



# Development and implementation in real time of optic techniques associated to fuzzy controllers

Paper Code: 044

Assis, P. Henrique, F. J. Gomes\*

Depto. de Energia Elétrica, Faculdade de Engenharia  
UFJF – Juiz de Fora - MG – Brasil  
[passis@geminisistemas.com.br](mailto:passis@geminisistemas.com.br)  
\* [chico@jfnet.com.br](mailto:chico@jfnet.com.br)

**Abstract** - The aim of this work is to analyse the viability of using techniques of computational intelligence, particularly computational vision, as an element embodied in the control loop, instead of the conventional sensor. The implemented process operates through a conventional video camera, as a way of acquiring an image of the process, which is then binarized by using used methods of detection of borders such as Canny, Sobel, Prewitt. The error sign for the controller is obtained by comparing the coming optic information of the process with a binarized reference through the algorithm of Levenshtein. The parameters defined by this algorithm are sent to the controller that, in turn, will generate the sign for controlling the process. In the selected example it was used a fuzzy controller and adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS). The training system operates in an interactive way optimizing a performance criterion supplied by the algorithm of Levenshtein.

## I. INTRODUÇÃO

A malha de controle clássica utiliza, para aquisição de dados dos processos industriais, tipos diferenciados de sensores. Sabe-se, contudo, que problemas diversos e expressivos podem estar associados à utilização destes sensores convencionais, decorrentes de características como não-linearidades, envelhecimento do material, reações com o ambiente de trabalho além de, em muitos casos, custos elevados de aquisição e manutenção.

A evolução da informática, fazendo com que os computadores se tornem cada vez mais velozes, permitindo, assim, grande processamento de informações, bem como o desenvolvimento das diversas técnicas de inteligência computacional descortinaram a possibilidade de se utilizar imagens do processo em substituição aos sensores convencionais, aliando assim a utilização do “processamento de imagens” ao controle de processos industriais. A proposta desse trabalho é desenvolver, implementar e analisar o desempenho de algoritmos de controle que operam baseado na utilização de imagens em substituição aos sensores convencionais.

O trabalho está organizado como segue: o capítulo II apresenta os métodos utilizados para a detecção de bordas, o capítulo III o algoritmo proposto e o IV a aplicação do

método. Os resultados obtidos e a conclusão do trabalho constituem os capítulos V e VI, respectivamente.

## II. OS MÉTODOS UTILIZADOS

É fato conhecido que imagens são, na realidade, um suporte físico que carrega no seu interior uma determinada informação. Processar uma imagem, consiste em transformá-la sucessivamente com o objetivo de se extrair mais facilmente a informação nela presente [1].

Uma imagem é composta por um conjunto de pontos, denominados "*Pixels*" (*Picture Elements*) ou "*Dots*", dispostos na tela do computador formando uma matriz de pontos denominada "*Bitmap*" ou "Mapa de Bits" [2].

Uma característica importante para análise de uma imagem são as suas bordas, variações locais de intensidade desta imagem, e de onde diversas e variadas informações podem ser retiradas, como por exemplo, diferentes regiões de um objeto, mudanças de luminosidade ou de cor, e outros mais.

Sabendo-se que nos *pixels* de borda de uma região ocorre uma variação acentuada no valor de densidade (nível de cinza), um operador que seja sensível a tais variações pode ser usado como um detetor de bordas [3]. Uma opção é utilizar um operador diferencial, visto que a derivada pode ser interpretada como a taxa à qual uma função varia e que esta taxa de variação da densidade será alta próximo às bordas e baixa em áreas homogêneas (áreas de uma mesma região e que possuem o mesmo valor de densidade ou pequena variações deste valor) [4].

