

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

GERALDO SALES DA SILVA

CONTROLE DE pH EM MÁQUINA DE PRODUÇÃO DE CARTÃO  
MULTICAMADA

CURITIBA  
2010

GERALDO SALES DA SILVA

CONTROLE DE pH EM MÁQUINA DE PRODUÇÃO DE CARTÃO  
MULTICAMADA

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Química, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Kaminski Lenzi

Co-Orientador: Prof. Dr. Ivo Neitzel

CURITIBA  
2010

DaSilva, Geraldo Sales

Controle de pH em máquina de produção de cartão  
Multicamada / Geraldo Sales da Silva – Curitiba, 2010.

48 f.:il (algumas color.); 29 cm.

Orientador: Doutor Marcelo Kaminski Lenzi

Co-Orientador: Doutor Ivo Neitzel

Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Setor de  
Tecnologia, Universidade Federal do Paraná

1. pH. 2. Controle de processos 3. Papel e celulose

CDD

CDU

## TERMO DE APROVAÇÃO

GERALDO SALES DA SILVA

CONTROLE DE pH EM MÁQUINA DE PRODUÇÃO DE CARTÃO MULTICAMADA

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Química, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, pela seguinte banca examinadora:

Orientador:

Prof.Dr. Marcelo Kaminski Lenzi  
Departamento Engenharia Química - UFPR

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Fernanda de Castilhos  
Departamento Engenharia Química - UFPR

Prof.Dr. Ivo Neitzel  
Departamento Engenharia Química - FATEB

Prof.Dr. Sergio Henrique Saavedra Martinelli  
Departamento Engenharia Química - FATEB

Curitiba, 31 de Agosto de 2010

Á Deus por sua benevolência, saúde e paz.

Aos meus pais Olímpia e Sebastião Malaquias que na sua simplicidade sempre souberam o valor do estudo e não mediram esforços para me garantir toda educação necessária.

Aos meus filhos Raissa e Yuri Sales a quem gostaria de deixar o ensinamento sobre a importância da busca pelo conhecimento.

E a minha esposa Kelly Cristina pelo incentivo durante a realização desse trabalho.

## **AGRADECIMENTOS**

### **Aos que acreditaram e incentivaram esse projeto mestrado:**

Arthur Canhisares - Diretor Industrial de Papéis da Klabin SA.

Ivo Neitzel – Coordenador Pós Graduação Faculdade de Telêmaco Borba (FATEB).

Luiz Fernando de Lima Junior – Coordenador Pós-Graduação Engenharia Química Universidade Federal do Paraná (UFPR).

Marcelo Kaminski Lenzi – Professor Doutor titular mestrado UFPR.

Osvaldo Vieira – Coordenador de Pesquisa e Desenvolvimento Klabin.

Wilson José Tim Pontara – Diretor Geral – FATEB.

### **Aos professores da UFPR que dedicaram seus finais de semana ao ensino:**

Alexandre Knesebeck.

Carlos Itsuo Yamamoto.

Luiz Fernando de Lima Luz Júnior.

Marcelo Kaminski Lenzi.

Papa Matar Ndiaye.

### **Em especial aos professores que com sua dedicação me incentivaram na dissertação:**

Ivo Neitzel – Co-orientador.

Marcelo Kaminski Lenzi – Orientador.

### **Aos colegas que me ajudaram no trabalho de dissertação:**

Agradeço a todos os colegas da Klabin que me ajudaram na realização desse trabalho, com incentivo, tempo de discussão ou informação.

## RESUMO

O pH é uma das variáveis de maior importância para a fabricação de papel, devido à sua enorme influência na química da parte úmida e na formação da folha. O controle desta variável resulta em produção de papel com baixa variabilidade e em consequência mais facilidade para atender a qualidade requerida. Devido às dificuldades intrínsecas do processo, como não linearidade e à sua natureza estocástica, o desenvolvimento de modelos fundamentais para controle de processos torna-se uma tarefa complexa. Assim, usando os resultados da resposta a uma excitação em degrau do controlador PI em laço fechado foi possível obter o modelo do comportamento dinâmico do processo. Diversas abordagens foram usadas para a obtenção do modelo matemático, mas a que mais se destacou foi a abordagem em que foi considerada o equacionamento na variável tempo, utilizando o critério ISE (Integral do Quadrado do Erro) como critério de avaliação. É importante mencionar que foram consideradas duas alternativas para representar a mudança de *setpoint*, um degrau ideal e o caso real, uma sequência de degraus (*staircase*). A partir do modelo identificado para o processo, foram realizados estudos de simulação visando avaliar a sintonia do controlador e o impacto econômico por ajuste dos parâmetros proporcional e integral. Desta forma, mostrou-se que a escolha adequada dos parâmetros do controlador, afeta de maneira decisiva a variabilidade da resposta da malha de controle, bem como sua estabilidade e o tempo necessário para atingir o *setpoint*.

Finalmente, é de suma importância ressaltar que os resultados indicam uma melhora no desempenho da malha de controle avaliado através critério ISE e que o ganho econômico pode chegar a 88%.

Palavras-Chave: Controle de processos. Papel cartão. pH. Caixa de entrada.

## **ABSTRACT**

Due to its influence on wet end chemistry, pH plays a key role in paper manufacturing. Therefore, the control of this variable results in production with low variability and as consequence high paperboard quality. However, because of inherent manufacturing difficulties, such as process nonlinearities and its stochastic nature, the derivation of fundamental models for control purposes still remains a complex task. Consequently, by using closed-loop-based identification techniques, consisting on the dynamic behavior of a closed PI pH control loop a mathematical model was obtained. Different approaches were considered for modeling issues; however, the best fit was obtained by using a mathematical model based on a continuous time independent variable, using the ISE (Integral Square Error) as evaluation criterion. It is worth mentioning that the setpoint change was modeled in two ways, such as step and staircase. With the aid of the identified process model, simulations were carried out in order to evaluate the controller tuning parameters and also its economic impact on the control loop performance. This way, it could be successfully shown that the choice of controller parameters directly influences the control loop variance and the required time to reach a new setpoint. Finally, it should be stressed that the obtained results indicate an improvement of roughly 88% on the economic parameter evaluated.

