

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA AUTÓNOMO DE AQUISIÇÃO DE DADOS EM ENSAIOS ESTRUTURAIS

Luis Miguel Jardim Noites

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS

Professor Doutor Miguel Ângelo Carvalho Ferraz

Professor Doutor Mário Jorge de Seixas Pimentel

JUNHO DE 2016

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2015/2016

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2015/2016 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2016.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão electrónica fornecida pelo respetivo Autor.

Aos meus Pais

Sucesso não é o final, falhar não é fatal: é a coragem para continuar que conta.

Winston Churchill

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador, Prof. Miguel Ferraz, que se mostrou sempre disponível para o esclarecimento de qualquer tipo de dúvidas, e pelos comentários efectuados sobre o meu trabalho.

Gostaria também de agradecer ao Prof. Mário Pimentel por me ter fornecido todas as condições necessárias para a realização do estágio, especialmente a disponibilização de material necessário à realização do referido estágio.

Um especial agradecimento ao Eng.º Nuno Pinto, pela disponibilidade, ao longo deste período, na resolução de vários problemas ligados ao sistema *CompactRIO*.

O meu reconhecimento sincero ao Eng.º Jorge Reis, cujo apoio permitiu a realização mais eficiente deste trabalho.

Aos meus pais, por tudo o que sempre fizeram por mim, por todo o seu apoio e incentivo durante a realização deste estágio.

Luis Miguel Jardim Noites

RESUMO

Este relatório pretende documentar os principais aspectos do desenvolvimento de um sistema de aquisição de dados centrado na utilização de um equipamento *National Instruments™ CompactRIO™*.

O equipamento anteriormente referido foi adquirido pelo Laboratório da Tecnologia do Betão e do Comportamento estrutural da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto; no entanto este não se encontra presentemente a ser utilizado, tendo sido preferida uma opção baseada em equipamentos *DataTaker™ DT800*. No entanto para ensaios em que seja necessária uma maior qualidade dos dados, este sistema mostra-se com algumas limitações pelo que se utiliza uma versão centrada na utilização de equipamentos do tipo *National Instruments™ CompactDAQ™*.

Começou-se pela realização de um levantamento exaustivo dos recursos disponibilizados; de seguida foram analisadas as diversas tecnologias que poderiam vir a revelar-se importantes para a realização deste trabalho; finalmente foram implementados os diversos programas recorrendo às ferramentas necessárias, bem como os respectivos testes, para o correto desenvolvimento do projeto.

O sistema desenvolvido permite ao utilizador efetuar diversas escolhas a partir de uma interface *LabVIEW™* do modo de proceder à recolha e ao armazenamento dos dados. Estas escolhas visam a correta configuração do sistema com base nos módulos instalados no equipamento *CompactRIO™* assim como a escolha do modo de armazenamento e envio dos dados.

Este sistema visa a substituição das versões em funcionamento baseadas em sistemas *DataTaker™ DT800* e *National Instruments™ CompactDAQ™*, reunindo todas as funcionalidades deste dois sistemas num único equipamento. Uma das suas funcionalidades mais revelantes é a autonomia, pois permite a aquisição de dados de projetos que se prolongam por um intervalo de tempo considerável, no qual não é viável disponibilizar um computador local durante todo o período de análise do referido projeto. Neste caso a solução desenvolvida revelou-se muito adequada pois exhibe a possibilidade de um funcionamento autónomo como o *DataTaker™ DT800*, a precisão da aquisição de um sistema *National Instruments™ CompactDAQ™* e ainda uma elevada velocidade de aquisição que nenhum dos anteriores permite.

Para concluir foram efectuados alguns ensaios para verificar a facilidade de utilização do sistema e a qualidade dos dados recolhidos, tendo sido ainda realizada uma análise criteriosa de modo a validar todos os resultados gerados pelo sistema.

Palavras-Chave: *National Instruments™ CompactRIO™*, *National Instruments™ CompactDAQ™*, *DataTaker™ DT800*, Real-Time, FPGA, *LabVIEW™*.

ABSTRACT

The main objective of this document is to record the main aspects related with the development of a system based on the use of a *National Instruments™ CompactRIO™* equipment.

The aforementioned equipment was acquired by the “Laboratório da Tecnologia do Betão e do Comportamento estrutural” from the Faculty of Engineering of the University of Porto however this is not currently being used, it was favoured an option based on the use of a *DataTaker™ DT800* equipment. However for tests where a higher data quality is needed a version built around a *National Instruments™ CompactDAQ™* equipment is used.

The first task envisioned an extensive survey of the available resources, after which it was possible to analyse the various technologies that could be necessary to accomplish this work; in the end it was possible to implement all the programs using the necessary tools, as well as the respective tests for the proper development of the project.

The developed system allows the user to make different choices from a *LabVIEW™* interface to collect and store data. These choices aim to correctly configure the system based on the modules installed on the *National Instruments™ CompactRIO™* equipment as well as give the user the choice of storage mode and the presentation of the data collected.

This system aims to replace working versions based on a *DataTaker™ DT800* and *National Instruments™ CompactDAQ™* system, bringing together all the features of these two systems in one. One of the most useful features is autonomy, because it allows the acquisition of project data extending over a considerable period of time, were it's not feasible to provide a local computer during the duration of the project analysis period. In this case the developed solution has proven very suitable for autonomous operation as is the case with the solution based on the *DataTaker™ DT800* system, also the acquisition accuracy is similar with the solution based on the *National Instruments™ CompactDAQ™* system and yet it provides a high speed that none of the above enables.

In the end some tests were made to check the system's ease of use and quality of collected data, and a thorough analysis was performed in order to validate all the results generated by the system.

Keywords: *National Instruments™ CompactRIO™*, *National Instruments™ CompactDAQ™*, *DataTaker™ DT800*, Real-Time, FPGA, *LabVIEW™*.

ÍNDICE GERAL	
AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	III
ABSTRACT	V
ÍNDICE GERAL	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	XI
ÍNDICE DE QUADROS	XV
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Estrutura do Relatório.....	1
1.2 Descrição	1
1.3 Motivação	2
1.4 Objectivos.....	2
1.5 Planeamento do projeto	3
2 ESTADO DA ARTE	7
2.1 Avaliação de sistemas.....	7
2.1.1 <i>DataTaker</i> TM DT800.....	7
2.1.2 <i>CompactDAQ</i> TM	10
2.1.3 <i>DataTaker</i> TM DT80.....	12
2.1.4 Comparação dos sistemas.....	13
2.2 Levantamento e descrição dos recursos existentes.....	14
2.2.1 Sistema <i>CompactRIO</i> TM	14
2.2.2 Chassi <i>CompactRIO</i> TM cRIO-9104.....	15
2.2.3 Controlador <i>CompactRIO</i> cRIO-9004.....	16
2.2.4 Módulos de aquisição	17
2.2.4.1 Módulo de aquisição de ¼ ponte.....	17
2.2.4.2 Módulo de aquisição de ½ ponte ou ponte completa	17
2.2.4.3 Módulo de aquisição de Temperatura.....	19
2.2.4.4 Módulo de aquisição de sensores em tensão	20
2.2.4.5 Módulo de aquisição de sensores em corrente.....	21
2.3 Conclusões.....	22
3 SOLUÇÕES TECNOLÓGICAS	23
3.1 Programas	23
3.1.1 <i>LabVIEW</i> TM	23
3.1.2 <i>LabVIEW</i> TM RT.....	23
3.1.3 <i>LabVIEW</i> TM FPGA	24

3.2	Sensores de deslocamento (<i>LVDTs</i>)	25
3.3	Extensômetros	26
3.3.1	Células de Carga.....	26
3.3.2	Ponte de <i>Wheatstone</i>	27
3.3.3	<i>Shunt Calibration</i>	28
3.4	Termoresistências	29
3.4.1	Equação de <i>Callendar-Van Dusen</i>	29
3.5	Sensores de inclinação.....	30
3.6	Comunicação dos dados	30
3.6.1	Comunicação <i>FPGA-RT</i>	30
3.6.2	Comunicação <i>FPGA-Computador</i>	31
3.6.3	Comunicação interna	31
4	DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO	33
4.1	Introdução.....	33
4.2	Aquisição e preparação dos dados (Módulo <i>FPGA</i>)	33
4.2.1	Aquisição dos dados	33
4.2.2	Processamento inicial dos dados	37
4.2.3	Transmissão dos dados	37
4.2.4	Sincronização do módulo	37
4.3	Visualização dos dados (Módulo <i>RT</i>).....	39
4.3.1	Leitura dos dados.....	39
4.3.2	Gravação dos dados	40
4.3.3	Conversão dos dados	40
4.3.4	Apresentação dos dados.....	40
4.4	Visualização dos dados (Módulo <i>Host</i>).....	41
4.4.1	Leitura dos dados.....	41
4.4.2	Gravação dos dados	41
4.4.3	Conversão dos dados	42
4.4.4	Apresentação dos dados.....	42
5	ENSAIOS	43
5.1	Contexto/Enquadramento	43
5.2	Preparação dos provetes para os ensaios	44
5.3	Ensaios realizados.....	46
5.3.1	Ensaio 1 – Teste da versão <i>RT</i>	46
5.3.2	Ensaio 2 – Teste da versão final	49

5.3.3	Ensaio 3 – Teste da versão computador	51
5.3.4	Ensaio 4 – Teste da versão <i>DataTaker</i> TM	52
5.3.5	Ensaio 5 – Teste de comparação	54
5.3.5.1	Teste de comparação a 10Hz	54
5.3.5.2	Teste de comparação a 50Hz	56
5.4	Comparação dos ensaios realizados	59
6	CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	61
6.1	Estado final do projeto	61
6.2	Trabalhos futuros	61
	REFERÊNCIAS	63
	ANEXO A. PROCEDIMENTO PARA A INSTALAÇÃO DE TODO O SOFTWARE NECESSÁRIO	65
A 1.	Procedimentos prévios	65
A 2.	Instalação do <i>LabVIEW</i> TM (incluído os módulos <i>RT</i> e <i>FPGA</i>)	66
A 3.	Configuração do <i>LabVIEW</i> TM	66
A 4.	Instalação dos <i>drivers</i> para o dispositivo <i>CompactRIO</i> TM	69
A 5.	Configuração inicial do dispositivo <i>CompactRIO</i> TM	69
A 6.	Configuração da comunicação entre o dispositivo <i>CompactRIO</i> TM e o computador	72
A 7.	Instalação do <i>software</i> no dispositivo <i>CompactRIO</i> TM	73
A 8.	Configuração da compilação	75

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1	Arquitetura do sistema.....	2
Fig. 2	Configuração do sistema para funcionamento autónomo.....	3
Fig. 3	Configuração do sistema para funcionamento controlado pelo utilizador.....	4
Fig. 4	Configuração ambicionada do sistema.....	4
Fig. 5	<i>DataTaker</i> TM DT800.....	7
Fig. 6	Exemplo de comando simples para utilização do <i>DataTaker</i> TM DT800.....	8
Fig. 7	Comandos de tarefas disponíveis no <i>DataTaker</i> TM DT800.....	8
Fig. 8	Exemplo de comandos para definição dos canais no <i>DataTaker</i> DT800.....	9
Fig. 9	Multiplexagem para <i>DataTaker</i> TM DT8x.....	9
Fig. 10	Sistema <i>CompactDAQ</i> TM	10
Fig. 11	Exemplo de painel frontal de aplicação em <i>LabVIEW</i> TM	11
Fig. 12	Exemplo do painel de blocos da aplicação em <i>LabVIEW</i> TM	12
Fig. 13	<i>DataTaker</i> TM DT80.....	12
Fig. 14	Aspecto gráfico da aplicação <i>Web</i>	13
Fig. 15	Arquitetura <i>CompactRIO</i> TM	15
Fig. 16	Chassi <i>CompactRIO</i> TM CRIO-9104.....	15
Fig. 17	Processador FPGA (XILINX TM Virtex-II 3000).....	16
Fig. 18	Controlador <i>CompactRIO</i> CRIO-9004.....	16
Fig. 19	Painel TFT RS-232 sensível ao toque.....	17
Fig. 20	Módulo NI-9236.....	17
Fig. 21	Módulo NI-9237.....	18
Fig. 22	Esquema de ligação ½ Ponte.....	18
Fig. 23	Acessório NI-9944 para ligação de sensores em ¼ ponte.....	18
Fig. 24	Esquema de ligação ¼ Ponte (Tipo I).....	19
Fig. 25	Esquema de ligação “ <i>Shunt calibration</i> ”.....	19
Fig. 26	Módulo NI-9217.....	20
Fig. 27	Módulo NI-9205.....	20
Fig. 28	Módulo NI-9203.....	21
Fig. 29	Exemplo de painel de blocos da aplicação em <i>LabVIEW</i> TM	24
Fig. 30	Esquema do funcionamento dos <i>LVDTs</i>	25
Fig. 31	Leitura do deslocamento em <i>LVDTs</i>	26
Fig. 32	Célula de carga.....	27
Fig. 33	Ponte de <i>Wheatstone</i>	27
Fig. 34	Ponte de <i>Wheatstone</i> com resistência (<i>Shunt Calibration</i>).....	28

Fig. 35	Comparação da linearidade Termistores e <i>RTDs</i>	29
Fig. 36	Comunicação entre processos.....	30
Fig. 37	Sincronização com <i>FPGA</i>	30
Fig. 38	Exemplo de “ <i>Race Conditions</i> ”	31
Fig. 39	Exemplo de sincronização por notificadores	32
Fig. 40	Exemplo de configuração (NI 9205)	34
Fig. 41	Ligação em modo RSE	34
Fig. 42	Ligação em modo NRSE	35
Fig. 43	Ligação em modo DIFF.....	35
Fig. 44	Painel frontal aplicação em <i>FPGA</i> de aquisição de sinal	36
Fig. 45	Painel de blocos em <i>FPGA</i> para aquisição	36
Fig. 46	Painel de blocos em <i>FPGA</i> para aquisição e média.....	37
Fig. 47	Painel de blocos em <i>FPGA</i> para aquisição sincronizada	38
Fig. 48	Painel de blocos para aquisição sincronizada em <i>RT</i> ou computador	38
Fig. 49	Painel frontal da aplicação <i>RT</i>	39
Fig. 50	Painel de blocos para gravação em <i>RT</i>	40
Fig. 51	Painel de blocos para cálculo da temperatura.....	40
Fig. 52	Painel inicial e configuração da aplicação de computador	41
Fig. 53	Painel de blocos para gravação dos dados no computador	42
Fig. 54	Esquema das vigas.....	44
Fig. 55	Montagem e betonagem das vigas VDA1 a VDA4.....	45
Fig. 56	Ensaios de tração e compressão do betão	45
Fig. 57	Realização do ensaio 1	47
Fig. 58	Ensaio 1 (Ação aplicada e resultados).....	47
Fig. 59	Fase final do Ensaio 1 à ruptura (Ação aplicada e resultados)	48
Fig. 60	Esquema estrutural pretendido	49
Fig. 61	Esquema estrutural ensaiado	49
Fig. 62	Posicionamento dos sensores.....	50
Fig. 63	Ensaio 2 da viga VDA3	50
Fig. 64	Esquemas comparativos	51
Fig. 65	Lei de carga no ensaio VDA3.....	51
Fig. 66	Resultados do ensaio VDA3.....	52
Fig. 67	Lei de carga no ensaio VDA4.....	53
Fig. 68	Ensaio 4 da viga VDA4	53
Fig. 69	Resultados do ensaio VDA4.....	54

<i>Fig. 70</i>	Ensaio de comparação	54
<i>Fig. 71</i>	Resultados do ensaio a 10Hz	55
<i>Fig. 72</i>	Resultados corrigidos do ensaio a 10Hz.....	55
<i>Fig. 73</i>	Pormenor dos resultados corrigidos do ensaio a 10Hz	56
<i>Fig. 74</i>	Resultados do ensaio a 50Hz	57
<i>Fig. 75</i>	Resultados corrigidos do ensaio a 50Hz.....	57
<i>Fig. 76</i>	Pormenor dos resultados corrigidos do ensaio a 50Hz	58
<i>Fig. 77</i>	Servidor de <i>software</i>	65
<i>Fig. 78</i>	Compatibilidade entre o <i>LabVIEW</i> e os <i>drivers CompactRIO™</i>	66
<i>Fig. 79</i>	Alteração das configurações <i>IPV4</i> da rede	67
<i>Fig. 80</i>	Alteração das configurações avançadas <i>IPV4</i> da rede.....	67
<i>Fig. 81</i>	Alteração do sufixo <i>DNS</i> da ligação.....	68
<i>Fig. 82</i>	Alteração das opções do programa	68
<i>Fig. 83</i>	Alteração do servidor de licenças	69
<i>Fig. 84</i>	Configurações <i>TCP/IP</i> inicial.....	69
<i>Fig. 85</i>	Acesso inicial ao <i>MAX</i>	70
<i>Fig. 86</i>	Configuração inicial do sistema.....	70
<i>Fig. 87</i>	Alteração do nome do sistema.....	71
<i>Fig. 88</i>	Alteração do endereço <i>IP</i> do sistema.....	71
<i>Fig. 89</i>	Esquema do <i>CompactRIO™</i>	72
<i>Fig. 90</i>	Configuração do endereço <i>IP</i> do computador	72
<i>Fig. 91</i>	Verificação da configuração do sistema	73
<i>Fig. 92</i>	Instalação do <i>software</i> no sistema	73
<i>Fig. 93</i>	Escolha de <i>software</i> adicional	74
<i>Fig. 94</i>	Verificação do sistema.....	74
<i>Fig. 95</i>	Compilação na nuvem	75
<i>Fig. 96</i>	Configuração da compilação na nuvem.....	75
<i>Fig. 97</i>	<i>Password</i> da compilação na nuvem e teste.....	76

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1	Comparação	13
Quadro 2	Valor das constantes para alguns tipos de termoresistências.....	30
Quadro 3	Localização dos módulos no sistema de aquisição.....	43
Quadro 4	Resultados dos ensaios à compressão uniaxial	45
Quadro 5	Resultados dos ensaios de compressão diametral.....	46

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

ADC - analog-to-digital converter

CompactDAQ - Compact Data acquisition.

CompactRIO - Compact reconfigurable IO Modules.

DBL – Double Precision value

DIFF – Differential

EMC - Electromagnetic compatibility

FPGA - Field Programmable Gate Array.

FXP – Fixed Point Value

HDL – Hardware Description Language

IO ou I/O – Input Output

IP - Intellectual Property core

IRQ - Interrupt Request

LabEST - Laboratório da Tecnologia do Betão e do Comportamento estrutural.

LVDT - linear variable differential transformer

MAX - Measurement & Automation Explorer

NRSE - Non-Referenced Single Ended

RSE - Referenced Single Ended

RTD - resistance temperature detectors

RTOS - Real-Time Operating System

SGL - Single Precision value

SSP - Standard Service Program

TCP/IP - Transmission Control Protocol / Internet Protocol

USB - Universal Serial Bus

VPN - Virtual Private Network

1 Introdução

1.1 ESTRUTURA DO RELATÓRIO

O relatório encontra-se subdividido em 6 capítulos que descrevem o projeto desenvolvido e ainda 1 anexo que complementa a informação.

O capítulo inicial inclui uma introdução ao projeto, apresenta a motivação e objectivos da sua realização, descreve um exaustivo levantamento dos recursos existentes terminando com o planeamento da sua realização.

No segundo capítulo é feita uma revisão bibliográfica, no qual se inclui uma descrição do estado da arte.

No capítulo seguinte é efectuada a revisão tecnológica do projeto, sendo analisadas várias tecnologias e componentes essenciais para o desenvolvimento da solução tais como:

- *LabVIEW™*
- *LabVIEW™ RT*
- *LabVIEW™ FPGA*
- Sensores
- Comunicação

O quarto capítulo apresenta detalhadamente o desenvolvimento do projeto, que representa o objectivo final deste trabalho.

Segue-se o capítulo 5 dedicado à análise e comparação dos resultados obtidos em vários ensaios realizados ao longo do desenvolvimento do projeto.

No último capítulo, capítulo 6 são apresentados os objectivos atingidos com a realização do projeto e são ainda referidas algumas evoluções futuras.

Em anexo encontra-se descrito todo o procedimento para uma correta instalação do *software* necessário.

1.2 DESCRIÇÃO

Neste primeiro capítulo pretende-se fornecer uma visão geral de todo o trabalho desenvolvido. Após uma descrição inicial do tema abordado, são referidos os objectivos que se pretende atingir com a realização deste trabalho.

Na conclusão deste capítulo é apresentada uma breve descrição da estrutura do documento.

1.3 MOTIVAÇÃO

Atualmente os ensaios estruturais realizados pelo Laboratório da Tecnologia do Betão e do Comportamento estrutural (LabEST) são efectuados com recurso a uma plataforma baseada numa unidade de aquisição *DataTaker™ DT800* ou em alternativa é utilizada uma unidade de aquisição do tipo *National Instruments™ CompactDAQ™*, no entanto o referido laboratório adquiriu recentemente plataformas *National Instruments™ CompactRIO™* com as quais visa a substituição das anteriormente referidas unidades. Este deverá ser de fácil utilização e potencialmente expansível para que possa efetuar além da aquisição dos dados e seu armazenamento, o controle de actuadores (controle este que deverá ser função dos dados recolhidos). A migração possibilitaria ainda que este laboratório possa realizar novos tipos de ensaios, para os quais a nova plataforma será mais indicada, tal como a realização de ensaios no local da estrutura sem que para tal seja necessário equipamento adicional. Outra grande vantagem na migração é o facto de os módulos de aquisição adquiridos para a plataforma *CompactDAQ™* poderem ser utilizados na nova plataforma possibilitando um aumento do seu desempenho e a otimização do investimento.

O presente relatório tem como objectivo documentar a realização de todas as tarefas necessária para o correto funcionamento de um sistema baseado na plataforma *CompactRIO™*.

1.4 OBJECTIVOS

O principal objectivo deste trabalho é criar um sistema com o qual é possível a recolha e o armazenamento de dados recorrendo a uma plataforma *CompactRIO™*. A solução a desenvolver permite não só a recolha e armazenamento de dados instantâneos como também o seu funcionamento autónomo (neste caso não é possível a interação com o utilizador pois a plataforma *CompactRIO™* não apresenta um display, no entanto todos os dados recolhidos são armazenados), o que cria um valor acrescentado para os utilizadores da referida solução.

Assim teremos que todo o sistema seria desenvolvido com recurso à tecnologia *LabVIEW™* respeitando a arquitetura que se encontra esquematizada na Fig. 1.

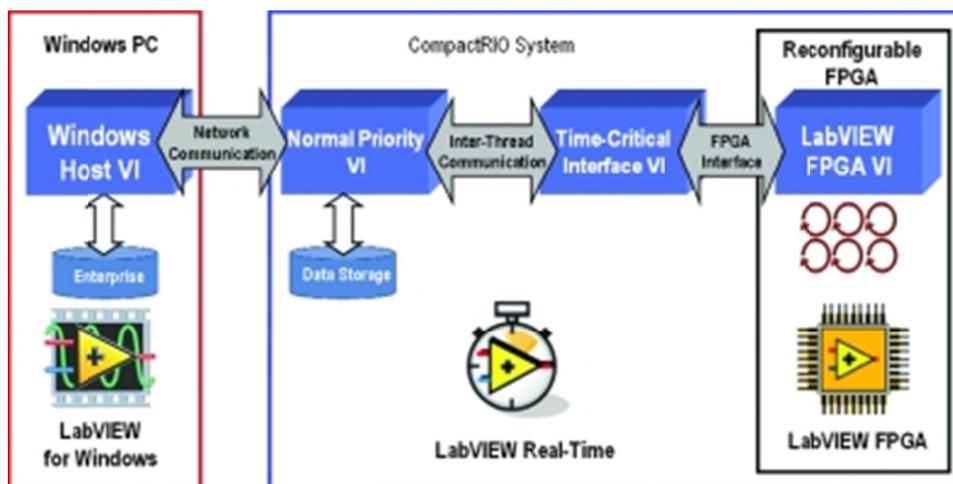


Fig. 1 Arquitetura do sistema

1.5 PLANEAMENTO DO PROJETO

O projeto visa a construção de um sistema de fácil utilização e que possibilita a aquisição de dados de vários tipos de sensores, sendo estes armazenados para uma utilização futura.

Para a sua execução foi inicialmente desenvolvida uma aplicação que funcionava maioritariamente no sistema *CompactRIO™*, e como tal apresentava uma elevada fiabilidade. No entanto, a interação com o utilizador é parcialmente omitida para que esta possa ser atingida.

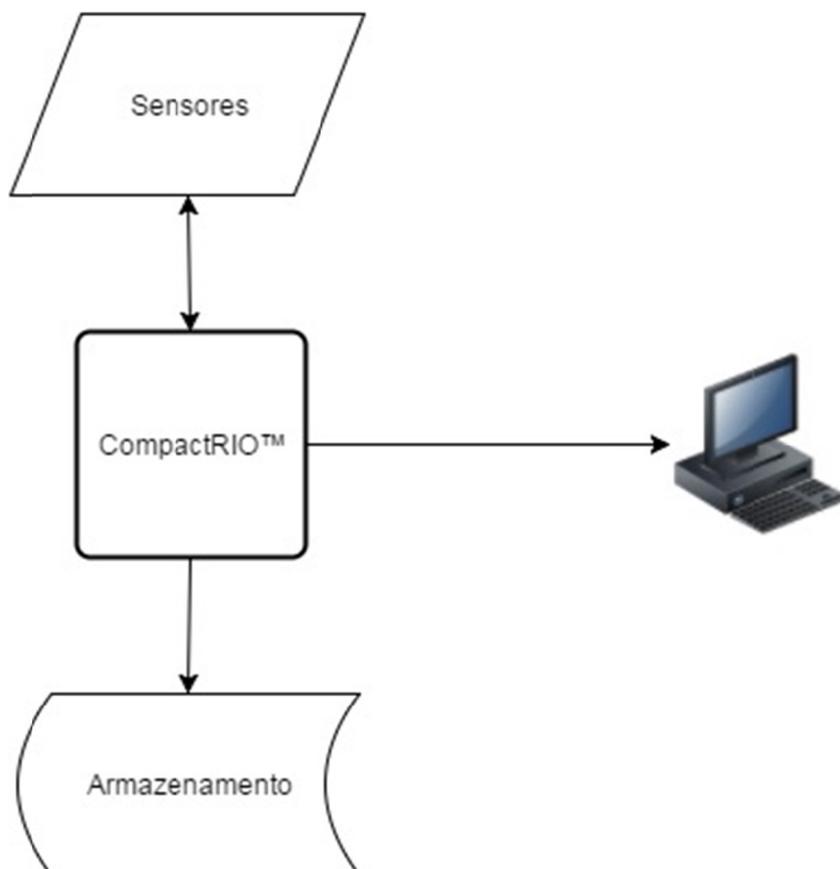


Fig. 2 Configuração do sistema para funcionamento autónomo

De referir que a solução delineada na Fig. 2 não apresenta uma comunicação bidirecional entre o utilizador e todo o sistema, não permitindo, portanto, a interação. Esta situação não é compatível com uma das finalidades que será o controlo do ensaio por parte do utilizador, seja este controlo efectuado em força ou deslocamento. No entanto uma das grandes vantagens é a capacidade de armazenamento dos dados que é feito no sistema não sendo portanto afectado pela ligação ao utilizador.

Para ter em atenção uma melhor interação com o utilizador, foi desenvolvida outra aplicação, neste caso em que se teria uma menor fiabilidade, ver Fig. 3, pois está dependente da fiabilidade de uma ligação de rede direta; no entanto existiria uma total interação entre o utilizador e o sistema permitindo deste modo que além de adquirir todos os sinais fosse possível ao utilizador, durante o ensaio, alterar as condições deste.

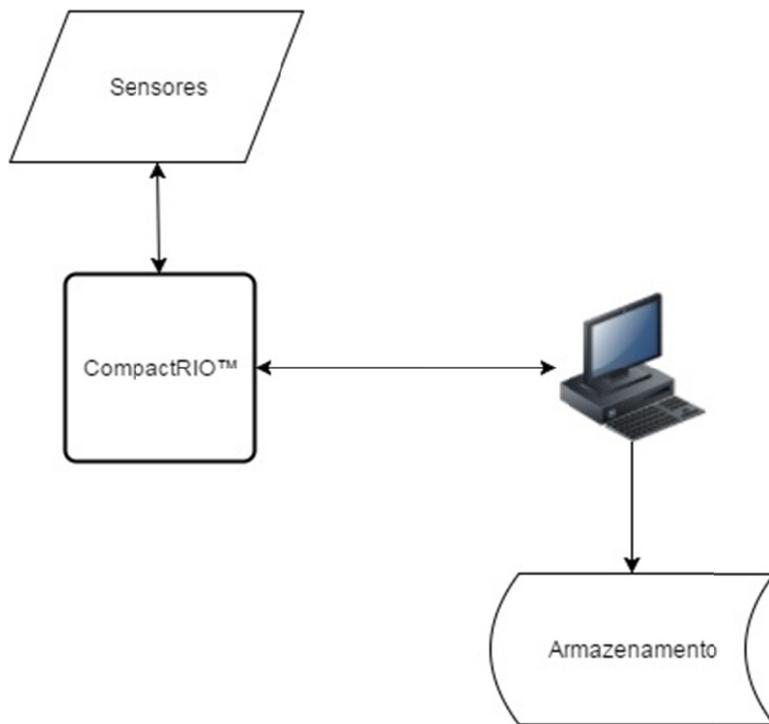


Fig. 3 Configuração do sistema para funcionamento controlado pelo utilizador

Esta configuração tal como foi anteriormente referido permite uma interação entre o utilizador e o sistema, sendo que os dados serão armazenados pelo sistema do utilizador, isso permite que o dados a armazenar sejam previamente tratados, e que estes sejam seletivamente armazenados. Os dados armazenados serão apenas aqueles que o utilizador pretender armazenar no momento, contudo, para obter esta funcionalidade, é sacrificada alguma da fiabilidade inerente ao sistema.

Uma alteração a implementar será o funcionamento de todo o sistema de modo a que este possa interagir com o utilizador e ainda assim manter uma elevada fiabilidade.

