

SEMINÁRIO

RECUPERAÇÃO E UTILIDADES

Dia 10 de Abril de 2001

Instituto de Engenharia - IE
São Paulo / SP - Brasil

*Simulação e controle de processos
no sistema de evaporação de licor
negro - KPP*

Sérgio Henrique Saavedra Martinelli *et alii*
KLABIN PARANÁ PAPÉIS



ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA TÉCNICA DE CELULOSE E PAPEL
Rua Ximbó, 165 - Aclimação, CEP 04108-040 - São Paulo, SP
Tel +55 11 5574-0166 / Fax +55 11 5571-6485 / E-Mail abtcp@abtcp.com.br



Universidade Estadual de Maringá - Klabin Paraná Papéis
Programa de Mestrado em Engenharia Química

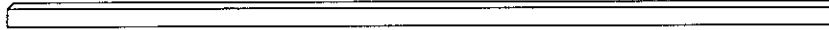
Simulação e Controle de Processos no Sistema de Evaporação de Licor Negro - KPP.

São Paulo, 10 de abril de 2001.

Orientadores na Universidade: Ivo Neitzel / Lúcio Cardozo Filho

Orientadores na Klabin: Osvaldo Vieira / Marcos Betini

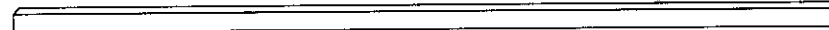
Mestrando: Sérgio Henrique Saavedra Martinelli



Objetivos:

- **Construção de um simulador, para o processo de evaporação na KPP, em estado estacionário, por meio de balanços materiais e energéticos.**
 - Análise, através de simulações, do desempenho para algumas alterações propostas para a planta.
 - Análise de alguns aspectos de alternativas de controle para o processo:
 - Estabilidade: do emparelhamento de variáveis no laço de controle pelo método de Niederlinski.
 - Interação: entre laços de controle, por meio do método de RGA (Relative Gain Array).
- **Estudo para a construção de um sensor virtual, através de Redes Neurais, para inferir o valor on-line da concentração do licor negro.**

Sérgio Martinelli - abril 2001



Revisão Bibliográfica:

CARDOSO et al. (1997): simulação da evaporação na Cenibra.

BREMFORDE e MULLER (1994): simulação do processo de evaporação (New Zealand Forest Products Kinleith Pulp and Paper - NZFP).

JESUS e ALMEIDA (1999): análise do desempenho de várias estratégias de controle para evaporação, no processo de produção de açúcar.

ZAMAN et al. (1998): mediram o aumento do ponto de ebulição do licor negro, à várias concentrações e pressões.

STOY (1992): mediu a entalpia do licor negro à várias concentrações e temperaturas.

Sérgio Martinelli - abril 2001



Modelagem e Simulação do Sistema:

- Balanço de massa global;
- Balanço de massa por componente;
- Balanço de energia;
- Relações termodinâmicas do licor negro.

Sérgio Martinelli - abril 2001



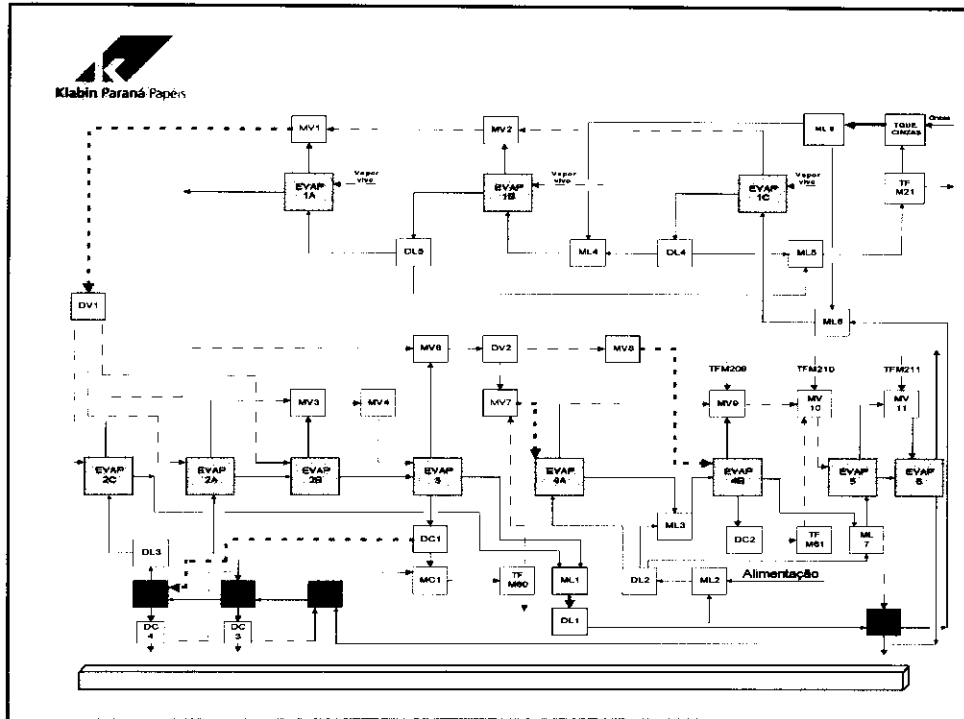
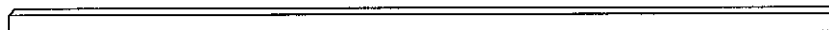