Keywords: Process control. Paper production. pH. Headbox.



## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - BENCHMARKING DESEMPENHO MALHAS DE CONTROLE.....	2
FIGURA 2 - ETAPAS BÁSICAS PROCESSO FABRICAÇÃO DE PAPEL.....	5
FIGURA 3 – ELEMENTOS DA CAIXA DE ENTRADA MÁQUINA PAPEL.....	6
FIGURA 4 – ELEMENTOS DA SEÇÃO DE FORMAÇÃO FABRICAÇÃO PAPEL.....	7
FIGURA 5 – ESQUEMA SIMPLIFICADO DE UMA PRENSA ÚMIDA.....	7
FIGURA 6 – CALANDRA E PERFIL ESPESSURA EM DIFERENTES PARTES PROCESSO.....	8
FIGURA 7 – ENROLADEIRA E REBOBINADEIRA MÁQUINA PAPEL.....	9
FIGURA 8 – ESTRUTURA DE CONTROLE FEEDBACK.....	14
FIGURA 9 – ESTRUTURA FEEDBACK COM TÉCNICA CONTROLE IMC.....	14
FIGURA 10 – ESTRUTURA CONTROLE FEEDBACK + FEEDFORWARD.....	14
FIGURA 11 – FLUXOGRAMA DO CONTROLE DE PH.....	19
FIGURA 12 – RESPOSTA TIPICA CONTROLADOR PI EM LAÇO FECHADO.....	24
FIGURA 13 – CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO DE SINTONIA.....	28
FIGURA 14 – COLETA DE DADOS NO PROCESSO.....	30
FIGURA 15 – RESPOSTA MODELO MÉTODO KEALY & DWYER SET POINT REAL.....	33
FIGURA 16 – RESPOSTA MODELO MÉTODO KEALY & DWYER SP IDEALIZADO.....	33
FIGURA 17 – RESPOSTA MODELO MÉTODO MOMENTOS – SP REAL .....	34
FIGURA 18 – RESPOSTA MODELO MÉTODO MOMENTOS – SP IDEALIZADO.....	34
FIGURA 19 – RESPOSTA MOD. MÉTODO NELDER & MEAD – SP REAL.....	35
FIGURA 20 – RESPOSTA MOD. MÉTODO NELDER & MEAD – SP IDEALIZADO.....	35
FIGURA 21 – RESPOSTA NELDER & MEAD MINIMOS QUADRADOS – SP REAL.....	36
FIGURA 22 – RESPOSTA NELDER & MEAD MINIMOS QUADRADOS – SP IDEALIZADO.....	36
FIGURA 23 – MELHOR AJUSTE DOMINIO TEMPO SP IDEALIZADO.....	38
FIGURA 24 – MELHOR AJUSTE DOMINIO TEMPO SP REAL.....	39
FIGURA 25 – COMPARATIVO ENTRE VARIANCIAS ANTES E APÓS SINTONIA.....	41
FIGURA 26 – COMPARATIVO DE RESPOSTA PELO MÉTODO ISE.....	41

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – SÍNTESE DOS RESULTADOS OBTIDOS MALHA FECHADA.....	32
TABELA 2 – SÍNTESE RESULTADOS OBTIDOS MALHA ABERTA.....	38
TABELA 3 – RESULTADOS DAS SINTONIAS REALIZADAS.....	40
TABELA 4 – RESULTADOS DE AVALIAÇÃO SENSIBILIDADE.....	42
TABELA 5 – SIMULAÇÕES DE RESULTADO ECONÔMICO.....	43

## LISTA DE SIGLAS

AKD – Dímero de Alquil-ceteno.
CO <sub>2</sub> – Dióxido de carbono.
CTMP – Chemi-thermo-mechanical pulp.
IAE – Integral do Valor Absoluto do Erro.
IMC – Internal Mode Control.
ISE – Integral do Quadrado do Erro.
ITAE – Integral do Valor Absoluto do Erro Ponderado.
LESF – Laboratório de Engenharia de Sistemas Fracionários.
MP7 – Máquina de papel número 7.
MP9 – Máquina de papel número 9.
pH – Potencial Hidrogeniônico.
PI – Controlador Proporcional Integral.
PI – System – Software da OSI.
PID – Controlador Proporcional Integral Derivativo.
SP – Set Point.
T <sub>m</sub> – Tempo morto.

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Introdução.....	1
1.2 Motivação e relevância .....	1
1.3 Objetivos.....	3
1.4 Organização da dissertação .....	3
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1 Fabricação do papel .....	4
2.2 Importância do pH na fabricação do papel .....	9
2.3 Controle de processos .....	11
2.3.1 Estrutura de controle .....	13
2.4 Controle de processos na indústria de papel.....	15
2.5 Identificação de processos na indústria de papel .....	17
2.6 Análise da revisão bibliográfica .....	18
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	19
3.1 Materiais .....	19
3.2 Metodologia .....	20
3.2.1 Identificação em malha fechada.....	21
3.2.2 Identificação em malha aberta .....	26
3.2.3 Sintonias do controlador.....	27
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	30
4.1 Resultados teste excitação em degrau .....	30
4.2 Estudos de Identificação – malha fechada .....	30
4.3 Estudos de Identificação – malha aberta .....	37
4.4 Estudos de Sintonia .....	39
4.5 Avaliação econômica .....	43
5 CONCLUSÕES.....	44
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	45

## 1 INTRODUÇÃO

---

### 1.1 Introdução

A indústria do papel possui um papel determinante para o desenvolvimento econômico e industrial de um país. Isso ocorre devido à mão-de-obra empregada e devido à geração direta e indireta de empregos em todas as etapas de fabricação.

