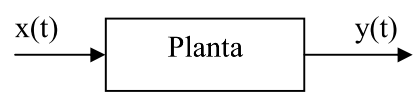
Redes Neurais na Modelagem de Sistemas Dinâmicos

(e Séries Temporais)



Sistema SISO

Sistemas Estáticos (sem memória)

$$y(t) = f\,[x(t)]$$

Modelos estáticos

A resposta é estática, não varia com o tempo

a entrada e a saída são constantes no tempo

Exemplos

Destilação ASTM de querozene da U 2100 (REPAR)

Entradas	Saída
Temperatura de retirada	
Vazão de retirada	PIE (ponto inicial de ebulição) do querozene
Relação molar do resíduo	

Conversor siderúrgico

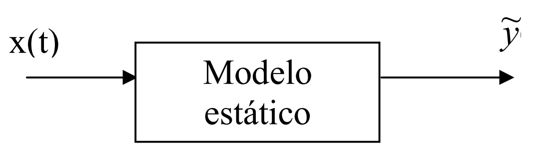
Entradas	Saídas
Peso gusa	Temperatura
Temperatura gusa	%carbono
Peso sucata	Houve projeção ?
Peso minério	
Peso calcita	
Tempo sopro	
Posição sopro	
Temperatura última corrida	
Tempo última corrida	

Sistemas Dinâmicos (com memória)

$$y(t) = f\ [x(t), \text{passado}]$$

Modelos dinâmicos

A resposta é dinâmica, pode variar com o tempo



a entrada e a saída podem variar no tempo

Dependência do passado

y(t) = f [x(t), passado]

o que é o passado ?

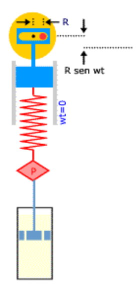
$$Passado = \begin{cases} x(t-1), x(t-2), \ldots, x(t-M) \\ e(t) \\ y(t-1), y(t-2), \ldots, y(t-N) \end{cases}$$

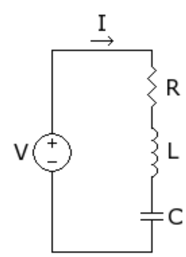
y(t) = f [x(t), x(t-1), x(t-2), ..., x(t-M)]

y(t) = f [x(t), e(t)]

y(t) = f [x(t), y(t-1), (t-2), …, y(t-N)]

Exemplos:





a posição no instante seguinte depende:	a corrente no instante seguinte depende:
- da força aplicada neste instante	- da tensão aplicada neste instante
- do estado do sistema:	- do estado do sistema neste instante:
- a energia potencial na mola - a energia cinética na massa	- a tensão no capacitor - a corrente no indutor

Séries Temporais

Modelos Não Recursivos

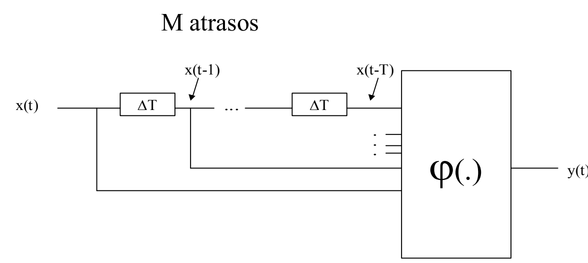
(a entrada em t não inclui saídas anteriores)

$$y(t) = f\left[x(t), x(t-1), \cdots, x(t-M)\right]$$

Modelo MA (moving average - linear)

Filtro FIR (finite impulse response)

$$y(t) = \sum_{i=0}^{M} b_i\, x(t-i)$$



TDNN (time delay neural network)

