

7 . Resultados Experimentais

7.1.Sistema Experimental

Os modelos de controle propostos nesta dissertação foram testados em uma máquina INSTRON modelo 8501 utilizada para ensaios de fadiga, do Laboratório de Fadiga da PUC-Rio. Ela é constituída de uma bomba hidráulica que fornece uma pressão de 190 bar, um atuador hidráulico cilindro-pistão com capacidade de 100 kN, e é comandada por uma servo-válvula MOOG modelo D562, que tem como entrada de controle um sinal de corrente de -40mA a 40mA. Além disso, a máquina dispõe de três sensores: um LVDT, que mede o deslocamento do atuador na faixa de [-60 mm, +60 mm], clip gages que medem a deformação do corpo de prova, e uma célula de carga de capacidade de 100 kN. Ela possui um controlador que chega a atingir frequências da ordem de 50 Hz para um corpo de prova de aço para um carregamento de amplitude 25 kN [4].



Figura 7.1. Máquina de Ensaios INSTRON 8501.

Para a implementação do controle por aprendizado no sistema experimental, é preciso utilizar um módulo computacional capaz de executar controle em tempo real. Isto é possível utilizando, e.g., o módulo *CompactRIO* da *National Instrument*, que juntamente com seus módulos de entrada/saída analógica, e módulos de excitação de extensômetros, pode atingir frequências de controle da ordem de kHz. Na Figura 7.2 é apresentado o esquema de conexões do sistema experimental como o controle por aprendizado proposto.