Como uma imagem em tons de cinza está definida em um espaço bidimensional, deve-se considerar as descontinuidades nas várias direções. Por isso, derivadas parciais são utilizadas com relação aos eixos principais da imagem,  $x$  e  $y$ , fazendo que um operador diferencial adequado às condições propostas seja o gradiente. Imaginando-se a imagem como uma função  $A$  de duas variáveis,  $x$  e  $y$ , o gradiente será expresso pela Eq. (1).

$$\nabla A(x,y) = \left( \frac{\partial A}{\partial x}, \frac{\partial A}{\partial y} \right) \quad (1)$$

Através deste vetor pode-se determinar não só a direção da maior variação entre os *pixels* vizinhos mas também sua magnitude. Calculando-se o módulo do gradiente, pode-se ter uma medida de quão alta é a variação de intensidade no *pixel*. Como o gradiente é uma grandeza vetorial seu módulo será expresso pela Eq. (2).

$$|\nabla A(x,y)| = \sqrt{(\nabla_x A(x,y))^2 + (\nabla_y A(x,y))^2} \quad (2)$$

Utilizando o operador gradiente, pode-se dizer que um *pixel* é de borda quando sua magnitude exceder um certo limiar previamente definido.

No presente trabalho foram testados os diversos operadores que utilizam gradiente: Roberts, Prewitt, Sobel, Laplacian of Gaussian, Canny [5].

### III. O ALGORITMO PARA O RECONHECIMENTO ÓTICO E CONTROLE DO PROCESSO

**Etapa 1 – Digitalização:** A digitalização do processo pode ser feita utilizando-se qualquer câmera multimídia digital, como uma Webcam, por exemplo. No presente trabalho utilizou-se uma QuickColor, da Logitech. Uma imagem é, na realidade, uma representação matricial dos *pixels*. Em se tratando de uma imagem colorida (RGB), pode-se representá-la através de uma matriz de três dimensões. Após a captura, reduz-se a imagem para tons de cinza, podendo representá-la como uma matriz de duas dimensões.

**Etapa 2 – Detecção de Bordas:** A detecção de bordas é realizada com a matriz “binarizada”, ou seja, matriz cujos elementos são 0’s e 1’s. Para determinar se o elemento será um ou outro, utilizou-se os métodos de detecção de bordas, mencionados anteriormente.

**Etapa 3 – Comparação com o estado ótimo:** Para se realizar a comparação com o estado ótimo, digitalizou-se e binarizou-se primeiramente a imagem representativa desse estado, que passa a constituir uma referência para o processo. A comparação se dará entre a matriz representativa do estado do processo no momento do controle e a matriz de referência armazenada. A técnica utilizada para comparação é a Distância de Levenshtein [6].

**Etapa 4 – O Controlador [7]:** As variáveis de entrada do controlador são Distância de Levenshtein e a taxa de variação da Distância de Levenshtein.

**Etapa 5 – Algoritmo de Controle:** A informação proveniente da imagem é articulada com o controlador

nebuloso, do tipo Mamdani e neuro-nebuloso (“neuro-fuzzy”) do tipo Sugeno, para geração da ação de controle.

**Etapa 6 – Atuação:** A saída do controlador é então aplicada ao processo, calcula-se o novo erro e reinicia-se o ciclo para novo processamento.

### IV. APLICAÇÃO DO MÉTODO

Para validação do método proposto foi utilizado o Processo do Balanço Horizontal (PBH), um problema clássico de controle não-linear, *Multi-Input Single-Output* (MISO) [8], conforme mostram as figuras 1a e 1b.

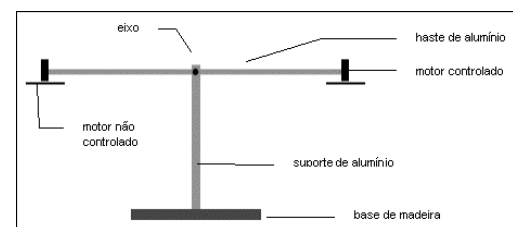


Figura 1a – Planta do Balanço Horizontal

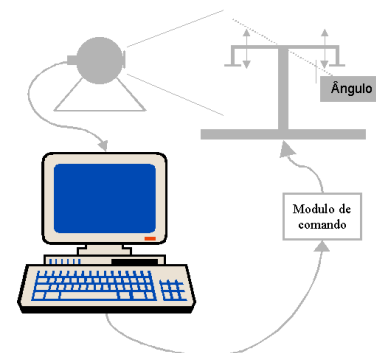
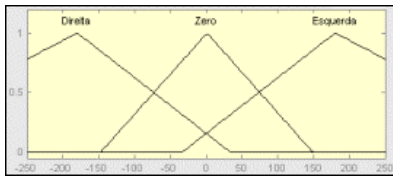


