

CONTROLADOR NEURAL DE MARCHA LENTA PARA MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA

BRUNO G. G. L. Z. VICENTE, MARCEL J. CEZARE

Laboratório de Controle e Eletrônica de Potência (LACEP)
Departamento de Engenharia Elétrica
Universidade de São Paulo (USP)
Av. Trabalhador Sancarlense, 400, CEP 13566.590, São Carlos, SP
brunozv,marcelcezare@gmail.com

IVAN N. DA SILVA

Laboratório de Automação Inteligente de Processos e Sistemas (LAIPS)
Departamento de Engenharia Elétrica
Universidade de São Paulo (USP)
Av. Trabalhador Sancarlense, 400, CEP 13566.590, São Carlos, SP
insilva@sel.eesc.usp.br

Abstract— This work presents an idle speed neural controller for internal combustion engines using recurrent multilayer perceptron network. For the application purposes, the modeling of the engine was also accomplished by technique based on artificial neural network. From simulation results, temporal recurrences for the input variables were introduced in order to improve the system efficiency in relation to other approaches already registered in the correlated literature, which have produced expressive gains of performance.

Keywords— idle speed control, engine modeling, multilayer perceptron network, artificial neural network.

Resumo— Este trabalho apresenta um controlador neural de marcha lenta para motores à combustão interna utilizando uma rede perceptron multicamadas recorrente. Para os propósitos da aplicação, a modelagem do motor foi também realizada utilizando redes neurais artificiais. A partir de resultados de simulação, introduziram-se recorrências temporais para as variáveis de entrada com o objetivo de melhorar a eficiência do sistema frente a outros trabalhos já registrados na literatura correlata, obtendo-se assim ganhos significativos de performance.

Palavras-chave— controle de marcha lenta, modelagem de motor, rede perceptron multicamadas, redes neurais artificiais.

1. Introdução

O aumento da frota mundial de automóveis tem provocado, ao longo do tempo, o acréscimo na emissão de poluentes na atmosfera, causando diversos prejuízos ambientais, tais como o efeito estufa, chuva ácida, inversão térmica, dentre outros, conforme mostra a Fig. 1 (Cofala et al., 2006)

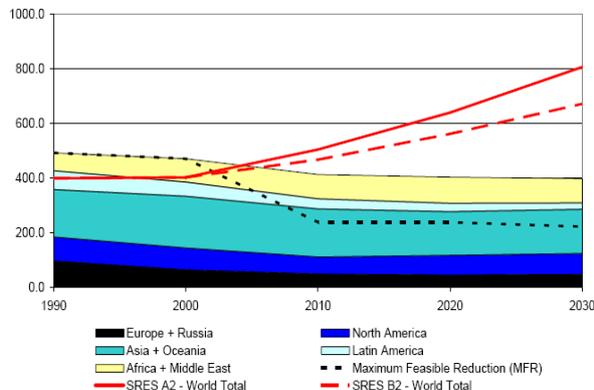


Figura 1. Projeção da evolução mundial de emissões de CO₂ (em milhões de toneladas).

Em termos mundiais, duas grandes frentes de pesquisas se consolidaram, as quais buscam a

diminuição das emissões destes poluentes. Uma das frentes visa a pesquisa de combustíveis alternativos limpos, enquanto outros pesquisadores trabalham na redução das emissões através de melhorias nos motores à combustão convencionais (Cash et al., 2003).

Nesta última direção, considerando também o desenvolvimento da eletrônica embarcada, surgiram sensores e atuadores de alta precisão com confiabilidade e durabilidade, possibilitando o aparecimento dos sistemas de injeção atuais (Monnerat Júnior, 2000). Por intermédio de tais sensores, obtêm-se informações do estado do veículo, tais como temperatura da água e do ar, rotação do motor e pressão no coletor, tornando possível determinar a quantidade de combustível a ser fornecida pelos injetores, bem como o instante da centelha para o início do processo de queima da mistura ar/combustível.

