ser recebidos. No sistema da NI o ajuste do zero do sistema, era efectuado através do botão “zerar” que se encontra na aplicação LabVIEW do sistema, e que coloca o valor que está a medir aproximadamente a zero. No caso do protótipo de medição criado o ajuste do zero era efectuado através do ajuste do potenciómetro que regula a tensão que é colocada na entrada não inversora do amplificador operacional LM741, ou seja, era ajustado o potenciómetro de calibração do canal de medição que se estava a utilizar, de maneira que à saída se obtivesse um valor de aproximadamente 512 (metade dos 1024 níveis de quantização possíveis), o que significa que se teria à saída o valor de 2,5V.

Uma vez ajustados os sistemas e com ambas as aplicações a correr, foi iniciada a colocação gradual de pesos em cima da régua de plástico. O esquema da montagem descrito anteriormente, com a colocação de pesos em cima da régua, pode ser observado através na figura seguinte (Fig. 4.5).

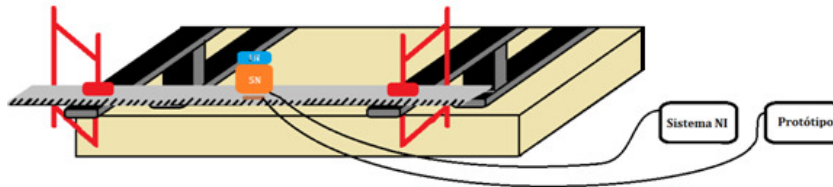


Fig. 4.5 - Esquema da montagem com a colocação gradual de pesos em cima da régua de plástico.

Como se pode observar através da figura anterior, os testes efectuados ao sistema de medição tiveram sempre o acompanhamento do sistema da NI, para se verificar se eram lidas as mesmas deformações em ambos os sistemas de medida, uma vez que o protótipo de medição criado ainda não havia sido calibrado.

Note-se que apenas foi ligado um extensómetro a cada sistema de medição. Como tal, apenas foi utilizado um canal de medição de cada um dos aparelhos. No caso do sistema de medição criado, e de forma a se testar a operacionalidade dos três canais que este possui, foram-se alterando aleatoriamente os canais de medição utilizados, verificando-se assim a operacionalidade de todo o sistema.

Iniciada a colocação gradual de pesos em cima da régua de plástico, tal como descrito no esquema da Fig. 4.5, foram registados os valores medidos, por ambos os sistemas, durante um período de tempo de aproximadamente 20s, sendo depois efectuada a média dos valores para cada peso colocado. De seguida, e de forma a se obter o registo da deformação da régua no sentido oposto, foi virada a régua e repetida a experiência.

A figura seguinte (Fig. 4.6) ilustra o gráfico das várias medições.

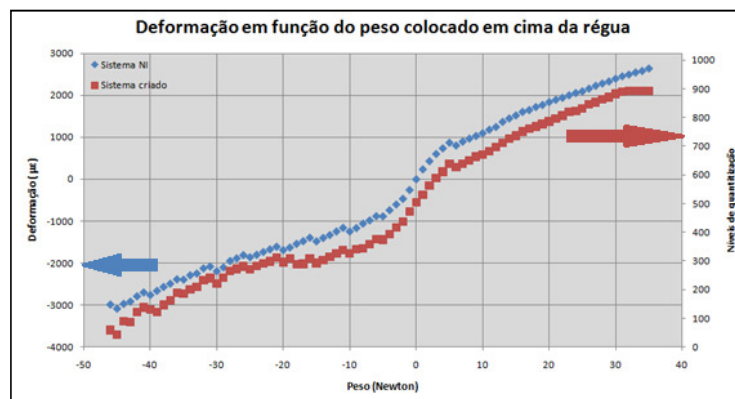


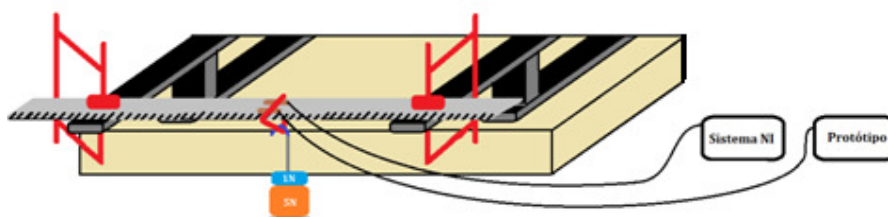
Fig. 4.6 - Gráfico da deformação em função do peso colocado em cima da régua.

Como se pode observar através do gráfico da figura anterior, a variação do valor da deformação não foi linear, nem na deflexão positiva nem na deflexão negativa. É possível inclusive detectar-se variações de sentido oposto na deflexão negativa do sistema, o que indica que o teste efectuado não foi de forma nenhuma o ideal para se poder testar e calibrar o sistema de medição desenvolvido. Pensa-se que essas variações

indesejadas se devem às diferentes dimensões dos pesos utilizados, que afectavam de forma diferentes os extensómetros. Por esse motivo não foi efectuada nenhuma calibração ao sistema desenvolvido. É no entanto notório o facto de que o sistema desenvolvido acompanha de forma correcta o sistema da NI.

Outra observação que deve ser registada, apesar de não ser visível no gráfico, mas apenas através da análise dos ficheiros obtidos, foi o facto de o protótipo de medição ter, durante este primeiro teste, efectuado uma média de 18,8 medições por segundo, ao passo que o sistema da NI efectuava apenas duas medições. Tal facto demonstra que o sistema de medição criado era de facto mais rápido a retirar medições do que o sistema da NI, e vem de acordo com um dos objectivos desta tese, ou seja, a criação de um sistema de medição que efectuasse muitas mais medições por segundo que o sistema da NI. Foi então desenvolvida uma pequena rotina em LabVIEW capaz de retardar as medições, de acordo com a preferência do utilizador, e cujo controlo pode ser observado na Fig. 3.25 da secção 3.2.3.1.4, onde é discutido o painel principal da aplicação desenvolvida.

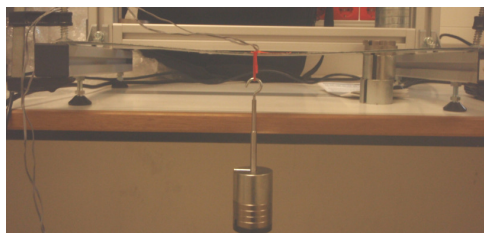
Para tentar melhorar os resultados obtidos, eliminando as variações inesperadas, passou-se então, nos testes seguintes a colocar os pesos num suporte montado por baixo da régua de plástico, como descrito pelo esquema da figura seguinte (Fig. 4.7).



*Fig. 4.7 - Esquema da montagem dos testes ao sistema de medição desenvolvido.*

Note-se que o suporte para os pesos que se encontravam suspensos estava afastado da mesa, de modo a que este não tocasse na mesa nem em nenhuma outra superfície, ficando assim suspenso da régua por uma fita de plástico.

A figura seguinte (Fig. 4.8) mostra uma fotografia da montagem.



*Fig. 4.8 - Fotografia da montagem para testar o sistema de medição criado.*

De seguida foram efectuados vários de testes, não só para se verificar a funcionalidade do sistema criado mas também para o calibrar, de acordo com o sistema da NI.

### 4.3.2 VARIAÇÃO CONSTANTE DE PESO

Utilizando-se a montagem descrita na secção anterior, começou-se por repetir o teste de colocação de diferentes pesos na régua. Tal como foi efectuado no teste anterior e antes de se colocar o suporte para os pesos sobre a régua, foram ajustadas a zero as medições que se estavam a realizar em ambos os sistemas. Depois, foram colocados progressivamente pesos no suporte que ficou colocado por baixo da régua, sendo que o próprio suporte possuía um peso de 100gr, ou seja, aproximadamente 1Newton.

A figura seguinte (Fig. 4.9) mostra os resultados obtidos com os dois sistemas de medição. Para se calcular o erro entre as medições efectuadas com os dois sistemas de medida utilizou-se a equação seguinte:

$$\frac{\text{Valor calibrado} - \text{Valor sistema NI}}{\text{Valor sistema NI}} = \text{erro entre os dois sistemas (\%)} \quad (4.1)$$

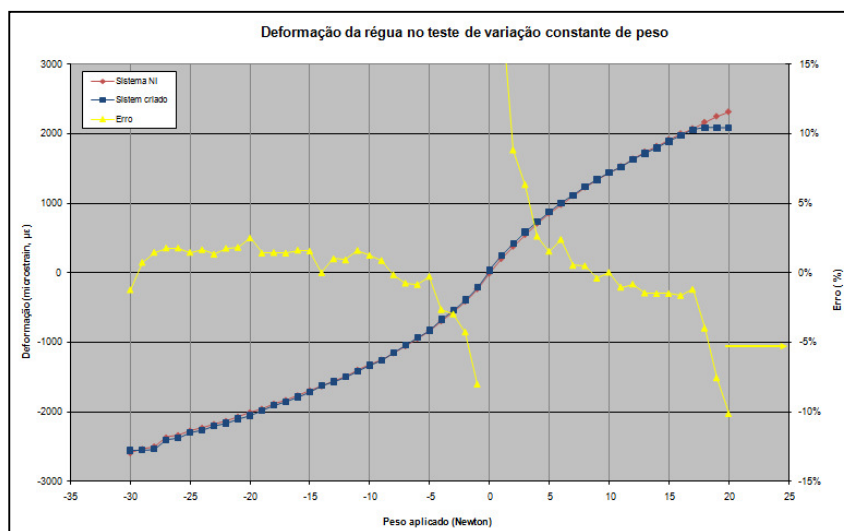


Fig. 4.9 - Gráfico da variação dos valores medidos pelo sistema criado e pelo sistema da NI.

Sabendo-se que os valores obtidos pelo protótipo do sistema de medição encontram-se na gama de valores de 0 a 1024 (níveis de quantização utilizados pelo conversor A/D), teve-se de calibrá-los de acordo com o sistema da NI. Para tal, e em primeiro lugar ajustaram-se os valores obtidos pelo protótipo de modo a que estes reflectissem as deflexões negativas e positivas, subtraindo-se o valor medido pelo valor constante de 512. Após a subtração multiplicou-se o valor obtido por uma constante, que será a partir deste ponto denominada de constante de calibração.

Várias observações podem ser feitas em relação aos resultados obtidos:

1. A primeira é de que os sistemas de medição apresentaram resultados aproximados, o que significa que estavam ambos a medir a mesma deformação (ou seja, os dois extensómetros estavam bem colocados). Note-se que ambas as curvas do gráfico da deformação da régua, medidas pelos dois

sistemas não eram lineares, pois para valores de peso superiores estas tendem a variar pouco quando comparadas com a sua variação inicial.

2. O sistema de medição criado apresentou um valor de calibração fixo para a deflexão positiva e negativa de 5,2.
3. A terceira observação é de que o sistema criado saturou para valores de deformação superiores a 2000  $\mu\epsilon$ .
4. O erro calculado apresentou valores aceitáveis (abaixo dos 2,5%) em toda a gama de valores, excepto para valores de deformação superiores às 2000  $\mu\epsilon$  (saturação do sistema de medição criado) e para valores próximos de 0. O erro dos valores medidos perto do ponto de repouso (sem peso sobre a régua) pode ser justificado por um eventual mau ajuste de zero, feito ao  $V_{ref}$  do sistema criado ou ao sistema da NI, no início das medições. Uma vez que foi necessário virar a régua de forma a se testar a deformação do lado contrário ao inicial e uma vez que nessa mudança foi necessário ajustar-se novamente a zero nos dois sistemas, tal processo poderá ter causado o elevado erro entre as duas medições no ponto de repouso.

Assim pode-se concluir que o teste realizado foi um sucesso, uma vez que foi possível calibrar o sistema de medição criado de acordo com os valores medidos pelo sistema da NI.

Pode-se também concluir que o erro calculado entre as duas medições era também ele bastante bom, na medida em que apresentou valores aceitáveis, exceptuando-se a região próxima de 0, o que pode ter tido origem no ajuste de zero inicial de ambos os sistemas de medição. Isto significa que o sistema criado demonstrou ser capaz de medir com exactidão razoável, o mesmo valor de deformação que o valor medido pelo sistema da NI.

#### 4.3.3 VARIAÇÃO ALEATÓRIA DA DEFORMAÇÃO

Este segundo teste aos sistemas de medição foi dividido em quatro partes. A diferença entre as duas primeiras partes do teste refere-se aos extensómetros utilizados pelos dois sistemas, ou seja, da primeira parte para a segunda, foi trocado o extensómetro do sistema da NI para o sistema de medição criado e vice-versa.

Para a terceira e quarta parte foi repetido o procedimento utilizado nas duas partes anteriores, sendo que, foi trocada a posição da régua de plástico, ou seja, foi invertido o lado em que ficava apoiada a fita que segurava o suporte para os pesos.

Refira-se que neste segundo teste foi também efectuada uma escolha prévia dos pesos a colocar sobre a régua, de forma a não saturar o sistema como havia ocorrido no teste anterior, ou seja, o sistema foi testado para valores abaixo dos 2000 $\mu\epsilon$ . Dessa forma foram medidas novamente as deformações sentidas pelos dois extensómetros, com os dois sistemas de medição a funcionar em paralelo, sendo que neste caso não foi parado o registo de dados para se registarem as deformações no sentido oposto. Para se efectuar um registo em tempo real da deformação em ambos os sentidos, foram colocados apoios por debaixo da régua de plástico, de forma a elevá-la quando se pretendia efectuar a medição da deformação no sentido oposto aos dos pesos.

Note-se que antes de se efectuar qualquer registo dos valores obtidos pelos dois sistemas foi necessário efectuar-se o ajuste dos zeros iniciais. Os resultados obtidos na primeira parte do teste podem ser observados através da figura que se segue (Fig. 4.10).

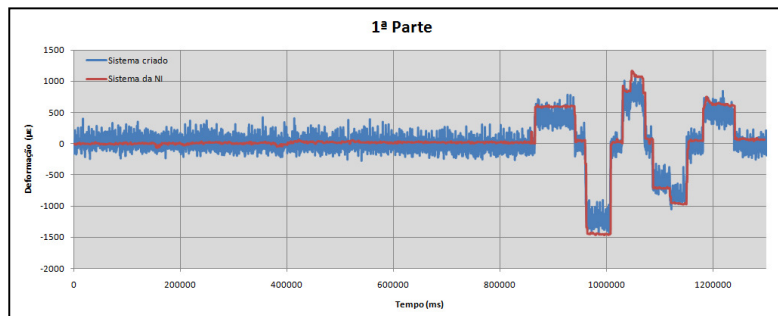


Fig. 4.10 - Variação aleatória da deformação (1ª parte).