Modelo NMA

$$y(t) = \varphi\left[x(t), x(t-1), \cdots, x(t-M)\right]$$

Modelos Recursivos

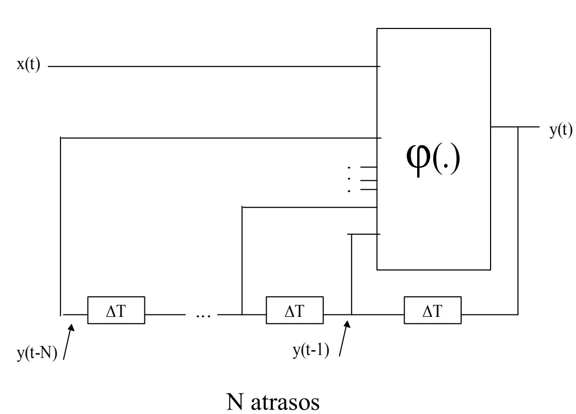
(a entrada em t inclui saídas anteriores)

$$y(t) = \varphi\left[x(t), x(t-1), \cdots, x(t-M), y(t-1), \cdots, t(t-N)\right]$$

Modelo AR (auto regressive - linear)

Filtro IIR (infinite impulse response)

$$y(t) = b_0 x(t) + \sum_{i=1}^{N} a_i\, y(t-i)$$



Modelo NAR

$$y(t) = \varphi\left[x(t), y(t-1), \cdots, y(t-N)\right]$$

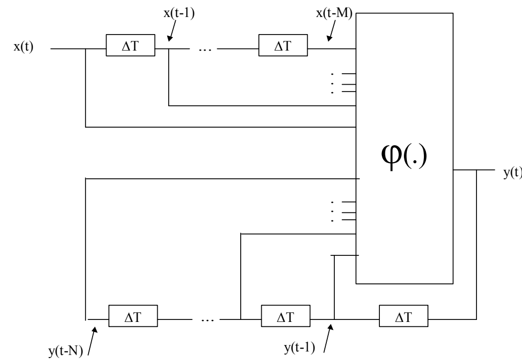
Modelos Recursivos

Modelo ARMA

(auto regressive moving average - linear)

Filtro IIR

$$\tilde{y}(t) = \sum_{i=0}^{M} b_i \, x(t - i) + \sum_{i=1}^{N} a_i \tilde{y}(t - i)$$



Modelo NARMA

$$y(t) = \varphi\left[x(t), x(t - 1), \cdots, x(t - M), y(t - 1), \cdots, t(t - N)\right]$$

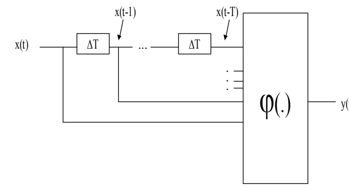
Dimensão dos Modelos

Planta:

linearizada nos pontos de operação

“singularidades”,
“frequencias naturais”,
“constantes de tempo”

Dimensionando o MA (NMA)



Tempo mínimo de observação

$$T_{min} = M \,.\, \Delta T \geq 4 \text{ Max } (\tau)$$

onde Max(τ) é a maior constante de tempo do sistema, em s

Período máximo de amostragem

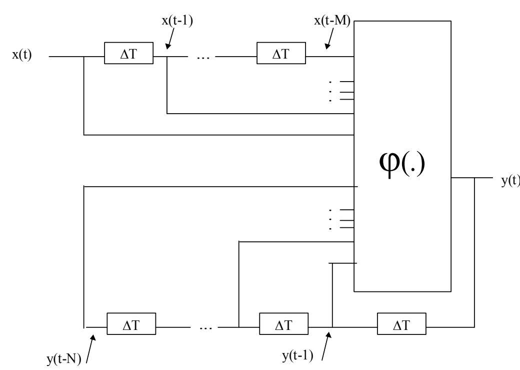
$$\Delta T = \frac{1}{f_s} \leq \frac{1}{2 \, f_{max}}$$

onde f_{max} é a maior freqüência operada pelo sistema

Número mínimo de atrasos necessários

$$M \geq \frac{T_{min}}{\Delta T} = 8 f_{max} \text{Max}(\tau_i)$$

Dimensionando o ARMA (NARMA)



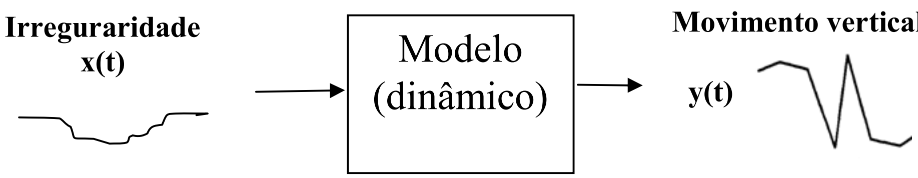
N – ordem prevista (2,3)

M ≤ N

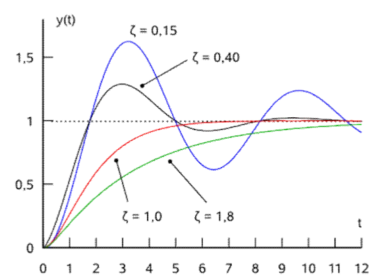
NARMA muito menor que o MA mas pode instabilizar !