1.1. Princípios de Funcionamento do Motor de Combustão Interna

O motor de combustão interna realiza a conversão da energia química presente no combustível em calor e, em seguida, o calor é

convertido em trabalho mecânico. A queima do combustível ocorre em ambientes fechados (câmaras de combustão), gerando calor que aumenta a pressão interna dos gases e desloca os pistões. Estes, por sua vez, estão fisicamente ligados a um dispositivo (virabrequim) que transforma o movimento linear de subida e descida em rotação.

Os motores possuem uma composição de cilindros dependendo da potência requerida. O funcionamento básico é o mesmo, bastando controlar o instante de ativação de cada um.

A posição mais baixa se denomina de Ponto Morto Inferior (PMI) e a mais alta de Ponto Morto Superior (PMS). Conforme ilustrado na Fig. 2, em tais locais, ocorre-se a inversão do sentido de deslocamento do pistão.

Para que ocorra a combustão, a câmara deve ser preenchida com a mistura que contém o combustível mais o ar. O duto por onde a mesma entra é chamado de coletor de admissão e a saída dos resíduos da queima é feita pelo coletor de escape. A abertura das válvulas que controlam o fluxo nos dutos está sincronizada com o movimento do pistão por meio do eixo de comando de válvulas. A centelha que inicia o processo de combustão é fornecida pela vela.

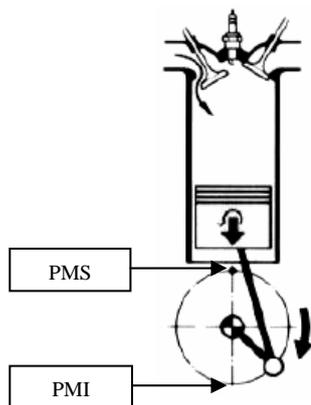


Figura 2. Unidade básica do motor e os pontos PMS/PMI.

O ciclo de funcionamento do motor é composto de 4 fases, correspondendo a 2 revoluções do virabrequim. A transição entre fases ocorre a cada ponto morto superior e inferior, sendo as mesmas constituídas por:

1. **Aspiração:** A válvula de admissão está aberta e o pistão, enquanto desce, aspira a mistura de ar e combustível para o interior da câmara.
2. **Compressão:** As duas válvulas, de admissão e escape, estão fechadas. Com o movimento de subida do pistão, ocorre-se então a diminuição do volume da mistura. Próximo ao PMS acontece a liberação da centelha que incendiará a mistura.
3. **Combustão:** Com as válvulas ainda fechadas, ocorre o aumento da pressão

interna devido à queima da mistura. Tal situação provoca o deslocamento do pistão para baixo, produzindo trabalho. Esta é a única parte ativa do ciclo, ou seja, aquela que fornece energia.

4. **Escape:** A válvula de escape se abre e, por intermédio do movimento de subida do pistão, os gases residuais da combustão são expelidos pelo coletor de escape

1.2. Mecanismo de Avanço

Observando as quatro fases do motor parece evidente que o instante da centelha deveria ocorrer logo após o PMS, ou seja, ao final da fase de compressão. Na prática, devido à velocidade de propagação da chama, torna-se necessário produzir a faísca um pouco antes do PMS visando obter uma maior eficiência da combustão. A partir deste aspecto é que se deriva o conceito de avanço, correspondendo à antecipação da centelha em relação ao PMS.

1.3. Motor de Passo e Controle do Ar

A quantidade de ar aspirado pelo motor depende de um dispositivo conhecido como borboleta, cuja função é dificultar a passagem do ar, sendo que a mesma está diretamente relacionada com o pedal do acelerador.

Quando se exige o máximo do motor, o pedal é pressionado até o fim do curso e a borboleta se encontra na posição que oferece o menor obstáculo à passagem do ar.

