

## 6 Sistema Experimental e Resultados

### 6.1.Sistema Experimental

A metodologia proposta é aplicada a uma máquina de ensaios de fadiga. A máquina de ensaios usada é o modelo 8501 da INSTRON, a qual se encontra no Laboratório de Fadiga da PUC-RIO. Ela possui uma servo-válvula MOOG modelo D562, que tem como entrada de controle um sinal de corrente de - 40mA a +40mA, além de um pistão com capacidade de 100 kN, um LVDT que mede o deslocamento do atuador, e uma célula de carga de capacidade de 100 kN. Adicionalmente, na medida das deformações, são usados clip gages da marca INSTRON. O fluido hidráulico é fornecido por uma bomba hidráulica a uma pressão de 190 bar. Possui um controlador que chega a atingir frequências da ordem de 50 Hz para um corpo de prova de aço e um carregamento de amplitude de 25 kN [4].

Para o desenvolvimento do controle por aprendizado é preciso utilizar um sistema computacional, vide Figura 6.2, capaz de executar controle em tempo real. Isso é possível usando um produto da National Instrument, o CompactRIO, o qual pode atingir frequências de trabalho da ordem de kHz, juntamente com seus módulos de saídas analógicas, entradas analógicas e o módulo excitador de extensômetros. O esquema de conexões do sistema de controle apresenta-se na Figura 6.1.

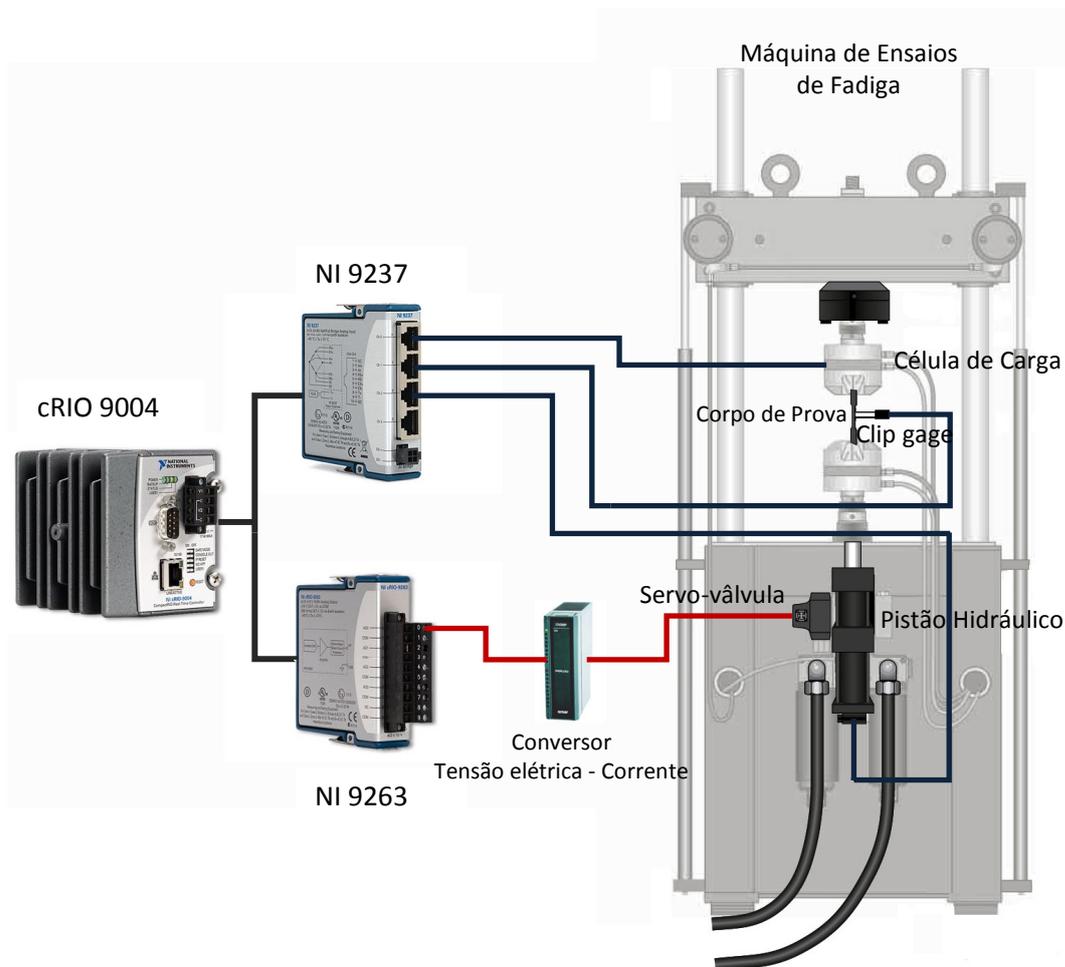


Figura 6.1. Configuração e conexões do Sistema de Controle.