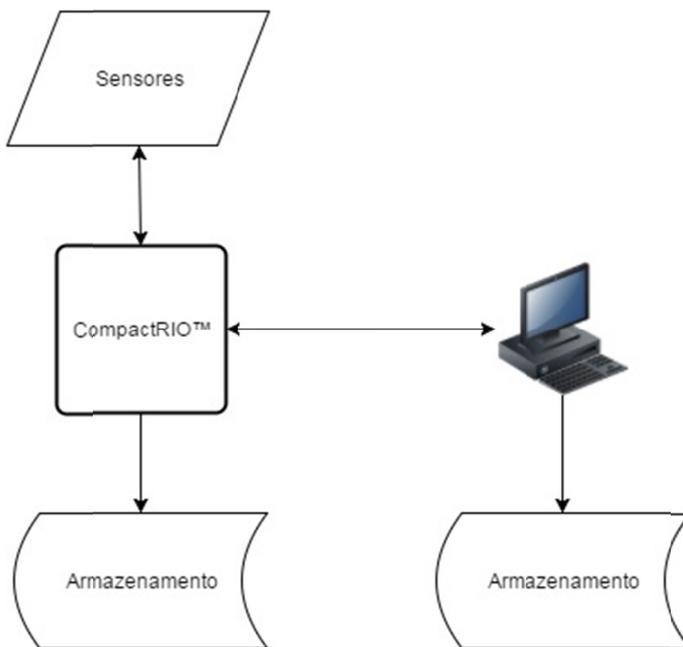


Fig. 4 Configuração ambicionada do sistema

Para obter esta configuração será necessário desenvolver um sistema no qual a comunicação entre este e o utilizador possa ser opcional. Para tal será necessária a implementação de uma comunicação por exemplo através de *shared variables* [1]; esta configuração teria as vantagens das anteriores e não estaria sujeita a problemas de fiabilidade. De notar, no entanto, que seria necessário recorrer ao armazenamento dos dados em dois locais distintos e que estes dados poderiam não ser iguais, pois o armazenamento dos dados no sistema é feito automaticamente e sem qualquer alteração por parte do utilizador. Pelo contrário, os dados armazenados pelo dispositivo do utilizador poderão ser alterados por este, sendo que neste caso, estão sujeitos às falhas inerentes à comunicação entre o sistema e o utilizador.

2 Estado da Arte

2.1 AVALIAÇÃO DE SISTEMAS

Neste capítulo é realizada uma exposição de alguns dos sistemas atualmente em utilização no LabEST, identificando as funcionalidades mais relevantes destes, assim como limitações que advêm da sua utilização. Na conclusão deste capítulo, serão apresentadas algumas considerações sobre os elementos a incluir no trabalho final, tendo em consideração os vários sistemas analisados.

2.1.1 *DATA*TAKER™ DT800

Este é o sistema (ver Fig. 5), mais utilizado para a realização atual dos ensaios no LabEST.



Fig. 5 *DataTaker*™ DT800

Este modelo caracteriza-se pela sua simplicidade na utilização; no entanto se for necessária uma utilização avançada, este torna-se rapidamente bastante complexo.

De referir que no presente este equipamento é utilizado recorrendo a um ecrã muito básico para a aquisição de dados e em que esta é preparada recorrendo a comandos de texto, como se pode ver na Fig. 6, estes comandos para aquisições elementares são bastante simples. De seguida é apresentado um exemplo para a aquisição de sinais.

```

BEGIN"exemplo"
RAIS 1R(4W) 2R(4W)
LOGON
END
    
```

Nome do trabalho

Tarefa A (com repetição de 1S) e aquisição de 2 canais (1 e 2) de resistências com parametro adicional indicando que têm 4 fios

Todos os dados são armazenados

Fig. 6 Exemplo de comando simples para utilização do *DataTaker*™ DT800

No entanto se for pretendido efetuar uma aquisição mais elaborada é necessário recorrer ao manual do sistema para determinar quais os comandos a utilizar.

Job Commands		Job Commands	
The DT800 supports these job-related commands:			
BEGIN "JobName"	When sent to the DT800, creates a job called "JobName"	BEGIN	When sent to the DT800, creates a job called UNTITLED
END		END	
DIRJOBS	Returns a report of all jobs stored in the DT800 (+ indicates locked job, * indicates current job)	DIRJOBS	Returns a report of all jobs stored in the DT800 (+ indicates locked job, * indicates current job)
DIRJOB "JobName"	Returns a report comprising various JobName details (by schedule)	DIRJOB "JobName"	Returns a report comprising various JobName details (by schedule)
DIRJOB	Returns a report of the current job and its details (by schedule)	DIRJOB	Returns a report of the current job and its details (by schedule)
SHOWPROG	Returns the current job's program file		
SHOWPROG "JobName"	Returns JobName's program file		
SHOWPROG *	Returns all currently-defined job's program files		
LOCKJOB	Locks the current job from deletion, its program file, and its data from deletion		
LOCKJOB "JobName"	Protects JobName from deletion, its program file, and its data from deletion		
LOCKJOB *	Protects all jobs from deletion, their programs from modification, and their data from deletion		
UNLOCKJOB	Allows the current job to be deleted, its program to be modified, and its data to be deleted		
UNLOCKJOB "JobName"	Allows JobName to be deleted, its program to be modified, and its data to be deleted		
UNLOCKJOB *	Allows all jobs to be deleted, their programs to be modified, and their data to be deleted		
DELDATA	Deletes the current job's data from the DT800		
DELDATA "JobName"	Deletes only JobName's data from the DT800		
DELDATA *	Deletes all job's data from the DT800		
DELJOB	Deletes the current job from the DT800		
DELJOB "JobName"	Deletes only JobName from the DT800		
DELJOB *	Deletes all jobs from the DT800		
CURJOB	Returns the current job's name		
RENJOB "JobName"	Makes JobName the DT800's current job. (Of course, JobName must already exist in the DT800 - see "Programs in Holder for Jobs" on page 15.) New data created is appended to any existing data for that job.		
RENJOBONRESIST "JobName"	See "Startup Job" on page 115.		
RENJOBONRESIST "JobName"			

Fig. 7 Comandos de tarefas disponíveis no *DataTaker*™ DT800

Como pode ser verificado na Fig. 7 a lista de comandos é muito extensa não sendo referidas as opções que cada um destes comandos possui.

Após a definição da tarefa uma opção obrigatória é a definição dos canais a adquirir.

Para estes a lista como pode ser verificado na Fig. 8 é extremamente extensa, sendo esta consultável no manual do sistema.

Category	Signal/Sensor Details	Channel Type	Examples	Default Channel Options	Channel Factor	Resolution	Output Units	Writing Configuration and Default	Fundamental Samples	Comment
Voltage	Voltage == with zero correction ["corrected"]	V	1V 1+V	(1,11M)	attenuation factor	1µV	mV	Figures 100 to 104	2W 4	Analog input voltage range is ±10mV to ±13V
	Voltage == no correction ["uncorrected"]	VVIC		(1,11M)	attenuation factor		mV		2W 1	
	Voltage output on A _o terminal	VO	VO=100				mV		2W 1	Cannot be used if any other channels use analog triggering in burst mode sampling
Current	Current; use with external shunt [see "Current Inputs" on page 170]	I	2I 38I	(100)	current shunt Ω	10nA	mA	Figures 105 to 107	2W 4	Requires an external current shunt (physically 100Ω, but higher for small currents)
	4-20mA current loop	L	1# . . 5#L	(100)	current shunt Ω	0.01%	Percent		2W 4	See "4-20mA Current Loops" on page 140.
Resistance	Resistance by 2, 3 or 4-wire methods, 1MΩ maximum	R	4R (P250)	(0, P7)	Resistance offset adjustment Ω	1mΩ	Ohms	Figures 108 to 115	4W 7	Default excitation: power (7mW) Use 2W or 3W channel options for 2 and 3-wire configurations
		BGI	1BGI (60)	(350, I10)	bridge resistance Ω	1ppm	ppm	Figures 116 to 122	4W 7	Default excitation: current (10mA) External completion required for 1/2 & 1/4 bridges.
Bridge	4-wire; quarter, half & full bridge; current excitation See "Bridges" on page 146	BGI	1BGI (60)	(350, I10)	bridge resistance Ω	1ppm	ppm	Figures 116 to 122	4W 7	Default excitation: current (10mA) External completion required for 1/2 & 1/4 bridges.
		BGV	1BGV	(0, V3500, 4W)	offset adjustment ppm	0.3ppm	ppm		4W 4	Default excitation: voltage (2.500mV) Use 6W channel option for 6-wire configuration. External completion required for 1/2 & 1/4 bridges.

Fig. 8 Exemplo de comandos para definição dos canais no DataTaker DT800

Outra grande desvantagem deste sistema é tratar-se de um sistema fechado em que não é possível expandir os canais existente, pois ao contrário das novas versões do tipo DataTaker™ DT8x não permite a ligação de módulos de multiplexagem [2], ver Fig. 9, para o aumento do número de canais.



Fig. 9 Multiplexagem para DataTaker™ DT8x

Sendo assim este módulo está limitado à aquisição de sinais de um número pré-estabelecido de canais.

O sistema pode variar conforme o tipo de sensor que se encontra ligado. Assim o número de sensores ligados varia entre 6 no caso de todos serem sensores do tipo resistência de 6 fios até um máximo de 42 no caso extremo de ter um sensor apenas com 1 fio de sinal e o outro ser comum a todos os sensores ligados. Esta última configuração é extremamente desaconselhada, visto que um dos cabos de todos os sensores se encontram ligados ao mesmo local, se houver qualquer tipo de interferência num deles esta é automaticamente propagada a todos os outros sensores.

2.1.2 COMPACTDAQ™

Outro dos sistemas ver Fig. 10, utilizado atualmente para a realização de ensaios no LabEST é baseado na arquitetura *National Instruments™ CompactDAQ™*.



Fig. 10 Sistema *CompactDAQ™*

Este pode ser utilizado de uma forma mais polivalente que o anterior, visto, ser possível adaptar a sua utilização aos requisitos necessários, procedendo para tal à alteração dos módulos instalados. Caracteriza-se ainda por uma utilização relativamente simples, pois como utiliza a tecnologia *USB* [3] para se conectar ao computador, este detecta automaticamente todos os módulos inseridos procedendo a algumas alterações que tornam a sua utilização muito intuitiva.

Ao contrário do anterior este não está tão limitado no número de canais que podem ser monitorizados, além disso a utilização de módulos de aquisição dos sinais torna a migração para o novo sistema muito interessante, visto que estes podem ser utilizados no novo sistema, com a vantagem adicional de ser possível extrair destes uma qualidade superior (tanto em questão de velocidade como de qualidade do sinal).

O *CompactDAQ™* é uma solução bastante interessante para o caso de se pretender a aquisição e condicionamento de sinais de diverso tipo de sensores, além disso permite que a aquisição dos vários sinais seja totalmente independente, sendo possível efetuar a sua leitura em intervalos de tempo distintos. No entanto esta modularidade está limitada ao tamanho do chassis, não sendo possível conjugar mais de 14 tipos de módulos e em que cada um poderá ter requisitos temporais diferentes.

A utilização deste sistema implica no entanto a utilização de um computador para o seu correto funcionamento; este facto condiciona a sua utilização.

Devido a todos os factos anteriormente mencionados este sistema é normalmente a escolha preferida no caso de ser necessária a aquisição de um número elevado de sensores, pois ao contrário do sistema anterior não se encontra limitado a um máximo de 42 sensores (se todos estes tiverem apenas um cabo

de sinal), neste caso o limite será de 14 módulos, sendo que cada um destes dispõe de limites diferentes, que no entanto normalmente são superiores à do anterior sistema.

Uma grande vantagem na sua utilização é o facto da interação com este ser efectuada recorrendo ao *LabVIEW™*, tornando-a intuitiva e apelativa como pode ser observado na Fig. 11. Assim ao contrário da anterior não é necessário que o utilizador recorra ao manual para determinar quais os comandos necessário para efetuar a aquisição de um determinado sinal, além disso o seu aspecto puramente gráfico torna-a relativamente simples.

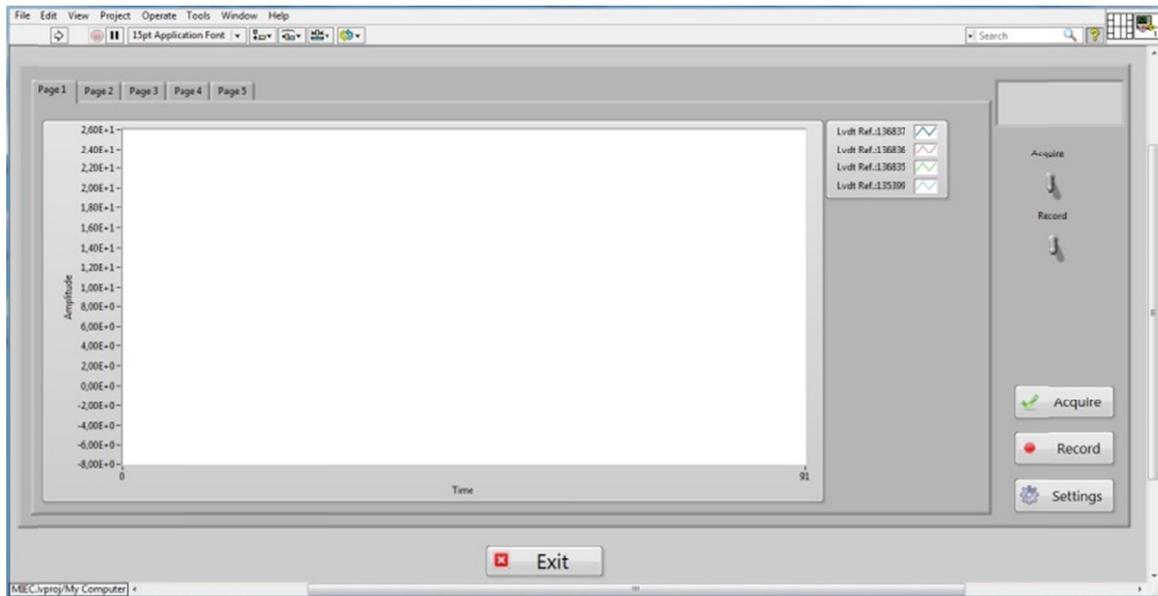


Fig. 11 Exemplo de painel frontal de aplicação em *LabVIEW™*

Associado a qualquer painel frontal da aplicação existe o painel de programação no qual todas as alterações ao programa podem ser realizadas, este respeita uma ordem baseada em fluxo (uma ação apenas é realizada quando todos os dados de entrada se encontram disponíveis) e a sua forma de programar é por blocos, podendo existir subprogramas que na realidade são programas completos.

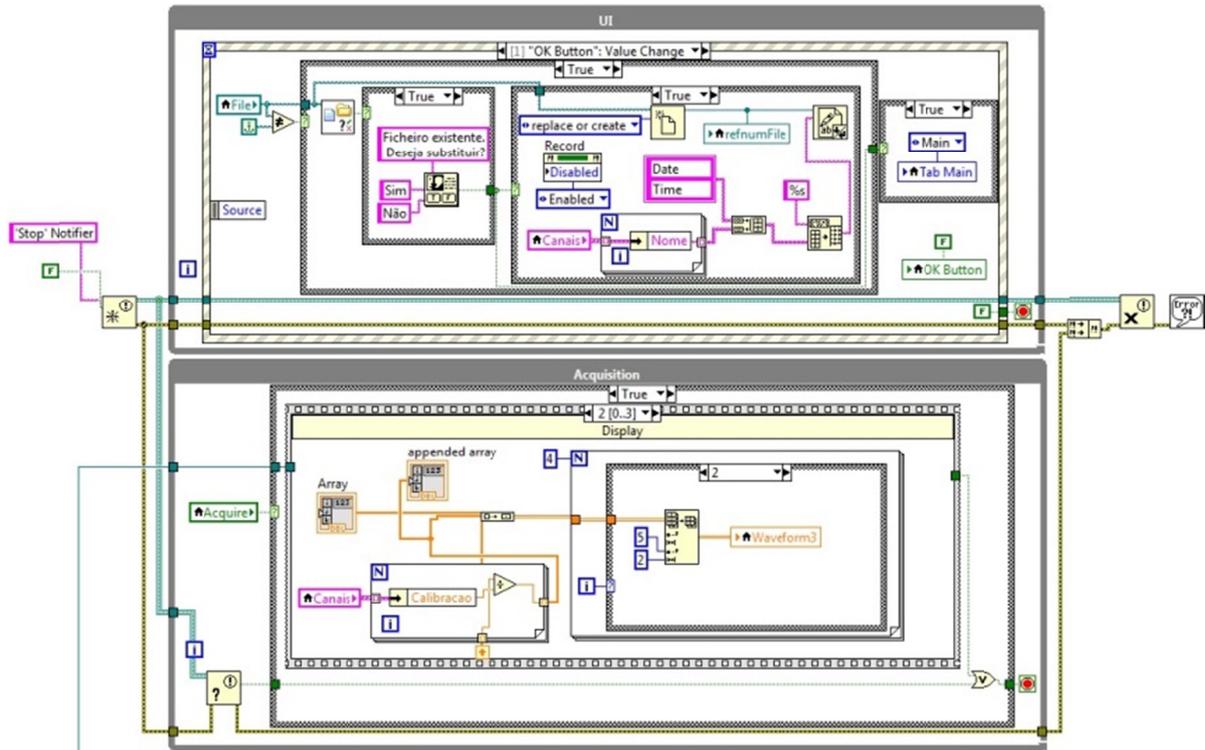


Fig. 12 Exemplo do painel de blocos da aplicação em LabVIEW™

2.1.3 DATATAKER™ DT80

Outro sistema que atualmente é utilizado para vários ensaios, ver Fig. 13, baseia-se na arquitetura DataTaker™ no entanto este não foi utilizado na realização dos ensaios para este trabalho.



Fig. 13 DataTaker™ DT80

O dispositivo DT80 ao contrário da sua versão DT800 referida anteriormente e que é utilizada para o tipo de ensaios que referidos neste trabalho, dispõe de uma aplicação Web para programar e

monitorizar o *datalogger*, que pode ser observada Fig. 14. Esta encontra-se instalada de série no sistema não sendo necessária a sua instalação para a executar, bastando para isso dispor de um *browser* (esta aplicação recorre a tecnologia *Flash* no entanto existe também uma aplicação mais simples recorrendo apenas a *HTML*) Esta proporciona um interface gráfico no qual é possível programar o *datalogger* sem necessitar de conhecer a linguagem de programação do *DataTaker™*.

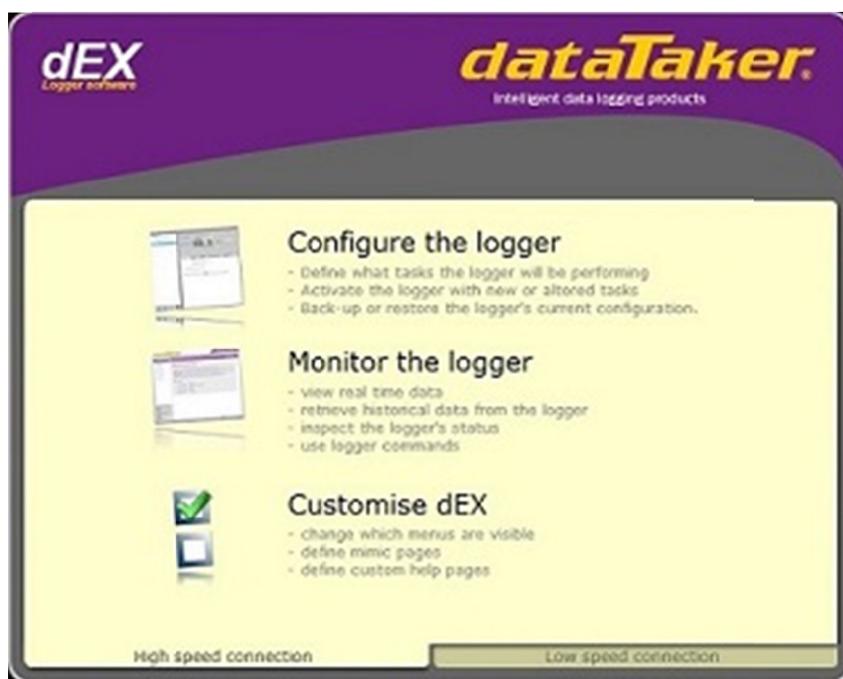


Fig. 14 Aspecto gráfico da aplicação *Web*

O desenvolvimento de uma aplicação para este sistema pode ser feita com recurso à linguagem anteriormente referida para o DT800, sendo que esta é muito pouco intuitiva, ou em alternativa pode ser instalado um *driver* para o *LabVIEW™* que possibilita que a interação com o dispositivo seja simplificada.

2.1.4 COMPARAÇÃO DOS SISTEMAS

Com os sistemas analisados anteriormente e o sistema com que todo o trabalho foi realizado, efetuou-se o Quadro 1 no qual é possível verificar as características mais relevantes para o seu desempenho.

	Quadro 1 Comparação			
	<i>DataTaker™</i> DT800	<i>CompactDAQ™</i>	<i>DataTaker™</i> DT80	<i>CompactRIO™</i>
Nº de canais	42	256	200*	256
Tipo de sensores	9	10+	9-10	10+
Velocidade de aquisição (Hz)	1	10	1	2500#
Precisão (bits)	16	20	17	24

Notas:

- * - Com recurso à unidade de multiplexagem CEM200 – apenas 42 no caso de esta não ser utilizada.
- + - Número indefinido pois depende do desenvolvimento específico de módulos para os sensores.
- # - A esta velocidade de aquisição não se revelou possível o armazenamento de todos os dados (no entanto devido às características intrínsecas do sistema é possível efetuar a gravação/aquisição à frequência de 50Hz sendo que cada uma destas é amostrada 50 vezes perfazendo o total de 50x50 ou 2500Hz, a repetição da amostragem aumenta consideravelmente a precisão do resultado final).

Os 9 tipos de sensores suportados por todas as unidades são:

- Voltagem.
- Corrente.
- Resistência.
- Relação entre resistências como por exemplo extensómetros ($1/4, 1/2$ ou ponte completa).
- Termopares.
- RTDs (Pt, Ni, Cu).
- Termistores.
- Frequência.
- Sensores Carlson.

No caso de se tratar de uma unidade *DataTaker™* DT80 na sua versão G, este permite ainda a aquisição de dados gerados por extensómetros de corda vibrante.

Por fim os sistemas *CompactDAQ™* e *CompactRIO™* permitem que os valores de todos os sensores anteriormente referidos possam ser adquiridos, e devido à sua construção modular é possível que qualquer tipo de sensor construído seja utilizado, bastando para tal que o módulo correspondente tenha sido desenvolvido.

2.2 LEVANTAMENTO E DESCRIÇÃO DOS RECURSOS EXISTENTES

Para iniciar este projeto, foi realizado um levantamento exaustivo de todo o material existente no LabEST de forma a planear o sistema otimizando os recursos existentes. Seguidamente descrevem-se os equipamentos utilizados.

2.2.1 SISTEMA *COMPACTRIO™*

O sistema *CompactRIO™* foi desenvolvido pela *National Instruments*, sendo que se trata de um sistema de aquisição e controle, que é extremamente personalizável e com um desempenho muito elevado.

A característica principal para ser extremamente personalizável encontra-se intimamente ligada ao facto de este ser constituído por blocos definidos pelo utilizador conforme as necessidades específicas de cada projeto dispondo de condicionamento do sinal para uma ligação direta aos sensores ou actuadores.

O sistema é constituído por elementos altamente configuráveis e baseados na tecnologia *FPGA* **Error! Reference source not found.**, o que lhe permite ter elevadas performances; dispõe ainda de um processador em tempo real que possibilita o desenvolvimento de aplicações seguras e que poderão

funcionar autonomamente. O sistema apresenta diversas características que certificam a sua utilização em ambientes industriais extremos [5].

O sistema desenvolvido para o *CompactRIO™* respeita a arquitetura referida na Fig. 15, permitindo ao utilizador obter a leitura dos dados dos diferentes sensores ou efetuar o controlo dos actuadores. Deste modo temos:

- Sensores analógicos – ligados diretamente ao módulo correspondente que dispõe de condicionamento de sinal e sua conversão para um sinal digital, como exemplo um *LVDT*.
- Controladores analógicos – recebem o sinal do módulo após a conversão do sinal digital para analógico e correspondente tratamento, por exemplo a velocidade de um actuador hidráulico.
- Sensores digitais – estes não exigem a conversão, sendo apenas o seu sinal condicionado, como é o caso de um sensor de nível de fluido.
- Controladores digitais – tal como os anteriores não necessitam de conversão apenas que o seu sinal seja condicionado, refere-se como exemplo o caso de controladores de direção de um actuador hidráulico.

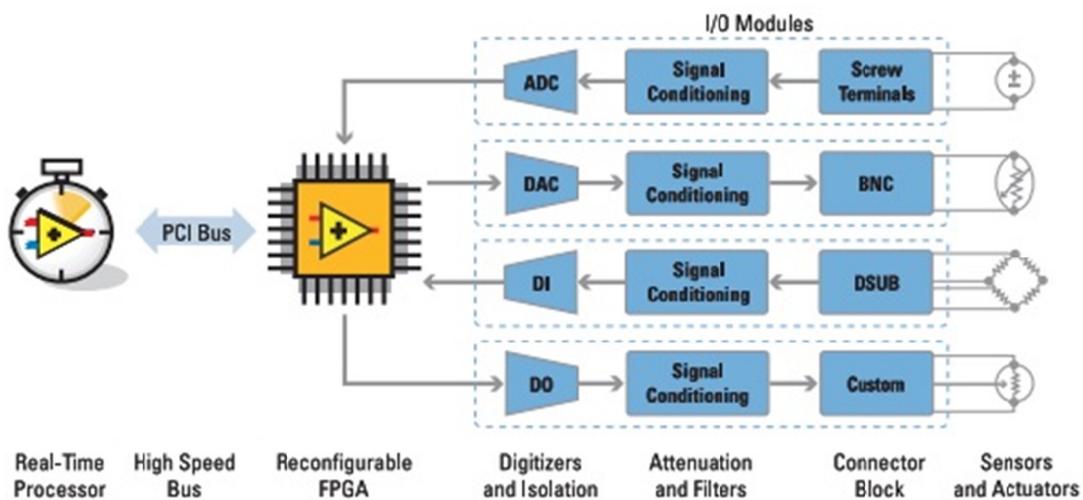


Fig. 15 Arquitetura *CompactRIO™*

2.2.2 CHASSI *COMPACTRIO™* CRIO-9104

Esta é uma parte fundamental de todo o sistema de aquisição, pois todas as restantes estarão interligadas a esta.



Fig. 16 Chassi *CompactRIO™* CRIO-9104

O chassi no qual todo o trabalho foi efectuado possui 8 entradas para módulos, sendo que cada uma destas poderá albergar qualquer um dos módulos existentes para o *CompactRIO™*. O chassi dispõe ainda de um processador do tipo *FPGA* ver Fig. 17 que contém 3 milhões de portas lógicas, sendo que

cada uma desta representa uma operação lógica simples **Error! Reference source not found.**, podendo com recurso a várias adquirir ou controlar os sinais dos sensores.



Fig. 17 Processador FPGA (XILINX™ Virtex-II 3000)

2.2.3 CONTROLADOR COMPACTRIO CRIO-9004

O controlador é uma parte essencial do sistema, pois permite a interação entre o utilizador e as saídas ou entradas dos diferentes módulos existentes neste sistema, ver Fig. 18.



Fig. 18 Controlador *CompactRIO* CRIO-9004

O modelo utilizado de controlador dispõe de um processador a 195MHz que assegura a aquisição/controla em tempo real, assim como o registo dos dados recolhidos na sua memória de 512MB (tipo *CompactFlash* não volátil) e ainda dispõe de 64MB DRAM para armazenamento das configurações e programas em tempo real.

Outra das funcionalidades que é muito utilizada é a sua porta Ethernet 10/100BASE-T, permitindo uma fácil ligação entre o dispositivo final e o sistema, esta porta disponibiliza ainda uma interface *web* e um servidor de ficheiros. Este último é utilizado para a transferência de ficheiros de dados armazenados localmente (como exemplo pode ser utilizado o programa *FileZilla*).

Uma das funcionalidades presente neste dispositivo que não foi presentemente utilizada é a sua porta série (RS-232) que serve para a conexão de periféricos; esta é uma das funcionalidades que deverá ser utilizada num trabalho futuro. Como exemplo, o programa poderia comunicar com um painel, ver Fig. 19, permitindo que o sistema fosse totalmente autónomo, o que seria uma grande vantagem para ensaios que não decorressem em ambiente laboratorial.



Fig. 19 Painel TFT RS-232 sensível ao toque

2.2.4 MÓDULOS DE AQUISIÇÃO

Para a realização do sistema foram utilizados vários tipos de módulos de modo a construir um conjunto que permite a leitura e controle de diversos tipos de valores, realizando o condicionamento do sinal.

2.2.4.1 MÓDULO DE AQUISIÇÃO DE ¼ PONTE

Este módulo (ver Fig. 20) tem como principais características:

- Conversores simultâneos do sinal analógico para digital com uma qualidade de 24 bits (2^{24} níveis diferentes de resultados).
- Medição da deformação de resistências de 350Ω , a uma frequência de 10 kHz em cada canal.
- Excitação interna de 3,3 V para sensores em ¼ ponte [7].



Fig. 20 Módulo NI-9236

2.2.4.2 MÓDULO DE AQUISIÇÃO DE ½ PONTE OU PONTE COMPLETA

As características principais deste módulo (ver Fig. 21) são:

- Resolução de 24 bits, entradas analógicas de ± 25 mV/V com conectores RJ50.

- 4 entradas analógicas amostradas simultaneamente a 50kHz
- Complementação de meia ponte e ponte inteira programável; excitação interna de até 10 V



Fig. 21 Módulo NI-9237

Recorrendo apenas ao módulo é possível ligar sensores do tipo ½ ponte ou ponte completa [7], para isso a configuração da ligação é a descrita na Fig. 22.

