

**Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto  
Departamento de Engenharia Química  
Instituto de Sistemas e Robótica**

***Controlo de Processos***  
**Aula dedicada ao José Almiro e Castro**

**Sebastião Feyo de Azevedo**  
**E-mail: [sfeyo@fe.up.pt](mailto:sfeyo@fe.up.pt)**  
**URL: <http://www.fe.up.pt/~sfeyo/>**

**1º Workshop Anual de 'Engenharia de Sistemas e Processos'**  
**26 de Fevereiro, 2003**

**Departamento de Engenharia Química**  
**Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra**

**Plano para a comunicação**

- ① **Dizer o que vou dizer**
- ② **Dizer o que tenho para dizer**
- ③ **Dizer o que disse**

## Dizer o que vou dizer

- ① **Âmbito**
  - ① Controlo de Processos na perspectiva de Operação Assistida por Computador
- ② **Uma perspectiva de desenvolvimento integrado da tecnologia e da teoria**
  - ② Que dificuldades na operação de processos?
- ③ **Monitorização e controlo de processos**
  - ③ Evolução da tecnologia e da teoria
- ④ **Outros factores para a prática da teoria**
  - ④ O Factor Humano - investimento, conhecimento e estrutura industrial
- ⑤ **Principais ideias a reter**

## Operação de Processos Assistida por Computador Sobre o (velho) fosso entre a teoria e a prática

- ☞ O desenvolvimento de formas novas (ou melhoramentos na ) operação de processos só é bem sucedido quando



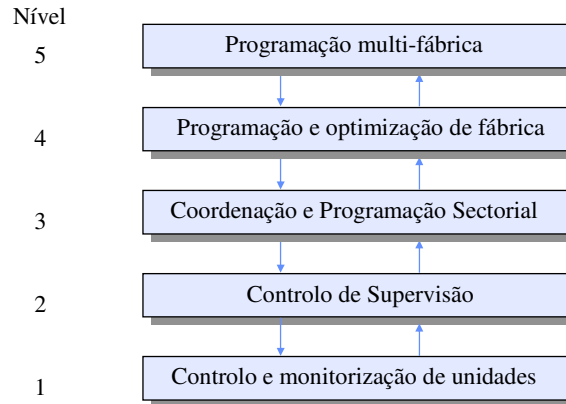
É possível ligar a inovação teórica com a tecnologia disponível para implementação à escala industrial

- ☞ Avanços na tecnologia digital têm impacto decisivo na instrumentação e controlo, abrindo caminho para trazer metodologias e tecnologias novas para a operação de processos

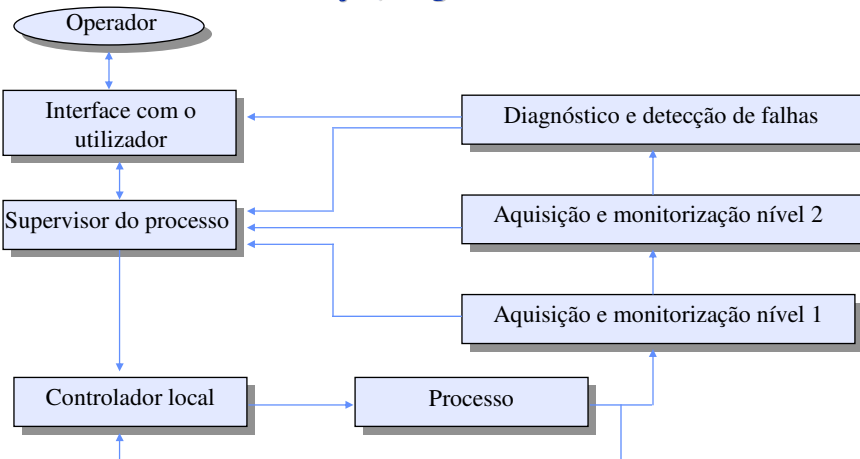
**Uma área nova de interesse**

**Operação de Processos Assistida por Computador**

## Operação de Processos Assistida por Computador Âmbito - Níveis de actuação



## Operação de Processos Assistida por Computador Monitorização, diagnóstico e controlo



## Dizer o que vou dizer

- ① **Âmbito**
  - ① Controlo de Processos na perspectiva de Operação Assistida por Computador
- ② **Uma perspectiva de desenvolvimento integrado da tecnologia e da teoria**
  - ② Que dificuldades na operação de processos?
- ③ **Monitorização e controlo de processos -**
  - ③ Evolução da tecnologia e da teoria
- ④ **Outros factores para a prática da teoria**
  - ④ O Factor Humano - investimento, conhecimento e estrutura industrial
- ⑤ **Principais ideias a reter**

## Operação de Processos Assistida por Computador I - Medidas (I)

☞ Sensores e instrumentos analíticos - elementos primários em monitorização de processos.

