

02402564

Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP

Departamento de Engenharia de Energia e

Automação Elétricas

ISSN 1413-2214

BT/PEA/9923

**Sistemas Não Lineares
Controlados pela Lógica Difusa:
Uma Aplicação em Acionamentos
Constituídos por Motores
Assíncronos**

**Werner W. Pacheco Lujan
Cícero Couto de Moraes**

São Paulo – 1999

O presente trabalho é um resumo da tese de doutorado apresentada por Werner W. Pacheco Lujan, sob orientação do Prof. Dr. Cícero Couto de Moraes: "Sistemas Não Lineares Controlados pela Lógica Difusa: Uma Aplicação em Acionamentos Constituídos por Motores Assíncronos", defendida em 27/04/99, na EPUSP.

A íntegra da tese encontra-se à disposição com o autor e na biblioteca de Engenharia de Eletricidade da Escola Politécnica da USP.

FICHA CATALOGRÁFICA

Lujan, Werner W. Pacheco

Sistemas não lineares controlados pela lógica difusa : uma aplicação em acionamentos constituídos por motores assíncronos / W.W.P. Lujan, C.C. de Moraes. — São Paulo : EPUSP, 1999.

18 p. — (Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas, BT/PEA/9923)

1. Controle – Teoria 2. Motores assíncronos 3. Sistemas difusos (Controle automático) I. Moraes, Cícero Couto de II. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas III. Título IV. Série

ISSN 1413-2214

CDD 629.8312

621.46

629.8

SISTEMAS NÃO LINEARES CONTROLADOS PELA LÓGICA DIFUSA: UMA APLICAÇÃO EM ACIONAMENTOS CONSTITUIDOS POR MOTORES ASSÍNCRONOS

Werner W. Pacheco Lujan e Cícero Couto de Moraes

1. Introdução e objetivo do trabalho

Os métodos tradicionais de controle de velocidade de motores assíncronos, são realizados através de uma série de simplificações sobre os parâmetros do sistema, resultando em processos que comprometem o desempenho do acionamento.

Os estudos principais neste campo assumem que o sistema seja linear, muito embora saibamos que o modelo completo da máquina assíncrona seja o de um sistema não linear.

Esses parâmetros do motor a ser controlado, variam com a temperatura, a velocidade do rotor, tensão e a frequência entre outros, o que produz variações do modelo e que pode levar a uma instabilidade do sistema.

Para solucionar estes problemas adicionamos ao sistema, o Controle de lógica Difusa que não depende do modelo adotado nem dos parâmetros utilizados.

O controlador Difuso pode-se combinar com o controle Adaptativo, aliás do controle vetorial indireto, produzindo melhor desempenho do acionamento, quando comparado com as técnicas tradicionais.

O controlador Difuso ativa-se quando o controle tradicional atinge seu limite operacional devido às imperfeições do modelo, variação dos parâmetros ou não linearidades do sistema, por outro lado por ser discreto, pede a presença do controle tradicional para garantir a anulação do erro no processo de controle.

Portanto o controlador Difuso e o controlador tradicional (Adaptativo mais Vetorial) atuam de forma complementar.

É enfocado o modelamento e análise do controlador Difuso nos acionamentos de corrente alternada, acionamentos que inclui ademais o Controle Vetorial, o Controle Adaptativo e o regulador P.I. caracterizados para sistemas não lineares, e é feita a simulação do sistema.

Finalmente um protótipo especialmente desenvolvido para este trabalho serviu para as medições, experimentos e verificação da teoria desenvolvida.

2. Análise das técnicas Tradicionais de controle de motores assíncronos

Sabido é que os métodos tradicionais: de malha aberta, malha fechada e ainda o controle de torque e fluxo tem um pobre desempenho. Com o advento do controle de campo orientado [1], um motor de indução pode ser operado com a mesma exatidão que um motor C.C., pelo que nosso sistema o inclui, assim como o controle Adaptativo, o Controle Difuso e o regulador P.I. O diagrama em blocos do controlador proposto é mostrado na Fig. 2.1. Onde:

$T_e = K_t i^* q_s$ representa o torque eletromagnético produzido pelo motor de acordo o Controle Vetorial, H_p representa o motor, se tem ademais o Controle Adaptativo, o Regulador PI e o Controlador Fuzzy. O modelo de 1^{er} ordem [16] correspondente ao sistema é:

$$\omega_r = H_p(s) [T_e(s) - T_L(s)] \quad (2.1)$$

$$\text{onde: } H_p(s) = (1/J)/(s + B/J) = b/(s+a) \quad (2.2)$$

sendo: B o coeficiente de atrito viscoso

substituindo eq. (2.2) em eq. (2.1) temos:

$$\omega_r(s) = (b/(s+a))[T_e(s)-T_L(s)] = (b/(s+a)) K_t[T_e(s)- T_L(s)]/K_t \quad (2.3)$$

de fig. 2.1:

$$[T_e(s)- T_L(s)]/K_t = u_p \quad (2.4)$$

substituindo eq. (2.4) em eq. (2.3) temos:

$$s\omega_r(s) + a \omega_r(s) = b k_t u_p$$

operando

$$s[\omega_r(s)/(b K_t)] = -a [\omega_r(s)/(b K_t)] + u_p \quad (2.5)$$

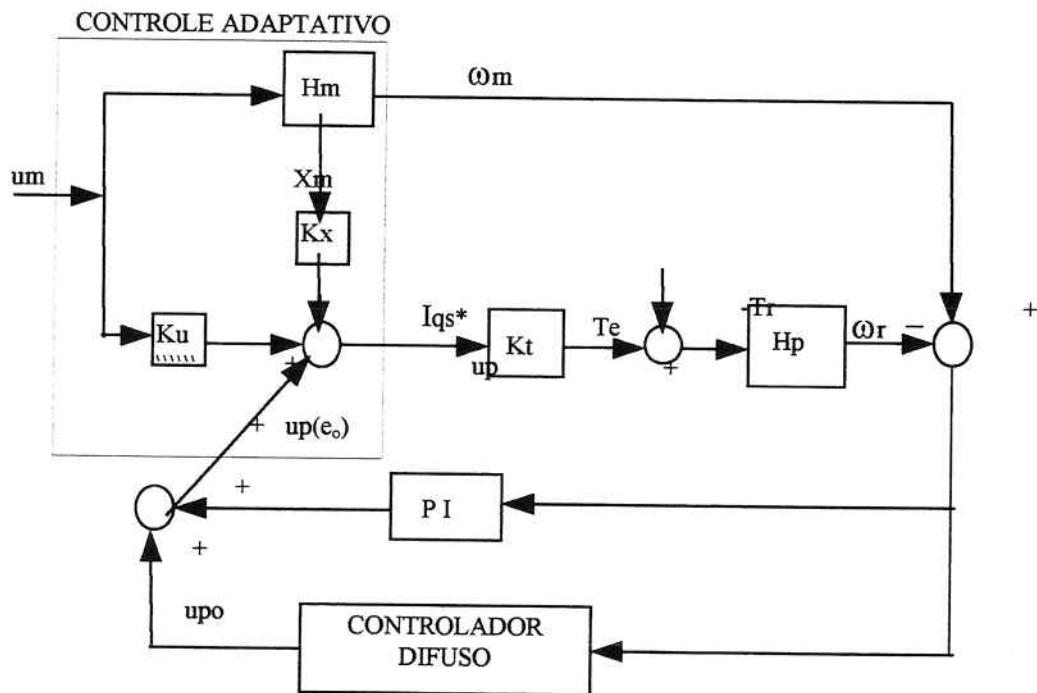


Fig. 2.1 Controlador Difuso-Adaptativo com PI

Suponhamos que as equações de estado da planta a ser controlada, sejam representadas por:

$$X_p = A_p X_p + B_p u_p \quad (2.6)$$

$$Y_p = C_p X_p = \omega_r(s) \quad (2.7)$$

comparando eq. (2.6) com eq. (2.5) temos:

$$X_p = \omega_r(s)/(b K_t) \quad (2.8)$$

$$A_p = -a \quad (2.9)$$

$$B_p = 1 \quad (2.10)$$

comparando eq. (2.8) com eq. (2.7):

$$C_p = b K_t \quad (2.11)$$

De acordo com o desempenho desejado o modelo de referência de 1ª ordem do Controle Adaptativo [10] será:

$$H_m(s) = 8/(s+8) = \omega_m/\omega_m \quad (2.12)$$

de aqui:

$$S\omega_m + 8\omega_m = 8\omega_m \quad (2.13)$$

$$S[\omega_m/(b K_t)] = -8[\omega_m/(b K_t)] \omega_m \quad (2.14)$$

sendo as equações de estado do modelo de referência:

$$\dot{X}_m = A_m X_m + B_m \omega_m \quad (2.15)$$

$$Y_m = C_p X_m = \omega_m \quad (2.16)$$

comparando eq. (2.15) com eq. (2.14), concluímos que:

$$X_m = \omega_m/(b K_t) \quad (2.17)$$

$$A_m = -8 \quad (2.18)$$

$$B_m = 8/(b K_t) \quad (2.19)$$

O objetivo é encontrar a entrada de controle u_p , tal que os estados da planta e sua saída possam acompanhar a saída do modelo de referência. Para obter este objetivo, propomos para a entrada de controle o valor [10]:

$$u_p = K_x X_m + K_u \omega_m + K_e e_o \quad (2.20)$$

onde e_o é o erro entre a saída da planta a controlar e a saída do modelo de referência:

$$e_o = \omega_m - \omega_r \quad (2.21)$$

Definimos como vector erro de estado a :

$$e = X_m - X_p \quad (2.22)$$

derivando eq. (2.22) e usando equações (2.6) e (2.15) obtemos :

$$\dot{e} = A_m X_m + B_m \omega_m - (A_p X_p + B_p u_p) \quad (2.23)$$

Somando e restando $A_p X_m$

$$\dot{e} = A_p(X_m - X_p) - A_p X_m + A_m X_m + B_m \omega_m - B_p u_p \quad (2.24)$$

Substituindo u_p da eq. (2.20) e $X_m - X_p$ da eq. (2.22) na eq. (2.24) e considerando que: $e_o = C_p e$

$$\dot{e} = (A_p - B_p K_e C_p)e + (A_m - A_p - B_p K_x)X_m + (B_m - B_p K_u)\omega_m \quad (2.25)$$

Na eq. (2.25) vemos que se A_p , B_p , C_p , K_e são escolhidos para permitir que:

$(A_p - B_p K_e C_p)$ seja uma matriz Hurwitz (seus autovalores devem ter sua parte real negativa) garante-se a estabilidade do sistema e se:

$$K_x = B_p^{-1} (A_m - A_p) \quad (2.26)$$

$$K_u = B_p^{-1} B_m \quad (2.27)$$

Então o vetor erro na eq.(2.25) cairá a zero assintoticamente, e a saída da planta a controlar seguirá a saída do modelo de referência.