Como se pode observar no gráfico da figura anterior, os dados obtidos pelo sistema de medição criado estão já tratados, ou seja, os dados registados estão calibrados com um factor de calibração de 5,2, tal como havia ocorrido no teste da secção anterior. Note-se que durante a parte inicial do ensaio a régua foi deixada na posição de repouso, para se verificar se as medições efectuadas pelo sistema de medição desenvolvido variavam (variação essa que não ocorreu).

Ainda em relação aos resultados da primeira parte do segundo ensaio pode-se realçar o facto de que muito embora o sistema tenha registado a deformação sentida pelos extensómetros, tal como o sistema da NI, os dados obtidos apresentaram bastante ruído, ou seja, existe uma variação muito grande dos valores registados num intervalo de tempo curto.

Depois e de forma a testar-se o sistema com o outro extensómetro, trocaram-se os extensómetros que se estavam a utilizar nos dois sistemas e efectuou-se uma vez mais o teste realizado anteriormente.

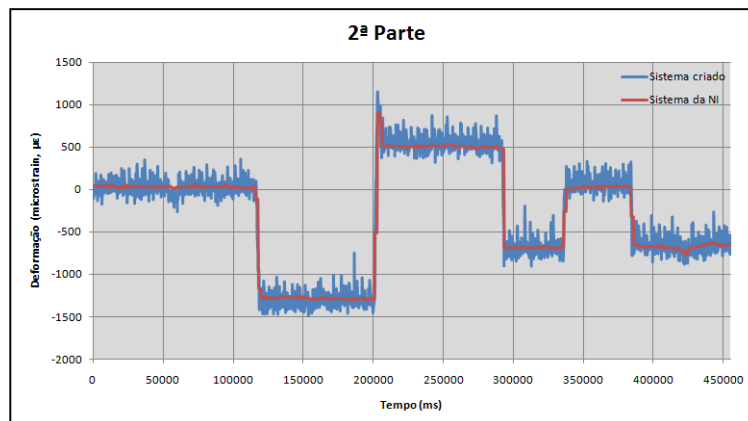


Fig. 4.11 - Variação aleatória da deformação (2ª parte).

Uma vez mais pode-se verificar que os valores registados pelo sistema de medição criado apresentaram mais ruído que o sistema da NI. No entanto é importante constatar que o sistema de medição criado acompanhou com rigor as deformações sentidas pelo extensómetro, uma vez que o sistema da NI apresentou resultados semelhantes. Uma vez mais e nesta segunda parte, os dados recolhidos pelo sistema de medição criado foram calibrados utilizando a mesma constante de calibração. Estes resultados vêm confirmar os resultados anteriores, ou seja, de que era possível calibrar-se o sistema de medição criado através da comparação com o sistema da NI, multiplicando-se os valores medidos por uma constante de 5,2.

Para a terceira parte do segundo teste de medição testou-se antes de mais, e agora com os extensómetros colocados na face oposta da régua, se ocorria alguma oscilação dos valores medidos para ambos os sistemas medição ao longo de um período de tempo mais longo que nos testes anteriores (aproximadamente 16 minutos). A figura seguinte (Fig. 4.12) ilustra o gráfico das medições efectuadas para ambos os sistemas.

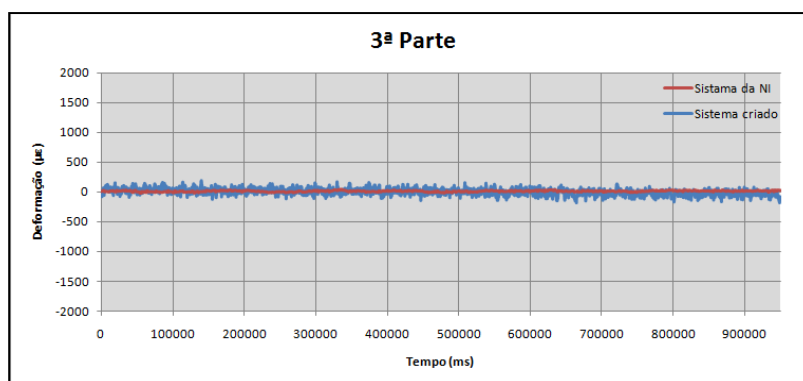


Fig. 4.12 - Variação aleatória da deformação (3ª parte).

Observando o gráfico da figura anterior verifica-se que existe menos ruído no sistema de medição criado, quando comparado com os gráficos das medições anteriores. Tal efeito pode ser explicado pela posição onde se encontrava a fita de plástico que servia de suporte para os pesos, e que nos dois testes anteriores estava directamente em cima dos extensómetros.

Assim, e como nesta parte do teste essa fita se encontrava directamente apoiada sobre a régua, pois os extensómetros estavam por baixo da régua, esta não exercem directamente nenhuma pressão sobre os extensómetros, sendo esse efeito mais notório nas medições do sistema de medição criado. Em relação à constante de calibração utilizada, pode-se referir que uma vez mais foi utilizado o valor de 5,2 para se multiplicar pelo valor das medições efectuadas.

Quanto à quarta parte do segundo teste efectuado, e de forma a perceber-se também a evolução da deformação da régua de plástico estando esta suspensa ao contrário, testou-se uma vez mais os dois sistemas de medição, alterando aleatoriamente os valores dos pesos colocados sobre a régua, bem como a altura dos apoios que eram colocados por baixo da régua a fim de a levantar.

A figura seguinte (Fig. 4.3) ilustra os resultados obtidos para os dois sistemas de medição.

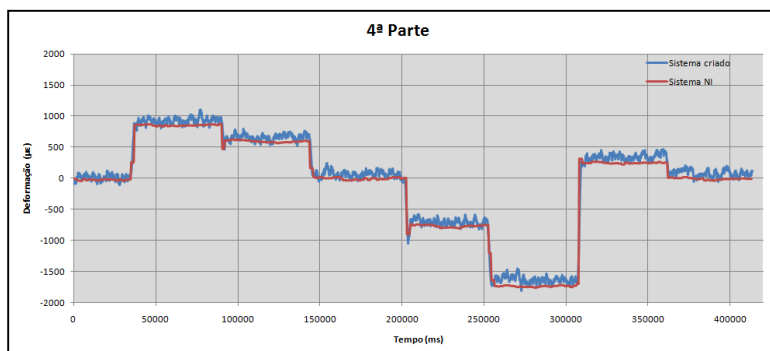


Fig. 4.13 - Variação aleatória da deformação (4ª parte).

Muito embora o ruído presente nas medições do protótipo de medição continue a ser significativo, quando comparado com o ruído presente nas medições do sistema da NI, este diminuiu significativamente em relação aos testes das duas primeiras partes deste teste. Uma vez mais, a única explicação para a diminuição do ruído poderá ser o facto de que agora a fita que segura o suporte para os pesos não estava a fazer contacto directo com os extensómetros.

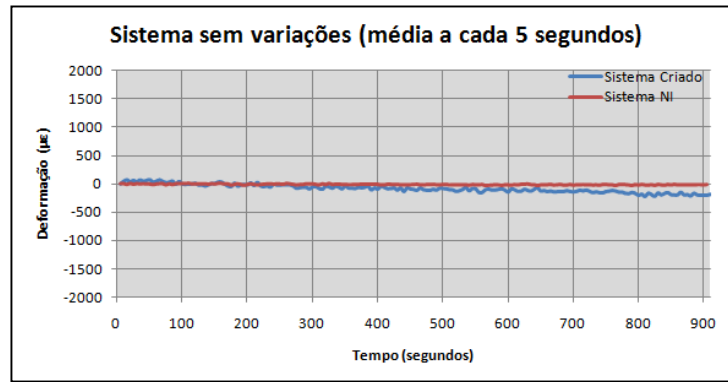
Quanto ao valor utilizado para se calibrar o protótipo de medição, foi novamente utilizado um valor constante de 5,2 sendo por isso finalmente concluído que, para se obter uma medição segundo a escala utilizada pelo sistema da NI, deverá multiplicar-se o valor obtido no sistema de medição criado pelo valor de 5,2.

#### 4.3.4 COMPORTAMENTO DOS SISTEMAS DE MEDIÇÃO EM REPOUSO

Uma vez que se pretendia que o sistema criado se comportasse de forma constante ao longo do tempo, testou-se o sistema durante longos períodos de tempo, sendo que para isso, a régua à qual estavam colados os extensómetros dos dois sistemas foi retirada dos apoios, deixando-se a mesma imóvel sobre a bancada de trabalho do laboratório de Engenharia Civil.

Note-se que como foram efectuados testes de longa duração, e como tal registadas muitas medições em cada teste (o sistema de medição efectuava aproximadamente 18 medições por segundo), teve-se de recorrer à aplicação para efectuar a média das medições (discutida na secção 3.3.6.2) durante intervalos de tempo específicos, neste caso a cada 5 segundos, afim de se puder desenhar os gráficos que ilustram as medições.

Neste primeiro teste colocaram-se ambos os sistemas de medição a gravar dados durante aproximadamente 15 minutos, com a régua em repouso sobre a mesa.



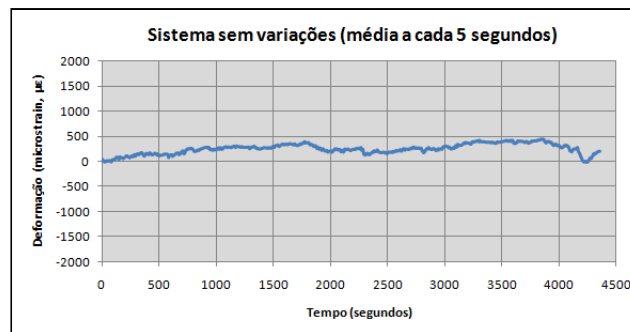
*Fig. 4.14 - Dados registados por ambos os sistemas com a régua em repouso (média a cada cinco segundos).*

Naturalmente, devido ao efeito das médias, observa-se uma diminuição do ruído, no entanto o principal facto a referir é a variação dos valores registados pelo sistema de medição criado. Como se pode observar os valores registados pelo sistema de medição criado tendiam a diminuir ao longo do tempo, enquanto o sistema da NI apresentava dados aproximadamente constantes.

A fim de se tentar perceber se a variação dos dados medidos teria origem no facto de estarem ambos os sistemas a funcionar, e de algum modo o extensómetro do sistema da NI influenciar o extensómetro do sistema desenvolvido, desligou-se o sistema da NI, registando-se apenas os dados recolhidos pelo sistema desenvolvido, durante um longo período de tempo.

Assim, e de forma a tentar recolher-se o máximo de informação sobre a variação detectada, deixou-se o sistema criado a funcionar sozinho durante um período de tempo de aproximadamente uma hora e quinze minutos.

Os dados recolhidos foram então tratados, com a aplicação que efectua as médias das medições registadas sendo o resultado final apresentado através da figura seguinte, que ilustra a média dos dados registados a cada 5 segundos.

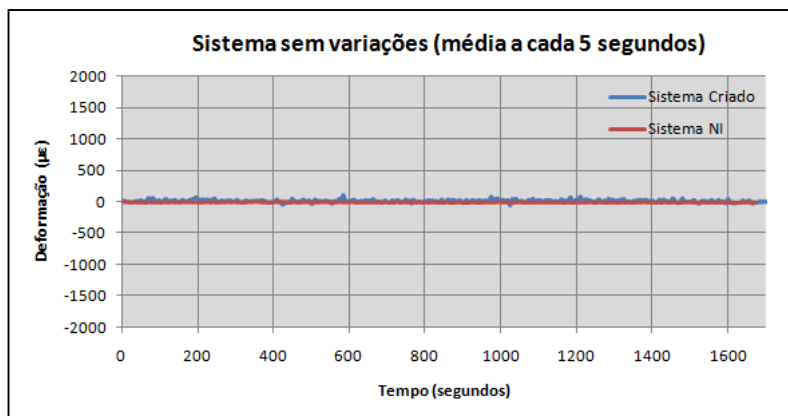


*Fig. 4.15 - Dados registados pelo sistema criado com a régua em repouso (média a cada 5 segundos).*

Uma vez mais pode-se constatar que as médias efectuadas reduziram de facto o ruído, mas no entanto, confirmou-se também que o sistema ao longo do tempo apresentava variações que em nada correspondiam à deformação do extensómetro, uma vez que durante todo o período de medição este encontrava-se imóvel sobre a mesa do laboratório, e sem nenhuma influência exterior.

Assim, pensou-se noutras causas possíveis que justificassem a variação descontrolada dos valores registados, chegando-se a uma hipótese. Uma vez que a alimentação do sistema de medição era realizada através do Arduino, e como o Arduino por sua vez era alimentado através da porta USB à qual estava conectado, o problema talvez fosse causado pela corrente insuficiente que era fornecida pela porta USB ao sistema de medição.

Para se testar esta teoria recorreu-se a um outro teste de longa duração, colocando-se o  $V_{ref}$  dos restantes canais, que não estavam a ser utilizados, no seu mínimo, para que fosse gasto o mínimo de corrente possível. A figura seguinte ilustra uma vez mais o gráfico das médias efectuadas ao longo do tempo, para um teste de aproximadamente 28 minutos. Note-se que, como foi colocada de parte a hipótese de ser o sistema da NI o causador da interferência, para o teste realizado, foram utilizados ambos os sistemas de medição a registar valores ao mesmo tempo. A Fig. 4.16 demonstra o êxito na eliminação da variação aleatória dos valores medidos pelo protótipo.



*Fig. 4.16 - Dados registados por ambos os sistemas com a régua em repouso (média a cada 5 segundos).*

De forma a confirmar os bons resultados obtidos anteriormente, repetiu-se uma vez mais o teste efectuado, a fim de se verificar se era possível reproduzirem-se os resultados obtidos, agora durante um período de tempo superior, ou seja, aproximadamente 40 minutos (quase 2500s).

A figura seguinte ilustra o gráfico obtido, sendo outra vez utilizados os dois sistemas, e a aplicação de cálculo das médias, de forma a ser mais fácil comparar os resultados.

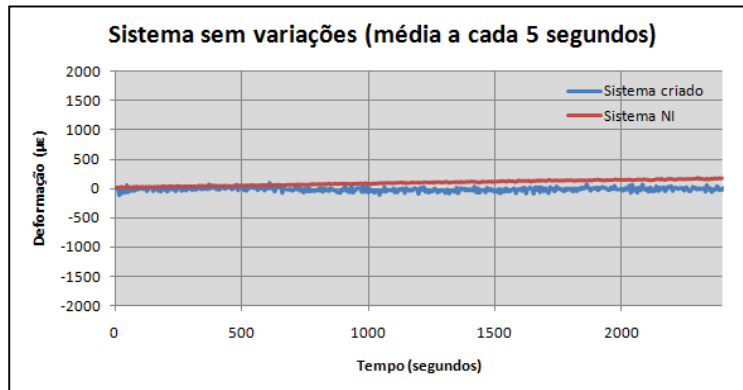


Fig. 4.17 - Dados registados por ambos os sistemas com a régua em repouso (média a cada 5 segundos).

