

Controle de Processos Industriais

Prof. Eduardo Stockler Tognetti

estognetti@ene.unb.br

Controle e Automação - LARA

Engenharia de Controle e Automação (Mecatrônica)

Universidade de Brasília – UnB, Brasil

Brasília, 2016

- Processos industriais
- Desafios do Engo. De Controle e Automação
- Controle de Processos Industriais

Experiência Profissional

Overview

Formação

- Engo. Eletricista (Ênfase em Controle) – USP/EESC (2002)
- Mestre em Controle e Automação – USP/EESC (2006)
- Doutorado em Controle e Automação – UNICAMP/FEEC (2011)

Experiência Profissional

- Engo. de Automação e Controle de Processos – Votorantim Celulose e Papel/ Fibria S.A – (2002 - 2011)
 - Gerenciamento PIMS, Automação industrial e Controle dos processos industriais (process control & drive system)

UnB

- Depto. Enga. Elétrica, Laboratório de Automação e Robótica (LARA)
- Disciplinas EQ
 - Controle de Processos
 - Instrumentação de Controle de Processos
 - Laboratório de Controle de Processos

Experiência Profissional

Indústria de Processos

2003-2006

- Engenheiro de Automação Jr. -- Votorantim Celulose e Papel.
- Implantação e administração de sistema de gerenciamento de informações de processo (PIMS)
 - Especificações
 - Desenvolvimento de software
 - Aplicações: monitoramento de processo e malhas de controle

Experiência Profissional

Indústria de Processos

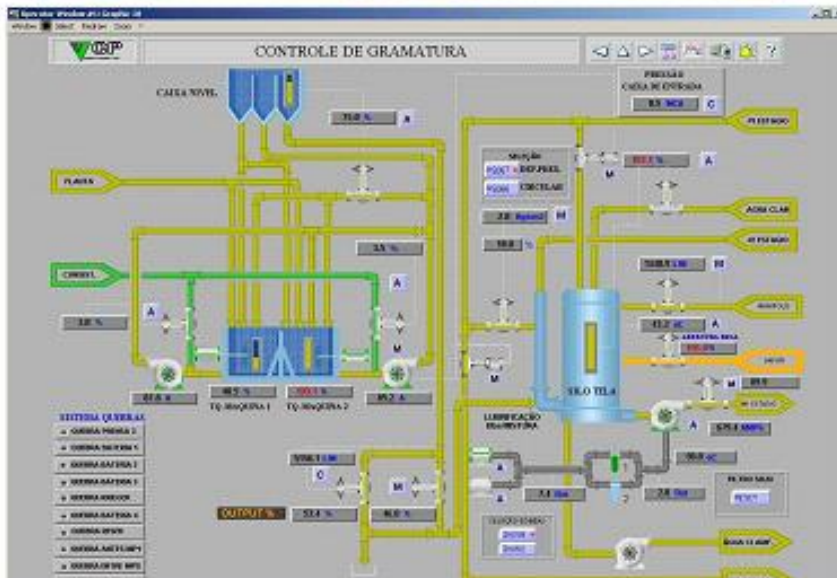
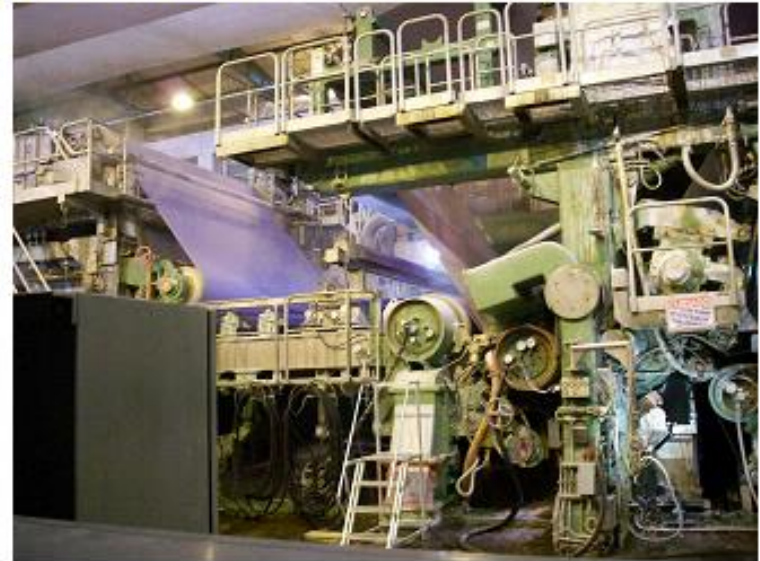
2006-2009

- Engenheiro de Automação Pl. -- Votorantim Celulose e Papel
 - Líder de equipe, comissionamento e partida de novas máquinas.
 - Gestão da Qualidade Total da automação industrial.

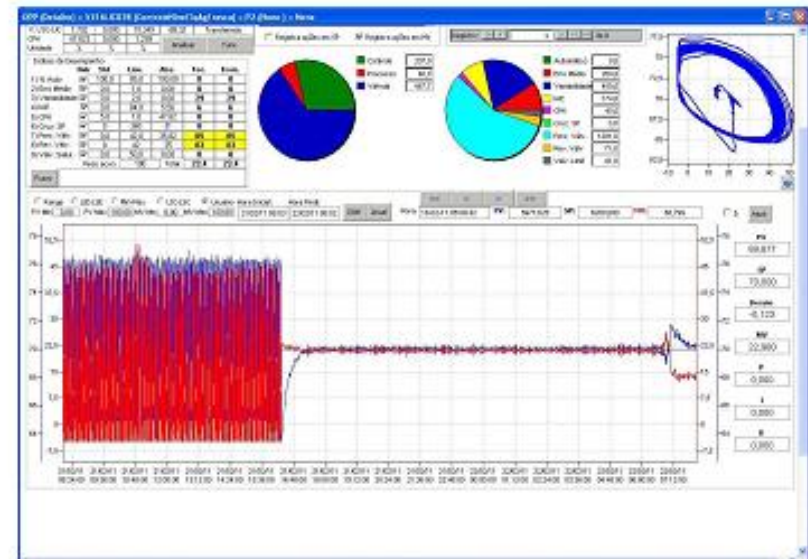
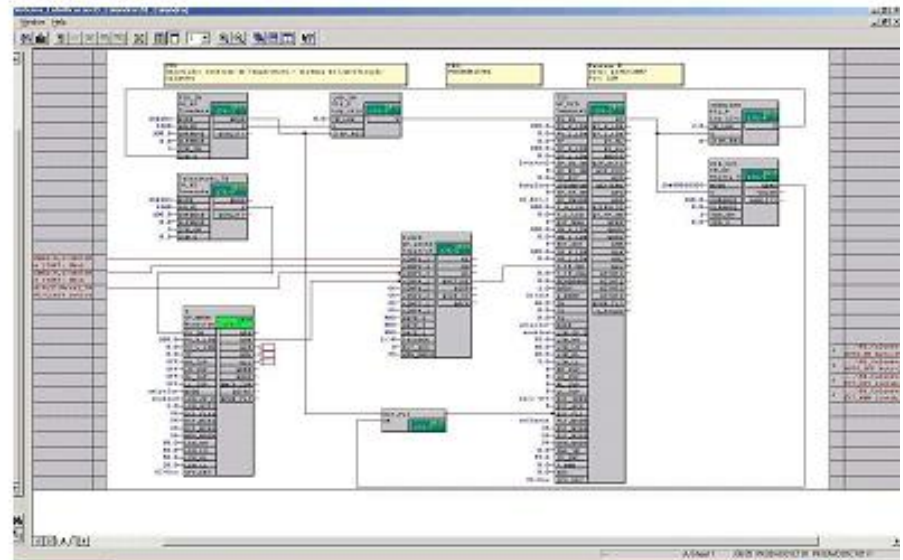
2009-2011

- Engenheiro de Automação Sr. -- Fibria Celulose S.A.
 - Manutenção, melhoria e desenvolvimento dos sistemas de automação do processo produtivo.
 - Otimização, sintonia e melhoria nas estratégias de controle.
 - Áreas de atuação: redes e controladores industriais, instrumentação e controle de máquinas elétricas.

Experiência Profissional - Controle de Processo



Experiência Profissional - Controladores Industriais

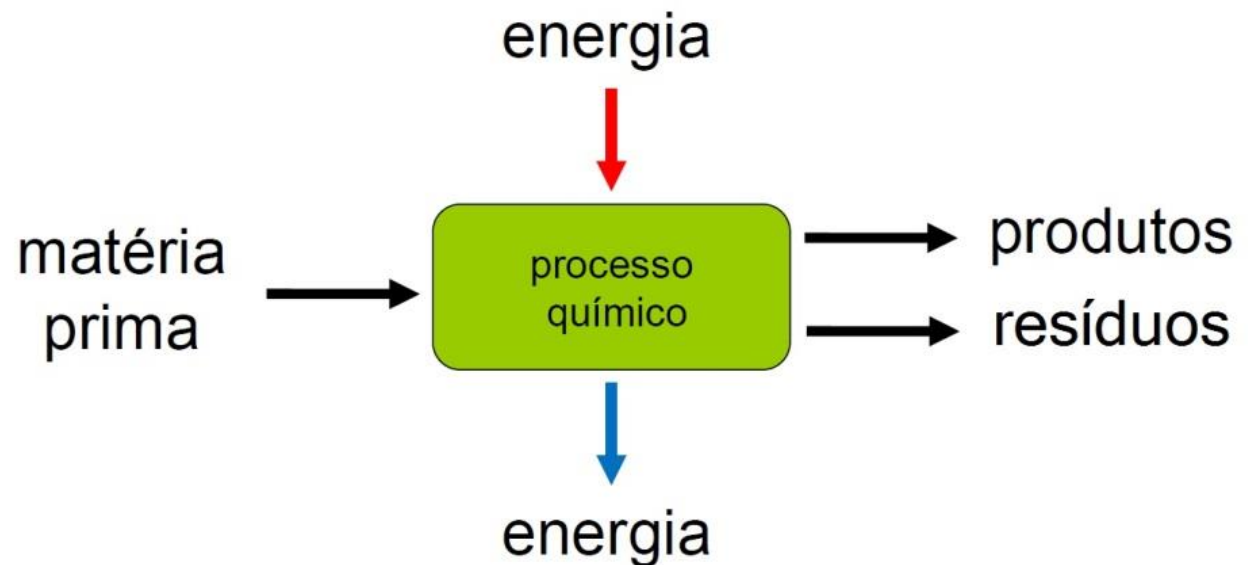


Processos Industriais



Processo

- Transformar matéria prima em produtos, através de operações físicas e químicas
- Exemplos
 - refinaria de petróleo
 - usina de açúcar e álcool
 - amônia
 - ...



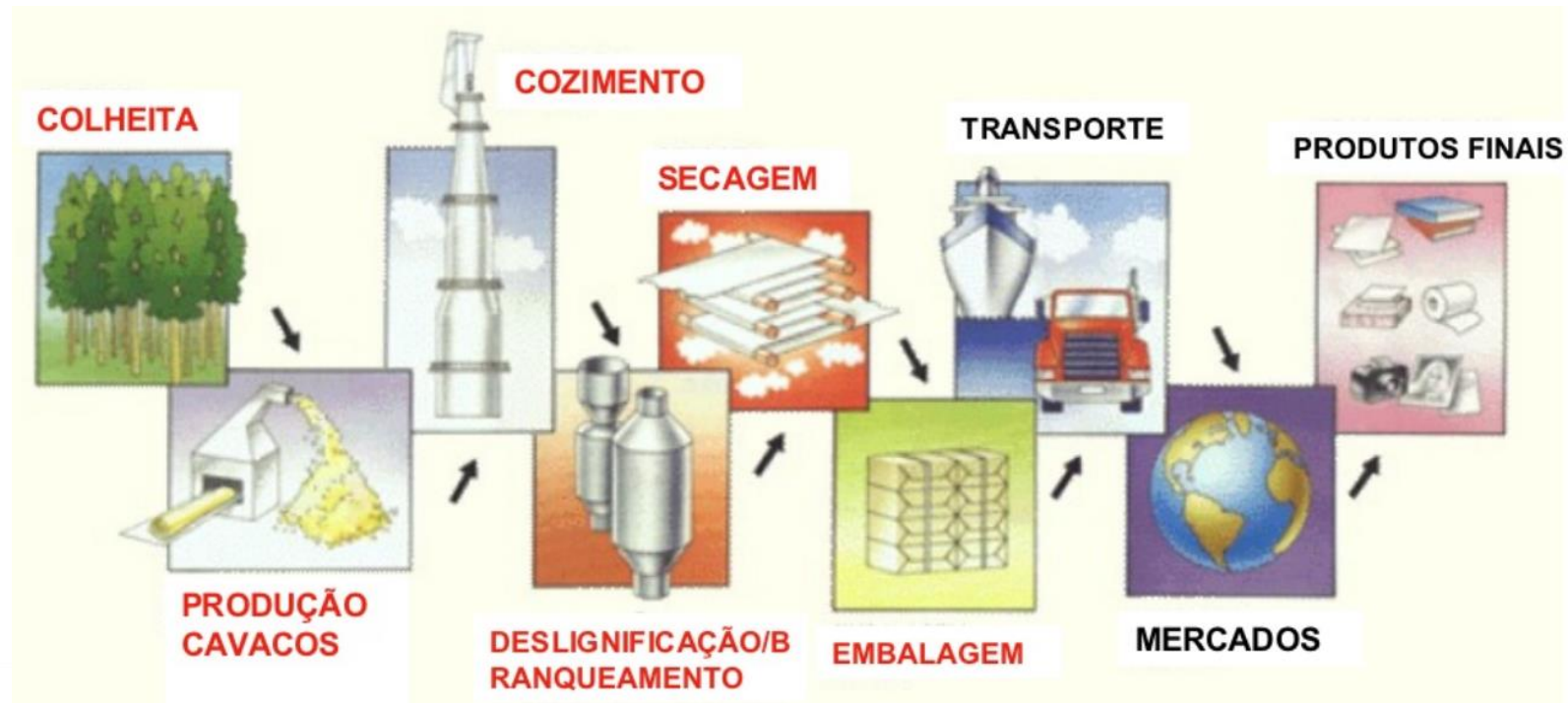
Desafios em controle e automação em processos de fabricação

Indústria de Celulose e Papel

Processo Celulose e Papel



Visão Geral do Processo de Celulose



Processo Papel

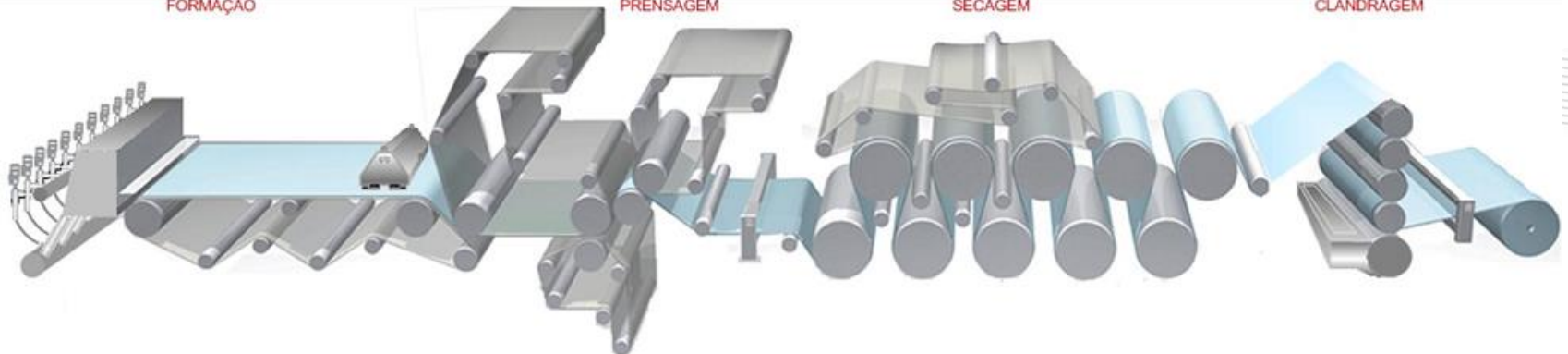


FORMAÇÃO

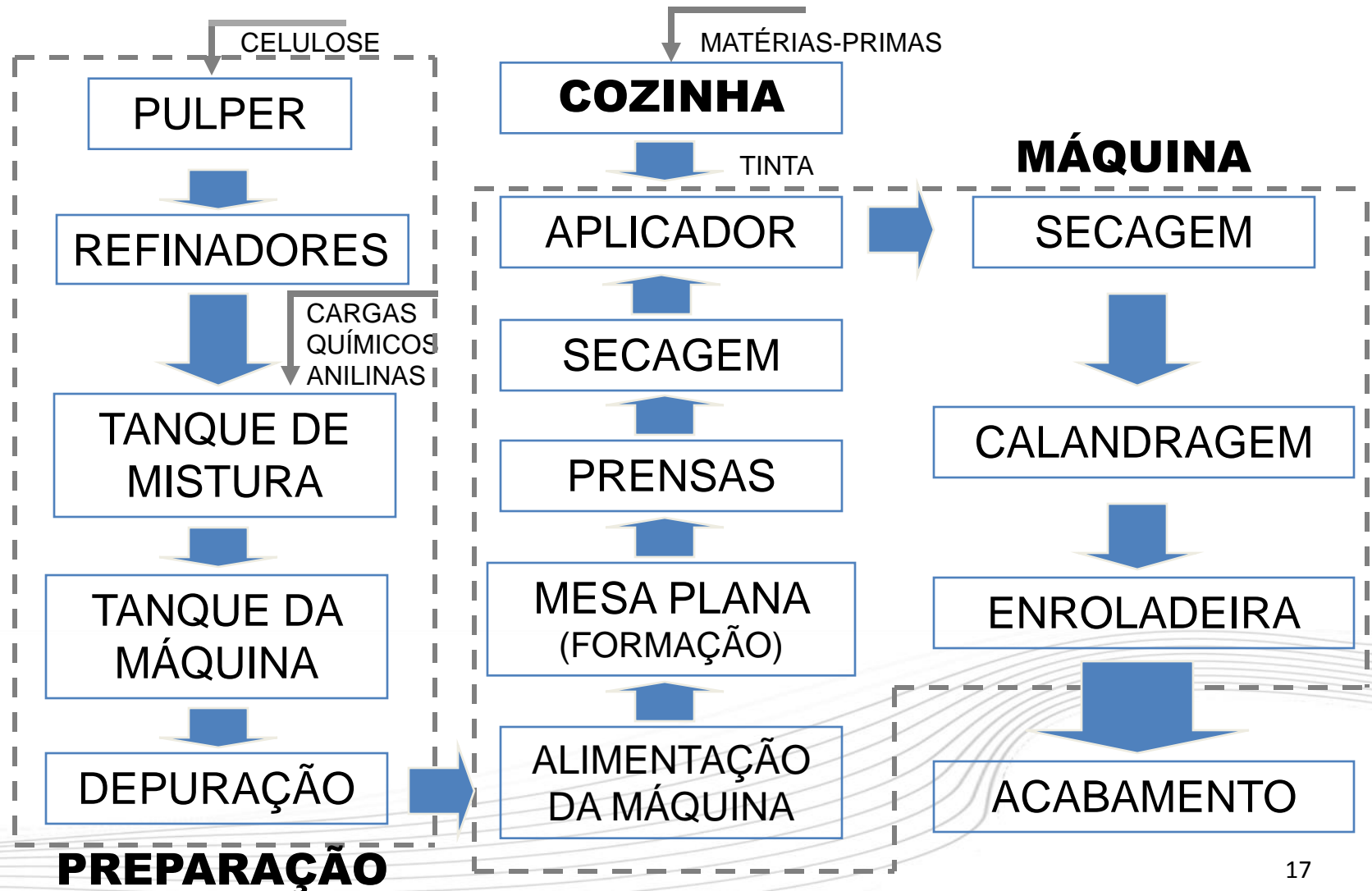
PRENSAGEM

SECAGEM

CLANDRAGEM



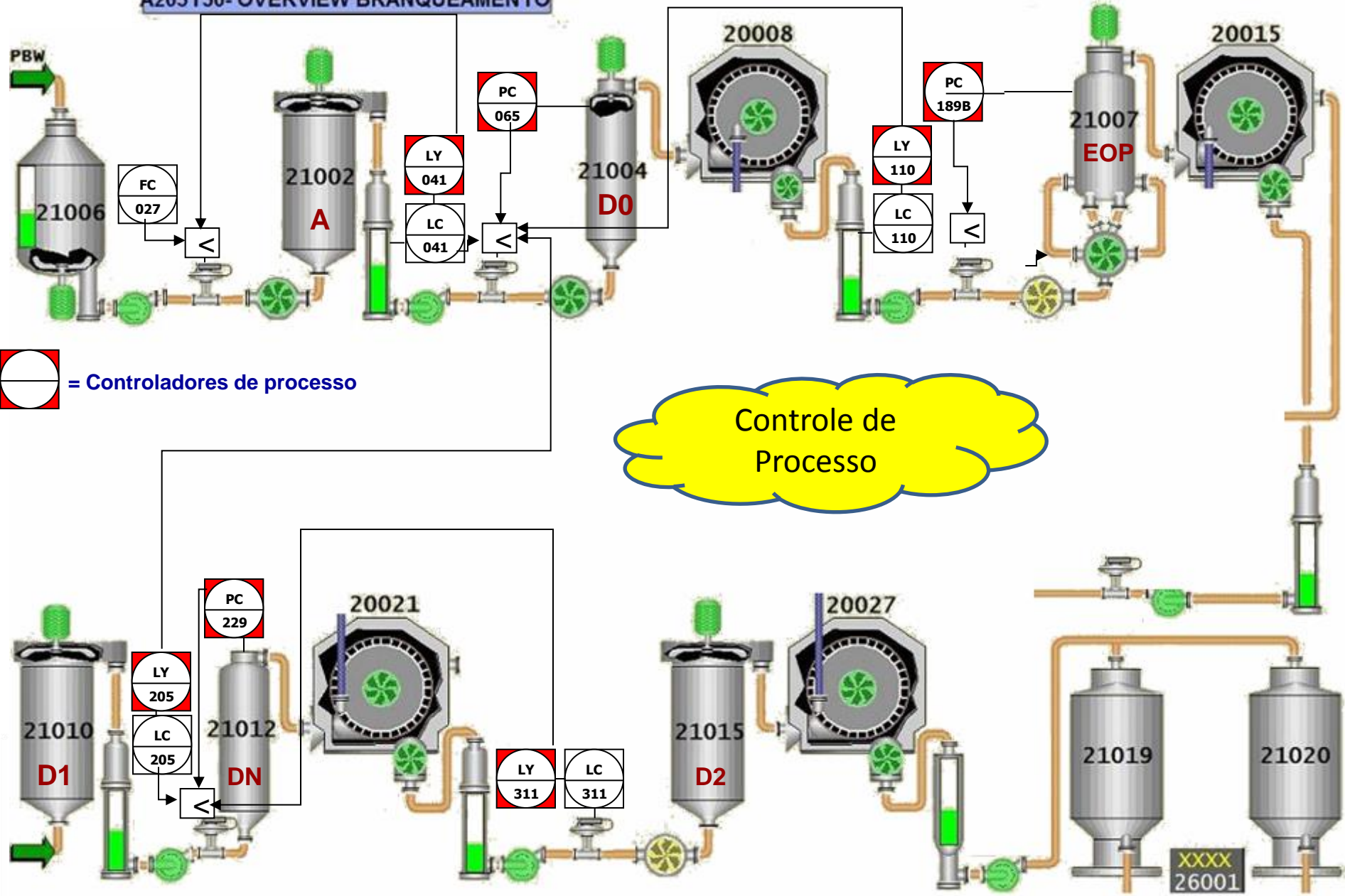
Etapas do processo de fabricação do papel



Desafios para o engenheiro de controle e automação na indústria

- Redução do consumo específico de matéria prima, energia, insumos químicos e água.
- Redução dos custos de produção.
- Redução da variabilidade do processo produtivo.
- Redução dos desperdícios.
- Maximização da utilização de seu parque industrial instalado.
- Cumprir com as normas que regulam o meio ambiente.
- Conseguir o conhecimento completo do seu processo.

A205T50- OVERVIEW BRANQUEAMENTO

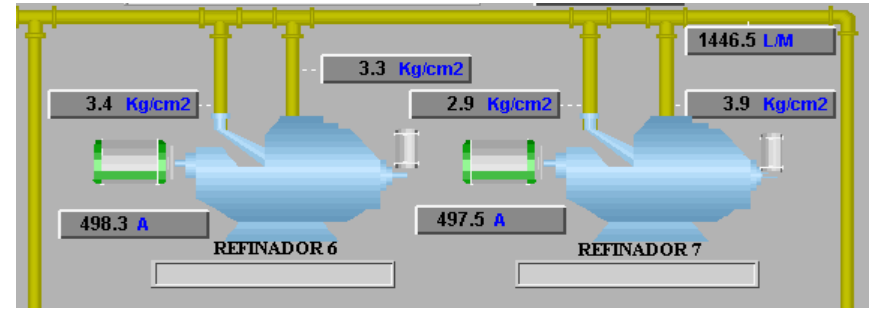


 = Controladores de processo

Controle de Processo

Controles (Refinação)

- Situação atual



- Refinação: O set-point dos refinadores não é alterado automaticamente de acordo com a análise do laboratório.
- Também não é utilizada a informação de potencia especifica

- Melhoria na estratégia de controle
(Sindus, Andritz)

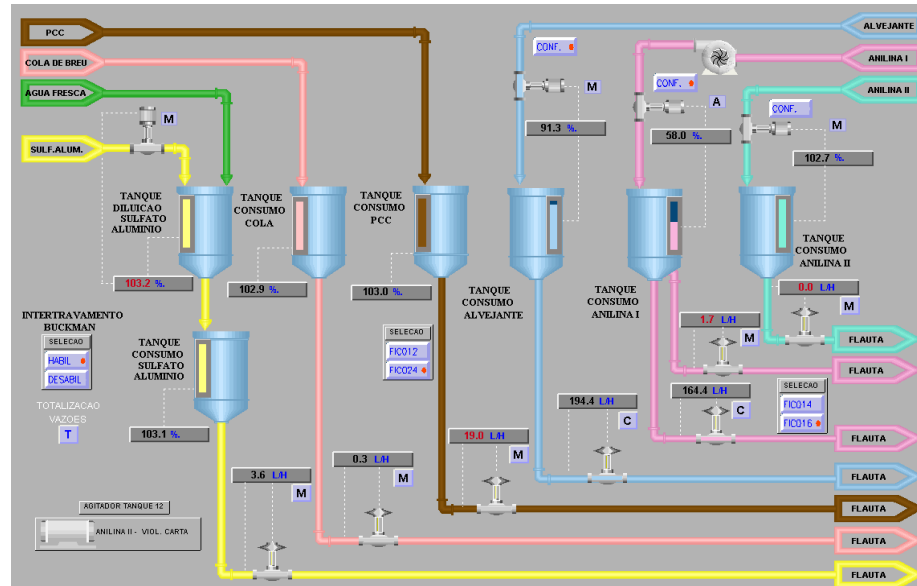
Controle de
Processo

- Controle baseado na potencia especifica e na análise do laboratório de dados de antes e depois do refinador.
- Desenvolvimento de um analisador virtual.

Análise de
desgaste/ tempo
de vida equipts.