Devido às variações das condições de operação e o pobre conhecimento dos valores dos parâmetros, os verdadeiros parâmetros geralmente se desviam daqueles valores usados no projeto. O desempenho do Controle Adaptativo é sensível às variações dos parâmetros. As experiências mostram que a estabilidade, as forças de controle e as características de seguimento do Controle Adaptativo são muito afetadas pelo termo $K_e e_o$ na eq. (2.20), particularmente pelo fato de ter sido usado um modelo dinâmico com ordem reduzida. Para solucionar este problema propomos a inclusão de um controlador Difuso através da substituição do termo $K_e e_o$ por $u_p(e_o)$ determinado pelo controlador Difuso e o regulador P.I., o que veremos a seguir.

3. Modelagem e análise do Controlador Difuso nos acionamentos C.A.

Um bom trabalho de Engenharia deve ser capaz de usar toda a informação existente de forma efetiva. Para a solução de muitos problemas práticos, uma importante quantidade de informação vem dos especialistas. Há muitas razões para que esta informação seja usualmente expressa em termos Difusos tais como: praticidade, facilidade de comunicação, facilidade de implementação, economia etc. No sentido de fazer uso da informação dos especialistas de maneira sistemática, o assim chamado controle inteligente vem emergendo nos trabalhos da comunidade científica.

Embora a teoria Difusa fosse desenvolvida por Zadeh há tempo, os controladores Difusos só foram aplicados recentemente. Isto devido ao grande progresso alcançado pelos computadores que permitem agora desenvolver complexos algoritmos Difusos. O controlador Difuso Fig. 2.1, basicamente compreende três principais componentes:

Fuzzificação

A lógica Difusa de tomada de decisões

Defuzzificação

3.1 Fuzzyficação

No proposto controlador Fuzzy, as variáveis de entrada no sistema são definidas como: o erro de seguimento de velocidade do rotor e_o (erro entre a velocidade do modelo de referência ω_m e a velocidade do rotor ω_r) e o incremento do erro Δe_o . Estes valores de entrada são medidos no sistema (em mV) e devem ser Fuzzyficados para entrar no mundo Fuzzy (Difuso).

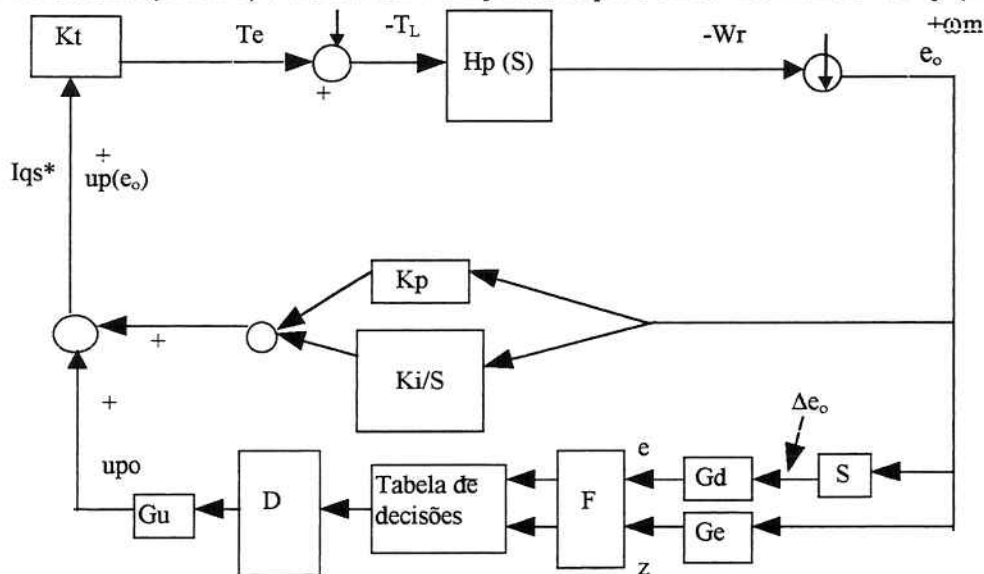


Fig. 3.1 Diagrama de blocos do controlador Fuzzy

Como variável de controle do driver e que seria a saída do sistema Difuso + o Regulador P.I., é escolhida a corrente de correção $u_p(e_o)$ que representa a corrente de torque i_{qs}^* . A corrente $u_p(e_o)$ ou i_{qs}^* vai atuar na entrada do controle vetorial indireto representado por K_t na

Fig. 3.1. A seguir equacionamos o erro e o incremento do erro em um instante de tempo k e um instante de tempo $k-1$ anterior.

$$e_o(k) = \omega_m(k) - \omega_r(k) \quad (3.1)$$

$$\Delta e_o(k) = e_o(k) - e_o(k-1) \quad (3.2)$$

onde :

$\omega_m(k)$ é a velocidade angular de referência (que se quer) no instante k

$\omega_r(k)$ é a velocidade do rotor, no instante k

O erro e_o , o incremento do erro Δe_o e a variável de controle $up(e_o)$ são todas quantificadas no universo Difuso. A primeira operação de Fuzzyficação de e_o e Δe_o , é a quantificação de seus valores de entrada, que é mostrada na tabela 3.1 (nível de quantificação). Os valores correspondentes de entrada do erro e o incremento do erro estão em p.u. já que a simulação se faz todo em p.u.

Tabela 3.1 Quantificação de erro e incremento do erro

Erro e_o	increm. Erro Δe_o	Nível quantif.
-1	-1	-6
-0.5	-0.5	-5
-0.25	-0.25	-4
-0.125	-0.125	-3
-0.0625	-0.0625	-2
-0.03125	-0.03125	-1
0	0	0
0.03125	0.03125	1
0.0625	0.0625	2
0.125	0.125	3
0.25	0.25	4
0.5	0.5	5
1	1	6

Tabela 3.2 Variáveis Lingüísticas

Positivo Grande : P G	Negativo Grande : N G
Positivo Médio : P M	Negativo Médio : N M
Positivo Pequeno : P P	Negativo Pequeno : N P
Zero : Ze	

Como resultado das regras de controle obter-se-ão os valores de $up(e_o)$, mas como estamos trabalhando no mundo Fuzzy estes valores estão Fuzzyficados, e deverão ser

defuzzyficados para sua utilização. Utilizam-se 7 variáveis lingüísticas (que estão caracterizadas por suas funções de Pertinência) para garantir bons resultados, tabela 3.2

Funções de pertinência.

As variáveis Difusas são definidas assinalando valores de um grau de pertinência para cada elemento do universo de discurso Difuso. Existem vários tipos de funções pertinência, mas para maior facilidade usaremos a forma triangular mostradas na fig. 3.2 onde o universo de discurso Difuso está constituído pela excursão entre -6 e +6 da variável das abscissas (variável x na fig. 3.2). O valor da função pertinência pode variar entre 0 e 1 (pertinência total).

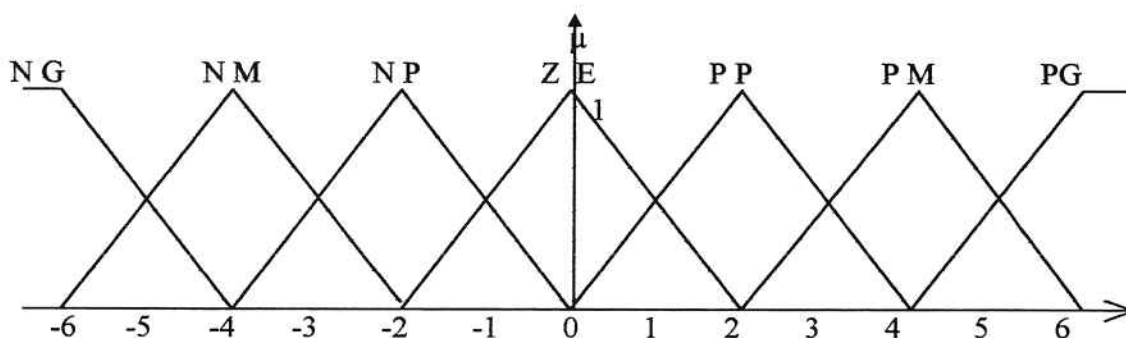


Fig. 3.2 Função pertinência triangular

A função pertinência da variável lingüística de forma triangular está determinada por três números (Fig. 3.2) exemplo P M : {2, 4, 6}. As funções de pertinência de extrema esquerda e extrema direita, por não terem a forma triangular completa estão determinadas por dois números

3.2 A Lógica Difusa de tomada de decisões

3.2.1 Análise dinâmica do sinal-erro de segmento

Produzido o erro entre a velocidade do motor e a velocidade desejada (de referência), a velocidade do rotor será aproximada até a velocidade de referência, mas em forma ondulante e convergente. A característica convergente da velocidade do rotor, logo após produzido o erro, é desenhada na fig. 3.3; [10] em que $c_1, c_2, c_3 \dots$ denotam os pontos de cruzamento pela referência e os pontos $m_1, m_2, m_3 \dots$ são os valores máximos; com tanto que $A_1, A_2, \dots A_3$ denotam faixas de referência para explicar o processo. As polaridades de e_0 e Δe_0 nas faixas de referência.2 são também indicadas na fig. 3.3.

3.2.2 Dedução das regras de controle difusas

As regras do controle Difuso são baseadas na experiência dos especialistas no conhecimento da engenharia do controle, para obter boas características do modelo.