Além disso, apresenta uma infinidade de produtos, podendo ser destinados diretamente ao mercado consumidor ou serem usados em outros processos. Assim, destaca-se o setor de embalagens, mais especificamente a utilização de papel cartão o qual corresponde a 8% da produção brasileira de papel<sup>1</sup>. Dentro do contexto de papel cartão, está o cartão para embalagem de alimentos líquidos que é destinado às embalagens de bebidas (como leite e sucos) e alimentos pastosos (como creme de leite e molho de tomate). Somente no ano de 2004 foram fabricados cerca de 8,4 bilhões deste tipo de embalagem.

Devido à globalização econômica, surge a natural necessidade do aprimoramento dos processos produtivos. Neste sentido, há a busca por processos mais econômicos, mais eficazes e eficientes, além de ambientalmente corretos.

Para atingir tais objetivos, a primeira escolha está no projeto adequado das unidades industriais. No entanto, além disso, torna-se indispensável o uso de técnicas de monitoramento e controle de processos, as quais serão exploradas nesse trabalho através do estudo da variável pH.

### 1.2 Motivação e relevância

O processo de produção de papel cartão sofre a influência de inúmeras variáveis, sendo o pH uma das mais importantes. O uso de um pH inadequado, pode levar a um desbalanceamento de elétrons e, conseqüentemente, afetar a absorção iônica de cargas minerais, mobilidade iônica, a interação entre cola e fibra, comportamento dos agentes de resistência úmido, comportamento de agentes de retenção e demais aditivos.

---

<sup>1</sup> FONTE: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CELULOSE E PAPEL – BRACELPA. 2009

Um controle inadequado do pH pode trazer problemas para as propriedades finais do cartão, como exemplo podemos citar, resistência à flexão abaixo do desejado, alta absorção ao edge wicking ácido lático e peróxido. Estas duas propriedades fora de especificação podem levar a uma grande geração de material refugado e/ou problemas no cliente final.

Portanto, surge a natural necessidade e importância do estudo para a aplicação de técnicas de controle e monitoramento de processos à produção de papel cartão. Neste trabalho o pH será a variável de estudo, mas as técnicas podem ser utilizadas para qualquer variável do processo de fabricação.

No ramo de celulose e papel o controlador proporcional-integral (PI) ainda é o mais utilizado, e apesar desta importância estes controladores apresentam desempenho baixo em algumas aplicações. Tem sido relatado na literatura que uma porcentagem significativa dos controladores instalados trabalham no modo manual e que 50% dos controladores instalados que operam em automático apresentam grandes variações em função de problemas de sintonia (OVIEDO ET. AL.2006).

Uma moderna máquina de papel tem aproximadamente 2000 malhas de controle. Sistemas bem projetados, sintonizados e com manutenção preventiva irão reduzir a variabilidade e garantir produtos dentro da especificação dos clientes (SELL NANCY, 1945).

Um estudo mais recente de mais de 2000 malhas de controle demonstram a situação das malhas de controle instaladas no setor fabricação de papel.



FIGURA 1 – BENCHMARKING DESEMPENHO MALHAS DE CONTROLE.

FONTE: BIALKOWSKI, 1993.

Outros dois motivadores para realização do trabalho foi a análise bibliográfica, onde: Não foram identificados trabalhos reportando a aplicação de técnicas de controle pH em fabricação papel. Não foram identificados trabalhos referente a identificação de processos em malha fechada com aplicação a produção papel.

### **1.3 Objetivos**

O objetivo geral deste trabalho foi a aplicação de técnicas de controle de processos a uma máquina de produção de papel cartão multicamada. Este objetivo geral é formado pelos seguintes objetivos específicos:

1. Estudo da influência do pH na fabricação de papel cartão;
2. Estudo experimental do comportamento dinâmico da variável de controle a partir de testes no equipamento industrial;
3. Identificação de um modelo matemático para o comportamento dinâmico;
4. Estudos de sintonia do controlador;
5. Simulação da malha de controle.

Este trabalho foi realizado na MP9 da KLABIN S/A Unidade Papéis em Telêmaco Borba-PR, no Laboratório de Controle de Processos da FATEB em Telêmaco Borba-PR e no Laboratório de Engenharia de Sistemas Fracionários – LESF da Universidade Federal do Paraná em Curitiba - PR.

### **1.4 Organização da dissertação.**

No Capítulo 1 além da introdução temos a motivação para realização do trabalho e os objetivos. O Capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica sobre as principais etapas do processo de fabricação, importância do pH na fabricação cartão, técnicas de controle de processos em geral e na indústria de papel. O Capítulo 3 descreve os materiais e métodos utilizados para a execução deste trabalho. No Capítulo 4 são apresentados e discutidos os resultados obtidos. No Capítulo 5 são feitas as conclusões e, por fim, são apresentadas as referências bibliográficas utilizadas.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

---

Nesta seção será apresentada a uma revisão bibliográfica sobre as principais variáveis da fabricação de papel, a importância do pH, a apresentação do estado da arte em termos de controle de pH na produção de papel cartão e, por fim, serão apresentadas as contribuições deste trabalho.

### 2.1 Fabricação do papel

Fabricação de papel é uma tecnologia que tem se expandido muito nos últimos anos. Avanços significativos têm sido feitos em todas as áreas da fabricação de papel, incluindo matérias primas, tecnologia de produção e controle de processos (JOHAN GULLICHSEN E HANNU PAULAPURO, 2000). No entanto, observa-se que independentemente da natureza do processo de fabricação da polpa, que pode ser química, mecânica ou reciclada, o tipo de madeira utilizada, madeira de fibra longa ou fibra curta, os conceitos da fabricação de papel são similares.