Na situação oposta, o pedal está relaxado e o motor se encontra na marcha lenta, estando a borboleta na posição mínima para manter o motor em rotação.

2. Análise da Condição de Marcha Lenta

A condição de marcha lenta é representada pelo veículo parado, estando o motor em funcionamento sem a necessidade de pressionar o pedal do acelerador e sem estar com a marcha engatada. Conseqüentemente, toda a energia produzida na queima da mistura é dissipada pelas perdas internas e pelo atrito, mantendo o motor em uma rotação constante.

O controle de marcha lenta tem como objetivo manter o motor a uma rotação esperada, mesmo na presença de distúrbios de cargas, tais como condicionadores de ar e direção hidráulica, por exemplo. A complexidade do problema aumenta para motores de baixa cilindrada e também de baixa rotação, onde a margem de torque disponível para rejeitar perturbações é pequena (Cook e Grizzle, 1996).

O desafio aumenta para as grandes variações de RPM (Rotações Por Minuto) que estão susceptíveis devido às condições ambientais. Deve-se atender também a requisitos subjetivos como a transferência de ruído ao passageiro e vibração da estrutura do veículo. Além disso, torna-se importante salientar que a condição de marcha lenta é a mais frequente nos veículos que transitam nos centros urbanos e seu correto funcionamento acarreta diretamente na economia de combustível e na menor emissão de poluentes.

Para maximizar a economia de combustível e minimizar os efeitos da poluição, a rotação de referência do motor deve ser tal que:

- Produza uma combustão com qualidade;
- Suporte as cargas;
- Induza pouco ruído e vibração.

As variáveis para o controle de marcha lenta são as seguintes:

- Fluxo de ar através da variação da posição da borboleta ou de uma válvula de *bypass*;
- Avanço (posição ideal da centelha), considerando o atraso de propagação da chama;
- Relação ar/combustível que não será considerada, pois se deve priorizar as emissões mantendo-a em valor fixo, proporcionando então maior eficiência dos gases catalíticos no escapamento.

3. Modelo Neural do Motor

Os motores à combustão interna são sistemas tipicamente não lineares e seu modelo matemático é obtido por processos de linearização (Narendra e Parthasarathy, 1990), resultando geralmente em aproximações pouco realistas para grande parte de suas variáveis de estado.

Neste trabalho se optou pela modelagem do motor através de uma rede neural do tipo perceptron multicamadas recorrente. As variáveis de entrada para a rede são a entrada de ar (*AR*), avanço (*AV*), rotação de saída do motor (*RPM*) e suas recorrências temporais.

Observou-se que um maior número de recorrências da variável *RPM* levava o modelo a um melhor resultado, ou seja, uma aproximação bem realista de um motor. Baseando-se em Arsie et al. (2006), os testes realizados determinaram que, para a variável *RPM*, uma quantidade de 20 recorrências temporais implica na melhor aproximação e também no menor esforço computacional.

Por outro lado, o número de camadas utilizadas no mapeamento do processo está ligado à complexidade do problema (Haykin, 1999).

Tratando-se de um sistema altamente não linear, a melhor configuração da rede perceptron recorrente foi aquela constituída de duas camadas escondidas, composta de 10 neurônios na primeira camada e 15 neurônios na segunda camada escondida, conforme ilustração da Fig. 3.

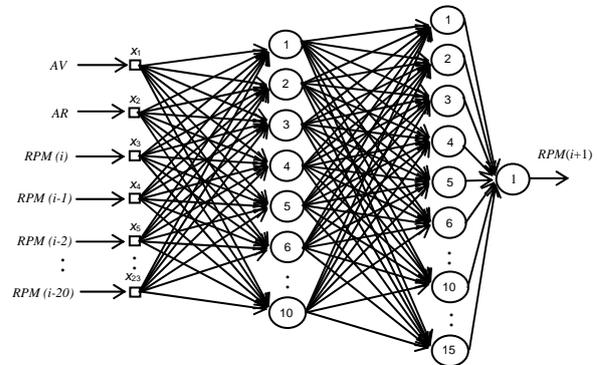


Figura 3. Rede neural representativa do comportamento do motor.