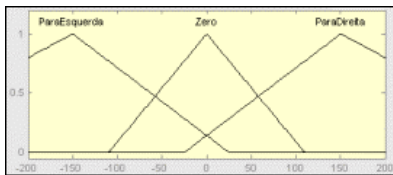
Figura 1b – Diagrama da montagem efetuada com a WebCam

**Descrevendo o Processo do Balanço Horizontal:** O Processo do Balanço Horizontal é constituído de uma base em madeira e um suporte vertical que serve de apoio a uma haste horizontal. Nas extremidades da haste horizontal estão montados motores DC que possuem hélices acopladas aos seus eixos. A rotação destes motores provoca deflexões na haste, alterando o ângulo horizontal [9]. Para efeito de controle do processo, manteve-se um motor com velocidade constante enquanto o outro poderia variar de acordo com a saída do controlador. A imagem é capturada por uma câmera de vídeo e processada, com o controlador atuando através de um canal D/A.

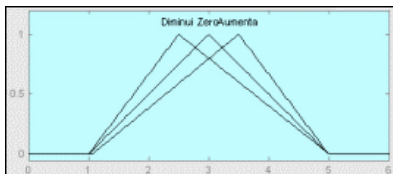
Variável de entrada 1 (Distância de Levenshtein):



Variável de entrada 2 (Taxa de Variação da Distância de Levenshtein):



Variável de saída 1 (Tensão):



Regras:

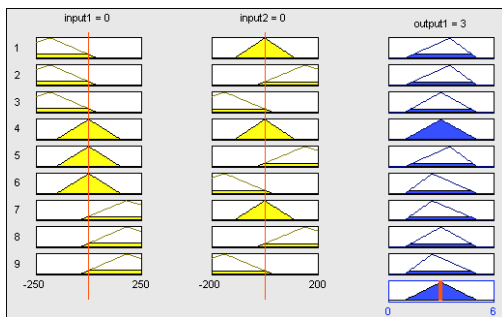


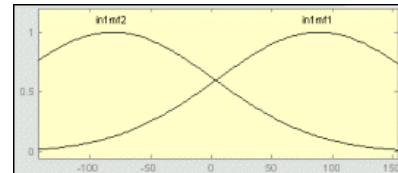
Figura 2 – Funções de pertinência e regras do controlador sintonizado.

**O Controlador:** implementou-se inicialmente um controlador nebuloso do tipo Mamdani [10, 11, 12]. A sintonia do controlador, mostrado na Fig. 2, é processo com certa complexidade, sendo necessário grande conhecimento sobre a planta para se obter os parâmetros que melhor descrevam o processo, o que conduziu a inúmeras tentativas de sintonia.

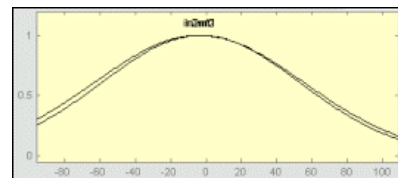
Como é fator relevante o conhecimento da planta, buscou-se uma alternativa que não necessitasse de tal pré-requisito. A solução encontrada foi o método ANFIS (*Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System*). Para a geração do controlador inicial, do tipo Sugeno [13, 14], utilizou-se o método *Subtractive Clustering* [15].

Quando da geração de tal estrutura para o controlador é também gerada uma estrutura ANFIS que necessita treinamento, o que permite a otimização dos valores dos parâmetros das funções de pertinência, que figurarão como o controlador nebuloso final. Após o treinamento, chegou-se à estrutura mostrada na Fig. 3.

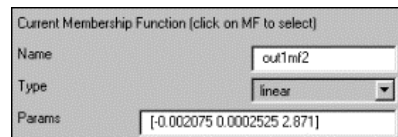
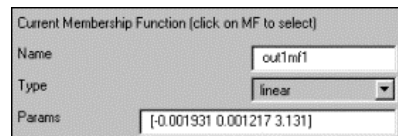
Variável de entrada 1 (Distância de Levenshtein):



Variável de entrada 2 (Taxa de Variação da Distância de Levenshtein):



Variável de saída 1 (Tensão):



Regras

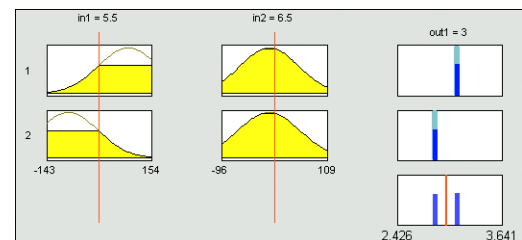


Figura 3 – Funções de pertinência e regras do controlador sintonizado pelo ANFIS.