Após individualização das fibras de madeira que é feita no digestor com utilização de químicos e trabalho mecânico, a suspensão de celulose é enviada para a máquina de papel, onde é refinada, diluída, depurada e os aditivos químicos são utilizados para promover as propriedades de qualidade óticas, mecânicas ou químicas requeridas. A polpa e os aditivos são misturados em uma suspensão com concentração menor que 1%, a qual é distribuída sobre uma tela formadora para desaguamento. Após desaguamento a polpa passa por prensas úmidas para retirada da maior quantidade de água possível antes de passar pelos cilindros secadores. Máquinas mais modernas possuem sistema para melhorar o acabamento superficial por meio da aplicação de uma tinta de revestimento e calandragem. A Figura 2 apresenta as etapas básicas do processo fabricação de papel.

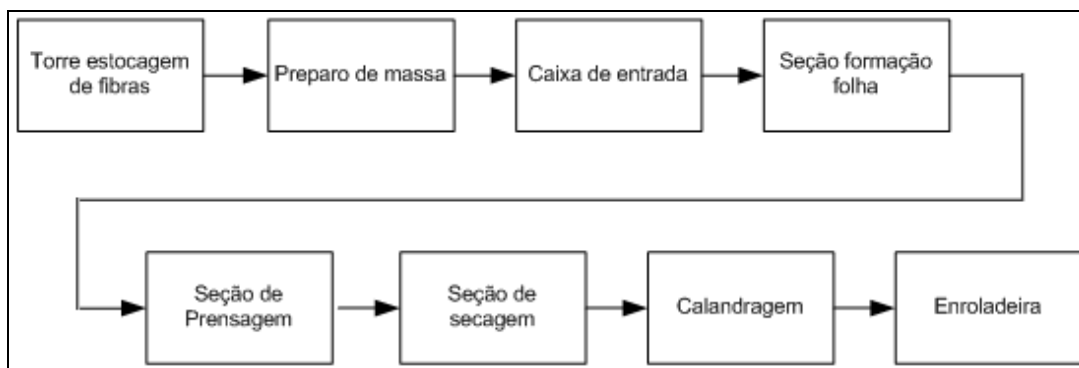


FIGURA 2 - ETAPAS BÁSICAS PROCESSO FABRICAÇÃO DE PAPEL.

No **preparo da massa**, as propriedades das fibras e suas ligações estão intimamente conectadas com a estrutura da malha fibrosa que elas formam. Assim as propriedades das fibras são importantes durante o processo de fabricação; pois afetam a estrutura do papel, e também são responsáveis pelas propriedades do papel pronto (JOHAN GULLICHSEN E HANNU PAULAPURO, 2000). O preparo de massa pode ser dividido em 3 etapas: Refinação, depuração e química da parte úmida.

- **Refinação:** É o tratamento mecânico, efetuado sobre a polpa de celulose, com o objetivo de mudar a estrutura da fibra, fazendo com que a polpa adquira determinadas características. O principal objetivo do refino é melhorar a ligação entre as fibras de forma que elas formem uma folha de papel mais macia e forte e com boas características de impressão e mecânicas (PAULAPURO, 2000).
- **Depuração:** Tratamento mecânico da polpa com o objetivo de retirar impurezas da massa fibrosa. Palitos provenientes de um mau cozimento, plásticos, areia, ou partículas metálicas, os quais podem comprometer a qualidade final do cartão. A boa performance da depuração é absolutamente necessária quando se produz papel com valor agregado. Um simples palito/rejeito na polpa pode causar problemas de qualidade ou de performance na máquina de papel (SUNDHOLM, 1999).
- **Química da parte úmida:** O objetivo da química da parte úmida é a de melhorar as propriedades do papel com o auxílio dos aditivos químicos. A proposta também pode ser a de facilitar a fabricação de papel ou melhorar a economia do processo através do uso de aditivos químicos. Existem papéis



que não levam em sua composição nenhum tipo de aditivo, todavia a maioria deles tem a presença de algum aditivo na sua composição final. Os aditivos químicos usados podem ser definidos como sendo de performance, substâncias que afetam as propriedades do papel ou de processo, substâncias que facilitam a operação do processo de fabricação.

A **caixa de entrada** é um equipamento utilizado para transformar o fluxo de suspensão de fibras vindo do *manifold* em uma fina camada que preencha toda a largura da máquina de papel. Ao realizar isso, a suspensão deve estar bastante homogênea e livre de faixas de consistência diferenciadas. Apesar da caixa de entrada não formar propriamente a folha, a boa formação das folhas de papel depende da distribuição de massa e nível de floculação (NISKANEN, 2000). A Figura 3 apresenta os elementos de uma caixa de entrada.