Preparação de Massa

Adição de cargas minerais e aditivos

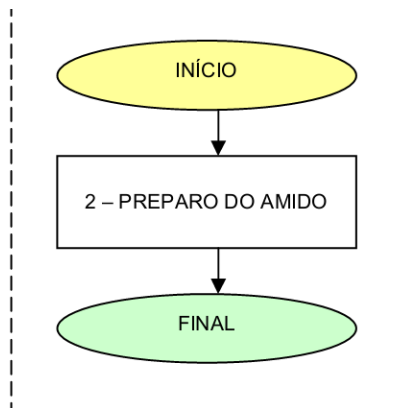


Auditoria consumos

2 – PREPARO DO AMIDO

- X1 – Umidade do amido em pó
- X2 – Impureza do amido
- X3 – pH do amido
- X4 – Grau de substituição do amido
- X5 – Nível de água do tanque
- X6 – Quantidade de amido
- X7 – Vazão de vapor
- X8 – Vazão de água pré-diluição
- X9 – Vazão de água pós-diluição
- X10 – Vazão de amido em suspensão

- R1 – Pressão de vapor
- R2 – Impureza no filtro



- Y1 – Temperatura do amido cozido
- Y2 – Sólidos do amido cozido
- Y3 – Grau de cozimento do amido
- Y4 – Viscosidade do amido cozido
- Y5 – pH do amido cozido
- Y6 – Impureza do amido cozido

PP – Amido cozido para dosagem sobre a massa celulósica

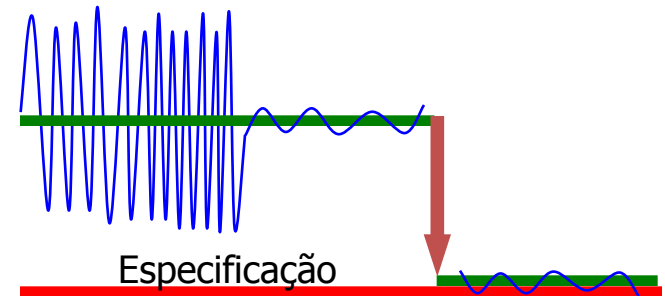
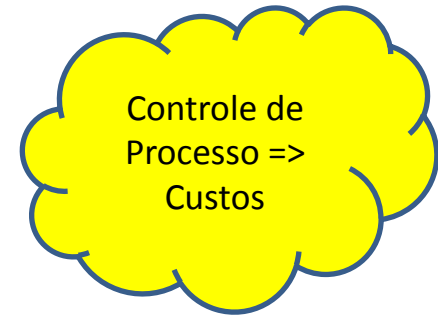
Controle de Qualidade

Receita de Fabricação

Operator Window #1: Graphic 4
RECEITA ADITIVOS

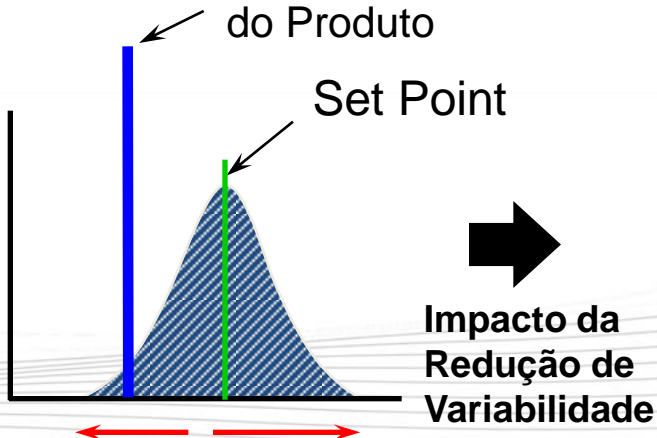
ADITIVO	CONCENTR.	DENSIDADE	DOSAGEM	SET POINTS	VAZAO REAL	STATUS
AMIDO MASSA				1818.61 LH	1820.93 LH	C
AMIDO TOTAL	4.0800 %	1.0000 g/cm ³	10.0000 Kg/Ton	3416.11 LH	26.6250 L/min	AMIDO ASA
COLA ASA	100.000 %	1.0000 g/cm ³	0.9000 Kg/Ton	16.5223 Kg/h	0.1422 Kg/h	
SULF. ALUMINIO	100.000 %	1.3280 g/cm ³	0.0000 Kg/Ton	0.0000 LH	31.894 LH	M -26.291 LH M
PAC	100.000 %	1.3800 g/cm ³	1.0000 Kg/Ton	13.3033 LH		
PCC	29.4897 %	1.2160 g/cm ³	150.0000 Kg/Ton	7679.39 LH	7738.75 LH	C 21.9106 LH M
ALVEJ. OPTICO	20.0000 %	1.0000 g/cm ³	3.5000 Kg/Ton	321.269 LH	372.132 LH	C
CORANTE I	0.2500 %	1.0000 g/cm ³	0.0900 Kg/Ton	660.883 LH	1.6469 LH	M 658.750 LH C
CORANTE II	0.2500 %	1.0000 g/cm ³	0.0000 Kg/Ton	0.0000 LH	2.6659 LH	M
RETENTOR	0.3500 %	1.0000 g/cm ³	0.1841 Kg/Ton	967.015 LH	965.250 LH	C
SILICA	100.000 %	1.0780 g/cm ³	1.8412 Kg/Ton	31.4033 LH		
CARTARETIM	10.0000 %	1.0000 g/cm ³	0.1340 Kg/Ton	0.4100 L/min		
RESINA R U	7.5000 %	1.0000 g/cm ³	0.0000 Kg/Ton	0.0000 LH	1.7645 LH	M
BUSPERSE 2454	100.000 %	1.1600 g/cm ³	0.2750 Kg/Ton	5.9346 LH		
BUSAN 1125C	100.000 %	1.2100 g/cm ³	0.7850 Kg/Ton	16.2403 LH		
BUSAN 1290	100.000 %	1.0600 g/cm ³	0.0823 Kg/Ton	0.0950 L/min		
EZE 629	100.000 %	1.0750 g/cm ³	0.0000 Kg/Ton	0.0000 L/min		
EZE 278	100.000 %	1.1900 g/cm ³	0.3500 Kg/Ton	0.0900 L/min		
COAGULANTE	0.0000 %	1.0000 g/cm ³	0.0000 Kg/Ton	0.0000 LH		
COAGULANTE KG/TON REFUGO REVESTIDO			0.0000 Kg/Ton	0.0000 LH		M
FIBRA JACAREI			0.0000 Kg/Ton			
FIB. LUIS ANTONIO			650.415 Kg/Ton			
FIBRA RIPASA			0.0000 Kg/Ton			
REFUGO			79.0161 Kg/Ton			
REVEST. FORMUL.			199.997 Kg/Ton			
REVEST. AMIDO			0.0000 Kg/Ton			

ENTRADA DE DADOS	
GRAMATURA	115.00 g/m ²
LARGURA ENROL.	4.19 M
VELOCIDADE MAO	635.00 M/min
FIBRA JACAREI	0.00 %
FIBRA LUIS ANTONIO	100.00 %
FIBRA RIPASA	0.00 %
CALCULO PROD.	18.36 T/h
FIBRA	11.93 T/h
FORMULAÇÃO	23.00 g/m ²
AMIDO BARREIRA	0.00 g/m ²
PERDA ESGOTO	15.65 %
PERDA ESG. SECO	6.96 %

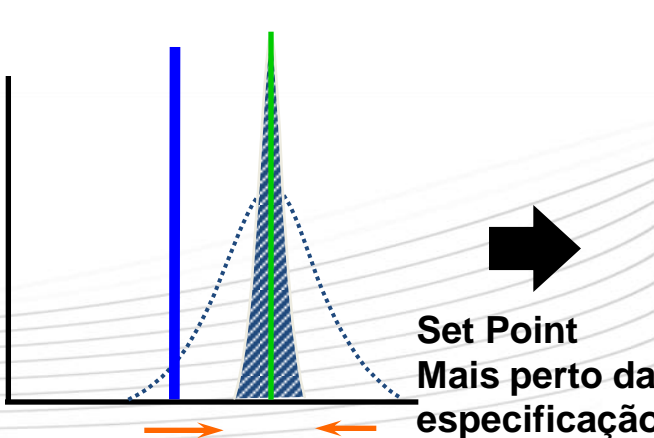


Especificação do Produto

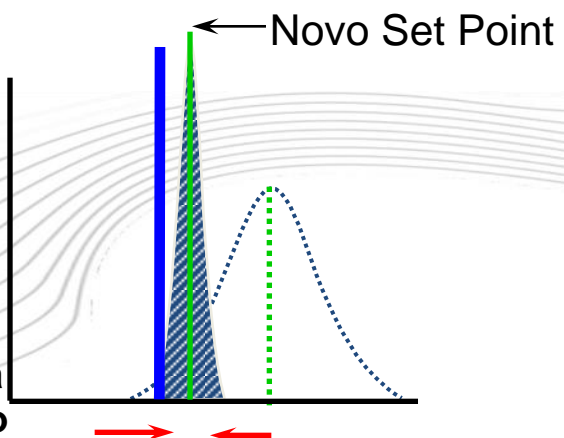
Set Point



Impacto da Redução de Variabilidade



Set Point Mais perto da especificação



CAIXA DE ENTRADA

Objetivos da Caixa de Entrada

- ✓ Distribuição uniforme da massa tratada em relação à largura da máquina (CD);
- ✓ Equalização do fluxo de massa e da velocidade;

Controle avançado
de processos

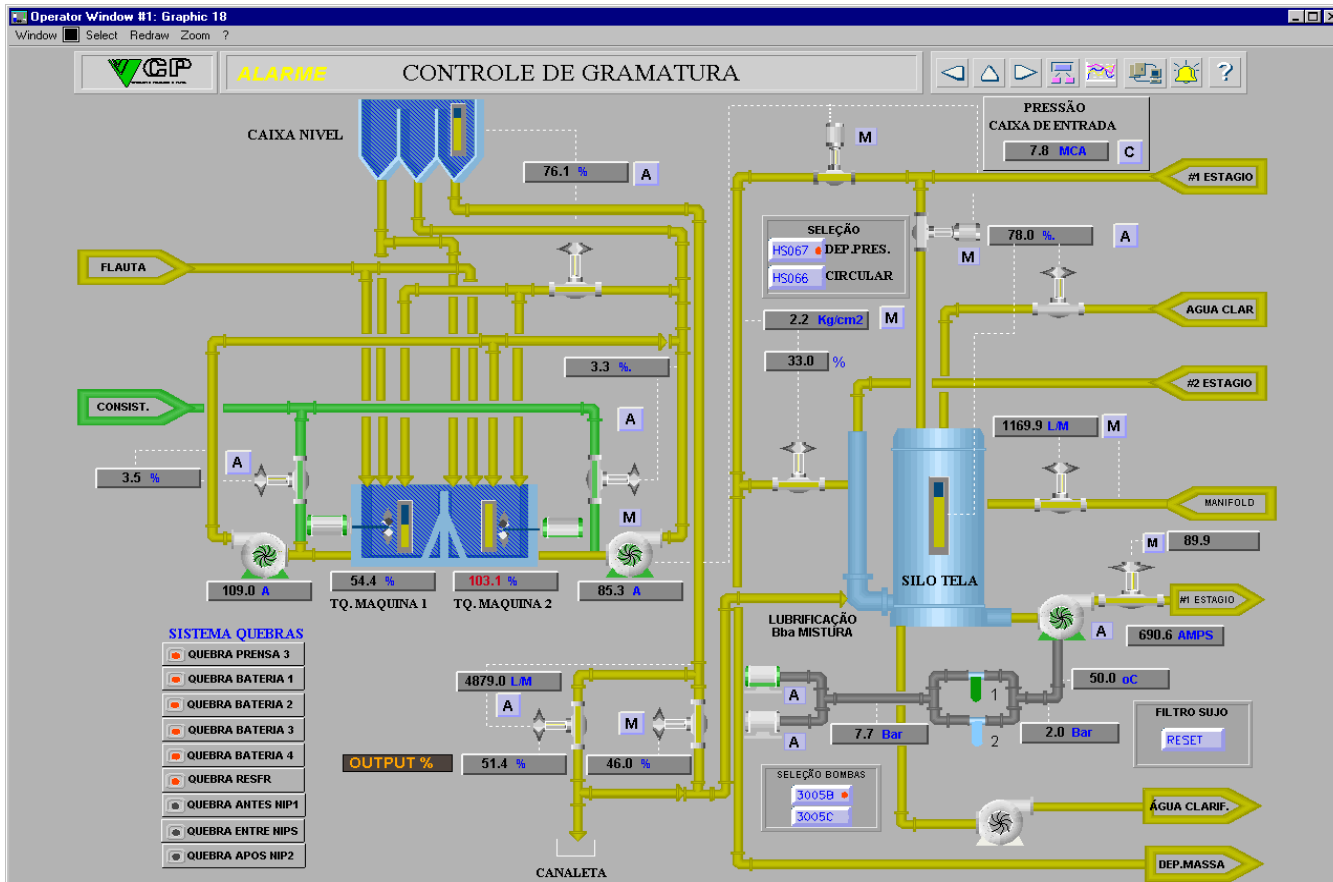


Caixa de entrada

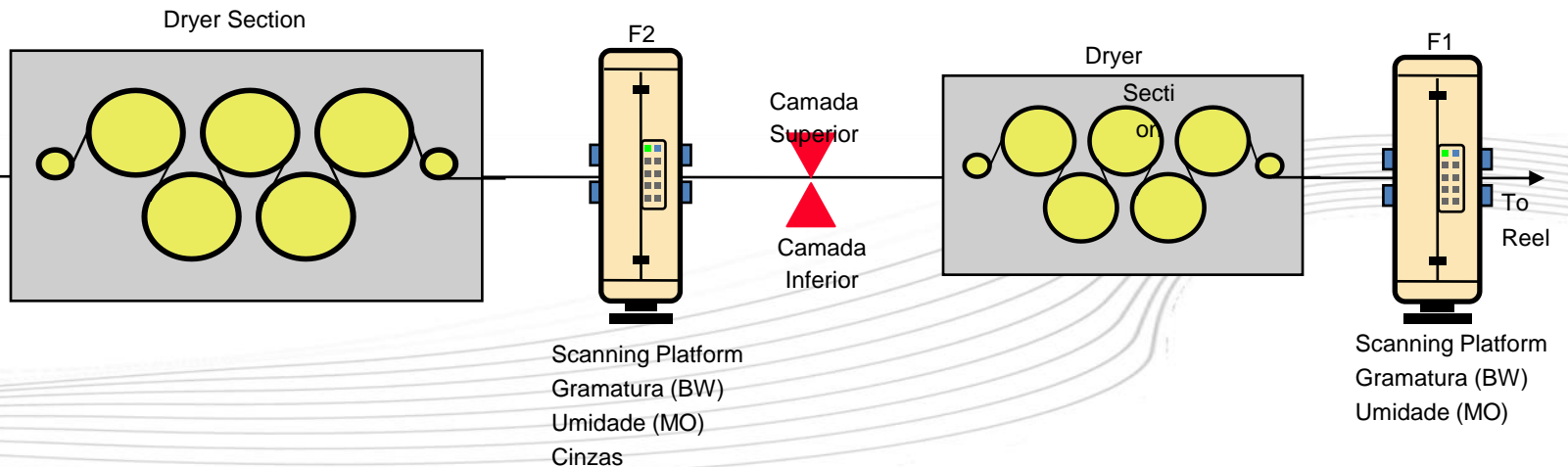


Modulo Jet (Profilmatic, Voith):
correção automática do perfil transversal
de g/m².

Controle MD



Controle CD

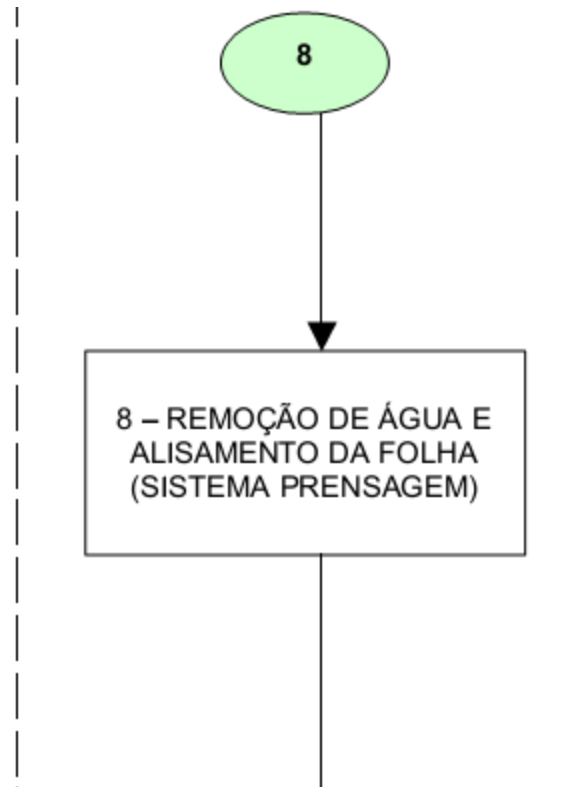


Controle multivariável



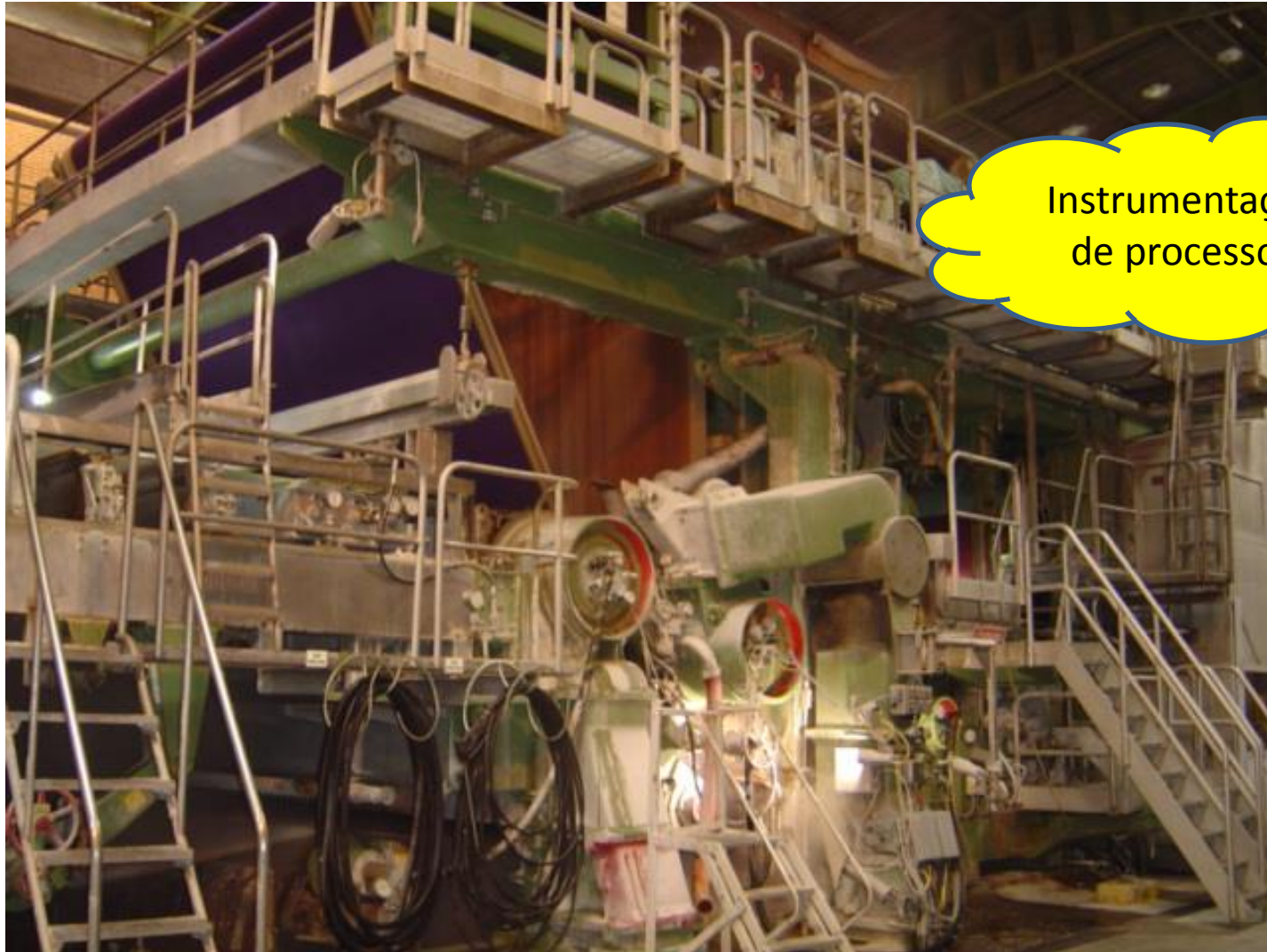
Impacto no processo:

- X1 – Pressão nas prensas LA
- X2 – Pressão nas prensas LC
- X3 – Pressão de abaulamento da 3ª prensa
- X4 – Pressão linear das
- X4 – Rejeito do 5º estágio
- X5 – Permeabilidade dinâmica dos Feltros
- X6 – Volume ativo dos feltros
- X7 – Remoção de água dos feltros
- X8 – Vácuo das caixas lavadoras
- X9 – Vácuo do rolo pick-up
- X10 – Vácuo do rolo transferência da 3ª prensa
- X11 – Pressão na caixa de vapor
- X12 – Temperatura na caixa de vapor
- X13 – Vácuo da caixa mata bolha
- X14 – Tempo de vida útil do rolo central
- X15 – Tempo de vida útil do rolo 2ª prensa
- X16 – Tempo de vida útil do rolo 3ª prensa
- X17 – Tempo de vida útil do rolo transferência 3ª prensa



- Y1 – Perfil transversal de umidade do papel
- Y2 – Consumo específico de vapor

PP – Folha de papel formada



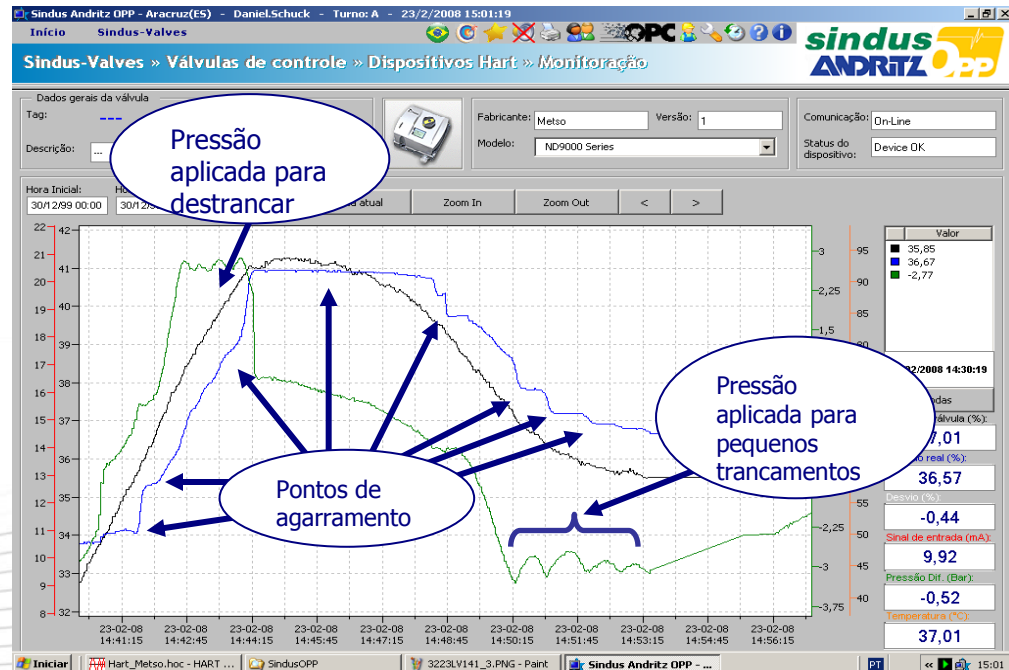
Instrumentação
de processos

Prensa Compacta

Instrumentos de Campo

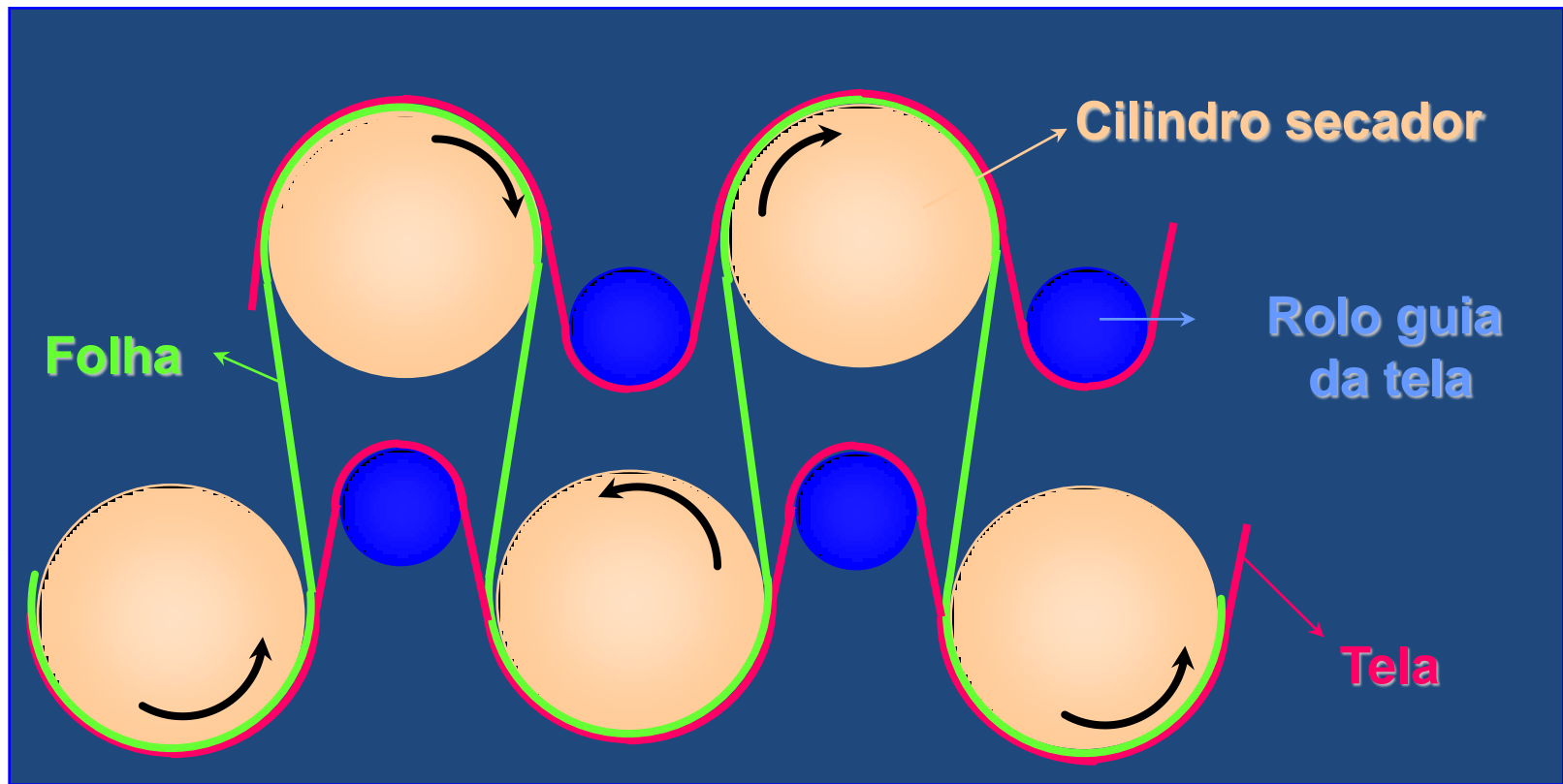


Afeta desempenho do controle



SEÇÃO DE SECAGEM:

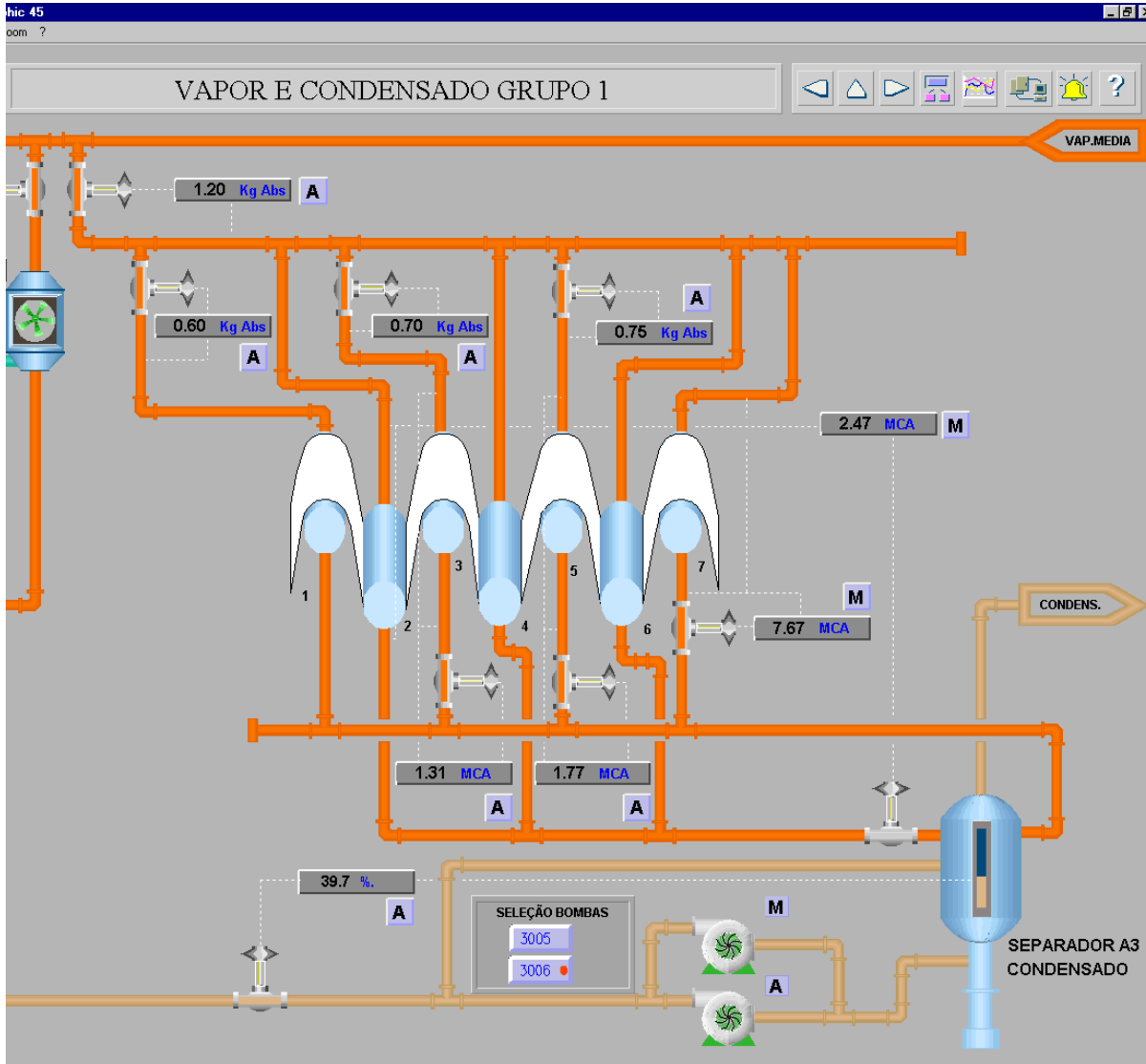
- A operação de secagem retira a água dentro da fibra, proporcionando a secagem interna da mesma





Controle de máquinas elétricas

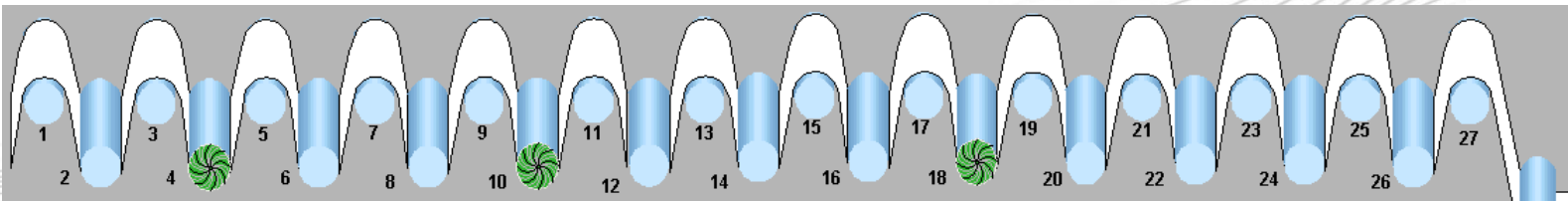
Seção de Secagem sem Coifa

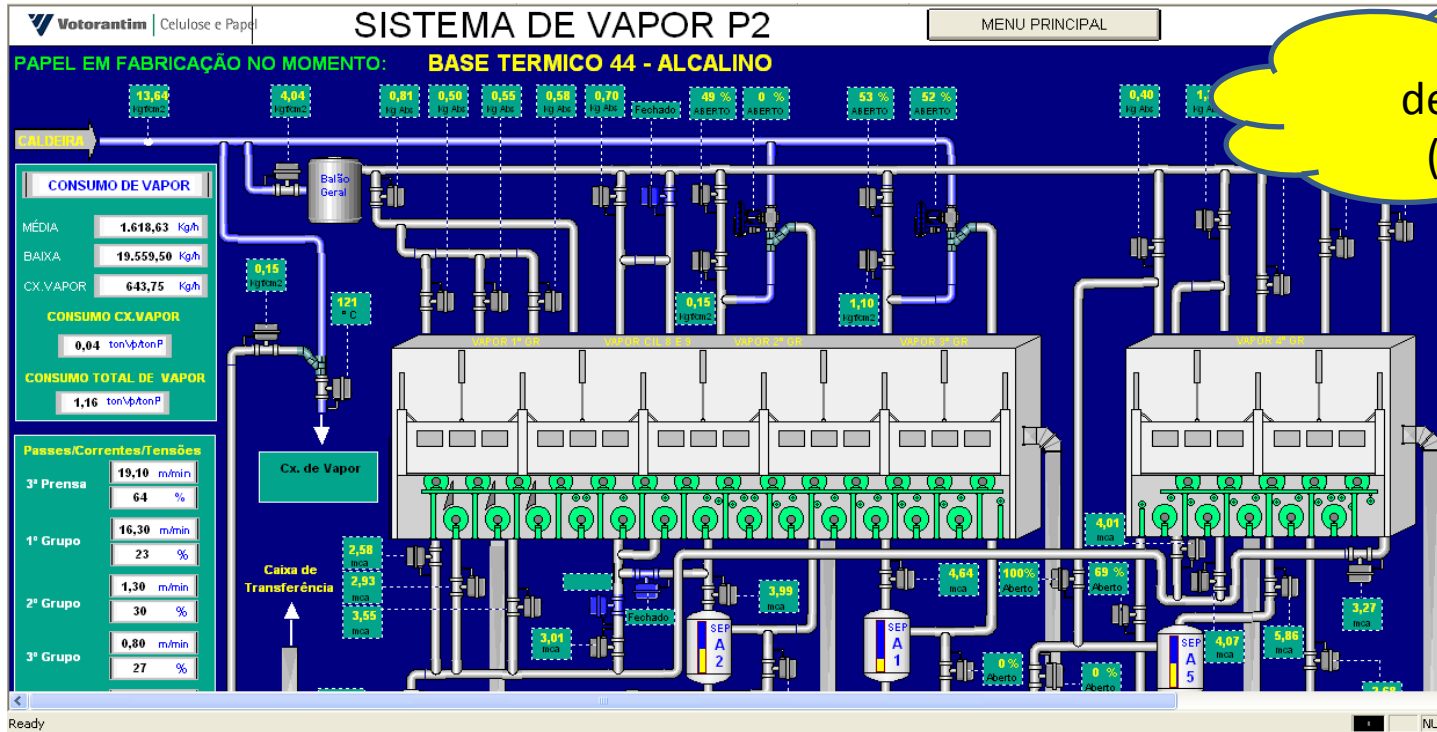


Complexidade

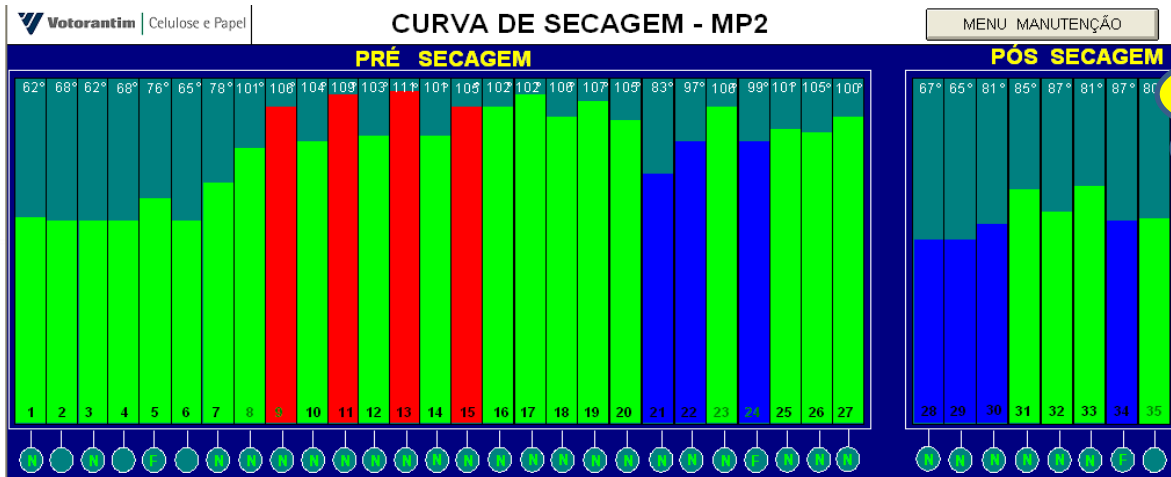
Consumo de vapor para controle de umidade

Controle multivariável de processos

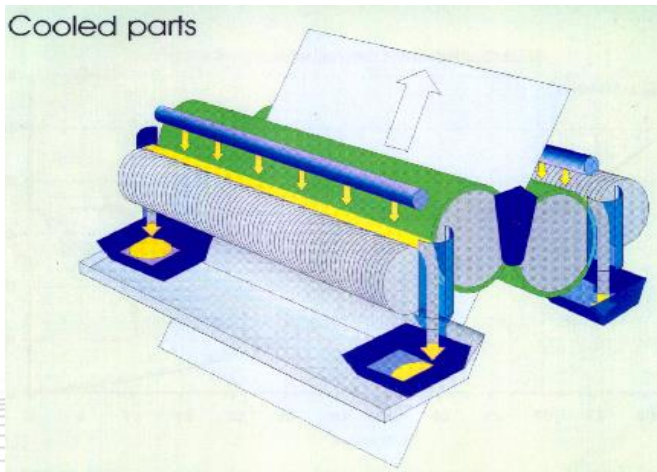




Set-up de operação (baseline)



Otimização no controle de umidade



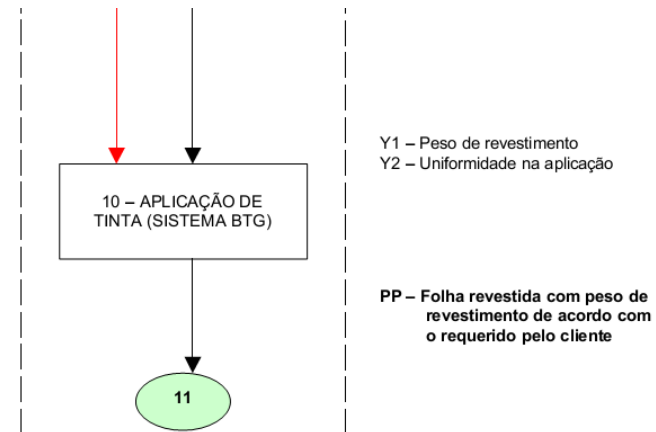
APLICAÇÃO DE REVESTIMENTO

O aplicador é um conjunto de rolos que tem função de revestir o papel com amido, pigmento ou tinta, de modo a melhorar a superfície do papel, resistência e printabilidade.

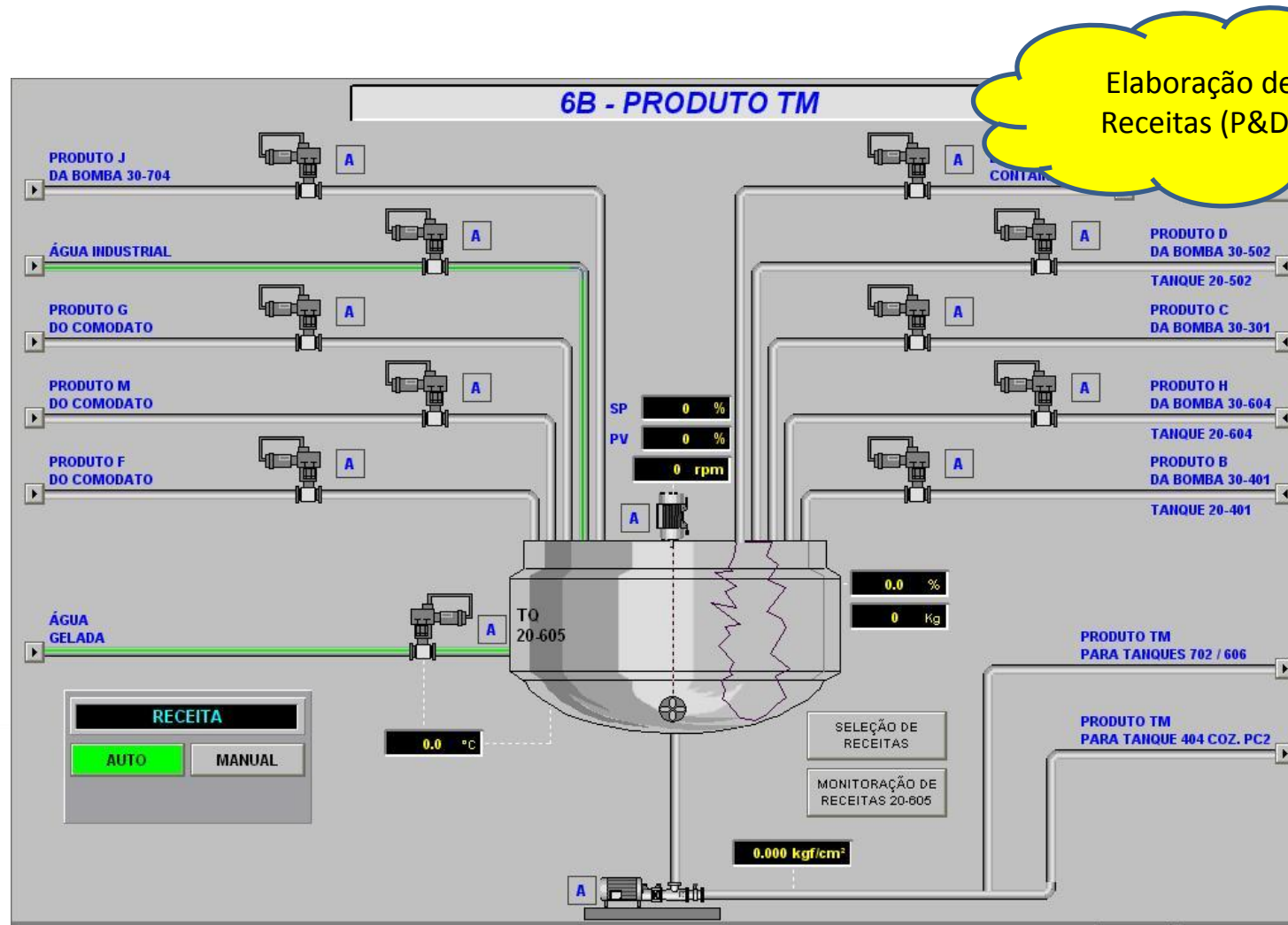


- X1 – Vazão de tinta
- X2 – Nip dos rolos
- X3 – Velocidade dos rolos
- X4 – Diferencial de pressão das raspas
- X5 – Ângulo Jet Flow
- X6 – Ângulo das raspas
- X7 – Pressão da linha de tinta
- X8 – Temperatura da água dos rolos
- X9 – Nível dos tanques de cabeça de Máquina
- X10 – Pressão de ar insuflamento (Air-Turn)
- X11 – Pressão de ar do bocal Estabilizador

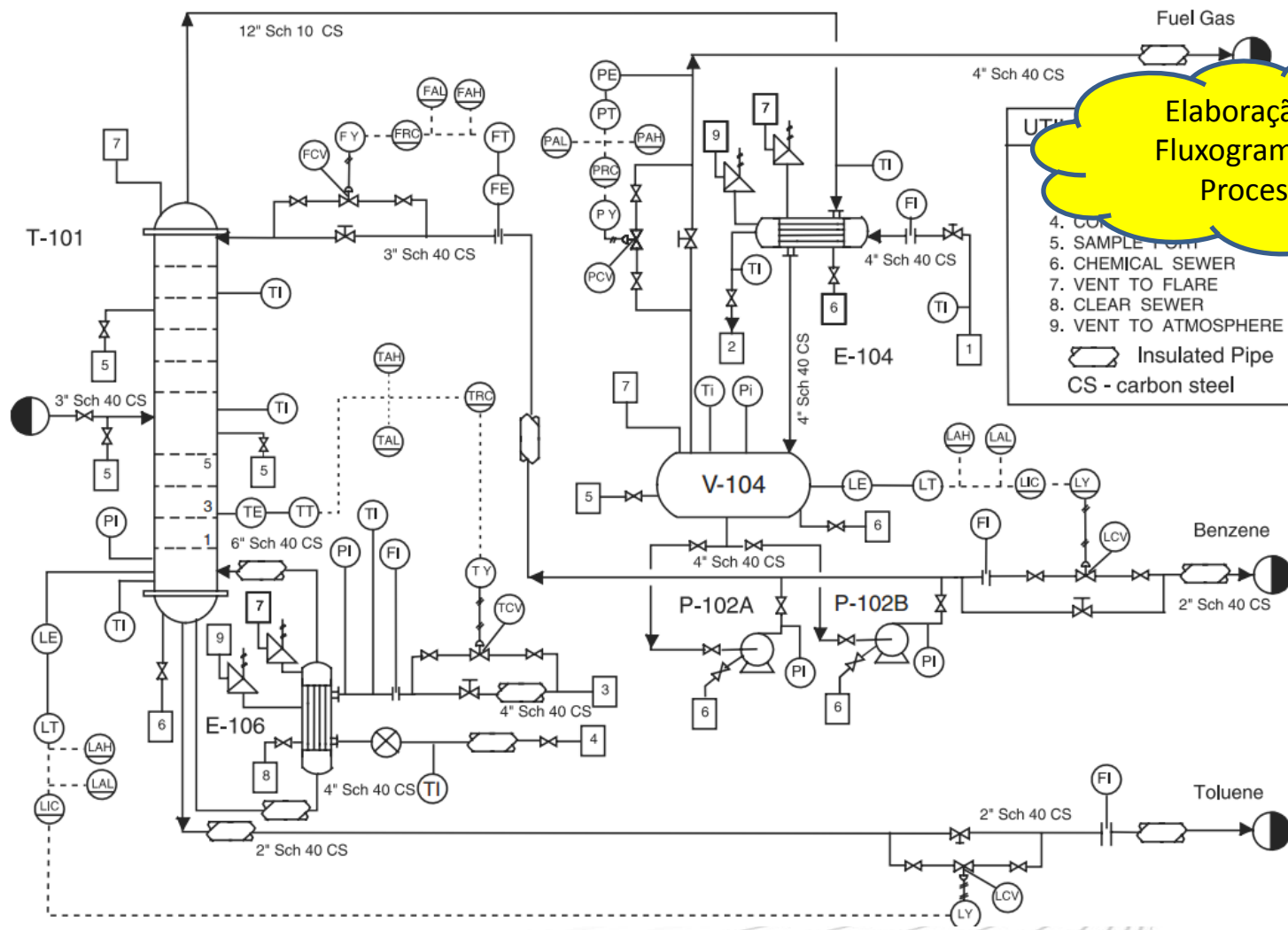
- R1 – Ajuste dos parafusos
- R2 – Desgaste dos rolos
- R3 – Diferencial de pressão dos filtros Valmet
- R4 – Índice de retenção de água
- R5 – Limpeza da calandra



Receitas de Fabricação



FLUXOGRAMA BÁSICO



Elaboração de Fluxogramas de Processo

Soft Calandra



CALANDRAGEM

Conceitos

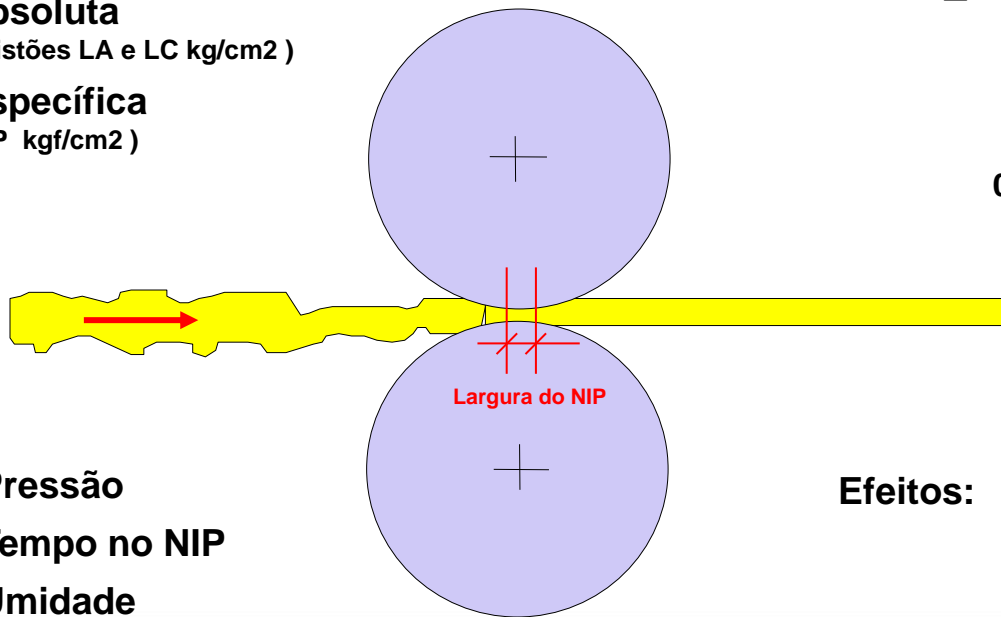
Energia aplicada:

Pressão Absoluta

(na área dos pistões LA e LC kg/cm²)

Pressão Específica

(na área do NIP kgf/cm²)

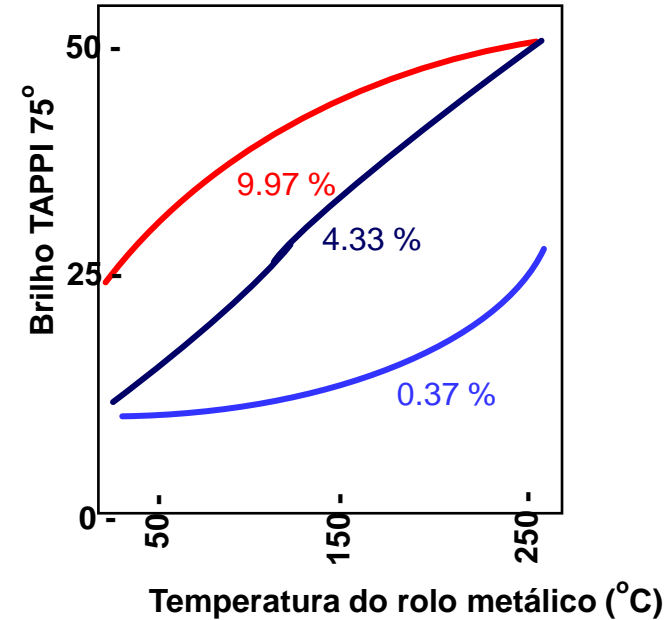


Variáveis: Pressão
Tempo no NIP
Umidade
Temperatura
Material à calandrar
Material dos Rolos

Efeitos: Alteração de Espessura
Alteração de Densidade
Alteração de Corpo
Alteração de Porosidade

Efeito das variáveis de processo.