### 6.1.1. CompactRIO

O CompactRIO da National Instruments é um controlador avançado com um sistema de aquisição de dados projetado para aplicações que requerem desempenho elevado e resposta em tempo real com alta confiabilidade. Ele combina um processador em tempo real integrado, um chip FPGA de alto desempenho e módulos de entrada/saída. O FPGA é conectado ao Processador em Tempo Real via um bus PCI de alta velocidade, e cada módulo de entrada/saída é conectado diretamente ao FPGA. O CompactRIO usado no sistema de controle é o CRIO 9004, vide Fig. 6.2 e as principais características são apresentadas na Tabela 6.1.



Figura 6.2. CRIO 9004.

Tabela 6.1. Características do cRIO 9004

<b>Características do cRIO 9004</b>	
<b>REDE</b>	
Interface de Rede	10BaseT e 100BaseTX Ethernet
Compatibilidade	IEEE 803
Taxas de comunicação	10 Mbps, 100 Mbps auto-negociável.
<b>MEMORIA</b>	
No volátil	512 MB
DRAM	64 MB

O CompactRIO tem um processador incorporado MPC5200 de 195 MHz que executa deterministicamente as aplicações desenvolvidas no software LabVIEW Real Time. O LabVIEW tem funções internas para transferir dados entre o FPGA e o processador em tempo real dentro do sistema do CompactRIO.

O FPGA (*Field Programmable Gate Arrays*) está composto por chips de silício, com entradas lógicas que não estão conectadas inicialmente e que depois são configuradas e re-configuradas entre elas para as diferentes aplicações que se estejam implementando (vide Figura 6.3). Aplicações com algoritmos onde se precisa resposta em tempo real, sincronização, precisão, execução de tarefas simultâneas de forma paralela são desenvolvidas no FPGA. O paralelismo consegue-se devido ao fato que o módulo LabVIEW FPGA executa sua lógica no

hardware, tendo o programa a vantagem de processar as tarefas tais como aplicações de controle, leitura e gravação de saídas analógicas e/ou digitais em tempo real e de forma determinística.

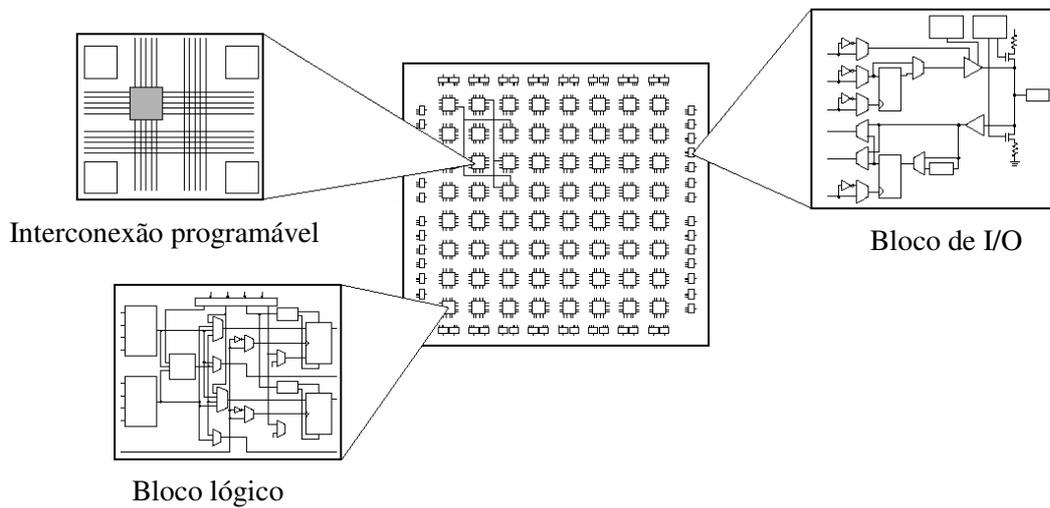


Figura 6.3 Tarefas que podem ser desenvolvidas no FPGA.

### 6.1.2. Módulos de Entrada e Saída

Para o controle da máquina servo-hidráulica, trabalhou-se com módulos de entradas e saídas analógicas e com um módulo de excitação de extensômetros.