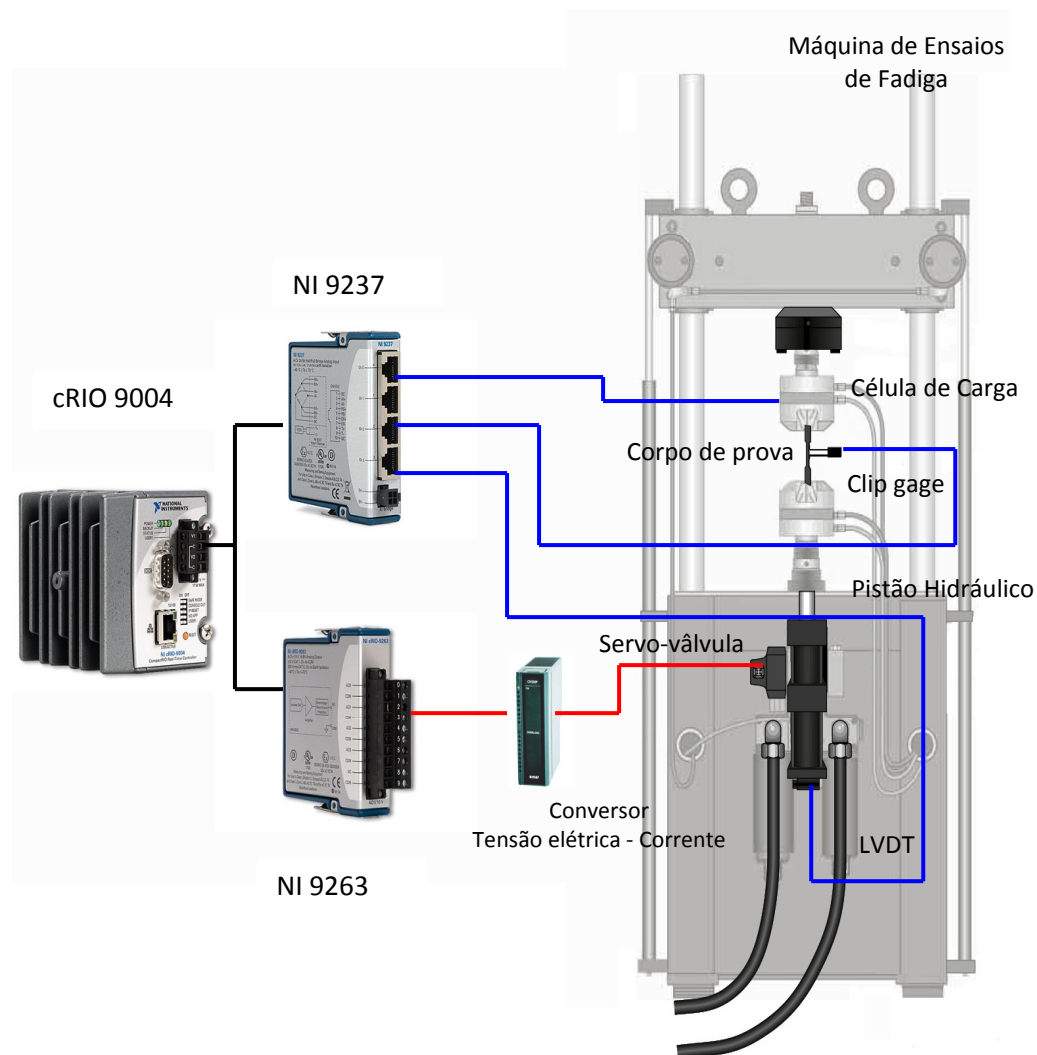


Figura 7.2. Conexões para o sistema de controle por aprendizado.

7.2. Módulo de Controle *CompactRIO*

O *CompactRIO* da *National Instruments* é um controlador programável de automação, que tem um sistema de controle reconfigurável e aquisição de dados projetado para aplicações que requerem alto desempenho e resposta em tempo real com alta confiabilidade. Ele combina um processador em tempo real integrado a um chip FPGA de alto desempenho e robustez, com módulos de entrada/saída intercambiáveis. 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*, apresentado na Fig. 7.3.



Figura 7.3. Controlador *cRIO-9004*.

O *cRIO-9004* tem incorporado um processador industrial classe Pentium de 195 MHz para executar aplicações determinísticas em tempo real desenvolvidas no software *LabVIEW Real Time*. O *cRIO* tem uma memória de 64 MB em *DRAM* e 512 MB de armazenamento *CompactFlash* não volátil, além de uma porta Ethernet para a programação pela rede. O *LabVIEW Real Time* 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*) é um chip de silício reprogramável, que utiliza blocos de lógica pre-construídos com entradas lógicas que não estão conectadas inicialmente, e que depois são configuradas e reconfiguradas entre si para as diferentes aplicações que estejam sendo implementadas (vide Figura 7.4). Aplicações com algoritmos onde se precisa resposta em tempo real, sincronização, precisão, e execução de tarefas simultâneas

de forma paralela, são desenvolvidas no FPGA. O paralelismo é conseguido 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.

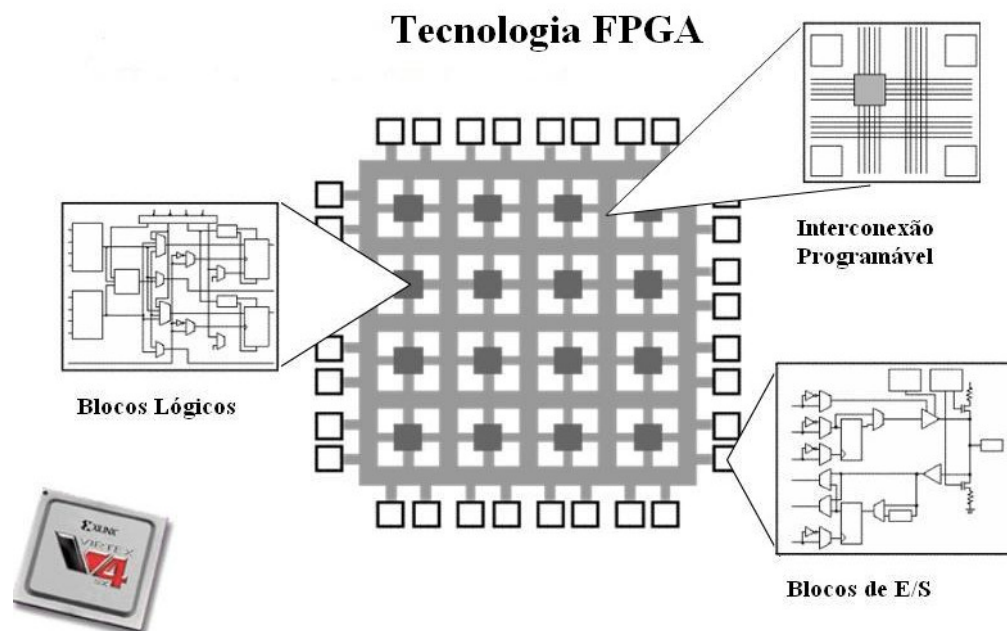


Figura 7.4. Componentes do Chip FPGA.