- apesar dos progressos tecnológicos observados –  
em larga medida, **o estrangulamento** está na (in)capacidade de medir propriedades dos processos

☞ **Actualmente**

- Medidas indirectas ainda são necessárias
- Servem como exemplo, do ainda não ‘possível’-
  - medição fiável de biomassa em processos de fermentação
  - medição fiável de distribuição de tamanhos de cristais em cristalização industrial

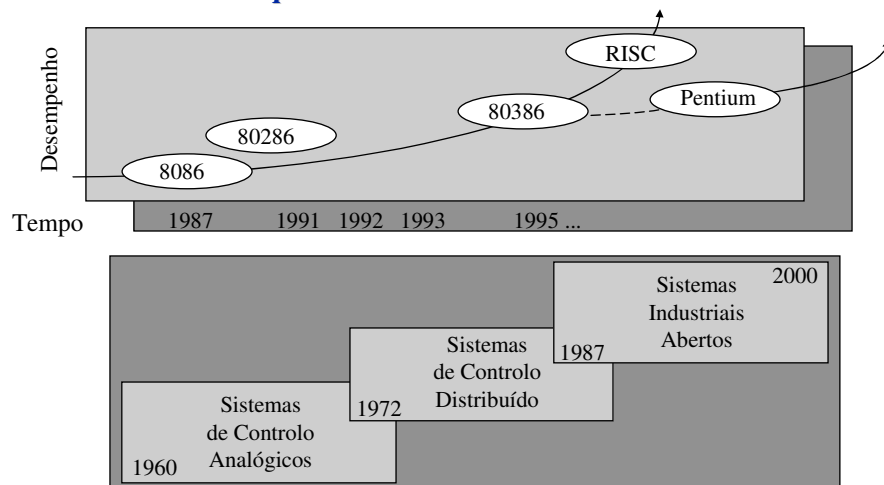
## Operação de Processos Assistida por Computador II - Sistemas de controlo industrial (I)

Um marco na história da OPAC,  
no fecho dos anos 80

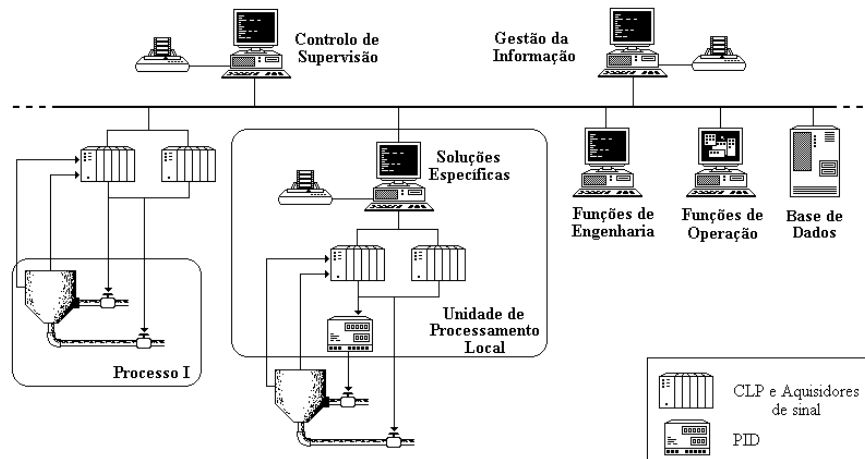
☛ **Hoje**, estão disponíveis sistemas comerciais com arquitecturas abertas, empregando sistemas operativos e protocolos de comunicação padronizados, o que permite -

- acção distribuída
- implementação simples de algoritmos complexos
- programação de supervisão com linguagens de nível alto
- integração de aplicações 'à medida' do problema