Para o treinamento da rede, utilizou-se uma combinação aleatória de distúrbios de carga com/sem influência de ar-condicionado, além de pulsos na direção hidráulica, sendo utilizada como ativação a função tangente hiperbólica.

4. Controlador Neural de Marcha Lenta

O controlador de marcha lenta desenvolvido também se baseou na arquitetura de uma rede perceptron multicamadas recorrente, atendendo o estabelecido em Puskorius e Feldcamp (1993), onde evidencia-se a necessidade de referenciar valores prévios do estado do motor para a tomada de atitude.

A etapa de treinamento também se constituiu na excitação do motor através de uma combinação aleatória de distúrbios de carga com/sem influência de ar-condicionado, além de pulsos na direção hidráulica, sendo ainda utilizada como ativação a função tangente hiperbólica.

Diferentemente de Monnerat Júnior (2000), onde o controle projetado contava apenas com entradas de *RPM* (atual e anterior), os testes de simulações experimentais apontaram a necessidade de maior recursão temporal (em referencial de tempo em PMS) do *RPM*.

Para tal configuração, o controlador passou a responder com maior acerto para pequenas oscilações, saturando-se para grandes variações. Desta maneira, delineou-se um problema de verificação de tendências das variáveis controladas. Uma medida eficaz foi a introdução na entrada da rede das variáveis *AR* e avanço (*AV*), com recorrências temporais em PMS, no qual se ganhou acuidade no controle, sendo apenas verificado um pequeno atraso de saída, como observado também na abordagem proposta em Hsieh et al. (2007).

A nova configuração de rede neural do controlador de marcha lenta, conforme ilustrado na Fig. 4, foi implementada com 24 entradas, sendo o valor de *RPM* do motor com 7 recorrências, o Avanço (*AV*) da centelha com 7 recorrências e o *AR* no motor, também com 7 recorrências.

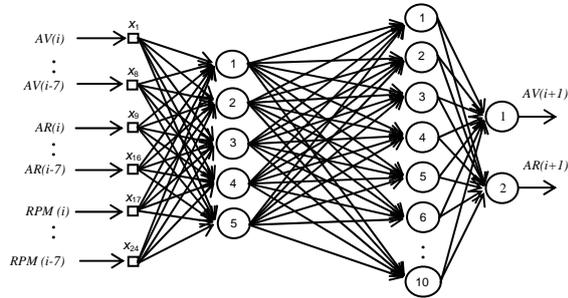


Figura 4. Rede neural do controlador de marcha lenta.

A topologia neural foi configurada em 2 camadas, sendo a primeira com 5 neurônios e a segunda com 10 neurônios. Como saída, obteve-se o estado futuro adequado para o disparo da centelha, $AV(i+1)$, e o estado futuro da quantidade de ar para a combustão, ou seja, $AR(i+1)$.

5. Aspectos de Testes e Validação do Sistema

Os dados referentes aos testes e a etapa de validação do modelo do motor e do projeto do controlador neural de marcha lenta foram extraídos de Monnerat Júnior (2000).

Realizou-se um pré-processamento para as seqüências de distúrbios, onde se misturou de forma aleatória as seqüências de golpes na direção, com e sem ar-condicionado, as quais estavam disponíveis no trabalho.