## V. OS RESULTADOS ESPECÍFICOS

São disponibilizadas, na Fig. 4, imagens contendo todos os métodos de detecção de bordas (binarização) testados. Conforme pode-se verificar o método Canny (terceira linha, segunda coluna) fornece a maior riqueza de detalhes.

Um dos procedimentos integrantes dos ensaios foi a adição de “complexidades” ao fundo da imagem, denominando-se fundo complexo, com introdução de novas bordas que, de alguma forma, interferem no processamento e posterior tomada de decisão pelo controle.

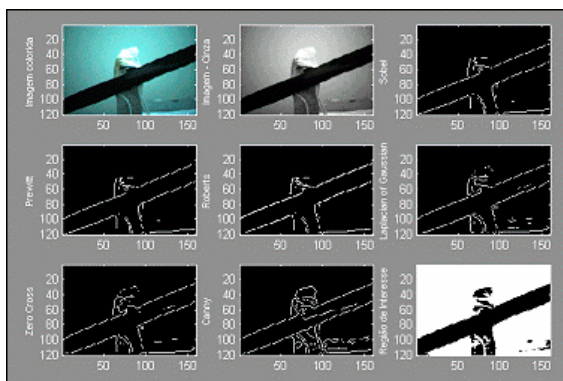


Figura 4 - Métodos de Detecção de Bordas - As imagens estão nessa ordem: Imagem colorida capturada, imagem em tons de cinza, Sobel, Prewitt, Roberts, Laplacian of Gaussian, Zero Cross, Canny e Região de Interesse.

Os gráficos apresentados nas Figs. 5a e 5b são referentes às três variáveis do controlador nebuloso: Distância de Levenshtein, taxa de variação da Distância de Levenshtein e tensão aplicada no motor para uma situação de estabilização horizontal do balanço, para uma sintonia manual do controlador.

As Tabelas I e II mostram os resultados obtidos em termos de tempo de estabilização, enquanto as Tabelas III e IV, exibem valores da figura de mérito, que foi definida como a integral do módulo do erro, considerada desde o início da simulação até a estabilização do processo.

Tabela I – Tempo de estabilização (fundo simples)

Método	Controlador Nebuloso (s)	ANFIS (s)
Sobel	37	10
Prewitt	39	11
Roberts	12	18
LoG	61	23
Canny	9	12

Tabela II – Tempo de estabilização (fundo complexo)

Método	Controlador Nebuloso (s)	ANFIS (s)
Sobel	11	6
Prewitt	7	6
Roberts	5	7
LoG	16	38
Canny	25	9

Tabela III – Figura de mérito x Método de binarização (fundo simples)

Método	Controlador Nebuloso (V)	ANFIS (V)
Sobel	3.323	6.576
Prewitt	4.557	5.840
Roberts	3.706	5.016
LoG	5.883	3.473
Canny	2.459	3.268

Tabela IV – Figura de mérito x Método de binarização (fundo complexo)

Método	Controlador Nebuloso (V)	ANFIS (V)
Sobel	1.871	1.992
Prewitt	3.233	3.637
Roberts	3.778	4.198
LoG	4.386	3.241
Canny	4.223	4.631

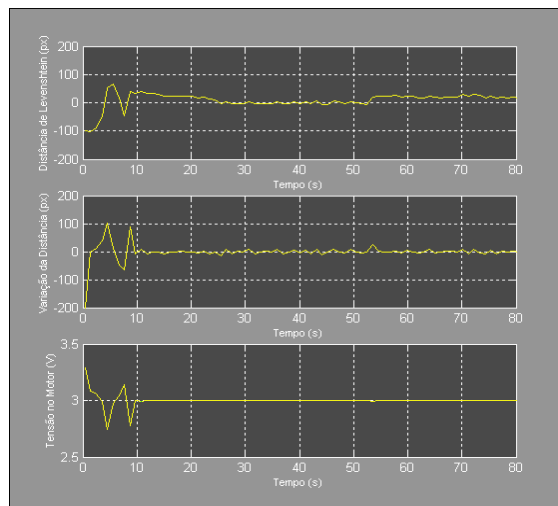


Figura 5a – Tela do sistema com os parâmetros do controlador sintonizado.