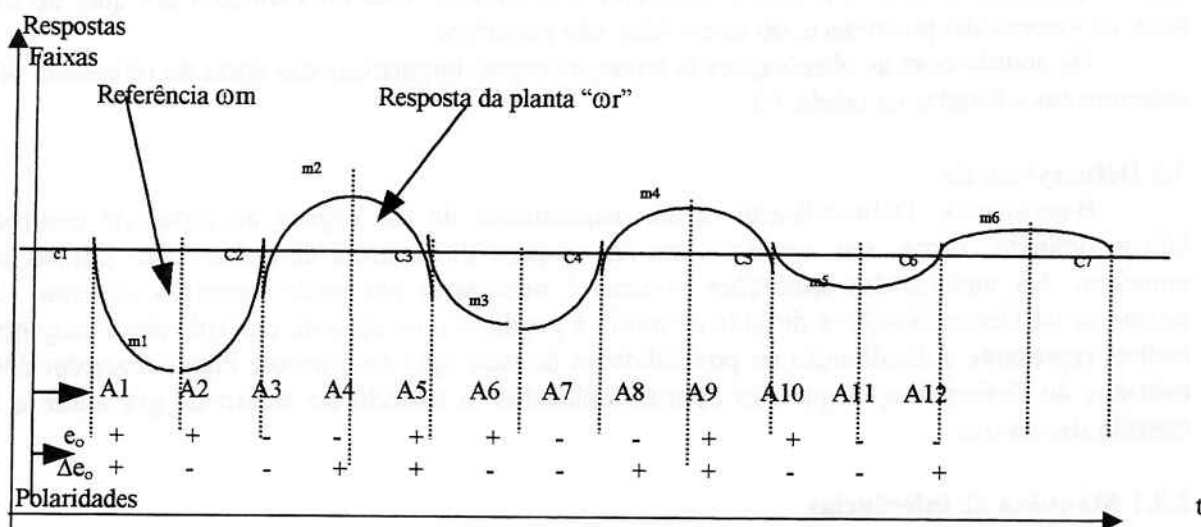


Figura 3.3 Análise dinâmica do sinal-erro do seguimento

Na tabela 3.3 [10] incluem-se o total de regras lingüísticas a usar no controle difuso. Algumas observações usadas para determinar as regras de controle são feitas a seguir.

a) Nas áreas A1, A5, A9 da fig. 3.3 e_o é positivo e crescente nos três casos e Δe_o é positivo também. Então o sinal de correção do erro $up(e_o)$ é posto para reduzir o erro, mas erro positivo significa que a velocidade do rotor ω_r é menor que a velocidade de referência ω_m ; portanto $up(e_o)$ deve ser positivo para incrementar a velocidade do rotor.

Tabela 3.3 Regras lingüísticas

Δe_o	E_o	NG	NM	NP	ZE	PP	PM	PG
NG		NG	NG	NG	NG	ZE	ZE	ZE
NM		NG	NG	NM	NM	ZE	ZE	ZE
NP		NG	NM	NP	NP	PP	PP	PM
ZE		NG	NM	NP	ZE	PP	PM	PP
PP		NM	NP	NP	PP	PP	PM	PG
PM		ZE	ZE	ZE	PM	PM	PG	PG
PG		ZE	ZE	ZE	PG	PG	PG	PG

b) Nas áreas A2, A6, A10, : e_o é positivo e Δe_o é negativo; o erro é ainda positivo, mas desde que esteja decrescendo gradualmente, a entrada de controle $up(e_o)$ é posta para torná-lo cada vez menor.

As observações nas áreas A3, A7, A11 e A4, A8, A12 são duais daquelas listadas em a) e b), respectivamente, pelo que na tabela 3.3 se nota uma simetria entre o segundo quadrante e o

quarto quadrante e entre o primeiro quadrante e o terceiro, mas uma simetria em que, de um lado, os valores são positivos e, do outro lado, são negativos.

De acordo com as observações já feitas, as regras linguísticas nas áreas de referência são selecionadas e listadas na tabela 3.3.

3.3 Defuzzyficação

Basicamente, Defuzzyficação é um mapeamento de um espaço de ações de controle Difuso definido sobre seu universo, em um espaço de controle de ações não Difuso ou numérico. Na maioria das aplicações práticas é necessário um valor numérico concreto. A estratégia de Defuzzificação é dirigida de modo a produzir uma ação de controle não Fuzzy que melhor represente a distribuição de possibilidades de uma ação de controle Fuzzy. Existem dois métodos de Defuzzificação que são os mais utilizados: o método do centro de gravidade e o método das alturas.

3.3.1 Máquina de inferências

Os dois métodos de Defuzzificação mencionados atuam sobre uma área de pertinência preparada a partir da tabela 3.3 pela assim chamada máquina de inferência. Existem vários métodos de inferência. Os mais conhecidos são:

- Método de Mandani (min-max)
- Método de Larsen (produto máximo- produto soma)
- Método de Sugeno (a etapa de decisão entrega um valor fixo de saída ponderado das entradas)
- Método de Tsukamoto (similar ao de Sugeno variando a fórmula de saída).

Não existe nenhuma lógica para definir qual dos métodos é melhor ou qual é o que devemos usar para um problema determinado; o uso de um ou outro depende dos resultados, nós usaremos o Método de Mandani com alguma modificação para adaptá-lo ao controle de motores e ao método das alturas

3.3.2 Método das alturas [15]

Cada valor de entrada de e_o ou Δe_o atinge no máximo duas funções pertinência ver fig. 3.4.a e b; o grau de pertinência do valor de entrada com relação às outras funções pertinência é zero. Muitas operações computacionais podem ser evitadas definindo-se primeiro um índice de faixas de trabalho J, e onde se localiza o valor de entrada; por exemplo J = 3 para $e_o = -3.5$ (em valor Difuso) ver fig. 3.4.a. O roteiro é o seguinte:

1) Na fig. 3.4.a incluímos a variável J que define as faixas do universo de discurso na variável e_o ; cada valor de entrada e_o dá um valor de pertinência não nulo em algumas destas faixas. Usamos a terminologia do Software de simulação Simnon para representar esta variável J, e já que o Simnon não permite escrever uma equação em uma extensão maior que uma linha, usaremos variáveis auxiliares J1, J2... toda vez que chegemos ao final da linha.

J = if $e_o < -P1$ then 1 else if $e_o < -P2$ then 2 else if $e_o < -P3$ then 3 else if $e_o < 0$ then 4 else J1

J1 = if $e_o < P3$ then 5 else if $e_o < P2$ then 6 else if $e_o < P1$ then 7 else 8

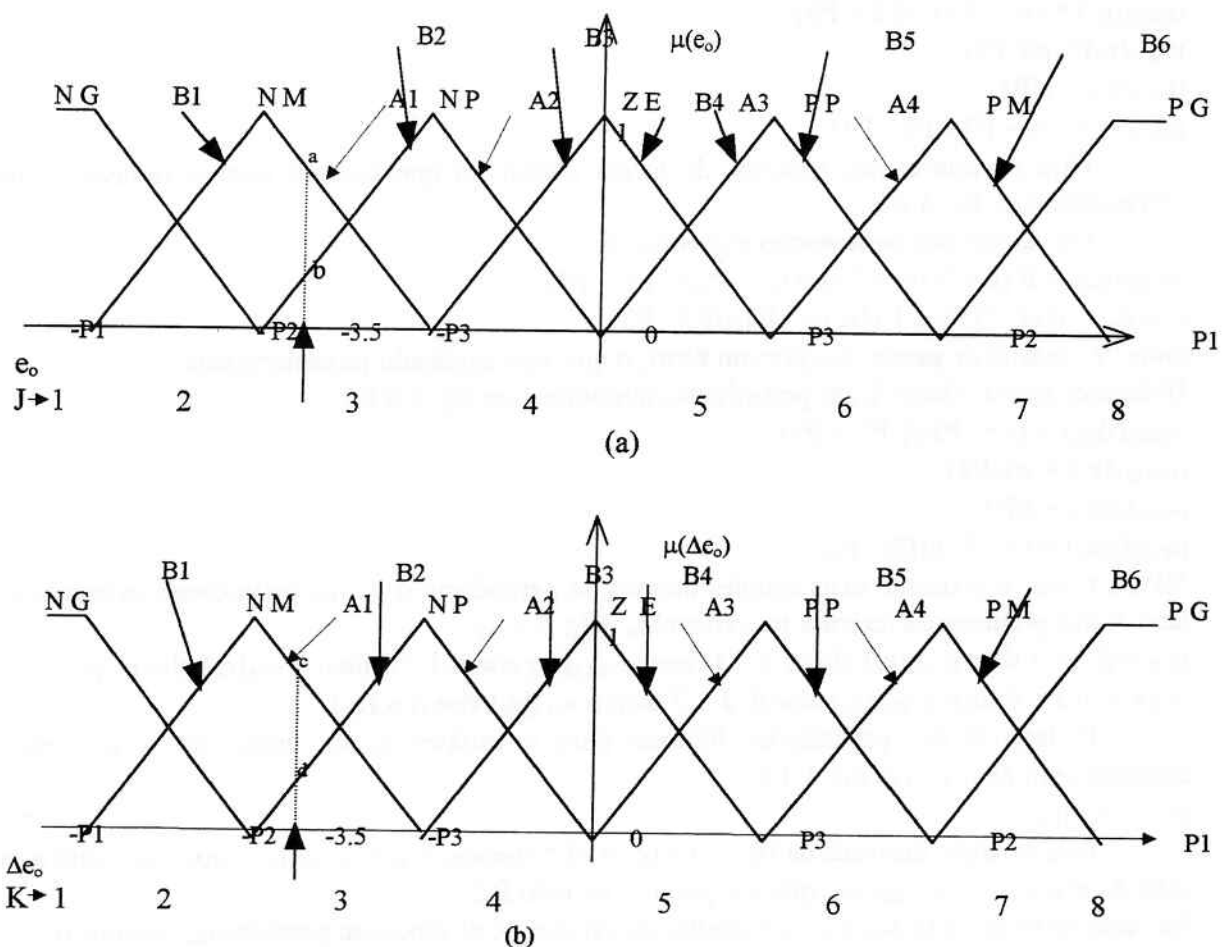


Fig. 3.4 Funções pertinência triangulares método das alturas:

(a) para entrada de e_o (b) entrada de Δe_o .