O módulo de saídas analógicas NI cRIO 9263 é usado para gerar tensões elétricas entre -10 V e +10 V. Essas saídas analógicas são convertidas em saídas de corrente de -40 mA e + 40 mA através de um conversor tensão elétrica para corrente, desenvolvido neste trabalho pelo autor (anexo A).



Figura 6.4. NI cRIO 9263.

Tabela 6.2. Características do NI cRIO 9263.

<b>Características NI 9263</b>	
Número de canais	8
Resolução do ADC	12 bits
Tipo de ADC	Registro de Aproximação Sucessiva
Faixa de entrada	$\pm 10$ V
Largura de banda de entrada (-3 dB)	690 kHz min
Impedância de entrada	
Resistência	1 M $\Omega$
Capacitância	5 pF
Ruído de entrada	
RMS	0.7 LSBrms
Pico a pico	5 LSB

O módulo excitador de extensômetros NI cRIO 9237 é utilizado para excitar e medir o valor da força aplicada ao corpo de prova através de uma célula de carga, e o valor da deformação medida pelo clip gage. Algumas características deste módulo se encontram na Tabela 6.3.

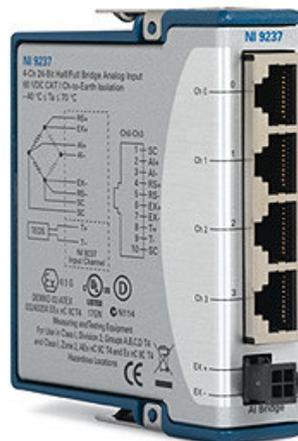


Figura 6.5. NI cRIO 9237.

Tabela 6.3. Características do NI cRIO 9237.

<b>Características NI 9237</b>	
Número de Canais	4
Ponte completa	
Total e media	Interno
Quarto	Externo
Resolução do ADC	24 bits
Tipo de ADC	Delta-sigma (Com pré - filtrado análogo)
Modo de Amostragem	Simultâneo
Velocidades de Data ( $f_s$ )	$\frac{50.000 \text{ kS/s}}{n}$ $n = 1, 2, \dots 31$ .
Relógio Base Principal (interno)	
Frequência	12.8 MHz
Exatidão	$\pm 100$ ppm Maximo
Faixa da escala total nominal	$\pm 25$ mV/V
Cruzamento	
1 kHz	110 dB
10 kHz	100 dB
Calibração shunt	
Resistência	100 k $\Omega$
Exatidão da resistência	
25°C	$\pm 110$ $\Omega$
-40 a 70°C	$\pm 200$ $\Omega$
Excitação	
Voltagem interna	2.5 V, 3.3 V, 5.0 V, 10.0 V
Potência Interna	150 mW Maximo
Voltagem Externa	2 V a 10 V



Figura 6.6 Máquina de Ensaio INSTRON 8501.

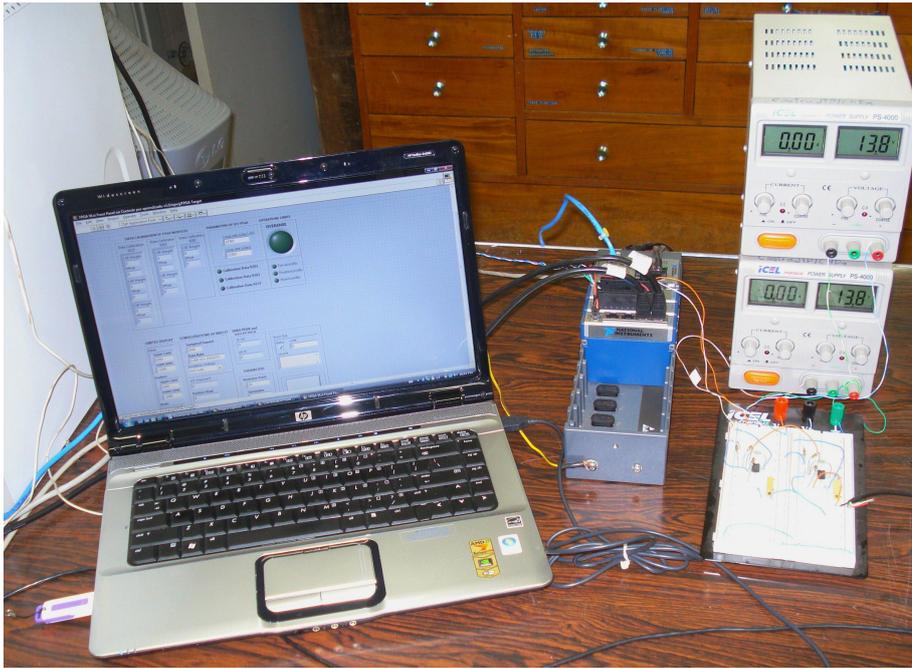


Figura 6.7 Sistema Computacional (computador CompactRio e Conversor de tensão elétrica em corrente)