Como se pode observar pelo gráfico da figura anterior, o sistema criado não apresentou nenhuma alteração ao longo do tempo, excepto o ruído da medição que acompanhou todos os testes. Como tal, pôde-se então concluir que o problema observado foi resolvido através da eliminação da corrente que atravessava os canais de medição que não estavam a ser utilizados.

No entanto a maior surpresa dos resultados foi o comportamento do sistema da NI, que apresentou resultados no mínimo suspeitos e que em nada correspondem à realidade do teste, uma vez que a régua esteve sempre parada sobre a mesa do laboratório.

De forma a confirmar se o sistema da NI estava de alguma forma a trabalhar de forma deficiente, resolveu-se submetê-lo a um teste também ele de longa duração. Como tal, e uma vez mais, efectuou-se um teste com a régua parada em cima da bancada do laboratório apenas com o sistema da NI a funcionar, de forma a comprovar-se se este ao longo do tempo apresentava variações. Note que o teste efectuado durou aproximadamente 13 horas seguidas. A figura seguinte ilustra os resultados obtidos, após terem sido submetidos à aplicação que efectua as médias.

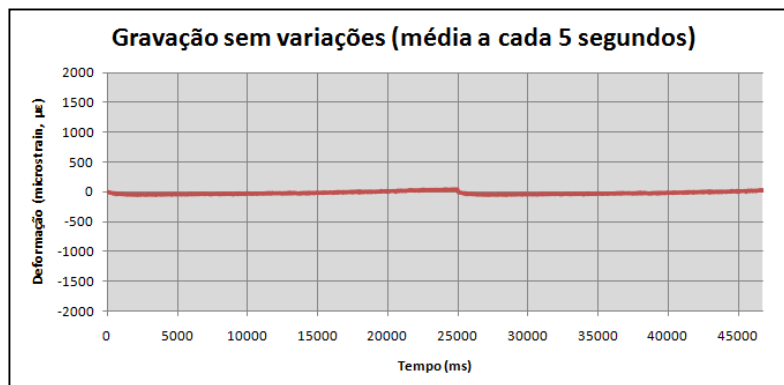


Fig. 4.18 - Dados registados pelo sistema da NI com a régua em repouso (média a cada 5 segundos).

Como se pode observar através da figura anterior, existiu de facto uma variação ao longo do tempo das medições efectuadas pelo sistema da NI. No entanto a variação verificada neste teste de longa duração é consideravelmente menor que a variação verificada no teste da Fig. 4.17, pelo que não foi possível determinar a causa do que ocorreu no ensaio anterior.

## 4.4 Medição do tempo de vida do Érbio

Antes de se efectuar qualquer tipo de teste, e após ter sido montado o esquema da Fig. 3.30, visualizou-se o espectro do sinal, que iria ser medido no detector óptico, num OSA (*Optical Spectrum Analyzer*), de forma a confirmar-se que a maior parte da potência presente na fibra se situava em torno dos 1550nm. A figura seguinte (Fig. 4.19) mostra a imagem do espectro do sinal medido pelo OSA.

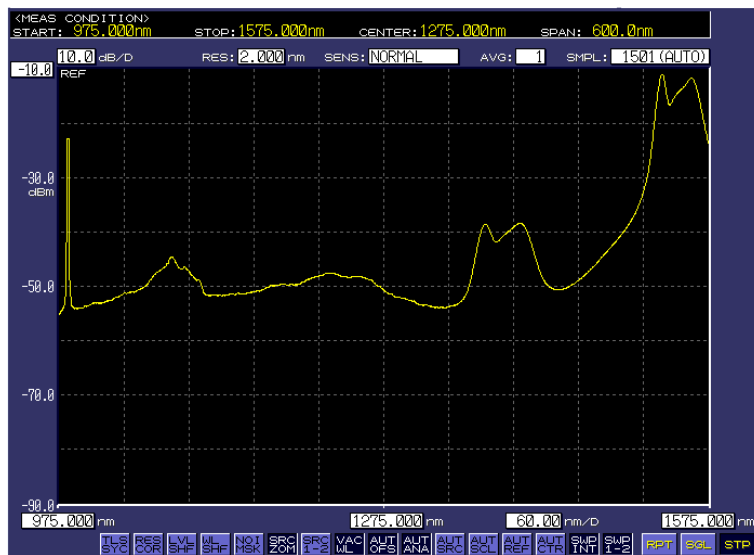


Fig. 4.19 - Espectro do sinal colocado no detector óptico. Imagem retirada do OSA.

Na figura anterior pode-se verificar claramente que o pico de potência situa-se na região de comprimento de onda dos 1550nm, ocorrendo outro pico nos 980nm, que corresponde ao laser de bombagem. Note-se que a diferença entre estes picos é superior a 10dB, o que é claramente suficiente para se concluir que a maior parte da potência na fibra resultava da emissão do Érbio.

Em seguida, ligou-se esse braço do WDM ao detector óptico de forma a tentar-se medir o tempo de vida da luminescência presente na fibra dopada com Érbio após ser desligado o driver que alimentava o laser de bombagem.

Uma vez que o tempo de vida da fluorescência presente numa fibra dopada com Érbio é supostamente de aproximadamente 8ms, tal como descrito na secção 2.9.2, e uma vez que a aplicação criada era capaz de efectuar, em média, uma medição a cada 2,4ms, era de esperar que fosse possível observar a curva de decaimento em cada teste efectuado, ou seja, de cada vez que fosse desligado o laser de bombagem.

Tal não foi possível de se registar, pois verificou-se, com a aplicação criada em LabVIEW, que o tempo de descida era muito inferior aos 8ms esperados.

A figura seguinte (Fig. 4.20) ilustra um dos gráficos desenhados a partir dos resultados obtidos, onde é possível verificar-se que o decaimento é muito rápido, apenas sendo possível obter 1 ou quando muito 2 pontos durante a descida do nível de sinal.

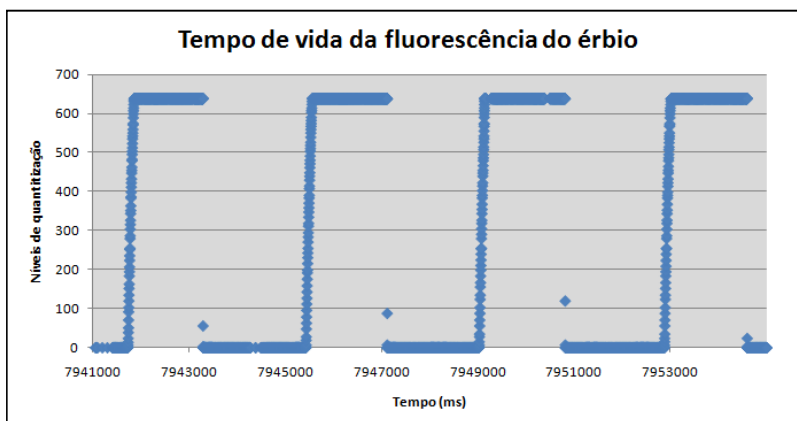


Fig. 4.20 - Gráfico do tempo de vida da fluorescência presente numa fibra dopada com Érbio.

Uma vez que com o Arduíno e o restante esquema de montagem não foi possível visualizar-se o tempo de descida, optou-se então por se ligar o sinal analógico do detector óptico a um osciloscópio, a fim de se tentar medir o tempo de vida da fluorescência da luz presente na fibra dopada.

A imagem seguinte (Fig. 4.21) ilustra os resultados obtidos com o osciloscópio, onde se torna claro que o tempo de vida é de cerca de 0,3ms ao contrário dos 8ms esperados.

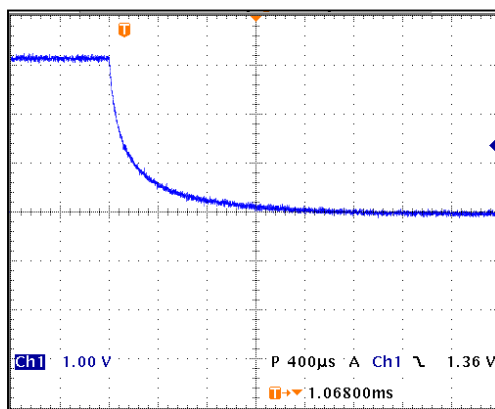


Fig. 4.21 - Imagem obtida com um osciloscópio para se visualizar o tempo de vida da fluorescência numa fibra dopada com Érbio

Pode-se assim facilmente concluir que de facto os resultados obtidos pelo sistema de medição desenvolvido vão de encontro com os resultados medidos pelo osciloscópio, ou

seja, uma vez que o tempo de vida medido é inferior a 1ms, não seria possível medir-se esse decaimento com o sistema criado.

Esta disparidade no tempo de vida observado, relativamente ao tempo de vida esperado, poderá eventualmente ser justificada pelo tipo de vidro utilizado para a criação da fibra dopada que foi utilizada. Uma vez que não se dispõe de informação sobre a constituição da fibra dopada, não é possível chegar a nenhuma conclusão.



## 5. Conclusões e perspectivas de trabalho futuro

Em primeiro lugar e em relação ao trabalho desenvolvido com os deflectómetros digitais, deve-se realçar o facto de que os dispositivos não foram de nenhuma forma alterados em relação à configuração que estes traziam de fábrica. Foi apenas criada uma interface que os permitisse ligar a um computador e construída uma aplicação de leitura, tratamento e gravação de dados, em LabVIEW. Como tal, e em relação à sua performance pouco ou nada pôde ser acrescentado às características que estes apresentam e que estão expostas no procedimento.

Em relação à sua interface com o LabVIEW, verificou-se que de facto foi possível, através de um Arduíno, construir-se todo um sistema que garante o correcto sincronismo entre o sinal de dados e o sinal de *clock* presente nos terminais dos deflectómetros, evitando com isso problemas de sobrecarga e/ou erros e atrasos de leitura. Na construção da aplicação em LabVIEW foram enfrentados diversos problemas, nomeadamente em relação à configuração da taxa de transferência de dados, no erro na apresentação de dados quando os valores apresentados pelos deflectómetros se alteravam, na configuração do número de caracteres a ler no *buffer* e até no tratamento da sequência de dados recebida. Todos esses problemas foram no entanto resolvidos através da interpretação dos resultados obtidos, e da procura da optimização de todo o sistema.

Conseguiu-se então desenvolver duas aplicações em LabVIEW que, efectuando o mesmo processo mas de formas diferentes, se tornaram duas soluções para dois estilos de medição diferentes sendo que a taxa de leitura das duas foi aproximadamente igual. Assim, se se pretender efectuar uma leitura dos dados medidos pelos deflectómetros utilizando-se ao mesmo tempo um apoio visual, deve-se utilizar a primeira aplicação (discutida na secção 3.2.3.1), ao passo que se apenas se pretender registar os valores medidos, sem que seja necessária a sua apresentação imediata deve-se, neste caso, optar pela segunda aplicação (discutida na secção 3.2.3.2). No entanto, deve-se realçar o facto de que embora a segunda aplicação apresente uma melhor taxa de leitura de dados, a diferença entre elas não é de nenhuma forma um factor determinante para a sua escolha, uma vez que a segunda aplicação necessita, após o registo dos dados, da segunda parte da aplicação que é responsável pelo tratamento dos dados registados, para que estes sejam perceptíveis.

Por fim e ainda em relação a esta parte do trabalho desenvolvido, resta apenas realçar que após contacto com os utilizadores habituais destes aparelhos, e discussão dos resultados obtidos, que estes se demonstraram satisfeitos com a taxa de 500ms por leitura, obtida pela interface e aplicação desenvolvida.

Quanto ao sistema de medição dos extensómetros que foi criado, pode-se concluir, tendo em conta o orçamento deste sistema de medição, que foi um sucesso, na medida em que apresenta melhores taxas de amostragem de dados, bem como pelo facto deste ser independente de alimentação externa. Conseguiu-se assim desenvolver um sistema de medição que pode pesar de forma imediata, nas futuras decisões acerca da aquisição

de mais sistemas de medição de deformações à NI, devido não só ao seu custo, mas também ao seu desempenho.

Dessa forma foi então conseguido desenvolver-se um sistema de medição, que aplicado em estruturas rígidas, que é capaz de medir deformações até aos  $2000\mu\epsilon$ , em ambos os sentidos, com um excelente tempo de resposta. Refira-se que no sistema da NI a taxa máxima de amostragem era de apenas duas medições por segundo, mas com o sistema desenvolvido, a taxa máxima de amostragem que se conseguiu foi de 18,8 medições por segundo. Tal factor é de realçar na medida que agora a Universidade da Madeira possui uma forma de demonstrar aos seus alunos de Engenharia Civil variações bruscas e rápidas em estruturas rígidas. No entanto, e tendo em vista a utilização do sistema durante longos períodos de tempo, foi criada uma opção no painel de controlo da aplicação que permite o controlo do número de medições a efectuar, de forma a diminuir a taxa de amostragem das medições. Outro ponto positivo do sistema desenvolvido, a par da elevada taxa de amostragem obtida, é o facto de este ser alimentado através do próprio cabo de transmissão de dados (cabo USB), uma vez que nem sempre, em testes de campo, é possível obterem-se fontes de energia como uma tomada de 230V. O peso e a facilidade de transporte do sistema criado é também uma das suas mais valias na medida em que torna o seu transporte e montagem em locais remotos uma possibilidade.

Em relação aos seus pontos menos fortes deve-se realçar em primeiro lugar o ruído das medições, que prejudica de forma séria os testes efectuados. Deve-se no entanto referir o facto deste poder ser atenuado se o extensómetro que se esteja a utilizar for isolado de fontes eléctricas ou de outras fontes de ruído, e se os restantes circuitos de medição forem convenientemente calibrados.

Por fim e ainda em relação ao sistema de medição dos extensómetros desenvolvido, resta acrescentar que este sistema foi já apresentado às pessoas que realmente utilizam este tipo de aparelhos em laboratório, ou no exterior, sendo que perante as críticas que lhe foram feitas, este mostrou ser de facto uma opção a ter em conta. Nessa apresentação foram discutidas outras funcionalidades a implementar no sistema de medição de extensómetros criado, ou seja, com a utilização de dois braços, (ao contrário de apenas um, como se utiliza no sistema de medição criado) activos da ponte de Wheatstone. Além disso foi abordada a possibilidade de utilizar-se o sistema desenvolvido para a medição de células de carga, também elas equipamentos extremamente úteis à Engenharia Civil.