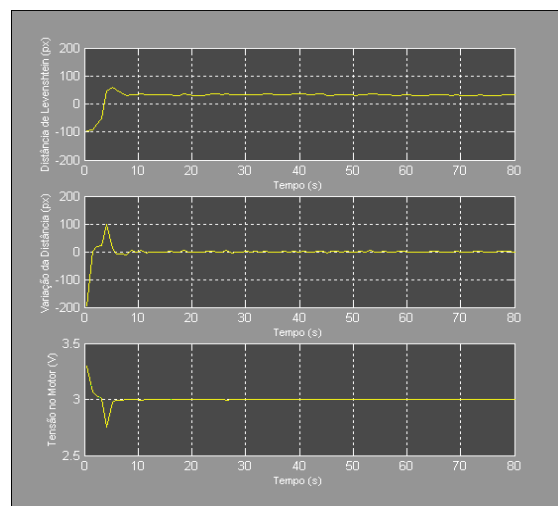


Figura 5b - Tela do sistema com os parâmetros definidos pelo ANFIS.



## Development and implementation in real time of optic techniques associated to fuzzy controllers

Paper Code: 044

### VI. CONCLUSÃO

Como pode ser visto, em ambos os casos, controlador nebuloso e neuro-nebuloso, o processo foi estabilizado, induzindo-nos a concluir a respeito da viabilidade técnica de se utilizar a imagem em substituição aos sensores. Quando comparado aos controladores convencionais com sensores, do tipo PID e mesmo com estrutura nebulosa, as figuras de mérito obtidas mostraram a perfeita factibilidade do método proposto. Os resultados alcançados mostraram que o método pode ser perfeitamente aplicável à processos industriais, sob algumas condições restritivas:

1 - os processos não podem apresentar uma dinâmica muito rápida, pois existe um tempo necessário para o processamento da imagem. Uma comparação utilizando-se a mesma planta (PBH), porém com um sensor convencional, mostrou que um ciclo de amostragem para o sistema proposto, baseado em técnicas óticas, é sempre maior que o caso convencional. Para o processo utilizado, os tempos de amostragem foram da ordem de 1 segundo. Ressalte-se, entretanto, que existe uma grande influência do “hardware” utilizado, tendo em vista que, quanto maior a capacidade de processamento do equipamento, menores serão os tempos de amostragem.

2 - o sistema é ainda muito dependente de fatores externos, como por exemplo, do posicionamento da câmera em relação ao processo. Variações como distância da câmera para a planta e dimensão da matriz reduzida tiveram também forte influência sobre os resultados. Quanto maior a distância entre a câmera e a planta, menor é o nível de detalhamento da imagem e, conseqüentemente, menor o número de pontos que diferenciam a imagem momentânea do processo da imagem de referência.

3 - existem questões que devem ser melhor equacionadas, como, por exemplo, o aparecimento de um valor de “offset” registrado para a Distância de Levenshtein. Embora não se tenha detectado uma influência direta entre esse parâmetro e os resultados finais, uma aplicação com maior cunho profissional deveria, certamente, analisar as possíveis correlações entre esses pontos e, se for o caso, procedimentos para sua correção.

Pode-se notar que, de uma forma geral, não existe um método que tenha se mostrado superior aos demais em todas as circunstâncias. Quando analisados sob o enfoque do tempo de estabilização, verifica-se que os melhores resultados ocorreram para os métodos de Roberts, com valores da ordem de 5 segundos, para a sintonia manual e fundo complexo, e Sobel/Prewitt, com valores de 6 segundos, para a situação de fundo complexo

e ANFIS. Quando utilizando fundo simples, os resultados destacam os métodos de Canny (sintonia manual) e ZC (ANFIS) com tempos de 9 segundos. Curiosamente, a melhor estabilização foi conseguida com o sistema com sintonia manual e fundo complexo.