## 6.2. Calibragem dos Transdutores

### 6.2.1. Calibragem da célula de carga

Para a calibragem da célula de carga usou-se o método de montar duas células de carga em serie, tendo em conta que o carregamento aplicado a elas seria o mesmo neste caso. Uma delas serve como leitor de força e a outra célula de carga é lida pelo NI cRIO 9237.

Um fator de conversão é aplicado ao valor medido pelo NI cRIO 9237, de modo que multiplicado por esse fator, o valor obtido seja similar ao valor lido pela outra célula. Com este método de calibração, obtiveram-se erros menores que 3%, os quais podem ser considerados admissíveis para medições de força.

### 6.2.2. Calibragem do clip gage

A calibragem do clip gage foi feita com o calibrador de clip gage da marca Boeckeler com uma faixa nominal de 25 mm, o qual tem uma resolução de 1.0 micrômetro, obtiveram-se erros de medição no máximo 1,2 %, com uma taxa de amostragem de 5 kHz, e com um número de amostras de 1024 por canal.

### 6.3. Software desenvolvido em LabVIEW

Para o controle por aprendizado da Máquina Servo-Hidráulica de ensaios de fadiga, desenvolveu-se um software em três equipamentos distintos, no computador, no Real Time e no FPGA do CompactRIO.

A maior parte do software foi feito no FPGA o que inclui a leitura de dados das entradas analógicas, do excitador de Strain Gages e a parte de controle, para ter a certeza de uma resposta em tempo real, tendo como referencia experimental que o FPGA pode atingir a frequências de hasta 55 kHz para dados analógicos e de hasta alguns MHz para dados digitais. A parte de leitura/escritura da tabela de aprendizado é feita no Real Time, e finalmente a parte de configuração e apresentação de resultados no Computador.

### 6.4. Resultados Experimentais

Fizeram-se ensaios nas amplitudes de 10 kN, 20 kN, 30 kN e 40 kN, todos eles utilizando  $\pm 20$ mA na servo-válvula. Esta servo-válvula é capaz de trabalhar a  $\pm 40$ mA, no entanto uma limitação na frequência do controlador CompactRIO gera problemas de *overshoot* para um valor tão alto. O gráfico seguinte mostra um teste de controle por aprendizado para um ciclo de carregamentos de 40 kN de tração e 40 kN de compressão, em um corpo de prova  $\epsilon N$  feito de aço com 12mm de diâmetro. O armazenamento das leituras dos sensores precisou ser feita externamente ao CompactRIO, uma vez que essa funcionalidade ainda não havia sido nele implementada, apesar de factível. O sistema de medição externo registrou um *overshoot* máximo de 7% em regime após o término do aprendizado. Este *overshoot* é provavelmente causado pela limitação de frequência do CompactRIO, que ainda ocorre mesmo limitando a corrente a  $\pm 20$ mA.