Tabela 1: Matrix ciclo-corrente para a solução do sistema de evaporação.

Variáveis de Entrada	Solução do Equipamento	Variáveis de Saída
Assumir (FLSIML1,XLSIML1,TLSIML1)	DL 1	
	ML 2	
	DL 2	
Assumir (FVSMV7,TVSMV7)	EVAP 4A	
	ML 3	
Assumir (FVSMV8,TVSMV8)	EVAP 4B	
	DC 2	
	TF M61	
	MV 9	
	MV 10	
	ML 7	
	EVAP 5	
	MV 11	
	EVAP 6	
	PA M22	
	PA M23	
	DC 3	
Assumir (FVSIDC1,TVSIDC1)	PA M24	
	DC 4	
	DL 3	
Assumir (FVSMV1,TVSMV1)	DV 1	
	EVAP 2C	
	EVAP 2A	
	EVAP 2B	
	MV 3	
	MV 4	
	EVAP 3	
	DC 1	Novo Valor (FVSIDC1,TVSIDC1)
	MC 1	
	TF M60	
	MV 6	
	DV 2	

1 2 3 4

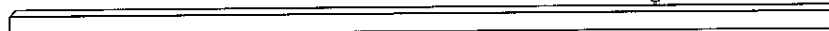
	MV 8	Novo Valor (FVSMV8,TVSMV8)	↑
	MV 7	Novo Valor (FVSMV7,TVSMV7)	↑
	ML 1	Novo Valor (FLSML1,XLSML1,TL SML1)	↑
	DL 1		
	PA M25		
Assumir (FLSTCINZ,XLSTCIN,TLSTCIN)	DL 6		←
	ML 6		
	EVAP 1C		
	DL 4		
	ML 4		
	EVAP 1B		
	DL 5		
	ML 5		
	TF M21		
	T CINZ	Novo Valor (FLSTCIN,XLSTCIN,TLSTCIN)	←
	MV 2		
	EVAP 1A		
	MV 1	Novo Valor (FVSMV1,TVSMV1)	↑



Comparação dos resultados da simulação com dados de operação:

Efeito	Concentração de operação (%)	Concentração pela simulação (%)
1A	79 – 84	82,9
1B	68 – 73	72,3
1C	54 – 60	57,0
3	37 – 44	41,6
2B	32 – 38	35,8
6	29 – 34	30,4

Sérgio Martinelli - abril 2001



Comparação dos resultados da simulação com dados de operação:

Efeito	Temperatura do licor de operação (°C)	Temperatura do licor pela simulação (°C)
6	63 - 72	65,3
5	79 - 82	81,8
4B	88 - 95	92,8
4A	89 - 95	93,6
3	98 - 106	104,9
2B	109 - 118	116,6
2A	109 - 117	115,4
1C	136 - 137	140,1
1B	140 - 141	147,3
1A	146 - 149	153,1

Sérgio Martinelli - abril 2001

Aplicação do Simulador

Mudanças Propostas para a Planta:

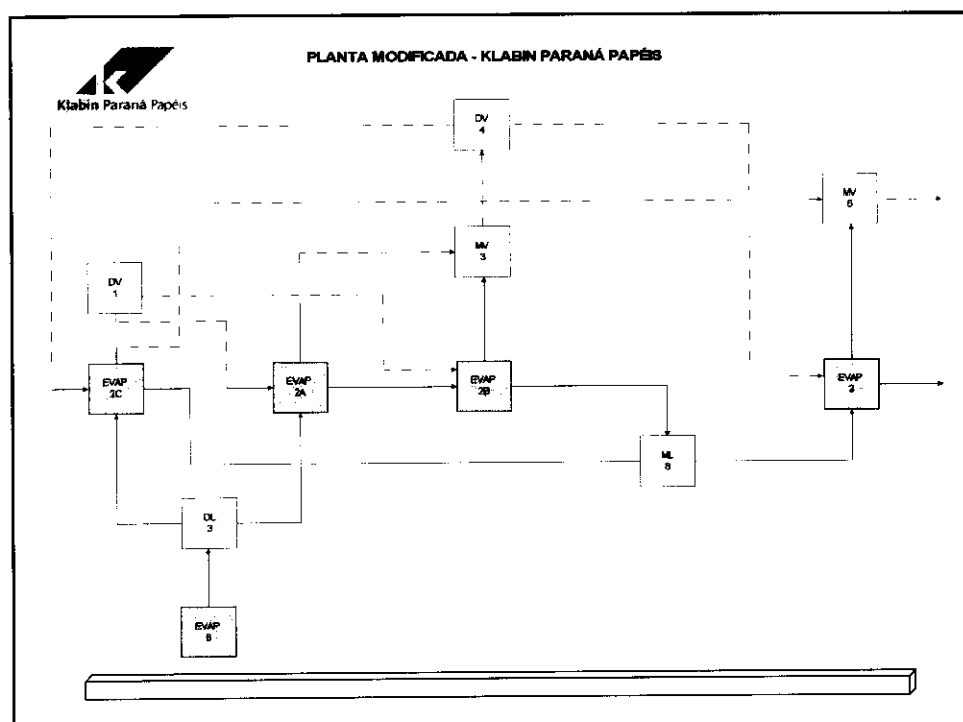
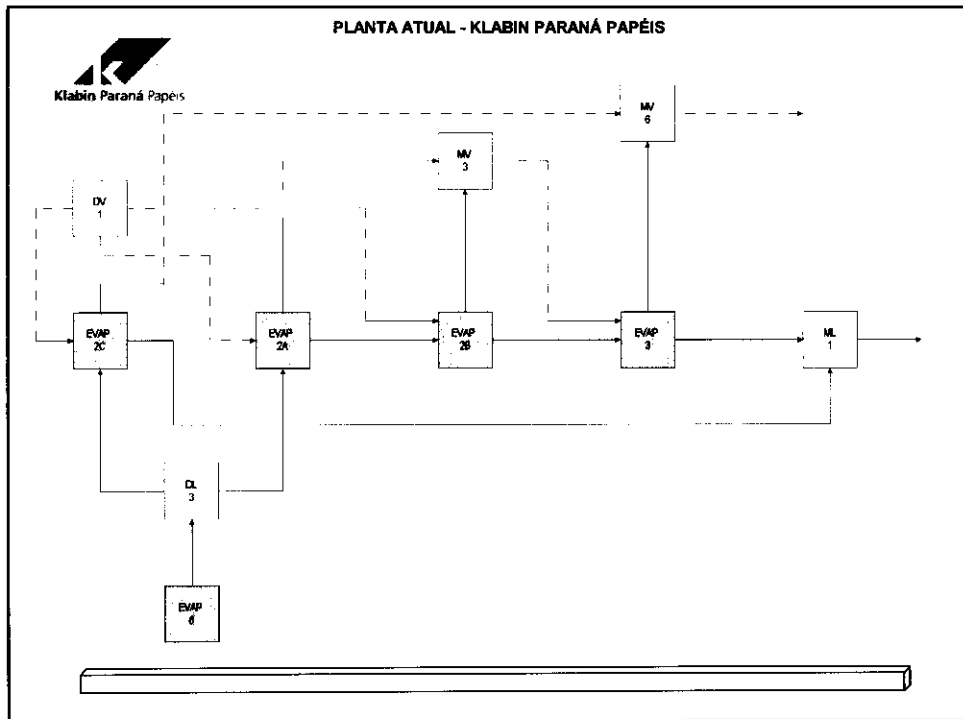
Alterações:

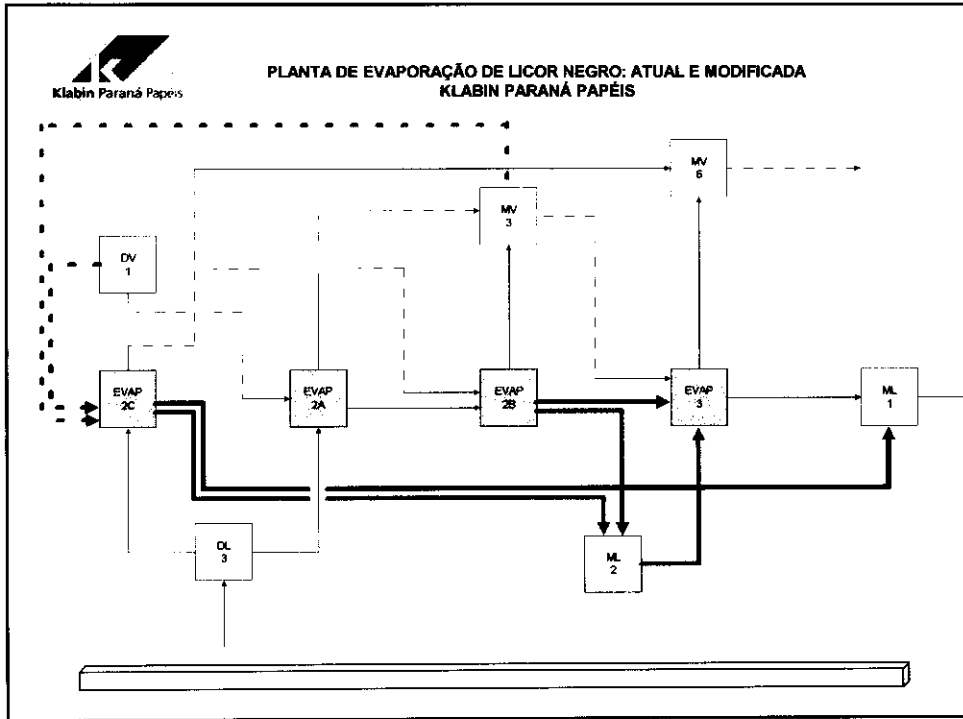
Transformar o efeito 2C em um outro 3º efeito.

Objetivo:

Aumentar a eficiência energética do processo.

Sérgio Martinelli - abril 2001





Aplicação do Simulador

Comparação da Performance dos Sistemas

Efeito	Sistema Atual Conc. (%)	Sistema Proposto Conc. (%)	Diferença entre Atual e Proposto Conc.(%)
Licor na aliment.	14,0	14,0	0
3	41,6	43,1	1,5
1C	57,0	59,0	2,0
1B	72,2	74,2	2,0
1A	82,8	84,9	2,1

Sérgio Martinelli - abril 2001

Aplicação do Simulador

Variáveis	Sistema Atual		Sistema Proposto	
	Fluxo (Kg/h)	Conc. (%)	Fluxo (Kg/h)	Conc. (%)
Alimentação	476.000	14,0	476.000	14,0
Recirculação do 3º ef.	132.222	41,6	123.636	43,1
Alimentação para ef. 4A, 4B e 5	608.222	20,0	599.636	20,0
Alimentação para o 1º ef.	160.376	41,6	154.346	43,1

Sérgio Martinelli - abril 2001

Aplicação do Simulador

O aumento da eficiência energética no sistema 2 pode ser expresso de duas formas:

1. Mantendo-se a concentração de saída igual ao sistema 1, reduzindo o consumo de vapor na evaporação.
2. Mantendo-se constante o consumo de vapor na evaporação e obtendo-se uma concentração maior. Calcula-se a quantidade de vapor adicional, gerado na Caldeira de Recuperação, pela quantidade de energia referente a não evaporação da diferença de água contida no licor.

Sérgio Martinelli - abril 2001



Aplicação do Simulador

Cálculos de custos para a opção 1:

Balanco de Massa:

Massa de água evaporada = (Massa de licor entra + Massa de cinzas que entra
- Massa de licor que sai)

Sistema Atual:

Massa de água evaporada = 476.000 (Kg/h) + 5.800 (Kg/h) - 87.495,2 (Kg/h)
= 394.304,8 (Kg/h)

Sistema Proposto:

Massa de água evaporada = 476.000 (Kg/h) + 5.800 (Kg/h) - 85.345,6 (Kg/h)
= 396.454,4 (Kg/h)

Sérgio Martinelli - abril 2001



Aplicação do Simulador

Diferença entre os sistemas 1 e 2:

Água evaporada no sistema 2 - Água evaporada no sistema 1 = 2.149,6(Kg/h)

Economia de vapor: 4,1538 (Kg água evaporada / Kg vapor consumido)

Fonte: Boletins da Recuperação Química (Média referente ao mês de março/2000)

Redução do consumo de vapor: 517,502 Kg/h de vapor vivo.