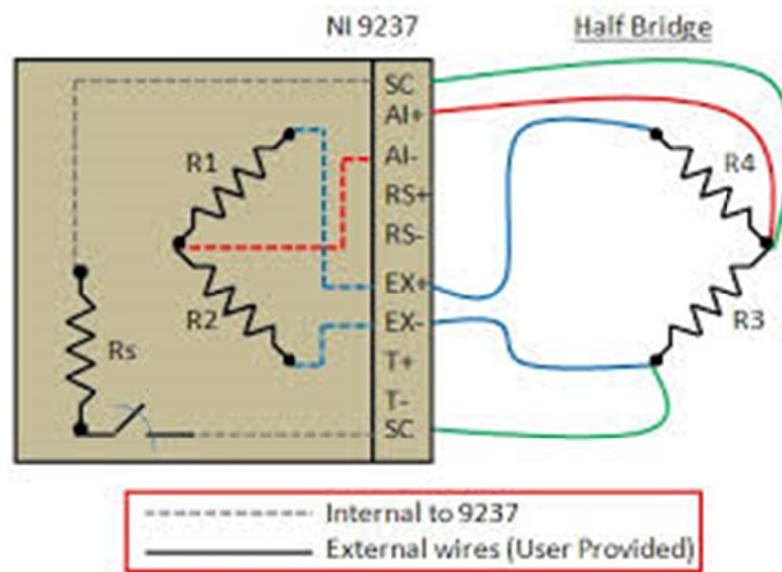


Fig. 22 Esquema de ligação ½ Ponte

Além do módulo referido, existem também os acessórios NI-9944 ver Fig. 23, que permitem a ligação de sensores em ¼ ponte [7] ao anterior.



Fig. 23 Acessório NI-9944 para ligação de sensores em ¼ ponte

Com recurso ao acessório NI-9944 é possível ligar sensores em ¼ ponte, pois este acessório dispõe de uma resistência interna que permite que uma única resistência simples, logo em ¼ ponte, seja complementada com a resistência interna de modo a criar um sensor virtual com uma disposição em ½ ponte, tal como pode ser constatado na Fig. 24.

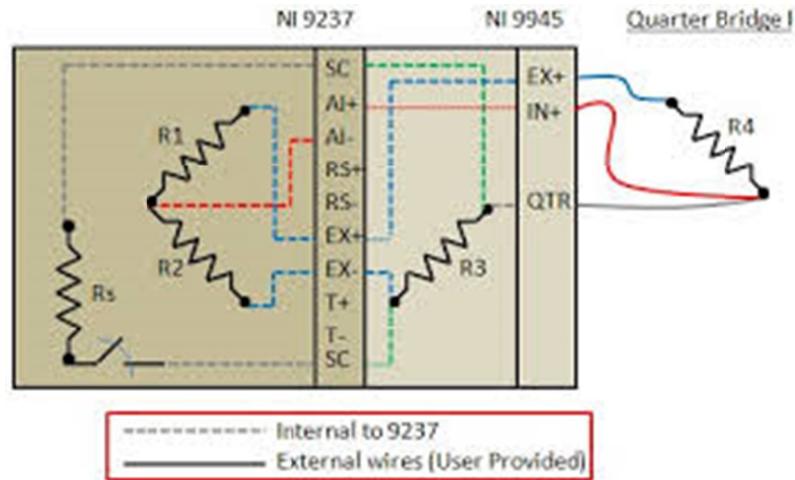


Fig. 24 Esquema de ligação ¼ Ponte (Tipo I)

Os dois módulos anteriormente referidos (NI-9236 e NI-9237) permitem efetuar uma correção às leituras.

Estas correções são “*Shunt calibration*” (Ver Fig. 25) e “*Offset*” e permitem efetuar uma alteração nos valores lidos de modo a corrigir os valores de cálculo tendo em atenção as resistências iniciais do sistema.

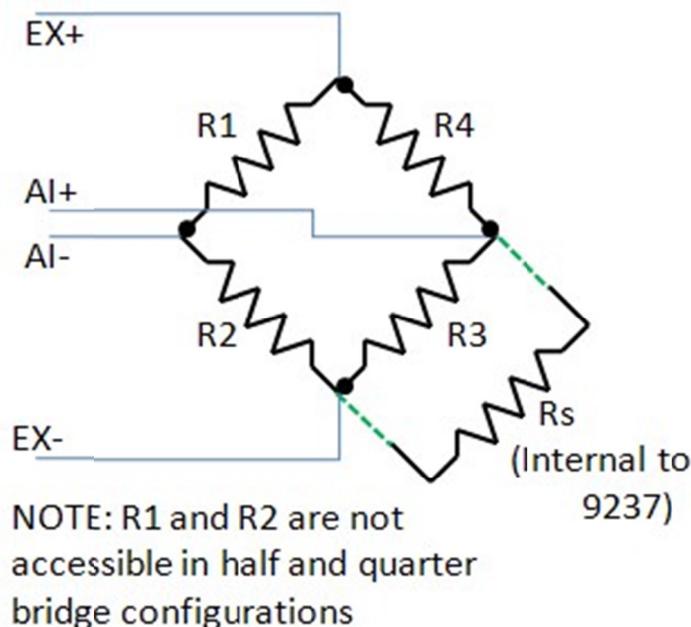


Fig. 25 Esquema de ligação “*Shunt calibration*”

2.2.4.3 MÓDULO DE AQUISIÇÃO DE TEMPERATURA

Outro dos módulos utilizados ver Fig. 26, visa a aquisição de dados de temperatura; de salientar como principais características:

- Resolução de 24 bits, com rejeição do ruído de 50/60 Hz gerado pela corrente elétrica de alimentação.
- 4 entradas analógicas para leitura de resistências de temperatura (resistance temperature detector - *RTDs*) de 100Ω
- *RTDs* de 3 e 4 fios com excitação interna



Fig. 26 Módulo NI-9217

Com recurso a este módulo é possível a aquisição de valores de sensores de temperatura. Na realidade este módulo adquire o valor de uma resistência, sendo assim o seu resultado será expresso em Ω ; dado que o resultado pretendido deverá ser uma temperatura é necessário efetuar a conversão deste para o valor pretendido, para tal é utilizada as equações de *Callendar-Van Dusen*.

2.2.4.4 MÓDULO DE AQUISIÇÃO DE SENSORES EM TENSÃO

Para o desenvolvimento do projeto este módulo ver Fig. 27, é essencial, pois permite a aquisição de valores de deslocamentos (*linear variable differential transformer - LDVTs*) de diversos tipos assim como a aquisição da célula de carga (neste caso não será adquirida a resistência mas a alteração da tensão induzida pela variação desta).



Fig. 27 Módulo NI-9205

O presente módulo é bastante versátil, permitindo a ligação de 32 sensores (quando se efetua a ligação de apenas de 1 cabo sendo o outro comum a todos, o que não representa é uma solução ideal, visto os erros poderem propagar-se pelos vários sensores através da ligação comum) ou 16 sensores (neste caso ambos os cabos do sensor são conectados ao módulo para permitir ler a diferença de tensão entre estes), além disso todas estas entradas podem ser programadas para que a faixa de leitura seja a mais

aconselhada para cada tipo de sensor (a faixas disponíveis são ± 200 mV, ± 1 , ± 5 e ± 10 V), esta alteração da faixa de leitura aumenta a resolução do sensor.

Além deste facto a sua taxa de amostragem é de bastante elevada permitindo a aquisição de 250kS/s com uma resolução de 16 bits.

Um exemplo da versatilidade foi constatado quando no mesmo módulo foram conectados *LVDTs* e a célula de carga, pois os *LVDTs* têm uma variação de ± 10 V, no entanto a célula de carga apresenta uma variação genérica entre 0V e 0,01V deste modo é aconselhável seja conectada a um canal com a faixa de leitura ajustada a ± 200 mV de modo a obter uma maior precisão, visto que a utilização de uma mesma faixa de leitura para todos os sensores implicava que a célula de carga apenas poderia detectar variações superiores a 0,3mV (que corresponde aproximadamente a 3kN) pelo contrário se a faixa de leitura selecionada for ± 200 mV poderemos detectar variações de 0,0061mV (0,06kN = 60N). Sendo assim é possível concluir que este módulo é muito versátil sendo possível efetuar leituras que estão mais recomendadas para outros módulos usando apenas este.

2.2.4.5 MÓDULO DE AQUISIÇÃO DE SENSORES EM CORRENTE

Outra das funcionalidades importantes é a medida em corrente. Atualmente é apenas utilizada para a medição de inclinómetros.

Uma atualização que poderia revelar-se muito interessante seria a utilização deste módulo para adquirir sinais de *LVDTs*, visto que a sua utilização traria grandes benefícios, sendo que um deles seria o facto de a ligação necessitar apenas de três condutores, outro grande benefício encontra-se intimamente ligado ao facto de estes serem totalmente imunes às variações de tensão (este nota-se principalmente pois as fontes de alimentação exibem sempre uma variação da tensão de saída e também a rede eléctrica têm flutuações), a maior vantagem no entanto deveria ser o facto de o seu valor não variar com o aumento do cabo de ligação do sensor.



Fig. 28 Módulo NI-9203

Este módulo dispõe de 8 canais de entrada de corrente e faixas de entrada de ± 20 mA ou 0 a 20 mA, no entanto como apenas têm um conversor do sinal analógico para digital (*ADC*), o exposto anteriormente para a leitura de *LVDTs* em corrente poderia não ser tão vantajoso pois mesmo que a leitura ser imune às condições de ligação é preciso ter em atenção a quantidade de sensores conectados ao módulo pois a leitura é efectuada recorrendo a uma multiplexagem [2] do conversor.

2.3 CONCLUSÕES

São referidas agora algumas conclusões passíveis de ser obtidas com a análise dos sistemas atualmente em utilização; podemos concluir no entanto que existem qualidades comuns aos sistemas.

A solução a desenvolver deverá possuir um funcionamento que garanta todos os requisitos dos sistemas atuais assim como:

- Disponibilização de um número elevado de canais para monitorização.
- Aumento da qualidade dos sinais adquiridos, tanto em termos de velocidade como precisão.
- Gravação de todo os dados adquiridos durante o processo de monitorização.

Verificou-se pela análise dos sistemas presentes que estes não disponibilizam a funcionalidade de calibração dos sensores de extensão, recorrendo à função de *Shunt Calibration* [8], que permite que os dados recolhidos sejam mais precisos; para tal esta função anula os erros iniciais decorrentes da montagem dos sensores de aquisição dos dados.

Para facilitar a análise gráfica dos dados pelo utilizador, este poderá alterar o valor inicial da apresentação dos dados no gráfico, permitindo assim que o utilizador defina um *offset* inicial dos dados.

Uma das grandes potencialidades deste sistema é a facilidade com que poderão ser acrescentadas funcionalidades. Uma das mais relevantes será a implementação de controlo dos actuadores com base nos dados recolhidos, outra funcionalidade bastante interessante para implementar será o envio por correio electrónico dos ficheiros com os dados, após a realização do ensaio.

3 Soluções Tecnológicas

3.1 PROGRAMAS

De seguida são referidos programas mais relevantes para o desenvolvimento deste trabalho destacando-se o *LabVIEW™*. É ainda referido o *add-on FPGA* para o *LabVIEW™* pois trata-se de uma tecnologia intrinsecamente ligada à utilização de sistemas *CompactRIO™* o que se revelou essencial para o desenvolvimento do trabalho. Seguidamente é abordado o funcionamento dos sensores mais utilizados. Finalmente são referidas as tecnologias existentes para a comunicação dos dados entre o módulo *FPGA* e o módulo *RT*, assim como entre o módulo *RT* e o utilizador final. De referir que a primeira envolve a comunicação dos dados internamente no sistema *CompactRIO™*, ao contrário, a segunda visa a comunicação dos dados entre dispositivos diferentes, sendo que um é o *CompactRIO™* e o outro é o computador final no qual o utilizador poderá interagir.

3.1.1 *LABVIEW™*

O *LabVIEW™* é uma ferramenta muito poderosa que permite a sua utilização por diferentes tipos de operadores. Um utilizador corrente com extrema facilidade consegue efetuar as funções mais básicas, como seja adquirir sinais vindos de sensores; no entanto, utilizadores com mais conhecimentos poderão aceder a funções do *LabVIEW™* com as quais é possível realizar automaticamente procedimentos que permitam o tratamento dos dados recolhidos de forma expedita.

O *LabVIEW™* é um ambiente de desenvolvimento gráfico que fornece as ferramentas necessárias para aquisição de dados, controle de instrumentos, análise e apresentação dos mesmos. O *LabVIEW™* oferece a flexibilidade de uma poderosa linguagem de programação gráfica, sem as dificuldades inerentes às ferramentas deste segmento, possibilitando um desenvolvimento completo a partir de qualquer plataforma à sua escolha.

De seguida são enunciadas algumas das vantagens da utilização do *LabVIEW™*:

- Reduz o tempo de desenvolvimento de uma aplicação.
- Oferece recursos integrados com um grande número de dispositivos de medidas.
- Análise simplificada e fácil apresentação dos dados.
- Desenvolvimento com o recurso a *Express VI* [9].
- Programa com recursos poderosos tais como as estruturas de eventos [10].

Todas estas vantagens estão disponíveis para todos os tipos de utilização o que permite que os programas, mesmo desenvolvidos por utilizadores menos experientes, tenham um aspecto profissional, permitindo além disso a sua utilização por qualquer pessoa.

3.1.2 *LABVIEW™ RT*

O *LabVIEW™ RT* trata-se de um *add-on* do ambiente de desenvolvimento *LabVIEW™*, que utiliza a abordagem da programação gráfica para criar sistemas embebidos autónomos de alta fiabilidade.

Este *add-on* permite o desenvolvimento de aplicações com uma finalidade totalmente definida que deverão estar preparadas para funcionar continuamente. O *software* desenvolvido com o seu recurso deve obedecer a imposições ou restrições temporais, pelo que questões de tempo-real têm que ser equacionadas; o seu desenvolvimento implica especifica-lo corretamente, pois este inclui requisitos temporais, de desempenho, de segurança, de fiabilidade e de tamanho, tendo que executar, muitas vezes, de forma contínua, autónoma e em ambientes *hostis*.

O *software* desenvolvido com o auxílio do *LabVIEW™ RT* implementa uma tarefa específica, executada pelo computador embestado, que se encontra no presente caso no interior do *CompactRIO™*; no entanto este não tem como função facultar a execução de comandos genéricos para o utilizador.

Assim trata-se de desenvolver uma aplicação que irá ser executada num sistema operático de tempo real (*RTOS*) [11]; daqui advém a maior diferença, visto que o *LabVIEW™* normal proporciona um ambiente de desenvolvimento para plataformas *Windows*, em contrapartida o *LabVIEW™ RT* visa o desenvolvimento de aplicações para um ambiente *RTOS*, que no caso do *cRIO-9004* trata-se do *Phar Lap ETS*.

3.1.3 LABVIEW™ FPGA

A utilização do *add-on LabVIEW™ FPGA* destina-se ao desenvolvimento utilizando uma linguagem de programação baseada em *LabVIEW™*, no entanto devido às suas especificações particulares existem algumas diferenças na programação, que exigem alguns conhecimentos adicionais, mas a curva de aprendizagem é significativamente menos exigente do que a da linguagem de descrição do *hardware (HDL)* [12].

Normalmente o painel frontal destas aplicações é muito simples, sendo que a interação do utilizador com esta é bastante reduzida para que possa ser garantido o seu correto funcionamento.

Com este é possível garantir a execução de algoritmos de controlo, de temporização e *trigger*, os quais poderão ser executados a taxas que poderão atingir a velocidade de 300 MHz, permitindo ainda a inclusão de código *HDL* e da propriedade intelectual do processador (*IP core*) [13] de terceiros, incluindo funções do *Xilinx CORE Generator* [14].

O recurso à tecnologia *FPGA* estava anteriormente reservada, pois exigia um profundo conhecimento do *hardware* envolvido, no entanto com a utilização do *add-on* é possível converter um programa simples como apresentado na Fig. 29 em comandos para gerar um circuito de *hardware* digital, simplificando assim o desenvolvimento do projeto, o que origina a redução do tempo de realização deste.

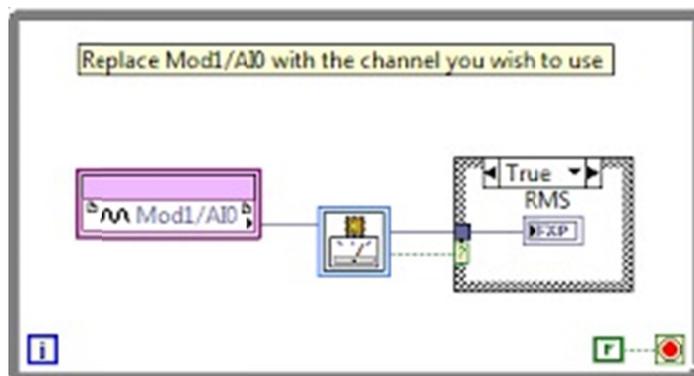


Fig. 29 Exemplo de painel de blocos da aplicação em *LabVIEW™*

Com este módulo é possível personalizar o funcionamento do *hardware* de instrumentação usando para isso código desenvolvido recorrendo à linguagem de programação *LabVIEW™*.

3.2 SENSORES DE DESLOCAMENTO (LVDTs)

Os *LVDTs* apresentam como grande vantagem em relação aos demais transdutores de deslocamento a sua elevada robustez. Como pode ser verificado no esquema não existe contacto entre os elementos de medição do deslocamento, daí advém a inexistência de desgaste nestes elementos. Esta característica permite a realização de *LVDTs* que possam ser utilizados dentro de água e nas condições mais adversas.

O princípio de funcionamento destes baseia-se em transferência magnética, o que significa que a sensibilidade dos *LVDTs* é infinita. Pois o mais pequeno movimento pode ser detectado, com recurso a um apropriado leitor do sinal como pode ser verificado na Fig. 30.

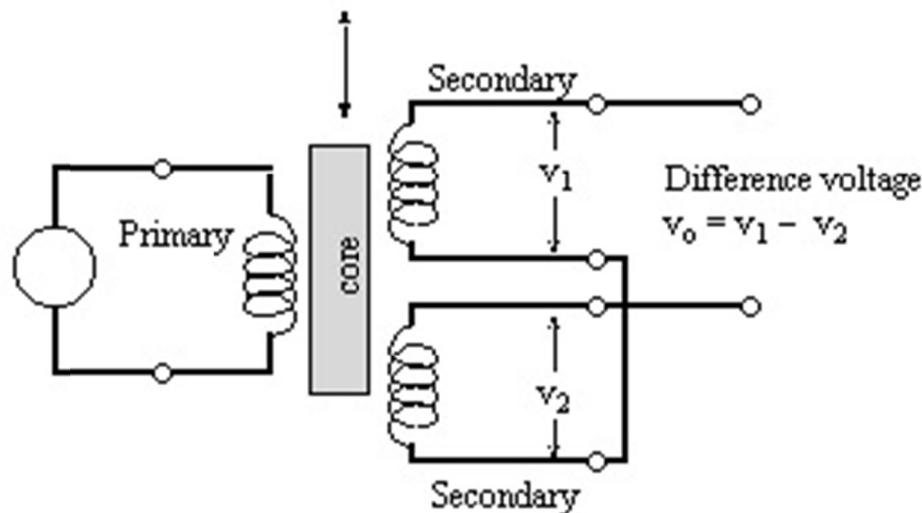


Fig. 30 Esquema do funcionamento dos *LVDTs*

As vantagens desta tecnologia apresentada na Fig. 31, são a sua grande fiabilidade e sensibilidade, permitem que seja considerada a melhor para a medição de deslocamentos, e que conta com uma utilização superior a 90 anos.

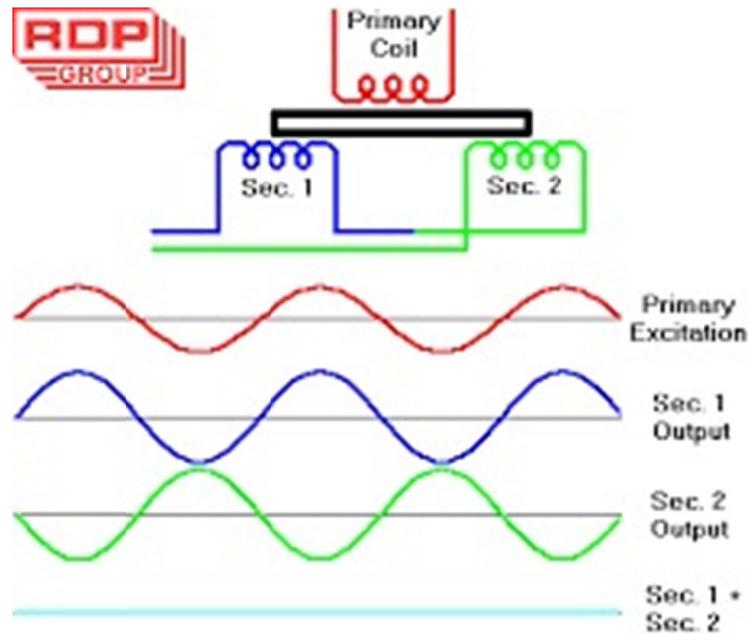


Fig. 31 Leitura do deslocamento em LVDTs

3.3 EXTENSÓMETROS

Os extensómetros são sensores muito utilizados em ensaios estruturais para a determinação de múltiplos tipos de esforços que poderão ser relacionados com a extensão da estrutura, como sejam a tração/compressão ou torção.

3.3.1 CÉLULAS DE CARGA

Na realização dos ensaios estruturais para teste do programa desenvolvido foram utilizadas células de carga, de várias categorias, estas convertem uma força num sinal eléctrico.

Estas baseiam-se na monitorização dos extensómetros, que se encontram dispostos de um modo definido e com base na lei de *Hooke* é possível converter o incremento da extensão do material constituinte no aumento da tensão que por sua vez é proporcional ao esforço necessário para produzir essa extensão.

$$\tau = c \varepsilon \quad (1)$$

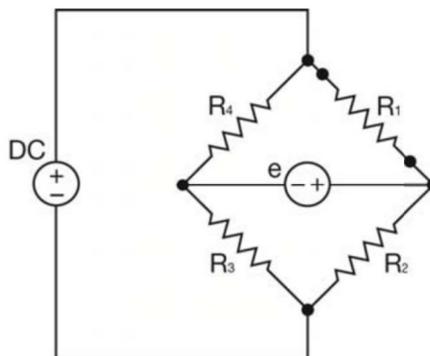


Fig. 32 Célula de carga

Para obter esta transformação a célula de carga é constituída por resistências eléctricas que se encontram ligadas de modo a formar uma ponte de *Wheatstone*, com esta disposição obtêm-se um sensor preciso e robusto que pode operar em ambientes extremos.

3.3.2 PONTE DE *WHEATSTONE*

A assemblagem das resistências num circuito em ponte de *Wheatstone* permite avaliar o valor de uma resistência eléctrica desconhecida.

Fig. 33 Ponte de *Wheatstone*

Para que os sensores tenham uma elevada precisão a ponte de *Wheatstone* é ajustada para variações ambientais de temperatura e auto-aquecimento, com adição de resistências de alta precisão para corrigir o desequilíbrio da ponte e ajustar a sensibilidade de saída; são ainda adicionadas resistências para compensar os erros resultantes de uma utilização durante um intervalo de tempo alargado no qual a temperatura está sujeita a alterações.

Apesar do facto da utilização de extensómetros ser muito comum, a aquisição de dados a partir destes pode constituir um desafio, visto que existem muitos factores que podem condicionar o desempenho da medição tais como:

- O condicionamento do sinal.
- O modo de construção/disposição das resistências na ponte de *Wheatstone* (indutância)
- O tipo das resistências utilizadas (capacitância e precisão).
- Fonte de alimentação (excitação).

3.3.3 SHUNT CALIBRATION

A fim de calibrar a ponte de *Wheatstone*, recorre-se à utilização de resistências de precisão onde é temporariamente desviado o circuito num dos braços da ponte para que este tenha uma resistência conhecida.

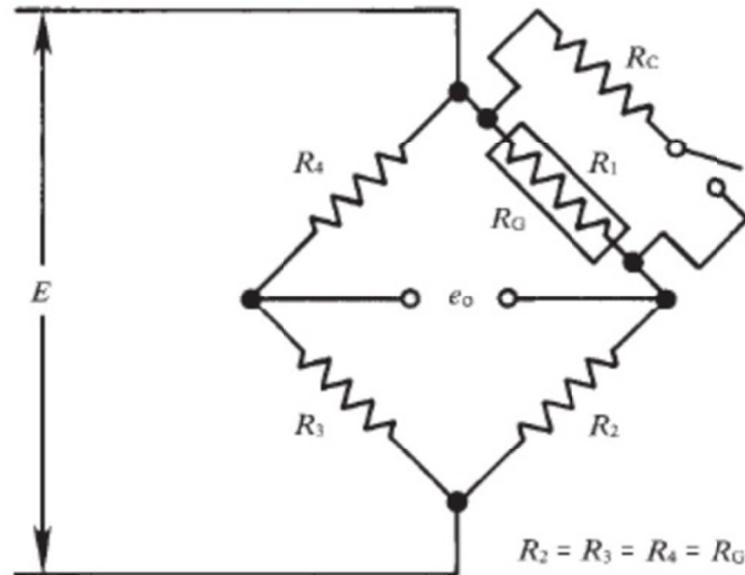


Fig. 34 Ponte de *Wheatstone* com resistência (*Shunt Calibration*)

Este método de calibração de um circuito de resistências dispostas de modo a constituir uma ponte de *Wheatstone* é bastante comum e conveniente para determinar periodicamente o ganho ou a extensão de um condicionador de sinal. Este método não equivale a uma calibração completa, uma vez que não é realmente aplicada nenhuma alteração mecânica à resistência; no entanto este método de calibração fornece uma simulação de uma alteração mecânica ao transdutor permitindo determinar a maneira mais eficaz de reduzir os erros e desvios associados aos elementos eléctricos utilizados. A resistência ligada em paralelo simula o que aconteceria se um esforço mecânico fosse exercido no transdutor. O valor da tensão lido pode ser comparado com o que seria esperado se uma alteração mecânica fosse aplicada à resistência. De seguida, a diferença entre este e o valor esperado serve para compensar as leituras subsequentes.

Este método de calibração é muito simples e pode ser aplicado a qualquer momento, de referir que é uma mais-valia pois este pode ser aplicado durante o processo de aquisição. No entanto é recomendado que regularmente seja efectuada uma calibração física para garantir a precisão, estabilidade, confiabilidade e linearidade do instrumento.

No caso de instalações onde o comprimento dos cabos é relevante, este criará uma atenuação do sinal durante o processo de aquisição dos dados de deformação, de modo a que este erro possa ser compensado é efectuada uma *Shunt Calibration* sobre cada um dos extensómetros (resistências) ativos. No entanto o processo de calibração de cada uma das resistências pode revelar-se impraticável após a instalação dos mesmos, podendo estes encontrar-se inacessíveis; neste caso é possível efetuar esta calibração no instrumento de medida, o que não permite determinar todos os erros.

3.4 TERMORESISTÊNCIAS

Estes sensores são constituídos por semicondutores sensíveis à temperatura com os quais é possível determinar a temperatura a que estes se encontram. Para a determinação da temperatura é necessário resolver a equação de *Callendar-Van Dusen*.

As termoresistências são constituídas por uma resistência a qual exhibe uma relação entre a resistência eléctrica do material e a temperatura a que se encontra. Na realização dos ensaios foi utilizada uma resistência de platina, que apresenta uma resistência de 100Ω quando sujeita a uma temperatura de 0°C , vulgarmente designada de Pt100; uma das grandes vantagens da sua utilização é o facto de a relação ser extremamente linear, sendo por isso o tipo de termoresistência mais utilizado.

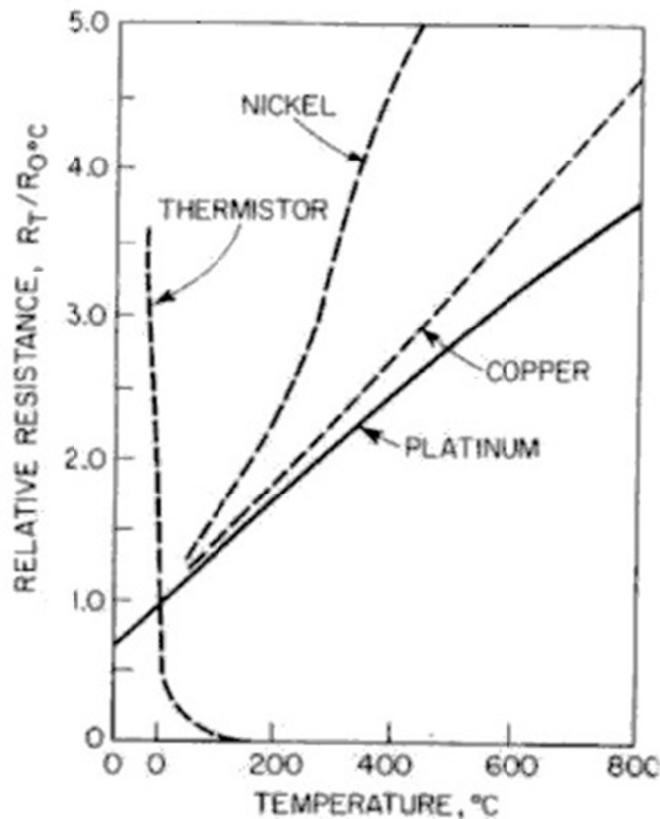


Fig. 35 Comparação da linearidade Termistores e RTDs

3.4.1 EQUAÇÃO DE CALLENDAR-VAN DUSEN

Para a conversão dos valores de resistência lidos no sensor nos valores de temperatura pretendidos é necessário proceder à resolução das equações expressas por *Callendar-Van Dusen*.

$$R = R_0 \times \left[1 + A \times T + B \times T^2 + C \times T^3 \times (T - 100) \right] \quad (2)$$

Para o caso específico da temperatura ser superior a 0°C , a fórmula quadrática anterior têm como solução.

$$T_R = \frac{-R_0 A + \sqrt{R_0^2 A^2 - 4R_0 B(R_0 - R_T)}}{2R_0 B} \quad (3)$$

Quadro 2 Valor das constantes para alguns tipos de termoresistências

	Pt100	F100	D100
A (°C-1)	3,90830E-3	3,95834E-3	3,97869E-3
B (°C-2)	-5,77500E-7	-5,83397E-7	-5,86863E-7
C (°C-4)	-4,18301E-12	-4,29000E-12	-4,16696E-12

3.5 SENSORES DE INCLINAÇÃO

Durante a realização do projeto foi também prevista a utilização de sensores para medir a inclinação da estrutura a monitorizar.

Estes têm uma elevada precisão, convertendo o ângulo a que estão para uma tensão que pode variar entre 4mA e 20mA; esta é a gama usual de todos os sensores que medem corrente, de modo a que seja possível determinar se o sensor está a funcionar corretamente ou se na realidade o valor que está a ser adquirido é 0 que não é portanto transformado numa corrente nula.