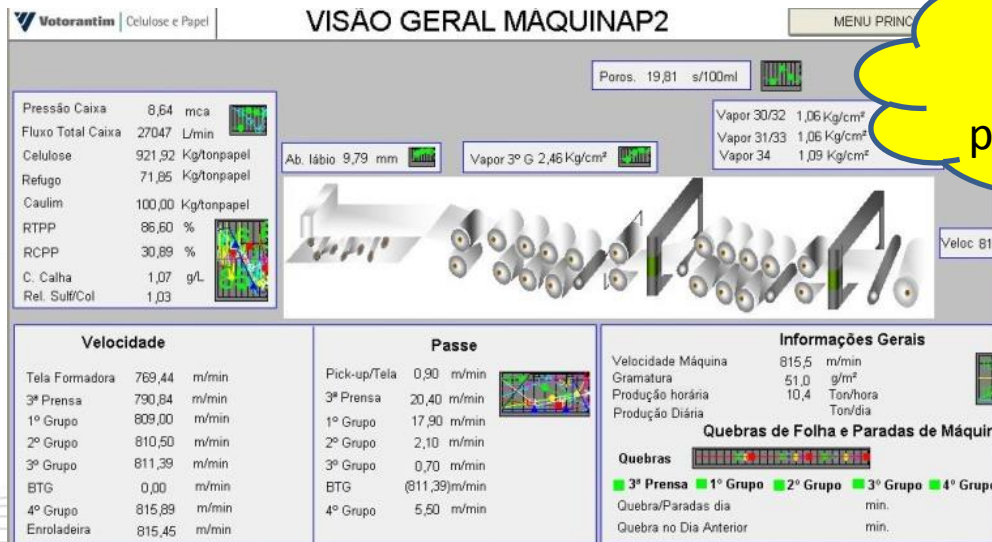
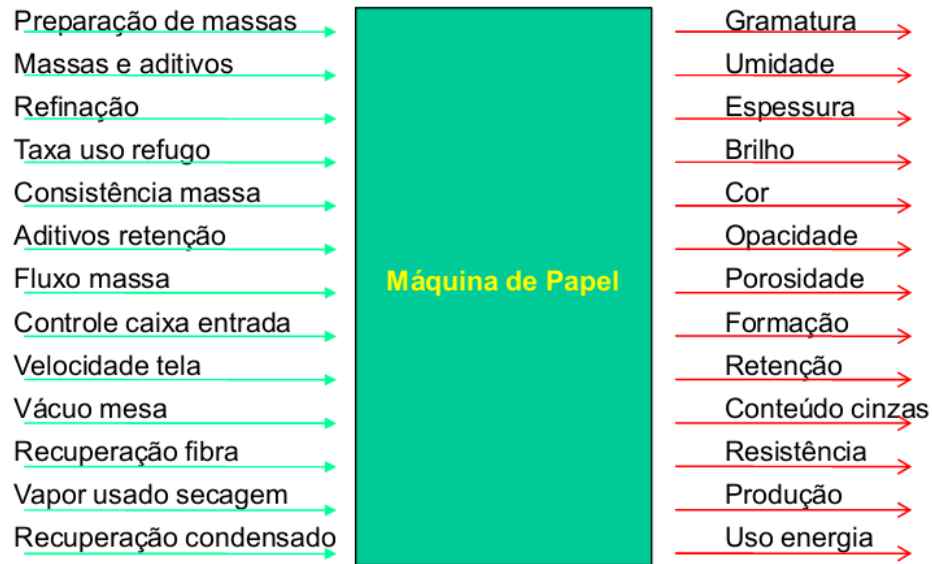
EFEITOS DA UMIDADE DO PAPEL
Experiência de Campo



Enroladeira



Máquinas de Papel: processo multivariável













Análise multivariável de processos ↔ KPIs

Controle de Processos Industriais



Frentes de Trabalho

<p>Integração a ERP (Enterprise resources planning)</p>  	<p>Fluxo de informação para assegurar uma cadeia produtiva sincronizada métodos de produção ligados às plantas, ciclos encurtados de ordem e despacho.</p>	<p>Integração com camada de planejamento, Industry Standards – MESA, ISA95</p>
<p>Nível 3 – MES (Manufacturing execution system)</p>  	<p>Controle de todo o processo produtivo assegurando uma ótima utilização dos recursos disponíveis</p>	<p>Sistemas de planta & mapeamento do processo, projeto de arquitetura MES, implementação.</p>
<p>Controle de Otimização</p>	<p>O conhecimento do controle reside dentro do sistema (tecnologia) na forma de uma modelagem matemática. O sistema é suficientemente inteligente para afetar o controle em si próprio.</p>	<p>Desenvolvimento e remanejamento de tecnologias avançadas de controle, (como MPC, Fuzzy, redes neurais)</p>
<p>Nível 2</p>		
<p>Controle Supervisório</p>  	<p>Controle com o operador utilizando a tecnologia como habilitador.</p>	<p>Desenvolvimento e remanejamento de sistema de controle supervisório, Geração de gráficos de processo, base de dados de Tags, interfaces com PLC</p>
<p>Nível 1- Controle básico Regulatório</p>  	<p>PLC, DCS, PID, controle on - off e receitas</p>	<p>Programação e comissionamento de PLC/DCS, Integração com instrumentação de campo, sintonia PID</p>
<p>Nível 0 - Sensores e Atuadores</p>  	<p>Todos os equipamentos de campo tais como motores, transdutores, solenóides, drives</p>	<p>Comissionamento de H/W, Solenóides, Válvulas, motores, drives e suas interfaces</p>



Objetivos



Objetivos do Controle de Processos

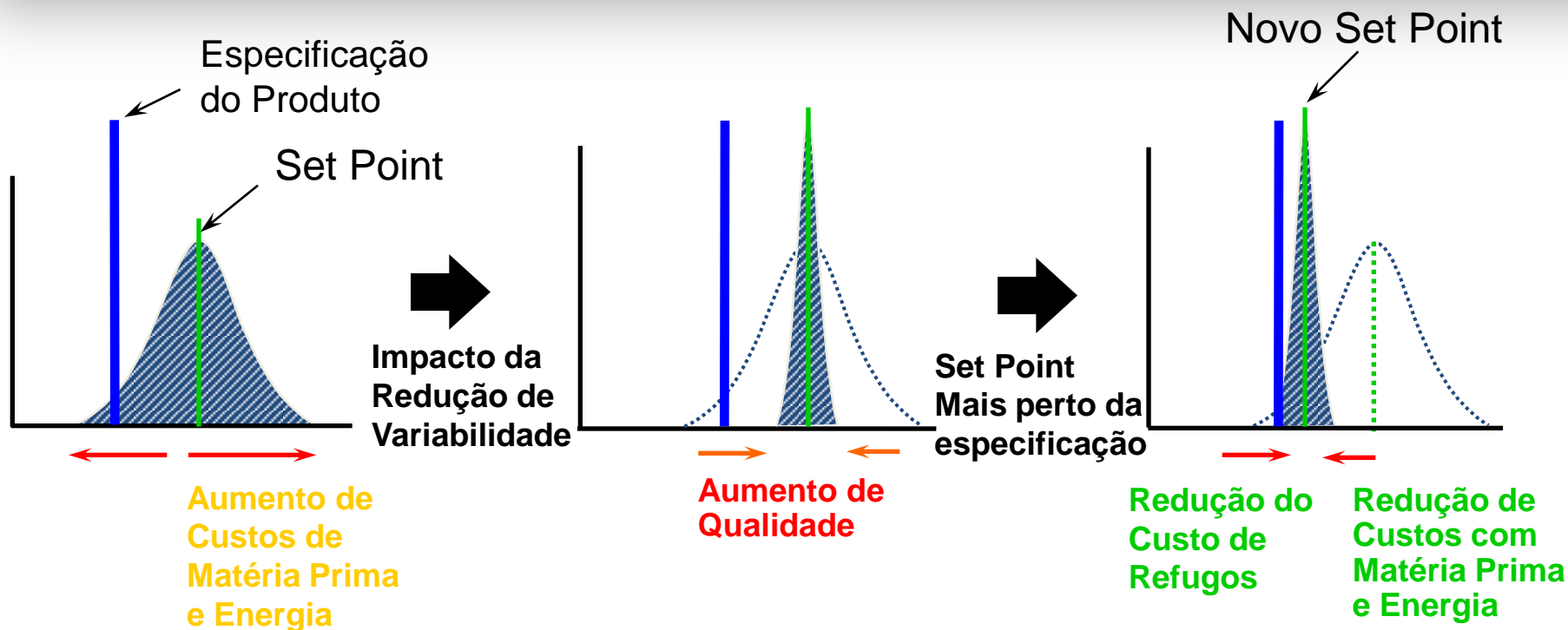
Gerais

- Segurança
 - Pessoas e equipamentos
- Motivações econômicas
 - Atender especificações de qualidade
 - Minimizar gastos energéticos
 - Minimizar desperdícios/ consumo de insumos
 - Maximizar produtividade e eficiência
 - Maximizar tempo de vida dos equipamentos
- Meio-ambiente

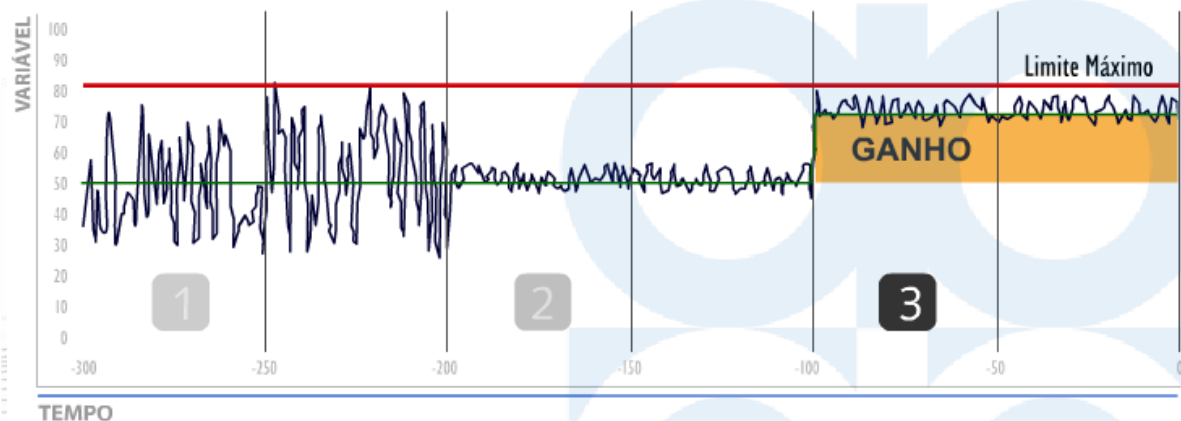
Específicos

- Atenuar distúrbios
- Garantir estabilidade
- Otimizar desempenho (\$)
- Combinação das acima

Redução da Variabilidade

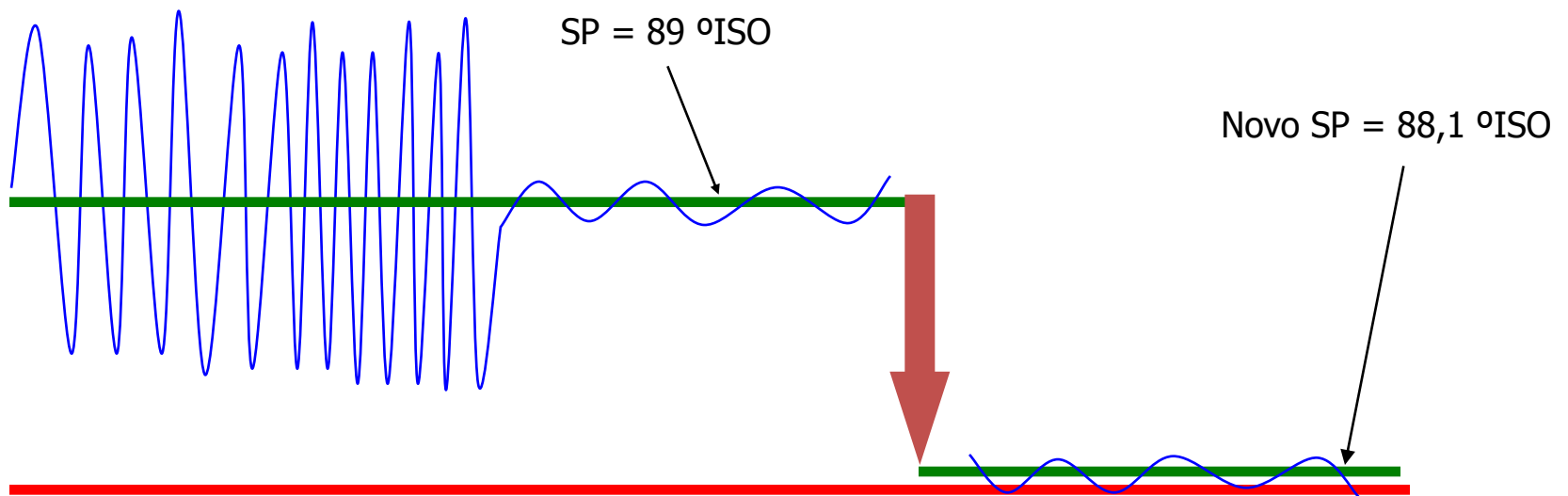


PROCESSO DE OTIMIZAÇÃO DO SISTEMA DE CONTROLE



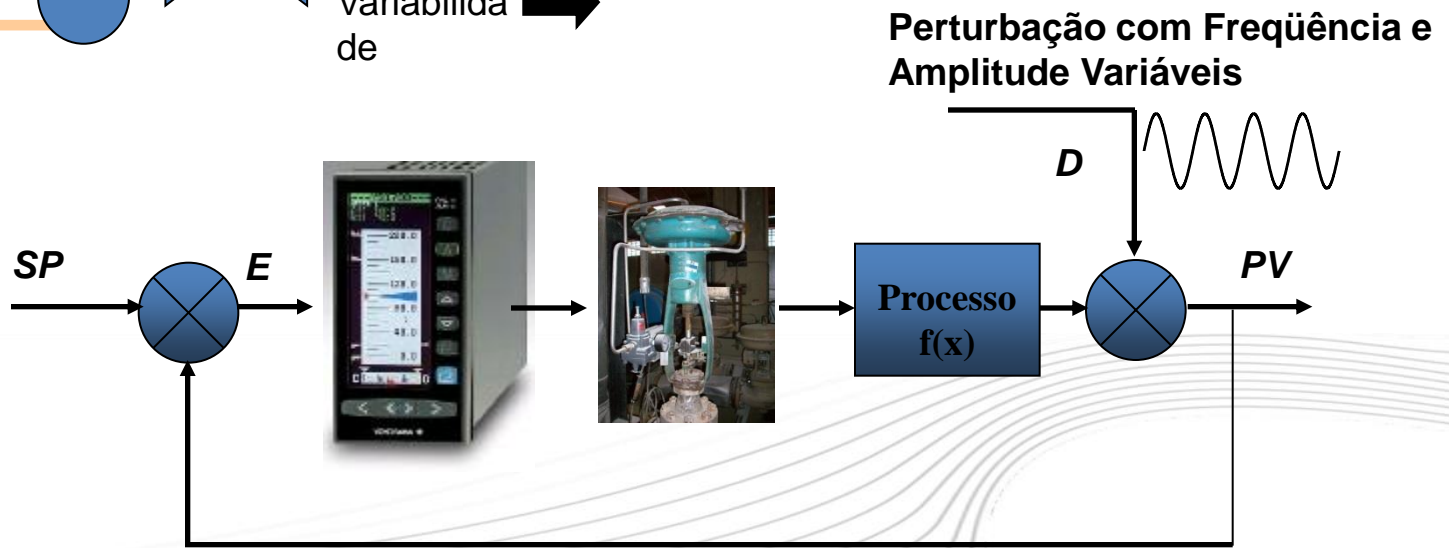
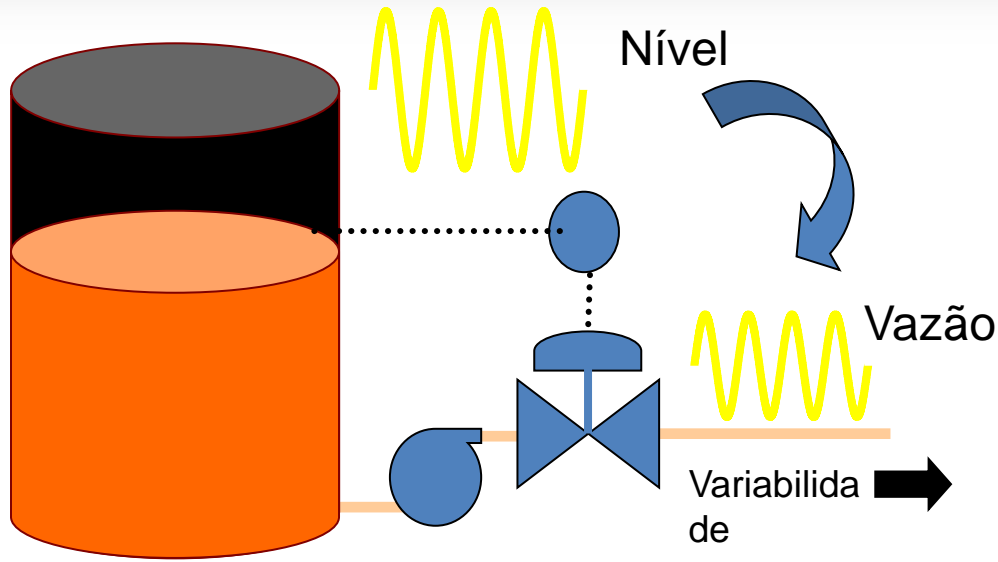
- ↓ Refugo e Matéria Prima
- ↑ Produtividade \$\$\$
- ↑ Qualidade do Produto

EFEITO DA MARGEM DE SEGURANÇA DO OPERADOR (EX.: CONTROLE DE ALVURA)



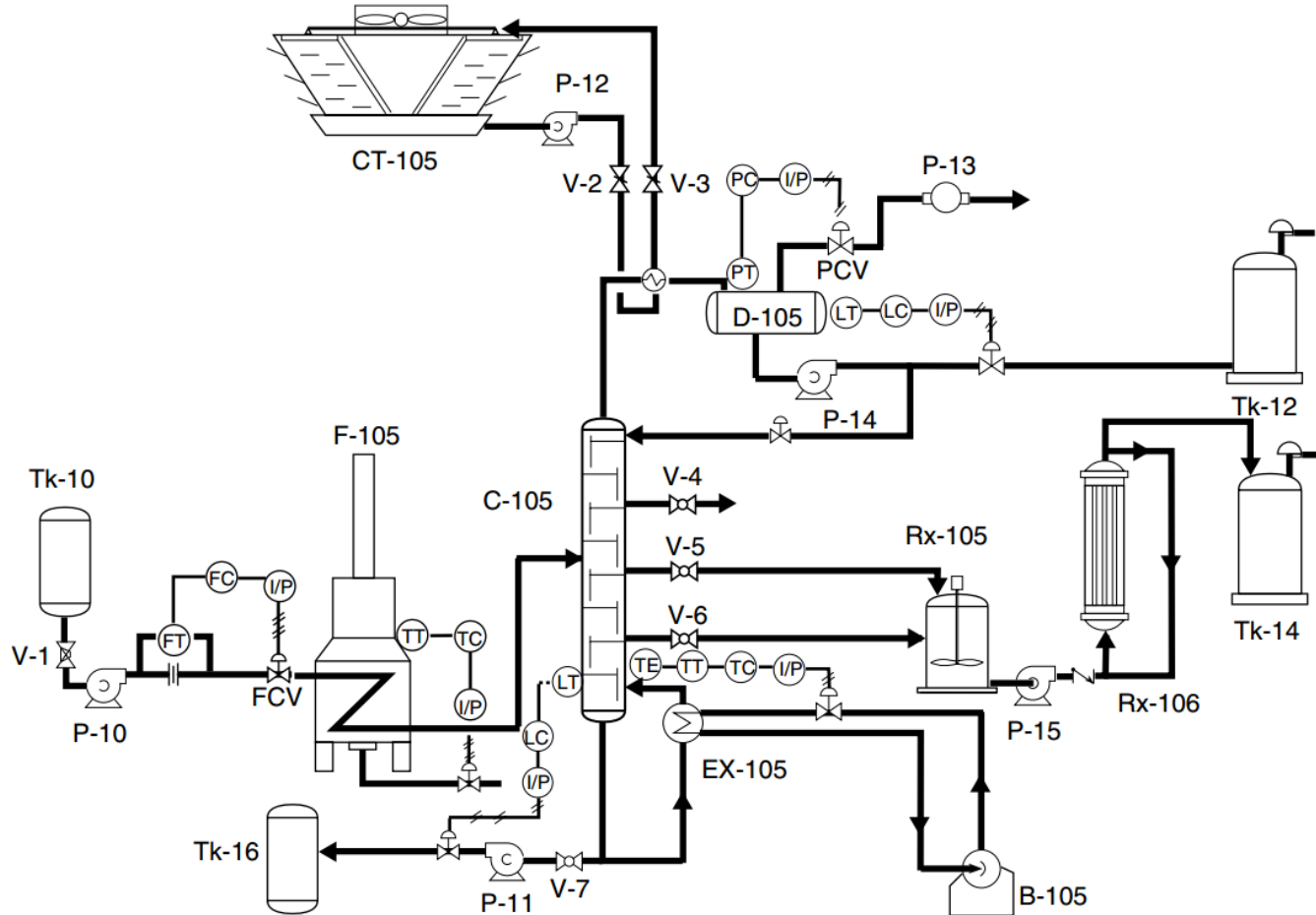
Especificação = 88 °ISO

Estratégia de Controle



Representação de Processos

(P&ID , *piping and instrumentation diagram*)



Desafios e Oportunidades

Engenheiro de Controle e Automação

Malhas de Controle

- Estatísticas
 - 30% das malhas em manual
 - 30% problemas em sensores, atuadores
 - 20% projeto errado e/ou inadequado
 - 85% mal sintonizadas (30% sem sentido)
 - 85% com desempenho insatisfatório
 - 90% das plantas tem um de seus turnos de operadores melhor que os outros
- Somente 20% das malhas operam melhor em automático que em manual !

Problemas Típicos Encontrados

Medição

- Variabilidade
- Ruído
- Não-linearidade

Controle

- Projeto/conceito ruim
- Em manual
- Sintonia

Válvula

- Saturada
- Com Agarramento
- Com Folga

Processo

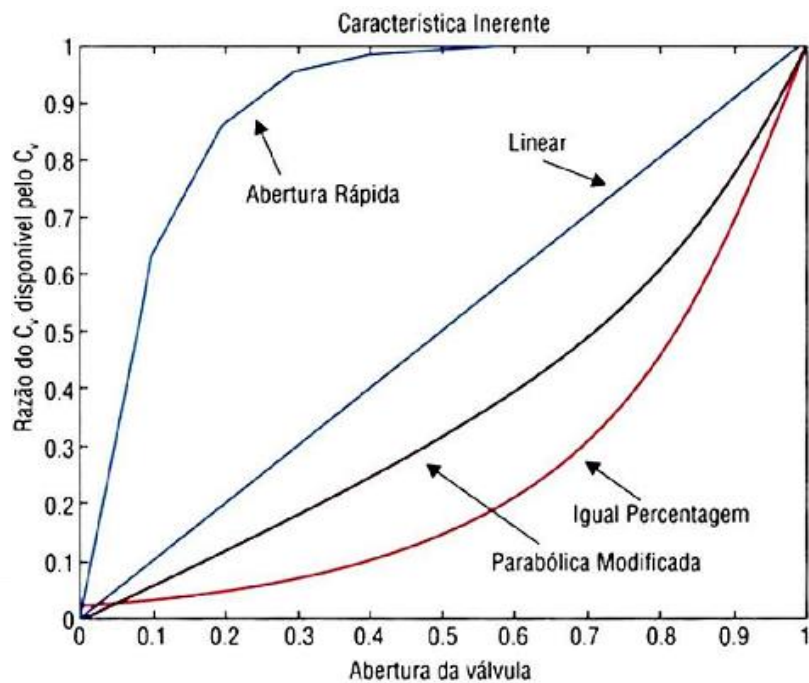
- Distúrbios
- Mudanças do operador
- Interações entre variáveis

Instrumentos

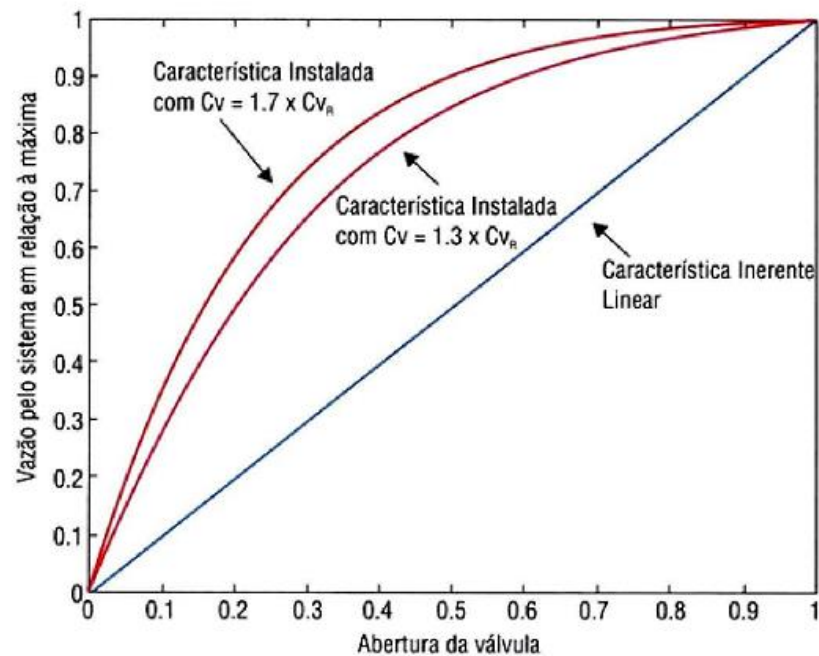


Características não-lineares de válvulas de controle

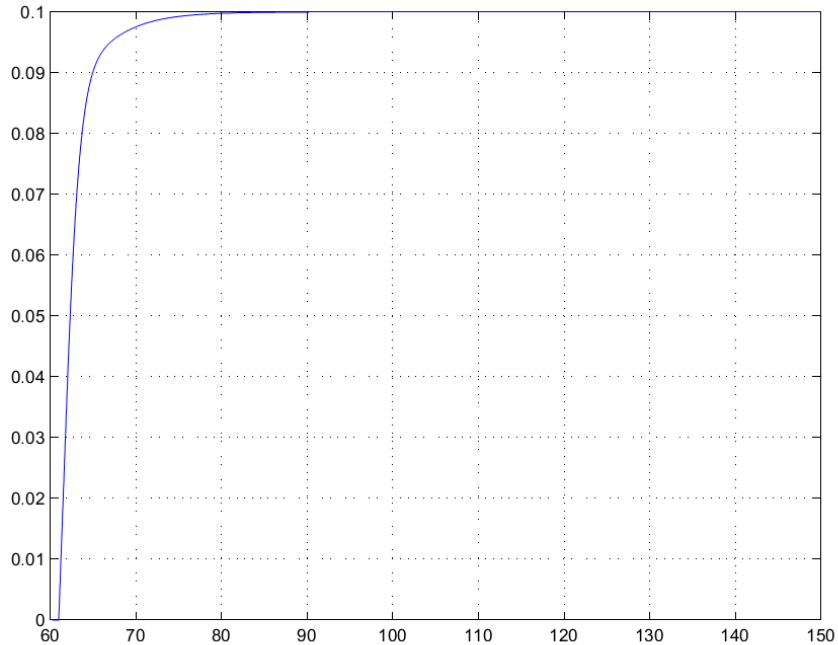
Inerente



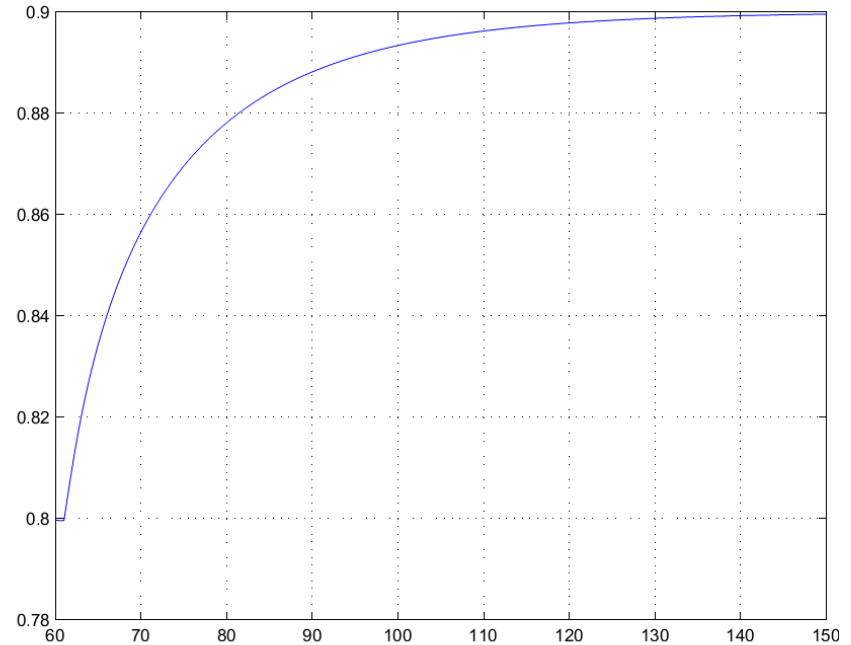
Instalada



Efeito das não-linearidades

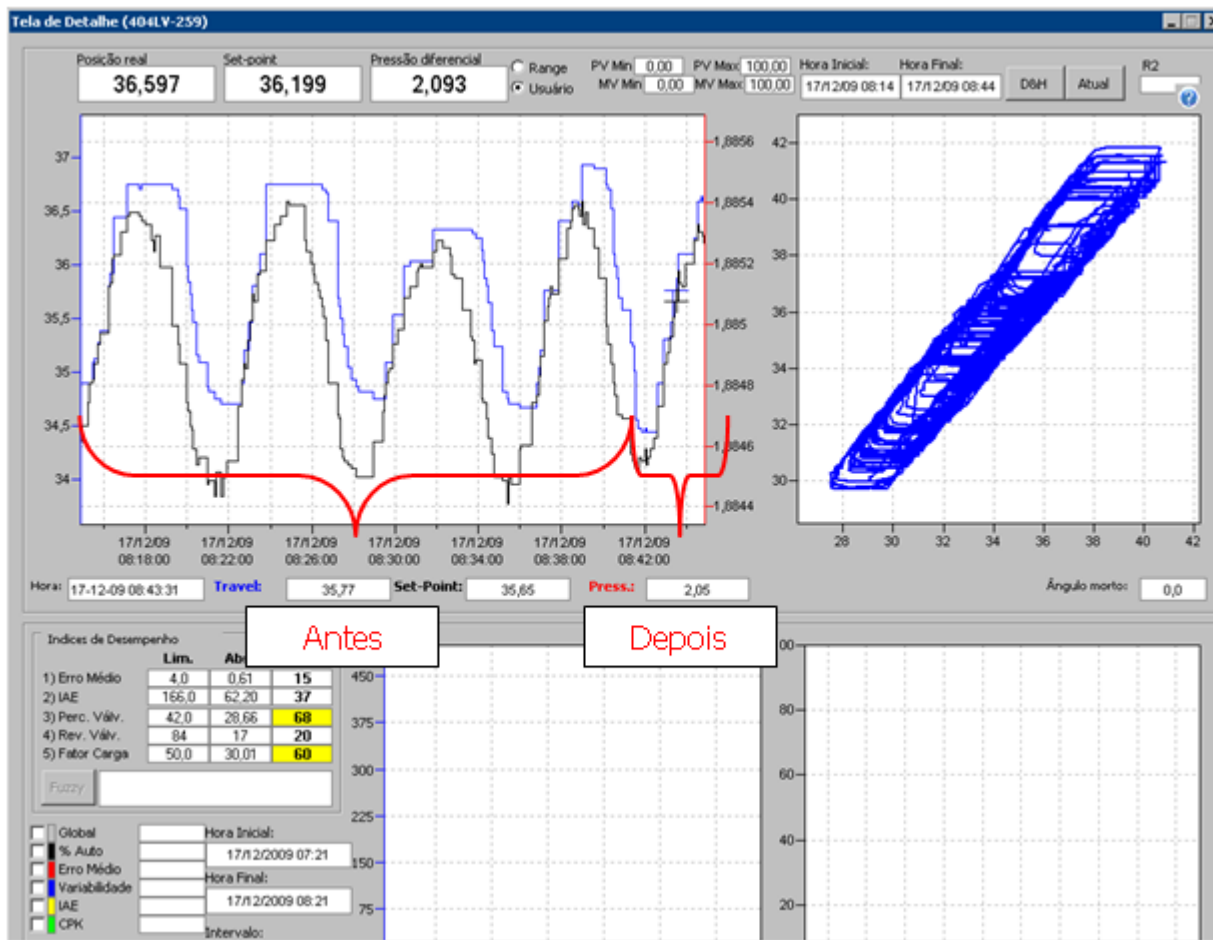


Degrau de 0 a 10% para controlador PI sintonizado para malha em 10% (CHR) $\rightsquigarrow t_s \approx 15$ seg.