Exemplo de dimensionamento de um modelo:

Movimento vertical da suspensão de um carro passando sobre uma irregularidade da pista



Características do sistema amortecedor do carro

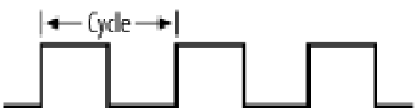


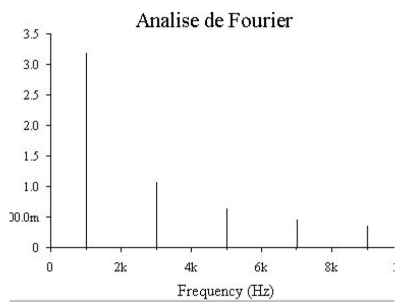
Constante de tempo do sistema amortecedor $\tau \approx 1 s$

Tempo mínimo de observação $T_{\min} = M.\Delta T \approx 4\tau \approx 4s$

Irregularidade considerada: redutores de velocidade

Características da entrada





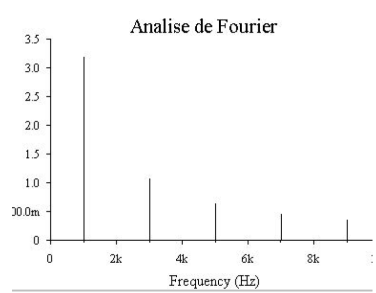
Ciclo: ~ 20 cm

Velocidade: v = 40 km/h ~ 11 m/s

Intervalo entre ressaltos : ~ 20 cm = 0,02 m

Período da componente fundamental: $\frac{0{,}02\,m}{11\,m/s} = 0{,}0018\,s$

Frequência fundamental: $f_0 = \frac{1}{0{,}0018\,s} = 555\,Hz$



Freqüência máxima (4º harmônico)

$$f_{\max} \approx 4\,f_0 = 2.200\,Hz$$

Freqüência mínima de amostragem $f_s \geq 2 f_0 = 4.400\,Hz$

Dimensionando o sistema

Período máximo de amostragem $\Delta T \le \frac{1}{f_s} = \frac{1}{4400\,Hz} = 0{,}23\,ms$

Modelo NAR

Número mínimo de atrasos necessários

$$M \ge 8 f_{\max} Max(\tau) = (8)(2.200)(1) = 17.600 \quad !!!$$

Modelo NARMA

Ordem estimada: 2 ou 3

N = 2, 3 M= 0 - 3

Aplicação do modelo em outras situações (outras irregularidades) ?

v > 40 km/h >>>

ΔT < 0,2 ms

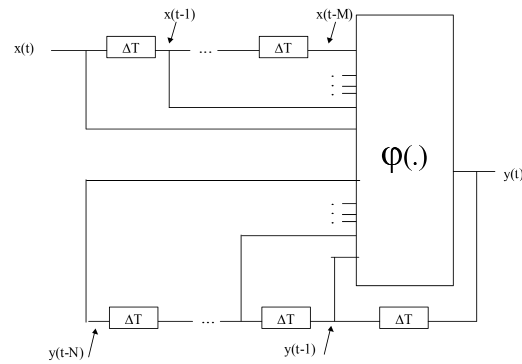
irregularidades diferentes,
espectro freqüências diferente,
v < 40 km/h >>>

possível ΔT > 0,2 ms,
treinamento diferente

Como treinar a RN ?