3.6 COMUNICAÇÃO DOS DADOS

O *LabVIEW™* dispõe de um grande número de métodos de comunicação de dados, sendo aqui referidos apenas aqueles que foram utilizados no presente projeto.

3.6.1 COMUNICAÇÃO *FPGA-RT*

No desenvolvimento do primeiro programa foi necessário a utilização de um método expedito para a transferência valores entre ambos, como indicado na Fig. 36.

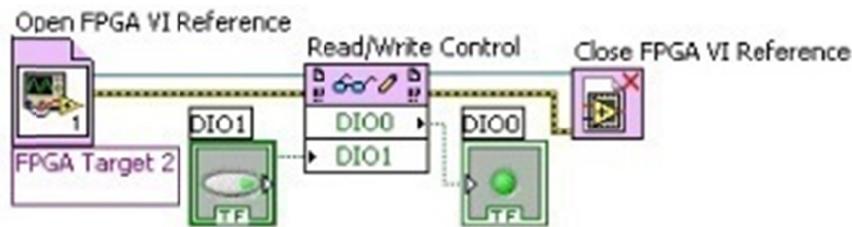
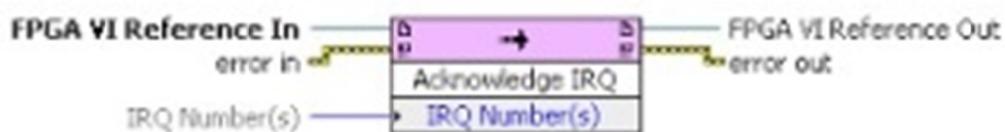


Fig. 36 Comunicação entre processos

Este método também se revela útil para a comunicação *FPGA-Computador* e *RT-Computador*.

Além disso foi necessário recorrer à utilização de interruptores lógicos (*IRQ*) [15] para sincronizar a transferência dos dados entre os dispositivos.

Fig. 37 Sincronização com *FPGA*

3.6.2 COMUNICAÇÃO FPGA-COMPUTADOR

Tal como referido anteriormente esta comunicação foi realizada com recurso ao método de comunicação entre painéis frontais.

3.6.3 COMUNICAÇÃO INTERNA

Para a comunicação dos dados internamente (FPGA - RT - Computador) foram utilizados dois métodos distintos.

O método mais simples baseia-se na utilização de variáveis locais; este é muito simples de usar e implementar, no entanto têm alguns inconvenientes dos quais o mais importante é o problema do seu uso poder criar *Race Conditions* **Error! Reference source not found.**, tal como exemplificado na Fig. 38, no qual é impossível determinar qual o valor da variável pois a sua utilização quebra a continuidade do programa. Assim a sua utilização é muito simples mas deve ser aplicada com precaução.

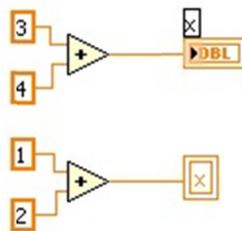


Fig. 38 Exemplo de “Race Conditions”

No exemplo anterior é demonstrada a utilização de variáveis locais, devido à estrutura inerente do *LabVIEW™* para efetuar tarefas concorrentes é impossível antecipadamente determinar qual o código que é efectuado, este depende de muitas variáveis que não podem ser controladas pelo utilizador, como seja a existência de código de outro *software* a ser executado num determinado processador, o que provoca um atraso nesse mesmo processo.

O outro método de comunicação utilizado foi o da notificação, este permite apenas o envio de uma única variável e normalmente é utilizado para sincronizar internamente várias tarefas.

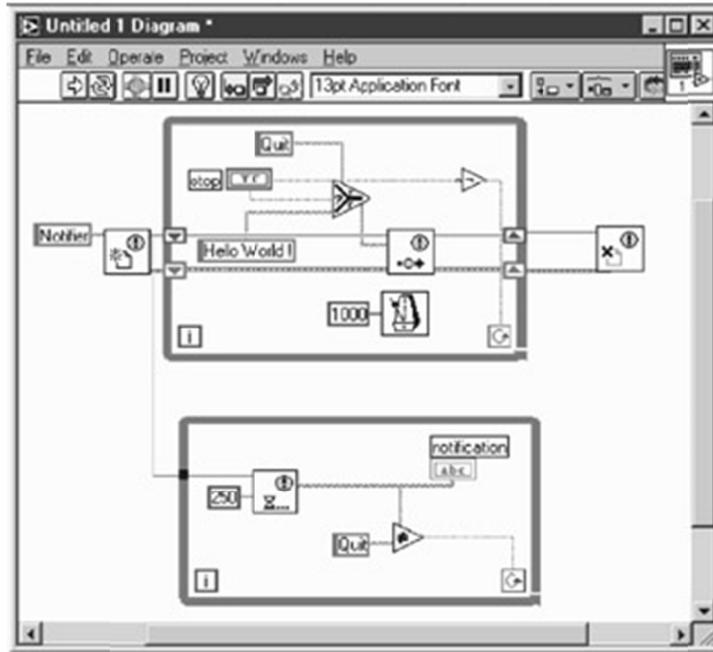


Fig. 39 Exemplo de sincronização por notificadores

Com o uso de notificações é possível sincronizar vários processos que funcionam concorrentemente, para tal basta definir um dos processos como sendo o principal ou o que irá servir de referência que terá que ser obrigatoriamente o que demora mais tempo a realizar, após o que é necessário que os outros sejam informados de qual o notificador criado e consequente leitura deste notificador para determinar a ação que o processo deverá executar. Este processo assemelha-se a um diagrama de *gant* em que existem restrições de precedência.

Para a realização do presente projeto a sincronização foi efectuada entre o processo que adquiriria o sinal e como tal estava limitado à velocidade de aquisição imposta pelo utilizador e o processo de apresentação e gravação dos dados. Deste modo os dados apresentados e gravados estão limitados aos dados recebidos, tornando a tarefa mais fiável e permitindo ainda o funcionamento de todo o programa de um modo muito seguro evitando todos os problemas associados com a execução de processos concorrentes como sejam a duplicação e perda dos dados.

4

Desenvolvimento do Protótipo

4.1 INTRODUÇÃO

Para atingir o objectivo final foram desenvolvidas duas aplicações distintas. Para arranque do projeto houve a necessidade de desenvolver uma aplicação em *FPGA* que teria como única funcionalidade a aquisição e tratamento inicial dos dados, esta é comum às duas aplicações desenvolvidas. De seguida foi desenvolvida a aplicação *RT*, que comunicando com a aplicação *FPGA* teria como função um tratamento mais amplo dos dados, armazenando-os num ficheiro e gerando gráficos dos mesmos. Por fim desenvolveu-se uma aplicação no computador que também comunicava com a aplicação *FPGA* mas ao contrário da anterior tinha uma muito maior interação com o utilizador.

O desenvolvimento deste novo sistema de aquisição de dados visa o aumento substancial das capacidades de realização de ensaios estruturais por parte do LabEST. O requisito primordial era que o sistema pudesse realizar todos os ensaios obtendo a qualidade dos sistemas a substituir, tendo atingido este objetivo foram adicionadas funcionalidades extra o que demonstra a sua mais-valia. Além disso este sistema é facilmente extensível de modo a que novas funcionalidades possam ser acrescentadas, isto deve-se ao facto de este se encontrar documentado e usar uma tecnologia muito atual.

4.2 AQUISIÇÃO E PREPARAÇÃO DOS DADOS (MÓDULO *FPGA*)

Esta aplicação revelou-se essencial para o correto desenvolvimento de todo o projeto, com esta é possível transformar sinais do mundo físico em sinais digitais que posteriormente serão utilizados.

4.2.1 AQUISIÇÃO DOS DADOS

Com a utilização desta aplicação é possível aceder a qualquer tipo de sensor instalado e obter a leitura do valor que este transmite. Para a realização de uma correta aquisição dos dados é necessário proceder à configuração de todos os canais utilizados.

Na Fig. 40 é possível observar a configuração da placa NI 9205, pois esta é a que apresenta uma mais vasta utilização. Aqui é possível observar as configurações disponíveis para esta placa. Sendo as mais importantes o campo de leitura (Input Range) e o modo como o sensor é conectado à placa de aquisição (*Terminal Mode*).

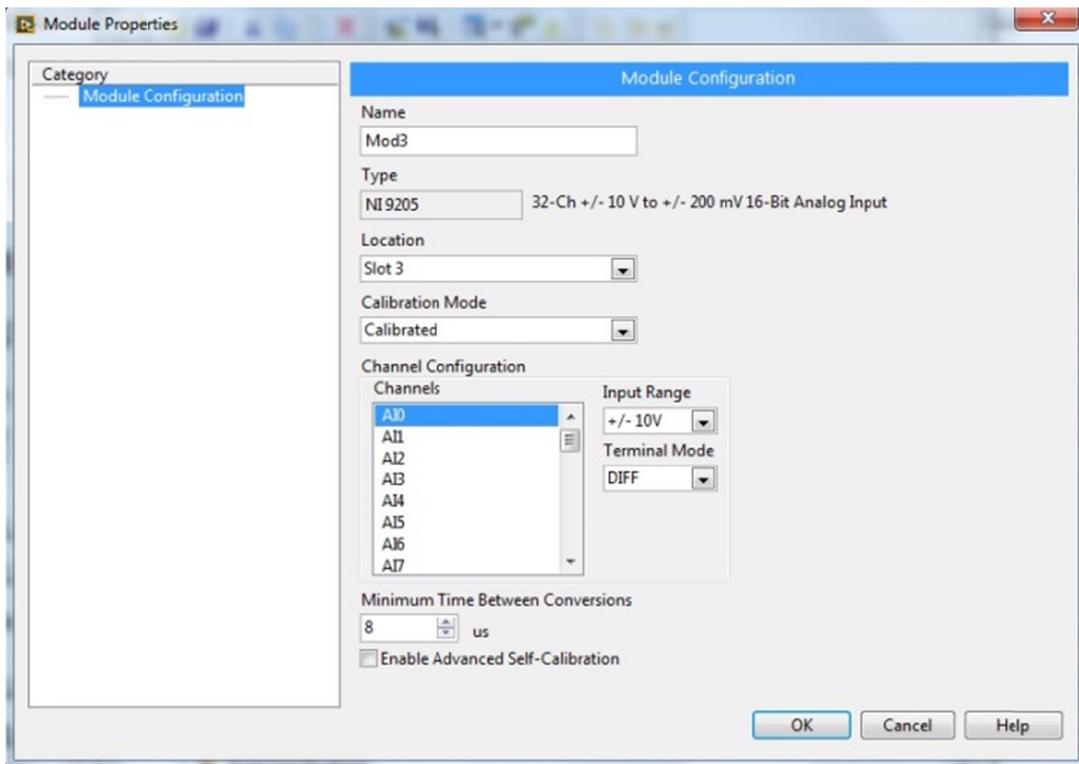


Fig. 40 Exemplo de configuração (NI 9205)

Para a configuração da forma como o sensor será ligado à placa, existem três possibilidades:

- RSE – No qual uma das ligações do sensor é monitorizada pelo módulo e a outra (comum a todos os sensores) é diretamente ligada à terra do sensor como evidenciado pela Fig. 41.
- NRSE - No qual uma das ligações do sensor é monitorizada pelo módulo e a outra (comum a todos os sensores) é conectada diretamente na entrada comum do módulo, este tipo de ligação pode ser observado Fig. 42.
- DIFF – Ligação mais aconselhada, no entanto a que exige mais recursos pois utiliza dois canais de leitura para a leitura de um único sinal, daqui obtêm-se a diferença entre os dois canais é apresentada na Fig. 43

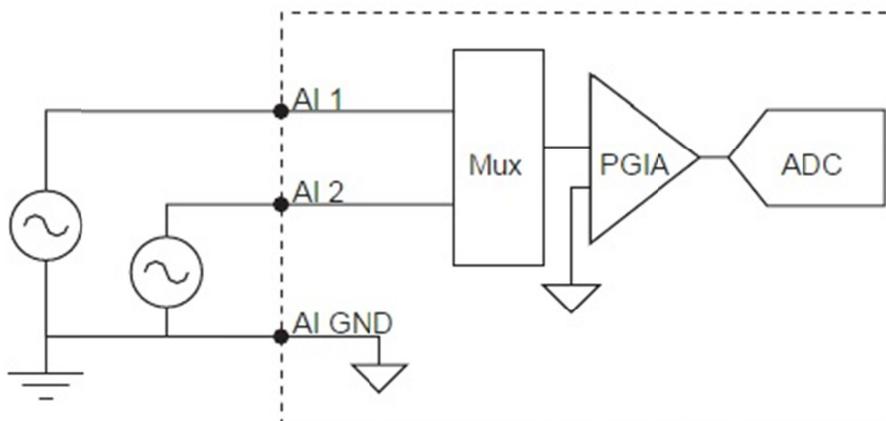


Fig. 41 Ligação em modo RSE

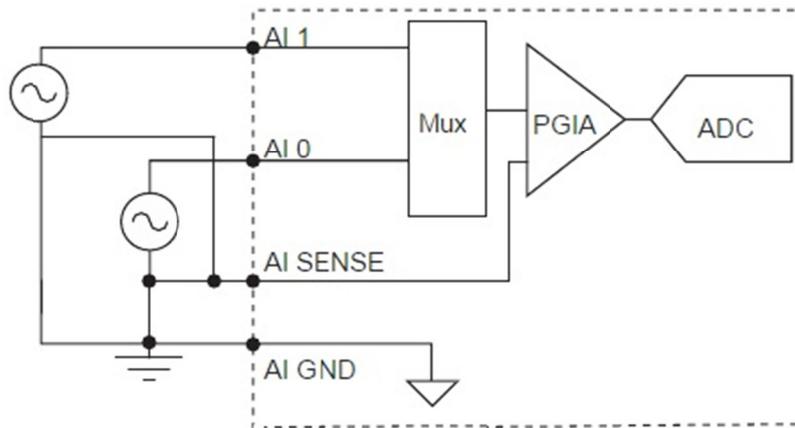


Fig. 42 Ligação em modo NRSE

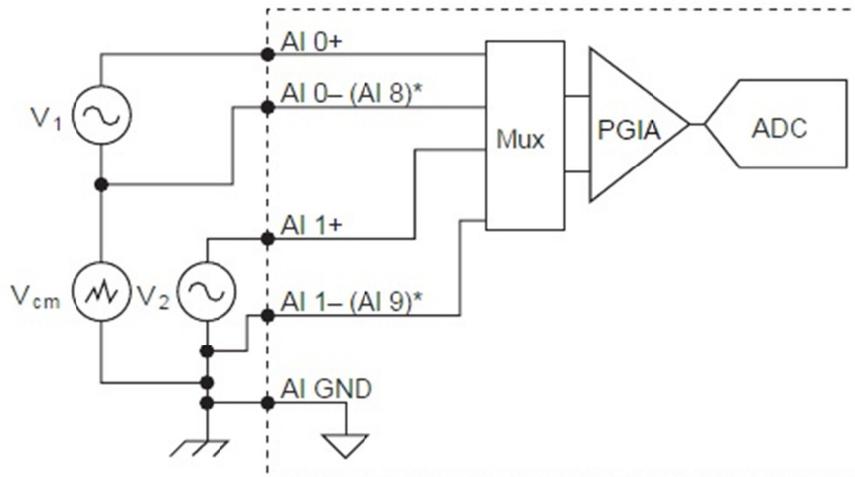


Fig. 43 Ligação em modo DIFF

Depois de estabelecido o modo de ligação do sensor é necessário avaliar o tipo de sensor que será ligado ao canal, de modo a avaliar qual o campo do valor da tensão deste.

Para o presente caso o campo de valores disponíveis é:

- ±10V
- ±5V
- ±1V
- ±200mV

A sua escolha esta intimamente ligada ao tipo de sensor, pois de modo a obter melhor precisão deverá ser escolhido o campo de valores que mais se adequa.

Para avaliarmos a resolução do módulo é necessário recorrer a fórmula.

$$\Delta V = V \times 2^{-n} \quad (4)$$

Da utilização da fórmula obtemos o valor ΔV que representa a menor alteração que se pode detetar com a placa, para isso é necessário definir qual o limite superior do campo de leitura da placa V , assim como a sua resolução (n) que se expressa em bits.

Por exemplo, se ligarmos uma célula de carga em que os valores variam entre 0 e 2V aos quais corresponde uma variação entre 0kN e 200kN teremos (de recordar que o módulo 9205 têm uma resolução de 16bits):

- Caso seja escolhido o campo $\pm 10V$ e recorrendo a fórmula anterior poderemos detectar uma alteração de 0,15mV que corresponde a 15N
- Se por outro lado escolhermos o campo de leitura $\pm 5V$ podemos obter variações de apenas 7,6N.
- A escolha de um campo inferior ao do sensor como seja $\pm 1V$, origina que a variação que se consegue detectar seja de apenas 1,5N, no entanto se a célula de carga estiver sujeita a valores superiores a 100kN o valor obtido será sempre de 100kN, o campo de $\pm 200mV$ têm uma precisão superior mas o erro também é muito superior sendo apenas detectadas variações que são ultrapassem o valor de 20kN

Após a escolha de todos os parâmetros a leitura utilizando o *LabVIEW™ FPGA* é extremamente simples.

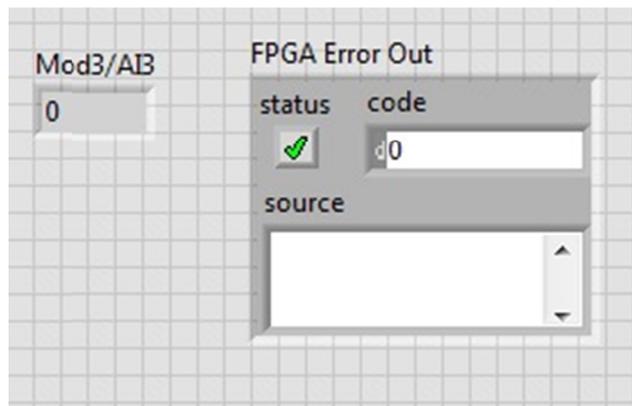


Fig. 44 Painel frontal aplicação em *FPGA* de aquisição de sinal

De referir no entanto como podemos observar pela Fig. 44 a aplicação não implica qualquer interação do utilizador, disponibilizando apenas o valor adquirido no sensor.

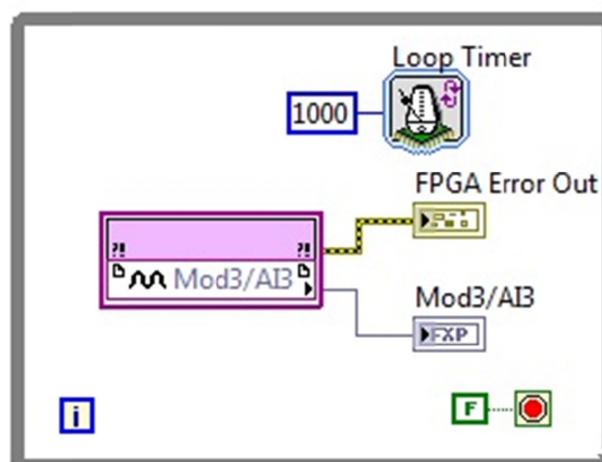


Fig. 45 Painel de blocos em *FPGA* para aquisição

Para uma correta aquisição como pode ser verificado na Fig. 45 a operação de aquisição do sinal proveniente do sensor tem que ser repetida logo existiu a necessidade de utilizar um ciclo e especificar o tempo de repetição, neste caso 1000ms ou 1Hz.

4.2.2 PROCESSAMENTO INICIAL DOS DADOS

Para melhorar a qualidade dos sinais obtidos foi introduzido no programa *FPGA* outro ciclo que força este a adquirir uma quantidade específica de sinais e retornando apenas a sua média de modo a que alguns erros e flutuações possam ser minimizados, este método [17] origina o aumento da resolução prática da placa.

De referir que neste caso é necessária a conversão do tipo de dados obtidos para outro tipo, o tipo de dados inicial é constituído pelo valor e o erro associado, para a utilização deste método é necessário retirar apenas o valor lido de modo a que este seja adicionado.

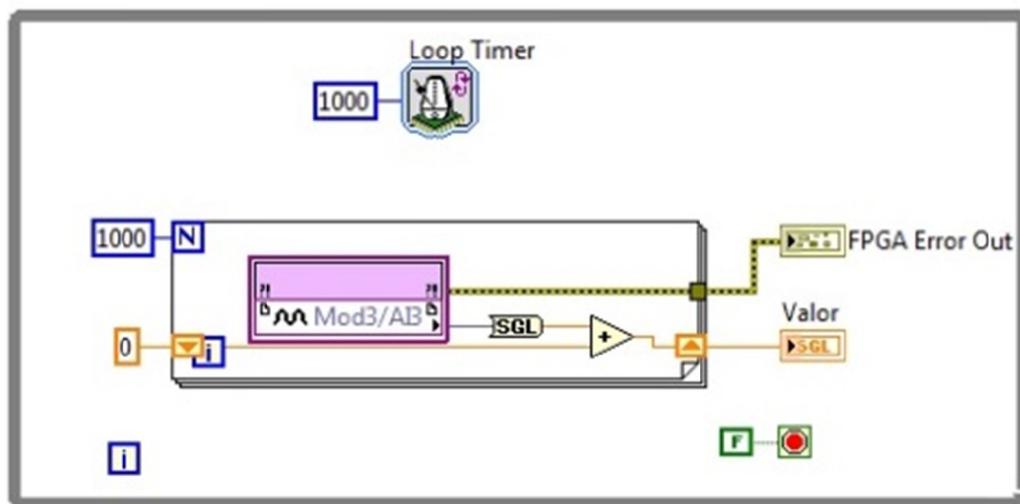


Fig. 46 Painel de blocos em *FPGA* para aquisição e média

Na Fig. 46 podemos verificar que foi introduzido um ciclo interior que se repete 1000 vezes, sendo que o exterior se mantém, logo a aquisição continua a fornecer dados com uma frequência de 1Hz mas na realidade a aquisição passou a ser efectuada a uma frequência de 1000Hz devido ao facto de ser efectuada a média de 1000 valores e apenas ser restituído um valor a cada 1000ms.

4.2.3 TRANSMISSÃO DOS DADOS

A transmissão simples dos dados é realizada automaticamente pelo *LabVIEW™* como pode ser observado na Fig. 36, sendo para tal apenas necessário que a aplicação disponha de um indicador com o valor a transmitir para a outra aplicação.

4.2.4 SINCRONIZAÇÃO DO MÓDULO

Com vista à sincronização do módulo este ficaria apenas encarregue da aquisição dos sinais que seriam efectuados não a uma frequência específica, mas sempre que a aplicação que a aplicação que lhe está a cima requisite. Para obter esta característica o programa tem que ser alterado.

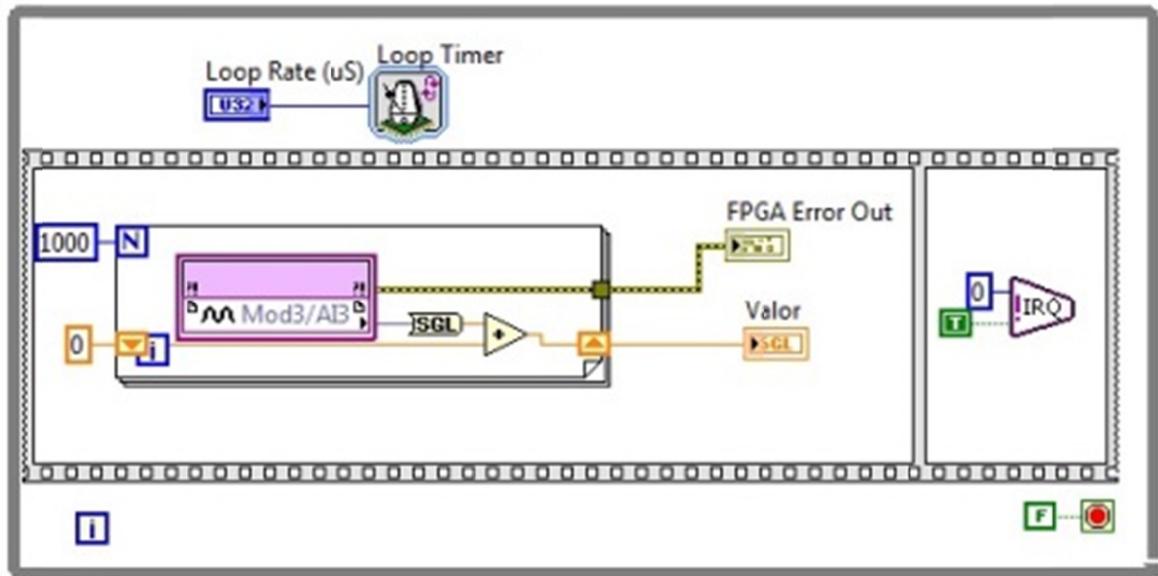


Fig. 47 Painel de blocos em *FPGA* para aquisição sincronizada

No programa passou a existir um controle que dispõe do valor em ms do ciclo, podendo este ser alterado da mesma forma pela aplicação que o controla e que tem acesso ao valor lido no sensor. Além disso foi adicionado o comando para alterar o valor de um *IRQ* com pode ser observado na Fig. 47 de modo que o programa de controle seja notificado da existência de um novo valor. Isto serve também para sincronizar o programa visto que este após a leitura do valor altera novamente o seu valor para falso ficando a aguardar que exista novo valor para prosseguir a execução.

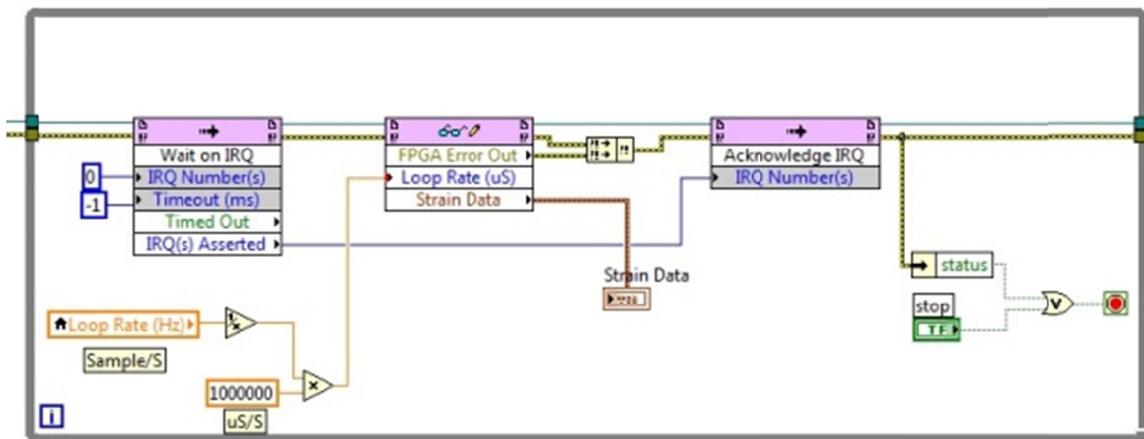


Fig. 48 Painel de blocos para aquisição sincronizada em *RT* ou computador

No diagrama apresenta na Fig. 48 é possível verificar que o ciclo não tem nenhuma temporização implícita, no entanto devido à sincronização essa temporização é controlada pela aquisição. Teremos que o ciclo envia para o programa *FPGA* a frequência de aquisição e este dispõe de um ciclo que executa a essa frequência e apenas quando o valor do *IRQ* é válido o ciclo pode prosseguir.

4.3 VISUALIZAÇÃO DOS DADOS (MÓDULO RT)

Este foi o primeiro programa com apresentação gráfica a ser desenvolvido. Tal como anteriormente referido, este comunica diretamente com o módulo *FPGA* para receber os dados lidos e enviar a taxa de aquisição.

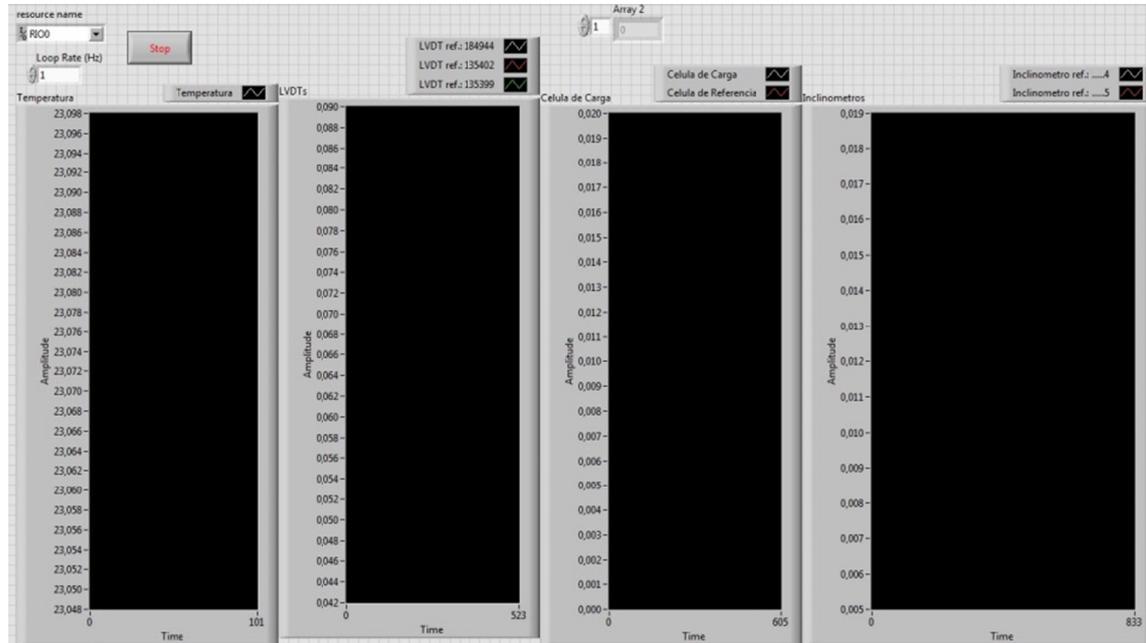


Fig. 49 Painel frontal da aplicação RT

Devido às restrições inerentes aos programas que funcionam em modo *RT* o aspecto gráfico é relativamente simples como pode ser observado na Fig. 49, isto deve-se principalmente às restrições impostas para que seja possível o seu funcionamento neste modo, permitindo ao utilizador apenas alterar a frequência de aquisição do ensaio durante a sua realização, sendo este o limite de interação do utilizador, que no entanto tem acesso aos dados que estão a ser adquiridos e transformados em gráficos diferentes pois a escala de grandezas é inerentemente diferente teremos assim o gráfico que corresponde às leituras efectuadas pelo módulo de resistências térmicas, após a transformação da resistência em Ω para $^{\circ}\text{C}$ é apresentada como será de esperar a variação térmica do ambiente do ensaio apresenta muito pequena oscilação com um valor médio definido (um ensaio poderá iniciar-se à temperatura de 25°C e não será espectável que a temperatura varie mais que 1°C ao longo de todo o ensaio), já no caso de se tratar de uma célula de carga a variação será entre 0kN e o seu limite que poderá ser de 100kN logo o valor apresenta uma grande variação não sendo compatível a apresentação de ambos no mesmo gráfico no qual estariam sujeitos a uma escala de valores única.