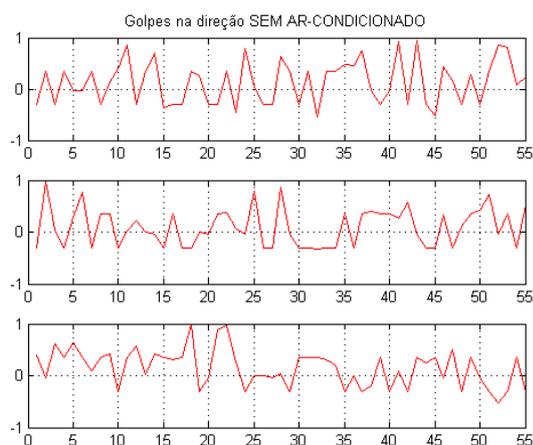


Figura 5. Exigências de RPM na entrada do controlador neural quando da aplicação de golpes na direção com ar-condicionado desativado.

Para cada treinamento três novas seqüências de distúrbios de entrada na rotação foram geradas, onde sempre um terço de cada seqüência reservou-se para

a validação. A Fig. 5 ilustra três situações de distúrbios representando as exigências de *RPM* quando da aplicação de golpes na direção, estando o ar-condicionado desativado.

Como exemplo, a Fig. 6 ilustra três situações de distúrbios representando as exigências de *RPM* quando da aplicação de golpes na direção, estando agora o ar-condicionado ativado.

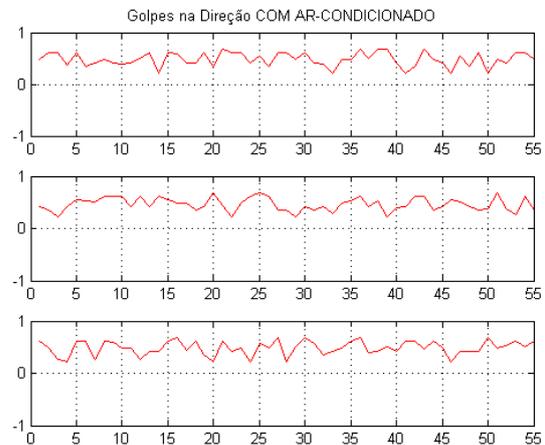


Figura 6. Exigências de RPM na entrada do controlador neural quando da aplicação de golpes na direção com ar-condicionado ativado.

A Fig. 7 ilustra ainda mais três situações de distúrbios representando as exigências de *RPM* quando da aplicação de golpes na direção, alternando as mesmas com o funcionamento do ar-condicionado.

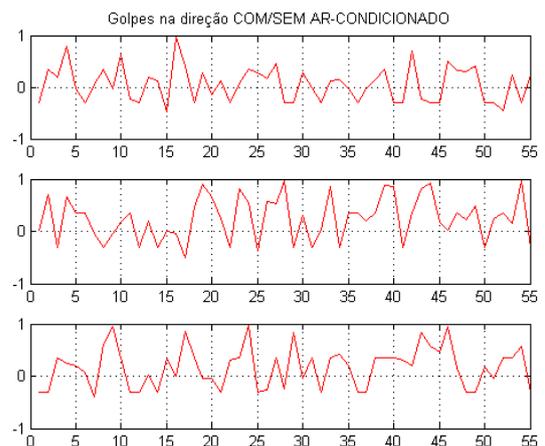


Figura 7. Exigências de RPM na entrada do controlador neural quando da aplicação de golpes na direção alternando com o funcionamento do ar-condicionado.

6. Análise dos Resultados

Na Fig. 8 são apresentados os resultados obtidos para a modelagem do motor. Destaca-se em vermelho a curva de *RPM* referência e em azul a resposta do motor modelado. Apesar de não haver a sobreposição gráfica do modelo neural, verificou-se

o acompanhamento do comportamento do motor modelado frente à saída esperada, resultado este bastante satisfatório para a implementação do controlador.

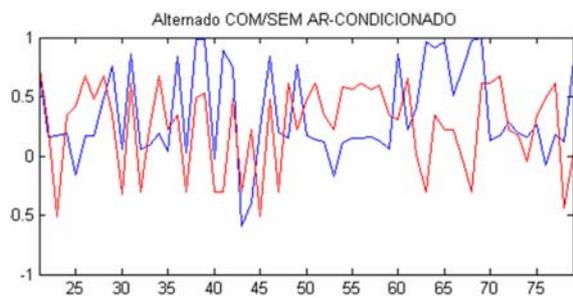


Figura 8. Resultado do treinamento do motor.