## Evolução em sistemas de controlo e em arquitecturas de sistemas de controlo



## Sistemas de controlo distribuído



## Operação de Processos Assistida por Computador III - Evolução na teoria – Capturar e representar conhecimento

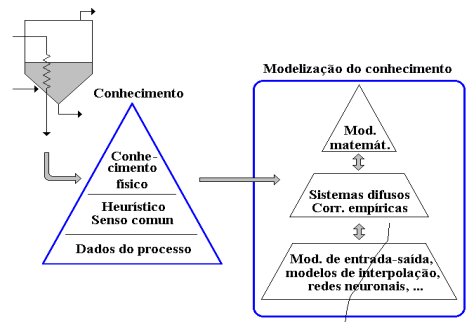
### 🔧 Evolução de conceitos em operação de processos

- No essencial, baseiam-se numa evolução da atitude relativamente ao conhecimento disponível -
  - Que conhecimento ?
  - Como o capturar ?
  - Como o representar e usar ?

OU

- Repensar de conceitos sobre capturar e representar 'conhecimento' do processo
- Empregar métodos de engenharia de 'conhecimento'

## Capturar e representar o conhecimento I - Formas de conhecimento



## Capturar e representar o conhecimento II - Modelos (I)

- Modelos mecanísticos (primeiros princípios)

Ex: modelo dinâmico para fermentadores

$$\frac{d\xi}{dt} = r(\xi) - D\xi + F - Q(\xi)$$

- Modelos estocásticos, de entrada-saída

$$A(q^{-1}) y(t) = B(q^{-1}) u(t) + C(t) w(t)$$

em que:  $q^{-1} y(t) = y(t-1)$

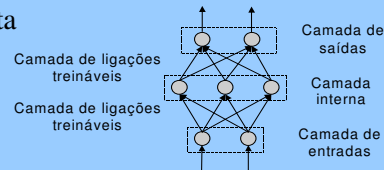
Ex: controlo de nível (h) com o caudal de saída (Q)

$$\hat{h}_k = \sum_{i=1}^2 a_i h_{k-i} + \sum_{j=1}^2 b_j Q_{k-j}$$

## Capturar e representar o conhecimento II - Modelos (II)

- ☞ Modelos baseados em métodos e técnicas de IA

Ex: Redes de propagação directa



- ☞ Modelos híbridos (mecanísticos + RN e/ou métodos difusos e/ou bases de conhecimento)

- Capturar conhecimento escondido e evitar a violação dos ‘primeiros princípios’.

## Capturar e representar o conhecimento III – Integração de conhecimento (I)

- ☞ Pretende integrar-se conhecimento mecanístico + RNN e/ou difuso e/ou and/or RTKBS

- Capturando ‘conhecimento escondido’ sem violar ‘primeiros princípios’

- ☞ **Integração modular complementar**

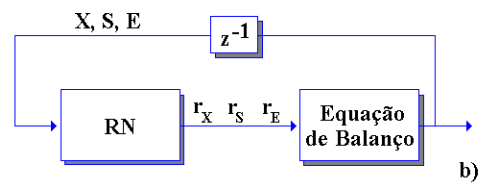
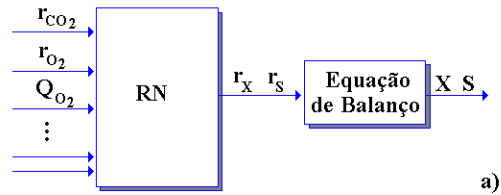
- Formas diferentes de conhecimento, focando sub-sistemas diferentes

- ☞ **Integração modular competitiva**

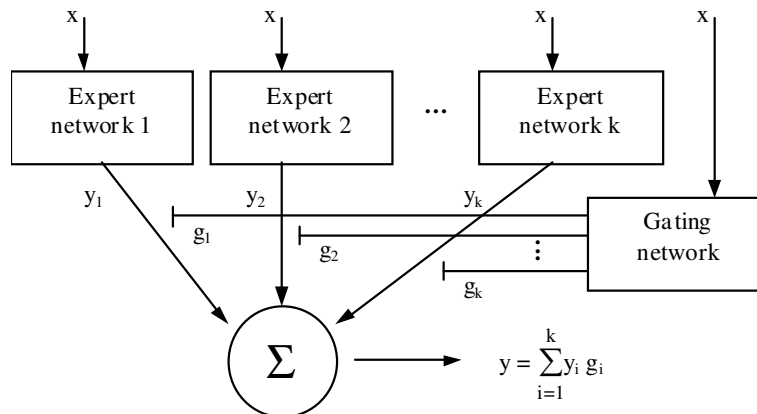
- Fontes e tipos de informação diferentes para o mesmo sub-sistema