4.3.1 LEITURA DOS DADOS

A leitura dos dados é efectuada automaticamente utilizando a linguagem de programação *LabVIEW™*. O módulo *FPGA* funciona autonomamente tendo como função única a conversão das alterações físicas detectadas pelos sensores em sinais digitais passíveis de ser utilizados posteriormente. Assim é admissível considerar que o programa desenvolvido pode ser considerado como uma implementação total de um programa que adquire e trata os dados, que na realidade já foram convertidos para sinais digitais pelo módulo *FPGA* tal como pode ser observado na Fig. 47.

4.3.2 GRAVAÇÃO DOS DADOS

Seguidamente à leitura dos dados o programa efetua o seu armazenamento. Para tal recorre às funções específicas do *LabVIEW™* para o realizar.

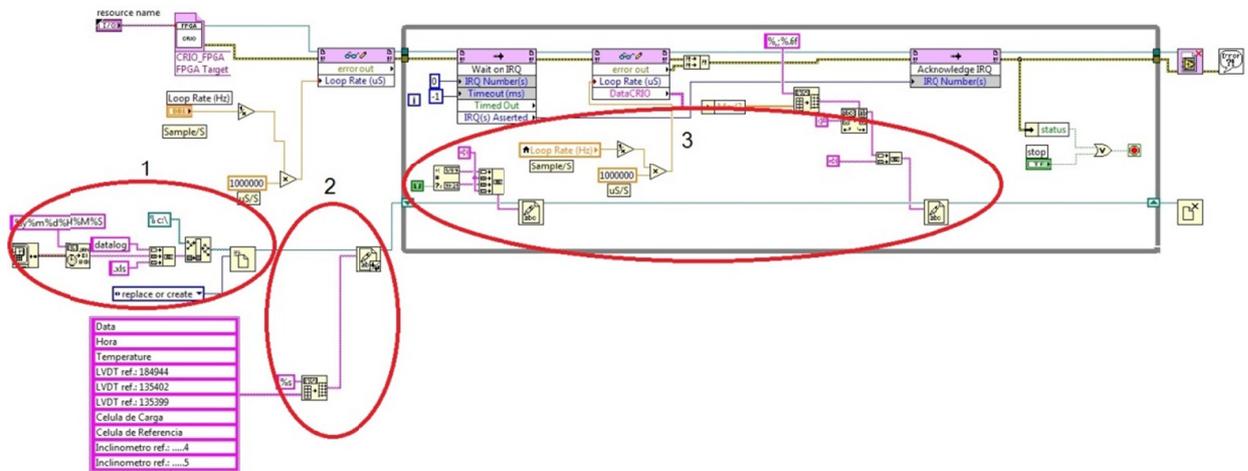


Fig. 50 Painel de blocos para gravação em RT

Na figura anterior é possível verificar várias características essenciais para a gravação. Assim teremos que em 1 é gerado um nome para o ficheiro dos dados que varia (depende da data/hora em que este é gerado), após o que a primeira linha de texto é gravada contendo os sensores ativos como pode ser visualizado em 2. Por fim em 3, que será repetido a cada aquisição, é gravada a data e hora desta, assim como todos os valores que foram obtidos.

4.3.3 CONVERSÃO DOS DADOS

A conversão dos dados apenas ocorre após a gravação destes, pois considerou-se mais útil a gravação dos dados no seu estado bruto, sem alterações. A conversão dos dados para os sensores de deslocamento, células de carga e inclinómetros, resume-se à multiplicação do valor lido pela constante de transformação, no entanto no caso de se tratar de valores de temperatura é necessário recorrer à fórmula de *Callendar-Van Dusen* (ver 3.4.1), criando para isso um módulo específico.

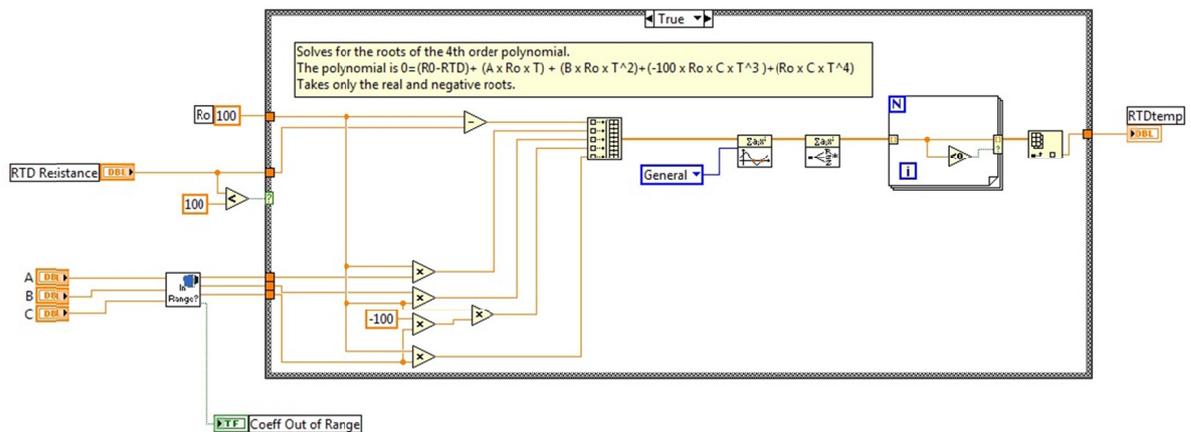


Fig. 51 Painel de blocos para cálculo da temperatura

4.3.4 APRESENTAÇÃO DOS DADOS

Devido ao facto do *LabVIEW™* estar vocacionado para apresentação gráfica dos resultados, esta é feita automaticamente, bastando para tal enviar para um indicador gráfico os valores pretendidos.

4.4 VISUALIZAÇÃO DOS DADOS (MÓDULO *HOST*)

Esta aplicação exibe uma interface com o utilizador mais desenvolvida que a anteriormente referida. Este facto deve-se principalmente a esta não ter que respeitar as condicionantes exigidas pelo funcionamento *RT*, no entanto tal como a anterior, também esta comunica diretamente com o módulo *FPGA*.

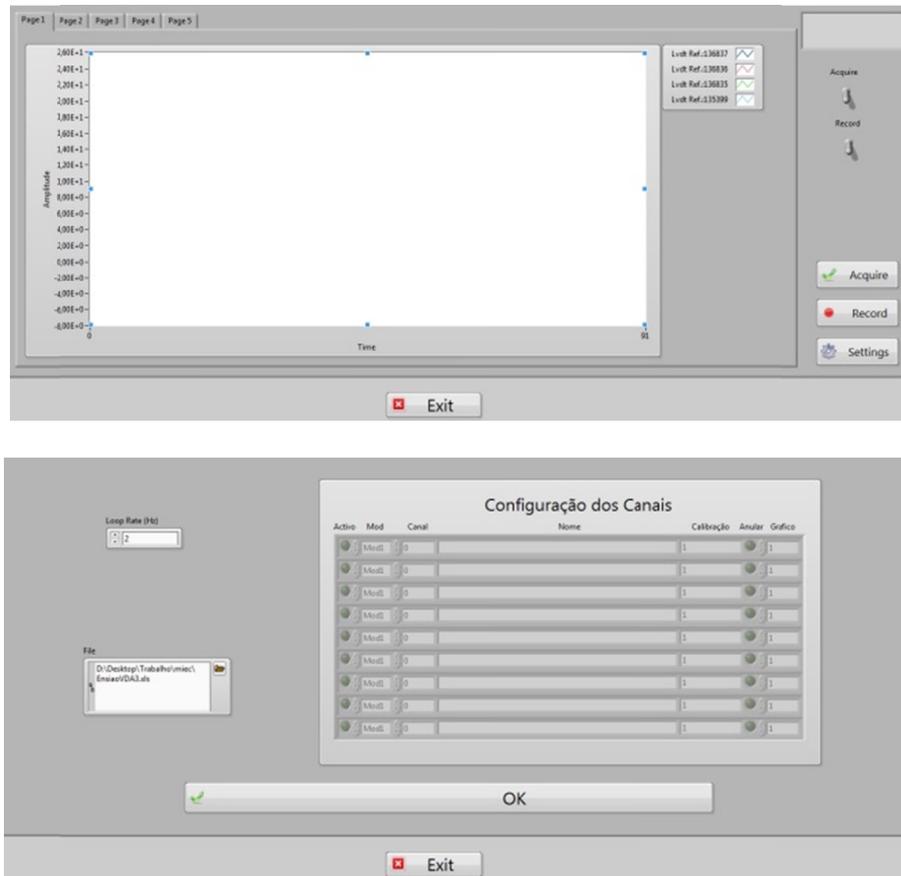


Fig. 52 Painel inicial e configuração da aplicação de computador

Na figura anterior é possível verificar que esta aplicação têm um aspecto gráfico muito mais apelativo e uma vez que está sujeita a menos restrições é possível ao utilizador escolher os canais a monitorizar definindo o seu nome. É também possível definir o nome e local do ficheiro de dados a gerar.

4.4.1 LEITURA DOS DADOS

Tal como na aplicação anterior, também esta comunica diretamente com o módulo *FPGA* para obter os dados recolhidos.

4.4.2 GRAVAÇÃO DOS DADOS

Do mesmo modo que a versão *RT* também esta efetua a gravação dos dados num ficheiro. No entanto nesta os dados gravados respeitam as escolhas realizadas pelo utilizador.

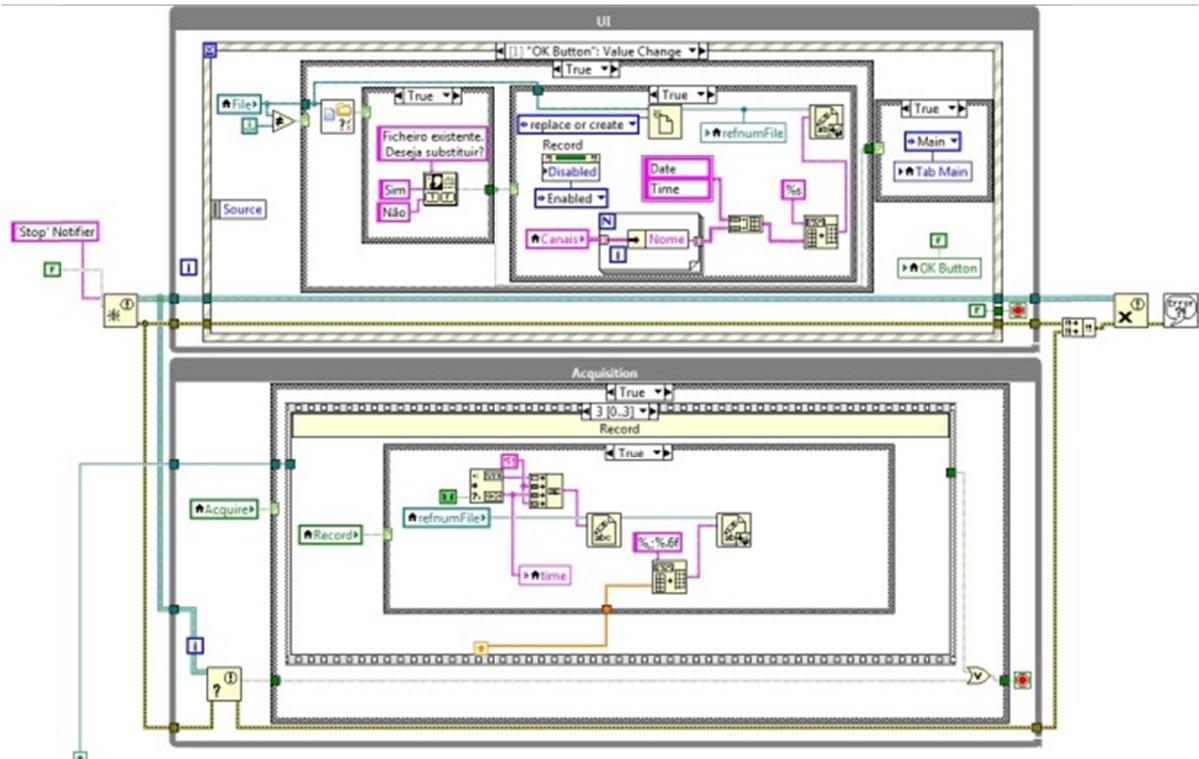


Fig. 53 Painel de blocos para gravação dos dados no computador

Além disso como pode ser verificado a estrutura é radicalmente diferente da anterior, sendo assim, existe um ciclo superior que trata os eventos gerados pelas ações do utilizador, neste logo que o utilizador confirme que todos os dados da configuração se encontram corretos, é gerado um ficheiro com o nome escolhido pelo utilizador e é escrito o cabeçalho deste com base nos canais ativos que o utilizador escolheu. No ciclo inferior, que é executado apenas se o utilizador tiver escolhido no ecrã principal a gravação dos dados, são gravados todos os dados adquiridos.

4.4.3 CONVERSÃO DOS DADOS

A conversão dos dados é idêntica à anteriormente referida para o caso *RT*, excluindo o facto de que nesta devido ao seu carácter mais interativo é possível o utilizador definir o parâmetro de conversão na janela de configurações.

4.4.4 APRESENTAÇÃO DOS DADOS

A apresentação dos dados é uma das características mais interessantes desta aplicação, pois ao contrário da anterior, esta dispõe de uma interface gráfica muito apelativa, como se poderá constatar pela figura (Fig. 52)

5 Ensaios

5.1 CONTEXTO/ENQUADRAMENTO

O desenvolvimento deste projeto implicava a realização de um programa em *LabVIEW*, que permitisse a aquisição e armazenamento dos dados referentes aos ensaios a desenvolver pelo LabEST, e ainda que a sua utilização fosse simples de modo a permitir a sua utilização por diversos utilizadores, sem que estes tenham necessidade de ter conhecimentos em *LabVIEW* para utilizar o programa.

A aplicação em *FPGA* responsável pela aquisição dos dados requer conhecimentos profundos em *LabVIEW* na sua vertente *FPGA*, no entanto para facilitar a utilização por todo o tipo de utilizadores foi previamente configurada procedendo-se à compilação de modo que de futuro para utilizações correntes não seja necessário efetuar qualquer alteração e deste modo permitir que qualquer utilizador tenha a possibilidade de executar a aplicação global no computador.

O código *FPGA* desenvolvido está intimamente ligado ao *hardware* utilizado, deste modo para o efetuar foram feitas algumas suposições como documentado no Quadro 3, de modo a definir o *hardware* utilizado.

Quadro 3 Localização dos módulos no sistema de aquisição

Slot	Módulo	Observações
1	NI 9236	Iniciação da excitação e leitura dos sensores 0 a 7
2	NI 9217	Leitura das 4 resistências de temperatura disponíveis
3	NI 9205	Ligações efectuadas com o acessório NI 9940 para sensores em modo DIFF, as ligações são se encontram realizadas para 8 canais (total de 16)
4	NI 9237	Iniciação da excitação e leitura do 4 canais disponíveis, de referir que este módulo foi desativado na implementação final pois a sua utilização inviabilizava a leitura dos outros módulos
5	NI 9203	Leitura dos 8 canais em corrente, disponibilizados pela placa

Para a correta implementação do projeto foi ainda necessário o desenvolvimento de uma aplicação a disponibilizar aos utilizadores, para qualquer das aplicações, é necessária a correta instalação de todo o *software* relevante tal como especificado no Anexo A.

Das duas principais tarefas que constituem o trabalho (aquisição via *FPGA*; monitorização e gravação via programa local), a primeira constituiu a tarefa mais demorada, e visa a aquisição dos dados pelo sistema, recorrendo à tecnologia *FPGA* para converter os dados físicos ou reais dos sensores em dados digitais que poderão ser posteriormente utilizados pela tarefa seguinte, durante a conversão é efectuada

um tratamento inicial dos dados de modo a obter uma melhor resolução, recorrendo à utilização de médias para obter este efeito como é referido em pelo método [17].

A segunda tarefa visava a construção de uma aplicação na qual um utilizador genérico sem formação específica tem a possibilidade de visualizar os dados em vários gráficos e proceder ao seu armazenamento, para serem utilizados no futuro.

De facto, a elaboração da primeira tarefa representa a quase totalidade do projeto, no entanto a segunda é que corresponde a parte visível pelo utilizador. Relativamente a este propósito, refere-se que a aquisição e armazenamento dos sinais são tarefas cruciais, havendo apenas que atender especificamente a factores de correção, deste modo os dados armazenados serão os dados correspondentes aos que são obtidos diretamente da aplicação *FPGA* podendo não corresponder aos valores apresentados nos gráficos que se encontram corrigidos pelas formulas de conversão dos dados em grandezas físicas.

Como exemplo das operações realizadas podemos examinar uma célula de carga que quando sujeita a uma força produz uma alteração da voltagem lida pela aplicação *FPGA*, para já temos uma leitura em *Volts*, ainda é efectuado um pré-tratamento que envolve a aquisição de uma quantidade de dados pré-definida e comunicação de apenas a média dos valores mas sem alteração da grandeza, este valor em *Volts* é transmitido ao programa principal que armazena este valor para futura referencia e com base na constante de transformação que o utilizador tenha escolhido efetua a sua transformação e apresentação no gráfico desejado, esta transformação visa a conversão do *Volts* para *kN* tendo por base a constante obtida por calibração do equipamento.

5.2 PREPARAÇÃO DOS PROVETES PARA OS ENSAIOS

Para a realização dos ensaios foram efectuadas 4 vigas que deveriam respeitar todos os parâmetros estipulados pelo projeto de investigação anteriormente referido, seguindo o esquema referido na Fig. 54 e futuramente referidas como VDA1 a VDA4.

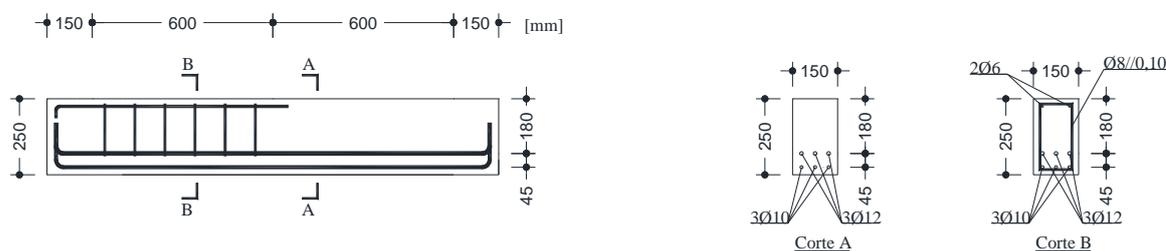


Fig. 54 Esquema das vigas

Depois de efectuadas as montagens das armaduras conforme o esquema obtiveram-se várias vigas apresentadas Fig. 55.



Fig. 55 Montagem e betonagem das vigas VDA1 a VDA4

O betão constituinte foi utilizado para o enchimento dos moldes como pode ser observado na Fig. 55, tendo ainda sido efectuados 6 provetes cilíndricos com $\phi 150$ e 300mm de altura que foram sujeitos a ensaios de tração e compressão como retratados na Fig. 56, para verificar as características do betão utilizado.



Fig. 56 Ensaios de tração e compressão do betão

Com base nos ensaios realizados após 28 dias da betonagem dos cilindros obtiveram-se os resultados presentes no Quadro 4 para os ensaios à compressão uniaxial que foram, e os resultados do Quadro 5 para o caso dos ensaios de compressão diametral com vista a estimar a resistência à tração, nos quais se apresentam os dados referentes:

- σ_c - tensão de rotura do betão à compressão.
- E_c - módulo de elasticidade do betão.
- F_{\max} - força exercida para obter a rotura do betão à tração.
- f_{ct} - tensão de rotura do betão à tração.

Quadro 4 Resultados dos ensaios à compressão uniaxial

	σ_c (MPa)	E_c (GPa)
Cil1	35,4	29,4
Cil2	35,4	31,4
Cil3	35,9	30,8

Quadro 5 Resultados dos ensaios de compressão diametral

	F_{\max} (kN)	f_{ct} (MPa)
Cil1t	202,92	2,89
Cil2t	227,13	3,23
Cil3t	222,43	3,17

5.3 ENSAIOS REALIZADOS

O sistema de aquisição desenvolvido foi testado na instrumentação de uma série de ensaios estruturais realizados no âmbito de um projeto de investigação desenvolvido pelo LabEST. Estes testes tiveram como finalidade a verificação da correta implementação do sistema. No entanto, em virtude do tipo de ensaios que foi possível realizar durante o período desta dissertação não houve oportunidade para demonstrar todas as potencialidades que este sistema pode oferecer devido às características, por exemplo a baixa taxa de aquisição entre outras.

Foram utilizados os dois sistemas, o já existente e o desenvolvido, de modo a comparar os resultados obtidos e validar o desenvolvimento do novo sistema. Deste modo ficou provado que a utilização do novo sistema conduz a resultados que são idênticos aos dos sistemas atuais, existindo ainda a hipótese do novo sistema ser expandido para cumprir novos requisitos que seriam impraticáveis com a utilização dos sistemas presentemente em utilização.

5.3.1 ENSAIO 1 – TESTE DA VERSÃO *RT*

A primeira versão do sistema de aquisição totalmente funcional a ser desenvolvida incluía o módulo *FPGA* essencial para a aquisição dos dados, e ainda o módulo *RT*, a versão que respeita todos os requisitos para funcionamento autónomo. Esta versão disponibilizava uma interface gráfica pouco apelativa (ver Fig. 49), no entanto o seu funcionamento autónomo revelar-se-ia uma mais-valia para desenvolvimentos futuros.

O ensaio de flexão em quatro pontos foi realizado numa viga simplesmente apoiada existente no laboratório com uma configuração que pode ser observada na Fig. 57 que foi utilizada para testar o sistema. O ensaio visou apenas o teste do dispositivo sem que houvesse necessidade de realizar um ensaio específico, e foi constituído por duas partes distintas; a primeira visava a realização de ciclos de carga e descarga (em que o deslocamento imposto tinha uma variação constante) até atingir o limite de 20kN, na segunda parte foi aplicado um ciclo único em que a força variava linearmente até atingir a rotura do provete.

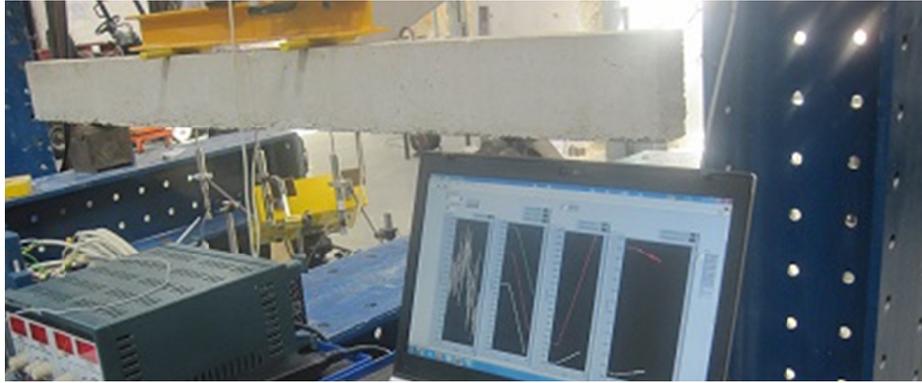


Fig. 57 Realização do ensaio 1

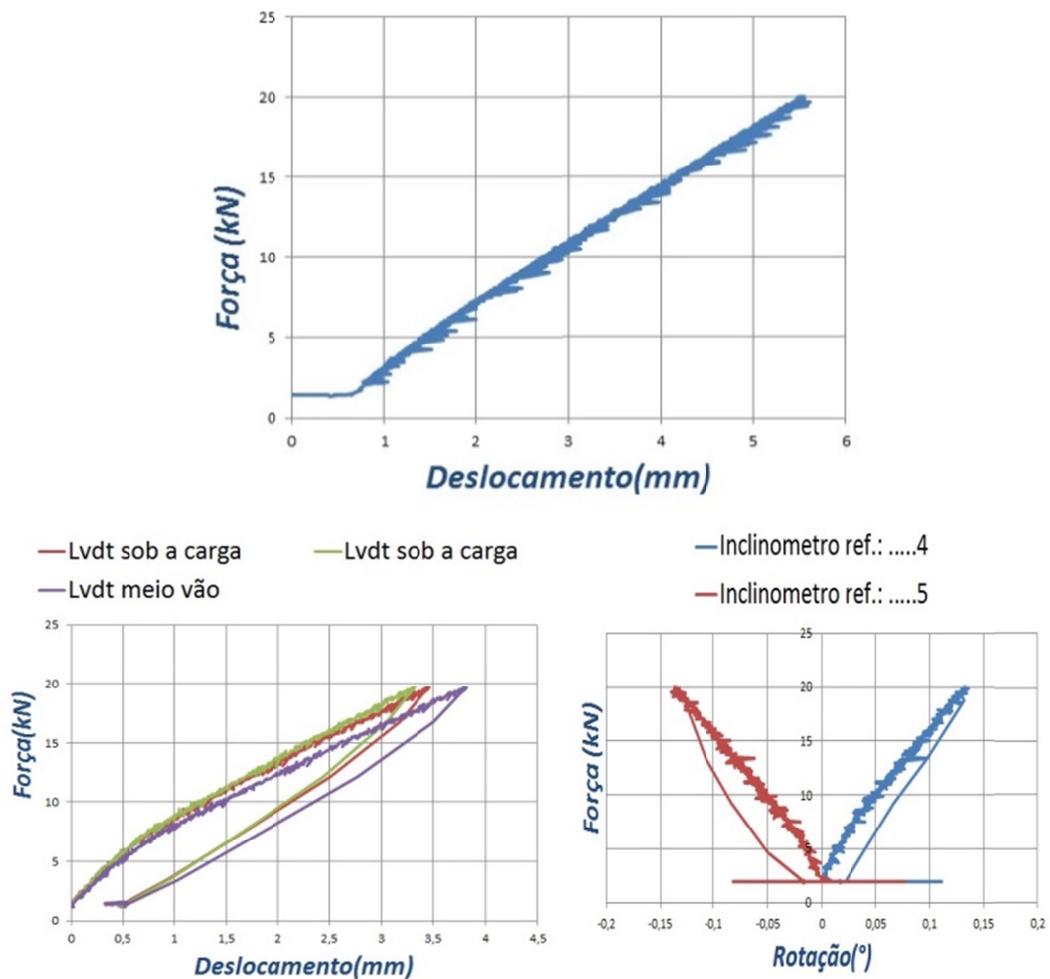


Fig. 58 Ensaio 1 (Ação aplicada e resultados)

A primeira fase do ensaio 1 decorreu normalmente e como pode ser verificado no gráfico Fig. 58, pela análise dos deslocamentos obtidos estes correspondem ao que teoricamente seria expectável. É de referir que o primeiro gráfico corresponde aos deslocamentos e forças medidas impostos pelo actuador sendo a sua leitura é totalmente independente do sistema desenvolvido, os dados dos dois gráficos seguintes são adquiridos pelo sistema de aquisição desenvolvido. Da análise da Fig. 58 observamos que os dados da célula de carga lida correspondem aos valores impostos pelo actuador. No que diz

respeito aos deslocamentos, podemos verificar que estes são um pouco inferiores aos obtidos diretamente pelo sistema de atuação. Isto deve-se ao facto de o deslocamento medido pelo actuador incluir a deformação não só da viga, mas de todo o sistema de reação.

Quanto aos inclinómetros estes têm uma variação simétrica tal como seria espectável uma vez que a sua disposição é simétrica em relação ao ponto médio da viga. Foi ainda introduzido no sistema de aquisição a leitura dos dados da temperatura exterior recorrendo a um sensor de temperatura, este demonstrou que a temperatura exterior foi praticamente constante ao longo de todo o ensaio, não sendo expectável qualquer influência nos outros valores adquiridos. No entanto a sua utilização serviu para validar a possibilidade de em futuros ensaios, nos quais seja necessário adquirir a temperatura, para obtenção por exemplo da reação de cura do provete, de referir que a sua utilização requiere alguma atenção pois o módulo de aquisição de temperatura dispõe de uma taxa de aquisição bastante inferior aos restantes, assim a velocidade de aquisição do ensaio encontra-se limitada à frequência máxima permitida pelo módulo de temperatura que está limitado a 100S/s ou 100Hz.

Na segunda parte do ensaio procedeu-se ao carregamento do provete com variação linear da força aplicada até ser atingida uma força de 42,5kN.