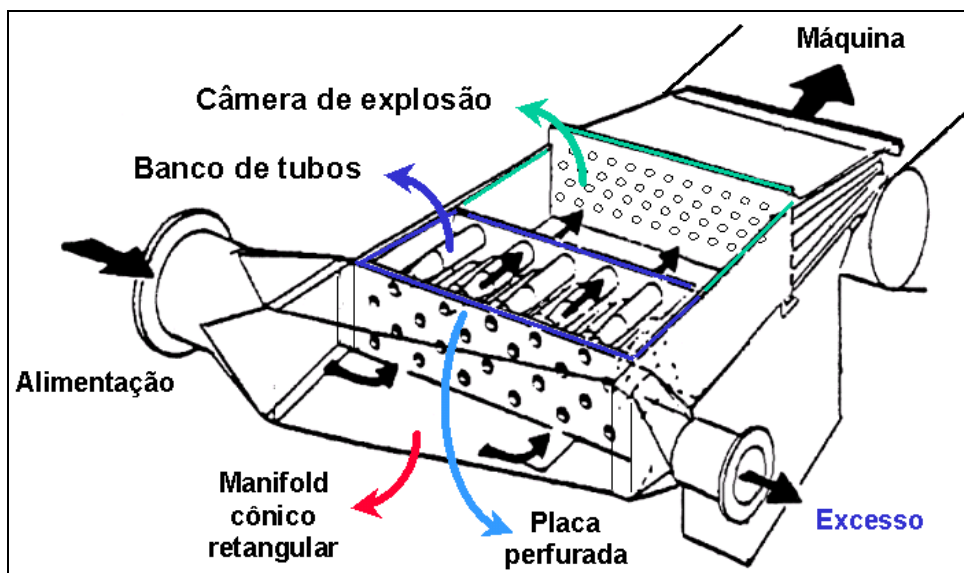


FIGURA 3 – ELEMENTOS DA CAIXA DE ENTRADA MÁQUINA DE PAPEL.

A **seção de formação** é a primeira etapa de desaguamento da máquina de papel. No fim da seção de formação, com um grau de teor seco de aproximadamente 20% a folha de papel é transferida da seção de formação para a seção das prensas, que é a etapa de desaguamento seguinte. A Figura 4 apresenta uma ilustração esquemática da seção de formação.

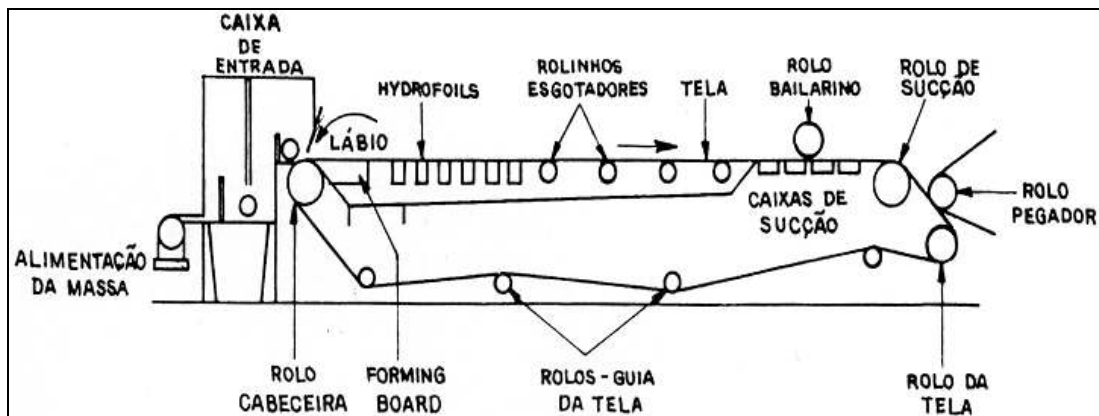


FIGURA 4 – ELEMENTOS DA SEÇÃO DE FORMAÇÃO FABRICAÇÃO PAPEL.

A **zona de prensagem** representa uma extensão da seção de formação, e a sua principal função é a de remover água, consolidar e aperfeiçoar as propriedades físicas da folha, bem como promover uma maior resistência a úmido para proporcionar um bom desempenho da folha na seção de secagem. A prensagem úmida está baseada na compressão mecânica da folha de papel, em contato com feltro entre dois rolos, combinada com a sucção de água pelo rolo inferior. A prensagem a úmido é um importante processo da fabricação de papel, afetando a qualidade e a economia do processo (PAULAPURO, 2000). A Figura 5 apresenta um esquema de uma prensa úmida.

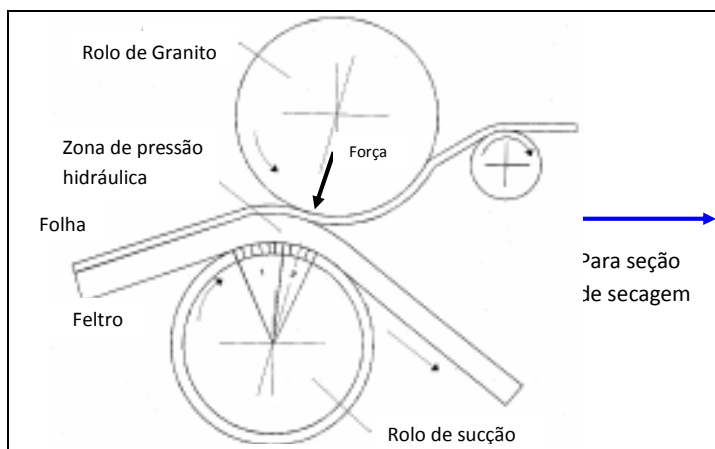


FIGURA 5 – ESQUEMA SIMPLIFICADO DE UMA PRENSA ÚMIDA.

FONTE: VOITH PAPER, 2001.

O processo de secagem térmica do papel é primordial para remoção de água da folha, não só pela sua importância na qualidade final do papel produzido, mas também por ser o principal consumidor de energia de todo o processo, ou seja, é o processo de remoção de água com maior custo. Para esta etapa existem diversas possibilidades, mas seções com cilindros múltiplos são indubitavelmente a técnica mais aplicada.

A **seção de calandragem** consiste de um processo mecânico, no qual ocorre basicamente a passagem da folha de papel entre dois rolos sob pressão. O papel é moldado pelo trabalho mecânico e plasticidade da folha. A ação da calandragem permite corrigir irregularidades na formação da folha, tornar a superfície mais plana ou alisar a folha, compactar e aumentar a densidade das fibras do papel, conforme pode ser observado na Figura 6.