Rede em Operação

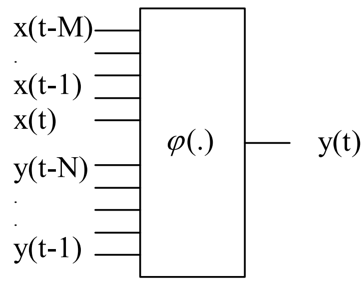
(em modo paralelo)



Rede em Treinamento

Não e dinâmico, a rede

é treinada em separado !!

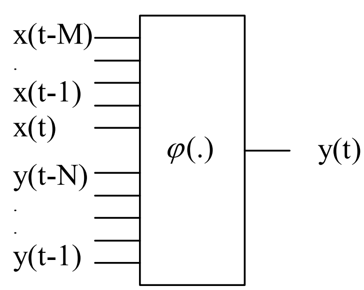


Treinamento da RN

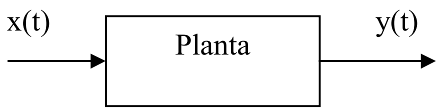
Não e dinâmico, a rede e treinada em separado !!

Par entrada-saida ($\underline{e}(t)$, $\underline{s}(t)$) correspondente ao instante t:

$$\underline{e}(t) = \begin{bmatrix} x(t-1) \\ x(t-2) \\ \ldots \\ x(t-M) \\ y(t-N) \\ y(t-N+1) \\ \ldots \\ y(t-1) \end{bmatrix} \qquad \underline{s}(t) = [y(t)]$$

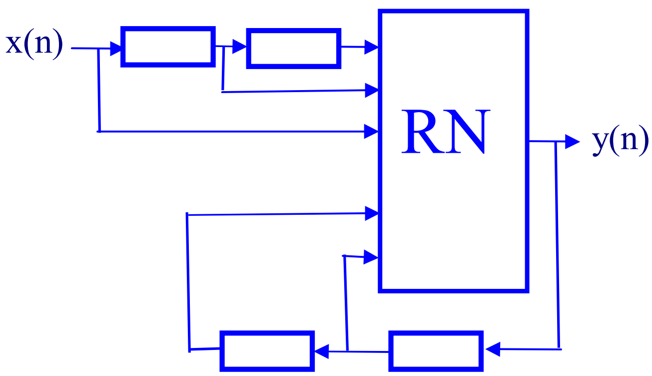


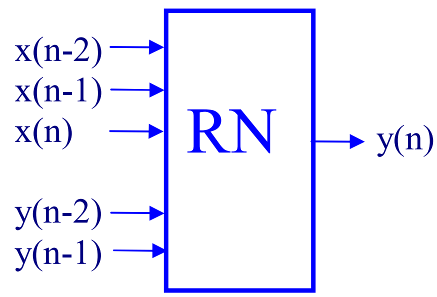
Exemplo:



M=3

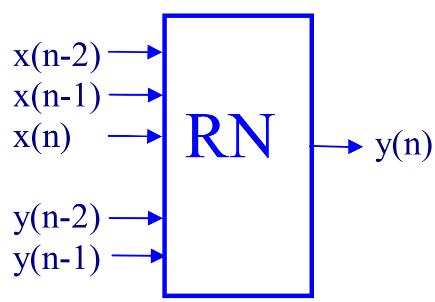
N=2





Construção dos pares entrada-saída para o treinamento:

t, n	x(n)	y(n)
...	...	...
52	x(52)	y(52)
53	x(53)	y(53)
54	x(54)	y(54)
55	x(55)	y(55)
56	x(56)	y(56)
57	x(57)	y(57)
...	...	...



t = n = 56

$$e(56) = \left.\begin{matrix} x(54) \\ x(55) \\ x(56) \\ y(54) \\ y(55) \end{matrix}\right]$$

$$s(56) = y(56)\,]$$

Cuidados usuais a tomar com RNs

1 - Escolha das Variáveis de entrada

2 – Escalamento das Variáveis

3 - Pares entrada – saída

4 - Dimensionando a rede

5 – Inicializando a Rede

6 – Treinamento: Superfícies de Erro

7 – Overtraining (overfitting, sobre-teinamento)

8 – Critica durante o treinamento

9 - Validação Cruzada

10 – Critica pos treinamento

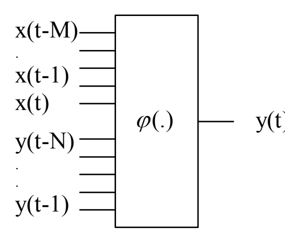
11 - Outros tipos de erro

12 – Outros Processos de Treinamento

Cuidados adicionais a tomar no caso de sistemas dinâmicos

1 - Escolha das Variáveis de entrada da rede neural

Quantas (quais) entradas / **saídas** atrasadas tomar ?