Na fig. 3.4.b incluímos a variável K para a variável Δe_o ; usando a técnica anterior temos:
 $K = \text{if } \Delta e_o < -P1 \text{ then } 1 \text{ else if } \Delta e_o < -P2 \text{ then } 2 \text{ else if } \Delta e_o < -P3 \text{ then } 3 \text{ else } K1$
 $K1 = \text{if } \Delta e_o < 0 \text{ then } 4 \text{ else if } \Delta e_o < P3 \text{ then } 5 \text{ else if } \Delta e_o < P2 \text{ then } 6 \text{ else } K2$
 $K2 = \text{if } \Delta e_o < P1 \text{ then } 7 \text{ else } 8$

Os valores de P1, P2, P3 de acordo com tabela de quantificação 3.1 é como se segue:

P1 = 6 corresponde a e_o ou $\Delta e_o = 1$

P2 = 4 corresponde a e_o ou $\Delta e_o = 0.25$

P3 = 2 corresponde a e_o ou $\Delta e_o = 0.0625$

2) Definimos todas as funções de pertinência com as quais vamos trabalhar, usando a terminologia do Simmon.

Para a variável e_o os valores das pertinências extremas são:

$\mu_{NG}(e_o) = \text{if } (J < 2) \text{ then } 1 \text{ else } (e + P2)/(-P1 + P2)$

$\mu_{PG}(e_o) = \text{if } (J > 7) \text{ then } 1 \text{ else } (e - P2)/(P1 - P2)$

onde "e" resulta de passar e_o por um filtro, o que será explicado posteriormente

Definimos agora o lado A das pertinências interiores (ver fig. 3.4.a)

$$\mu_{NMA}(e_o) = (e + P3)/(-P2 + P3)$$

$$\mu_{NPA}(e_o) = e/(-P3)$$

$$\mu_{PPA}(e_o) = e/P3$$

$$\mu_{PMA}(e_o) = (e - P3)/(P2 - P3)$$

Para a variável Δe_o atuamos de forma similar ao que fizemos com a variável e_o mas representado na fig. 3.4.b

Os valores das pertinências extremas são:

$$\mu_{NG}(\Delta e_o) = \text{if } (K < 2) \text{ then } 1 \text{ else } (z + P2)/(-P1 + P2)$$

$$\mu_{PG}(e_o) = \text{if } (J > 7) \text{ then } 1 \text{ else } (z - P2)/(P1 - P2)$$

onde “z” resulta de passar Δe_o por um filtro, o que será explicado posteriormente.

Definimos agora o lado A das pertinências interiores (ver fig. 3.4.b)

$$\mu_{NMA}(\Delta e_o) = (z + P3)/(-P2 + P3)$$

$$\mu_{NPA}(\Delta e_o) = z/(-P3)$$

$$\mu_{PPA}(\Delta e_o) = z/P3$$

$$\mu_{PMA}(\Delta e_o) = (z - P3)/(P2 - P3)$$

3) Para tornar o processo mais simples unimos na pertinência μ_{J1} , as pertinências extremas e o lado A das pertinências internas na variável e_o (fig. 3.4.a)

$$\mu_{J1} = \text{if } J < 3 \text{ then } \mu_{NG}(e_o) \text{ else if } J < 4 \text{ then } \mu_{NMA}(e_o) \text{ else if } J < 5 \text{ then } \mu_{NPA}(e_o) \text{ else } \mu_{J1a}$$

$$\mu_{J1a} = \text{if } J < 6 \text{ then } \mu_{PPA}(e_o) \text{ else if } J < 7 \text{ then } \mu_{PMA}(e_o) \text{ else } \mu_{PG}(e_o)$$

O lado B das pertinências internas para a variável e_o foi unido em μ_{J2} , mas é complemento de μ_{J1} . ver fig. 3.4.a

$$\mu_{J2} = 1 - \mu_{J1}$$

Pela situação ilustrada na fig. 3.4.a ($e_o = -3.5$) temos, $\mu_{J1} = \mu_{NMA}(e_o)$ que é o ponto a, no lado A1 e $\mu_{J2} = 1 - \mu_{NMA}(e_o)$ que é o ponto b no lado B2

Na variável de entrada Δe_o e com o auxílio da variável K de faixas de pertinência, teremos o mesmo procedimento que o feito com J em e_o .

$$\mu_{K1} = \text{if } K < 3 \text{ then } \mu_{NG}(\Delta e_o) \text{ else if } K < 4 \text{ then } \mu_{NMA}(\Delta e_o) \text{ else } \mu_{K1a}$$

$$\mu_{K1a} = \text{if } K < 5 \text{ then } \mu_{NPA}(\Delta e_o) \text{ else if } K < 6 \text{ then } \mu_{PPA}(\Delta e_o) \text{ else } \mu_{K1b}$$

$$\mu_{K1b} = \text{if } K < 7 \text{ then } \mu_{PMA}(\Delta e_o) \text{ else } \mu_{PG}(\Delta e_o)$$

O lado B das pertinências internas para a variável Δe_o é unido em μ_{J2} mas é o complemento de μ_{J1} ver fig. 3.4.b

$$\mu_{J2} = 1 - \mu_{J1}$$

4) Valorizam-se os antecedentes (satisfação de antecedentes) usando o operador Mínimo, o que dará quatro regras que definem as pertinências usadas na determinação da média das alturas para cada par de valores de entrada (e_o , Δe_o).

$$\text{Regra 1 : } \mu_{RA} = \min(\mu_{J1}, \mu_{K1})$$

$$\text{Regra 2 : } \mu_{RB} = \min(\mu_{J1}, \mu_{K2})$$

$$\text{Regra 3 : } \mu_{RC} = \min(\mu_{J2}, \mu_{K1})$$

$$\text{Regra 4 : } \mu_{RD} = \min(\mu_{J2}, \mu_{K2})$$

5) Usando as faixas de pertinência auxiliares, J e K, percorremos toda a tabela de regras lingüísticas 3.3, para determinar o valor das correntes de saída concordantes com cada uma das

quatro regras enunciadas em 4); e que, para simplificação, denominaremos como Ia, Ib, Ic, Id.

Por exemplo, a corrente I_a concordante com a regra 1 obtém-se a partir das pertinências auxiliares μ_{J1} , μ_{K1} da seguinte maneira:

$I_a = \text{if}(J < 3 \text{ and } K < 3) \text{ then } I1 \text{ else if}(J < 4 \text{ and } K < 3) \text{ then } I2 \text{ else if}(J < 5 \text{ and } K < 3) \text{ then } I3 \text{ else} \dots$

Com $K < 3$ percorrem-se todas as faixas de J ; logo com $K < 4$ todas as faixas de J e assim até concluir com todas as faixas de K . Com este procedimento percorrem-se todos os valores da tabela de regras lingüísticas, (tabela 3.3) e I_a vem a ser a soma de todos os possíveis valores, não é propriamente uma soma, já que só um, de todos os possíveis valores, vai-se efetivar.

Se os valores de entrada são: $e_o = -3.5$, $\Delta e_o = -3.5$, a faixa de pertinência de J é 3, o valor de μ_{J1} que lhe corresponde é: $a = 0.75$ o que acontece dentro da pertinência $\mu_{NMA}(e_o)$ ver Fig. 3.4.a; a faixa de pertinência de K é 3, o valor de μ_{K1} que lhe corresponde é: $c = 0.75$ e isto acontece dentro da pertinência $\mu_{NMA}(\Delta e_o)$ ver Fig. 3.4.b.

$\mu_{NMA}(e_o)$ e $\mu_{NMA}(\Delta e_o)$ determinam que, para entrar na tabela de regras lingüísticas entremos com "NM" para a variável de entrada e_o e com "NM" para a variável de entrada Δe_o ; dessa maneira determinamos o valor da corrente de saída que corresponde a esses dois valores e que segundo a tabela 3.3 é "NG"; para determinar o valor de corrente que lhe corresponde vamos na Fig. 3.5. O valor que corresponde à "NG" é -1 (em p.u.), I_a será igual à -1.

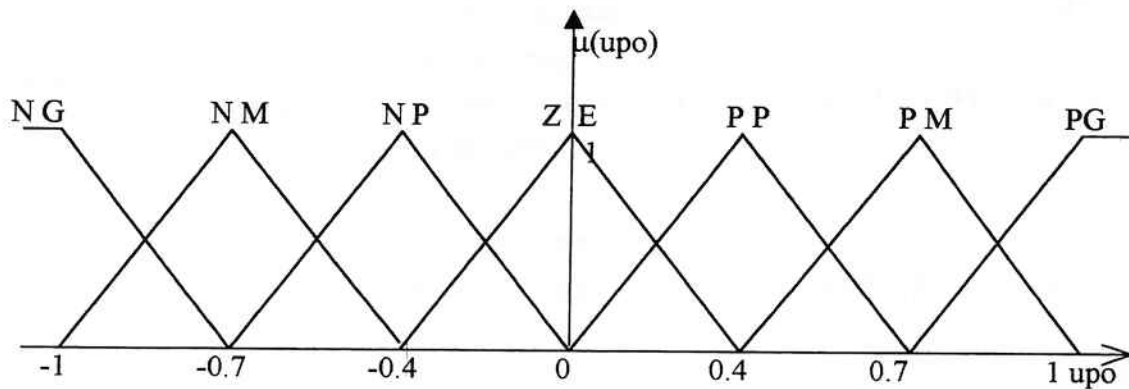


Fig. 3.5 Funções pertinência triangular da corrente de saída de controle upo

Se na tabela 3 temos como valor lingüístico de saída "NM", o valor de corrente que lhe corresponde segundo a fig. 3.5 é -0.7, o mesmo valor de μ_{po} para seu valor máximo de pertinência. Da mesma forma se procede para os outras variáveis lingüísticas da Fig. 3.5

Segue-se o mesmo procedimento para definir I_b a partir de μ_{J1} , μ_{K2} ; I_c a partir de μ_{J2} , μ_{K1} ; I_d a partir de μ_{J2} , μ_{K2}

6) Cálculo de i^*qs diante do método das alturas:

$$i^*qs(p.u.) = \frac{\mu_{RA} I_a + \mu_{RB} I_b + \mu_{RC} I_c + \mu_{RD} I_d}{\mu_{RA} + \mu_{RB} + \mu_{RC} + \mu_{RD}} \quad (3.3)$$

3.4 Ajuste do controlador Difuso [10]

Os principais propósitos do ajuste do controlador Difuso no esquema de controle proposto são:

Primeiro - para as entradas ao sistema e_0 e Δe_0 , sintetizar um sinal de controle amplificado nas cercanias de zero (set point) para aumentar a capacidade adaptativa do controlador Difuso. Segundo - para a saída de controle u_0 , evitar as oscilações que podem ocorrer perto de zero; o ajuste de sensibilidade das entradas e da saída se faz dependente do erro de velocidade e_0 , com o que se obtém um melhor desempenho.