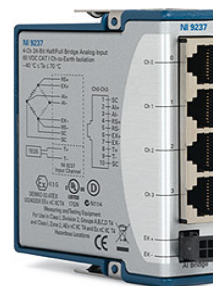
Para o controle da máquina servo-hidráulica, trabalhou-se com módulos de entradas e saídas analógicas e com um módulo de excitação de extensômetros.

O módulo *NI cRIO 9263* apresentado na Figura 7.5 (a) é o modulo de saídas analógicas usado para gerar tensões elétricas entre -10 V e +10 V. Essas saídas analógicas são convertidas em saídas de corrente de -40 mA a +40 mA através de um conversor de tensão elétrica para corrente, o qual foi desenvolvido por Alva [5].

O *NI cRIO 9237* apresentado na Figura 7.5 (b) é o módulo de excitador de extensômetros utilizado para excitar e medir o valor da força aplicada ao corpo de prova através da célula de carga, e também pode medir as deformações do corpo de prova através de um clip gage.



(a)



(b)

Figura 7.5. (a) NI cRIO 9263 e (b) NI cRIO 9237.

7.3. Software desenvolvido em LabVIEW

Os modelos de controle por aprendizado da máquina servo-hidráulica para ensaios de fadiga foram desenvolvidos utilizando o software LabView. Este software utiliza três ambientes de programação: um computador conectado ao cRio, o Real Time do cRio e o FPGA do cRio. A parte do controle bang-bang, incluindo as leituras dos dados das entradas analógicas, e do excitador de *train gage*, foi feito no FPGA, para ter a certeza de uma resposta em tempo real, tendo como referência experimental que o FPGA pode trabalhar com frequências de até 55 kHz para dados analógicos, e para dados digitais frequências de até alguns MHz. A estrutura do sistema Neuro-Fuzzy, as tabelas de aprendizado (aprendizado acelerado) e os algoritmos de aprendizado, são feitos no Real Time. Finalmente, as configurações e apresentação de resultados são feitas no computador.

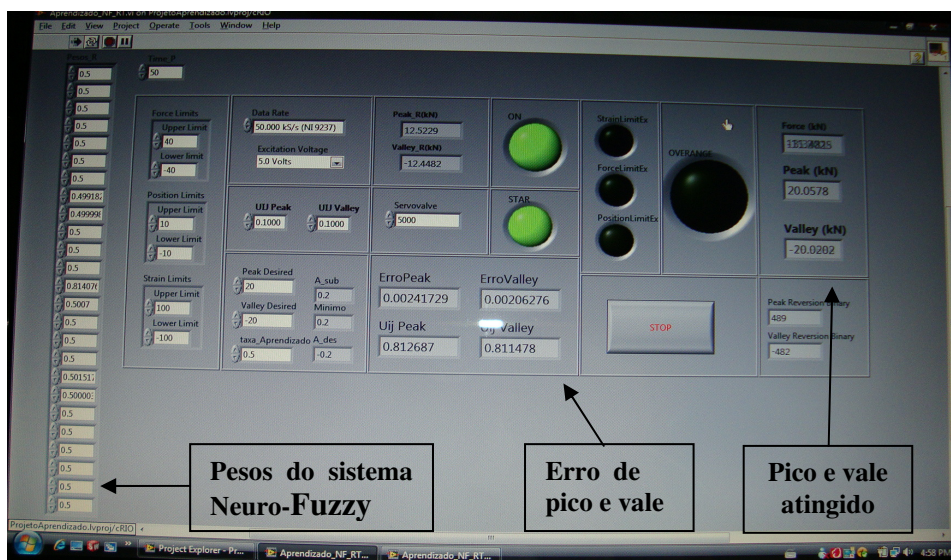


Figura 7.6. Tela de controle por aprendizado Neuro-Fuzzy.