Degrau de 80 a 90% para controlador PI sintonizado para malha em 10% (CHR) $\rightsquigarrow t_s \approx 85$ seg.

Problemas em Válvulas



Problemas em Válvulas



Controle de Processos

Estratégias



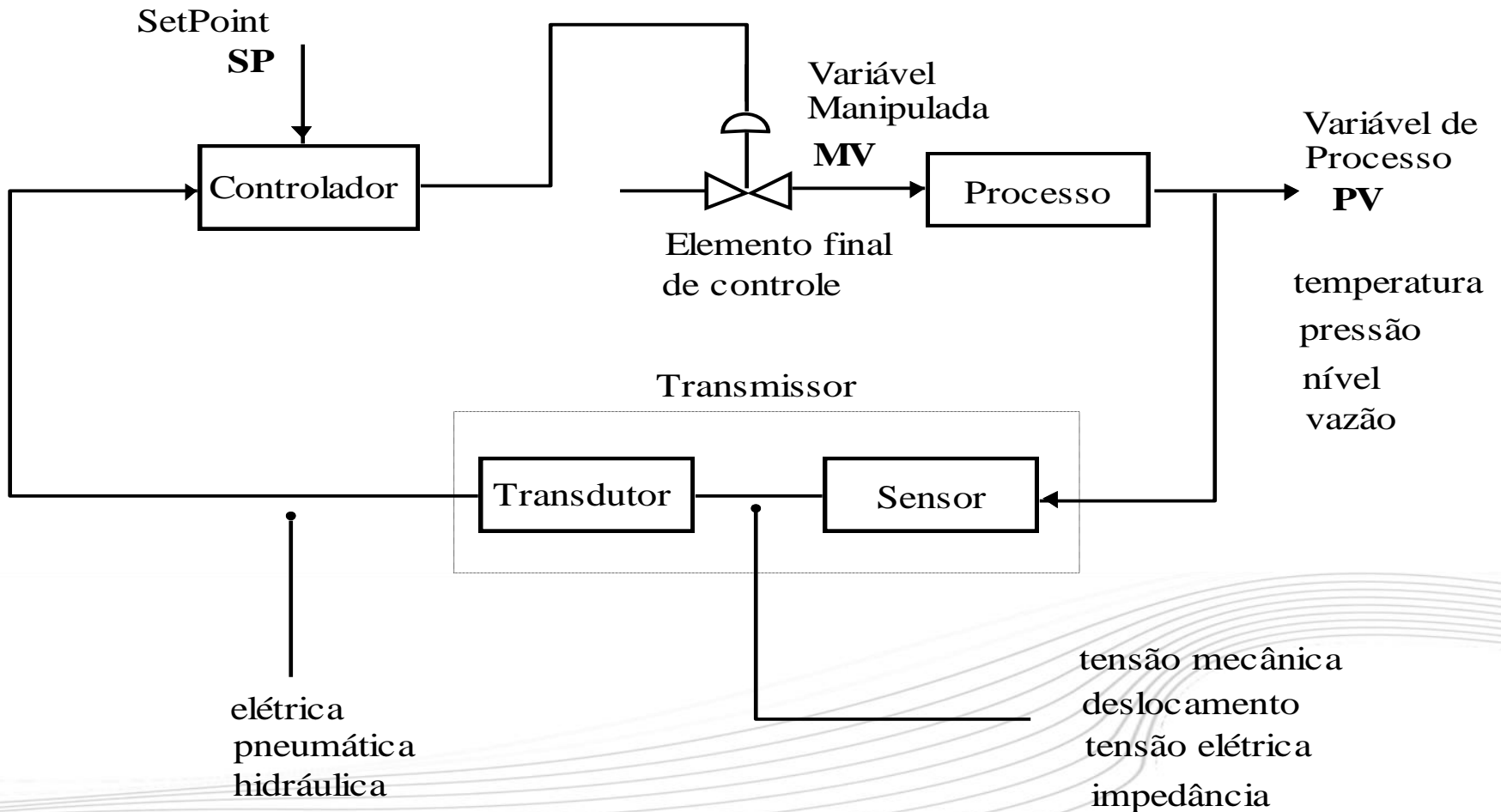
Modelagem de Processos

- Teórico (caixa branca)
 - Modelagem física ou fenomenológica
- Empírico (caixa preta)
 - Dados entrada-saída
- Teórico-Empírico (caixa cinza)
 - Estratégia combinada

Processos industriais

$$G(s) = \frac{K}{\tau s + 1}, \quad G(s) = \frac{K}{\tau s + 1} e^{-\theta s}, \quad G(s) = \frac{K}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)} e^{-\theta s}$$

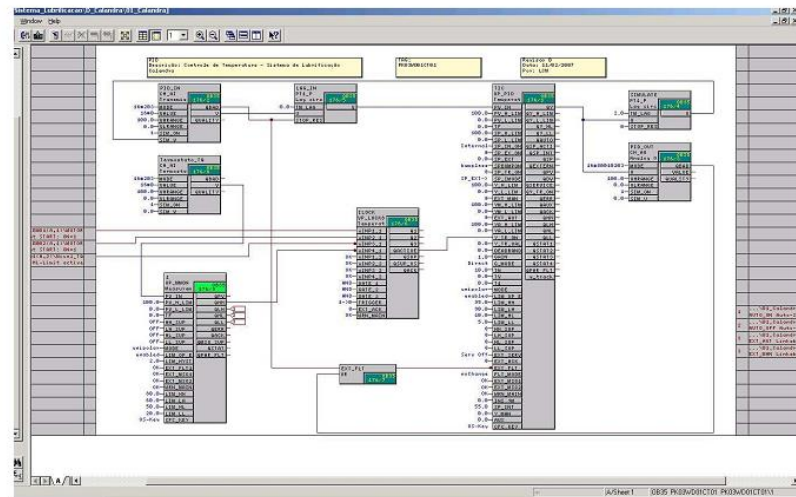
Controle de Processos



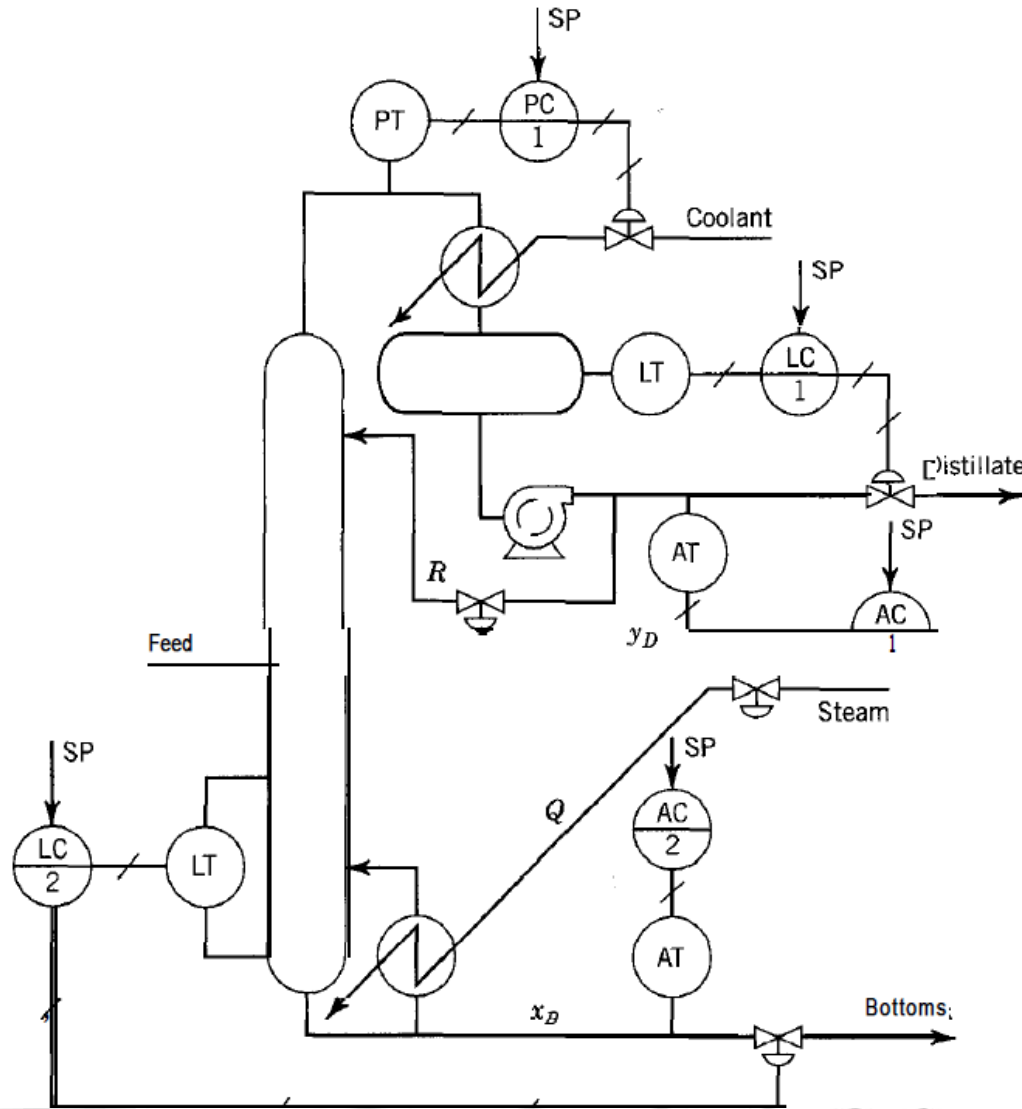
Controlador PID

- Largo uso industrial (90% [YS91])
- Ações de controle & sintonia de fácil entendimento
- Compromisso simplicidade/ desempenho


$$u(t) = K_c \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \implies \frac{U(s)}{E(s)} = K_c \left(1 + \frac{1}{sT_i} + sT_d \right)$$



Controles de uma coluna de destilação



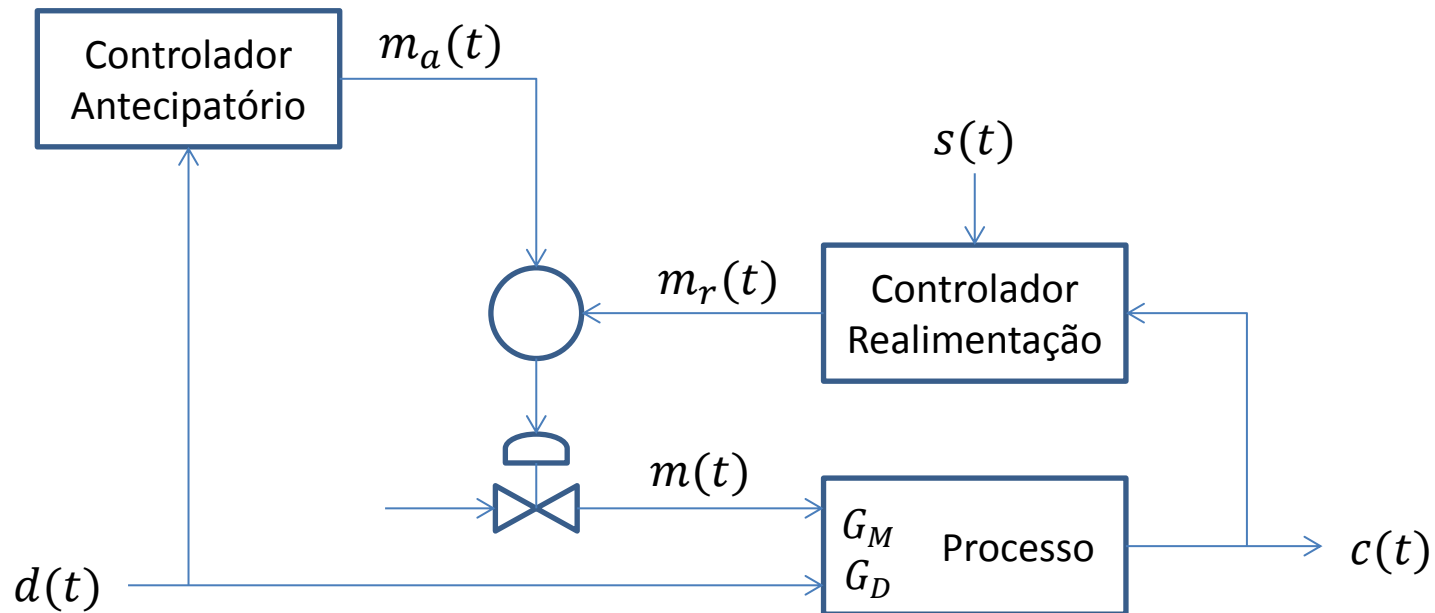
Controle Regulatório x Avançado

- Controle Regulatório: PID
 - Controle Não-convencional: cascata, antecipatório, seletivo, relação, *split range*
 - Controle Inferencial
 - Controle Avançado;
 - Controle Robusto;
 - Controle Adaptativo;
 - Controle Preditivo Multivariável;
 - Controle Globalmente Linearizante
- 

Controle Avançado

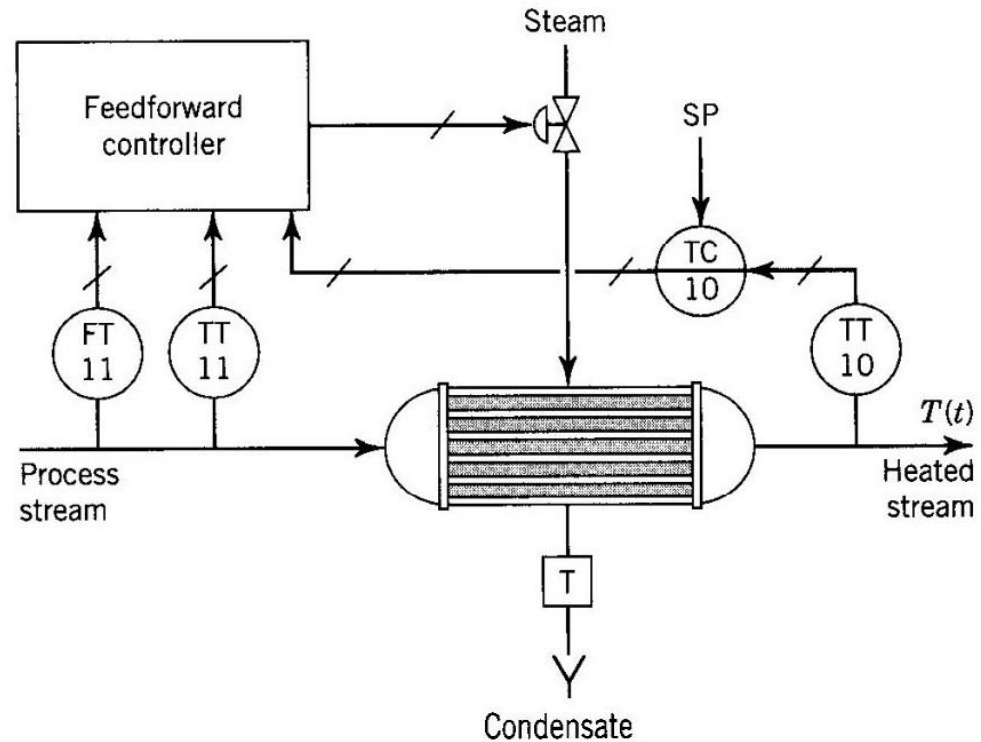
- Anos 60: qualquer *algoritmo* ou estratégia de controle que derivasse do *PID clássico*;
- Anos 70: computadores de processo permitiram a implementação de controladores do tipo *Feedforward, Multivariável e Ótimo*;
- Proliferação de técnicas ditas avançadas de controle: avanços na indústria eletrônica, especialmente no desenvolvimento de dispositivos computacionais de baixo custo, ocorrida a partir dos anos 70.

Controle Antecipatório



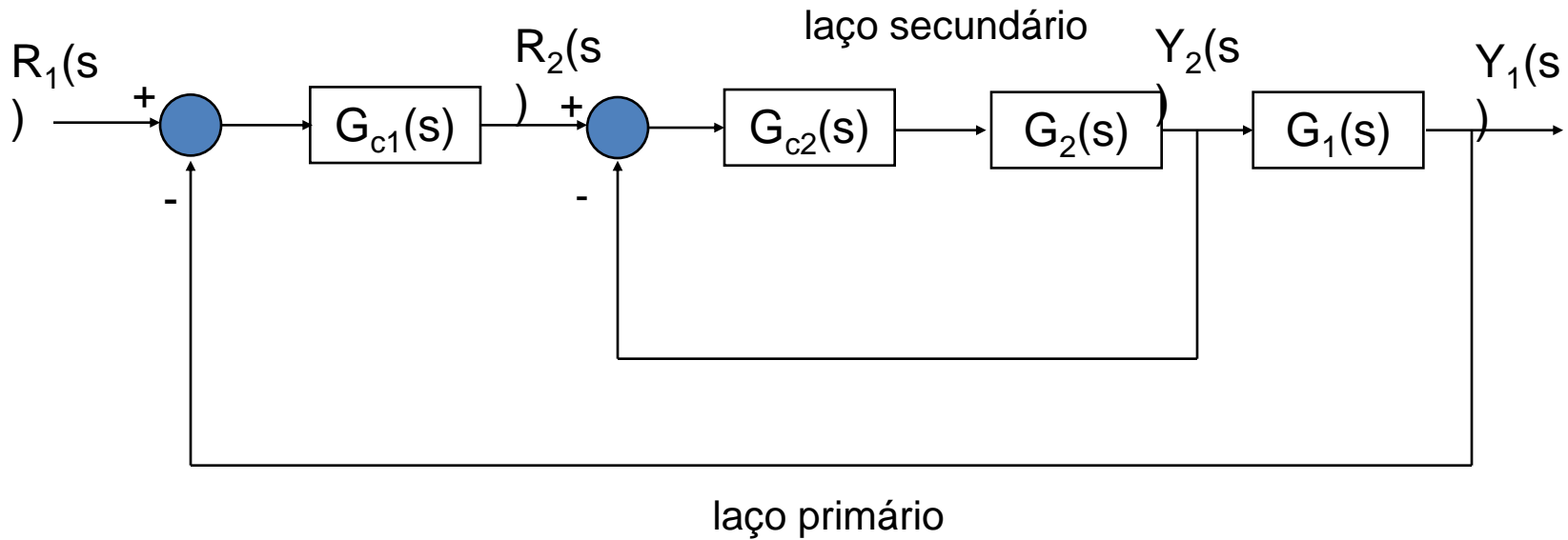
- Antecipação da ação do distúrbio no processo
- Necessária medição dos distúrbio (custo)
- Conhecimento da dinâmica do processo (uso combinado)

Controle Antecipatório



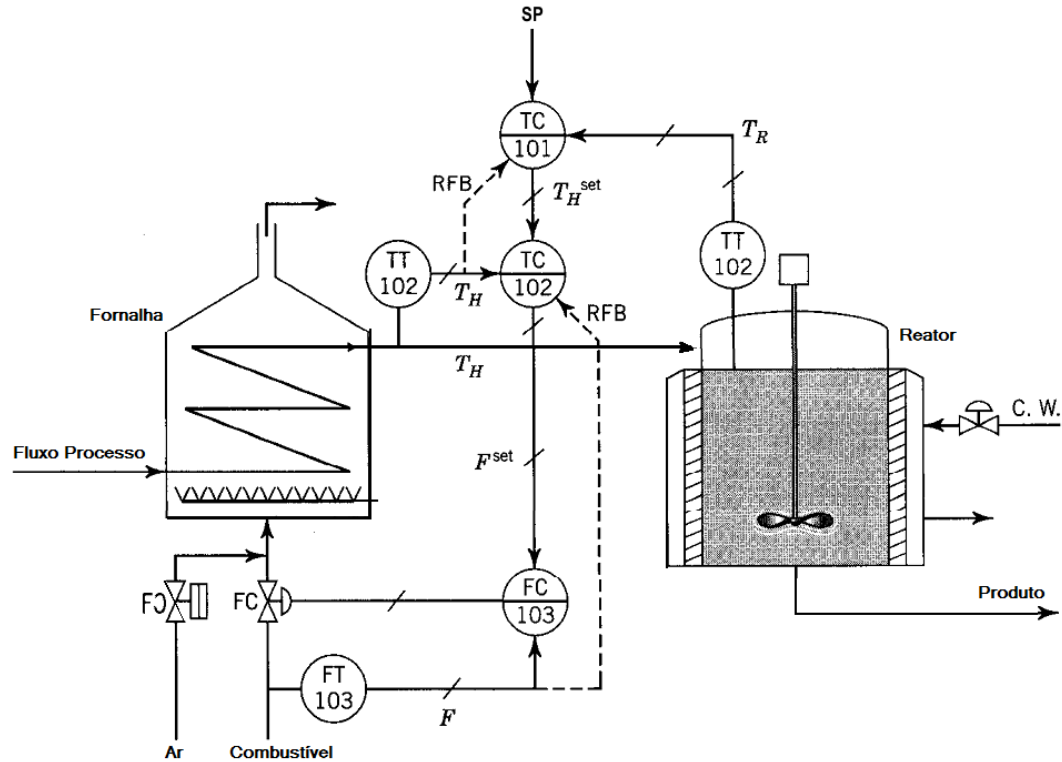
Trocador de calor

Controle em Cascata



- Sintonia de múltiplas malhas: malha a malha
- Tentativa e erro e tabelas de parâmetros de ganhos P, I e D
- Dificuldades em atender parâmetros de desempenho