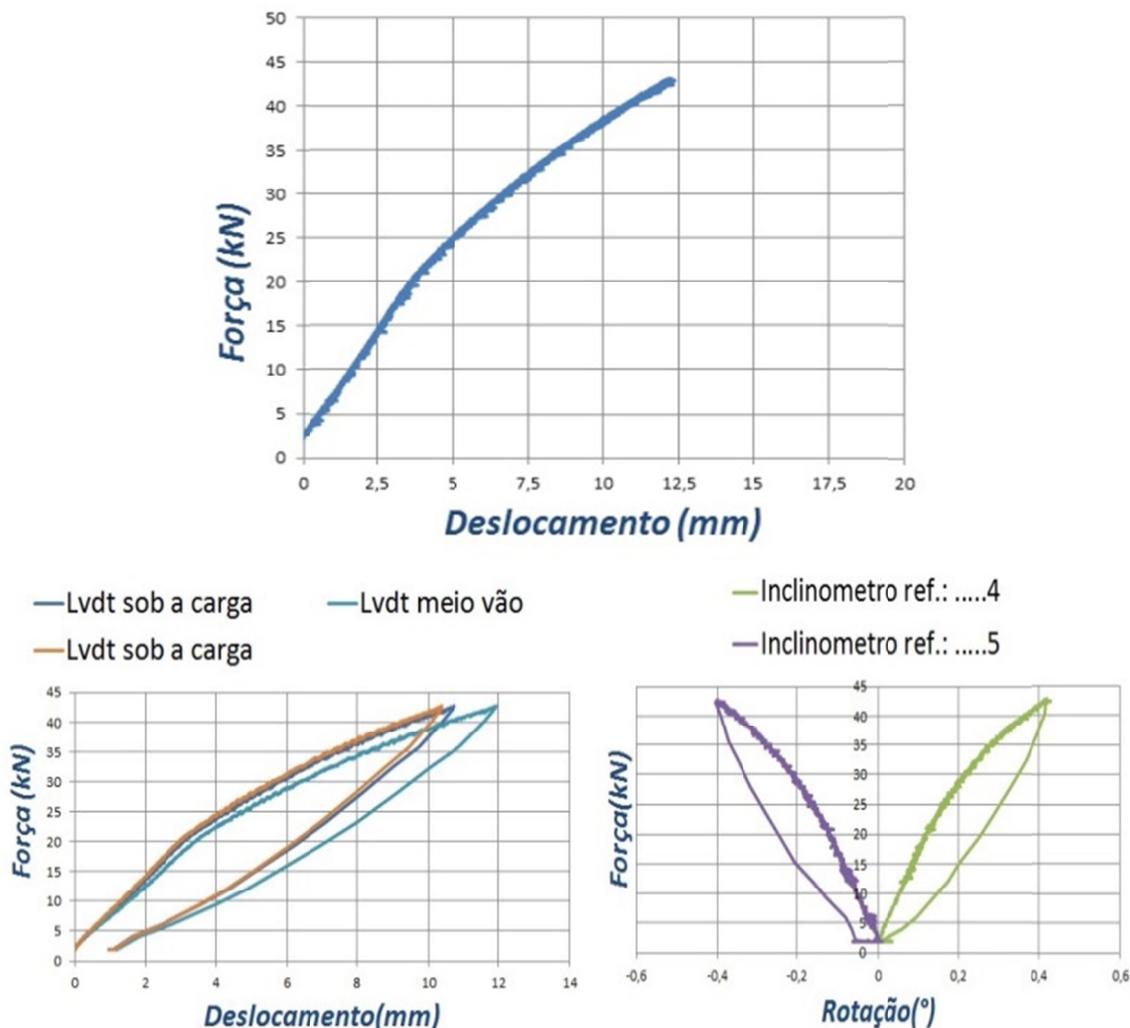


Fig. 59 Fase final do Ensaio 1 à ruptura (Ação aplicada e resultados)

5.3.2 ENSAIO 2 – TESTE DA VERSÃO FINAL

O Ensaio 2 decorreu utilizando uma das vigas referidas anteriormente em 5.2 e tinha como finalidade simular uma consola. Na Fig. 60 é apresentado a configuração do sistema estrutural pretendido.

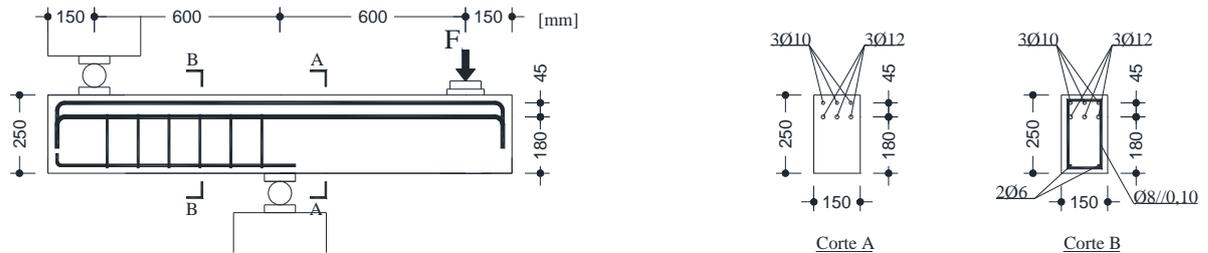


Fig. 60 Esquema estrutural pretendido

A configuração da viga para a realização do ensaio apresentada na Fig. 60 implicava muitos ajustes e a sua execução acarretava erros, pelo que através de uma pequena alteração foi possível executar o ensaio com uma maior precisão e facilidade. Para tal bastou inverter a viga e aplicar a força no centro da viga tal como representado na Fig. 61, implicando no entanto a disponibilidade de um actuador com o dobro da capacidade.

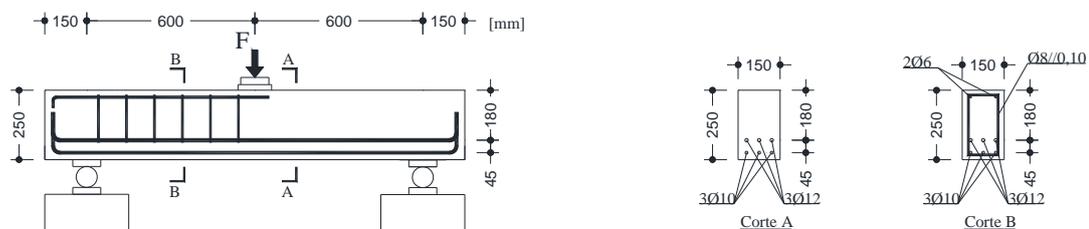


Fig. 61 Esquema estrutural ensaiado

A viga ensaiada foi instrumentada como se vê na Fig. 62 com uma célula de carga para medir a força aplicada, um LVDT que mede o deslocamento δ do ponto médio da viga assim como LDVTs para medir os deslocamento axiais superiores (t_1 e t_2) e inferiores (b_1) da viga ensaiada.

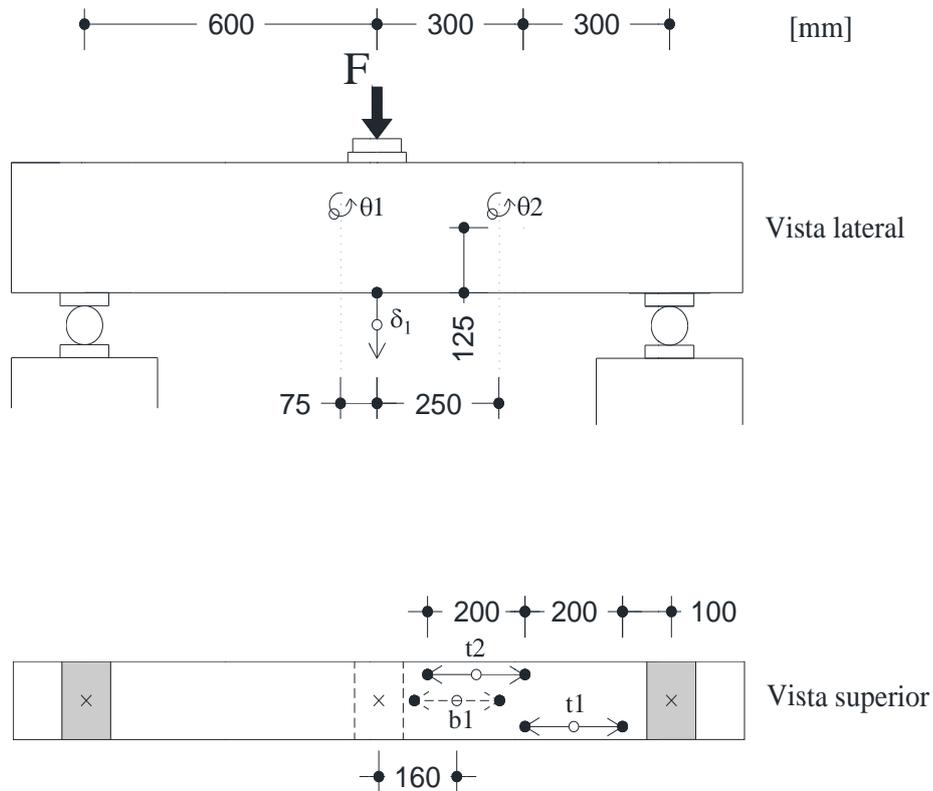


Fig. 62 Posicionamento dos sensores

A viga ensaiada tem duas camadas de armadura inferior e estão inseridas numa campanha experimental mais vasta com o objectivo de caracterizar ao comportamento ao corte de vigas de betão armado reforçadas com uma camada de materiais compósitos de ultraelevado desempenho reforçados com fibras. Estas vigas são vigas de referência, com a mesma armadura e dimensões totais das vigas reforçadas, daí terem duas camadas de armadura. A configuração final do ensaio pode ser verificada na Fig. 63.

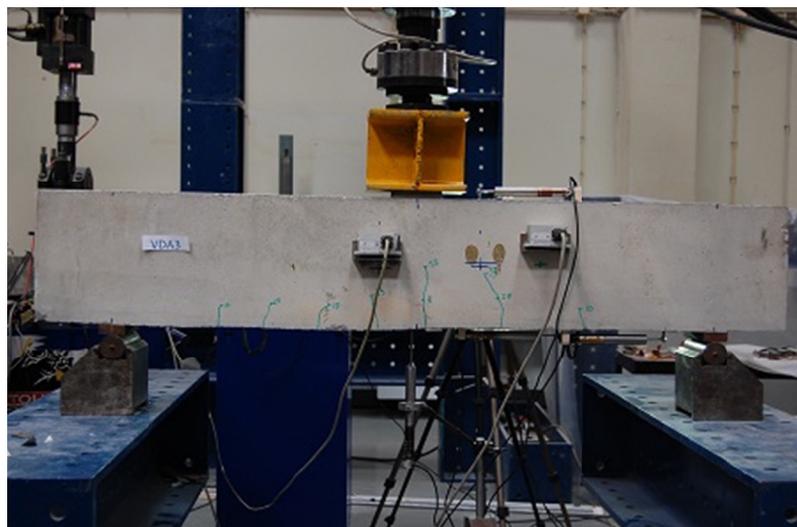


Fig. 63 Ensaio 2 da viga VDA3

Na Fig. 64 é possível verificar os gráficos dos esforços de corte representados por V , dos momentos M e ainda a curva dos deslocamentos impostos para a configuração pretendida e ensaiada

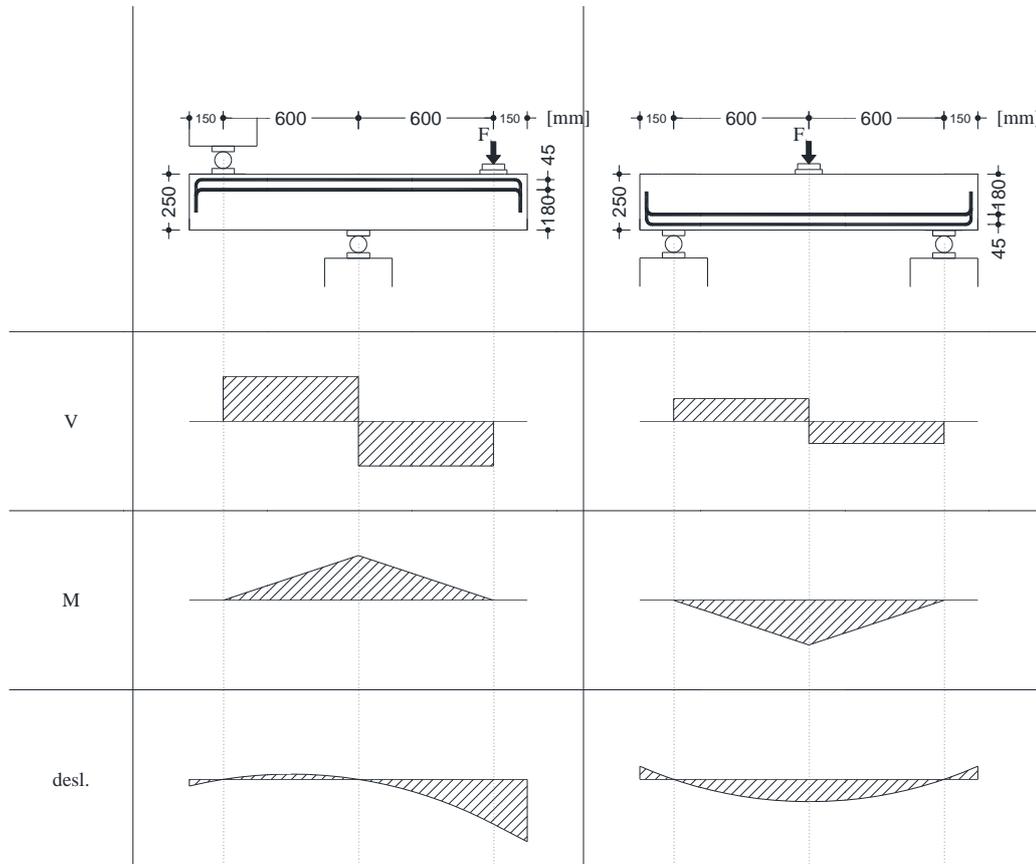


Fig. 64 Esquemas comparativos

5.3.3 ENSAIO 3 – TESTE DA VERSÃO COMPUTADOR

Neste ensaio utilizou-se uma versão do sistema de aquisição com um interface gráfico mais apurado, como tal não respeita os requisitos impostos pelas aplicações *RT*, no entanto para este tipo de ensaios iminentemente estáticos essas diferenças são desprezáveis.

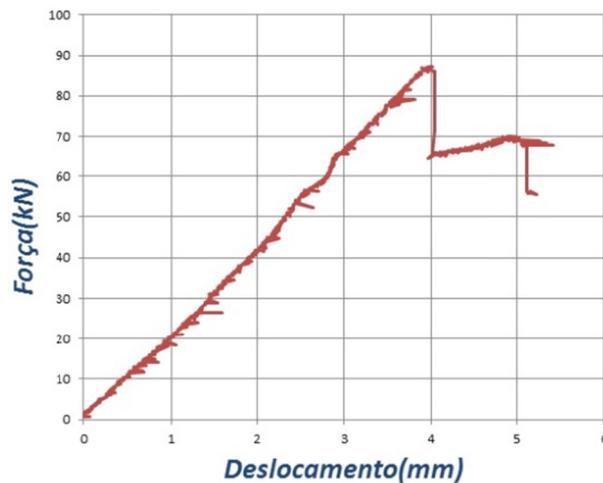


Fig. 65 Lei de carga no ensaio VDA3

Para este ensaio que como pode ser verificado pela lei de carga presente na Fig. 65 obtida pelo sistema de actuador que decorreu até obter a ruptura do provete e para este foram obtidos os seguintes resultados:

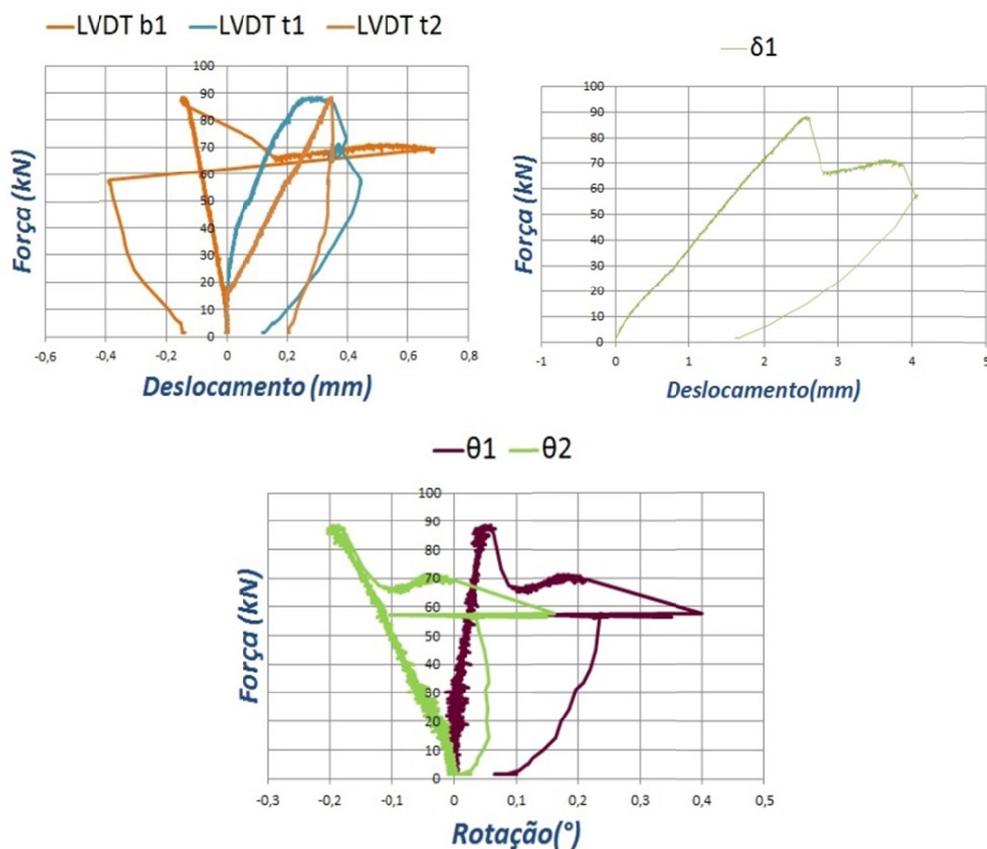


Fig. 66 Resultados do ensaio VDA3

Como se pode observar no primeiro gráfico de resultados o deslocamento do LVDT b1 que se encontra à compressão é linear até ao momento da ruptura do provete, em contrapartida os outros sensores que se encontram à tração são apenas lineares no início do ensaio seguindo-se a criação de fissuras ao longo do provete que provocam a alteração da linearidade.

No gráfico do deslocamento do ponto central, nota-se que a ruptura do provete acontece aproximadamente aos 90kN, ao que se segue uma diminuição quase imediata da força resistida pelo provete, no final ainda existe alguma resistência residual, sendo que o valor da força de pico se atingiu com a propagação súbita de uma fenda diagonal típica das roturas por corte.

Quanto ao gráfico dos inclinómetros, nota-se se estes têm uma variação linear e oposta, que não é totalmente simétrica devido ao facto de estes não se encontrarem simetricamente afastados do ponto de atuação da força.

5.3.4 ENSAIO 4 – TESTE DA VERSÃO *DATATAKER*TM

Como termo de comparação foi novamente utilizado o anterior sistema baseado na utilização de um equipamento *DataTaker*TM DT800, cuja solicitação se apresenta na Fig. 67.

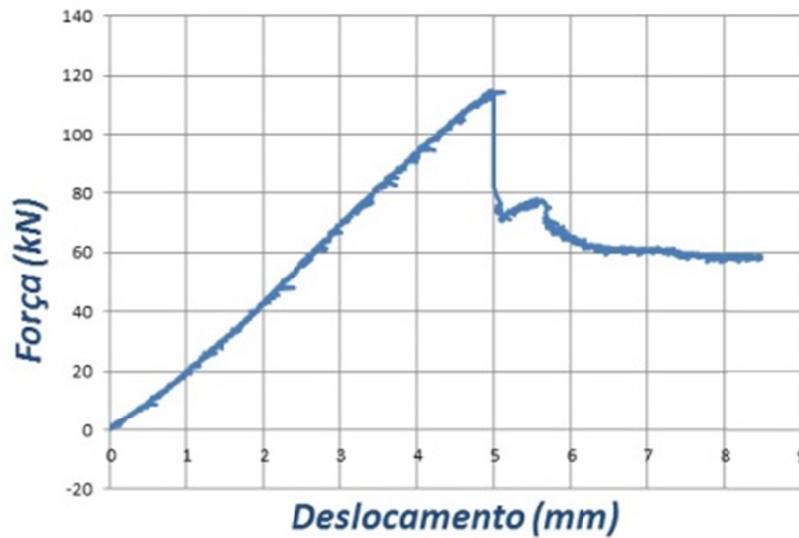


Fig. 67 Lei de carga no ensaio VDA4

Para este ensaio a configuração utilizada foi a mesma da anterior.

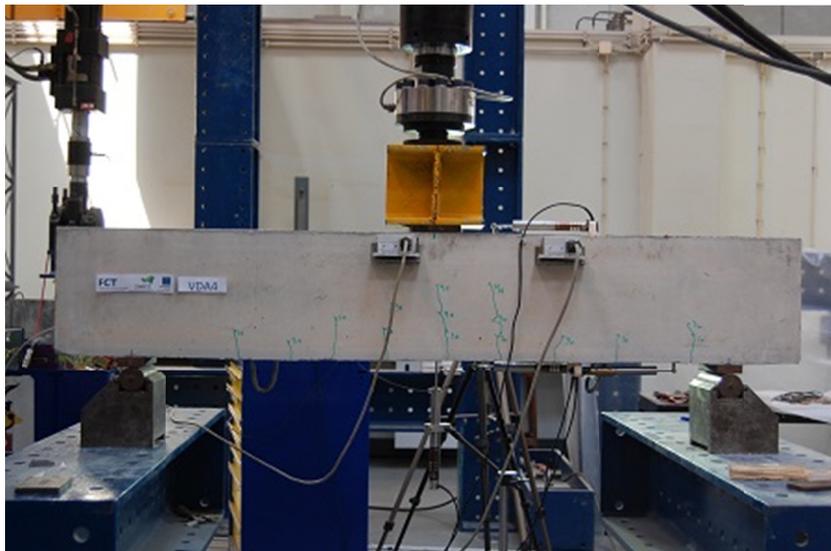


Fig. 68 Ensaio 4 da viga VDA4

Na Fig. 69 vemos claramente que o LVDT b1, que se encontra na zona comprimida, teve um comportamento linear até à rotura. Já os LVDTs colocados na zona de tração não têm um comportamento linear devido a formação de fendas na face traccionada m que os LVDTs estão instalados. Tal como no caso da viga anterior, a rotura ocorreu imediatamente após a formação e propagação de uma fenda diagonal típica das roturas por corte

A análise dos gráficos permite ainda concluir que a rotura se deu com a armadura de flexão em regime elástico, facto que pode ser facilmente comprovado através de um cálculo seccional em flexão simples.

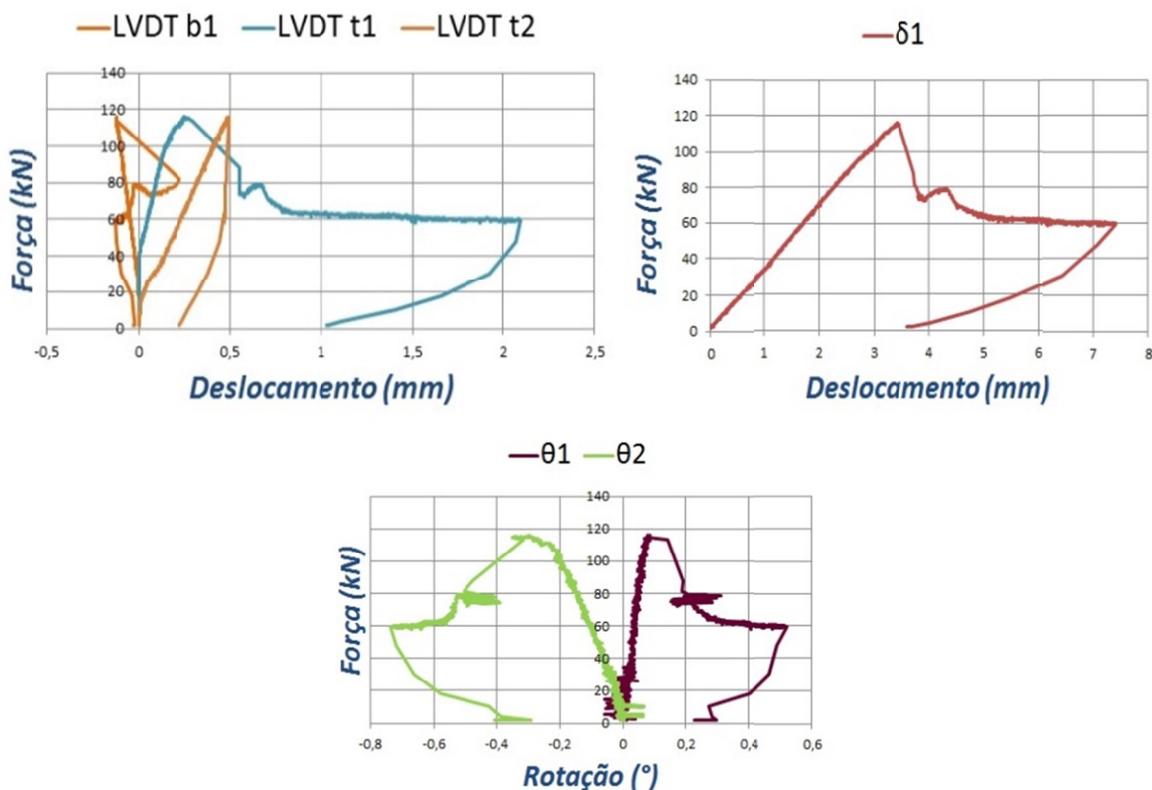


Fig. 69 Resultados do ensaio VDA4

5.3.5 ENSAIO 5 – TESTE DE COMPARAÇÃO

Por último realizou-se um ensaio com a finalidade de comparar os sistemas, este ensaio permitia ao utilizador impor um deslocamento, sendo este deslocamento detectado por dois LVDTs montados numa mesa de calibração de modo que ambos os valores lidos nos diferentes sistemas fossem compatíveis, a configuração deste ensaio pode ser verificada na Fig. 70.

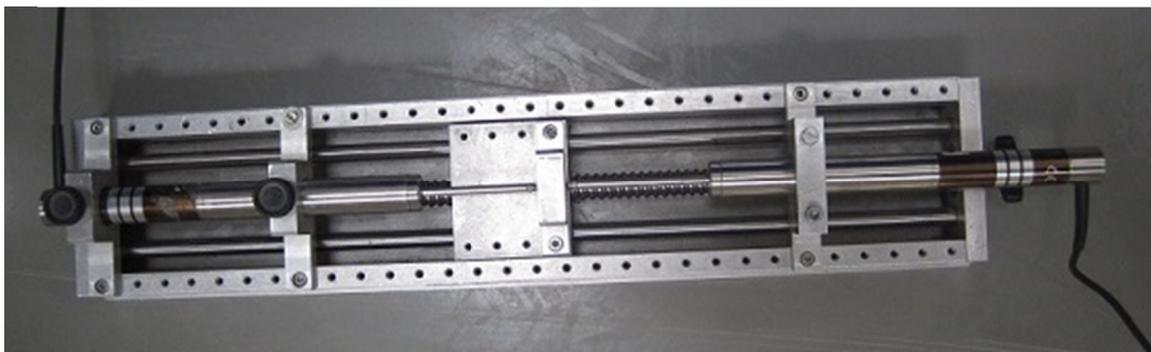


Fig. 70 Ensaio de comparação

5.3.5.1 TESTE DE COMPARAÇÃO A 10HZ

Inicialmente foi realizado um ensaio que adquiria os dados no sistema desenvolvido a uma taxa de 10Hz, de referir que o sistema baseado na utilização do *DataTaker™ DT800* está limitado à obtenção de dados a 1Hz (taxa que foi utilizada para o ensaio).

Com a realização deste ensaio obtiveram-se os dados representados na figura Fig. 71.

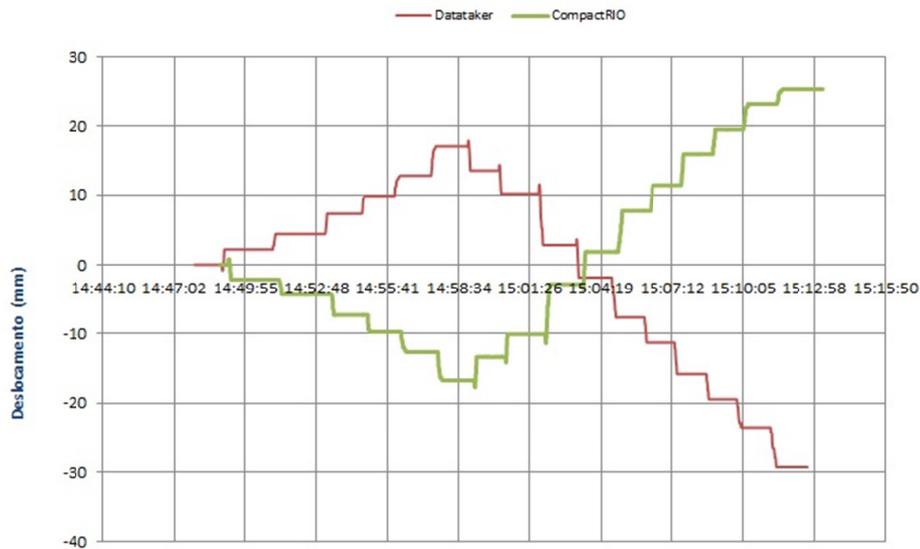


Fig. 71 Resultados do ensaio a 10Hz

Com os dados obtidos procedeu-se à inversão de um dos resultados obtidos tendo em vista a obtenção de dados coincidentes, sendo ainda necessário proceder ao ajuste horário pois como os dois sistemas são totalmente independentes não é possível obter a referência temporal coincidente para os dois ensaios (para tal contribui o facto de os relógios internos não estarem perfeitamente sincronizados e o início do ensaio é feito manualmente logo sujeito a diferenças no início atribuídas ao utilizador), com estas correções foi possível obter os resultados presentes na figura Fig. 72.

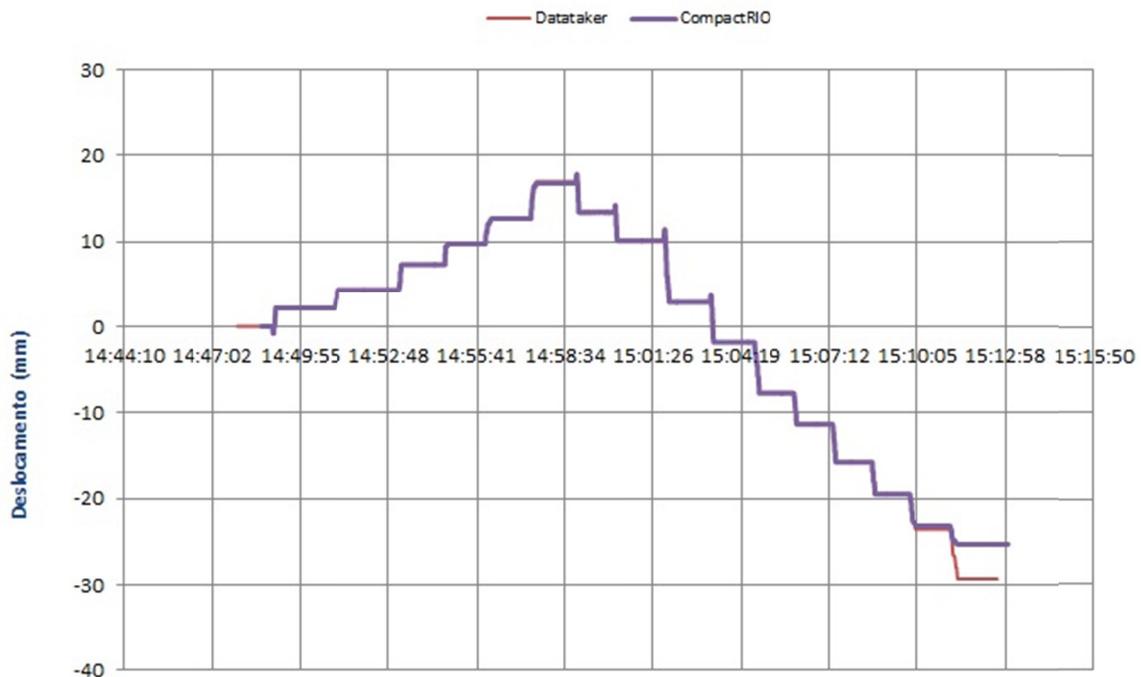


Fig. 72 Resultados corrigidos do ensaio a 10Hz

Após as correções referidas anteriormente é possível verificar que globalmente existe uma concordância dos resultados obtidos pelos dois sistemas.