Custo do vapor: R\$ 21,22 / Gcal

Fonte: Gerência de Utilidades (Média referente aos meses de janeiro à agosto de 2000)

Calor latente de vaporização: 503,583 Kcal/Kg

Redução de custos: R\$ 47.779,57 / ano

Sérgio Martinelli - abril 2001

Entradas

	Energia (Kcal/Kg sólidos) %	
Calor referente à combustão do licor	3666,7	93,8
Calor sensível do licor	83,3	2,1
Calor sensível do ar	161,1	4,1
Total	3911,1	100,0

Saídas

	Energia (Kcal/Kg sólidos) %	
Calor sensível dos gases secos da chaminé	238,9	6,1
Calor sensível da umidade nos gases da chaminé	77,8	2,0
Calor latente da água no licor negro	308,3	7,9
Calor latente da água da combustão	194,4	5,0
Conteúdo de calor do smelt	138,9	3,5
Calor para formar sulfeto	258,3	6,6
Perdas de calor	11,1	0,3
Diferenças	77,8	2,0
Total	1350,6	33,4
Calor para gerar vapor	2605,6	66,6
Total	3911,1	100,0

Fonte: TAPPI, 1992, Chemical Recovery in the Alkaline Pulping Processes. 3th ed. Atlanta, TA

GLEADOW e BARYNIN (1997): A queima de licor negro à mais alto teor de sólidos gera uma maior eficiência térmica e uma maior geração específica de vapor na Caldeira de Recuperação. A perda de água será menor.

VAKKILAINEN et al. (1996): Um aumento da concentração de sólidos de 65% para 80%, o fluxo de vapor aumenta 6,9% e a eficiência de geração de vapor aumenta de 64,7% para 69,5%. Para esse caso o fluxo de gás na chaminé diminui em 7%.

BIERMANN (1996): Operar a Caldeira de Recuperação com maior concentração de sólidos no licor, além de gerar uma maior recuperação de calor leva à temperaturas maiores na parte mais baixa da fornalha, o que provoca um aumento na taxa de redução do smelt e uma diminuição na emissão de enxofre.

Sérgio Martinelli - abril 2001

Aplicação do Simulador

Cálculo de custos para a opção 2:

Calor latente de vaporização da água no licor: 2.346,39 KJ/Kg

Considerando que a energia economizada para evaporar a água residual do licor seja transferida para geração de vapor:

Aumento na produção de vapor: 13.900,0 tonelada / ano

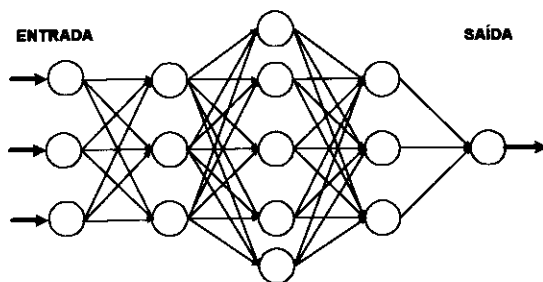
Custo do vapor: R\$ 21,22 / Gcal

Redução de custos: R\$ 220.869,09 / ano

Sérgio Martinelli - abril 2001

Redes Neurais

Sistema constituído de diversos elementos simples interconectados chamados neurônios, por analogia com o cérebro humano. Esses elementos são arranjados em camadas.



Estrutura genérica de uma rede neural

Sérgio Martinelli - abril 2001



Redes Neurais e Sensores Virtuais

O potencial de modelagem das redes neurais possibilita utilizá-las como sensores virtuais.

Campo de utilização: Variáveis dificilmente mensuráveis;
Sensores físicos caros.

A rede aprende como um determinado sistema trabalha e constrói um modelo que futuramente é utilizado para inferir o valor de uma determinada variável.

Sérgio Martinelli - abril 2001



Sensor Virtual: Concentração de sólidos do licor negro

Justificativa:

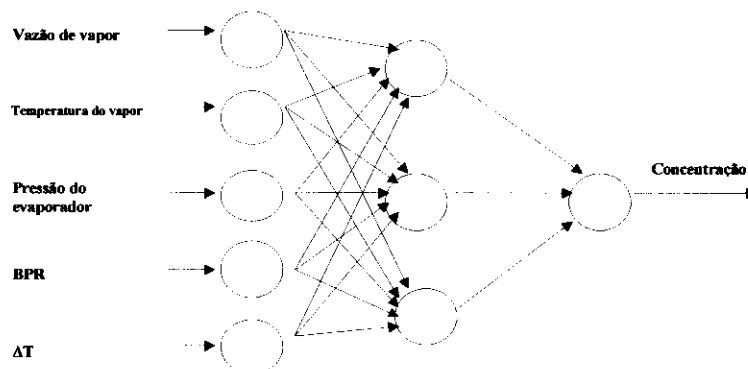
- Possibilitar uma melhora no controle operacional da planta.
- Otimizar a frequência de lavagens dos evaporadores.
- Etapa inicial para implantação futura de um sistema de controle automático.