Finalmente, e em relação à montagem óptica estudada pode-se realçar o facto de que foi possível obter-se, com a ligação entre o Arduíno e o LabVIEW, uma taxa média de leitura de um sinal analógico de cerca de 408,3Hz. Infelizmente e em relação à montagem propriamente dita, verificou-se que a mesma não permitiu determinar o tempo de vida da fluorescência na fibra dopada com Érbio. O mesmo no entanto poderá ser útil para aplicações em que se pretendem observar fenómenos mais lentos.

Em resumo, foi demonstrada a possibilidade de utilizar-se a plataforma de desenvolvimento Arduíno para o desenvolvimento de sistemas de medição, de baixo custo, e compatíveis com o LabVIEW.

## 5.1 Perspectivas de trabalho futuro

---

Em relação ao sistema de interface dos deflectómetros digitais pensa-se que pouco ou nada poderá ser melhorado, uma vez que o sistema desenvolvido foi otimizado em relação à taxa de leitura e ao sincronismo dos sinais enviados pelos terminais de dados e de *clock*. Poderá no entanto ser melhorado o código a utilizar no Arduíno, nomeadamente no factor de *prescale* da velocidade do ciclo de leitura das medições. Tal alteração não será simples de implementar, uma vez que pelos testes realizados, percebeu-se que as funções dos interruptores, utilizadas no sincronismo das medições, eram afectadas. Em relação às aplicações em LabVIEW pode-se admitir que estas poderão ser optimizadas, mas e se se reparar nas conclusões retiradas dos testes práticos realizados às duas aplicações, verificou-se que o processamento realizado para o tratamento das medições pouco ou nada influenciava na taxa de leitura dos dados registados.

Quanto ao sistema de medição dos extensómetros algumas optimizações podem ser consideradas, nomeadamente a construção de uma versão miniaturizada do circuito desenvolvido, através da utilização de componentes SMD (*Surface Mount Device*) o que por si só reduziria de forma significativa o seu tamanho, e facilitaria o seu transporte e utilização. Tal construção não foi no entanto possível, devido à falta de tempo.

Outra questão que poderá ser abordada será o estudo de novas formas de alimentação, para que sejam evitadas as variações nos valores medidos ao longo do tempo, e para que possam ser utilizados, sem restrições, todos os canais de medição ao mesmo tempo. Poderão também ser estudadas formas de desligar os canais que não estejam a ser utilizados, reduzindo dessa forma o consumo. No entanto, a questão principal a ser optimizada será sem dúvida a questão do ruído, tentando-se perceber melhor a sua origem, e quais as técnicas que poderão ser usadas para o reduzir.

Por fim, e em relação à montagem utilizada para se medir o tempo de vida da fluorescência numa fibra dopada com Érbio, e uma vez que o Arduíno estava já a funcionar na sua máxima taxa de amostragem e mesmo assim não foi possível registar-se o decaimento, pôde-se constatar que com este microcontrolador tal não seria possível.

Como implementação futura pode-se pensar na substituição do microcontrolador, por um com maior capacidade, muito embora deva-se referir que para os restantes trabalhos desta tese, o microcontrolador utilizado foi suficiente. Resta apenas referir o facto de que, uma vez que o objectivo desta tese era o de desenvolver uma versão *low cost* de um sistema de medição, não foi testado mais nenhum microcontrolador.



## 6. Anexos

---

### 6.1 Código a carregar no Arduino para a verificação da taxa de amostragem

---

```
// Código para definir as alterações nos códigos de registo do Arduino
#ifndef cbi
#define cbi(sfr, bit) (_SFR_BYTE(sfr) &= ~_BV(bit))
#endif
#ifndef sbi
#define sbi(sfr, bit) (_SFR_BYTE(sfr) |= _BV(bit))
#endif

void setup() {
  int start ;
  int i ;

  // Definição do valor do pescale
  sbi(ADCSRA,ADPS2) ;
  sbi(ADCSRA,ADPS1) ;
  sbi(ADCSRA,ADPS0) ;

  Serial.begin(9600) ;
  Serial.print("ADCTEST: ") ;
  start = micros() ;
  for (i = 0 ; i < 1000 ; i++){
    analogRead(0) ;
  }
  Serial.print(micros() - start) ;
  Serial.println(" microsec (1000 calls)" ) ;
}

void loop() {
}
```

## 6.2 Deflectómetro digital

---

### 6.2.1 CÓDIGO A CARREGAR NO ARDUÍNO

```
//Inicialização dos Pins que estão ligados ao Arduino
int dadosA = 4;
int dadosB = 5;
// ClockA é colocado no pin 2 das entradas digitais do Arduino Duemilenove.
int clockA = 2;
// ClockB é colocado no pin 3 das entradas digitais do Arduino Duemilenove.
int clockB = 3;

void setup() {
  //Inicializa a conexão através da porta série
  Serial.begin (9600);
  //Configura os pins do Arduino I/O
  pinMode (dadosA, INPUT);
  pinMode (clockA, INPUT);
  pinMode (dadosB, INPUT);
  pinMode (clockB, INPUT);
}

void loop() {
  //Inicialização das variáveis de tempo
  long time = millis();
  long fim = time + 150;
  //Introdução de um cabeçalho de forma a separar cada medição
  Serial.write("E1");
  //Ler os valores digitais, durante 150ms
  while (time < fim){
    //Coloca um interruptor no pin 2 do Arduino (clock do sinal A)
    attachInterrupt(0, CicloA, RISING);
    time = millis();
  }
  //Introdução de uma mensagem de finalização
  Serial.write(";");
  //Desliga o interruptor para que possa ler o proximo interruptor sem interferências
  detachInterrupt(0);
  long time1 = millis();
  long fim1 = time1 + 150;
  //Introdução de um cabeçalho de forma a separar cada medição
  Serial.write("E2");

  while (time1 < fim1){
    //Coloca um interruptor no pin 3 do Arduino (clock do sinal B)
    attachInterrupt(1, CicloB, RISING);
    time1 = millis();
  }
  //Introdução de uma mensagem de finalização
  Serial.write(";");
  detachInterrupt(1);
} // fim do loop

//Ciclo de envio dos dados através da porta série
void CicloA(){
```

```
    if (digitalRead (dadosA) ==LOW) {  
      Serial.write("0");  
    }  
    else{  
      Serial.write("1");  
    }  
  }  
  void CicloB(){  
    if (digitalRead (dadosB) ==LOW) {  
      Serial.write("0");  
    }  
    else{  
      Serial.write("1");  
    }  
  }  
}
```



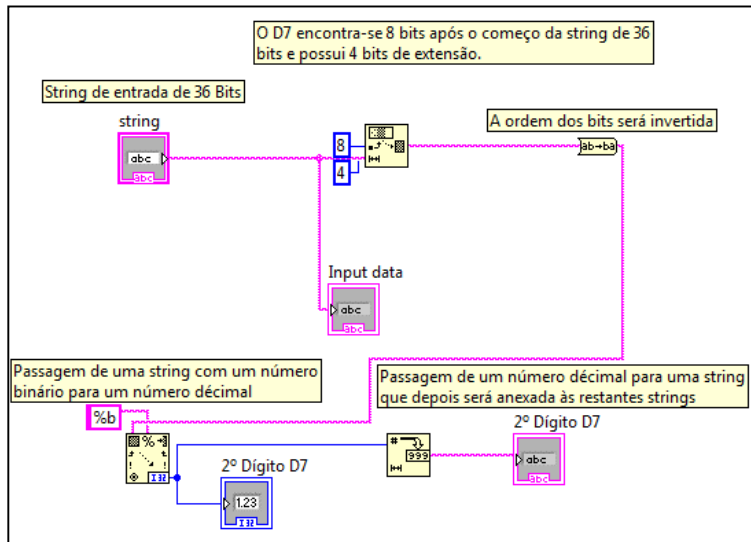


Fig. 6.3 - Código em LabVIEW para se obter o valor do dígito D7.

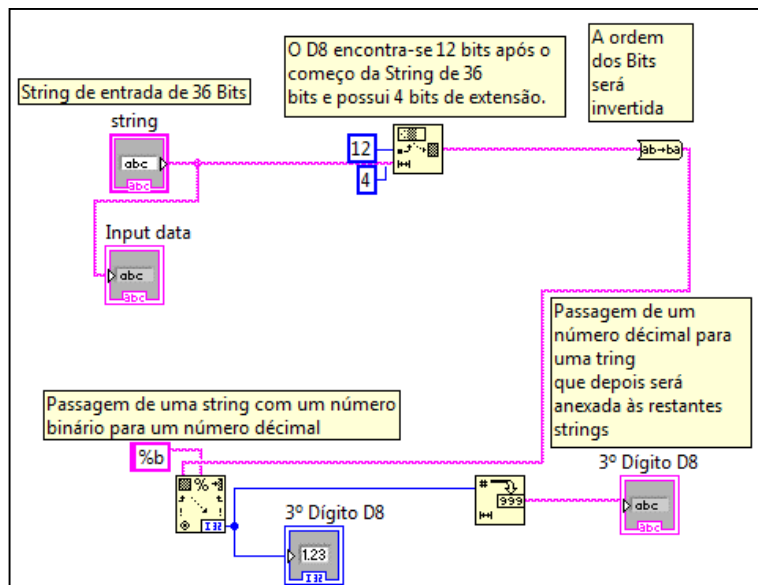


Fig. 6.4 - Código em LabVIEW para se obter o valor do dígito D8.

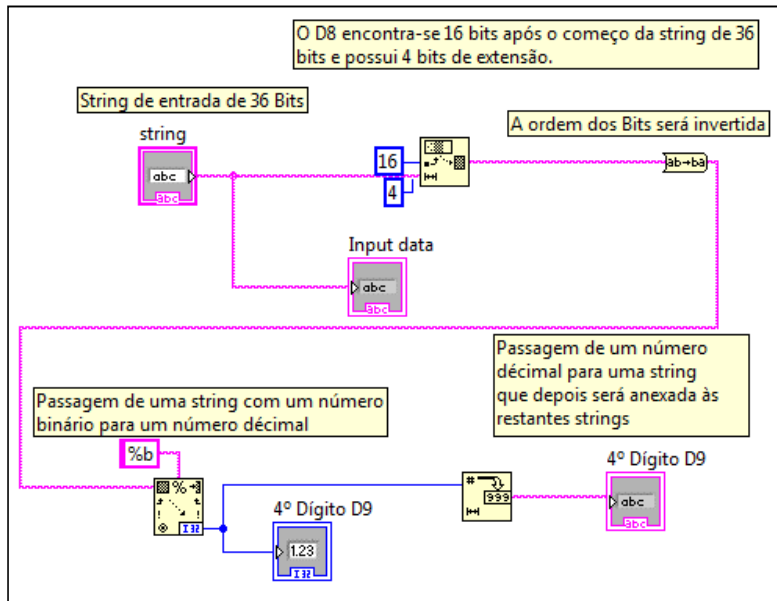


Fig. 6.5 - Código em LabVIEW para se obter o valor do dígito D9.

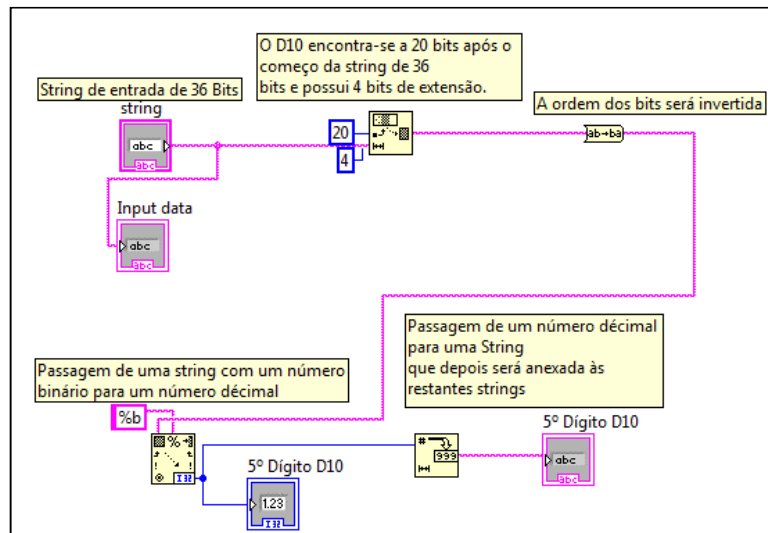


Fig. 6.6 - Código em LabVIEW para se obter o valor do dígito D10.

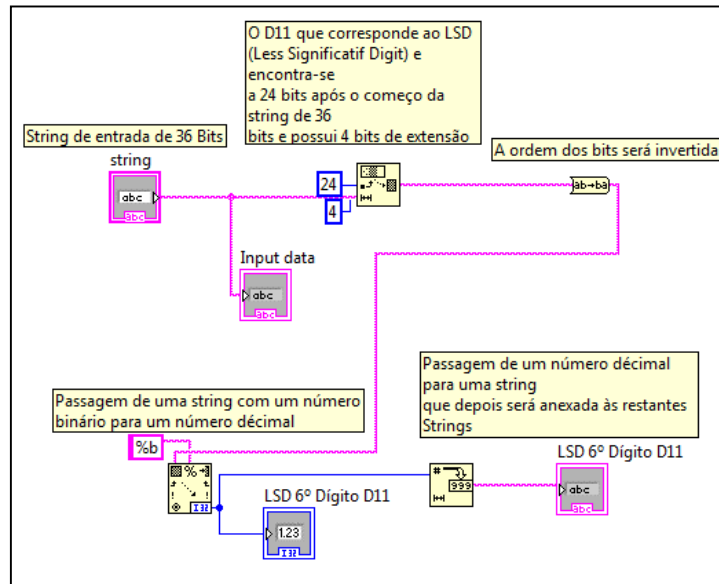


Fig. 6.7 - Código em LabVIEW para se obter o valor do dígito D11 (LSD).