São utilizados os seguintes blocos de ajuste: Ge para a entrada do erro e_0 , Gd para a entrada do incremento do erro Δe_0 , e Gu para a saída u_0 . As saídas dos blocos Ge e Gu chamamos “e” e “z” respectivamente, nas formulações do item 3.3.2.

As formulações matemáticas dos blocos de ajuste são mostradas a seguir:

$$Ge = \begin{cases} K1 & \text{para } |e_0| \leq a_0 \\ K1 - (K1 - K2)(|e_0| - a_0)/(a_1 - a_0) & \text{para } a_0 < |e_0| < a_1 \\ K2 & \text{para } |e_0| \geq a_1 \end{cases} \quad (3.4)$$

$$Gd = \begin{cases} K3 & \text{para } |e_0| \leq a_0 \\ K3 - (K3 - K4)(|e_0| - a_0)/(a_1 - a_0) & \text{para } a_0 < |e_0| < a_1 \\ K4 & \text{para } |e_0| \geq a_1 \end{cases} \quad (3.5)$$

$$Gu = \begin{cases} 0 & \text{para } |e_0| \leq b_0 \\ K5 + K6(|e_0| - b_0) & \text{para } |e_0| \geq b_0 \end{cases} \quad (3.6)$$

Sendo :

$a_0 = 0,003$; $a_1 = 0,005$; $K1 = 60$; $K2 = 20$; $K3 = 30$; $K4 = 10$

$b_0 = 0,0001$; $K5 = 2$; $K6 = 30$

As funções de Ge e Gd indicam que a sensibilidade ao erro (e_0) e o incremento de erro (Δe_0) serão ampliadas linearmente, assim como suas magnitudes reduzir-se-ão gradualmente. Já no processo de simulação consegue-se melhor desempenho, conforme a máquina com a qual estamos trabalhando, multiplicando-se e_0 e Δe_0 previamente, na entrada do bloco Ge, por um determinado valor que se consegue no processo de ajuste da simulação.

A saída do controlador Difuso geralmente pode mostrar uma oscilação em torno do set point (quando o erro está se aproximando de zero). Para resolver este problema, a função Gu da eq. (3.6) é enfatizada para melhorar a resposta transitória de velocidade e permitir que a saída do controlador Difuso seja zero, quando o erro chega a ser menor que o limite estabelecido b_0 . Neste instante, só o controlador PI é excitado para eliminar o erro de estado estacionário. Assim, a inerente conduta oscilante em torno do set point apresentada pelo controlador Difuso pode ser evitada.

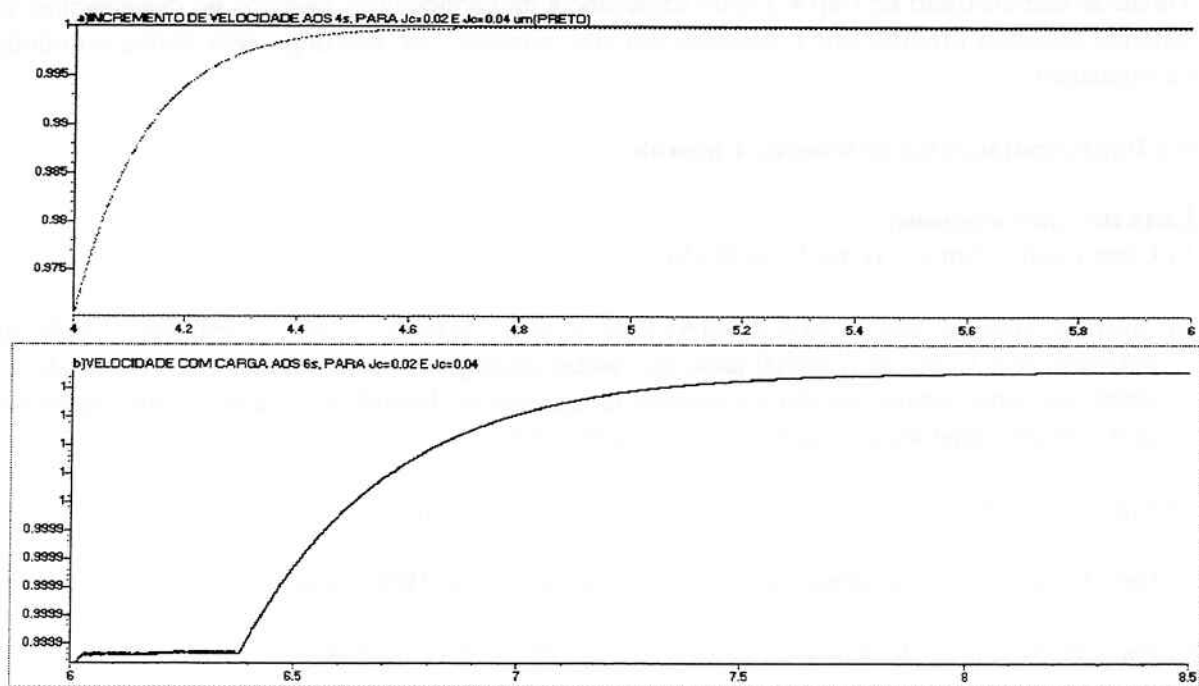
4. Simulação

Os Trabalhos de simulação permitem determinar o desempenho de cada um dos métodos estudados e concluir que a associação do Controle Fuzzy com o Controle adaptativo permite complementar suas qualidades de invariância ante variação dos parâmetros o que faz o sistema praticamente independente de temperatura, atritos, desgastes, oscilação de carga e saturação. Isto é muito importante quando se quer fazer o estudo do sistema motor-carga que sabemos é não linear, onde a maior dificuldade o constituem os parâmetros que são variáveis. Para a simulação se inclui junto ao controle vetorial indireto o Controle Adaptativo, o Controle Difuso e o regulador P.I.

Na figura 4.1.a é simulada a velocidade angular do rotor " ω_r " onde se pôs em destaque: a variação repentina da velocidade de 0.9 P.U. a 1 P.U. aos 4 segundos e a variação repentina de carga de 0 P.U. a 0.5 P.U. aos 6 segundos, sendo que esta última não se consegue distinguir bem pelo que se amplia na fig. 4.1.b

A figura 4.1.b mostra em detalhe a presença da carga abrupta na variável de saída velocidade " ω_r " em função do tempo aos 6 segundos e se aprecia que a variação da velocidade com a carga é insignificante, da ordem de um dezmilésimo do valor referencial (1,0 pu).

Tanto na fig. 4.1.a como na fig. 4.1.b apresenta-se a variação do parâmetro J_c (momento de inércia da carga) que se varia de $J_c=0,02$ a $J_c=0,04$. Para cada J_c se observa uma curva



praticamente coincidente com a outra, o que determina que a inclusão do controlador Difuso faz o sistema praticamente se tornar independente da variação dos parâmetros elétricos e mecânicos.

Fig. 4.1 Controle Difuso Adaptativo com PI, velocidade variando o parâmetro J_c .

5. Levantamentos e resultados obtidos a partir de um acionamento de Controle Vetorial implementado em conjunto com o Controle Adaptativo e a Lógica Difusa.

5.1 Introdução

Com o protótipo atuaremos de forma similar à simulação: incrementando primeiro a velocidade do motor (desta vez em uns 10%) assim que tenha alcançado o regime permanente, para logo depois introduzir uma carga repentina de 50% do valor nominal. Isto será feito para dar validade os estudos Teóricos desenvolvidos e verificar o desempenho do sistema de controle.

O Sistema de Controle compreende: Controle Vetorial Indireto, Controle Adaptativo, Regulador PI e Controle Difuso. O Controle Vetorial Indireto não será implementado, sendo que já é vendido incluído no inversor sem representar um significativo custo adicional. O Controle Adaptativo, o Regulador PI e o Controle Difuso serão implementados em tempo real mediante um programa feito na linguagem "C" e com o auxílio de um microcomputador Pentium II.

A variação dos parâmetros é a principal causa para considerar o sistema não linear. Tendo-se demonstrado no Cap 4 a total irrelevância da variação dos mesmos no desempenho do sistema, podemos prever que o desempenho que obteremos no protótipo será similar ao obtido na simulação.

5.2 Implementação do Sistema de Controle

Lista de equipamentos:

- 1) Computador Pentium II, 64 M de RAM
- 2) Inversor Siemens 6SE31-MICROMASTER modelo MM75/2, 230 V, trifásico, 750W de potência, tem Controle Vetorial incluído; saídas analógicas proporcionais: na velocidade do rotor, corrente, torque, tensão no circuito intermediário, frequência através de um conversor D/A, entrada analógica através de um conversor A/D .
- 3) Motor assíncrono: de 1 C.V., 380/220 V, 3.8 A, 1700 r.p.m.
- 4) Gerador de corrente contínua de 0.75 C.V., 180 V, 3.8 A, 1800 r.p.m.
- 5) Placa de Aquisição de dados Advantech PLC-818L, 12 bits, 40 KHz,
- 6) Borneira Digital PCLD-780, para fazer a conexão Conversor – Inversor