Variáveis utilizadas:

- Vazão do vapor de aquecimento.
- Pressão do vapor de aquecimento.
- Pressão da câmara de expansão do evaporador.
- Aumento do ponto de ebulição do licor (BPR).
- Diferença de temperatura entre licor e do vapor de aquecimento.

Sérgio Martinelli - abril 2001

Esquema



Sérgio Martinelli - abril 2001

Aplicação do Simulador

Arranjo:

Variável Controlada: Concentração do licor na saída do evaporador 1A
 Variável Manipulada: Temperatura do vapor vivo para o evaporador 1A

Variável Controlada: Concentração do licor na saída do evaporador 1B
 Variável Manipulada: Temperatura do vapor vivo para o evaporador 1B

Variável Controlada: Concentração do licor na saída do evaporador 1C
 Variável Manipulada: Temperatura do vapor vivo para o evaporador 1C

NI : 0,5042229766

$$RGA = \begin{bmatrix} 1,300289095 & 0,1001726582 & -0,4004624855 \\ -0,3152022725 & 1,423696935 & -0,1085015632 \\ 0,01491234633 & -0,5238696711 & 1,50895679 \end{bmatrix}$$

Sérgio Martinelli - abril 2001

Niederlinski Index

Método para análise de estabilidade.

Eliminação de emparelhamentos ruins de variável controlada/ variável manipulada, em um estágio preliminar ao projeto.

O método é uma condição necessária mas não suficiente para estabilidade de um sistema de loop fechado, com ação integral.

Sérgio Martinelli - abril 2001

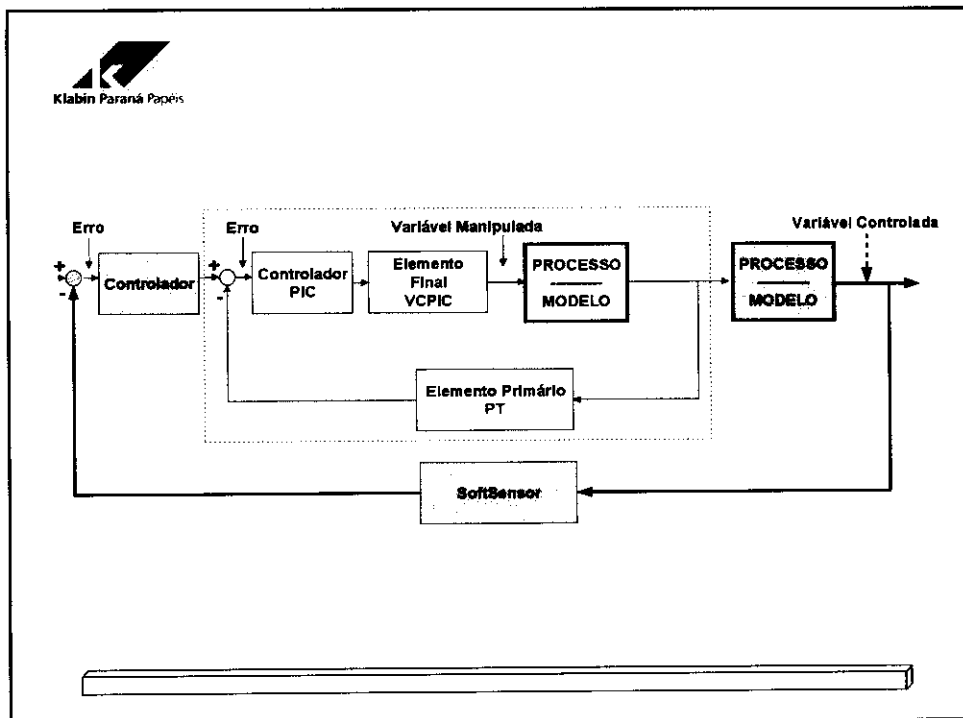
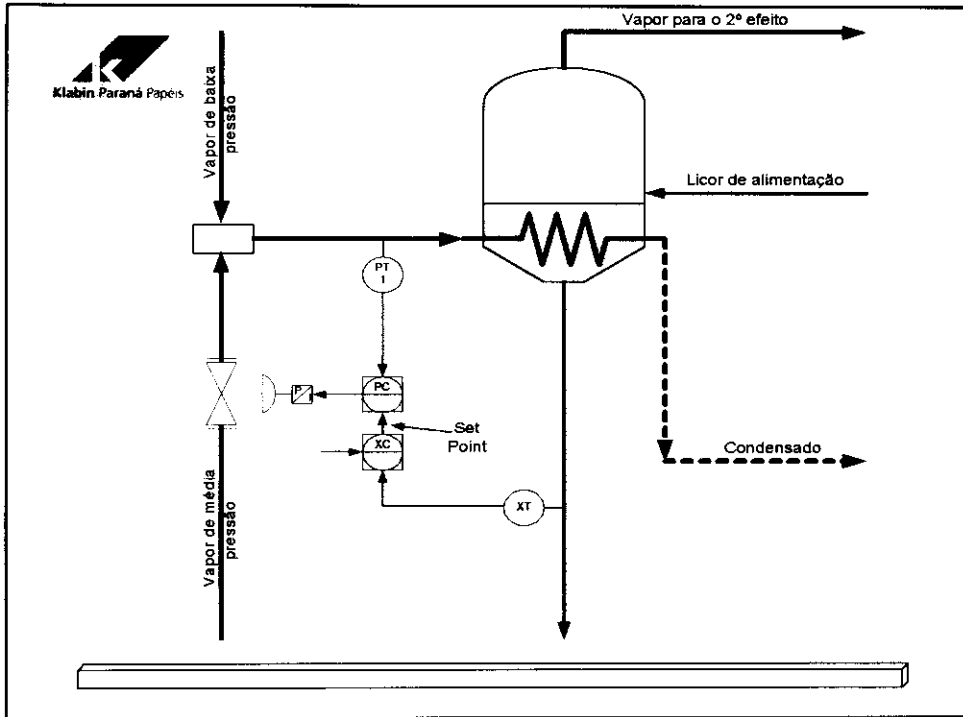
RGA (Relative Gain Array)