Entradas – existem atrasos puros ?

Saídas realimentadas **- ordem do sistema**

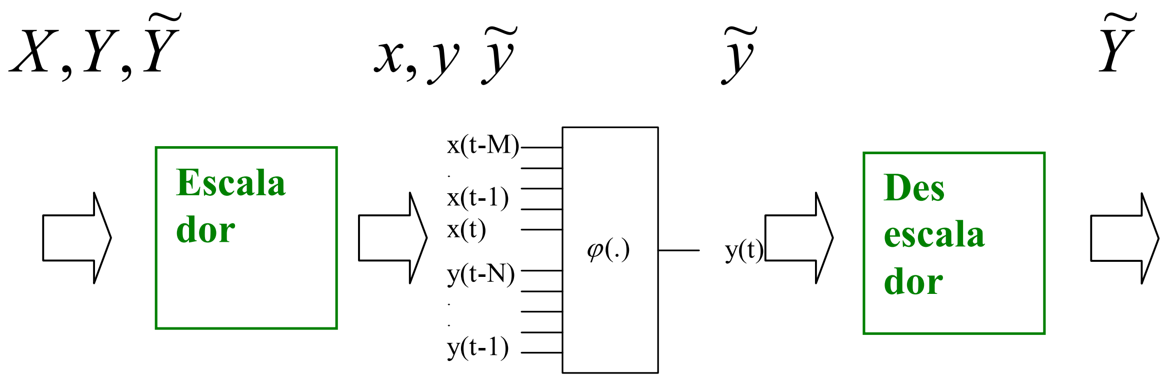
poucas: não representa
demasia: pode instabilizar

Tentativa e erro – ordem do sistema

Possível solução : Poda de saídas realimentadas na construção da RN automática / manual

2 – Escalamento das Variáveis

Rede **em operação** trabalha imersa em um escalador / desescalador



O escalador e o desescalador podem ser embutidos na primeira e última camada da rede treinada.

3 - Pares entrada – saída:

Mapeamento unívoco

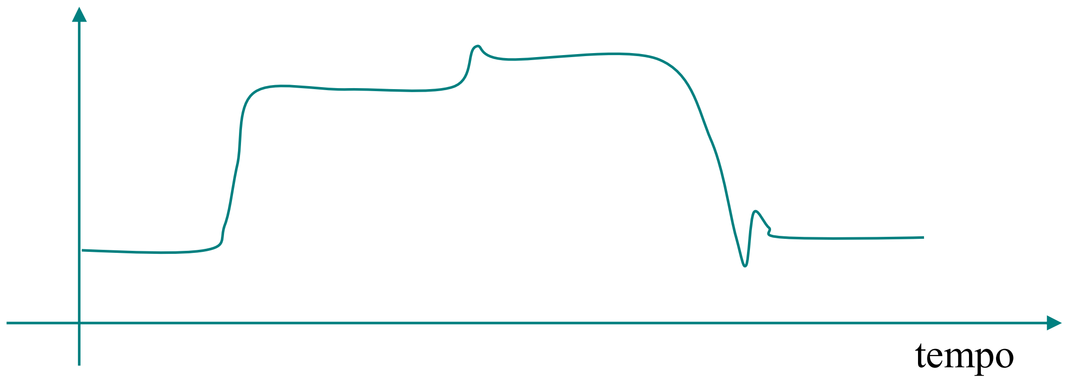
$x_1 >> y_1$ e $x_2 >> y_2$

se $x_2 = x_1$ então $y_2 = y_1$

o modelo (inverso) e unívoco ?