Quando analisados sob a ótica das figuras de mérito, destacam-se os métodos de Prewitt, com sintonia manual, fundo complexo e valor final de 0,519, e Sobel, para o ANFIS, com fundo também complexo e valor final de 0,725. Quando utilizados com fundos simples, os melhores resultados foram para os métodos de Roberts, com sintonia manual e valor final de 1,138, e ZC para o ANFIS, com valor final de 1,039.

Pode-se dizer que os sensores convencionais propiciam uma informação mais precisa do processo que os métodos óticos aqui implementados. Entretanto, os métodos óticos não possuem problemas como histerese e envelhecimento do material.

As conclusões finais mostram que é perfeitamente possível, dentro das limitações colocadas de tempo de processamento, utilizar-se imagens do processo para o controle em malha fechada, eliminando os sensores convencionais e os problemas inerentes aos mesmos. Foi constatada a necessidade de procedimentos de padronização e ajuste – também necessários nos sensores convencionais – para garantia e repetibilidade dos resultados.

Existem, com é natural em qualquer nova proposição, limitações a serem solucionadas, dentre as quais pode-se destacar a necessidade de maior tempo de processamento, o que não constitui impeditivo para sua utilização, desde que a aplicação se limite a processo com dinâmicas não muito rápidas. Pode-se citar, como exemplo, que os tempos de processamento, para o processo utilizado, foram de 0,20s e 0,66s, para o sensor convencional e para o método proposto, respectivamente. Ressalte-se, entretanto, que essa questão será minorada com o crescimento da capacidade de processamento dos equipamentos utilizados, fato este que ocorre de forma contínua.

### VII. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] M. P. Albuquerque e M. P. Albuquerque: Processamento de Imagens: Métodos e Análises.
- [2] Osório, F. et al. (2001) Computação Gráfica – Introdução. Disponível em <http://www.inf.unisinos.br/~osorio/CG-Doc/CG-Web/cg.html>.



## Development and implementation in real time of optic techniques associated to fuzzy controllers

Paper Code: 044

- 
- [3] Ribeiro, O. A. F. T., (2000) Aplicações de Processamento de Sinal e Imagem – Detecção de Orlas, Universidade do Porto, Porto, Portugal.
- [4] Silva, C. A., Seixas, R.B., Detecção Automática de Contornos com Geração de Superfícies em Dados Volumétricos, Universidade do Estado do Rio de Janeiro – UERJ / Instituto de Matemática Pura e Aplicada – IMPA.
- [5] Canny, J., (1986) A Computational Approach to Edge Detection, IEEE PAMI, vol. PAMI-8, no. 6, pp. 679-698.
- [6] Levenshtein, V. I. (1966) Binary codes capable of correcting deletions, insertions and reversals. Soviet Physics-Doklady, 10(8):707-710.
- [7] Zadeh, L. A. (1965) Fuzzy sets, Information and Control, vol. 8, pp. 338-353.
- [8] Filatov, N.M; Keuchel, U. and Unbehauen, H. (1996) Dual Control for an Unstable Mechanical Plant, IEEE Control Systems, p. 31-37, August.
- [9] Coelho, L. e Coelho, A. A. R. (1999) Identificação de um processo multivariável balanço horizontal via rede neural polinomial, InTech Brasil, p. 116-124, Setembro.
- [10] Mamdani, E.H. and S. Assilian (1975) An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller, International Journal of Man-Machine Studies, Vol. 7, No. 1, pp.1-13.
- [11] Mamdani, E.H. (1976), Advances in the linguistic synthesis of fuzzy controllers, International Journal of Man-Machine Studies, Vol. 8, pp. 669-678.
- [12] Mamdani, E.H. (1977) Applications of fuzzy logic to approximate reasoning using linguistic synthesis, IEEE Transactions on Computers, Vol. 26, No. 12, pp. 1182-1191.
- [13] Sugeno, M. (1977) Fuzzy measures and fuzzy integrals: a survey, (M.M. Gupta, G. N. Saridis, and B.R. Gaines, editors) Fuzzy Automata and Decision Processes, pp. 89-102, North-Holland, New York.
- [14] Sugeno, M. (1985) Industrial applications of fuzzy control, Elsevier Science Pub. Co.
- [15] Bezdek, J.C. (1981) Pattern Recognition with Fuzzy Objective Function Algorithms, Plenum Press, New York.