Um dos métodos mais estudados para análise de interação.

Possui as vantagens de ser fácil e necessitar somente informações dos ganhos estáticos do processo.

O uso dos ganhos estáticos do processo determinados empiricamente não é recomendado para cálculo de RGA (Shinskey).

Sérgio Martinelli - abril 2001



BIBLIOGRAFIA

- BHAT, N., MCAVOY, T.J., 1992, "Determining Model Structure for Neural Models by Network Stripping", *Computers Chemical Engineering*, v. 16, n. 4, pp. 271-281.
- BIERMANN, C.J., 1996, *Handbook of Pulping and Papermaking*. 2nd ed. San Diego, CA, Academic Press.
- BREMFORDE, D.J., MÜLLER, H.M., 1994, "Multiple Effect Evaporator Performance for Black Liquor", *Appita Journal*, v. 47, n. 4 (Jul), pp. 320-326.
- CARDOSO, M., PASSOS, M.L.A., CARAZZA, F., 1997, "Avaliação preliminar do processo de recuperação do licor de eucalipto para sua otimização". In: 30º Congresso Anual de Celulose e Papel da ABTCP, pp. 601-609, São Paulo, Nov.
- CARDOZO, L.C.; SIMÕES, M.R.; WOLFF, F., 2000, "Propriedades Térmicas do Licor Negro de Processo Kraft", *Anais do CIADICYP 2000*
- CLAY, D.T., GRACE, T.M., 1984, "Measurements of High Solids Black Liquor Boiling Point Rise", *TAPPI*, v. 67, n. 2, p. 62.
- CONSIDINE, D.M., ROSS, S.D., 1964, *Handbook of Applied Instrumentation*. 1st ed. New York, McGraw-Hill Book Company.
-