Efeito de população local reduzida:

transição vs regime permanente



Efeito ? alto erro na região de baixa população

Correção ? replicar população

4 – Obtenção dos dados da planta

Pontos de operação para a modelagem:

Grande excursões (amplitudes) - explorar as não linearidades

Grande faixa de frequências – explorar todas as singularidades

entrada Ideal: ruído branco de grande amplitude

Pontos de operação reais:

Grandes excursões – busca do rendimento máximo

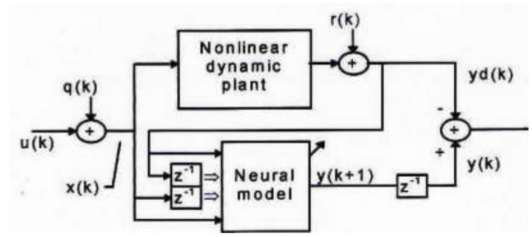
Operação suave – baixas frequências

E a caracterização das altas frequências ?

Aplicar um sinal piloto na entrada:

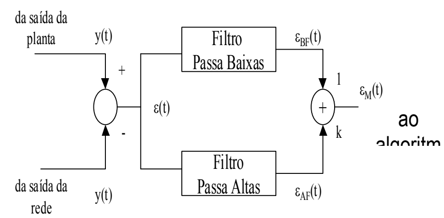
Altas frequências, baixa amplitude

q(t) = onda quadrada de período aleatório

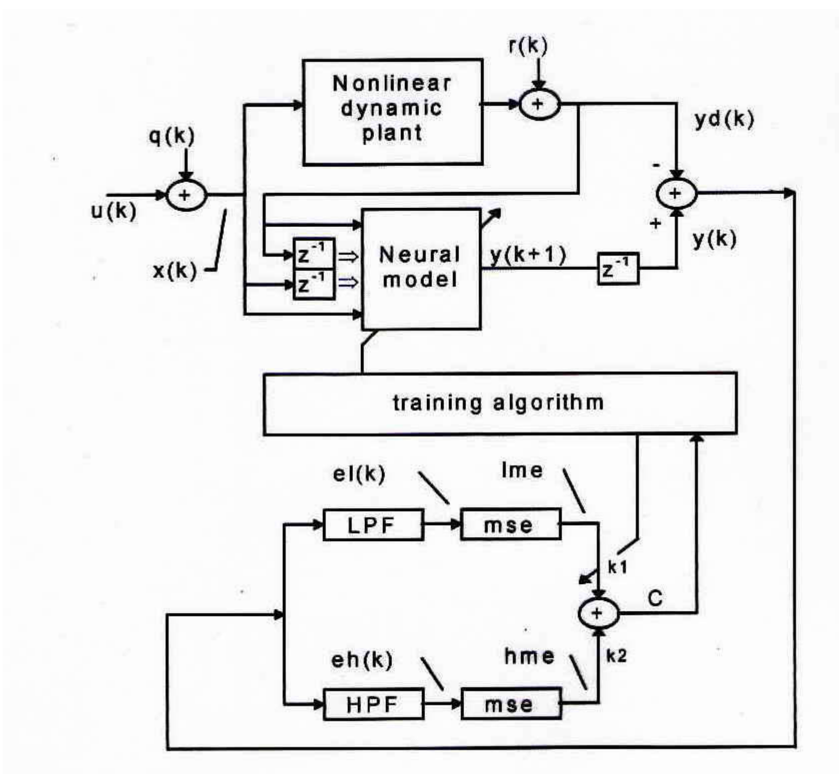


Enfatizar o erro em altas freqüências na saída:

$$\varepsilon_M(t) = \varepsilon_{LF}(t) + k\, \varepsilon_{HF}(t)$$



Treinamento:

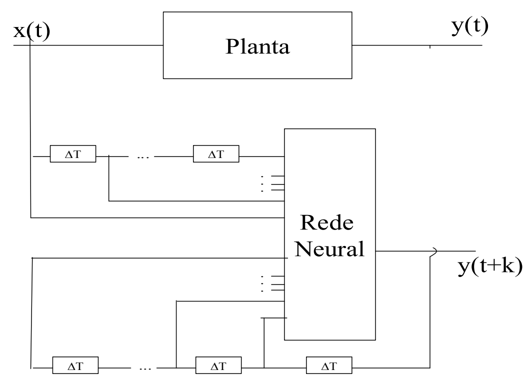


Operação da Rede

Operação em Paralelo

Independe da planta,

possível instabilidade

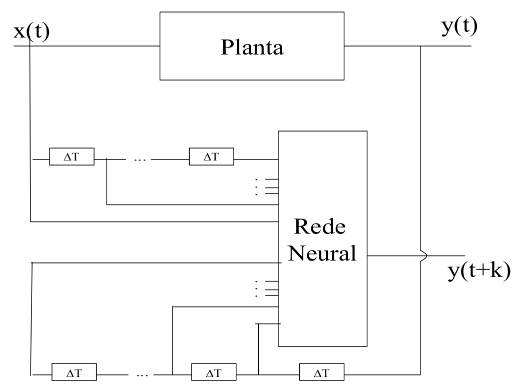


Operação em Série – Paralelo

Depende da planta,

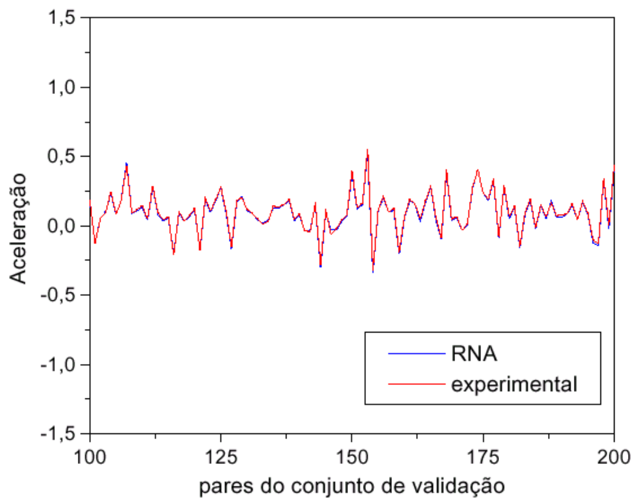
estabilidade garantida

para que serve ? **Preditores y(t+k)**

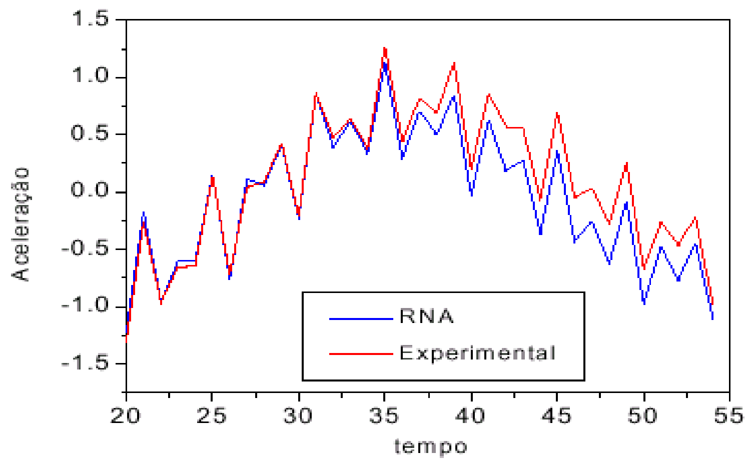


Exemplo 1:

Operação em serie - paralelo



Operação em paralelo



Exemplo 2:

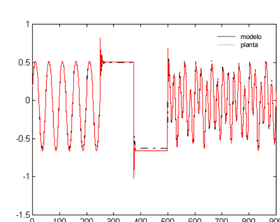
$$y(t) = \frac{y(t-1)\, y(t-2)\, y(t-3)\, x(t-2)\left[y(t-3)-1\right] + x(t-1)}{1 + y(t-3)^2 + y(t-2)^3}$$

Entrada para treinamento e teste

$$x(t) = \text{sen}(.1t) + .02\ \text{sq\_rnd}\ (t)$$

Entrada para validação

$$x(k) = \begin{cases} \text{sen}(\pi k/25) & , k < 250 \\ +1 & , 250 \le k < 375 \\ -1 & , 375 \le k < 500 \\ 0{,}3\,\text{sen}(\pi k/25) + 0{,}1\,\text{sen}(\pi k/32) + 0{,}6\,\text{sen}(\pi k/10) & , 500 \le k < 900 \end{cases}$$