#### 6.2.2.2.2 COLOCAÇÃO DA CASA DECIMAL

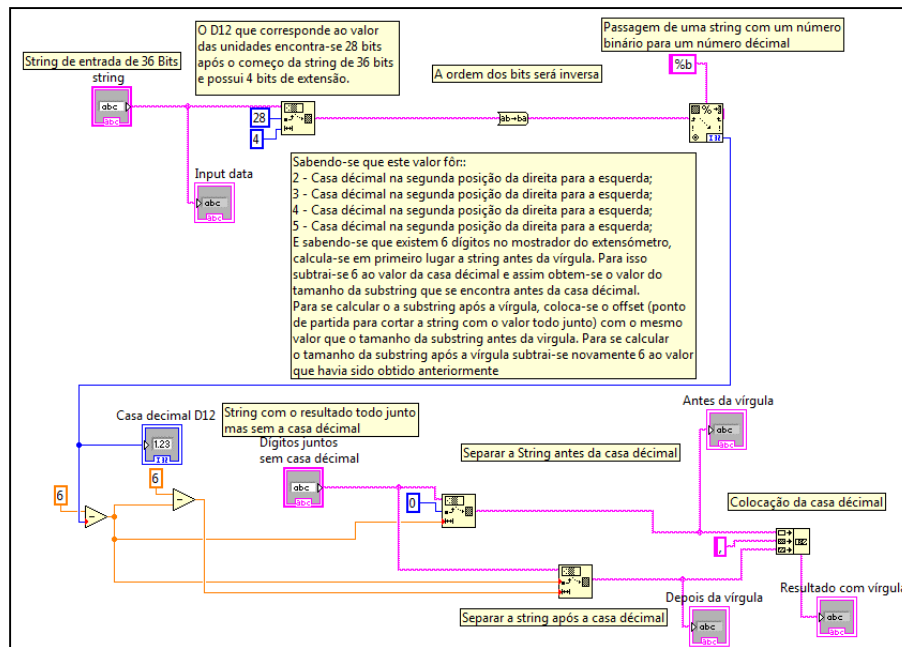


Fig. 6.8 - Código em LabVIEW para se obter a string final com a indicação da casa decimal.

### 6.2.2.2.3 OBTENÇÃO DO SINAL DA MEDIÇÃO

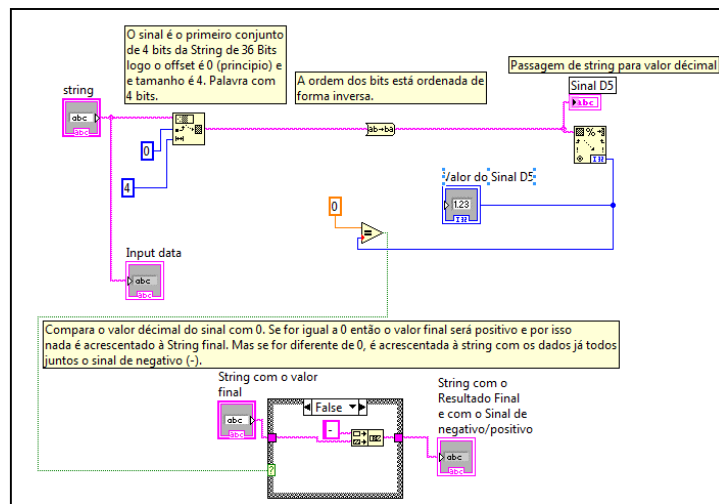


Fig. 6.9 - Código em LabVIEW para se obter o valor do dígito D5 (Sinal da medição).

### 6.2.2.2.4 UNIDADE DE MEDIDA

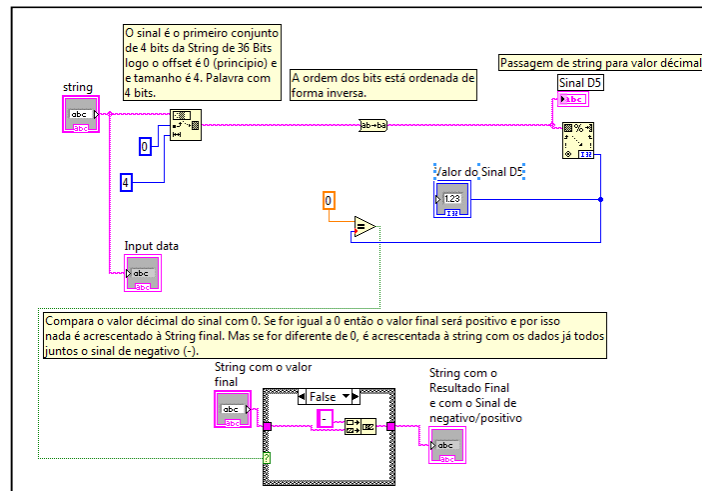


Fig. 6.10 - Código em LabVIEW para se obter o valor do dígito D13 e para se obter a string final com as unidades já colocadas no fim.

# 6.3 Manual do defleómetro digital Mitutoyo

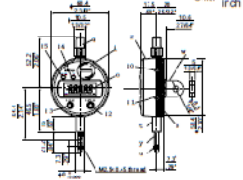
ID-S Digimatic Indicator  
No 99M/AHC02M  
Serial No. 543



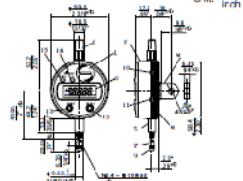
**WARNING** The battery and fluid crystal display used in the indicator contain stimulant materials. If any liquid material comes into contact with your eye or skin accidentally, immediately rinse with clean water. If it gets in your mouth, immediately spit it out. In other cases, please consult a physician.



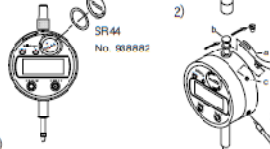
[1] • 543-681/682 Unit: mm / inch



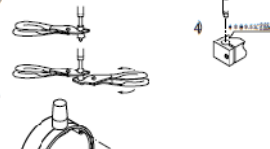
• 543-683 Unit: mm / inch



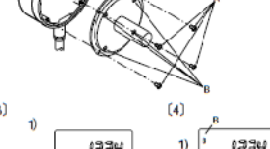
[2] 1) 2)



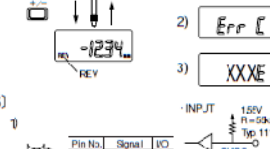
5) 6)



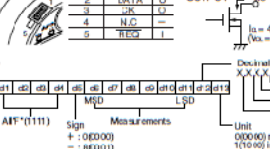
[3] 1) 2) 3)



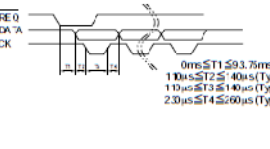
[4] 1) 2) 3)



[5] 1)



2) 3)



**IMPORTANT**

- Do not disassemble and modify this indicator.
- To clean the indicator, use a soft cloth soaked in a diluted neutral detergent. Do not use any organic solvent (such as benzene or acetone). It may deform or damage the indicator.
- The contaminated spindle may cause malfunction. Wipe the mill with a cloth dampened with alcohol, then wipe the spindle with a cloth dampened with a small amount of oil viscosity.
- If the indicator is not used for more than three months, remove the battery from the indicator to store them separately. Otherwise, the liquid leaked from the battery may damage the indicator.

**(1) Dimensions and Nomenclature**

**1) Dimension of each part**  
 •  $\phi$  is the symbol for American Gauge Design (ADG) and represents a dimension required by AGD Group 2 in ANSI standards. (Applied in series 543-683.)  
 • An asterisk (\*) represents a dimension of the Flat Back type. Horizontal represents a dimension of the Back with Lug type and a common dimension of both types.

- 2) Nomenclature**
- |   |                          |                  |                     |
|---|--------------------------|------------------|---------------------|
| 1) Cap                                      | v) Lug                   | e) Flat back     | r) Output connector |
| f) Stem                                     | y) Spindle               | u) Contact point | l) Battery cap      |
| g) Display unit (LCD)                       | 10) Lever mounting screw | 11) Release hole |                     |
| 2) ON/OFF button                            | 13) ORIGIN button        | 14) +/- button   |                     |
| 15) Indicator (only for series 543-682/683) |                          |                  |                     |

**(2) Setting Up**

**1) Setting the battery**

**IMPORTANT**

If the battery is replaced, the origin is cleared. Set up the origin position for the reference encoder. Refer to (3.2.3).

- Remove the battery cap by turning it counterclockwise with a coin, etc., set in the groove.
- Set a new battery (with the + side facing up) and secure the battery cap in the reverse procedure.

**TIP**

Immediately after the battery has been set, a meaningless display or "E" will appear, but this is not abnormal. Continue to set the origin.

**2) Mounting the lifting lever (optional)**

- Demount the cap, unscrew the screw (M2.5) on the top of the spindle, then mount the stop screw (b) instead.
- Loosen the lever mount screw(s), and mount the lever (a) while hanging from the stop screw (b).

**3) Mounting the release (optional)**

Unscrew the back screw (M2.0) from the release hole, then screw the end of the release.

**4) Mounting this indicator**

If mounting the indicator on a fixture or a stand, use the stem or lug to clamp the indicator. To clamp it using the stem, use the slotted holder having a diameter of  $\phi 5.2$ mm hole with a tolerance of  $+0.002$ mm to  $-0.02$ mm.

**IMPORTANT**

Do not clamp the stem directly by tightening a set screw, etc. If the screw is tightened with a torque of 500mNm or more, the spindle may rotate.

**5) Replacing the contact point**

As illustrated in the left, remove the contact point using two pairs of pliers (one is for holding the spindle) and a waste cloth, then replace it with a desired contact point.

**IMPORTANT**

When replacing the contact point, hold the spindle and use in the contact point. Otherwise, the indicator may be damaged.

**6) Mounting an optional back**

As illustrated in the left, unscrew the four mounting screws (No.02ACB411) in the A position, then mount the coated back using the removed screws.

**IMPORTANT**

- If other screws than mounting screws (No.02ACB411) are used in the A position, the thread in the hole of the back may be damaged.
- An indicator back may have screws in the position B as shown in the figure, depending on the type. Do not remove these screws.

**7) Connecting the SPC output cable (optional)**

Connect the connector of the SPC output cable with the connector on the indicator.

**(3) Operating Procedure**

**1) Setting the count direction**

The +/- key selects the count direction of display values with respect to the spindle direction. The "REV" sign appears in the lower left of the LCD, if the indicator is set so that it counts down when the spindle is rotated.

**2) Setting up the origin**

Display the spindle to the position at which the origin is specified, then press and hold the ORIGIN key for more than one second. The origin will be set up, indicating "000" on the display.

**(4) Error Messages and Remedies**

- Message "B"**: The battery voltage is low. Replace the battery with a new one.
- Message "Err C"**: Water drops may be condensed on the detector unit due to sudden thermal change or the detector unit may be overstrained due to other causes. If this message still appears after two hours of thermal stabilization with power turned off, the indicator needs to be repaired. Contact the nearest Mitutoyo service network.
- Least significant digit display "E"** (ABS data composition error): A temporary error or an accident to suddenly shift displacement of the spindle. Keep on using the indicator, since there is no effect on measurement.

**(5) Data Output**

**1) Output connector specification**

**2) Output data format**

**3) Timing chart**

**(6) Specifications**

Model	ID-S1012	ID-S1013M	ID-S1013E
Order No.	543-681	543-682	543-683
Design outline	127-0.03mm	127-0.03mm/2,5000"	127-0.03mm
Resolution	0.01mm	0.01mm/2000"	0.01mm
Measuring range	127mm	127mm/2"	127mm
Accuracy	±0.025mm or less	±0.025mm/2000" or less	±0.025mm
Standards	ISO/F46/JIS 6700	ANSI B89.1.10/AGD	
Spindle diameter	ø6mm	ø9.52mm (3/8") (A)	
Contact point	Carbide ball (M2.5 x 0.45)	Steel ball (M4-45 UNF)	
Measuring force	1.2N (0.265 lbf) max		
Protection class	Dust-proof IP-42, IEC 529/JIS D0207, C0920 or equivalent (in the factory setting)		
Measuring direction	All directions as a variable		
Power supply	Silver oxide battery (SR44) 1.5V x 3		
Battery life	2000 hours approx. for continuous use		
Mass	123g approx.		
Operating temperature range	0°C - 40°C		
Storage temperature range	-10°C - 60°C		

\*1: Suffix "M" of model number means the Flat Back type. Others represent the Back with Lug type.  
 \*2: The output error is not included.

**(7) Option**

For information on various optional parts, refer to the related catalog or contact the nearest Mitutoyo service network.