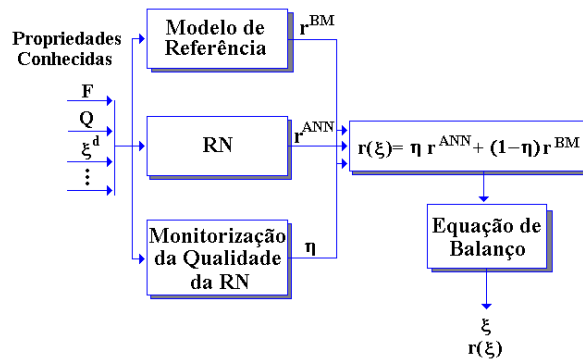
### Capturar e representar o conhecimento III – Integração de conhecimento (II) Estruturas híbridas modulares complementares



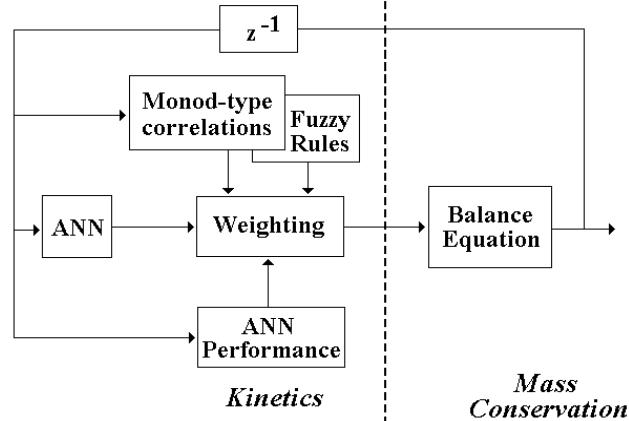
### Capturar e representar o conhecimento III – Integração de conhecimento (III) Estruturas híbridas modulares competitivas



### Capturar e representar o conhecimento III – Integração de conhecimento (IV) Estruturas competitivas + complementares



### Capturar e representar o conhecimento III – Integração de conhecimento (IV) Estruturas competitivas + complementares



## Dizer o que vou dizer

- ① **Âmbito**
  - ① Controlo de Processos na perspectiva de Operação Assistida por Computador
- ② **Uma perspectiva de desenvolvimento integrado da tecnologia e da teoria**
  - ② Que dificuldades na operação de processos?
- ③ **Monitorização e controlo de processos -**
  - ③ Evolução da tecnologia e da teoria
- ④ **Outros factores para a prática da teoria**
  - ④ O Factor Humano - investimento, conhecimento e estrutura industrial
- ⑤ **Principais ideias a reter**

## Operação de Processos Assistida por Computador IV - Monitorização de processos (I)

### ☞ **Tópico na primeira linha do nosso interesse -**

- monitorizar o comportamento de variáveis internas do processo, que definem o chamado estado do processo, e para as quais as medidas directas -
  - ou são difíceis,
  - ou são caras,
  - ou são imprecisas,
  - ou não existem

### ☞ **Soluções com base nos sistemas distribuídos actuais**

- Acções básicas - aquisição directa, alarmes, acções tudo-nada, gráficos, históricos...
- Acções avançadas - implementação de métodos de análise com base em modelos

## Operação de Processos Assistida por Computador IV - Monitorização de processos (II)

### ☞ ‘Sensores por programação’

**genericamente** representam um método pelo qual –  
com um número mínimo de medidas directas, se é capaz de descrever completamente o estado do processo em qualquer momento e ponto da operação

### ☞ Sensores por programação

- métodos com base em modelos determinísticos
- métodos com base em RNA
- métodos com base em modelos híbridos

## Operação de Processos Assistida por Computador Sensores por programação I - Galileu reavaliado

### ☞ Há ~ 400 anos, Galileo Galilei (1564-1642) -

“Measure what is measurable and  
make measurable what is not so”,

Citado em I. Gordon and S. Sorkin, *The Armchair Science Reader* (New York, 1959)

‘Quotations by Galileo Galilei’ in <http://www-groups.dcs.st-nd.ac.uk/~history/Quotations/Galileo.html>

## **Operação de Processos Assistida por Computador**

### **Sensores por programação**

#### **II - com base em modelos mecânicos**

- ① Frequentemente ‘sensores por programação’ consistem somente na manipulação de relações algébricas simples,
  - ✓ É o caso da medida da sobressaturação em processos de cristalização.
  