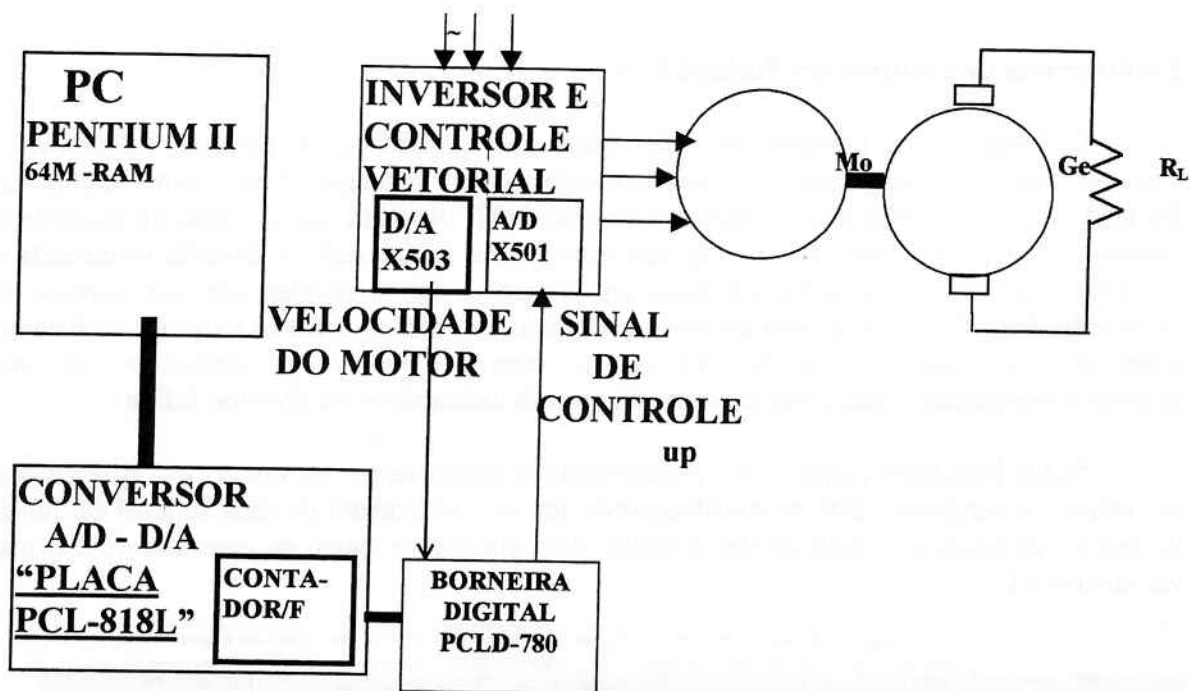


Fig. 5.1 Sistema de controle

5.3 Processo

Na Fig. 5.1, a Placa de aquisição de dados PCL-818L recebe o sinal analógico proporcional à velocidade do motor, emitido nos bornes 1 e 2 de X503 no Inversor; diante de uma conversão A/D o envia ao Computador.

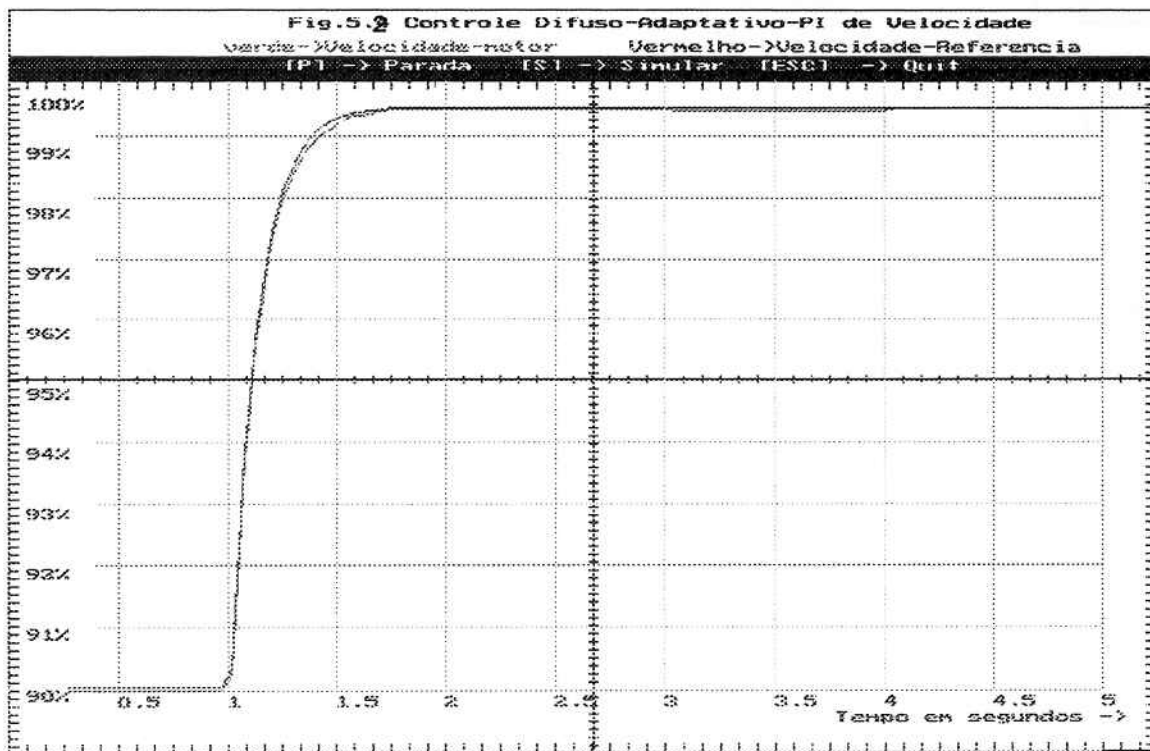
Através de um programa em Borland C++ ,a velocidade do motor se compara com a velocidade de referência e o erro se processa usando Controle Adaptativo, Regulador PI e Controle Difuso, para gerar um sinal de controle Digital “up” . A Placa de aquisição de dados converte este sinal Digital (up) em analógico e através de sua saída analógica envia-se aos bornes 3 e 4 de X501 no inversor, com a finalidade que a velocidade do motor acompanhe a velocidade de referência.

Nos bornes 1, 3 e 4 em X501 do inversor, conecta-se um potenciômetro de $4.7K\Omega$. No borne 1 tem-se a tensão de 10V proporcionada pelo Inversor; no borne 4 tem-se 0V; assim, nos bornes 3 e 4 obtém-se uma tensão que varia entre 0 e 10 volts, o que produzirá uma velocidade no motor entre 0 rpm e a velocidade nominal (1700 rpm). Fixando a posição do potenciômetro num valor que corresponda à velocidade inicial requerida, o controle realimentado feito através da tensão de controle up se concretiza ao aplicar up nos bornes 3 e 4.

5.4 Programa de Controle em Borland C++

O Programa de Controle de velocidade, que compreende o controle Adaptativo, o Controle Fuzzy e o Regulador P.I. foi desenvolvido em linguagem C++ com compilador Borland 4.0 e interface gráfica baseada no sistema DOS, isto para que o tempo do controle do sistema se aproxime o mais possível de um controle em tempo real. A filosofia empregada na elaboração do mesmo consistiu em fazer um programa ágil e simples mas que cumpra seu prometido. Para fazer o programa em Simnon é preciso identificar todas as variáveis de Estado e isolar suas derivadas, sem se importar com a ordem e o número de variáveis e constantes presentes na equação. Toda a sua estrutura é montada utilizando o Ne (Norton Editor)

Numa linguagem como o "C" é importante o ordenamento em que se vão apresentando as variáveis e constantes. Em um trabalho prévio fez-se o isolamento de cada variável em função do tempo, deixando-a o mais simples possível, para abreviar o tempo de operação do sistema - ver apêndice C.



5.5 Testes e resultados do Controle

Na Fig. 5.2 apresenta-se o gráfico do teste realizado com o Controle Difuso Adaptativo e regulador P.I. feito em Borland C++. Estando o motor numa velocidade base de 675 rpm; num percurso de 4 segundos apresenta-se: primeiro a variação de 10% na velocidade a que começa em um segundo, aos três segundos se coloca uma carga repentina de 50% do torque nominal.

O resultado mostra que a velocidade do motor (cor verde no gráfico) acompanha muito de perto a velocidade de referencia (cor vermelho no gráfico) e a carga repentina não faz variação visível na velocidade do motor a pesar da grande amplificação que tem o gráfico, isto confirma a grande estabilidade que adquire o sistema quando se incorpora o Controle Difuso o Controle Adaptativo e o Regulador P.I.

6 Conclusões:

- 1 - O estudo e simulação do sistema considerando sua característica não linear, é facilitado pela praticamente invariabilidade do sistema ante mudança dos parâmetros
- 2 - O Controle Vetorial-Difuso-Adaptativo com PI, pela característica de invariabilidade ante mudança dos parâmetros, conseguiu-se representar matematicamente de forma simplificada, em Borland "C++" o qual diante um computador permitiu sua implementação em tempo real, ganhando-se com a alta performance que este sistema apresenta.
- 3 - De acordo com os resultados práticos obtidos pode-se concluir que o sistema implementado é robusto, oferece grande estabilidade ao sistema e obtém-se resposta rápida ao controle na velocidade desejada do motor.
- 4 - O uso cada vez maior dos motores de indução para aqueles casos onde é requerido controlar a velocidade do motor com muita exatidão, permite obter todas as vantagens que o motor de indução tem sobre o motor de corrente contínua, fundamentalmente os que se referem ao custo da máquina e ao custo de manutenção.

A principal contribuição neste trabalho foi o alto grau de desempenho obtido na simulação do controle Difuso-Adaptativo com P.I., que supera aquele obtido na bibliografia especializada. Isto é importante porque as mesmas constantes do regulador P.I. e controlador difuso obtidas na simulação, foram usados no programa em Borland C++ na implementação em tempo real, com ótimo resultado. Por outro lado a adaptação do método das alturas neste processo tanto na simulação como na implementação permitiu minimizar o tempo nas múltiplas simulações processadas e realizar um controle mais efetivo na implementação em tempo real.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- 1 - B.K. Bose, "Power Electronic and A.C. drives." Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1986.
- 2 - W. Leonhard, "Control of Electrical drives" Electric Energy Systems and Engineering Series, 1990.
- 3 - B. Atkins, "Teoria General de las Maquinas Electricas" Ediciones Urmo. Bilbao 1967
- 4 - N. De Oliveira "Proposta de um sistema de controle de motores de indução, independente das alterações de parâmetros de máquina, usando o método vectorial, com curvas características de relação tensão/frequência." Tese USP 1995
- 5 - I.D. Landau, "Adaptive Control": The model reference approach. New York: Marcel Dekker, 1982.