## 6.4 Sistema de medição de extensômetros

### 6.4.1 CIRCUITO DESENVOLVIDO

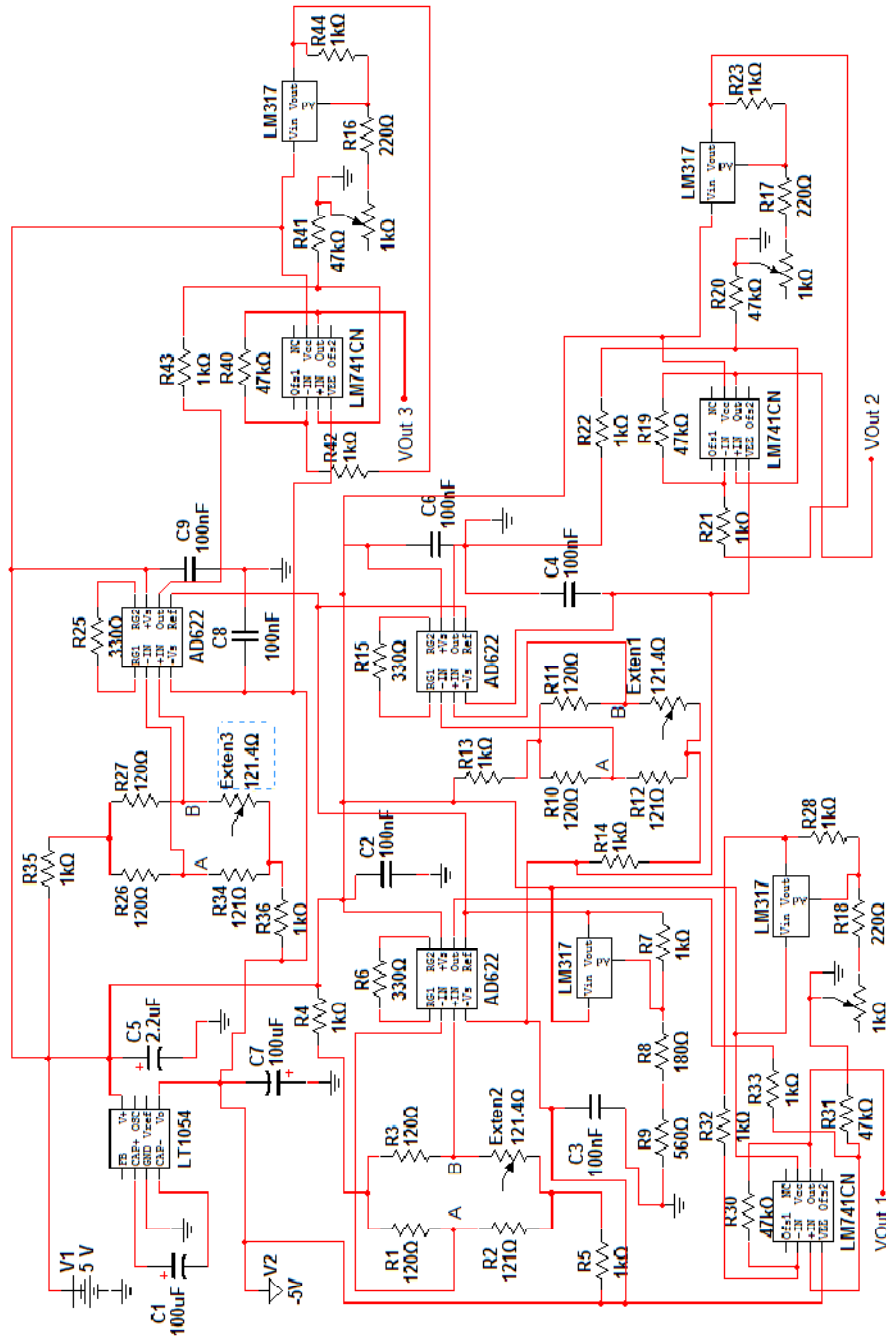
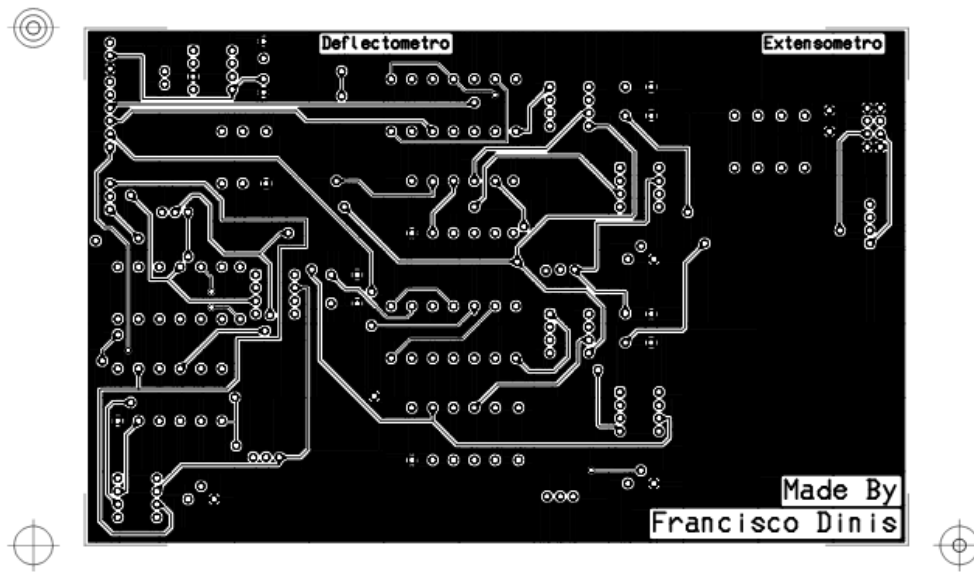
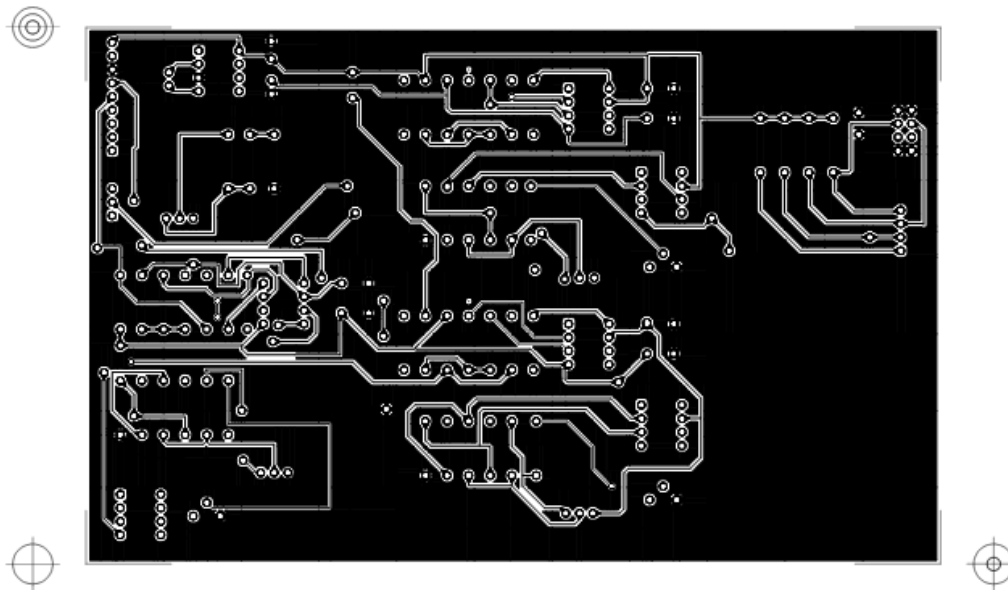


Fig. 6.11 - Esquema do circuito desenvolvido para a aquisição simultânea das medições de 3 extensômetros.

#### 6.4.2 PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO CRIADAS



*Fig. 6.12 - Plano de topo a decalcar para a placa.*



*Fig. 6.13 - Plano de fundo a decalcar para a placa.*

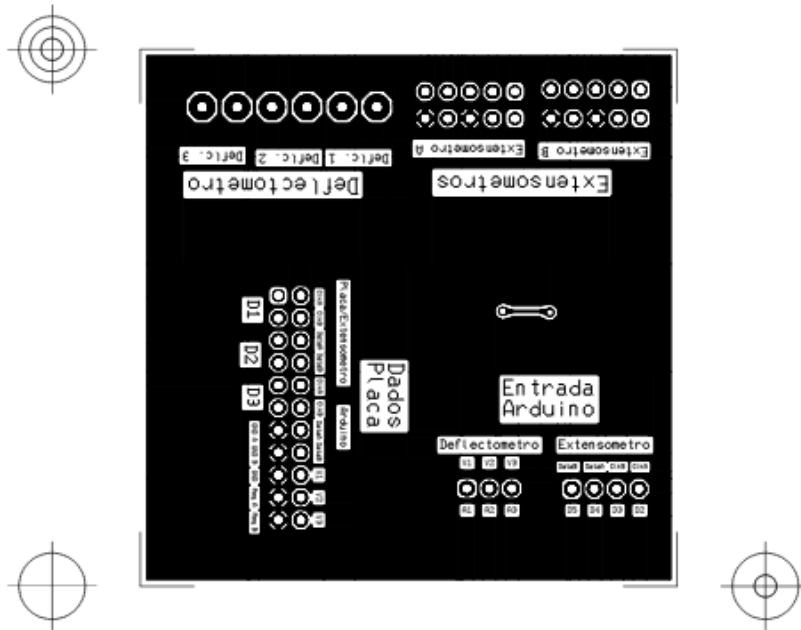


Fig. 6.14 - Plano de topo a decalcar para a placa (circuito auxiliar).

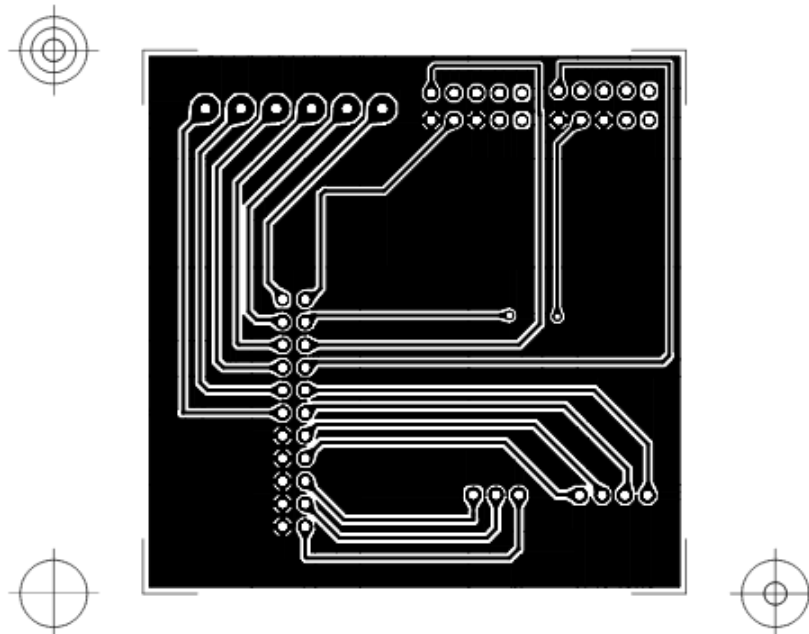


Fig. 6.15 - Plano de fundo a decalcar para a placa (circuito auxiliar).

### 6.4.3 CÓDIGO A CARREGAR NO ARDUÍNO PARA A LEITURA DAS MEDIÇÕES DOS TRÊS EXTENSÓMETROS

```
//Inicialização dos pins que estão ligados no Arduíno
int pinA = 1; //pin 1 Entrada analógica do Sinal A
int pinB = 2; //pin 2 Entrada analógica do Sinal B
int pinC = 3; //pin 3 Entrada analógica do Sinal C

int signalA = 0; //Inicialização do valor A
int signalB = 0; // Inicialização do valor B
int signalC = 0; // Inicialização do valor C

//inicialização da comunicação via série
void setup()
{
  Serial.begin(38400);
}

void loop()
{
  signalA = analogRead(pinA);
  //cabeçalho do sinal A
  Serial.write("A,");
  Serial.print(signalA);
  //mensagem de fim de transmissão do sinal A
  Serial.write(",");

  signalB = analogRead(pinB);
  Serial.write("B,");
  Serial.print(signalB);
  Serial.write(",");

  signalC = analogRead(pinC);
  Serial.write("C,");
  Serial.print(signalC);
  Serial.write(",");
}
```



#### 6.4.4.3 CONFIGURAÇÃO DO TEMPO DE LEITURA

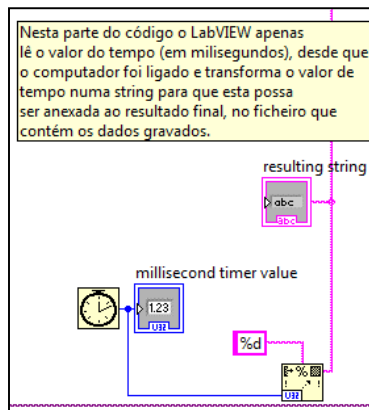


Fig. 6.18 - Configuração do timer para a leitura do tempo actual em milissegundos.

#### 6.4.4.4 GRAVAÇÃO DOS RESULTADOS

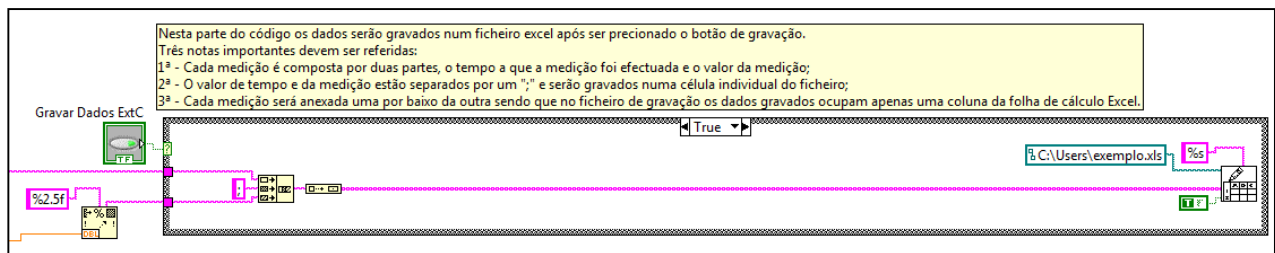


Fig. 6.19 - Gravação do resultado das medições efectuadas pelo sistema de medição.

#### 6.4.4.5 CONFIGURAÇÃO DO NÚMERO DE MEDIÇÕES POR SEGUNDO

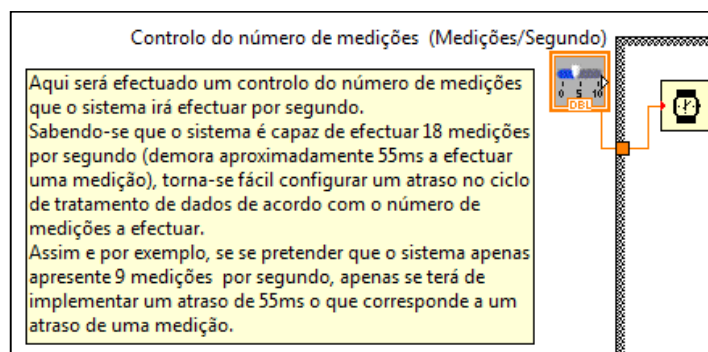


Fig. 6.20 - Configuração do número de medições a efectuar por segundo.

#### 6.4.4.6 AQUISIÇÃO DOS DADOS NÃO TRATADOS

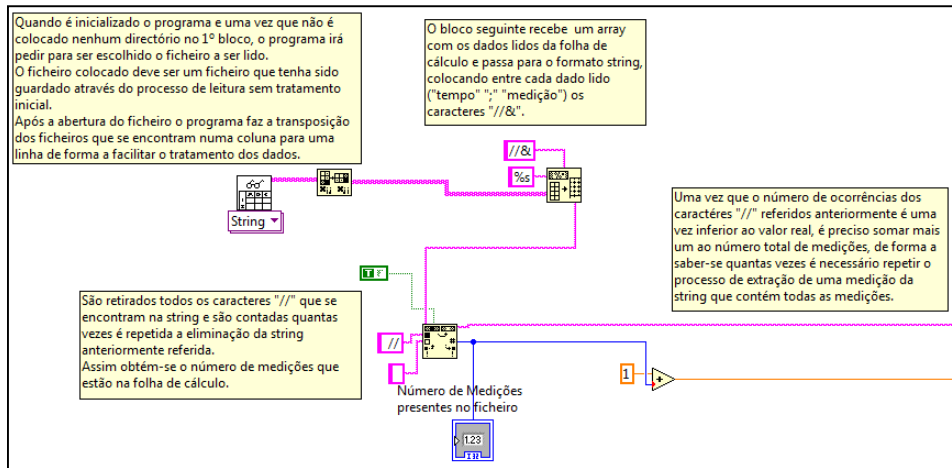


Fig. 6.21 - Leitura do ficheiro que contém as medições não tratadas.