7.4.Resultados Experimentais

Os ensaios são feitos para carregamentos de amplitudes entre 10 kN e 60 kN, todos eles para uma corrente de ± 20 mA ou ± 30 mA na servo-válvula. A servo-válvula é capaz de trabalhar até ± 40 mA, no entanto algumas limitações na frequência do controlador *CompactRio* geram problemas de overshoot para frequências muito altas, associadas ao ± 40 mA. A Figura 7.7 apresenta um ensaio de fadiga utilizando o controle por aprendizado Neuro-Fuzzy para um carregamento constante de 20 kN com carga média zero, em um corpo de prova εN feito de aço de 12 mm de diâmetro.

**Controle por Aprendizado Neuro-fuzzy
para um carregamento de +- 20 (kN)**

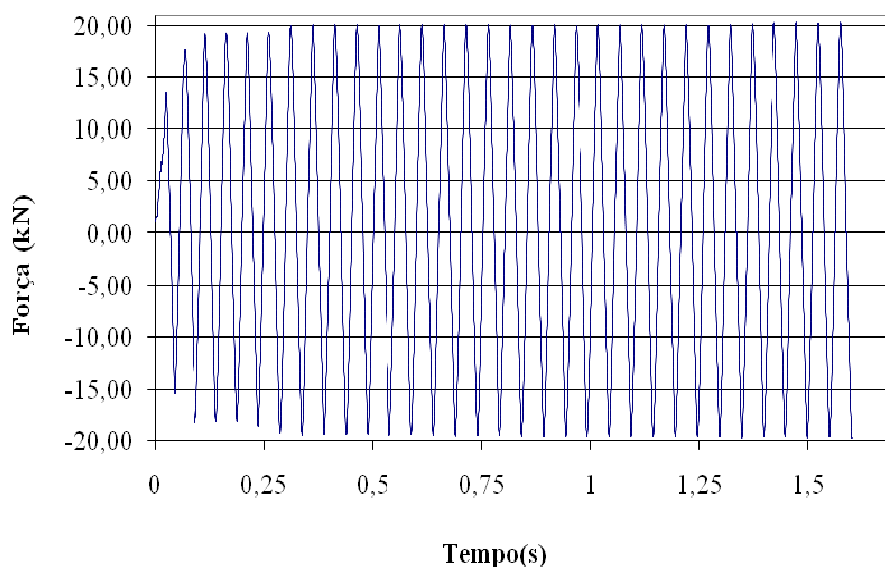


Figura 7.7. Resposta da máquina servo-hidráulica a um ensaio de fadiga sob amplitude constante com controle por aprendizado Neuro-Fuzzy.

O armazenamento das leituras dos sensores precisou ser feita externamente ao CompactRio, devido que a implementação desta funcionalidade atrapalha a frequência de controle do C-Rio. O sistema de medição externo registrou uma *overshoot* Máximo de 1% após o termino do aprendizado. Este *overshoot* é provavelmente causado pela precisão na medida da força e as limitações de frequência do C-Rio.

Na figura 7.8 é apresentado o erro normalizado em função do número de ciclos, para o ensaio de fadiga apresentado na figura acima, na qual os erros nos picos têm um aprendizado um pouco mais rápido que nos vales, convergindo após 7 ciclos.