Controle em Cascata



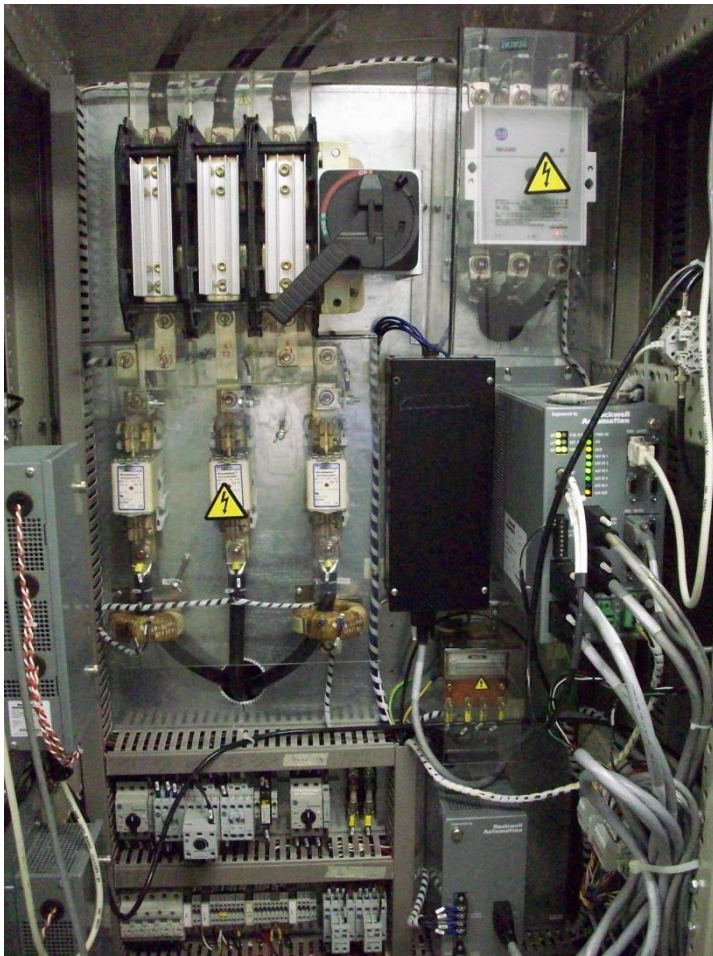
Reator com Pré-Aquecimento

Acionamento e Controle de Máquinas Elétricas

Exemplo de Controle em Cascata



Controle de Processos Acionamentos Industriais

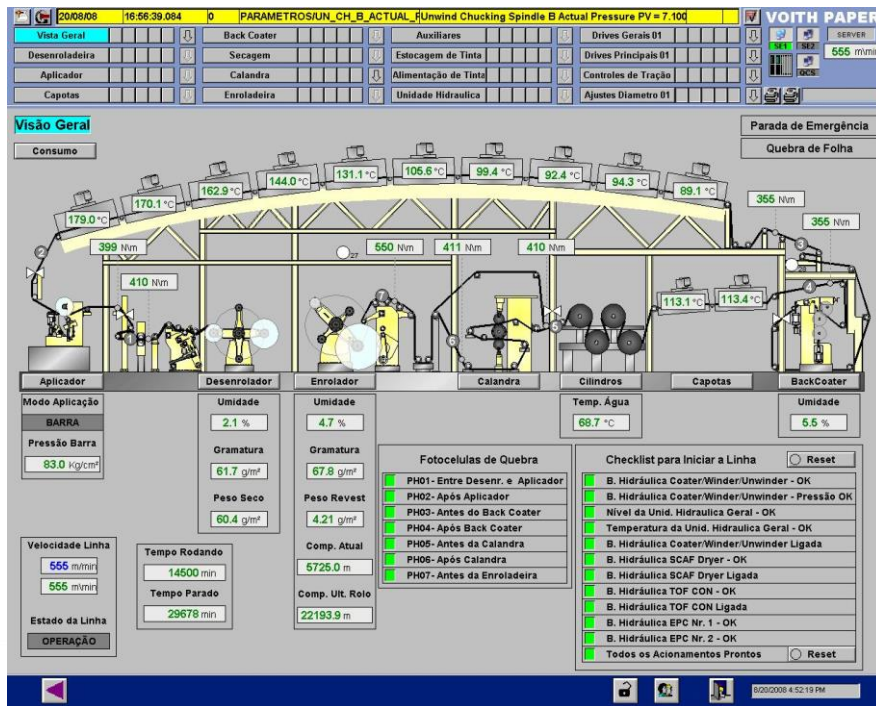


Acionamento digital

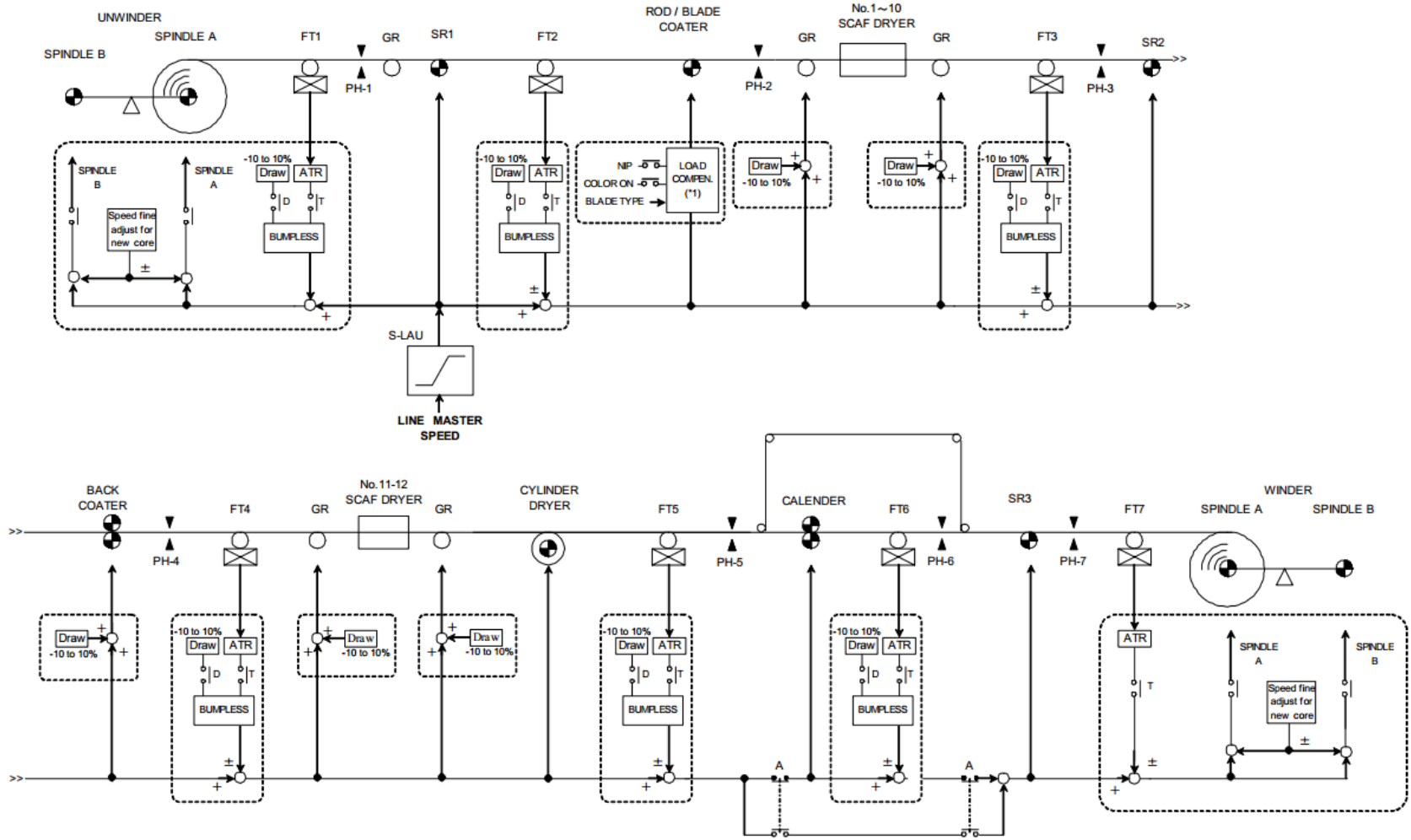


Acionamento analógico

Processo de Controle de Tensão da Folha de Papel

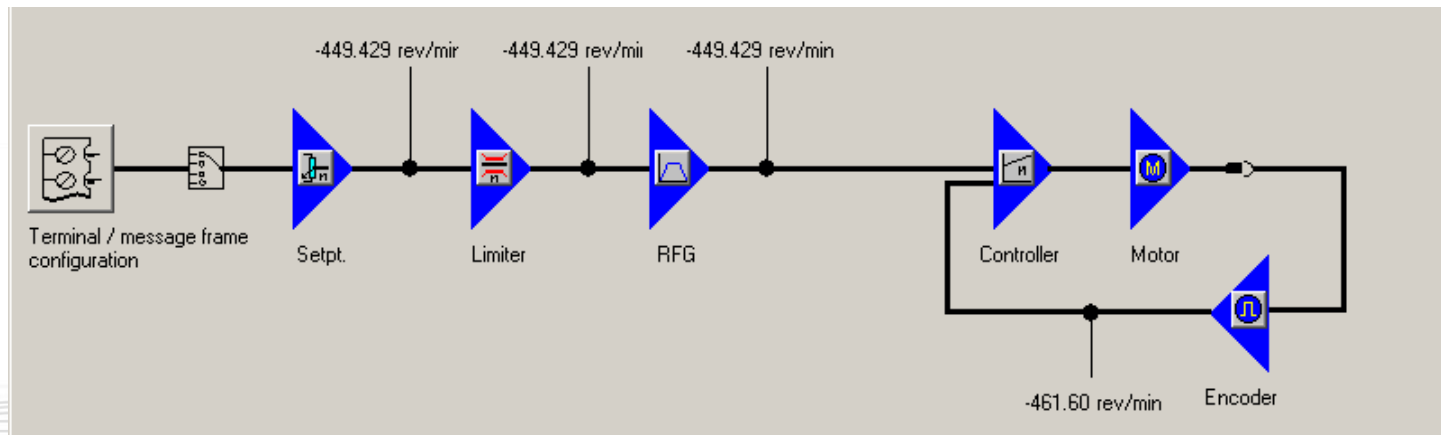


Controle em Cascata

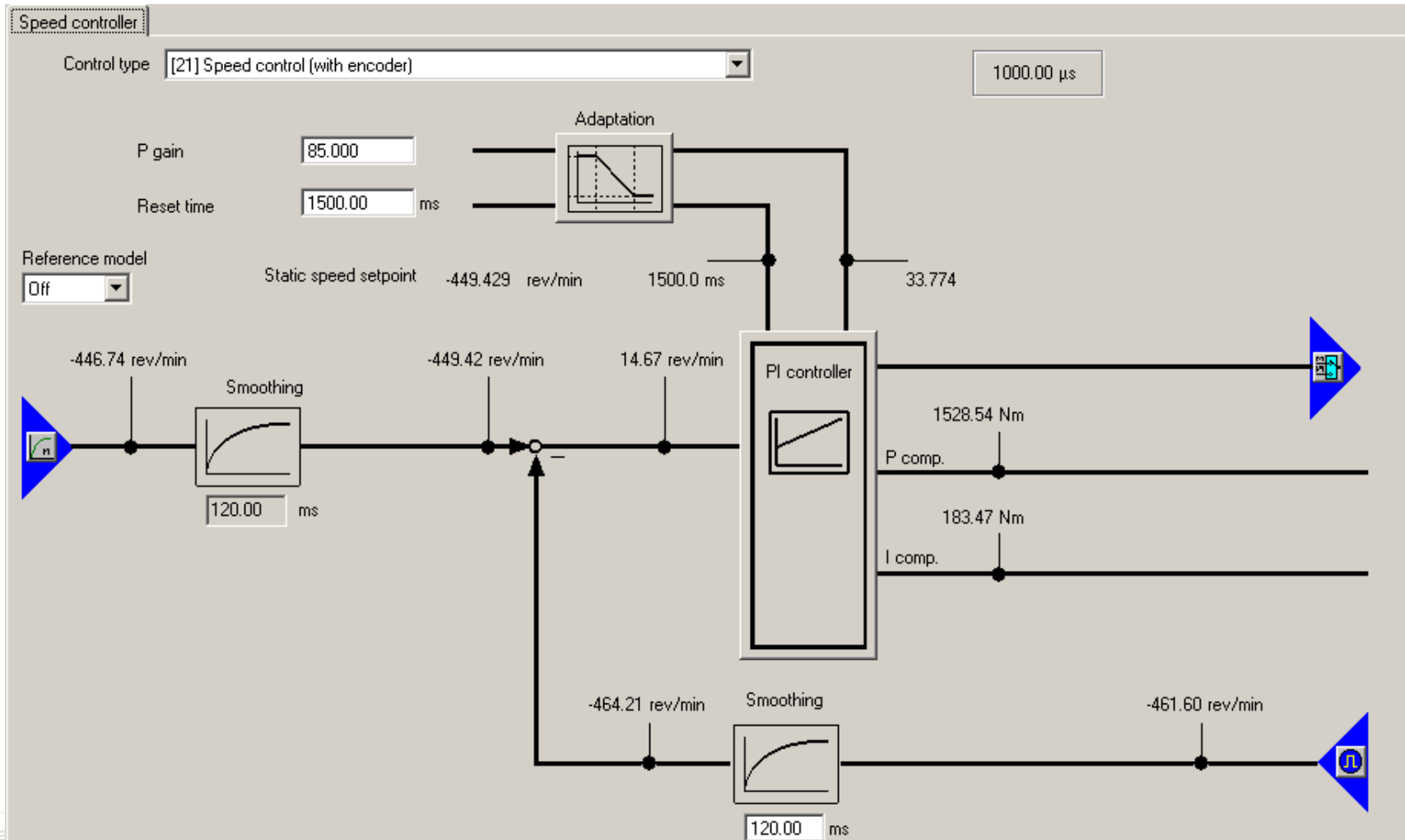


Acionamento Digital

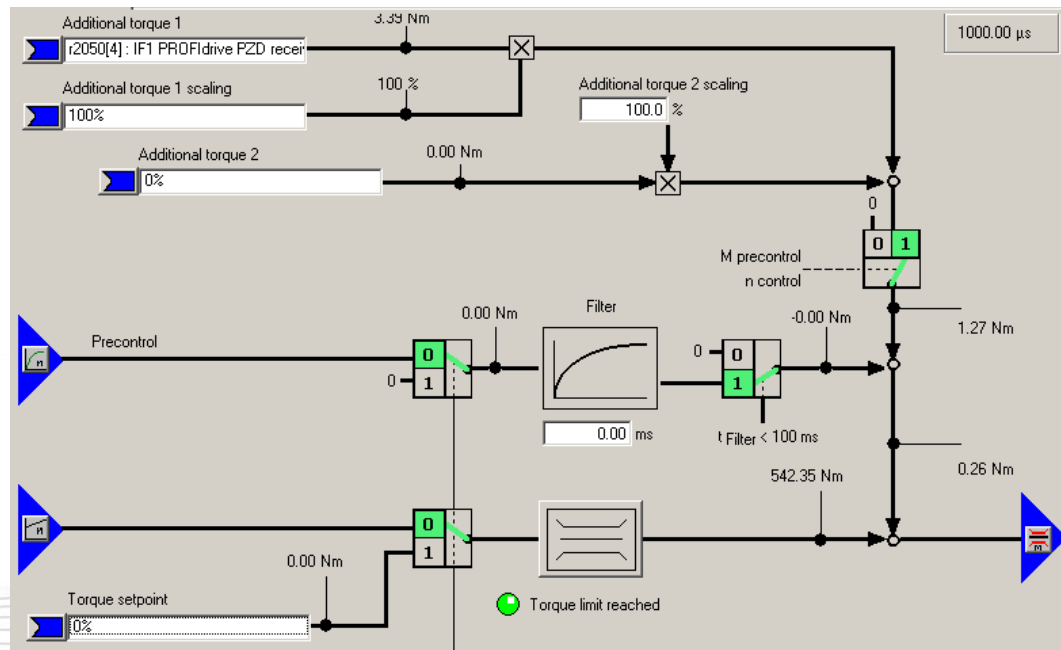
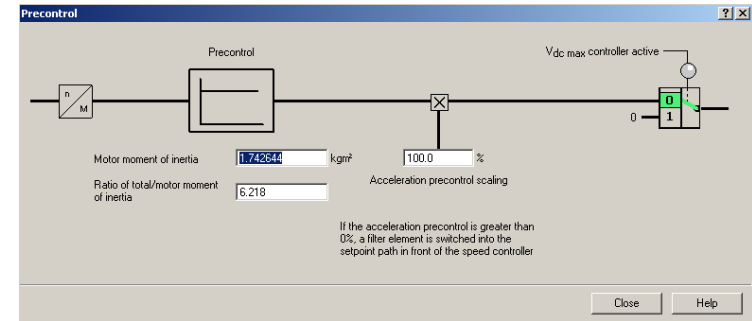
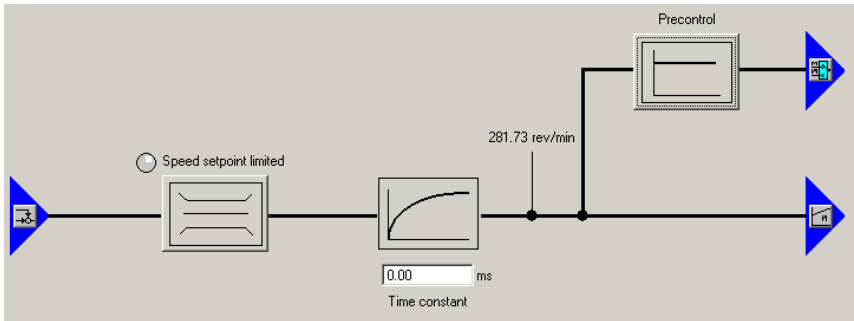
Software: Drive ES – Starter,
Siemens
Acionamento: Sinamics S120,
Siemens
Con



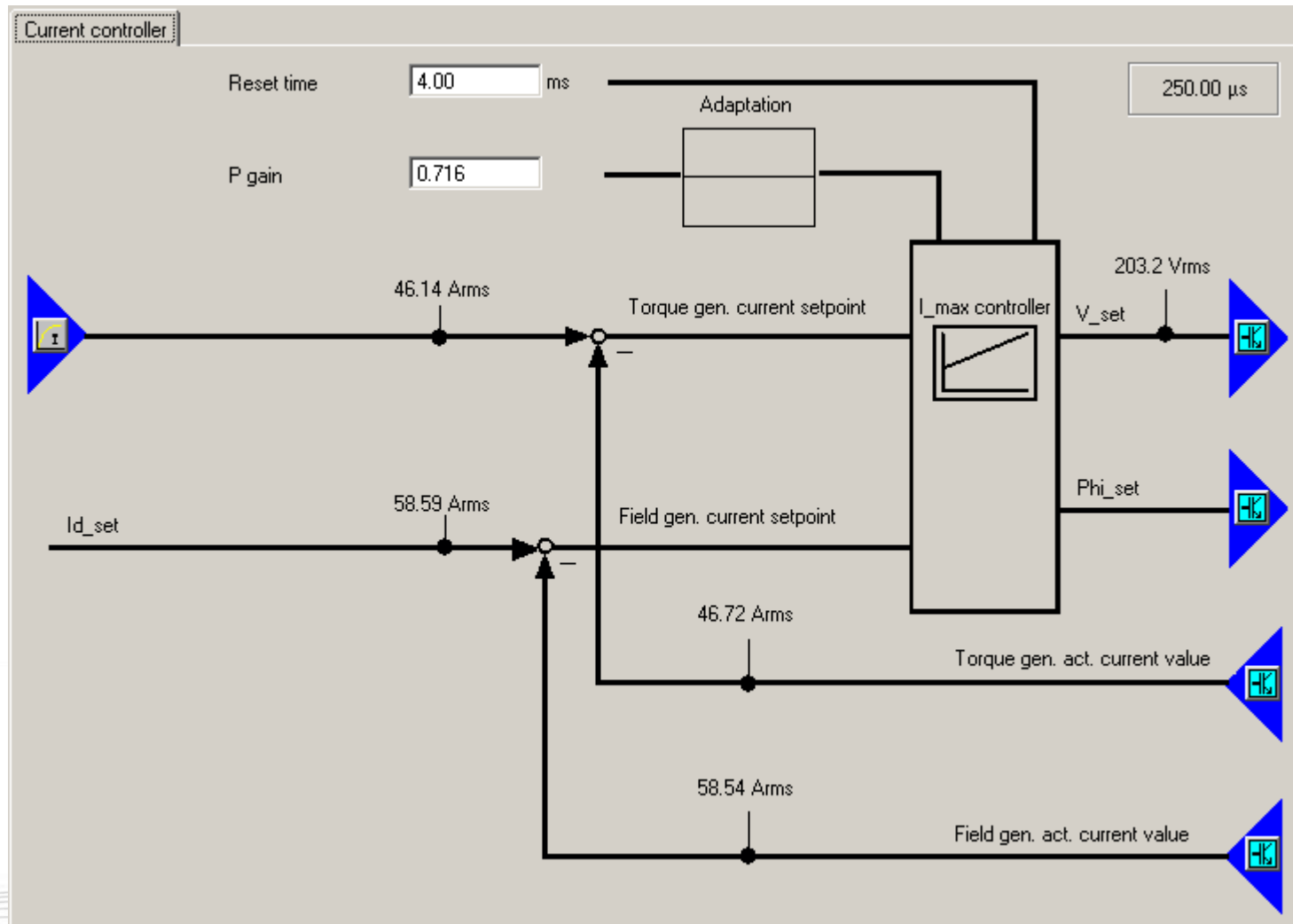
Malha de Controle de Velocidade



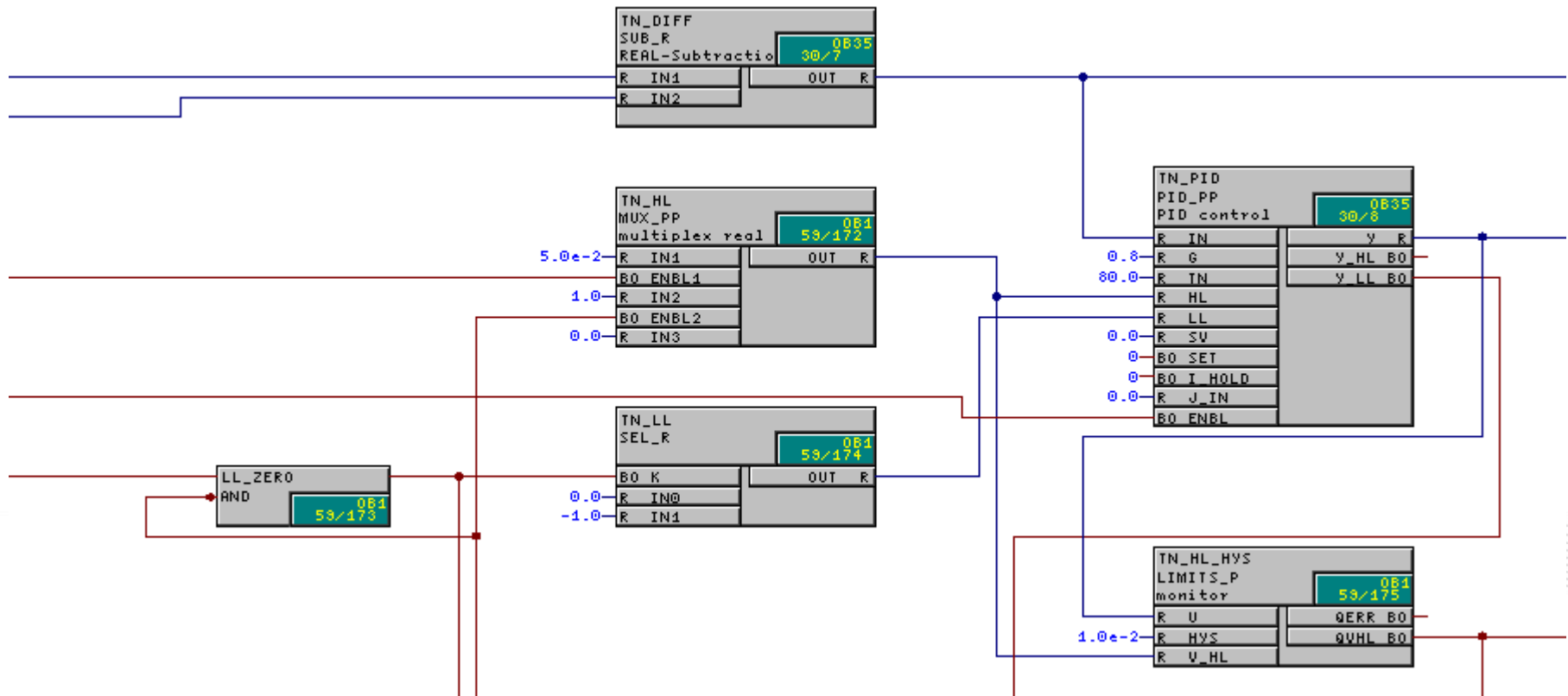
Pré-Contrôle (torque)



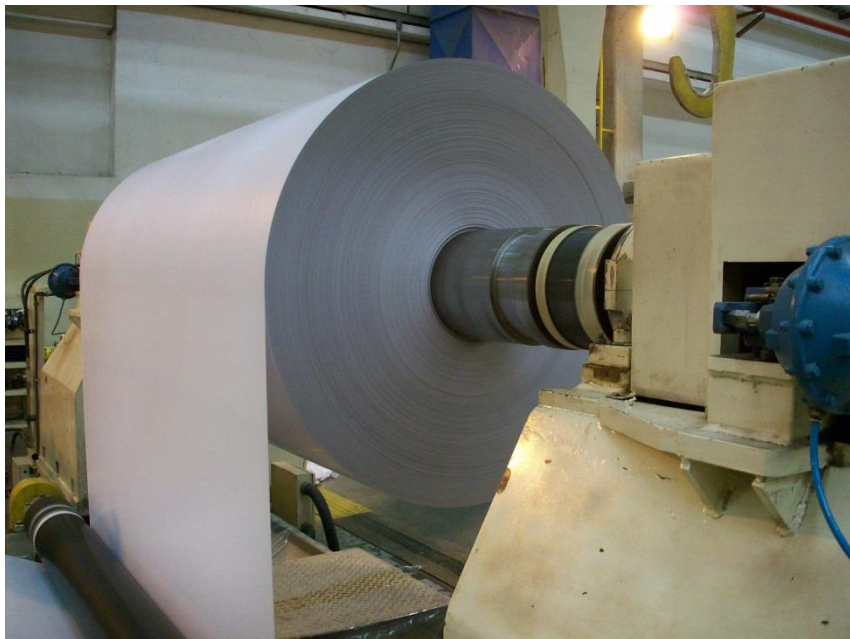
Malha de Controle de Corrente



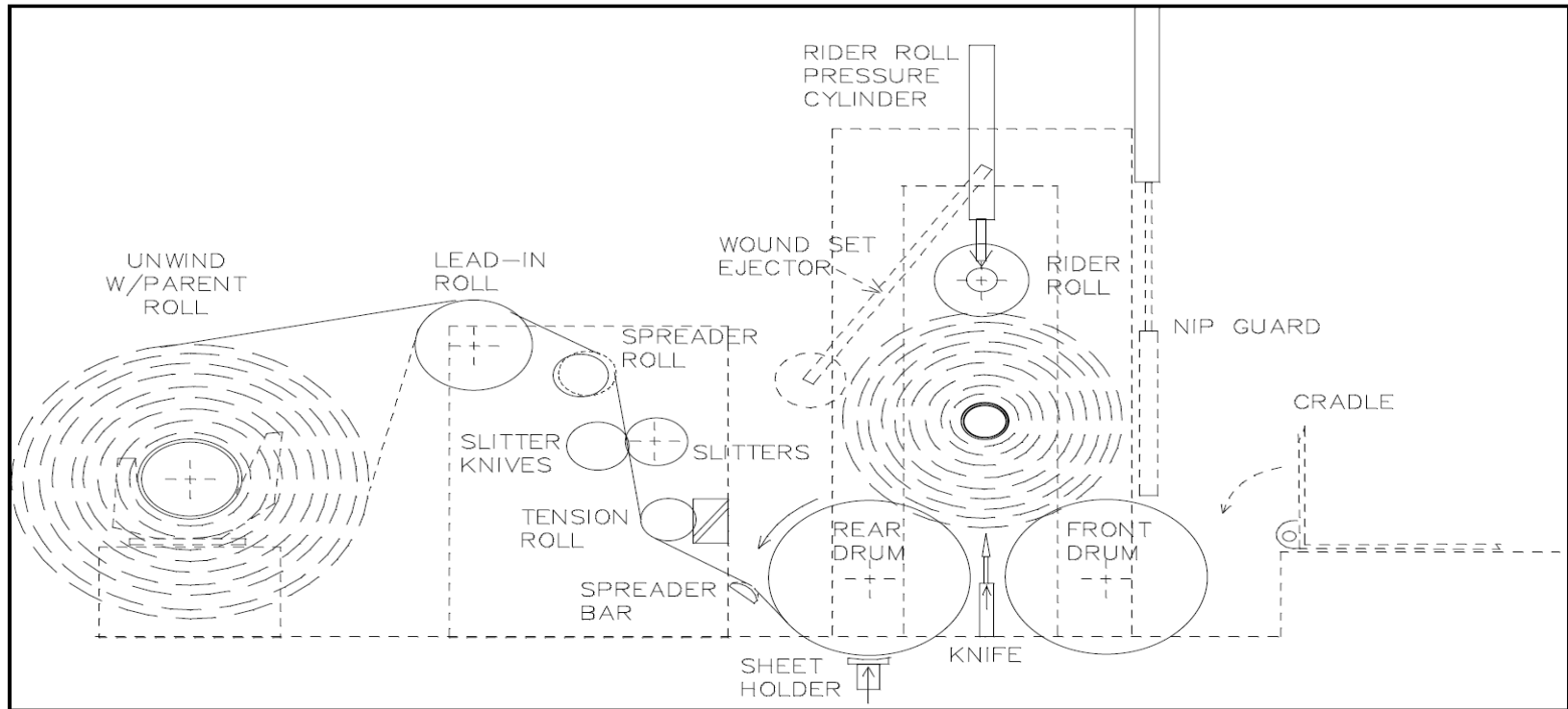
Malha de Controle de Tensão do Papel (3ª malha)



Rebobinadeiras



Sistemas de Controle: Rebobinadeira



Controles Desenroladeira:

- Tensão da folha (célula de carga)
- Torque motor (cálculo inércia bobina, perdas fricção, diâmetro, curva fluxo campo)

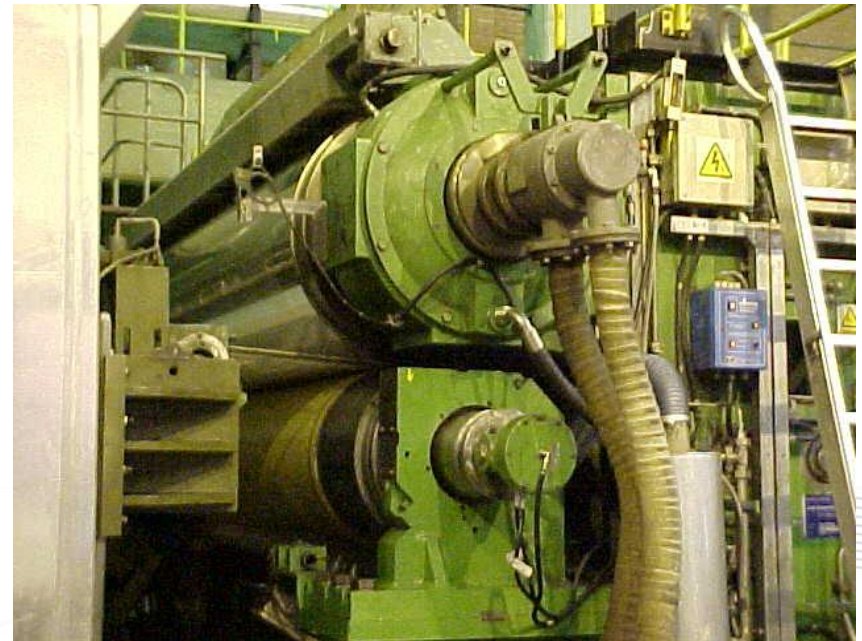
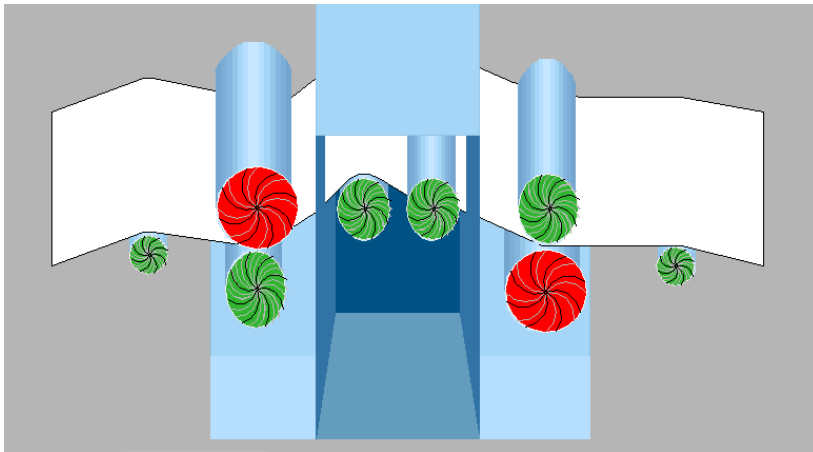
Controles Enroladeira:

- Controle dureza da bobina (pressão alívio I/P rolo suporte, função do diam.)
- Divisão de carga (mestre/escravo): $v_{mestre} (RST) \times overspeed$ com $tq_{lim_sup_RSD} = tq_{ref_RSD}$ (50-60% tq_{total} varia com diâmetro: dureza)

Geral: cálculo diâmetro e espessura => controle do comprimento (critério de parada)

Controle Mestre-Escravo

- Mestre: malha de velocidade (referência do processo)
- Escravo: malha de torque (referência % torque do mestre)
 - Referência da malha de torque (instável com perda do contato mecânico)
 - Saturação da malha de velocidade
- Aplicações: contato mecânico, divisão de carga, etc.