Para que a verificação fosse mais precisa foi estudada apenas uma fracção dos dados obtidos, sendo que o gráfico contendo apenas estes dados pode ser visualizado na Fig. 73.

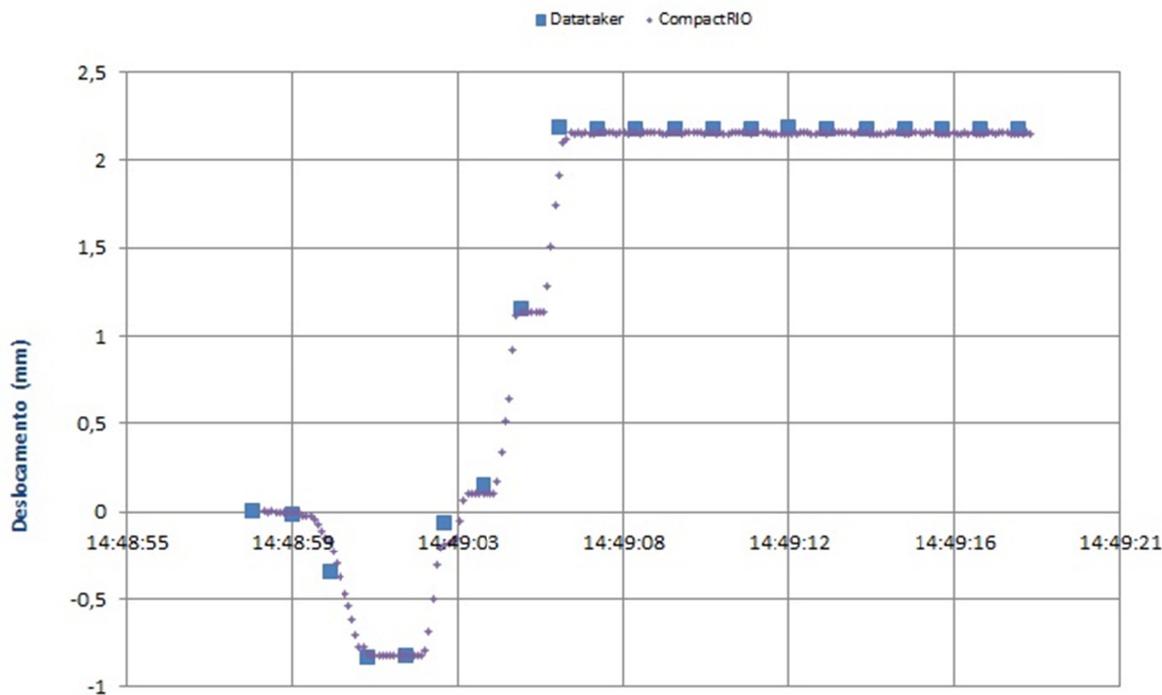


Fig. 73 Pormenor dos resultados corrigidos do ensaio a 10Hz

Pela análise do gráfico que não dispõe de linhas a unir os pontos, é possível verificar que ambos os sistemas fornecem dados correspondentes, no entanto é de salientar que uma vez que com o novo sistema é possível efetuar a aquisição dos dados com uma frequência muito superior é possível verificar ligeiras discrepâncias em pontos que não podem ser verificadas pelo sistema baseado no *DataTaker™ DT800*.

5.3.5.2 TESTE DE COMPARAÇÃO A 50HZ

De seguida foi realizado o mesmo teste sendo que apenas foi alterada a frequência com que os dados foram recolhidos pelo sistema, no entanto tal como já foi referido anteriormente não é possível utilizar o *DataTaker™ DT800* para obtenção de dados com uma frequência superior a 1Hz (na realidade é possível impor no programa uma taxa de 10Hz, no entanto esta não é totalmente respeitada, o sistema realiza o ensaio o mais rápido possível no entanto não respeita a imposição temporal efetuando a gravação dos dados sempre que possível).

Os dados obtidos foram tal como anteriormente usados para a criação de um gráfico que se encontra na Fig. 74.

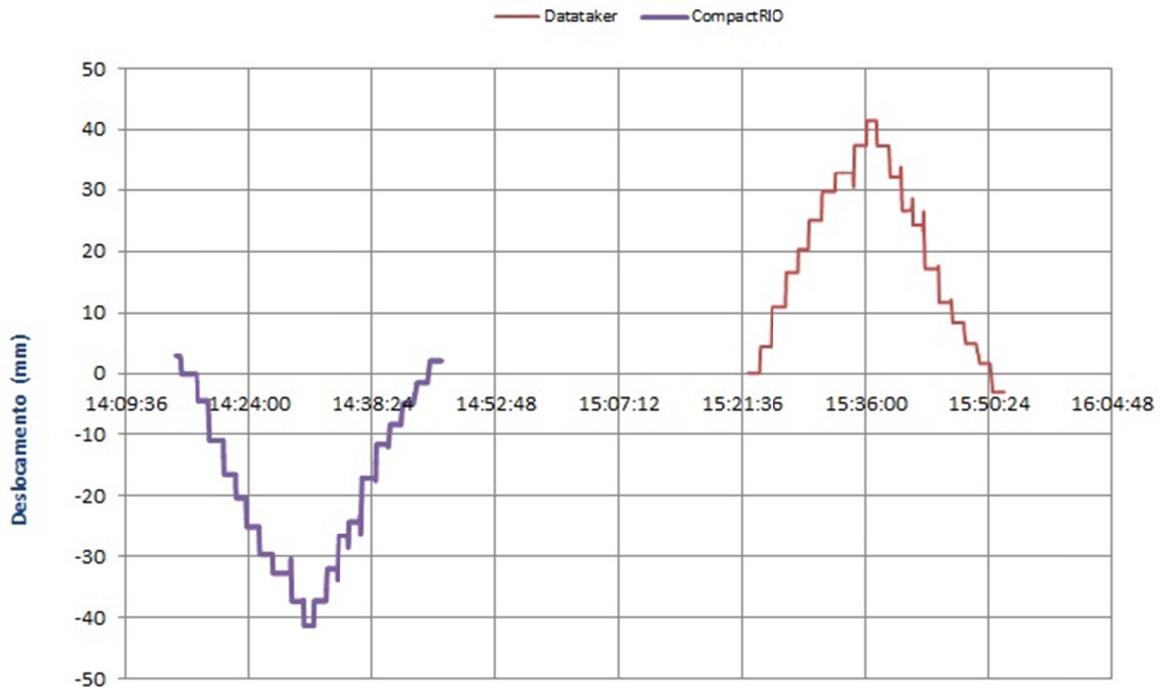


Fig. 74 Resultados do ensaio a 50Hz

Tal como para o anterior caso foi necessário proceder à inversão de um dos deslocamentos obtidos assim como ao ajuste temporal dos dados tendo-se obtido após estas correções o gráfico apresenta na Fig. 75.

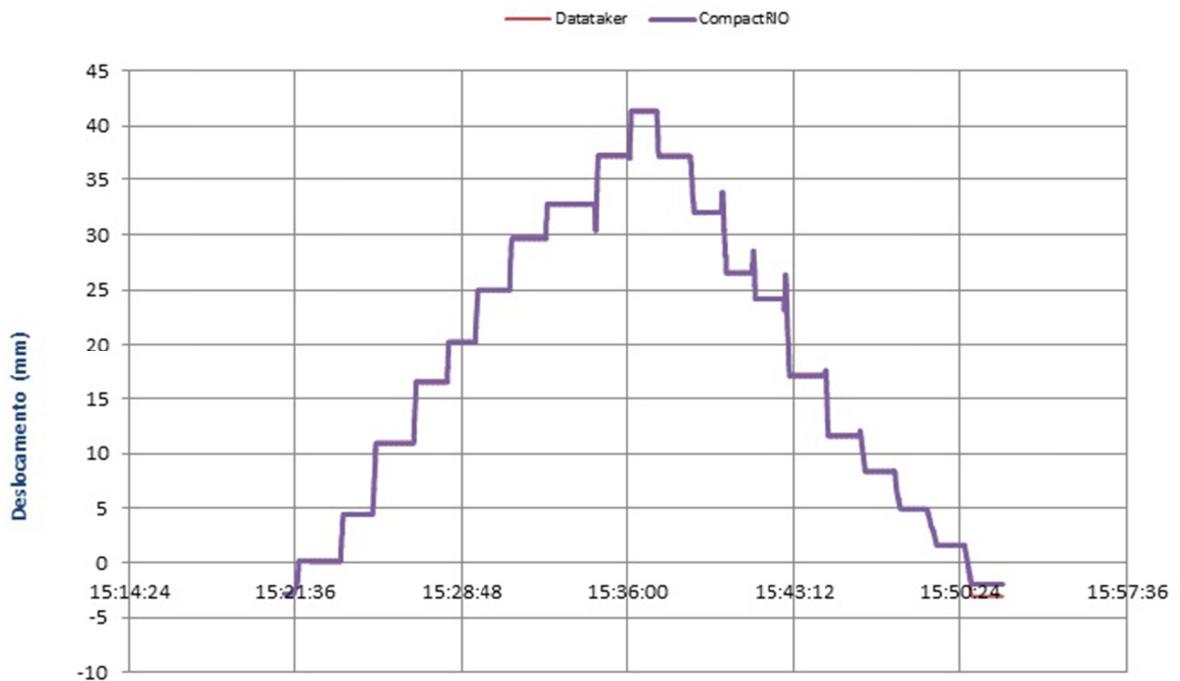


Fig. 75 Resultados corrigidos do ensaio a 50Hz

Tal como anteriormente podemos verificar que globalmente existe uma concordância dos dados obtidos pelos dois sistemas, ficando assim demonstrada a qualidade do novo sistema baseado na utilização do equipamento *National Instruments™ CompactRIO™*.

Por fim para verificar mais pormenorizadamente a concordância dos dados obtidos, foi realizado tal como para o anterior caso um gráfico contendo apenas uma fracção dos dados, tendo-se procedido à remoção das linhas que unem os pontos de modo a facilitar a sua análise, e com estes pressupostos foi obtido o gráfico que se encontra Fig. 76.

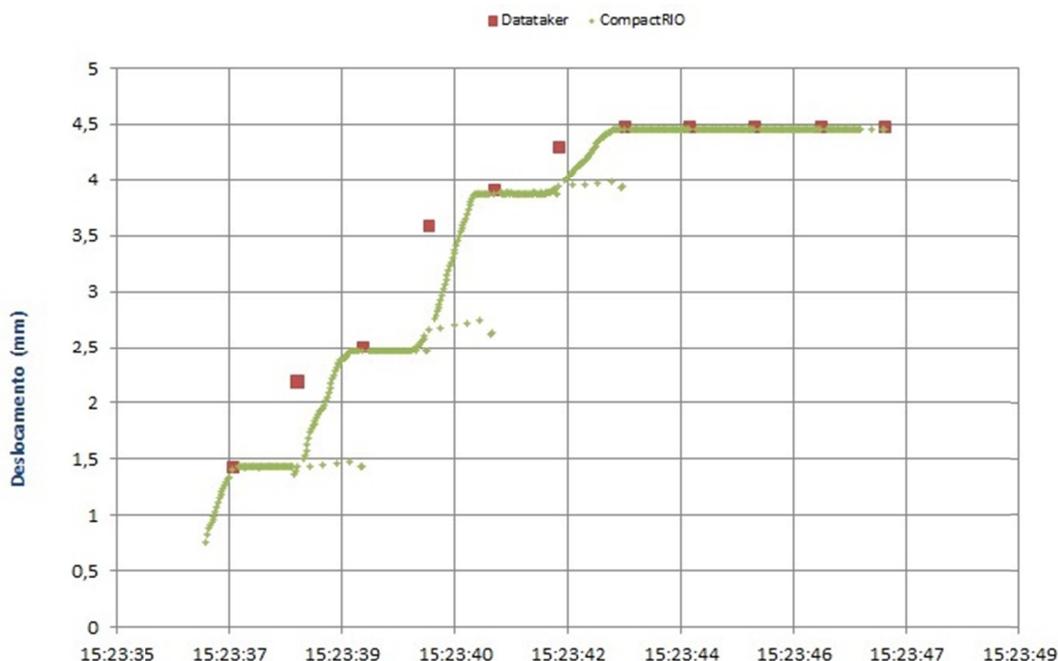


Fig. 76 Pormenor dos resultados corrigidos do ensaio a 50Hz

Neste exemplo é claramente visível a vantagem da utilização do sistema *National Instruments™ CompactRIO™*, sendo os dados recolhidos apresentam uma elevada concentração, permitindo observar alterações que não poderiam ser detectadas com a utilização do sistema anterior. Estas diferenças podem revelar-se extremamente importantes no caso de se tratar da observação de fenómenos que possam ter uma frequência de variação superior a 0,5Hz, pois a frequência com que é efectuada a aquisição dos dados deverá ser 2 vezes superior à frequência mais elevada do sinal, que é normalmente referenciada como frequência de *Nyquist*. Na prática no entanto é recomendado que o período de amostragem esteja compreendido entre 10 e 20 vezes a frequência máxima do sinal.

Este processo é conhecido como *Aliasing*, e impossibilita a correta interpretação dos dados obtidos, não correspondendo a interpretação realizada ao evento ocorrido, esta alteração pode ser facilmente verificada na Fig. 77.

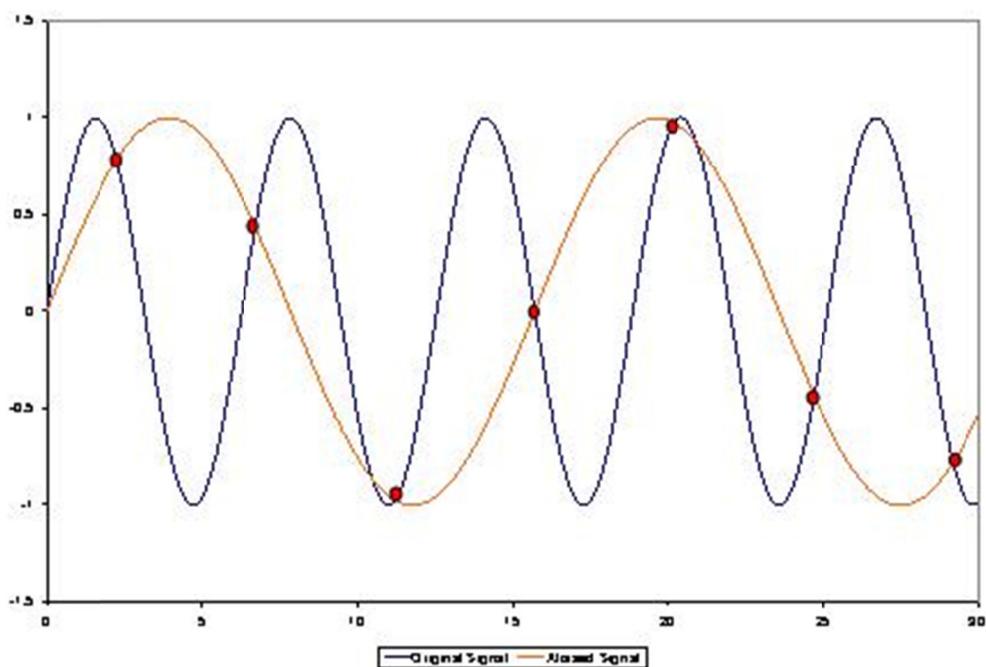


Fig. 77 Resultado de uma frequência de aquisição incorreta

5.4 COMPARAÇÃO DOS ENSAIOS REALIZADOS

Com a realização dos ensaios foi possível comprovar a eficácia do novo sistema de aquisição para substituir o utilizado atualmente, obtendo com este o mesmo tipo de resultados. No entanto para a realização de ensaios com especificações diferentes é mais indicada a utilização do novo sistema pois disponibiliza um grande número de melhorias em relação ao anterior.

6

Conclusões e Desenvolvimentos Futuros

6.1 ESTADO FINAL DO PROJETO

A realização deste projeto revelou-se extremamente aliciante, pois permitiu adquirir experiência e conhecimentos, além disso permitiu a realização de um novo sistema de monitorização baseado no desenvolvimento de duas aplicações totalmente funcionais; as aplicações *FPGA-RT* e *FPGA-Computador*.

De salientar a utilização da tecnologia baseada em programação de *FPGAs*, que representa uma das tecnologias com maior potencial para a realização de programas que visem a execução de tarefas a frequências elevadas, apesar de implementada esta funcionalidade não foi ainda utilizada, mas permite que o programa desenvolvido possa ser utilizado para a aquisição e controle de estruturas sujeitas a efeitos dinâmicos.

Outro aspecto importante foi a utilização de várias tecnologias para a realização do presente projeto, permitiu que durante a sua implementação fossem apreendidas algumas das vantagens e inconvenientes que lhe estão subjacentes.

6.2 TRABALHOS FUTUROS

O projeto desenvolvido cumpre todos os requisitos iniciais; no entanto, tal como foi constatado durante a sua realização, existem pequenas melhorias que só serão notadas no decurso de uma utilização mais intensiva.

Algumas das melhorias que futuramente podem implementadas, incluem a realização de um sistema de aquisição *FPGA-RT-Computador* que permita que a comunicação entre o *RT* e o *Computador* possa falhar (desligar o cabo de rede ou outra), deste modo teríamos uma aplicação muito mais robusta. Para tal haverá a necessidade de efetuar a gravação dos dados recolhidos em dois sítios; o primeiro seria na camada *RT* do programa e não estaria sujeita às ações do utilizador (no entanto apenas poderia gravar os dados na sua forma inicial), o outro seria na camada superior, neste caso já com as alterações requeridas pelo utilizador como sejam a escala e o *offset*.

O desenvolvimento de uma aplicação de comando remota (por exemplo com recurso a uma ligação via internet), por outro aparelho que poderá ser um *PDA* ou outro qualquer computador, não sendo exigido a estes que tenham o programa de aquisição instalado, seria também extremamente útil.

Uma das melhorias que deverá ser implementada o mais breve possível será a introdução da correção das leituras por meio do *Shunt Calibration*, o que permitirá um aumento da qualidade do sinal.

REFERÊNCIAS

- [1] https://zone.ni.com/reference/en-XX/help/371361J-01/lvconcepts/ni_psp/
- [2] https://web.fe.up.pt/~mleitao/TSC/Teoricas/TSC_3-RT.pdf
- [3] <https://en.wikipedia.org/wiki/USB>
- [4] <http://www.xilinx.com/training/fpga/fpga-field-programmable-gate-array.htm>
- [5] <http://www.ni.com/compactrio/whychoose/pt/>
- [6] http://www.tutorialspoint.com/computer_logical_organization/logic_gates.htm
- [7] <https://pt.wikipedia.org/wiki/Extens%C3%B4metro>
- [8] <http://www.vishaypg.com/docs/11064/tn514.pdf>
- [9] <https://zone.ni.com/reference/en-XX/help/371361J-01/lvconcepts/expressvis/>
- [10] <http://www.ni.com/white-paper/3331/en/>
- [11] https://en.wikipedia.org/wiki/Real-time_operating_system
- [12] https://en.wikipedia.org/wiki/Hardware_description_language
- [13] https://en.wikipedia.org/wiki/Semiconductor_intellectual_property_core
- [14] http://www.xilinx.com/ise/products/coregen_overview.pdf
- [15] <http://whatis.techtarget.com/definition/IRQ-interrupt-request>
- [16] <http://www.sjsu.edu/people/robert.chun/courses/cs159/s0/Day-8---Race-Semaphores.pdf>
- [17] <http://www.mccdaq.com/TechTips/TechTip-1.aspx>

Anexo A. PROCEDIMENTO PARA A INSTALAÇÃO DE TODO O SOFTWARE NECESSÁRIO

Para a correta realização do trabalho, é necessária a instalação de algum *software*.

Uma parte essencial do trabalho visa a utilização de uma aplicação construída em *LabVIEW™*. O *LabVIEW™* é um ambiente de programação gráfico que é utilizado por muitos engenheiros e cientistas para desenvolver sofisticados sistemas de medida, teste e controle, usando para tal uma linguagem muito intuitiva baseada em ícones gráficos e fios (semelhante a um gráfico de fluxo), além disso o *LabVIEW™* oferece uma fácil integração com uma vasta gama de dispositivos e ainda muitas bibliotecas de funções que permitem efetuar análises avançadas ou a visualização dos dados.

Além do pacote básico do *LabVIEW™*, é ainda necessário recorrer á utilização de vários *toolkits* adicionais. Estes permitem efetuar os subprogramas em *LabVIEW™* na sua vertente *RT* e *FPGA*.

A 1. PROCEDIMENTOS PRÉVIOS

Para realizar devidamente a instalação do *software*, existe a necessidade de previamente o obter.

Este objectivo pode ser atingido recorrendo a algumas transferências da internet.

Para obter o *LabVIEW™* não é possível efetuar a sua transferência da internet visto este necessitar de uma licença para a sua utilização, no presente caso a Faculdade de Engenharia dispõe da referida licença e os ficheiros de instalação encontra-se disponíveis através do servidor de *software* dessa instituição, disponível através do comando [\\software.fe.up.pt](https://software.fe.up.pt) que se encontra apenas disponível na rede interna da instituição (em alternativa pode ser acedido externamente após ligação *VPN*).

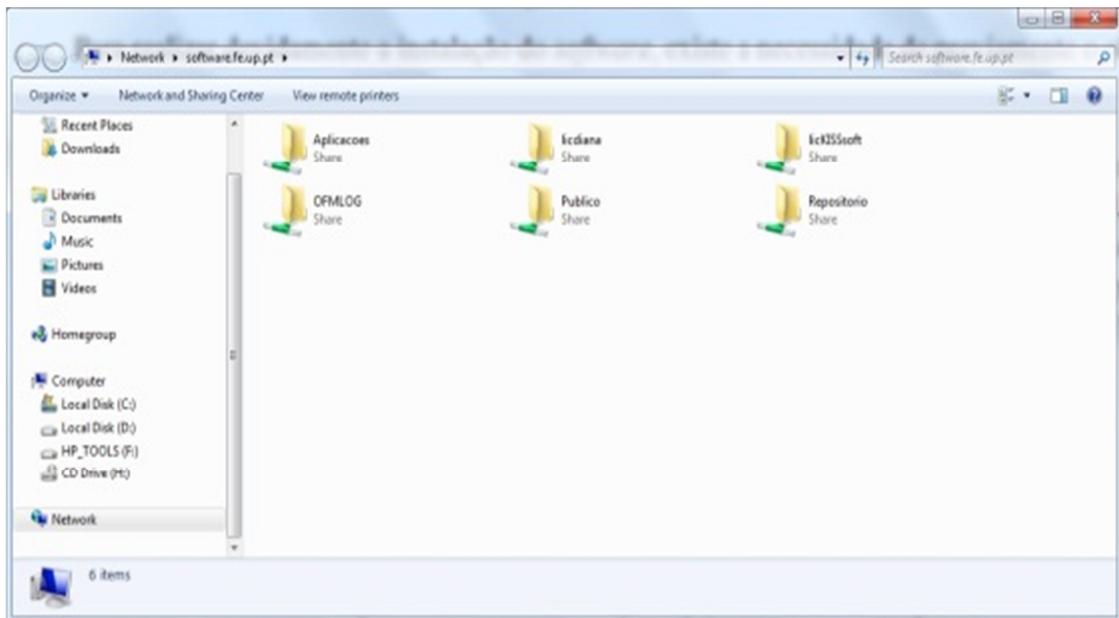


Fig. 78 Servidor de *software*

Para o desenvolvimento deste trabalho foi utilizada a versão 2014 SP1 do referido *software*.

Com base na escolha anteriormente realizada acerca da versão a utilizar e consultando a tabela de compatibilidades é possível escolher a versão dos *drivers CompactRIO™* a utilizar.

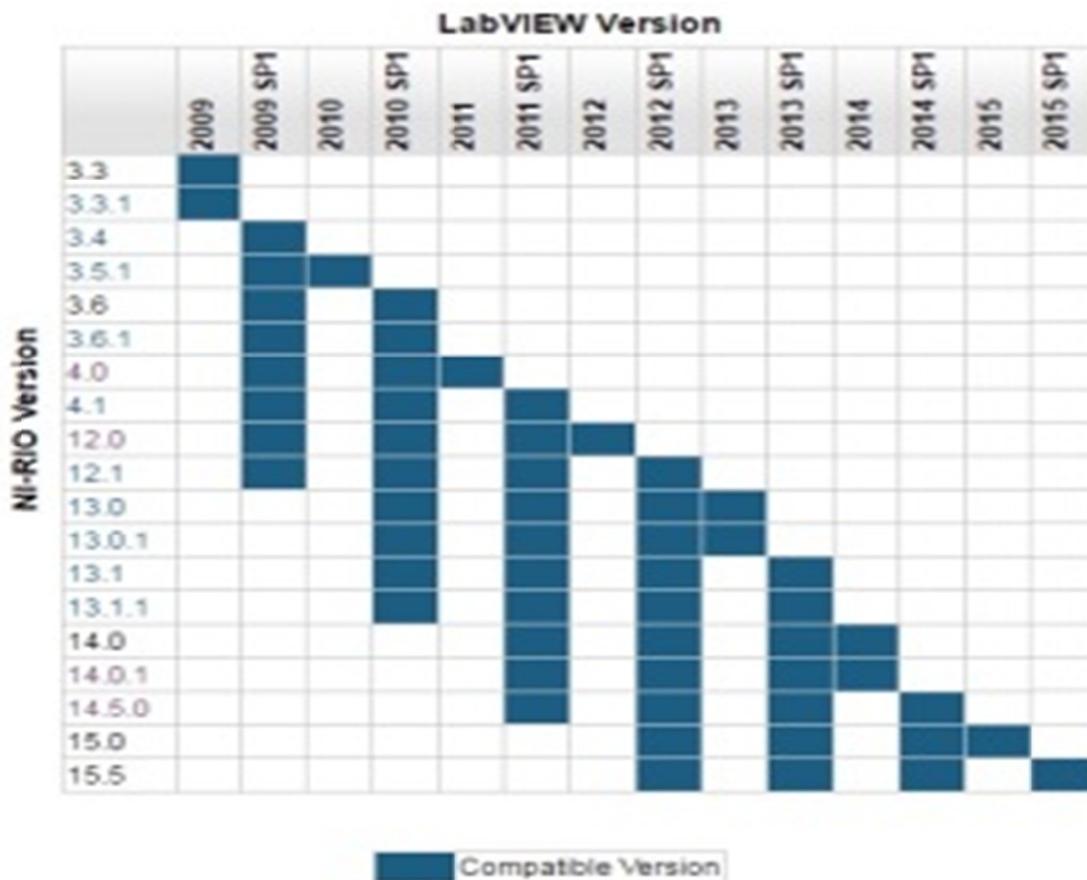


Fig. 79 Compatibilidade entre o LabVIEW e os drivers CompactRIO™

Uma vez que a versão do LabVIEW™ escolhida foi a 2014 SP1 é possível verificar a sua compatibilidade com a versão CompactRIO™ 15.0, este pode ser obtido através de uma transferência (<http://www.ni.com/download/ni-rio-15.0/5363/en/>).

A 2. INSTALAÇÃO DO LABVIEW™ (INCLUÍDO OS MÓDULOS RT E FPGA)

A primeira operação a realizar é a execução do ficheiro de instalação deste *software*, para tal existe a possibilidade de efetuar a transferência de todos os ficheiros deste *software* da máquina remota ([\\software.fe.up.pt](http://software.fe.up.pt)) ou em alternativa efetuar a instalação diretamente desta localização, tendo em atenção, que se efetuar a instalação diretamente da máquina remota, não poderá haver falhas de comunicação durante este período, no entanto, a instalação deverá ser mais expedita do que no outro caso, pois neste último caso será necessário transferir todo conjunto de aplicações que constitui este *software*, para a máquina local, mesmo que não seja necessária a instalação completa do *software*.

A 3. CONFIGURAÇÃO DO LABVIEW™

Depois de instalado o *software* e de modo que o passo seguinte funcione corretamente é necessário alterar as configurações IPv4 da placa de rede (no presente caso a placa de ligação é a placa wireless, no entanto o procedimento é idêntico no caso de se tratar da placa de rede com fio).

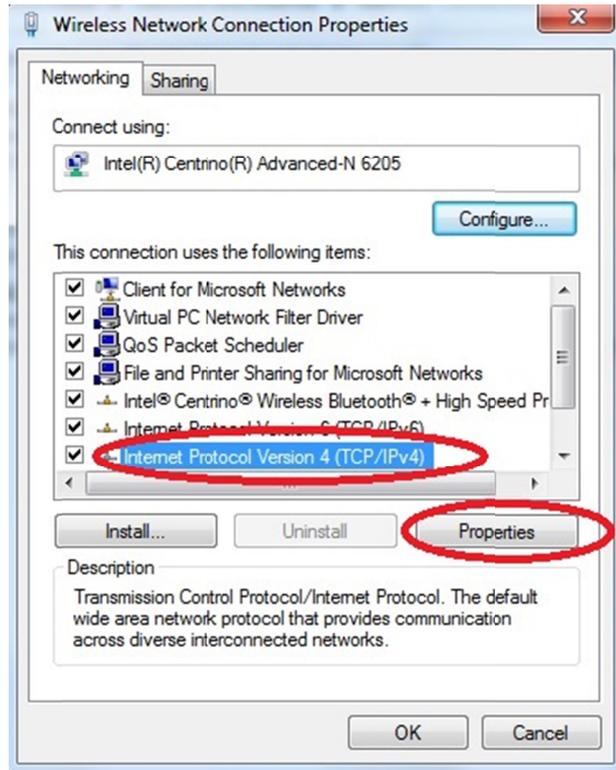


Fig. 80 Alteração das configurações IPv4 da rede

No ecrã seguinte é necessário escolher o botão para efetuar alterações avançadas.