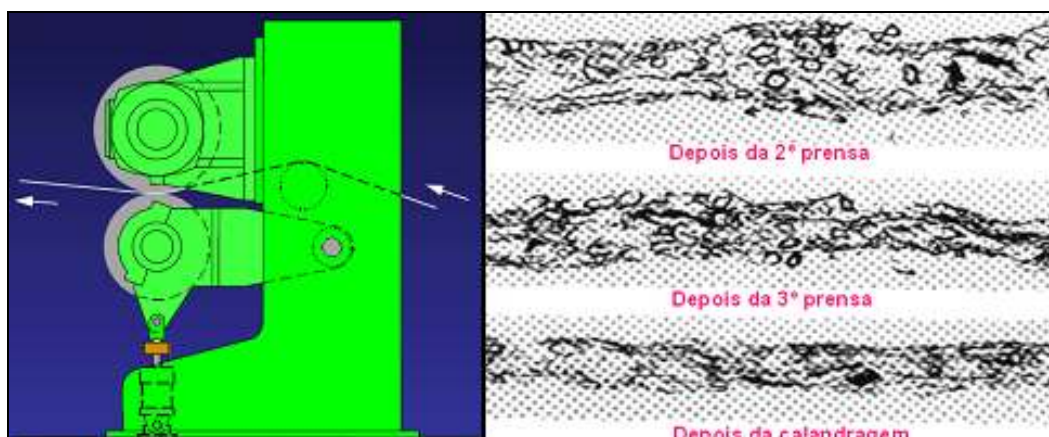


FIGURA 6 – CALANDRA E PERFIL DE ESPESSURA EM DIFERENTES PARTES PROCESSO.  
 FONTE: VOITH PAPER, 2001.

Na **seção de revestimento**, também denominada **Coating**, há o objetivo principal de se recobrir papéis e cartões cuja finalidade é melhorar as propriedades de impressão, permitindo que muitos produtos sejam expostos diretos em gôndolas (LEHTINEN, 1999). O revestimento geralmente é formado por uma fina camada de pigmentos, caulim ou carbonato de cálcio e um ligante (látex). Finalmente, o papel passa pela **rebobinadeira** para que possa ser adequadamente acondicionado para estocagem, transporte e distribuição, como apresenta na Figura 7.



FIGURA 07 – ENROLADEIRA E REBOBINADEIRA MÁQUINA PAPEL.

## 2.2 Importância do pH na fabricação do papel

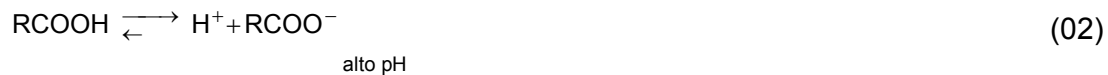
O pH é a mais simples, porém a mais importante variável de controle na fabricação de papel. Mudanças de pH afetam a adsorção iônica de cargas minerais, a mobilidade iônica, a interação cola/fibra, o comportamento dos compostos de alumínio, dos agentes de retenção e dos demais aditivos (SCOTT, 1940).

A estabilidade do pH é chave para um bom controle de adição de produtos químicos e estabilidade da drenagem da máquina de papel.

Em função do pH utilizado no processo são escolhidos os outros aditivos utilizados. Muitos destes aditivos trabalham em uma faixa muito estreita de pH tornando necessário o seu controle. Fabricadores de papel discutem processos trabalhando em sistemas neutros ou alcalinos. Esses termos se referem ao pH da massa na caixa de entrada (SCOTT, 1940).

O pH tem impacto direto na disponibilidade de sítios aniônicos presentes na fibra, uma vez que desloca a reação fibra – água. As ligações fibra/fibra e fibra/produtos químicos têm relação direta com a carga da superfície da fibra (sítios aniônicos).

Há sempre uma carga elétrica numa partícula dispersa devido a sua natureza química e interação com o meio. Por exemplo, fibras de celulose quando dispersas em água tornam-se negativamente carregadas devido à ionização dos grupos carboxílicos:



O pH da solução afeta a carga iônica da superfície da fibra, e a ligação entre fibras é diretamente relacionada a quantidade de cargas iônicas presentes. A ionização do grupo carboxílico da celulose afeta a carga eletrolítica da superfície da fibra.

As equações 2 e 3 mostram o efeito do pH na ionização do grupo carboxílico da fibra em função do pH do sistema. O aumento pH (eq.2) aumenta a quantidade de sítios aniônicos disponíveis. A redução pH (eq.3) produz o efeito contrário.

Enquanto moléculas de celulose dispersas em água têm caráter aniônico (negativamente carregadas), componentes catiônicos possuem carga positiva e promovem atração eletrostática com as fibras ou qualquer outro componente negativamente carregado. Assim, atrações e repulsões entre partículas regem a ação dos mecanismos de retenção e drenagem e tem dependência direta do meio empregado. Seguindo este princípio, aditivos para retenção e drenagem são substâncias carregadas eletricamente, de diferentes formas e tamanhos, e o mecanismo de ação destes aditivos químicos se fundamentam na agregação dos componentes presentes na massa através da floculação e/ou coagulação.

Outros impactos do controle de pH podem ser citados:

- Tem influência direta na drenagem da mesa plana;
- Tem influência na retenção de finos e carga da folha;
- Formação de depósitos químicos ou microbiológicos;
- Geração de espuma no processo;

O valor do pH se altera ao longo do processo de fabricação de papel, sendo alcalino na etapa de refino, condição ideal para obter uma boa fibrilação da celulose e menos corte de fibras (geração de finos). Ácido ou alcalino na caixa de entrada em função do sistema de colagem e da carga mineral utilizada. Por exemplo, a

colagem interna do papel utilizando cola de breu e alumínio é completada numa faixa de pH entre 4,2 e 5,5, mas o pH ideal para cola AKD deve estar entre 7,0 e 8,5, preferencialmente 8,0 (JINHUI, HONG, 1998).