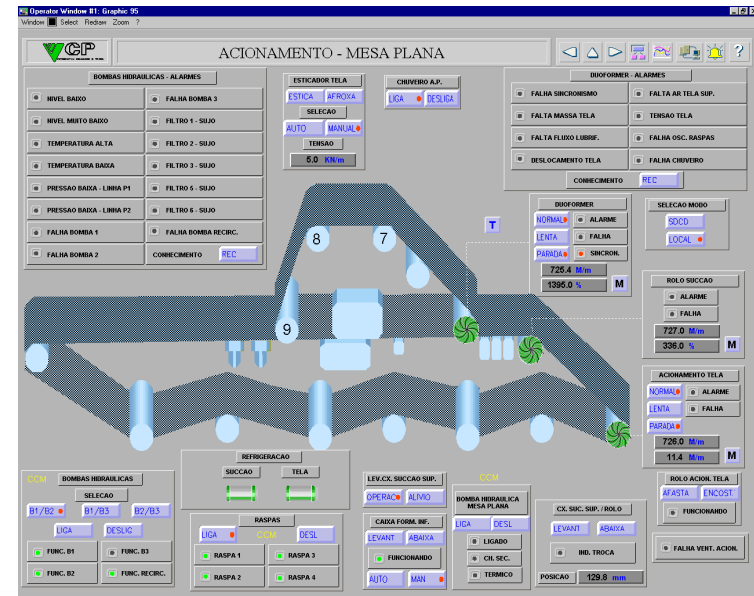
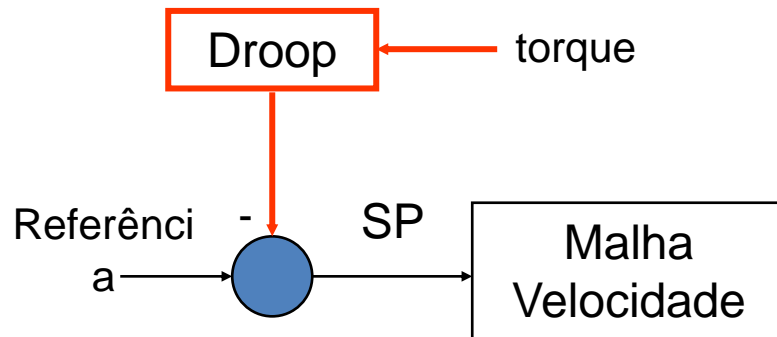


Sistema
Calandra

Speed Droop Control

Conceito:

- Velocidade cai com o aumento da carga do motor (torque)




Por que uma estratégia que diminui a eficiência da malha de velocidade?

Aplicações:

- Contato mecânico de cargas acionadas
- Divisão de carga
- Controle de tensão em malha aberta (sem célula de carga/ *dancer*)
- Referência de droop (% de queda de velocidade a 100% de torque), 5%

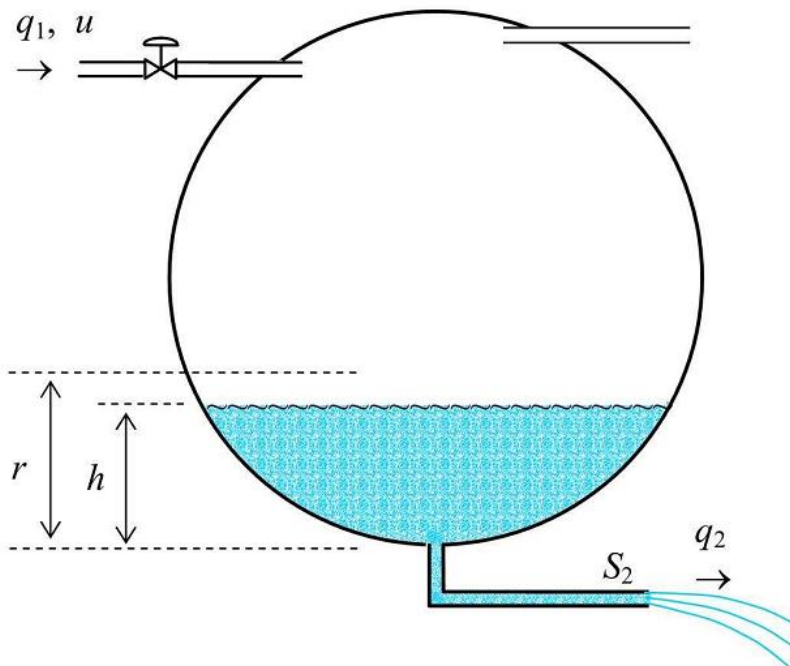
Dinâmicas Complexas

- É possível garantir estabilidade e desempenho para toda faixa de operação?
 - Como projetar sistemas de controle baseado em critérios ótimos?
 - Como garantir que as especificações serão atendidas sob incertezas dos modelos?
 - Como projetar controladores multivariáveis de modo integrado?
- 

Dinâmicas Não-Lineares

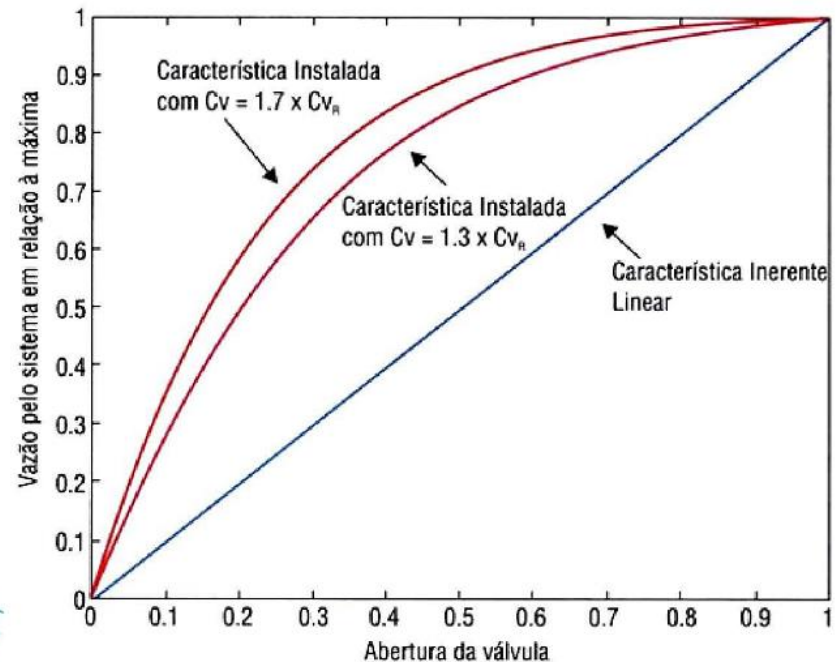
Controle de nível de um tanque esférico

$$S(h)\dot{h}(t) = u(t) - S_2\sqrt{2gh(t)} \quad (1)$$



Válvula de controle

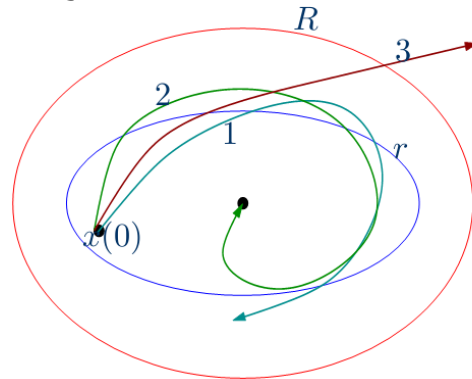
$$Q(a) = Q_{max} \sqrt{\frac{C^2 + 1}{C^2 + f(a)^{-2}}} \quad (2)$$



Sistemas Não-Lineares

$$\dot{x} = f(x, u), \quad y = h(x, u), \quad z = g(x, u)$$

1. Caracterização da estabilidade dos pontos de equilíbrio



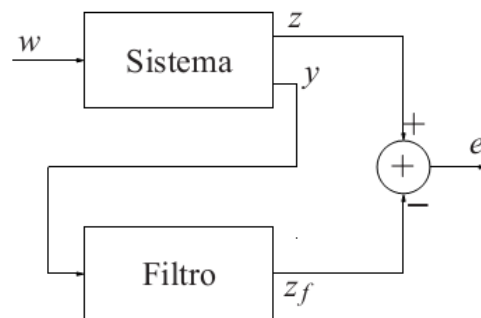
- 1 : Estável
- 2 : Assintoticamente Estável
- 3 : Instável

2. Síntese de controladores
3. Filtragem

$$(i) \quad u = \gamma(x) \quad (Kx, K\hat{x}, Ky)$$

$$(ii) \quad \dot{x}_c = A_c x_c + B_c y$$

$$u = C_c x_c + D_c y$$



Teoria de Lyapunov

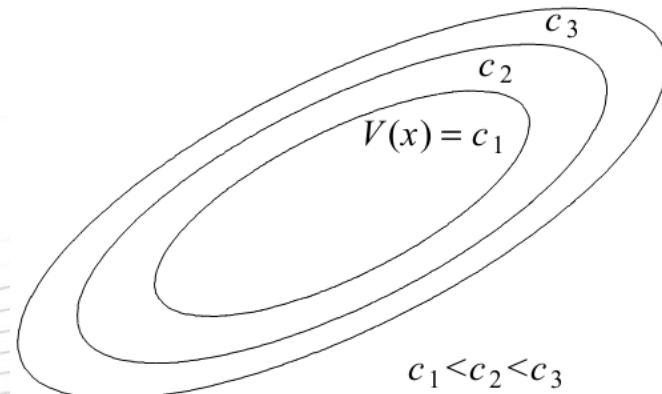
- Função energia
- Condição suficiente de estabilidade (para uma dada $V(x)$)

Teorema de Lyapunov:

Se existir $V(x)$ tal que $V(0) = 0$ e $V(x) > 0$,

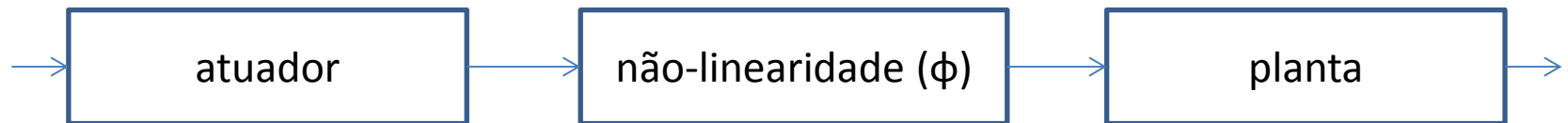
$\forall x \in D \setminus \{0\}$, $\dot{V}(x) = \frac{\partial V}{\partial x} f(x) < 0$, então a

origem é assint. estável.



Classes de Sistemas Não-Lineares

- Sistemas polinomiais
- Bilinearidades
- Restrições nos estados
- Componentes não-lineares



- Saturação
- Histerese
- Folga

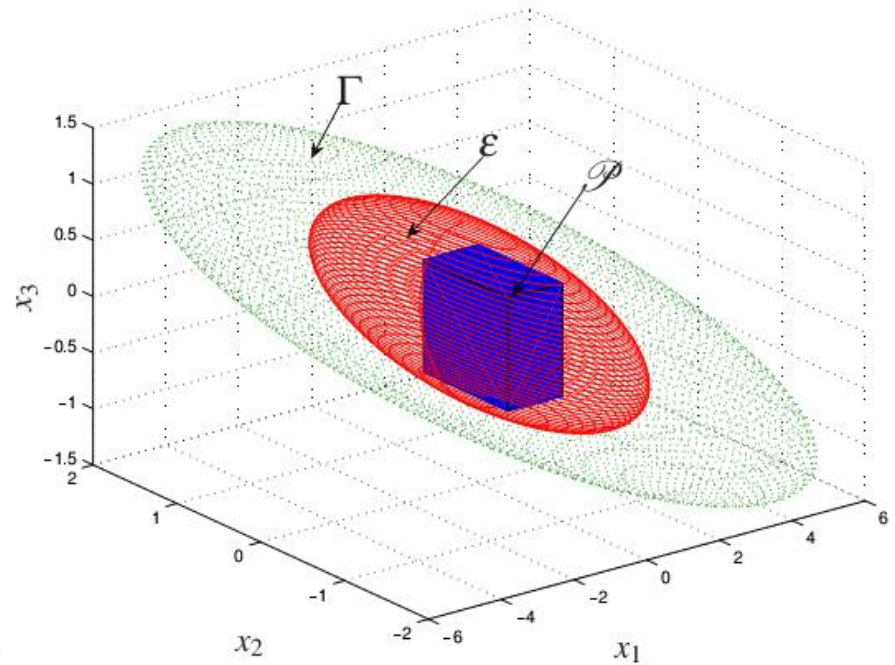
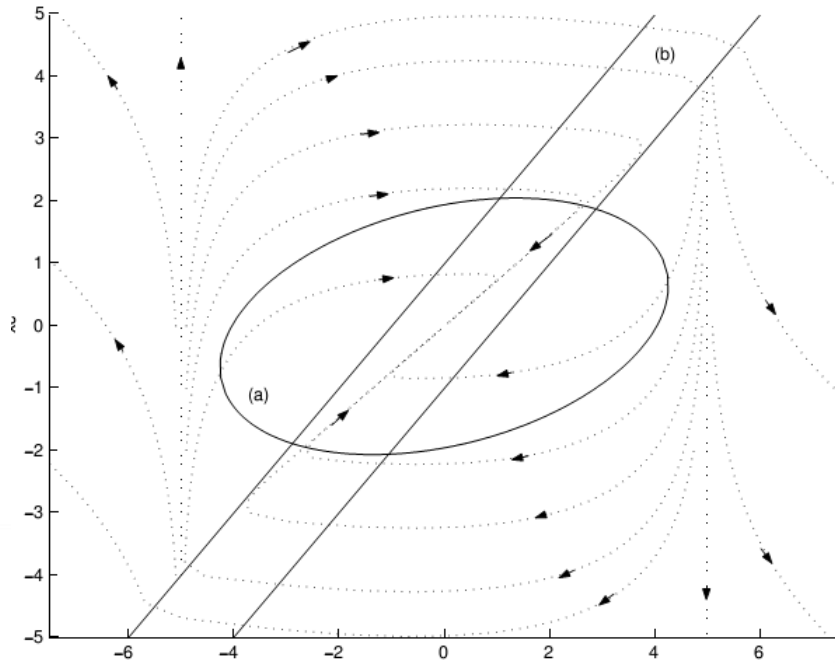
Exemplo:

$$\dot{x} = Ax + B\phi(x, u) + g(x)$$

Região de Atração

Saturação do sinal de controle

Sistema bilinear



Linearização

$$\dot{x} = f(x, u)$$

$f(0,0) = 0$ e f continuamente diferenciável no domínio $D_x \times D_u$ que contém a origem ($x = 0, u = 0$)

$$\dot{x} = Ax + Bu$$

$$A = \left. \frac{\partial f}{\partial x}(x, u) \right|_0, \quad B = \left. \frac{\partial f}{\partial u}(x, u) \right|_0$$

Problema: assumindo (A, B) estabilizável, projetar ganho K tal que $(A + BK)$ Hurwitz

$$u = Kx$$

Sistemas Lineares

$$\dot{x} = Ax + Bu$$

$$y = Cx + Du$$

- Condições necessárias e suficientes
- Formulação em um problema convexo (ex. LMIs)
- Função de Lyapunov quadrática $\rightarrow V(x) = x'Px$

Se existir $P = P' > 0$ tal que

$$A'P + PA < 0$$

então a origem é um ponto de equilíbrio assintoticamente estável.

Exemplo (*sistema linearizado*)

Considere o sistema

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= e^{x_2}u \\ \dot{x}_2 &= x_1 + x_2^2 + e^{x_2}u \\ \dot{x}_3 &= x_1 - x_2\end{aligned}$$

Problema: projetar lei de controle $u = Kx$

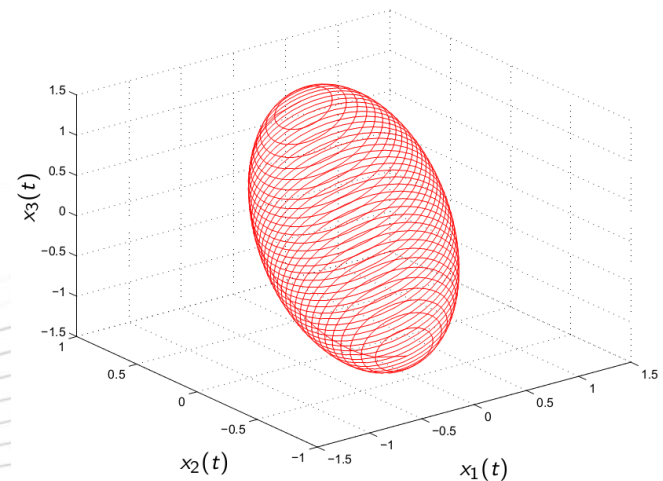
Do sistema linearizado

$$\exists W = W' > 0: AW + WA' + BZ + Z'B' < 0 \rightarrow K = ZW^{-1}$$

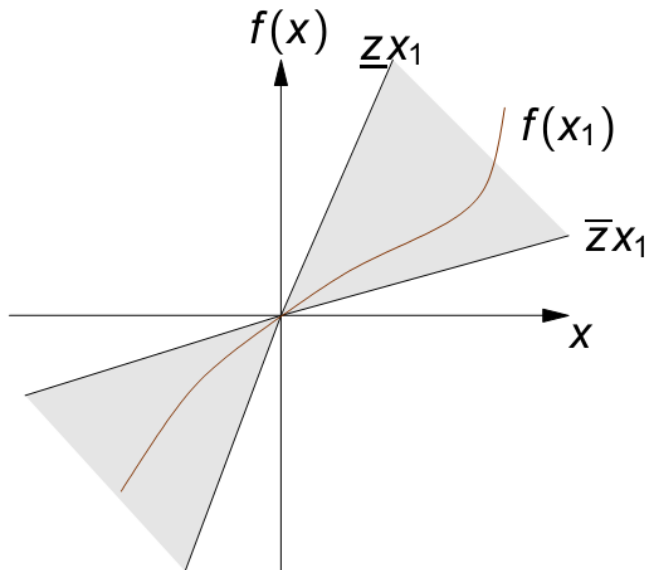
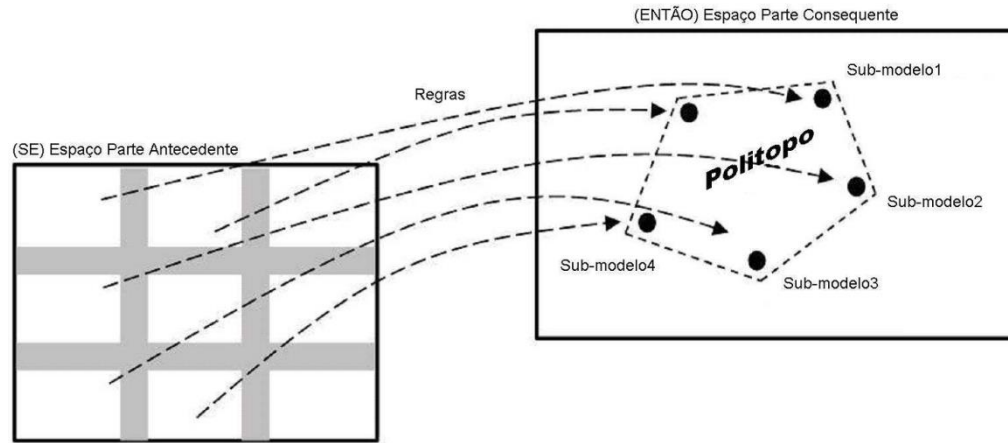
Domínio de estabilidade $D = \{x \in R^n: \dot{V}(x) < 0\}$

Estimativa da região de atração

$$\Omega = \{x \in R^n: V(x) < c\} \subseteq D$$



Representação Fuzzy Takagi-Sugeno



Condição de setor \rightarrow descrição exata em $\Omega(x)$.

Reescrevendo como

$$\dot{x} = f(x, u) = \xi(x, u)x + \gamma(x, u)u$$

tem-se

$$\dot{x} = A(\mu)x + B(\mu)u$$

válido em $\Omega(x)$.

Sistemas Lineares

- Casos especiais:
 - Incertos $\rightarrow A(\alpha)$
 - Variantes no tempo $\rightarrow A(t)$
 - LPV $\rightarrow A(\alpha(t))$
 - Chaveados $\rightarrow A_i(\alpha)$
 - Com atrasos $\rightarrow \dot{x}(t) = A(\alpha)x(t - \tau) + B(\alpha)u(t - \eta)$

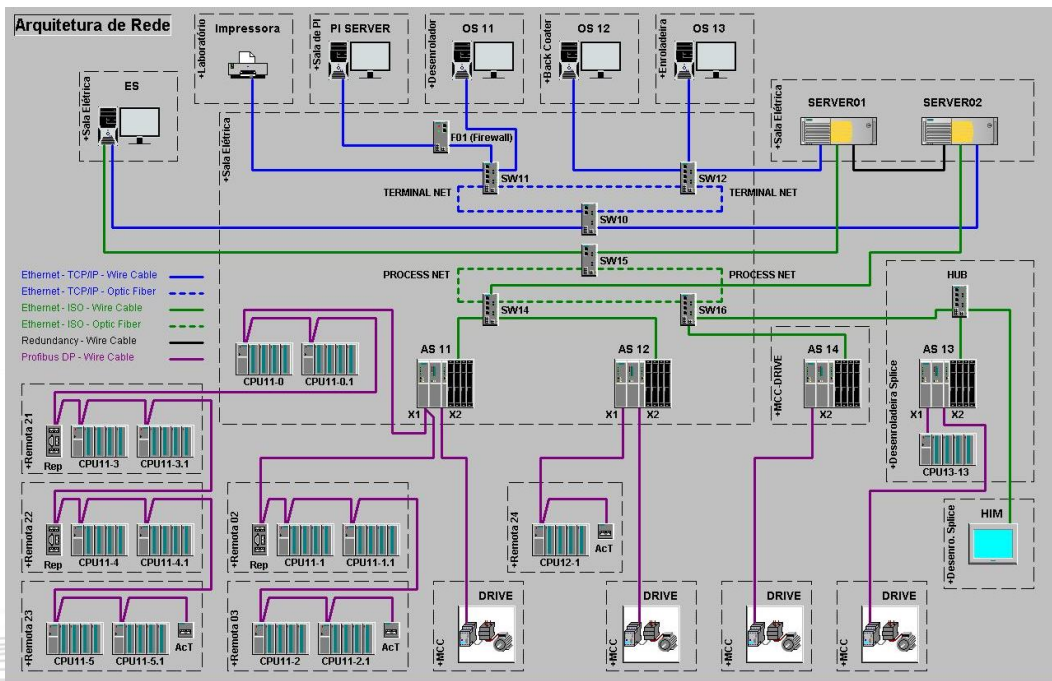
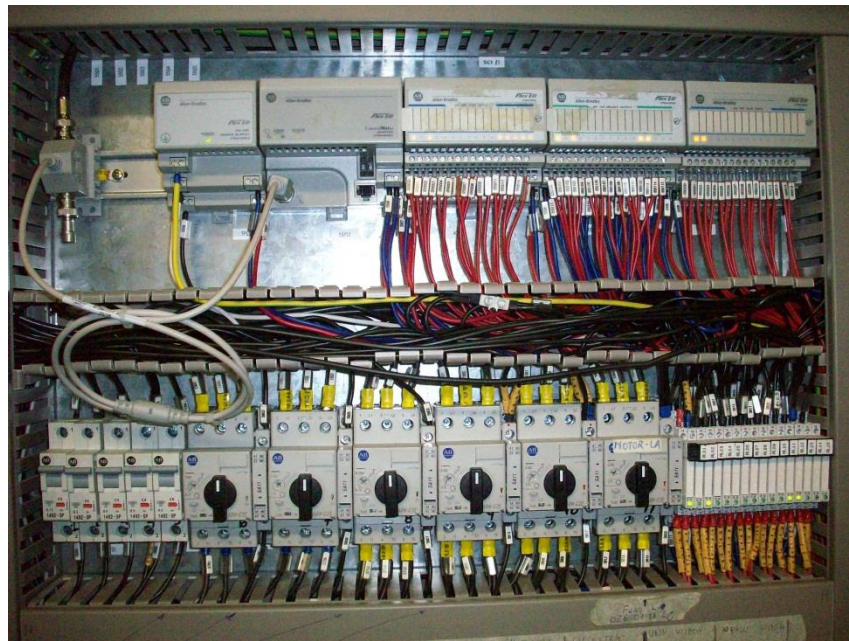
$$A(t)'P(t) + P(t)A(t) + \dot{P}(t) < 0 \quad \longrightarrow \quad P(t)$$

???