- ② Noutras situações, o sensor requer o uso do modelo mecânico completo
  - ✓ Normalmente, procura-se uma transformação que elimine os termos ou parâmetros conhecidos com menos exactidão
  - ✓ Invariavelmente são termos ‘cinéticos’

## **Operação de Processos Assistida por Computador**

### **Sensores por programação**

#### **III - com base em redes neuronais ou aproximações híbridas**

- ③ Noutros casos utilizam-se modelos de ‘entrada-saída’
  - ✓ Esta aproximação levanta questões sobre a confiança que temos nos resultados, quando fora do domínio de treino
  
- ④ Soluções híbridas, envolvendo modelos mecânicos e RNA, representam uma solução potencialmente adequada para muitas aplicações -
  - ✓ Capturam ‘conhecimento escondido’ e evitam que se violem ‘primeiros princípios’

## **Operação de Processos Assistida por Computador V - O presente e o futuro de controlo de processos (I)**

- ☞ Progresso significativo em controlo convencional
  - ✓ Hoje, dirige-se a atenção para algoritmos digitais
    - Controlo por realimentação negativa – PID convencional
    - Controlo por realimentação negativa – PID avançado
    - Sintonização automática
    - Controlo em cascata
    - Controlo por antecipação
    - Controlo pro realimentação-negativa-antecipação

## **Operação de Processos Assistida por Computador V - O presente e o futuro de controlo de processos (II)**

- ☞ Controlo com base em modelos (MBPC)
  - ✓ Controlo (adaptativo)-predictivo
  - ✓ Controlo adaptativo com modelo de referência
  - ✓ Controlo não-linear adaptativo linearizante
  - ✓ Controlo robusto
- ☞ Métodos da Engenharia de Conhecimento
  - Redes neuronais artificiais
  - Sistemas de controlo difuso
  - Métodos que utilizam bases de conhecimento em tempo-real
  - Métodos híbridos
  - Redes híbridas modulares

## Dizer o que vou dizer

- ① **Âmbito**
  - ① Controlo de Processos na perspectiva de Operação Assistida por Computador
- ② **Uma perspectiva de desenvolvimento integrado da tecnologia e da teoria**
  - ② Que dificuldades na operação de processos?
- ③ **Monitorização e controlo de processos -**
  - ③ Evolução da tecnologia e da teoria
  - ③ **Apreciação geral da teoria**
- ④ **Outros factores para a prática da teoria**
  - ④ O Factor Humano - investimento, conhecimento e estrutura industrial

## Dizer o que vou dizer

- ① **Âmbito**
  - ① Controlo de Processos na perspectiva de Operação Assistida por Computador
- ② **Uma perspectiva de desenvolvimento integrado da tecnologia e da teoria**
  - ② Que dificuldades na operação de processos?
- ③ **Monitorização e controlo de processos -**
  - ③ Evolução da tecnologia e da teoria
- ④ **Outros factores para a prática da teoria**
  - ④ O Factor Humano - investimento, conhecimento e estrutura industrial
- ⑤ **Principais ideias a reter**

## Operação de Processos Assistida por Computador O Factor Humano

### Operação industrial assistida por computador ?

☞ OBVIAMENTE, MAS -

A não aceitação ou o não entendimento de todas as implicações pode levar a expectativas frustradas -

- ☐ I - Custo do investimento
- ☐ II - Conhecimento técnico
- ☐ III - Mudanças organizacionais
- ☐ IV - A função da Universidade

## O Factor Humano I - Justificação do investimento

☞ Automatizar a produção com controlo por computador pode exigir um investimento elevado.