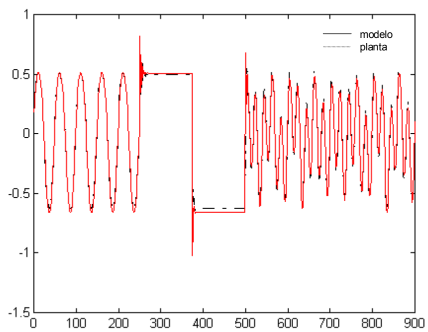


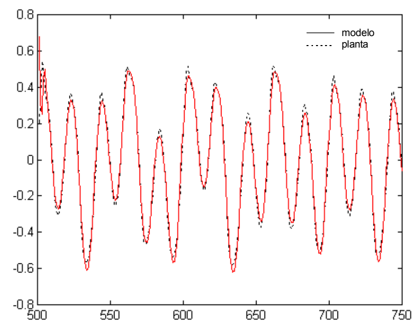
Rede Neural: 7 neurônios na camada intermediária

Ordem do modelo (poda):

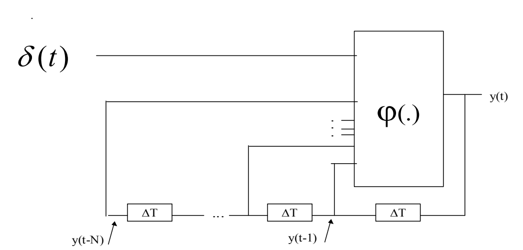
	Inicial	Final	Correta
N	5	3	3
M	4	2	2

Resultados





Uso em Series Temporais (modelo AR)



S(t) = Tendência +

Sazonalidade +

Ciclos senoidais +

Outros artefatos deterministicos +

Componentes não lineares +

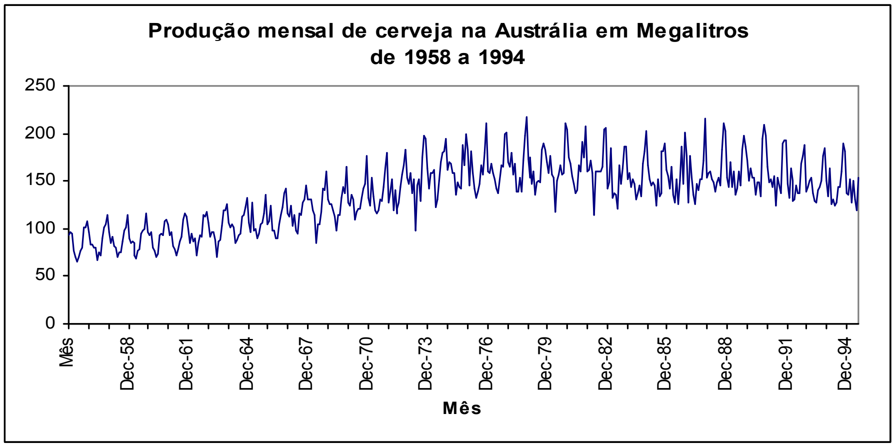
Ruido não correlato

Redes Neurais predizem este termo !

Trabalhar sobre a serie residual !

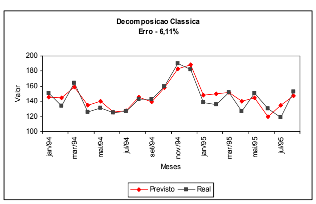
Series Temporais

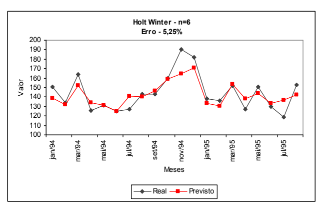
Exemplo:

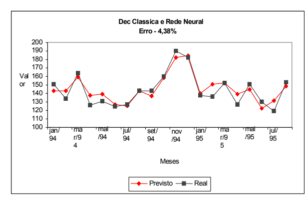


Resultados (período de teste):

Convencional Holt-Winters RNs







	Decomp.	Holt Winter	RN
1º Ano	4.71%	4.81%	3.68%
20 Meses	6.11%	5.25%	4.35%