A Figura 9 apresenta a saída do controlador neural de marcha lenta referente ao avanço (AV) obtido para controlar o motor. Observa-se um ajustamento do comportamento da saída fornecida pelo controlador (em azul) frente o avanço sem o controle. Sabendo que o controle sobre avanço é rápido, mas de alcance limitado (Gorinevsky e Feldkamp, 1996), verifica-se que o controlador neural tende a utilizar o avanço para o ajuste refinado do sistema.

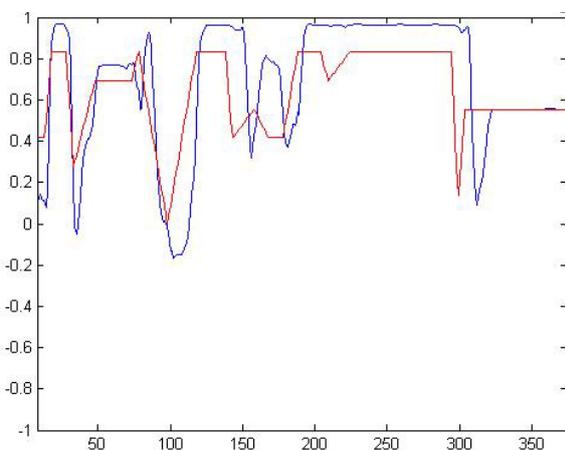


Figura 9. Resposta do controlador neural de marcha lenta referente à variável avanço (AV).

A resposta do controlador neural de marcha lenta para o AR (Fig. 10) evidencia a tendência contrária ao obtido para o avanço, ou seja, o controlador ajusta a entrada de ar para manter um nível de operação médio, visto que sua dinâmica é mais lenta, porém com maior excursão. Observa-se que o comportamento da curva obtida (em azul) reproduz, a menos em condições de saturação do ar, fielmente a curva de entrada de ar sem o controle (em vermelho).

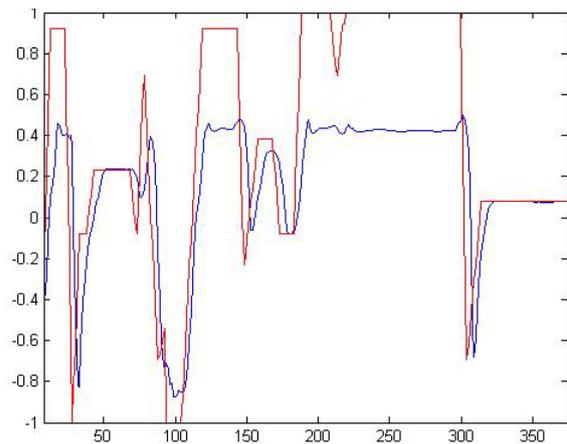


Figura 10. Resposta do controlador neural de marcha lenta referente à variável AR.

Finalmente, na Fig. 11, apresenta-se os resultados da rotação do motor controlado. Para os testes realizados, estabeleceu-se como referência para a condição de marcha lenta a rotação de 1000 rpm. A curva vermelha ilustra o comportamento da rotação do motor sem a ação do controlador neural, enquanto que a curva azul ilustra o comportamento da rotação do motor com a atuação do controlador neural. Observa-se que a curva azul não ultrapassa os limites de 900 e 1040 rpm, indicando um desempenho bem satisfatório do controlador neural desenvolvido nesta pesquisa.