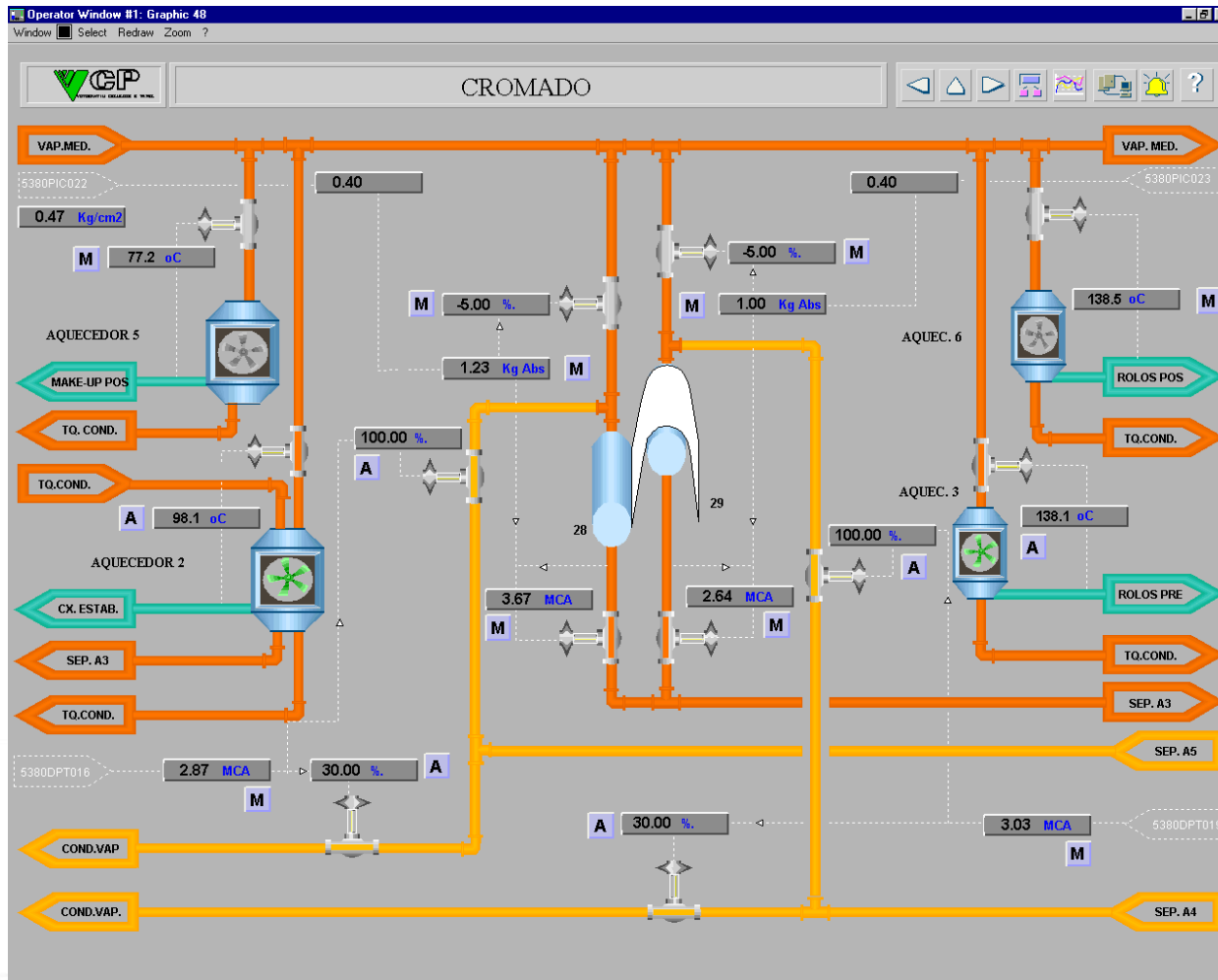
- Como \downarrow conservadorismo (necessidade) ?
- Desempenho ? Robustez ? Discreto (NCS) ?

Tecnologias

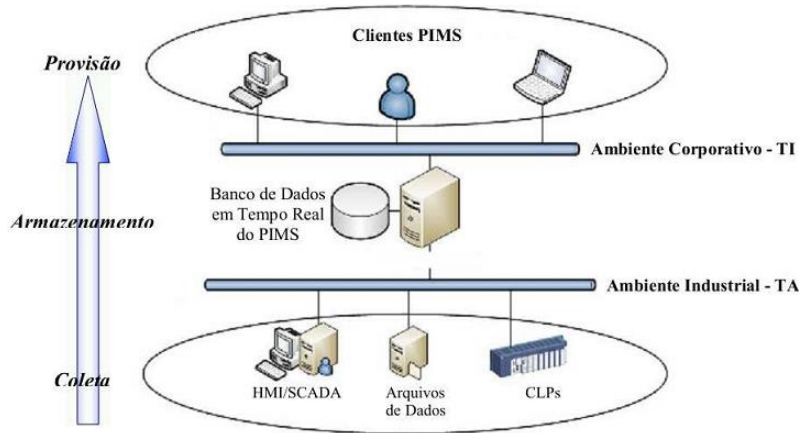




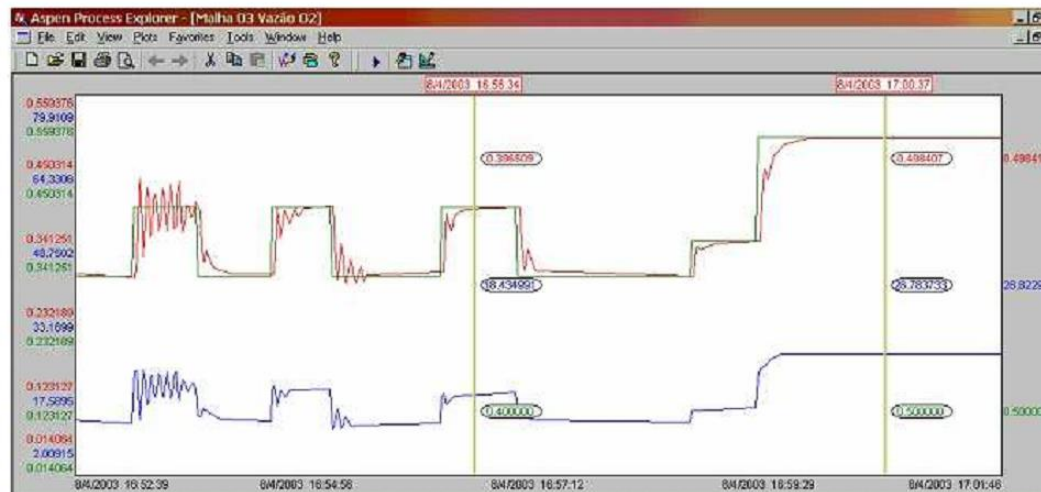
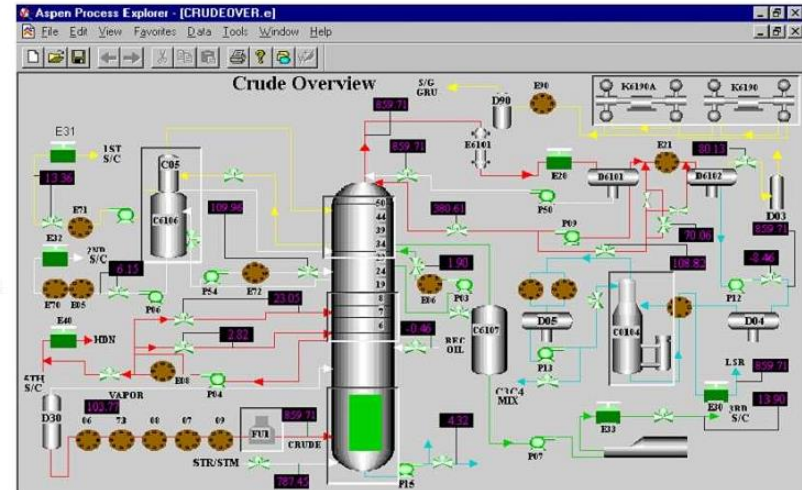
Supervisório de Processos



PIMS - Sistemas de Gerenciamento de Informações de Processo em Tempo Real



Arquitetura típica de um PIMS



Gestão de Malhas de Controle

Sindus Andritz OPP - Aracruz(ES) - Daniel.Schuck - Turno: B - 18/3/2008 23:56:33

Inicio Sindus-Process

Sindus-Process » KPIs (Matriz)

Econômicos 223FC461 >> Branqueamento L5 (Lavador DD do Estágio D2) >> Pasta Branqueada >> Branqueamento L5

DET A&E TUNE PSD MAN PROC INFO

Todos

MacroProcesso	Nota
Branqueamento L5	741
Depuração e Designifica...	661
Pátio	458
Cozinhar Cavacos "C"	422
Planta Química "C"	268

Registro: 1

Todos

Grupo	Nota
H2O2	1152
Vácuo	1131
Água Branca Alcalina	1084
Água Morna	1064
NaOH	885
SO2	787
O2	784
H2SO4	738
Licor Preto	730

Registro: 1

Todos

MicroProcesso	Nota
Estágio Pre EOP	2444
Controle Difusor Pressuri...	2443
Dosagem de H2O2	1277
Lavador DD do Estágio EOP	1018
Balanco de Filtrado	914
Lavador DD	899
Geral	848
Lavagem de Pasta Marrom	837
Oxidação de Licor Branco	805

Registro: 1

Todos

Tipo	Nota
Carga	1614
Carga de H2O2	1547
Consistência	1246
pH	1201
Residual de Cloro	1114
Pressão	837
Alvura	651
Concentração de H2O2	637
Vazão	557

Registro: 1

Todos

Turno	Nota
C	660
D	638
A	619
B	596
E	517

Registro: 1

Todos

Produto	Nota
n	619
ECF C	523

Registro: 1

Filtro e Relatório

Hora Inicial: 11/03/2008 23:55:51 Hora Final: 18/03/2008 23:55:51 Intervalo: Última Semana

Formato: Diretório: Nome do Arquivo: PID_Historico

Todos

Tag	Nota	Auto	Erro M	Variab	IAE	CPK	Cruz	Perc	Rev	Lim
221LC402	5428	0	24315	499	23799	35	0	1	0	199
221PDC454	5359	0	27662	1577	18796	2	0	0	0	200
223PC529	4693	0	21654	868	18960	538	0	7	11	197
221PDC414	4684	0	26366	1906	13688	0	0	0	0	200
222PC448	3017	0	0	344	26599	8	0	0	0	200
222LC160	2726	667	3969	19743	1	124	0	8	0	28
223QC269	2556	0	242	113	108	22343	1	0	0	200
222PC463	2536	0	10718	7098	4593	232	0	82	75	28
223PC009	2444	0	9988	6943	4758	112	3	0	0	189
222QC503	2384	0	965	577	445	18754	10	494	112	103
223PC455	2288	0	3460	10000	6007	445	16	107	232	150

Registro: 1 de 469

Macro: Todos

Micro: Todos

Grupo: Todos

Tipo: Todos

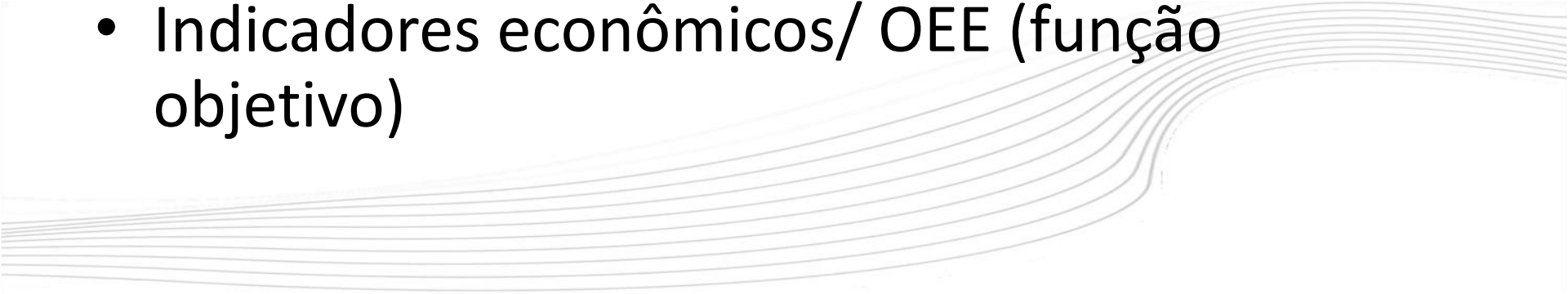
Turno: Todos

Produto: Todos

Tag: Todos

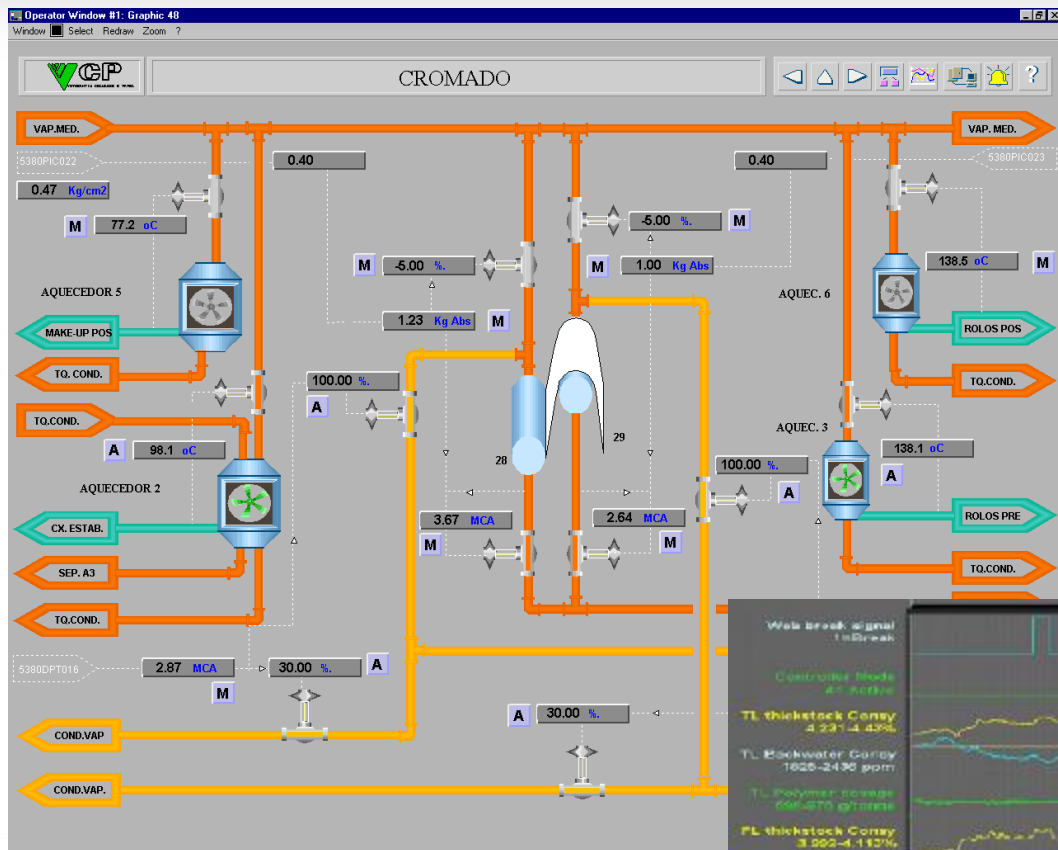
- Global: 0
- % Auto: 0
- Erro Médio: 0
- Variabilidade: 0
- IAE: 0
- CPK: 0
- Cruz.SP: 0
- Valv. Trav.: 0
- Valv. Rev.: 0
- Valv. Lim.: 0

Oportunidades

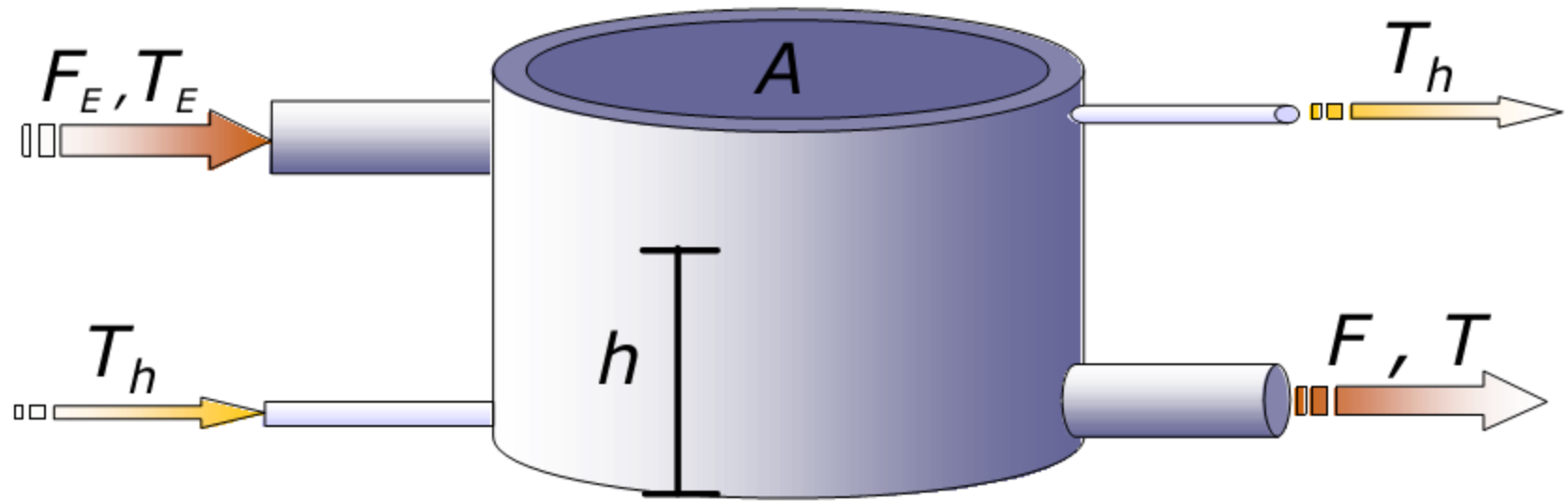
- Diagnóstico e correção de problemas de campo (manutenção preditiva)
 - Gestão e sintonia das malhas de controle
 - Estratégias de controle avançada para diminuição de variabilidade
 - Otimização do ponto de operação (mais próximo de limites operacionais)
 - Indicadores econômicos/ OEE (função objetivo)
- 

Em resumo...

Entendimento do processo



Representação matemática



$$\frac{dh(t)}{dt} = \frac{1}{A}(F_e(t) - C_v \sqrt{h(t)})$$

$$\frac{dC_R(t)}{dt} = \frac{F_e(t)}{Ah(t)}(C_{R_e}(t) - C_R(t)) - r_R(t)$$

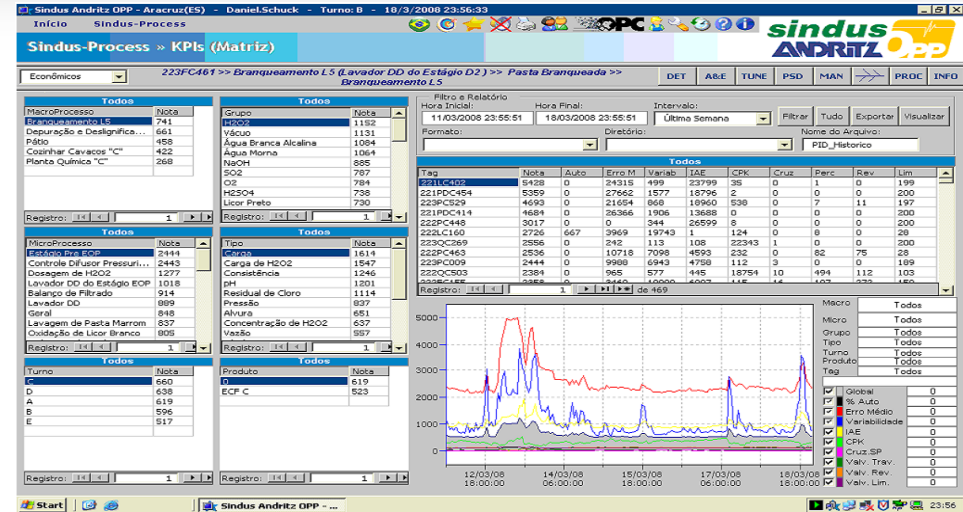
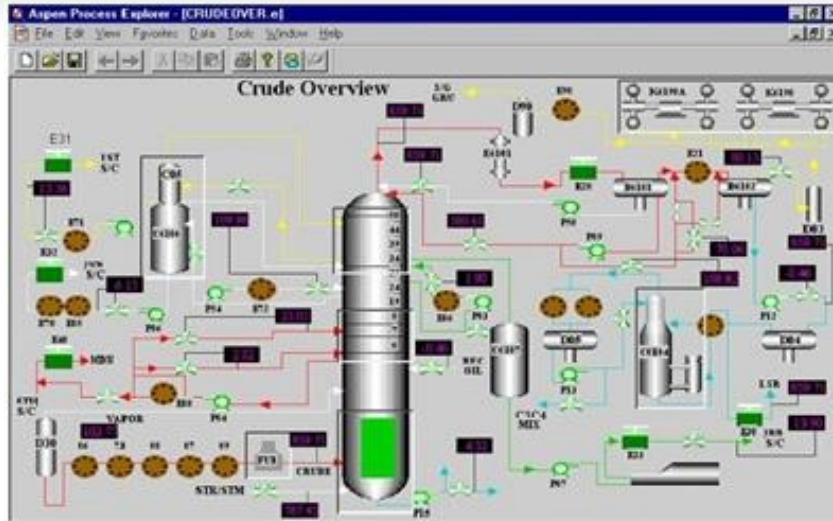
$$\frac{dT(t)}{dt} = \frac{F_e(t)}{Ah(t)}(T_E(t) - T(t)) - \frac{UA_c}{Ah(t)\rho C_p}(T(t) - T_h(t)) - \frac{\Delta H_r}{\rho C_p}r_R(t)$$

$$\text{com } r_R(t) = k_0 e^{-E/RT(t)} C_R^2(t)$$

(balanço de massa)

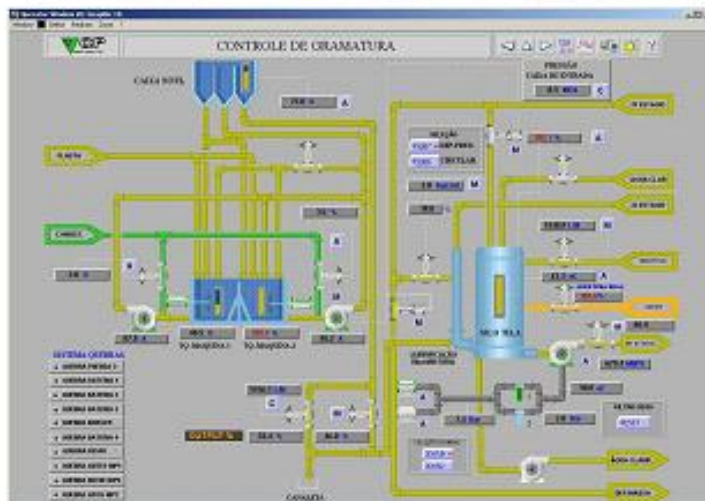
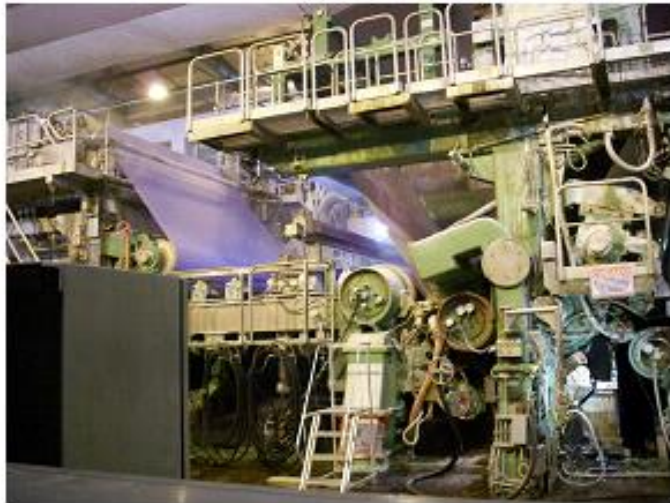
(balanço de energia)

Proposta de soluções



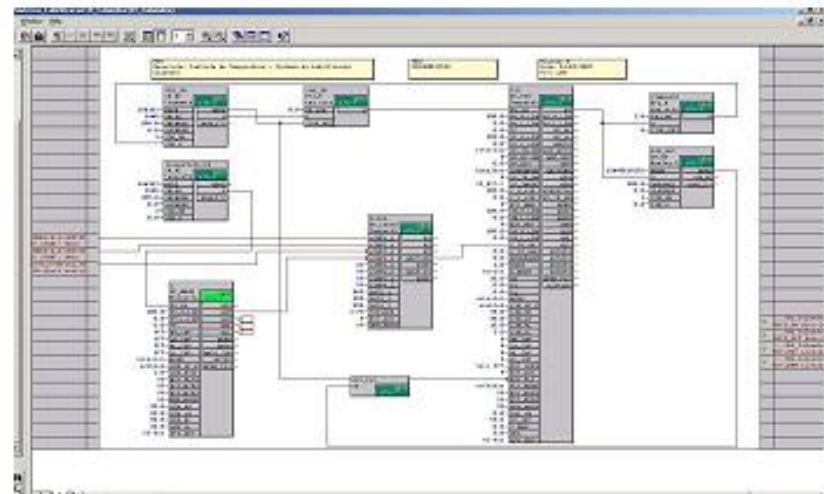
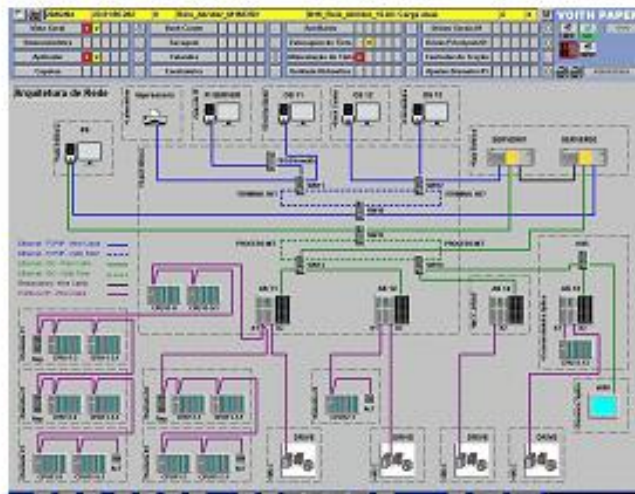
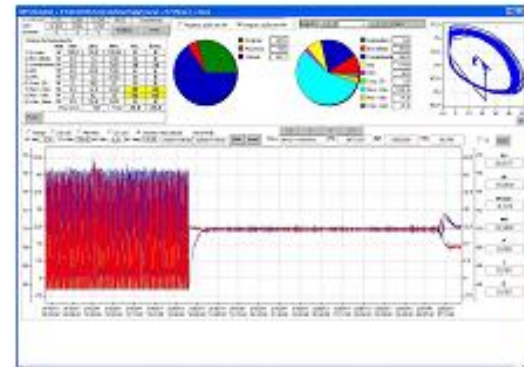
Controle e Instrumentação de Processos: produção de papel

- Processos (contínuos, bateladas), acionamentos (CA e CC), eventos discretos
- Instrumentação: sist. medição (transmissores), pneumática, hidráulica, atuadores



Tecnologia de Controle de Processos - Controladores/ Redes Industriais

- Controladores: CLPs, SDCDs, QCSs; sistema SCADAs
- Redes: 4 – 20mA, hart, ethernet, profibus, controlnet, devicenet, AS-i
- Acionamento de máquinas CC/CA \rightsquigarrow *single* e *multi-drive*, escalar, vetorial
- Siemens, ABB, GE, Rockwell, Honeywell, etc





Muito Obrigado!

Prof. Eduardo Stockler Tognetti

estognetti@ene.unb.br

Depto. Enga. Elétrica

Laboratório de Automação e Controle

<http://www.ene.unb.br/estognetti/>

Laboratório de Automação e Robótica (LARA)