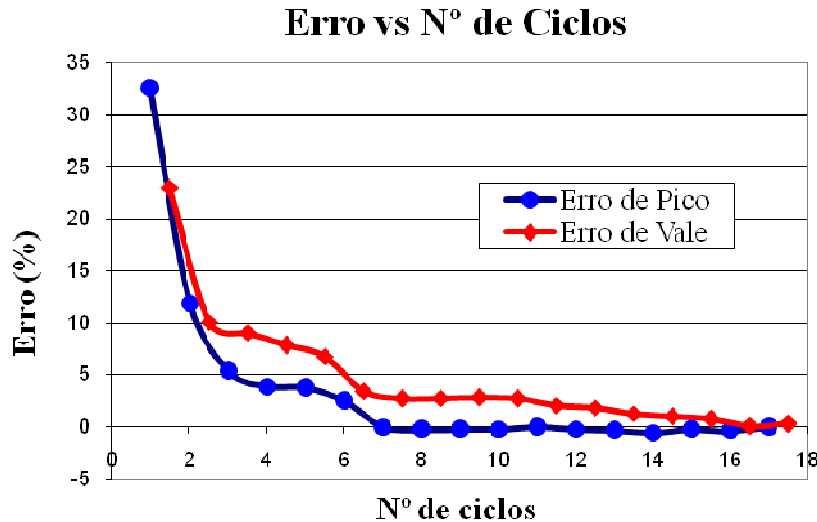


Figura 7.8 Convergência do erro em função do numero de ciclos.

Na versão atual do programa para os controles por aprendizado acelerado e Neuro-Fuzzy implementados no CompactRIO, notou-se duas limitações: a primeira relacionada com o controlador, o qual apresenta uma reduzida capacidade de memória em seu módulo de *FPGA*, obrigando desenvolver parte do controle no módulo *Real Time*, o qual apresenta uma baixa frequência de trabalho.

A outra limitação foi devido à hipótese que $0 < U_H < 1$. Em testes usando corrente de ± 40 mA na servo-válvula, observou-se que os valores ótimos de U_H poderiam adquirir valores negativos. Isto significa que a reversão em um pico precisaria ocorrer não apenas antes de atingir este pico ($U_H < 1$), mas antes mesmo de atingir ao vale anterior (i.e. $U_H < 0$). Isto é devido à pequena defasagem temporal entre o envio de sinal de atuação para a servo-válvula e sua movimentação efetiva. Este pequeno atraso passa a ser significativo em altas frequências resultando em $U_H < 0$, o que não é previsto nos modelos apresentado. Na Figura 7.9 se ilustram os pontos de reversão ótimo de subida e descida (circulo

de azul); à medida que a corrente é incrementada, o ponto de reversão do pico se antecipa do ponto 6 para o ponto 5, podendo até chegar ao ponto 4 (circulo de cor vermelho), associado a $U_H < 0$. De forma similar, o ponto de reversão de vale se antecipa do ponto 3 até eventualmente chegar ao ponto 1 para correntes de ± 40 mA.

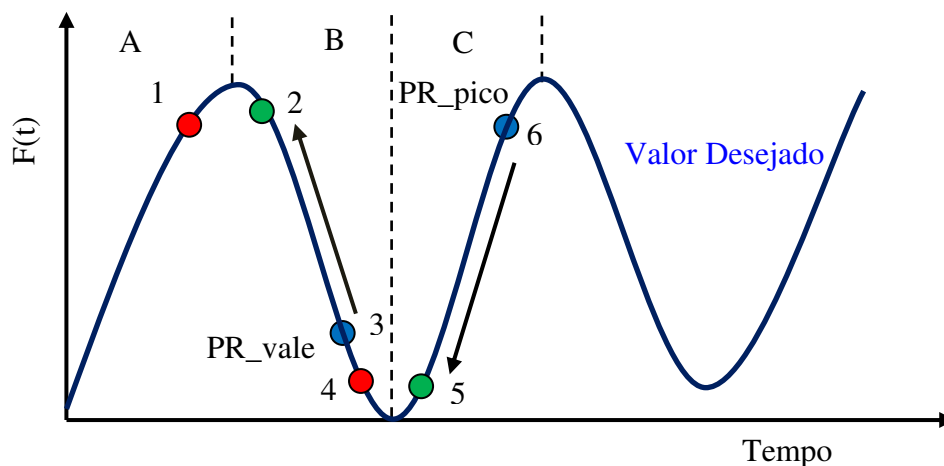


Figura 7.9. Antecipação dos pontos de reversão à medida que a frequência é aumentada.

Estes problemas limitaram a corrente de trabalho da servo-válvula a no máximo ± 30 mA para carregamentos maiores que 30 kN.