## 2.3 Controle de processos

Existem diversas técnicas que podem ser usadas em controle de processos, e mais especificamente para o controle de processos petroquímicos. Conforme apresentada por SEBORG (1999), as principais técnicas podem ser agrupadas nas categorias que seguem, sendo que TODAS possuem aplicações na indústria petroquímica, de acordo com as referências citadas pelo autor. Como exemplos típicos podem ser citados o controle de temperatura e composição de reatores, o controle de composição de colunas de separação, entre outros.

Convém ressaltar que a escolha da técnica depende de diversos fatores, como a existência e complexidade de um modelo matemático, disponibilidade de equipamentos e dispositivos de instrumentação, precisão necessária, escolha adequada das variáveis controlada e manipulada, e também identificação de distúrbios.

### □ *CATEGORIA I: TÉCNICAS CONVENCIONAIS*

Esta abordagem é a mais aplicada no âmbito industrial, ela envolve controladores liga-desliga e controladores da família PID. São caracterizadas por sua simplicidade, facilidade de uso e por utilizar uma representação do processo sob a forma de um modelo linear. As maiores dificuldades ocorrem em processos com alto grau de não-linearidade ou em processos multivariáveis com elevado grau de acoplamento entre as variáveis (SEBORG, 1999).

### □ *CATEGORIA II: CONTROLE AVANÇADO – TÉCNICAS CLÁSSICAS*

Técnicas clássicas de controle avançado podem ser vistas com detalhes em SEBORG ET AL., 2003. As principais envolvem o uso de controladores com **ganho proporcional**, ou seja, dependendo do erro no valor da variável que se deseja controlar, usa-se um determinado valor para o ganho do controlador, fazendo com que o ganho seja constante. Em sistemas com tempo morto, o modelo do processo

é dividido em duas partes, sendo uma referente ao tempo morto e outra à dinâmica do sistema.

□ *CATEGORIA III: CONTROLE AVANÇADO – TÉCNICAS AMPLAMENTE USADAS*

Estratégias de controle em malha aberta podem fornecer trajetórias ótimas para temperatura e correntes de alimentação. Entretanto, a otimalidade destas trajetórias está intimamente associada à exatidão do modelo dinâmico, o que faz com que haja certa limitação quando distúrbios não medidos estão presentes. O **controle preditivo**, técnica utilizada apenas em malha fechada, visa corrigir estes erros, atualizando a trajetória a cada instante em que uma nova medida é obtida (CAMACHO E BORDONS, 1999). A filosofia da estratégia de controle estatístico consiste em monitorar a saída do processo constantemente, para que se possa decidir quando tomar ações de controle baseando-se em princípios estatísticos. Dessa forma, devido à presença de imperfeições de medidas, uma intervenção no processo só é feita quando o processo apresenta uma tendência estatisticamente significativa de desvio, e não apenas pelo fato de alguns pontos esparsos não estarem de acordo com os valores pré-especificados (OHSHIMA E TANIGAKI, 2000; SCHORK *et al.*, 1993). No **controle adaptativo**, há um contínuo ajuste dos parâmetros do controlador por meio de alguma técnica de estimação, para que este se adapte às novas condições do processo. As limitações estão no fato de ser difícil a identificação de muitos processos e também de esta técnica não apresentar bons resultados para sistemas com elevado grau de não-linearidade (EMBIRUÇU ET AL., 1996). O **controle por modelo interno** (IMC) apresenta o uso de um modelo perfeito do processo a ser controlado e as ações de controle são baseadas em um sinal formado pela diferença entre a medição da variável controlada e valor desta variável obtido pelo modelo perfeito (GARCIA E MORARI, 1982).

□ *CATEGORIA IV: CONTROLE AVANÇADO – TÉCNICAS COM POUCAS APLICAÇÕES INDUSTRIAIS*

O uso de controle ótimo (SARGENT, 2000) está associado à determinação de perfis ótimos para as variáveis manipuladas de forma a maximizar ou minimizar algum objetivo (HICKS ET AL., 1969) como, por exemplo, minimizar o tempo de batelada e/ou maximizar a conversão. As dificuldades em sua utilização são provenientes de limitações do sistema. Deve-se garantir que os perfis ótimos satisfaçam as restrições reais de operação de equipamentos de processo (SECCHI ET

AL., 1990). O desempenho desses sistemas está limitado pelo modelo, que deve ser o mais acurado possível. As estratégias de controle não-linear podem estar baseadas na representação do processo através de um modelo não-linear. Dentre as técnicas mais comuns estão o **controle preditivo não-linear** e o **controle globalmente linearizante**, baseado na linearização do sistema através de uma mudança de coordenadas determinada por técnicas de geometria diferencial (ISIDORI, 1995; KANTER ET AL., 2001). Demais técnicas que se enquadram nesta categoria são as de controle robusto (MORARI E ZAFIRIOU, 1989) e as técnicas baseadas no comportamento humano (CAMPOS E SAITO, 2004) tais como: **controladores com redes neuronais, lógica fuzzy e sistemas especialistas**.

### 2.3.1 – Estrutura de controle

O sistema de controle pode ser estruturado de três formas básicas, como apresentado pela Figura 8, Figura 9 e Figura 10. A Figura 8 apresenta a estrutura *feedback* baseada na retroalimentação. A principal característica é o fato de que primeiro ocorre o desvio entre *setpoint* e variável controlada para que depois seja tomada a ação de controle para eliminar esta diferença (SEBORG ET AL., 2003). Sua importância está no fato de que a variável controlada é sempre medida. A Figura 9 ilustra a estrutura utilizada pela técnica de controle por modelo interno (IMC), sendo claramente observado a presença do modelo interno perfeito do processo. Finalmente, a Figura 10 apresenta a estrutura *feedforward* baseada na antecipação. A principal característica é o fato de que há uma antecipação da ação de controle a partir de alterações na variável distúrbio. A variável controlada não é medida em estruturas *feedforward* puras e assim, deve ser sempre utilizada em conjunto com a estrutura *feedback*, como apresentado na Figura 10 (SEBORG ET AL., 2003).