- 6 - Li-Xin Wang, "Adaptive Fuzzy Systems and Control" Design and Stability Analysis, University of California at Berkeley, Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1994
- 7 - Earl Cox, "Fuzzy Systems Handbook" A Practitioner's Guide to Building, Using, and Maintaining Fuzzy Systems, Academic Press, Inc. 1994
- 8 - Rogelio Palomera Garcia. "Fuzzy sets and Systems" École Polytechnique Federale de Lausanne Technical report, 1993
- 9 - M. Ouyang, C.M. Liaw, C. T. Pan, "Model reduction by power decomposition and frequency response matching", IEEE Trans Automat. Contr., vol. AC-32, no. 1 pp. 59-62, 1987
- 10 - Ying, Shieh Kung and Chang Ming Liaw - "A Fuzzy controller improving a Linear Model Following controller for motor drives".
IEEE Trans, on Fuzzy Syst. vol. 2 N^o 3 pp 194 -202, 1994
- 11 - L. A. Zadeh, "Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Processes" IEEE Trans on Systems, Man, and Cybernetics, vol 3, No. 1, pp. 28-44, 1973
- 12 - C.C. Lee - "Fuzzy logic in control systems fuzzy logic controller" Part I e Part II IEEE Trans Syst. Man and Cibern, vol 21 N^o 2 Part I pp 404-418-1990 Part II pp 419-436, 1990
- 13 - C. M. Liaw, J. B. Wang "Design and Implementation of a Fuzzy Controller for a High Performance Induction Motor Drive", IEEE Trans on Systems, Man, and Cybernetics, vol. 21, no. 4, pp. 921-929, 1991
- 14 - P. Goreau, A. Ibaliden "Robustness of a Fuzzy Controller for Induction Machine" Electrimacs'96 Saint-Nazaire September 17-18-19, 1996
- 15 - G. Sousa, B. K. Bose, M. G. Simoes "A Simulation-Implementation Methodology of a Fuzzy Logic Based Control System", 3^o Congresso Brasileiro de Eletrônica de Potência - 1995
- 16 - C.M. Liow, T.S. Liu, A.H. Liu, Y.T. Chen, and C.J. Lin, "Parameter estimation of excitation systems from sampled data" IEEE. Trans, Automatic Contr., vol. 37, no. S, pp. 663-666, 1992

BOLETINS TÉCNICOS - TEXTOS PUBLICADOS

- BT/PEA/9301 - Alguns Aspectos do Problema de Planejamento de Sistemas de Transmissão sob Incertezas - CARLOS MARCIO VIEIRA TAHAN, ERNESTO JOÃO ROBBA
- BT/PEA/9302 - Vibrações em Motores Elétricos Provocadas por Forças Magnéticas - ORLANDO SILVIO LOBOSCO, HENRIQUE PRADO ALVAREZ
- BT/PEA/9303 - Corrente Contínua em Alta Tensão: Aplicação de Equipamentos Elétricos e Modelos para Análises de Confiabilidade - LINEU BELICO DOS REIS
- BT/PEA/9504 - Automação e Informatização Aplicadas a Controle e Supervisão de Processos de Pesagem - EVALDO ARAGÃO FARQUI, EDUARDO MÁRIO DIAS
- BT/PEA/9505 - Modernização e Reabilitação de Usinas Hidrelétricas - DJALMA CASELATO, ADERBAL DE ARRUDA PENTEADO JR.
- BT/PEA/9506 - Estudo do Campo Elétrico Provocado por Linhas de Transmissão em Corrente Alternada - CELSO PEREIRA BRAZ, JOSÉ ANTONIO JARDINI
- BT/PEA/9507 - Aspectos Sobre Processos Automatizados de Pesagem Rodoferroviária: Uma Proposta de Modernização de Postos em Operação - SERGIO LUIZ PEREIRA, CÍCERO COUTO DE MORAES
- BT/PEA/9508 - Usinas Hidrelétricas em Rotação Ajustável: Novas Premissas para o Planejamento Energético - MARCO ANTONIO SAIDEL, LINEU BELICO DOS REIS
- BT/PEA/9509 - Desenvolvimento de um Sistema de Automação de Subestações pela integração de Módulos de Software e Hardware Existentes no Mercado Brasileiro - L. C. MAGRINI, J. A. JARDINI, S. COPELIOVITCH, N. KABA FILHO
- BT/PEA/9510 - Proposta de um Modelo para Estudos de Aplicação de Compensadores Estáticos em Sistemas de Potência - JOSÉ TOSHIYUKI HONDA, LUIS CERA ZANETTA JÚNIOR
- BT/PEA/9511 - Metodologia e Testes para Redução das Distâncias Elétricas entre Fases de Barramentos de Subestações de 138kV Abridadas, ANDRÉ NUNES SOUZA, ORLANDO SILVIO LOBOSCO
- BT/PEA/9512 - Avaliação da Severidade da Poluição para o Dimensionamento da Isolação das Redes Elétricas - ARNALDO G. KANASHIRO, GERALDO F. BURANI
- BT/PEA/9513 - Processos Auto-Adaptativos para Cálculo de Campos Eletromagnéticos pelo Método dos Elementos Finitos - LUIZ LEBENSZTAJN, JOSÉ ROBERTO CARDOSO
- BT/PEA/9514 - Investigação Experimental sobre os Arcos Sustentados em Sistemas Elétricos de Baixa Tensão - FRANCISCO H. KAMEYAMA, GERALDO F. BURANI
- BT/PEA/9515 - Fast Voltage Compensation: A Mean to Improve the Quality of Energy Supply - H. ARANGO, JOSÉ ANTONIO JARDINI
- BT/PEA/9516 - Modelo Avançado para Planejamento de Sistemas Energéticos Integrados Usando Recursos Renováveis - LUIZ ANTONIO ROSSI, LINEU BELICO DOS REIS
- BT/PEA/9601 - Metodologias para Planejamento de Sistemas de Distribuição: Estado-da-Arte e Aplicações - PAULO ROBERTO NJAIM, CARLOS MARCIO VIEIRA TAHAN
- BT/PEA/9602 - Integração de Relés Digitais em Sistemas de Automação de Subestação - JERÔNIMO CAMILO SOARES JR., JOSÉ A. JARDINI, LUIZ C. MAGRINI
- BT/PEA/9603 - Paradigma de Planejamento sob Incertezas - Aplicação ao Planejamento dos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica - ALBERTO BIANCHI JUNIOR, LINEU BELICO DOS REIS
- BT/PEA/9604 - Um Sistema de Controle de Velocidade para Motor de Indução Trifásico - CELSO KAZUMI NAKAHARADA, ADERBAL DE ARRUDA PENTEADO JR.
- BT/PEA/9605 - Controle Vetorial de Motores de Indução, Independente das Alterações de Parâmetros da Máquina - NERY DE OLIVEIRA JÚNIOR, WALDIR PÓ
- BT/PEA/9606 - Compactação de Subestações de 145 kV Através da Redução das Distâncias entre Fases - GERVASIO LUIZ DE CASTRO NETO, ORLANDO SILVIO LOBOSCO
- BT/PEA/9607 - Curvas de Carga de Consumidores Industriais - Agregação com Outras Cargas - RONALDO PEDRO CASOLARI, JOSÉ ANTONIO JARDINI
- BT/PEA/9608 - Utilização de Curvas de Carga de Consumidores Residenciais Medidas para Determinação de Diversidade de Carga, e Carregamento de Transformadores de Distribuição - EDUARDO LUIZ FERRARI, JOSÉ ANTONIO JARDINI
- BT/PEA/9609 - Comportamento Elétrico de Cabos Cobertos e Pré-Reunidos pelo Método dos Elementos Finitos - JOÃO JOSÉ DOS SANTOS OLIVEIRA, JOSÉ ROBERTO CARDOSO
- BT/PEA/9701 - Repotenciação de Hidrogeradores: Uma Proposta de Metodologia de Análise e Implantação - FÁBIO SALOMÃO FERNANDES SÁ, ADERBAL DE ARRUDA PENTEADO JR.