- Repensar da produção
- Aquisição de novos sensores
- Aquisição de elementos finais de controlo.
- Custo elevado de re-cablagem
- O custo de licenças continua muito elevado.

☞ Frequentemente a decisão de investimento tem de ser vista como uma decisão política de gestão e não como uma decisão com base em estudos económicos de curto prazo.

Questão relevante –  
Que futuro, se não nos mantivermos competitivos ?



## O Factor Humano II - *conhecimento técnico*

- ☞ A operação do processo é com o(a) 'engenheiro(a) de processo', **mas, claramente** ☞
- ☞ A evolução para controlo por computador exige novo conhecimento na empresa -
  - Elaboração de soluções específicas
  - Tradução de especificações do processo em códigos da linguagem de controlo
  - Manutenção e documentação de programas e procedimentos

Se a empresa não fomentar a endogeneização deste *conhecimento*, o resultado será uma sub-utilização da tecnologia e uma dependência excessiva de serviços externos.

## O Factor Humano III - Reorganização na Empresa

- ☞ Emerge assim a necessidade de um perfil novo - o perfil da engenharia de sistemas aplicada a processos industriais.
- ☞ A Organização tem de se adaptar e trazer este novo perfil para o seio do pessoal da operação do processo.
- ☞ Exige-se um trabalho de equipa. **Até porque assim** o pessoal do processo entenderá bem o esforço que é necessário neste novo trabalho de manter e desenvolver os programas de monitorização e controlo.

Nunca devemos esquecer que –  
O entendimento por todos da tarefa de cada um  
é a única forma de ter colaboração genuína de equipa.

## Afinal, uma evolução natural... A necessidade de 'Instrumentistas' na Indústria

- ☞ **Nos anos 40** - sistemas pneumáticos na indústria -
  - necessidade de manter e **calibrar** sensores, controladores, válvulas...
  - necessidade de Instrumentistas de equipamentos pneumáticos
  
- ☞ **Mais tarde, nos anos 70** - equipamento electrónico analógico; tecnologia digital -
  - o mesmo tipo de exigências de conhecimento humano -
    - os Instrumentistas para equipamentos analógicos e para equipamentos digitais!

## Afinal, uma evolução natural... A necessidade de 'Instrumentistas' na Indústria

- ☞ **Para a primeira década do Séc. XXI...**
  - sensores por programação e controlo com base em modelos - novas-antigas exigências de '**calibração**'
  - uma evolução dos Técnicos e Instrumentistas clássicos, com conhecimento em -
    - ✓ engenharia de processo;
    - ✓ modelização e simulação por computador;
    - ✓ identificação de modelos e estimativa de parâmetros;
    - ✓ análise de modelos não-lineares;
    - ✓ controlo por computador.

## Dizer o que vou dizer

- ① **Âmbito**
  - ① Controlo de Processos na perspectiva de Operação Assistida por Computador
- ② **Uma perspectiva de desenvolvimento integrado da tecnologia e da teoria**
  - ② Que dificuldades na operação de processos?
- ③ **Monitorização e controlo de processos -**
  - ③ Evolução da tecnologia e da teoria
- ④ **Outros factores para a prática da teoria**
  - ④ O Factor Humano - investimento, conhecimento e estrutura industrial
- ⑤ **Principais ideias a reter**

## Dizer o que Disse Principais ideias a reter

- ☞ Operação de Processos Assistida por Computador
  - ✓ A evolução necessária na produção industrial
- ☞ Dificuldades na operação industrial
  - ✓ Nas medidas do processo
  - ✓ No 'conhecimento' humano em engenharia de sistemas de processos
- ☞ O trabalho para o futuro já começou -
  - ✓ Repensar de conceitos sobre capturar e representar 'conhecimento' do processo
  - ✓ Desenvolver e implementar métodos com base em modelos e adaptativos no equipamento industrial disponível, para operação em tempo-real

## **Dizer o que Disse** **Principais ideias a reter**

### **Entender o futuro**

- ☞ **Dura reforma de atitude na Sociedade Civil**
  - ☐ **Trabalho, organização, qualidade, formação contínua**
  
- ☞ **As Empresas têm que entender os custos e a necessidade de reestruturações internas, de modernização e de inovação**
  
- ☞ **A Universidade tem que ser capaz de proporcionar o conhecimento especializado necessário ao desenvolvimento**