#### 6.4.4.7 AQUISIÇÃO INDIVIDUAL DE CADA MEDIÇÃO

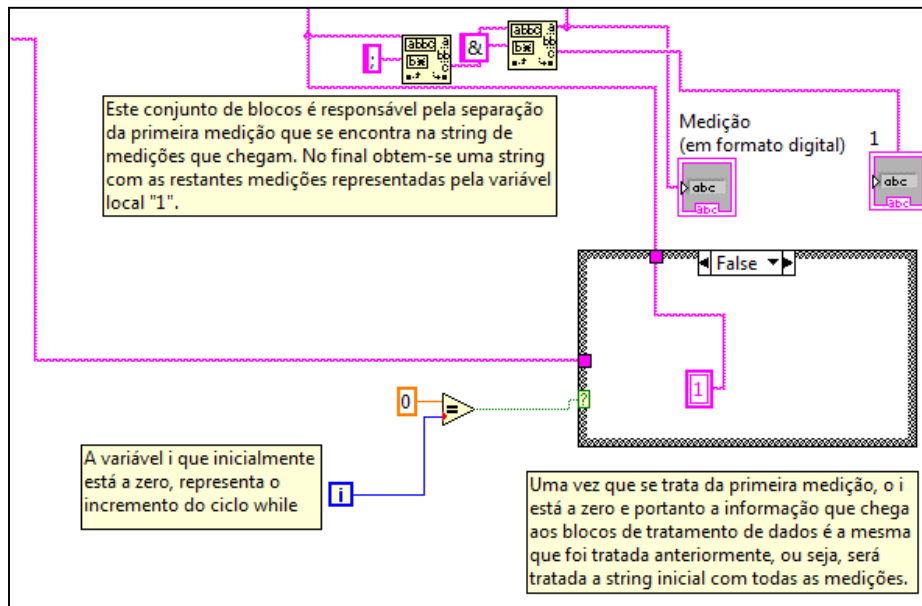


Fig. 6.22 - Aquisição do valor da primeira medição da string que contém todas as medições.

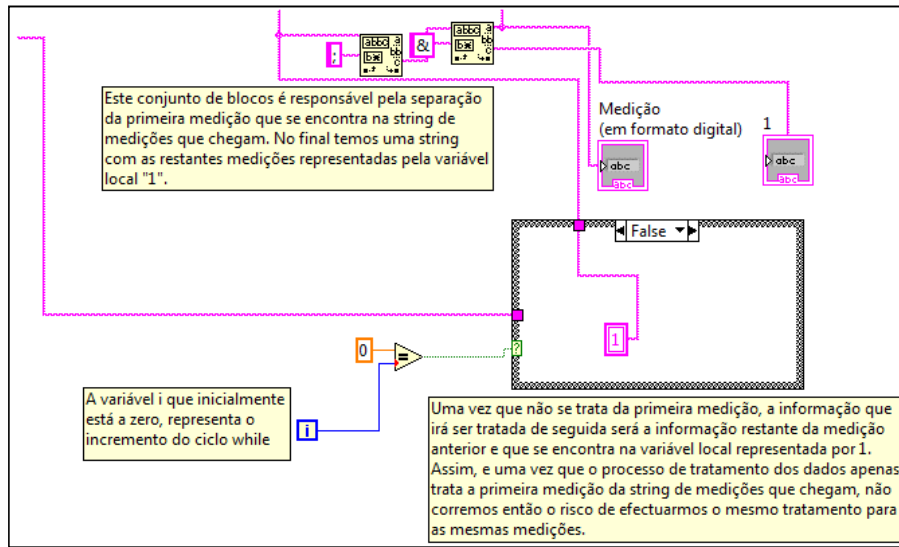


Fig. 6.23 - Aquisição do valor da primeira medição que se encontra na string restante que contém todas as restantes medições.

#### 6.4.4.8 CONFIGURAÇÃO DOS PARÂMETROS DAS MÉDIAS

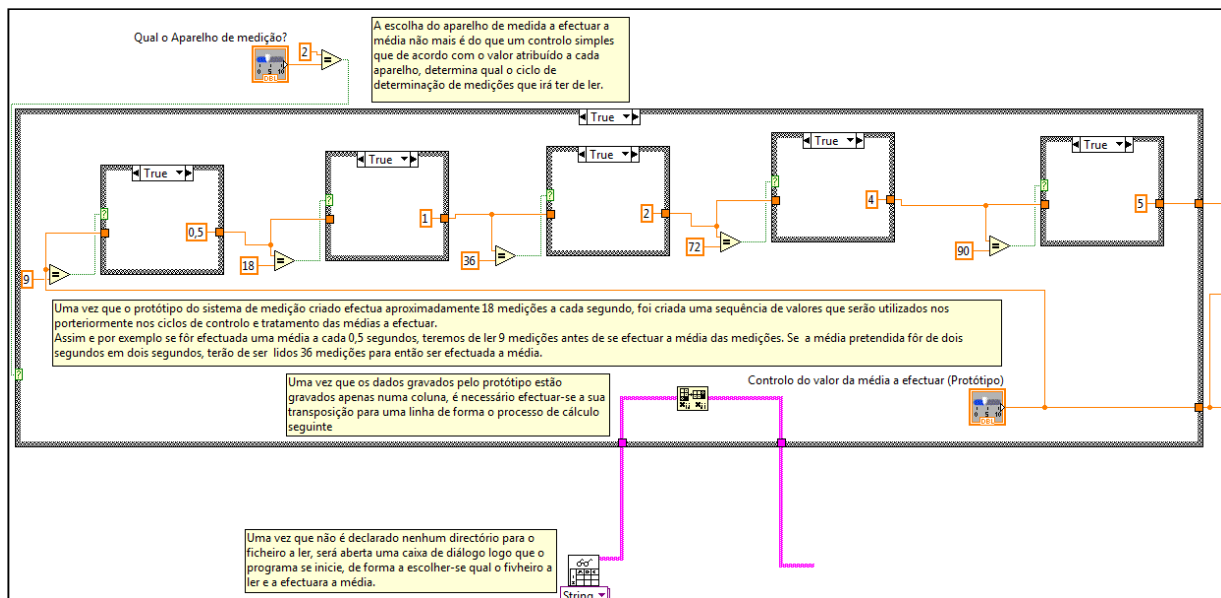


Fig. 6.24 - Configuração dos parâmetros a utilizar para o cálculo da média das medições para o protótipo.

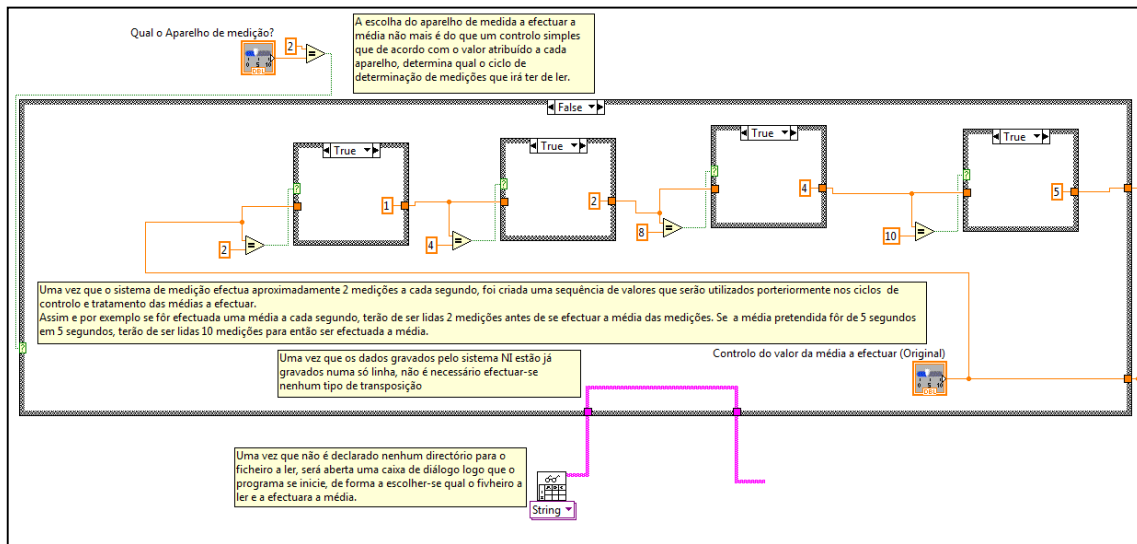


Fig. 6.25 - Configuração dos parâmetros a utilizar para o cálculo da média das medições para o sistema da NI.

#### 6.4.4.9 CONVERSÃO PARA UM ARRAY

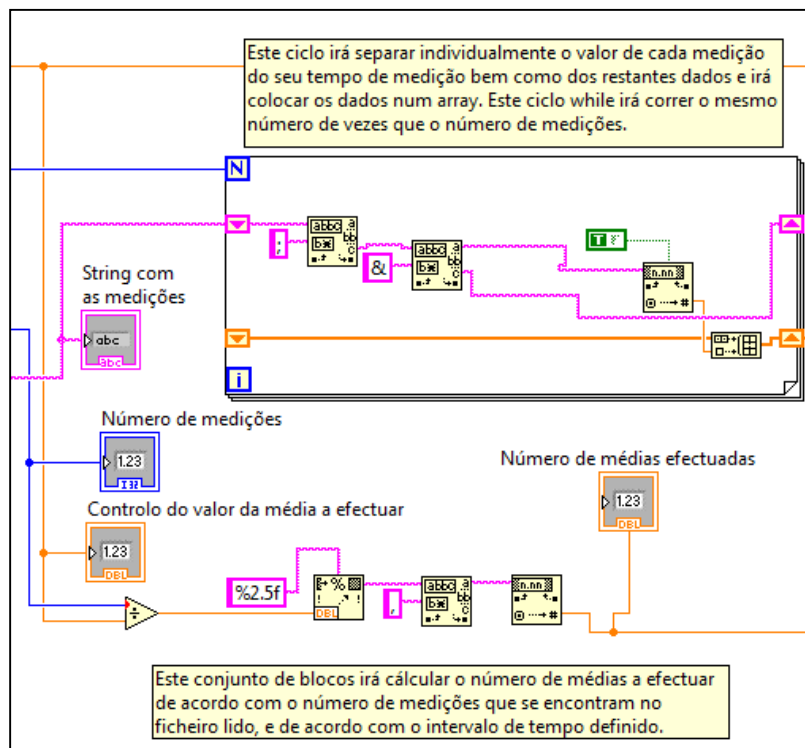


Fig. 6.26 - Ciclo para retirar o valor individual de cada medição da string de medições e para a conversão dos valores obtidos num array de medições.

#### 6.4.4.10 CÁLCULO DAS MÉDIAS E DOS INTERVALOS DE TEMPO

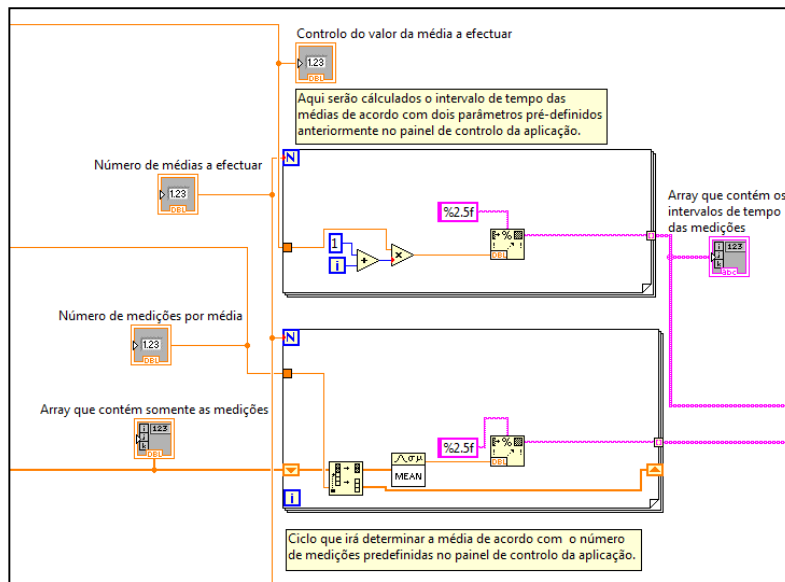


Fig. 6.27 - Ciclos que calculam as médias bem como os intervalos de tempo.

#### 6.4.4.11 PAINEL PRINCIPAL DA APLICAÇÃO QUE EFECTUA AS MÉDIAS

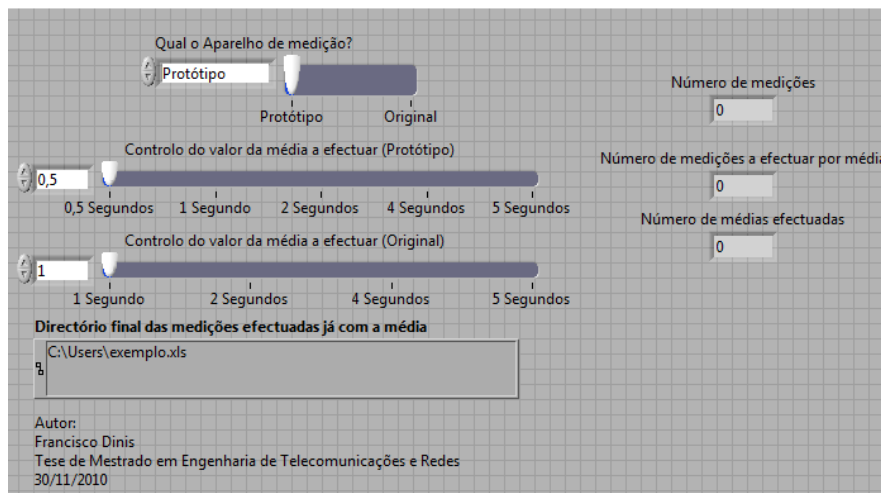


Fig. 6.28 - Painel principal do programa em LabVIEW que calcula as médias das medições.