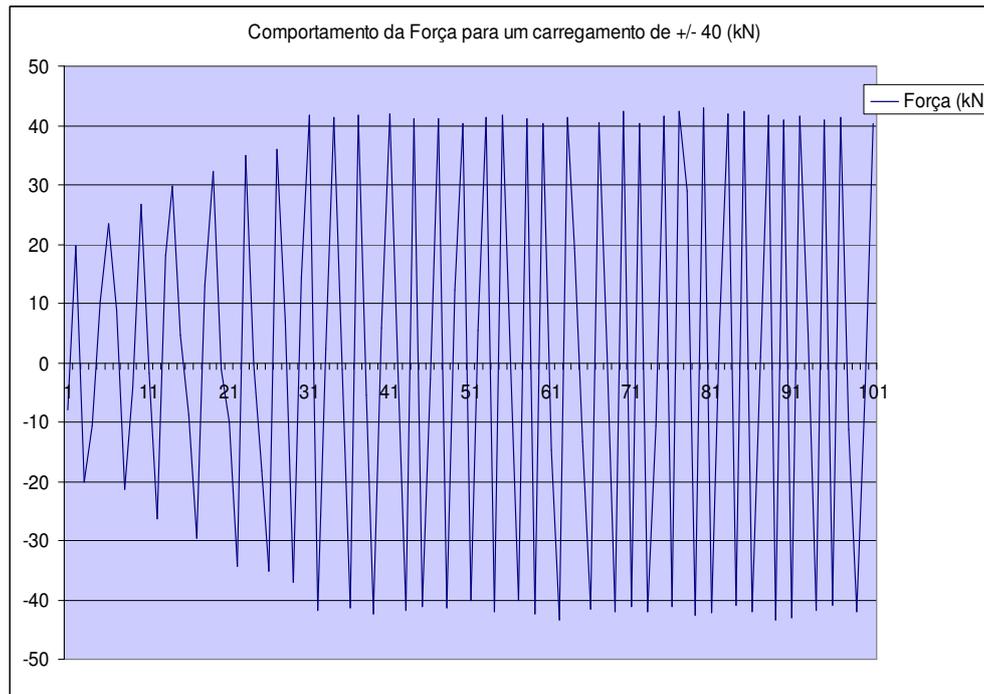


Figura 6.8 Comportamento da máquina servo-hidráulica para um ensaio de fadiga sob amplitude constante com controle por aprendizado.

Como discutido acima, na versão atual do programa de controle implementado no CompactRIO notou-se uma limitação na frequência do controlador. Esta limitação, como esperado pela teoria de controle digital, instabiliza o sistema na presença de ganhos muito elevados. Por isso, os testes do controle por aprendizado resultaram em *overshoot*. Este problema foi reduzido (mas ainda não totalmente eliminado) limitando a corrente de trabalho da servo-válvula a  $\pm 20\text{mA}$ , o que equivale a um ganho de saída menor.

Mesmo com essa limitação, observou-se um melhor desempenho que o controlador INSTRON para baixas amplitudes, vide Figura 6.9 e igual desempenho para altas. Somente após permitir o “*overdrive*” do controlador INSTRON, o qual utiliza correntes acima de  $40\text{mA}$ , é que os resultados da INSTRON se mostraram melhores. Uma vez solucionada a limitação de frequência do CompactRIO, e permitindo-se correntes acima de  $40\text{mA}$ , esperam-se resultados ainda melhores do controle por aprendizado proposto.

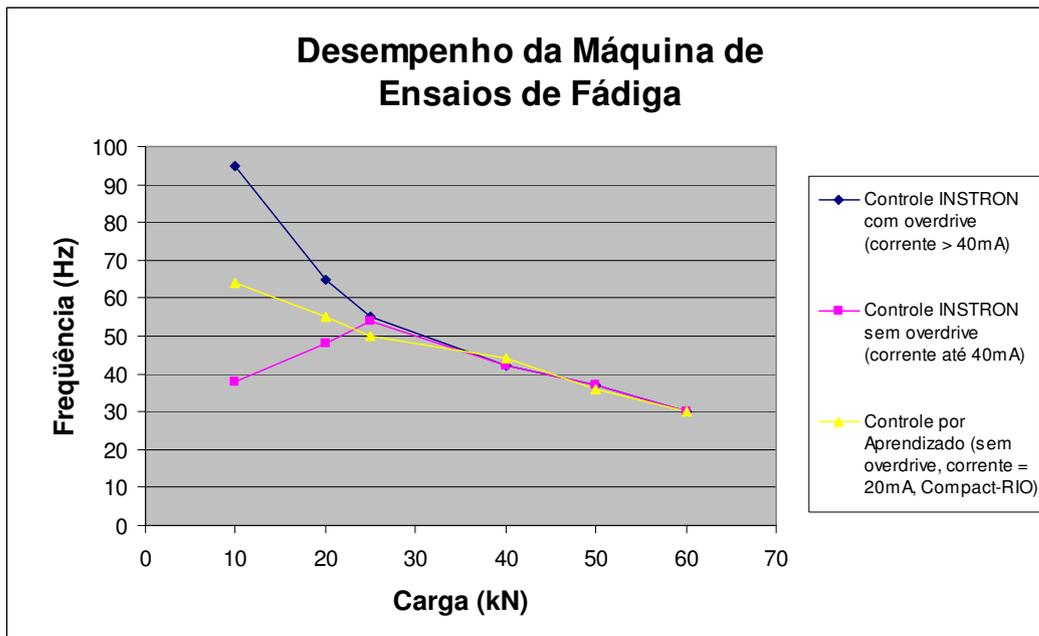


Figura 6.9 Comparação de desempenho usando os diferentes controles.