Mesmo com estas limitações, observou-se que o controle por aprendizado Neuro-Fuzzy com corrente de ± 30 mA (linha verde na Figura 7.10) para carregamentos maiores a 30 kN tem um melhor desempenho que o controlador INSTRON. Além disso, o controle por aprendizado Neuro-Fuzzy para uma corrente de ± 20 mA apresenta um melhor desempenho que o controlador INSTRON para baixas amplitudes, e somente após permitir o “overdrive” do controlador INSTRON, o qual utiliza correntes maiores que ± 40 mA, é que os resultados da INSTRON se mostraram melhores. Uma vez solucionadas as limitações da frequência do CompactRIO, espera-se poder trabalhar com correntes acima de ± 40 mA, para obter resultados ainda melhores que os do controle INSTRON com “overdrive”. Entretanto a linha de preto representa o limite máximo da servo-válvula, a qual representa o máximo desempenho que a máquina poderia atingir.

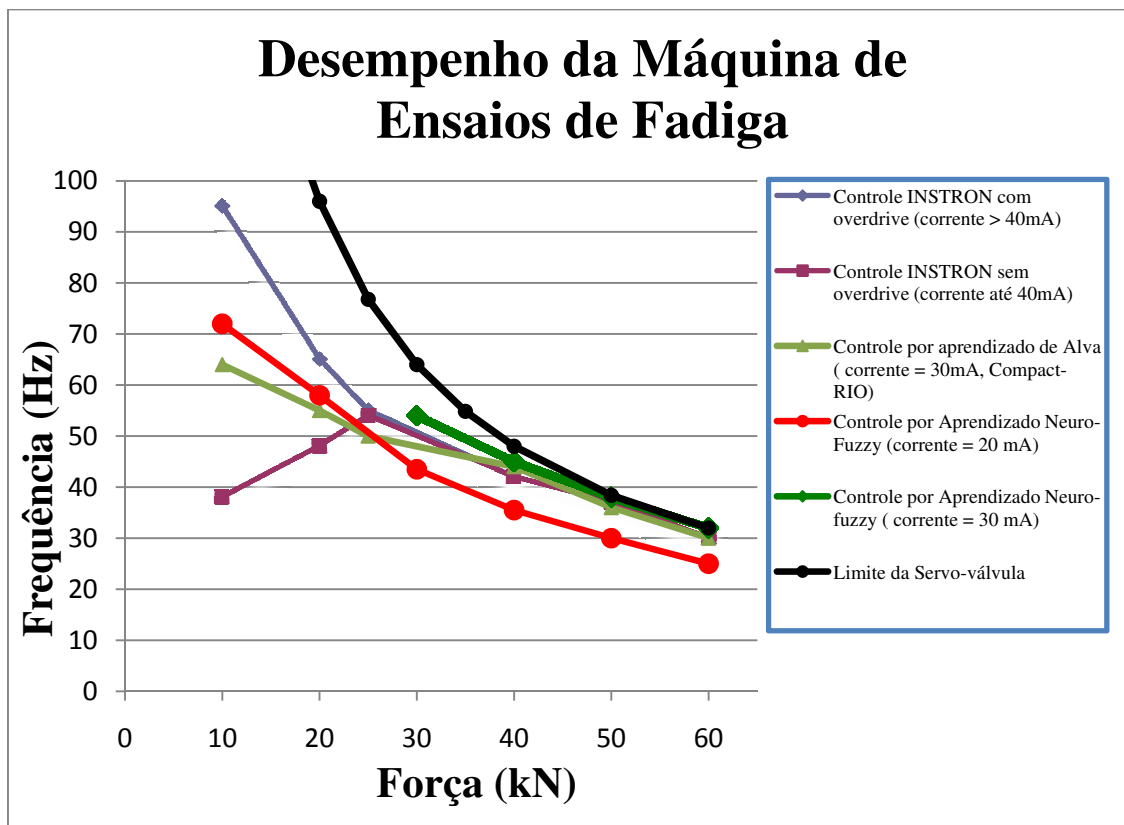


Figura 7.10. Comparação de desempenho usando diferentes controles na máquina INSTRON 8501.