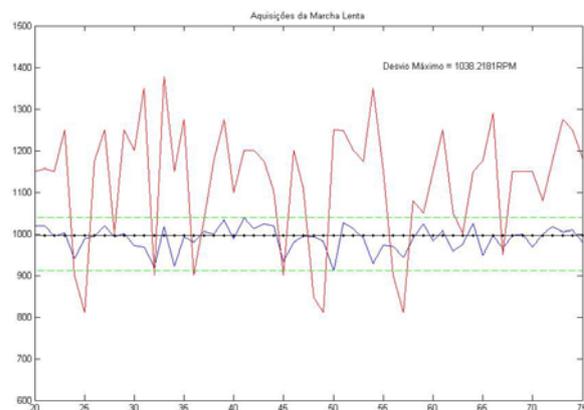


Figura 11. Resultado da rotação do motor controlado.

7. Conclusões

Para o desenvolvimento do trabalho em questão, o uso de redes neurais artificiais foi de suma importância para o mapeamento das não-linearidades envolvidas com o problema abordado.

Em relação ao modelo do motor, conclui-se que a escolha pela topologia perceptron multicamadas recorrente atende aos requisitos do estudo realizado, reproduzindo de forma eficiente o comportamento esperado.

A implementação do controlador neural de marcha lenta, utilizando também uma rede perceptron recorrente, a qual foi o foco principal do trabalho proposto, produziu resultados bem satisfatórios conforme observado pelas simulações efetivadas. Os resultados apontaram que o controlador neural desenvolvido trabalha com diferentes estratégias de controle, conforme as diferentes dinâmicas de acionamento das variáveis AR e Avanço.

Por fim, a resposta do motor diante da ação do controlador neural atendeu às condições de operação que foram predeterminadas, a qual viabiliza a implementação em hardware do sistema visando propósitos de aplicação em larga escala.

8. Referências Bibliográficas

- Arsie, I., Marotta, M., Pianese, C., Sorrentino, M. (2006). Experimental validation of a neural network based A/F virtual sensor for SI engine control, *SAE 2006 World Congress & Exhibition*, Detroit (USA), Document Number: 2006-01-1351.
- Cash, D. W., Clarck, W. C., Alcock, F., Dickson, N. M., Eckley N., Guston D. H., Jäger, J. and Mitchell, R. B. (2003). Knowledge systems for sustainable development, *Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America*, vol. 100, no. 14, pp. 8086-8091.
- Cofala, J., Amann, M. e Mechler, R. (2006). Scenarios of World Anthropogenic Emissions of Air Pollutants and Methane up to 2030, *Atmospheric Pollution and Economic Development Programme*, Laxenburg, Austria, Interim Report IR-06-023.
- Cook, J. A., Grizzle, J. W. (1996). *The Control Handbook – Engine Control Systems*, IEEE Press, pp. 1261–1274.
- Gorinevsky, D., Feldkamp, L.A. (1996). RBF network feedforward compensation of load disturbance in idle speed control, *IEEE Control Systems Magazine*, vol.16, no. 6, pp. 18-27.
- Haykin, S. (1999). *Neural Networks – A Comprehensive Foundation*, 2a. Edition, Macmillan.
- Hsieh, F., Chen, B., Wu, Y. (2007). Adaptive Idle Speed Control for Spark-Ignition Engines, *SAE 2007 World Congress & Exhibition*, Detroit (USA), Document Number: 2007-01-1197
- Monnerat Júnior, P. H. (2000). Controle Neural para Marcha Lenta de Veículos, *Dissertação de Mestrado*, Biblioteca da Área de Engenharia, UNICAMP, 95p.
- Narendra, K., Parthasarathy, K. (1990). Identification and Control of Dynamical Systems Using Neural Networks, *IEEE Transaction on Neural Networks*, vol.1,no.1, pp. 04-27.
- Puskorious, G. V., Feldcamp, L. A. (1993). Automotive Engine Idle Speed Control with Recurrent Neural Networks, *Proceedings of the American Control Conference*, San Francisco (USA), pp. 311-316.