## 6.5 Medição do tempo de vida do Érbio

---

### 6.5.1 CÓDIGO A CARREGAR NO ARDUÍNO PARA A LEITURA DO DETECTOR ÓPTICO

```
// Código de limpeza de registo e de preparação da sua alteração
#ifndef cbi
#define cbi(sfr, bit) (_SFR_BYTE(sfr) &= ~_BV(bit))
#endif
#ifndef sbi
#define sbi(sfr, bit) (_SFR_BYTE(sfr) |= _BV(bit))
#endif

int a=0;

void setup() {
  // Definição do factor de prescale
  cbi(ADCSRA,ADPS2);
  sbi(ADCSRA,ADPS1);
  cbi(ADCSRA,ADPS0);
  Serial.begin(38400);
}

void loop(){
  a = analogRead(0);
  Serial.print(a);
  Serial.print(";");
}
```

## 6.6 Construção de um protótipo de um sistema de medição baseado na técnica do Z-Scan

---

O interesse na descoberta de materiais que possuem variações não lineares é, hoje em dia, muito grande. Tal interesse deve-se principalmente à constante procura de novos materiais que permitam desenvolver novas aplicações ou melhorar algumas já existentes, como por exemplo, a protecção de sensores ópticos, ou o aperfeiçoamento de absorvedores saturáveis [35].

No entanto as técnicas disponíveis, bem como o conhecimento adquirido sobre alguns materiais orgânicos, nomeadamente em relação às suas não linearidades, são ainda relativamente insuficientes tendo em conta as necessidades actuais. Como tal, o desenvolvimento de compostos sintéticos que possam substituir os compostos orgânicos é um campo de estudo com muitas lacunas a preencher.

A técnica de Z-scan, que poderá ser descrita de um modo simplificado como uma técnica de varrimento longitudinal, é um método que permite determinar rapidamente as propriedades não lineares de variados materiais em diversos estados, tais como soluções, interfaces, filmes, cristais, vidros, etc. Essa técnica permite medir, com extremo rigor, as mudanças do índice de refração bem como as mudanças na absorção óptica, em função da potência do sinal [36].

Um dos factores que levou à rápida aceitação da técnica do Z-scan na comunidade científica, nomeadamente no campo da óptica, foi a facilidade de interpretação dos resultados. Em muitos casos, pode-se determinar o coeficiente de absorção, bem como a mudança no índice de refração, sem que seja necessário recorrer a análises computacionais dos dados obtidos, bastando somente uma interpretação gráfica dos resultados.

Pretendeu-se, no início do trabalho desta tese de Mestrado, desenvolver um protótipo de um sistema de medição que utilizasse a técnica do Z-scan, incorporando no esquema um laser em fibra, aproveitando assim as vantagens desse tipo de dispositivo, em termos de estabilidade e facilidade de operação. No entanto e após várias tentativas e constantes fracassos na construção do laser em fibra, optou-se por abandonar este trabalho.

### 6.6.1 A TÉCNICA DO Z-SCAN

A técnica do Z-scan baseia-se no facto de um feixe óptico, com perfil espacial gaussiano, ao se propagar através de um meio não linear modificar, de forma não homogénea, o índice de refração do material. Por outras palavras, as regiões do material atingidas pela parte mais intensa do feixe (centro do feixe) irão sofrer uma maior variação no índice de refração, em relação às regiões mais periféricas. Este fenómeno de variação espacial do índice de refração faz com que o meio se comporte como uma lente divergente, se  $n_2 < 0$  ou convergente se  $n_2 > 0$ , em que  $n_2$  representa a componente não linear do índice de refração [37,36].

Desta forma a técnica de varrimento longitudinal, denominada de Z-scan, é uma técnica da espectroscopia não linear que faz uso deste efeito de auto-focalização ou auto-desfocalização de um feixe de luz intenso, à medida que este se propaga por um meio não linear [38]. A técnica consiste basicamente na translação, ao longo da direcção de propagação da luz (direcção Z), de uma amostra, na vizinhança do plano focal de uma lente, que é utilizada para focar o feixe de luz proveniente de um laser.

A figura seguinte (Fig. 6.29), ilustra um esquema típico de montagem de um sistema de medida que utiliza a técnica do Z-scan.

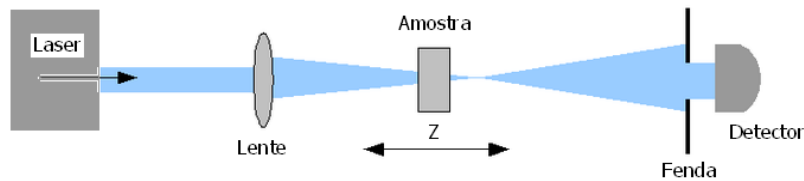


Fig. 6.29 - Técnica do Z-scan. Esquema de montagem.

À medida que a amostra é transladada, a transmissão da luz ( $\mathcal{S}$ ) através de uma fenda situada no campo distante é monitorizada por um fotodetector. A transmitância, o raio de abertura da fenda ( $r_a$ ) e a cintura do feixe na posição da fenda ( $\omega_a$ ), no regime de baixas potências relacionam-se através da seguinte expressão [35]:

$$\mathcal{S} = 1 - e^{-\left(2r_a^2/\omega_a^2\right)} \quad (7.1)$$

Ao realizar-se a transladação da amostra ao longo do eixo Z observa-se uma variação da intensidade luminosa que irradia a partir de uma determinada região da amostra. Desta forma, as alterações do valor da transmitância em função da posição da amostra significam alterações em função da intensidade. Note-se que a relação entre a posição e a intensidade podem ser analisada de acordo com a teoria de propagação linear de feixes gaussianos.

Naturalmente quanto mais intenso for o laser, mais fácil será de se observar esse efeito. Por isso decidiu-se utilizar um laser em fibra, pulsado, que seria capaz de gerar impulsos curtos e muito intensos [39].

## 6.6.2 PROCEDIMENTO

A primeira fase da montagem passava pela construção de um laser com fibra dopada com Itérbio, pulsando graças à presença de um absorvedor saturável na concavidade.

O esquema da montagem encontra-se na figura seguinte (Fig. 6.20).

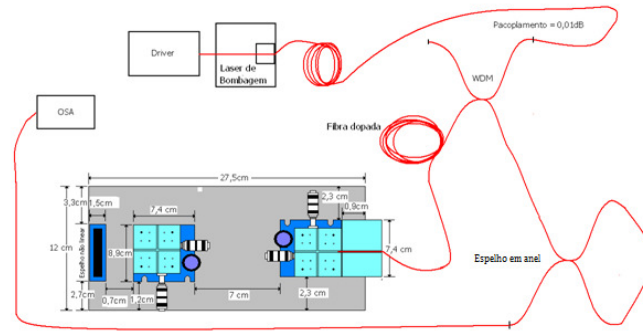


Fig. 6.30 - Esquema da montagem do laser em fibra óptica.

Como se pode observar pela figura anterior, fez-se uma fusão do *pigtail* que fornecia maior potência do WDM a um pedaço de fibra dopada com Itérbio. A radiação emitida pela outra ponta da fibra dopada era depois colimada e em seguida focada, no absorvedor saturável que seria colocado no suporte, que se encontra no lado esquerdo do suporte metálico, representado na figura anterior por um rectângulo preto.

Pretendia-se assim que a luz emitida pela fibra fosse “afectada” pelo absorvedor saturável, voltando a entrar na fibra dopada e propagando-se em direcção ao espelho em anel, que reflectiria a maior parte de volta para o absorvedor, deixando apenas uma pequena parte sair da cavidade. Essa saída encontrava-se ligada ao OSA. No entanto, a tarefa de alinhamento das lentes de colimação e de focagem, e do absorvedor demonstrou ser um obstáculo demasiado difícil de ultrapassar, na medida em que nenhum aumento de potência foi registado no OSA, após semanas de tentativas de alinhamento. Várias técnicas foram utilizadas de forma a tentar ultrapassar esse obstáculo, nomeadamente, o corte da ponta da fibra dopada (de modo a que o corte estivesse perfeito), o refazer das fusões entre o WDM e a fibra dopada, o corte do espelho óptico de modo a que numa das suas extremidades fosse colocado o OSA (de modo a ter-se uma maior sensibilidade no alinhamento da fibra dopada), entre outras.

Após inúmeras tentativas de alinhamento e repetidos fracassos, o comprimento da fibra dopada foi gradualmente diminuindo (devido aos constantes corte, fusões e se alguns acidentes de trabalho), até se tornar inútil para o trabalho a desenvolver. Como tal e uma vez que não era possível obter comercialmente, em tempo útil, mais um pedaço dessa fibra, optou-se por abandonar este trabalho.



## 7. Bibliografia

---

- [1] Bob Widlar, *Design Techniques for Monolithic Operational Amplifiers.*, Agosto 1969, vol. 4.
- [2] Paul Horowitz and Winfield Hill, *The Art of Electronics*, 2nd ed. Cambridge, Reino Unido: Press Syndicate of the University of Cambridge, 1989.
- [3] Jacob Millman and Christos C. Halkias, *Integrated Electronics: Analog and Digital Circuits and Systems.*: McGraw-Hill, Junho 1972.
- [4] Walter G. Jung, *Op. Amp. Applications*, Walter G. Jung, Ed. U.S.A.: Analog Devices, Inc., Julho, 2002.
- [5] Ron Mancini, *Op Amps for Everyone*, 2nd ed., Ron Mancini, Ed. Burlington, MA, Reino Unido: Texas Instruments, 2003.
- [6] Bruce Carter and Thomas R. Brown, *Handbook of Operational Amplifier Applications*. Dallas, Texas: Texas Instruments, Outubro 2001.
- [7] Bruce Carter, *A Single-Supply Op-Amp circuit Collection*. Dallas, Texas: Texas Instruments, Novembro de 2000.
- [8] Charles Kitchin and Lew Counts, *A Designer's Guide to Instrumentation Amplifiers*, 3rd ed. Norwood, MA, U.S.A: Analog Devices, Inc., 2006.
- [9] Datasheet Instrument Amplifier AD622. ISSN MA 02062-9106. Disponível em: <[http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/analogdevices/218546992AD622\\_c.pdf](http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/analogdevices/218546992AD622_c.pdf)>. Consultado em: 29 Julho 2010.
- [10] David Buchla and Wayne McLachan, *Applied Electronic Instrumentation and Measurement.*: Prentice Hall, 18 de Outubro de 1991.
- [11] James W. Dally, G. Kenneth McConnel, and Willey F. Riley, *Instrumentation for Engineering Measurements*, 2nd ed.: Jonh Wiley & Sons, 1993.
- [12] Ernest O. Doebelin, *Measurement Systems. Application and Design*, 4th ed.: Mac-Graw-Hill Internation Editions, 1990.
- [13] Aurélio Campilho, *Instrumentação Electrónica. Métodos e Técnicas de Medição*, Primeira Edição ed. Porto, Porto, Portugal: FEUP edições, 2000.
- [14] Américo de Azevedo, *Análise e Dimensionamento de um sistema de medida baseado numa célula de carga*. Porto, Portugal, 1992.
- [15] Albert D. Helfrick, *Instrumentação Electrónica Moderna e Técnicas de Medição*, PHB, Ed.: Prentice-Hall do Brasil, 1998.
- [16] Harry Norton, *Sensores y Analizadores.*: Editorial Gustavo Gili, 1982.
- [17] Arduino Tutorial: Learn electronics using Arduino. Disponível em: <<http://www.ladyada.net/learn/arduino/>>. Consultado em: 04 Setembro 2010.
- [18] Arduino Homepage. Disponível em: <<http://www.arduino.cc/>>. Consultado em: 10 Julho 2010.
- [19] Massimo Banzi, *Gettin Started with Arduino*, 1st ed.: O'Reilly Media, Inc, Outubro 2008.
- [20] Nuno Pessanha Santos, *Arduino Introdução e Recursos Avançados.*: Escola Naval Portuguesa, 2009.

- [21] Paul B. Crilly, A. Bruce Carlson, and Janet C. Rutledge, *Communications and Systems*, 4th ed.: MacGrawHill, 2001.
- [22] Site da FTDI. Disponível em: <[www.ftdichip.com](http://www.ftdichip.com)>. Consultado em: 25 Junho 2010.
- [23] Jonathan Oxer and Hugh Blemings, *Practical Arduino Cool Projects for Open Source Hardware*, Michelle Lowman, Ed. Nova York, Estados Unidos da América: Technology in Action, 2009.
- [24] E. Snitzer and R. Woodcock, *Yb - Er glass laser.*: Applied Physics Letters, 1965.
- [25] G. Karlsson et al., *Development and characterization of Yb-Er laser glass for high average power laser diode pumping.*: Applied Physics, 2002.
- [26] M.J.F. Digonet, *Rare-earth doped fiber lasers and amplifiers*. New York: Marcel Dekker, 1993.
- [27] J. Chang, Q. Wang, G. D. Peng, X. Zhang, and Z. Liu, *Modeling S and C band optical amplification in thulium and erbium codoped fluoride fiber.*: Optics Communications, 2006.
- [28] Homepage da: Mitutoyo U.S.A. Disponível em: <<http://www.mitutoyo.com/TerminalMerchandisingGroup.aspx?group=1202>>. Consultado em: 5 Maio 2010.
- [29] Mitutoyo U.S.A. ID-S Digimatic Indicator No. 99MAH002M Datasheet. Disponível em: <<http://www.mitutoyo.com>>. Consultado em: 6 Maio 2010.
- [30] Manual do utilizador do FP-SG-140. Disponível em: <<http://www.ni.com/pdf/manuals/323346a.pdf>>. Consultado em: 03 Agosto 2010.
- [31] Datasheet do regulador e conversor de tensão LT1054. Disponível em: <<http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/lineartechnology/1054lfe.pdf>>. Consultado em: 29 Maio 2010.
- [32] Datasheet do Regulador de tensão LM317. Disponível em: <[http://www.datasheetcatalog.org/datasheets/560/275630\\_DS.pdf](http://www.datasheetcatalog.org/datasheets/560/275630_DS.pdf)>. Consultado em: 25 Maio 2010.
- [33] Fairchild. Datasheet do amplificador operacional LM741CN. Disponível em: <<http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/fairchild/LM741.pdf>>. Consultado em: 15 Junho 2010.
- [34] Operating Manual do PDA10CS. Disponível em: <<http://www.thorlabs.com/Thorcat/13000/13058-S01.pdf>>. Consultado em: 05 Setembro 2010.
- [35] Richard L. Sutherland, *Handbook of Nonlinear Optics*, Segunda Edição ed.: CRC Press, 22 de Abril de 1996.
- [36] Eric W. Van Stryland and Mansoor Sheik-Bahae, *Z-Scan Measurements of Optical Nonlinearities*. Estados Unidos da América, 1998.
- [37] DeSalvo R., *Z-Scan measurements of the anisotropy of nonlinear refraction and absorption in crystals.*, Opt. Lett., Ed. Washington DC, 1993.
- [38] Y. R. Shen, *The Principles of nonlinear optics.*, Wiley Interscience, Ed. Nova York, Maio de 1984.
- [39] Luís de Aguiar Oliveira Gomes, *Lases e Amplificadores em Fibra Óptica*. Porto: Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, Outubro de 2005.