- FREDERICK, W.J., SACHS, D.G., GRADY, H.J., GRACE, T.M., 1980, "Boiling Point Elevation and Solubility Limit for Black Liquors", *TAPPI*, v. 63, n. 4, p. 151.
- GIL, P. CORREIA, A.D., ANO, "Dynamic Modelling and Optimal Hierarchical Control of a Multiple-Effect Evaporator", *Universidade de Lisboa*.
- GLEADOW, P., BARYNIN, J., 1997, "The outlook for chemical recovery with increased process closure", 30º Congresso Anual de Celulose e Papel da ABTCP, São Paulo, Brasil, 03-07 Novembro.
- KOLMOGOROV, S., KURKOVA, V., 1992, "Theorem and multilayer neural networks", *Neural Networks*, v. 5, pp. 501-506.
- KOORSE, G.M., MEHRATRA, A., VEERAMANI, H., 1997, "Engineering Properties of Spent Pulping Liquors", *Indian Pulp Pap.*, v. 41 (Jun/Jul), p. 7.
- LUYBEN, W.L., LUYBEN, M.L., 1997, *Essentials of Process Control*. 1st ed. New York, McGraw-Hill.
- MASSE, M.A., KIRAN, E., FRICKE, A.L., 1987, "A thermodynamic Model of the Heat Capacity of Compositionally Complex Multicomponent Polymer Solutions: Kraft Black Liquors", *Chem. Eng. Commun.*, v. 50, p. 81.
-



MCCABE, W.L., SMITH, J.C., HARRIOT, P., 1985, Unit Operations of Chemical Engineering. 4th ed. New York, McGraw-Hill.

MCQUADE, M.E., MCCORMACK, P.D., BYRNE, J.G., 1966, "Analysis and Optimization of a Multiple-Effect Evaporator", Chemical and Petroleum, session 48, paper 48C (Jun), pp. 48C.1-48C.15.

SENAI / IPT, 1988, Celulose e Papel. 2^a ed. São Paulo, SENAI / IPT.

STOY, M.A., 1992, Dependence of the Enthalpy and Vapor Pressure of Kraft Black Liquor on Solids Content. Ph.D. thesis, University of Florida, Florida, USA.

STOY, M.A., FRICKE, A.L., 1994, "Enthalpy Concentration Relations for Black Liquor", Tappi Journal, v. 77, n. 9 (Sep), pp. 103-110.

SU, H., MCAVOY, T. J., WERBOS, P., 1992, "Long Term Predictions of Chemical Processes Using Recurrent Neural Networks: A Parallel Training Approach", Industrial Engineering Chemical Research, v. 31, n. 5, pp. 1338-1352.

SZYMONSKI, K.A., GRACE, T.M., 1985, "A Method of Measuring the Water Vapor Pressure of Black Liquor", TAPPI, v. 68, n. 2, p.87.

TAPPI, 1992, Chemical Recovery in the Alkaline Pulping Processes, 3rd ed. Atlanta, Tappi Press.



VAKKILAINEN, E.K., PAJU, R.A., KIISKILÄ, E., 1997, "Effect of current trends on recovery boiler construction and design", 30^o Congresso Anual de Celulose e Papel da ABTCP, São Paulo, Brasil, 03-07 Novembro.

WENNERBERG, O., 1986, "Boiling Point Elevation and Viscosity of Black Liquor at High Solids Content and High Temperature", TAPPI International Chemical Recovery Conference, p. 275.

ZAIN, O.S., KUMAR, S., 1996, "Simulation of a Multiple Effect Evaporator for Concentrating Caustic Soda Solution", Journal of Chemical Engineering of Japan, v. 29, n. 5, pp. 889-893.

ZAMAN, A.A., FRICKE, A.L., 1996, "Effect of Pulping Variables on Enthalpy of Kraft Black Liquors: Empirical Predictive Models", Industrial Engineering Chemical Research, v.35, n. 7, pp. 2438-2443.

ZAMAN, A.A., MCNALLY, T.W., FRICKE, A.L., 1998, "Vapor Pressure and Boiling Point Elevation of Slash Pine Black Liquors: Predictive Models with Statistical Approach", Industrial Engineering Chemical Research, v.37, n. 1, pp. 275-283.

ZAMAN, A.A., TAVARES, S.A., FRICKE, A.L., 1996, "Studies on the Heat Capacity of Slash Pine Kraft Black Liquors: Effects of Temperature and Solids Concentrations", Journal of Chemical and Engineering Data, v. 41, n. 2, pp. 266-271.



Klabin Paraná Papers

ZAMAN, A.A., MCNALLY, T.W., FRICKE, A.L., 1998, "Vapor Pressure and Boiling Point Elevation of Slash Pine Black Liquors: Predictive Models with Statistical Approach", *Industrial Engineering Chemical Research*, v.37, n. 1, pp. 275-283.

ZAMAN, A.A., TAVARES, S.A., FRICKE, A.L., 1996, "Studies on the Heat Capacity of Slash Pine Kraft Black Liquors: Effects of Temperature and Solids Concentrations", *Journal of Chemical and Engineering Data*, v. 41, n. 2, pp. 266-271.