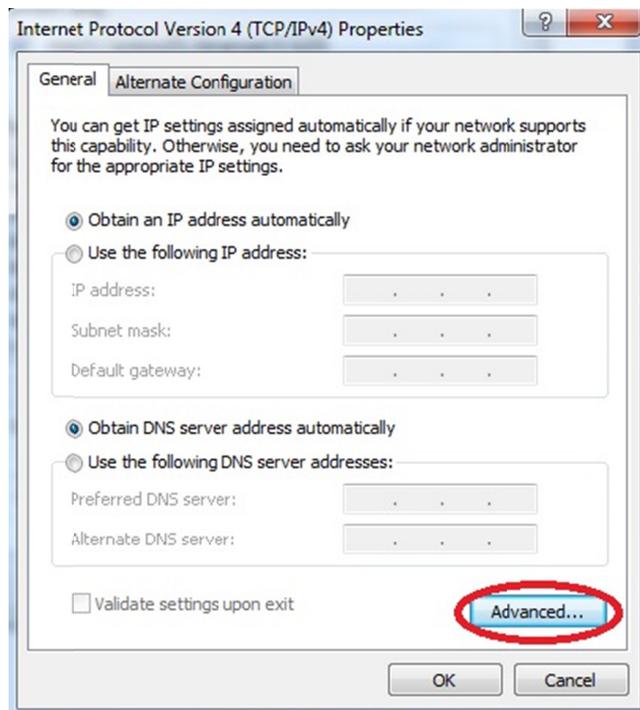


Fig. 81 Alteração das configurações avançadas IPV4 da rede

Por fim deveremos alterar as configurações do sufixo DNS para esta ligação.

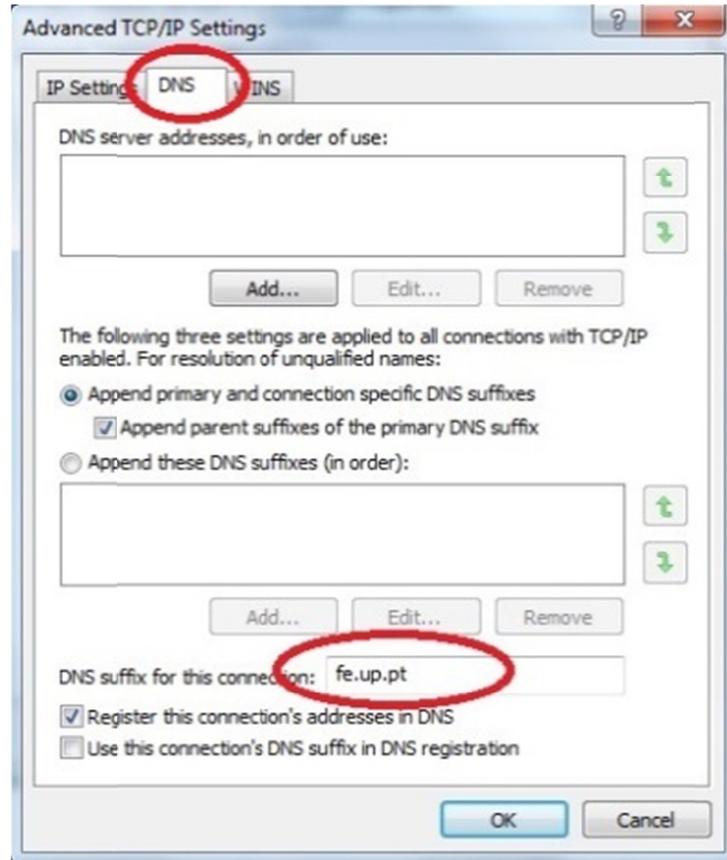


Fig. 82 Alteração do sufixo DNS da ligação

Seguidamente é necessário realizar algumas alterações de modo a que este passe a utilizar as licenças disponibilizadas pela instituição, para tal é necessário executar o *software* “NI License manager” que é automaticamente instalado aquando da instalação do *software* LabVIEW™, e neste efetuar a alteração do nome do servidor de licenças.

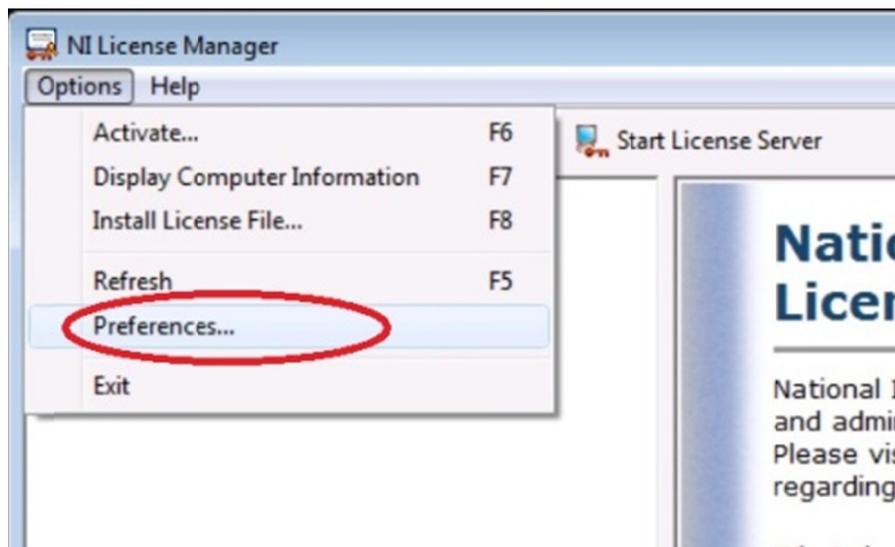


Fig. 83 Alteração das opções do programa

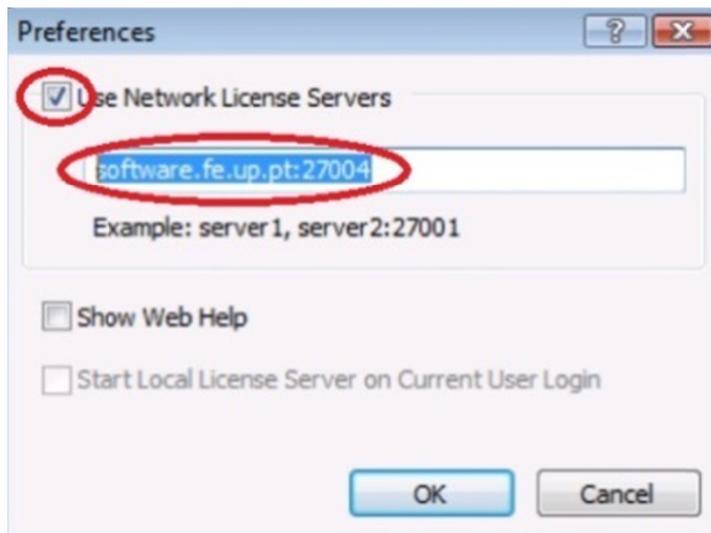


Fig. 84 Alteração do servidor de licenças

A 4. INSTALAÇÃO DOS *DRIVERS* PARA O DISPOSITIVO *COMPACTRIO*TM

Após ter completado a instalação anteriormente referida, é necessário proceder à instalação dos *drivers* para o dispositivo *CompactRIO*TM, para tal com recurso ao ficheiro que foi anteriormente referido é possível descompactar o seu conteúdo para um diretório provisório, após o que é possível executar o ficheiro de instalação aí contido.

A 5. CONFIGURAÇÃO INICIAL DO DISPOSITIVO *COMPACTRIO*TM

Tendo concluído as instalações anteriores é possível aceder ao dispositivo *CompactRIO*TM.

Para tal é necessário proceder a algumas configurações de rede do computador que irá comunicar com o dispositivo.

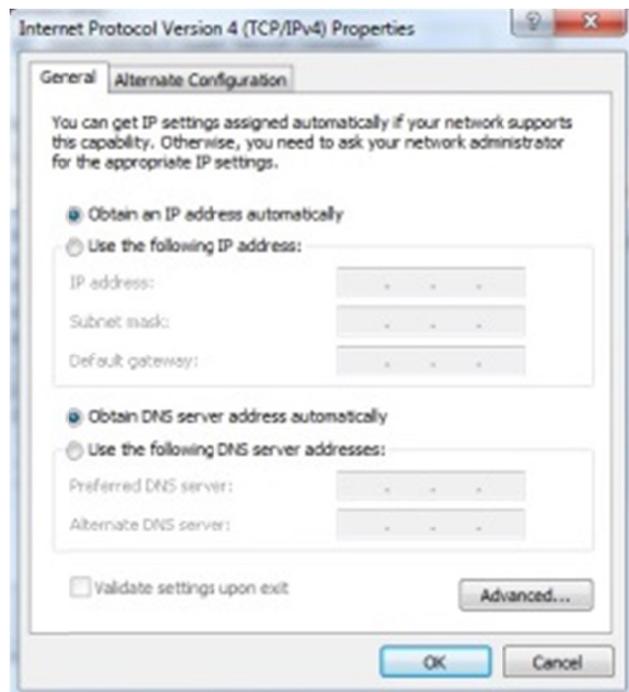


Fig. 85 Configurações TCP/IP inicial

Após a configuração do endereço *TCP/IP* é possível aceder ao dispositivo, no entanto com esta configuração de rede este está apenas disponível para configuração.

Acedendo ao *MAX* é possível verificar o estado inicial do *CompactRIO™*.

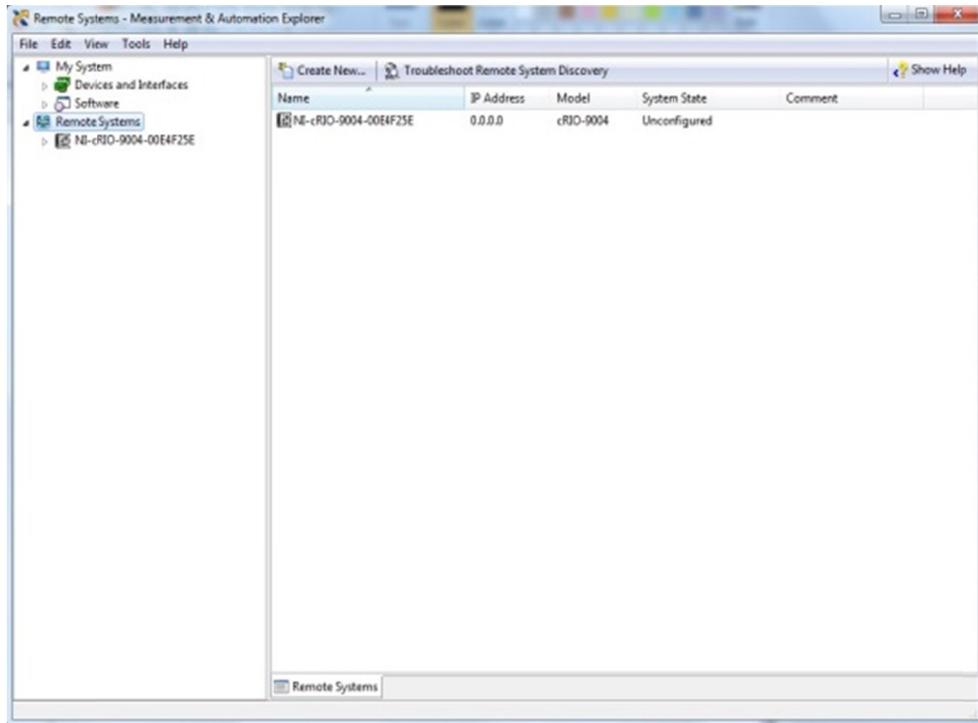


Fig. 86 Acesso inicial ao MAX

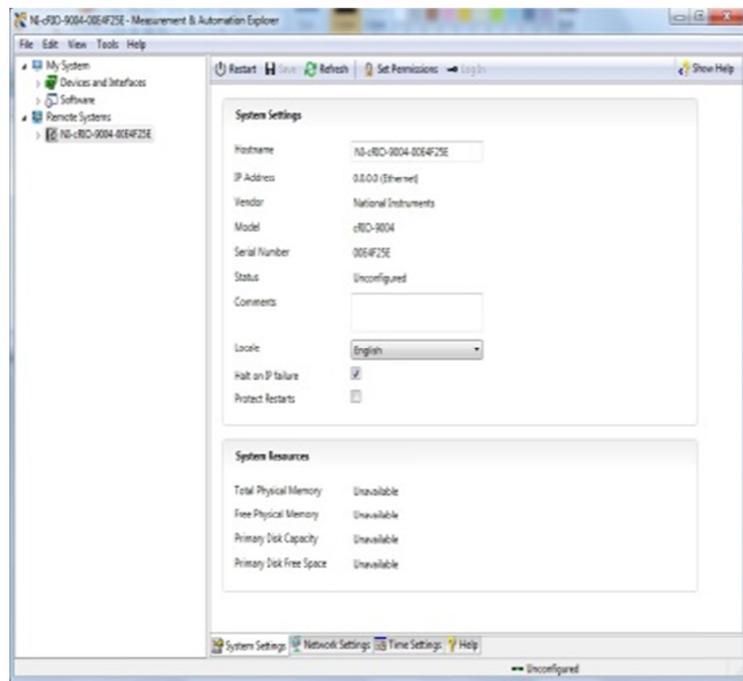


Fig. 87 Configuração inicial do sistema

Neste é possível verificar que o nome por defeito do dispositivo é “NI-cRIO-9004-00E4F25E” (este é constituído pelo modelo do dispositivo NI-cRIO-9004 e o numero de série deste 00E4F25E), o seu estado inicial é “Unconfigured” e que o endereço IP neste estado é “0.0.0.0”, de modo a alterar este estado é necessário proceder a algumas alterações.

Para tal foi alterado o nome do dispositivo para “LabestFEUP1”, configurou-se o seu IP na sua versão 4 como “169.254.215.59” e a mascara de rede como “255.255.0.0”, foi ainda necessário alterar a posição de um dos interruptores disponíveis no dispositivo (no esquema os interruptores estão assinalados com o numero 3, e o interruptor a alterar é o primeiro que têm como descrição “Safe Mode”), todos estes dados serão utilizados posteriormente.

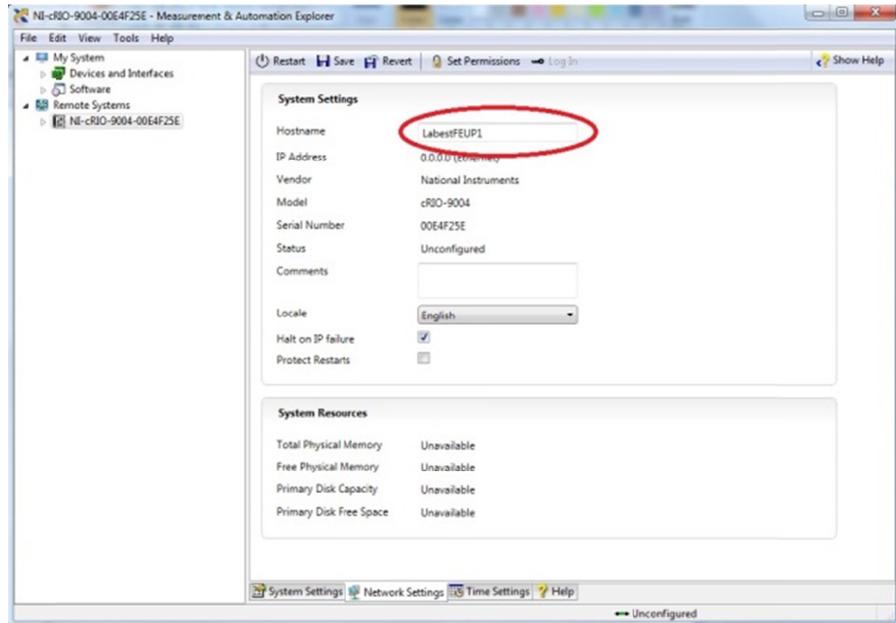


Fig. 88 Alteração do nome do sistema

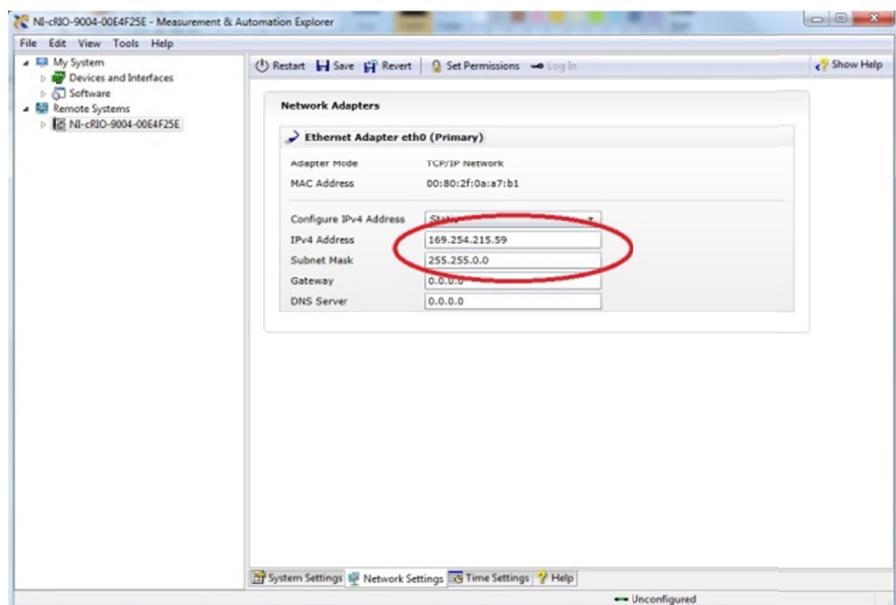


Fig. 89 Alteração do endereço IP do sistema

A configuração do endereço *IP* do computador têm que ter em atenção os dados anteriormente introduzidos no *CompactRIO*, deste modo o endereço *IP* poderá ser “169.254.215.1” (ou outro similar desde que se encontre na mesma rede do dispositivo), a mascara de rede deverá ser a mesma que foi utilizada anteriormente (neste caso “255.255.0.0”), para que estas configurações sejam utilizadas é necessário reiniciar a placa de rede.

Quando todas estas alterações se encontrarem realizadas é possível aceder novamente ao *MAX* de modo a verificar o estado do sistema.

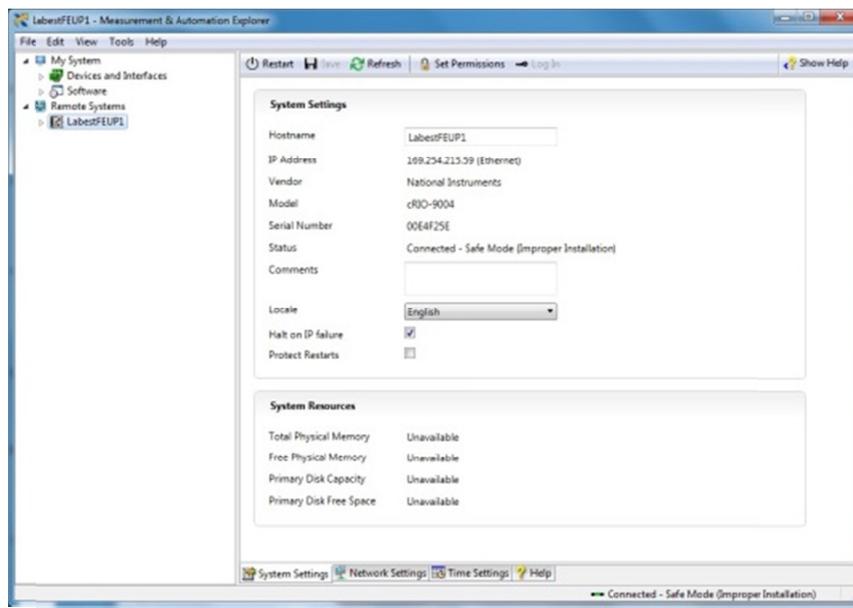


Fig. 92 Verificação da configuração do sistema

De salientar que ainda não é possível aceder ao sistema para adquirir dados, pois o estado da instalação ainda não está correto ou terminado (o estado é “*Connected – Safe Mode (Improper Instalation)*”), para este estado também contribui a alteração que foi feita do interruptor “*Safe Mode*”, mas esta é essencial para a etapa seguinte.

A 7. INSTALAÇÃO DO SOFTWARE NO DISPOSITIVO *COMPACTRIO*TM

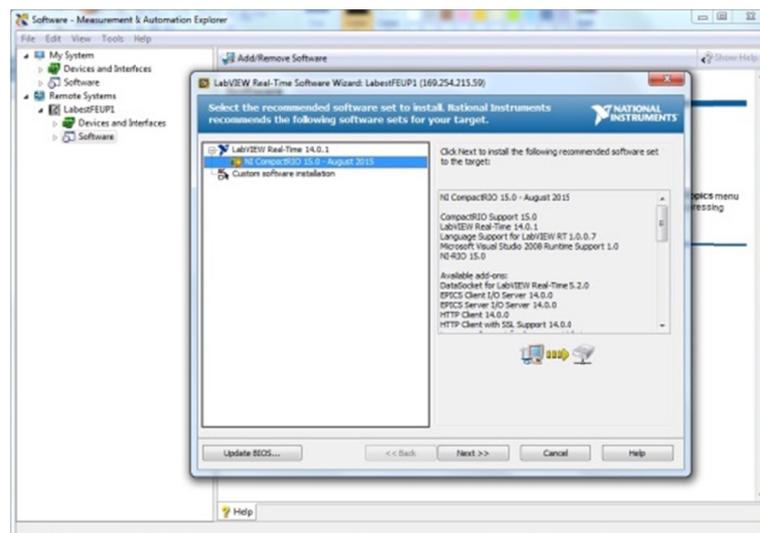


Fig. 93 Instalação do software no sistema

Para a realização desta etapa é essencial que anteriormente o interruptor “Safe Mode” esteja na posição de ligado.

A sua realização é efectuada através do MAX.

Atualmente o software recomendado é “NI CompactRIO 15.0 – August 2015”, sendo que este se trata da versão mais atualizada deste.

Para a realização deste trabalho não é necessário qualquer software adicional.

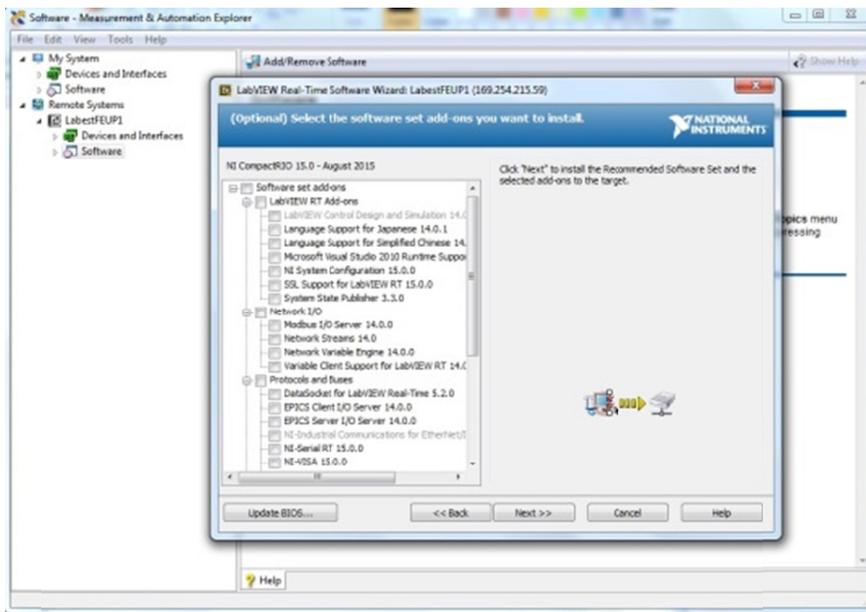


Fig. 94 Escolha de software adicional

Após a realização de todas estas etapas é ainda necessário alterar novamente o valor do interruptor “Safe Mode”, de modo que este se encontre na posição de desligado, premindo o botão indicado no esquema com o número 4, todo o sistema é reiniciado, sendo que o MAX deverá apresentar o seguinte resultado.

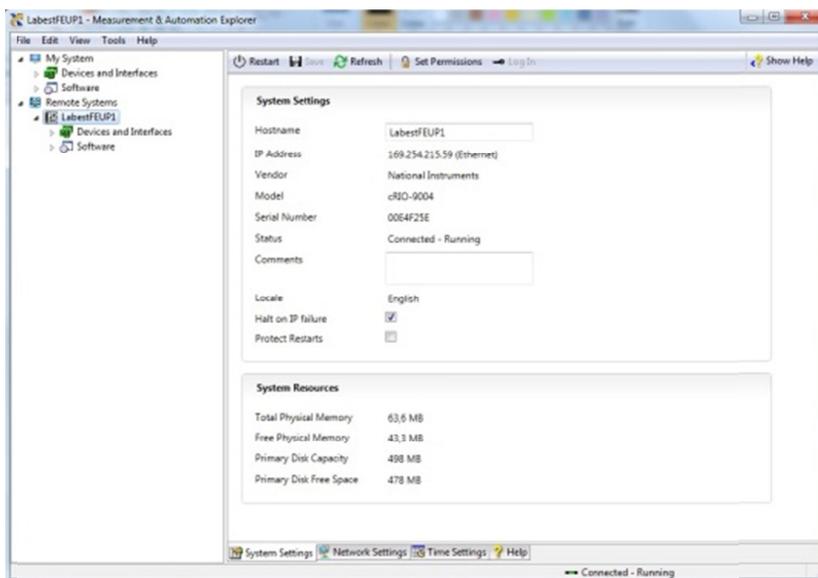


Fig. 95 Verificação do sistema

O factor mais importante é que o valor de *Status* seja “*Connected - Running*”.

Neste momento já é possível efetuar as operações de leitura e escrita nos módulos presentes no sistema.

A 8. CONFIGURAÇÃO DA COMPILAÇÃO

Uma vez que todos os sistemas da série *NI cRIO910x*, apenas suportam código *FPGA* compilado com o *software Xilinx Compilation Tools 10.1*, que não é instalado por defeito no *LabVIEW™* na versão utilizada, recorreu-se à compilação remota do *software* (este método pode eventualmente oferecer vantagens no tempo despendido para compilar o código).

O serviço *LabVIEW™ FPGA Compile Cloud Service* disponibilizado pela *National Instruments* encontra-se apenas acessível no caso de possuir um contrato de *SSP*. Uma vez a compilação *FPGA* é efectuada num servidor de alto desempenho, o seu tempo é reduzido. Além disso permite efetuar várias compilações em paralelo.

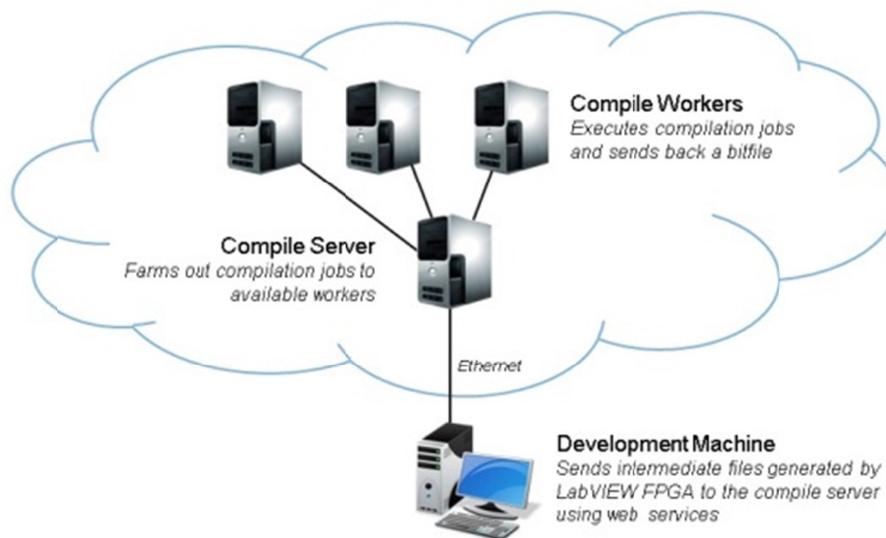


Fig. 96 Compilação na nuvem

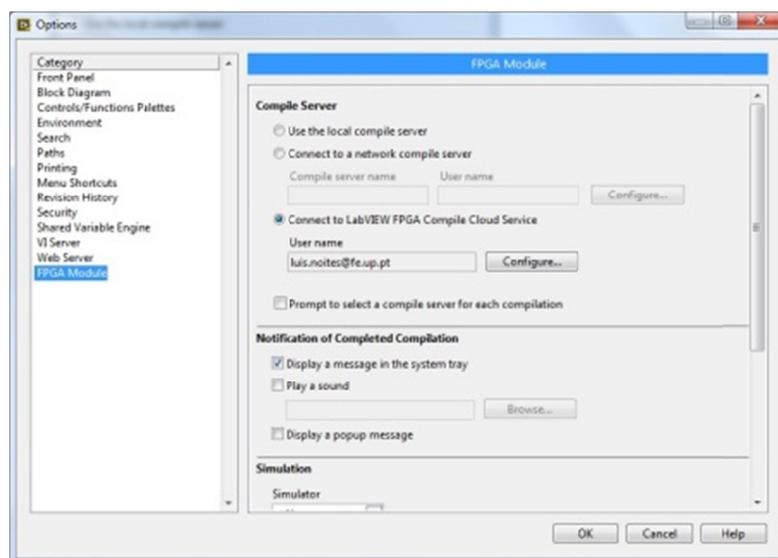


Fig. 97 Configuração da compilação na nuvem

Para poder usufruir deste serviço é necessário que dirigir-se à página www.ni.com/trycompilecloud onde é possível criar uma conta para este serviço. Após a criação de uma conta associada a este serviço, é possível configurar o *LabVIEW*TM, de modo que todas as compilações que houver necessidade de efetuar possam ser efectuadas com recurso a este.

Para finalizar o processo é necessário premir o botão para configurar, após o que é apresentado um ecrã onde o utilizador poderá introduzir a *password* e testar a ligação para se certificar que todo o processo foi em executado.



Fig. 98 *Password* da compilação na nuvem e teste