- BT/PEA/9702 - Desenvolvimento de um Sistema de Automação para um Sistema de Automação para um Centro de Operação da Distribuição - PAULO SÉRGIO MIGUEL SURUR, JOSÉ ANTONIO JARDINI
- BT/PEA/9703 - Planejamento da Expansão do Sistema de Distribuição Utilizando Programação Matemática Probabilística - MARIÂNGELA DE CARVALHO BOVOLATO, NELSON KAGAN
- BT/PEA/9704 - Técnicas de Inteligência Artificial Aplicadas ao Problema de Planejamento da Expansão do Sistema de Distribuição de Energia Elétrica - SALETE MARIA FRÓES, NELSON KAGAN
- BT/PEA/9705 - Aproveitamento Funcional de Sistemas de Controle e Proteção Digitais em Subestações de Distribuição - JOSÉ LUIZ PEREIRA BRITTES, JOSÉ ANTONIO JARDINI
- BT/PEA/9706 - Avaliação de Algoritmo para Proteção Diferencial de Transformadores - LUÍS SÉRGIO PIOVESAN, EDUARDO CÉSAR SENER
- BT/PEA/9707 - Sistema de Proteção para Falhas de Alta Impedância - CAIUS VINICIUS SAMPAIO MALAGODI, EDUARDO CÉSAR SENER
- BT/PEA/9708 - Um Ambiente para Planejamento da Operação de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica - KLEBER HASHIMOTO, NELSON KAGAN
- BT/PEA/9709 - Análise do Custo - Benefício da Instalação de Equipamentos de Proteção em Redes Aéreas de Distribuição - ANTONIO CLAUDINEI SIMÕES, JOSÉ ANTONIO JARDINI
- BT/PEA/9710 - Planejamento Integrado de Recursos Energéticos - PIR - para o Setor Elétrico - MIGUEL EDGAR MORALES UDAETA, LINEU BELICO DOS REIS
- BT/PEA/9711 - Análise de Defeitos no Motor de Indução Trifásico para Predição de Falhas Incipientes - JOSÉ ANTONIO URCIA MISARI, CÍCERO COUTO DE MORAES
- BT/PEA/9712 - Gerenciamento de Transformadores de Distribuição com Análise na Perda de Vida - CARLOS MÁRCIO VIEIRA TAHAN, VLADIMIR DUARTE BELCHIOR
- BT/PEA/9713 - Uma Nova Metodologia para a Avaliação de Sistemas de Aterramento Metro-Ferrovíários - JOSÉ AUGUSTO PEREIRA DA SILVA, JOSÉ ROBERTO CARDOSO
- BT/PEA/9714 - Um Exemplo de Decomposição de Fluxos em Transformadores - NICOLAU IVANOV, LUIZ CERA ZANETTA JR.
- BT/PEA/9715 - Custos de Transporte de Energia Elétrica - Análise de Metodologias - DÁRIO TAKAHATA, CARLOS MÁRCIO VIEIRA TAHAN
- BT/PEA/9716 - Bancada de Ensaio para a Avaliar o Comportamento de Acionamentos Controlados por Inversores PWM - JOSÉ ANTONIO CORTEZ, ADERBAL DE ARRUDA PENTEADO JR.
- BT/PEA/9717 - Integração de Técnicas de Diagnóstico de Falhas em Motores de Indução Trifásicos ao Sistema de Gerenciamento da Manutenção Industrial - JOSÉ A. URCIA MISARI, CÍCERO COUTO DE MORAES
- BT/PEA/9801 - Análise de Confiabilidade para Gerenciamento Operacional de Sistemas Automatizados de Pesagem Rodo-Ferroviária - RUBENS LOPES ROLIM, CÍCERO COUTO DE MORAES
- BT/PEA/9802 - Projeto de um Ondulador Híbrido e Estudo de Onduladores Derivados de Solenóide, para Utilização em Laser a Elétrons Livres - FRANCISCO SIRCILLI NETO
- BT/PEA/9803 - Configuração de Redes de Distribuição de Energia Elétrica com Múltiplos Objetivos e Incertezas através de Procedimentos Heurísticos - CARLOS C. BARIONI DE OLIVEIRA, NELSON KAGAN
- BT/PEA/9804 - Conceituação e Aplicação de Metodologia de Gerenciamento pelo Lado da Demanda em uma Empresa Distribuidora de Energia Elétrica - FERNANDO MONTEIRO DE FIGUEIREDO, JOSÉ ANTÔNIO JARDINI
- BT/PEA/9805 - Acoplamento Circuito Elétrico - Método dos Elementos Finitos em Regime Transitório Utilizando a Metodologia de Dommel - NANCY MIEKO ABE, JOSÉ ROBERTO CARDOSO
- BT/PEA/9806 - Modelo de Arco Elétrico Aplicado ao Estudo da Interrupção da Corrente em Disjuntores de Média Tensão - LUCILIUS CARLOS PINTO, LUIZ CERA ZANETTA JR.
- BT/PEA/9807 - Proteção para Falta de Alta Impedância Utilizando o Sistema de Rádio Troncalizado - MARCO ANTONIO BRITO, EDUARDO CESAR SENER
- BT/PEA/9808 - Contribuição ao Estudo e Projeto dos Motores Sincronos de Relutância - IVAN EDUARDO CHABU, JOSÉ ROBERTO CARDOSO
- BT/PEA/9809 - Cabos Cobertos: Metodologia para a Determinação da Espessura da Cobertura - ANTONIO PAULO DA CUNHA, JOSÉ ANTÔNIO JARDINI
- BT/PEA/9810 - Eletrificação Rural - Avaliações em São Paulo - MARCELO APARECIDO PELEGRINI, FERNANDO SELLES RIBEIRO
- BT/PEA/9811 - Política de Eletrificação Rural em São Paulo - LUIZ HENRIQUE ALVES PAZZINI, FERNANDO SELLES RIBEIRO
- BT/PEA/9812 - Uso Racional e Eficiente de Energia Elétrica: Metodologia para a Determinação dos Potenciais de Conservação dos Usos Finais em Instalações de Ensino e Similares - ANDRÉ LUIZ MONTEIRO ALVAREZ, MARCO ANTONIO SAIDEL
- BT/PEA/9813 - Diretrizes para a Regulação da Distribuição de Energia Elétrica - JAMES S. S. CORREIA, LINEU BELICO DOS REIS

- BT/PEA/9814 - Distribuição da Tensão de Impulso em Enrolamentos de Transformadores de Distribuição - PEDRO LUÍS SANTUCCI DE MENDONÇA, AUGUSTO FERREIRA BRANDÃO JÚNIOR
- BT/PEA/9815 - Estudo Comparativo entre os Diversos Métodos de Determinação do Rendimento de Motores de Indução - FRANCISCO ANTONIO MARINO SALOTTI, ORLANDO SILVIO LOBOSCO
- BT/PEA/9816 - A Nodal Analysis Approach Applied to Electric Circuits Coupling in Magnetodynamic 2D FEM - MAURÍCIO CALDORA COSTA, JOSÉ ROBERTO CARDOSO
- BT/PEA/9817 - Informatização e Automação dos Órgãos Gestores de Mão de Obra - EDUARDO MARIO DIAS, CÍCERO COUTO DE MORAES
- BT/PEA/9818 - Frequência de Ocorrência de Sobretensões Originárias de Descargas Atmosféricas em Linhas de Distribuição - NELSON MASSAKAZU MATSUO, LUIZ CERA ZANETTA JR.
- BT/PEA/9819 - Um Método de Imposição de Pólos no Estudo da Estabilidade de Redes Elétricas a Pequenas Perturbações - PERCIVAL BUENO DE ARAUJO, LUIZ CERA ZANETTA JR.
- BT/PEA/9820 - Inter-Relação do Planejamento Agregado de Investimentos com o Planejamento Localizado de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica - JUCEMAR SALVADOR SIMÕES, NELSON KAGAN
- BT/PEA/9821 - A Produção de Energia Através das Células de Combustível - JOSÉ LUIZ PIMENTA PINHEIRO, LINEU BELICO DOS REIS
- BT/PEA/9822 - Automação de Processos - Revisão e Tendências - SERGIO LUIZ PEREIRA
- BT/PEA/9823 - Metodologia para Seleção e Gerenciamento de Transformadores e Distribuição, Aplicando Técnicas de Redes Neutrais Artificiais - SE UN AHN, JOSÉ ANTONIO JARDINI
- BT/PEA/9901 - Contribuição ao Modelamento e Simulação de Motores em Ímãs Permanentes e Comutação Eletrônica de Alta Rotação - WANDERLEI MARINHO DA SILVA, CLOVIS GOLDEMBERG
- BT/PEA/9902 - Estudos de Sistemas de Potência e Automação: Plantas Industriais de Grande Porte - MAURÍCIO G. M. JARDINI, JOSÉ A. JARDINI
- BT/PEA/9903 - Synchronous Machines Parameters Identification Using Load Rejection Test Data - E. C. BORTONI, J. A. JARDINI
- BT/PEA/9904 - Identificação de Locais e Opções Tecnológicas para Implantação de Termoeletricas no Sistema Elétrico Brasileiro: Contribuição ao Estado da Arte e Aplicação ao Caso do Gás Natural - ELIANA APARECIDA FARIA AMARAL FADIGAS, LINEU BELICO DOS REIS
- BT/PEA/9905 - Sistema de Manutenção Preventiva de Subestações: Uma Abordagem Semântica para o Monitoramento Integrado - ELIAS RÔMA NETO, ADERBAL DE ARRUDA PENTEADO JR.
- BT/PEA/9906 - Previsão das Perdas Magnéticas na Presença de Harmônicos - MARCELO S. LANCAROTTE, ADERBAL DE ARRUDA PENTEADO JR.
- BT/PEA/9907 - Comportamento do Aterramento de Sistemas e Equipamentos de Distribuição sob Impulso - CLEVERSON LUIZ DA SILVA PINTO, ADERBAL DE ARRUDA PENTEADO JR.
- BT/PEA/9908 - Modelo de Sistema de Supervisão e Controle Operacional de Terminais de Contêineres - LEVI SALVI, EDUARDO MARIO DIAS
- BT/PEA/9909 - Medição de Altas Correntes em Frequência Industrial: Instrumentação, Dispositivos de Medição e Calibrações - HÉLIO EIJI SUETA, GERALDO FRANCISCO BURANI
- BT/PEA/9910 - Conversores Auto-Comutados Aplicados em Derivações de Sistemas de Transmissão de Corrente Contínua e Alta Tensão - WILSON KOMATSU, WALTER KAISER
- BT/PEA/9911 - Análise de Desempenho de Sistemas de Aterramento em Alta Frequência pelo Método dos Elementos Finitos - ANGELO PASSARO, JOSÉ ROBERTO CARDOSO, VIVIANE CRISTINE SILVA
- BT/PEA/9912 - Simulação de Motores "Shaded Pole": Uma Nova Abordagem Analítico-Numérica - PASCHOAL SPINA NETO, SILVIO IKUO NABETA, JOSÉ ROBERTO CARDOSO
- BT/PEA/9913 - Estimadores de Estado para Sistemas de Potência: Análise do Estado da Arte - CLEBER ROBERTO GUIRELLI, JOSÉ ANTONIO JARDINI
- BT/PEA/9914 - Análise sobre o Comportamento de Sistemas de Proteção Contra Descargas Atmosféricas Utilizando o Método dos Elementos Finitos - SEBASTIÃO C. GUIMARÃES JR., LUCIANO MARTINS NETO, JOSÉ ROBERTO CARDOSO
- BT/PEA/9915 - Automatização do Atendimento a Reclamações de Interrupção de Energia Elétrica - H. K. Kiyohara, L. C. Magrini, E. P. PARENTE, JOSÉ ANTONIO JARDINI
- BT/PEA/9916 - Controle Digital de Tensão e Reativos - PAULA S. D. KAYANO, LUIZ CARLOS MAGRINI, LINEU BELICO DOS REIS, ANTONIO JOSÉ GOMES CARMO, ELIAS DE SOUZA NETO
- BT/PEA/9917 - Localizadores Digitais de Falhas em Linhas de Transmissão - CARLOS EDUARDO DE MORAIS PEREIRA, LUIZ CERA ZANETTA JR.
- BT/PEA/9918 - Religamento Monopolar em Linhas de Transmissão - Propostas de Uma Ferramenta para Investigações Paramétricas - IVANIL POMPEU, LUIZ CERA ZANETTA JR.
- BT/PEA/9919 - Avaliação do U-Net em Custers com Rede My com Rede Myrinet - PAULO A. GEROMEL, SERGIO T. KOFUJI

BT/PEA/9920 – Avaliação do U-Net em Custers com Rede My com Rede Myrinet – PAULO A. GEROMEL, SERGIO T. KOFUJI

BT/PEA/9921 – SAG – Sistema de Apoio Gerencial via Internet – ADRIANO GALINDO LEAL, JOSÉ ANTONIO JARDINI

BT/PEA/9922 – Desequilíbrio de Tensão em Redes Secundárias de Distribuição – PAULO VINÍCIUS SANTOS VALOIS, CARLOS MÁRCIO VIEIRA TAHAN