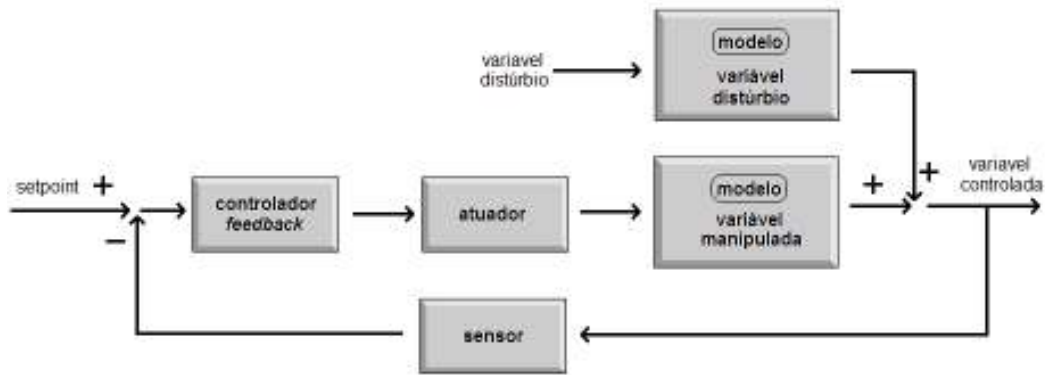


FIGURA 8 – ESTRUTURA DE CONTROLE FEEDBACK.

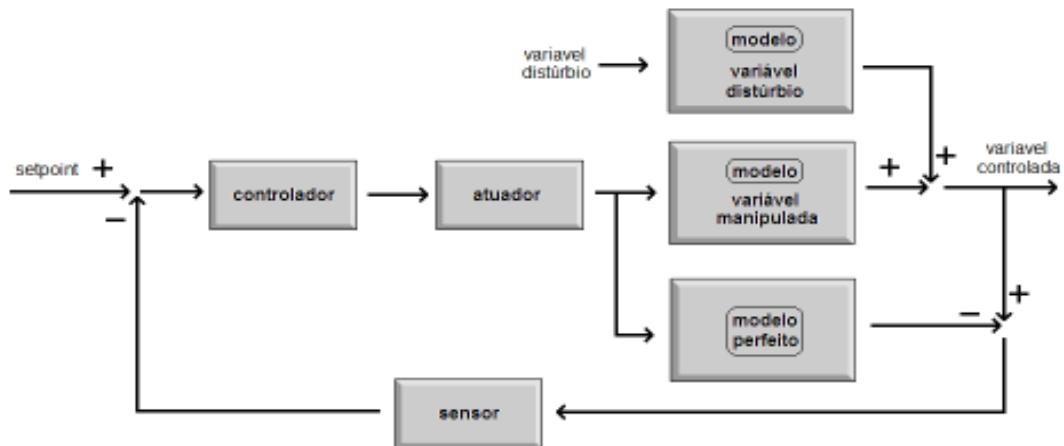


FIGURA 9 – ESTRUTURA FEEDBACK COM TÉCNICA CONTROLE MODELO INTERNO.

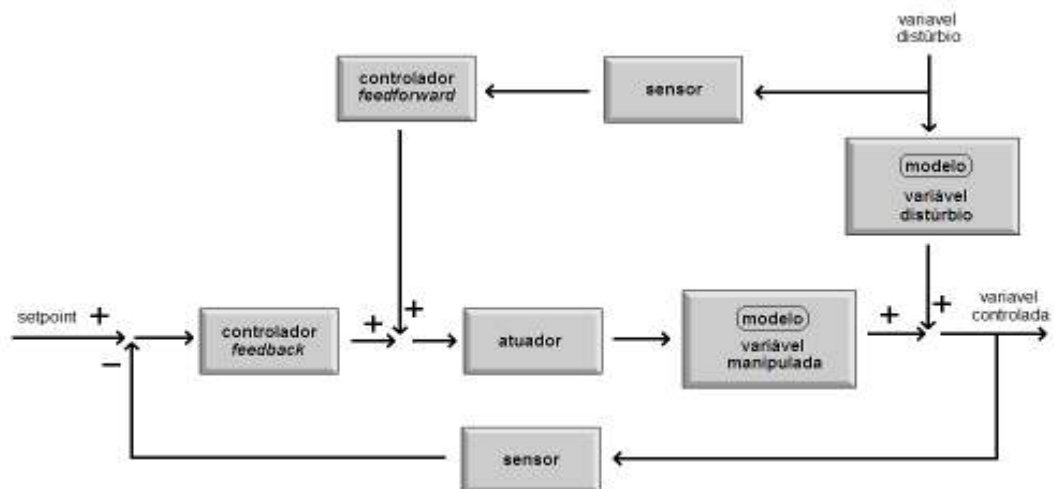


FIGURA 10 – ESTRUTURA CONTROLE FEEDBACK + FEEDFORWARD.

## 2.4 Controle de processos na indústria de papel

Na indústria de fabricação de papel, há a existência e aplicação de diversas malhas de controle, sendo que um considerável número refere-se à malhas para controle de variáveis não complexas, como controle de vazão, temperatura, pressão e nível (LEIVISKA, 2000). Algumas aplicações mais específicas relacionadas ao controle de propriedades do papel em tempo real também são apresentadas na literatura. No entanto, para este tipo de controle, surgem diversos aspectos que tendem a dificultar a implementação do controle automático em tempo real, tais como:

- 1) Não-linearidade dos processos;
- 2) Multivariabilidade;
- 3) Grau de acoplamento entre as variáveis;
- 4) Disponibilidade de instrumentação adequada;
- 5) Disponibilidade de modelos matemáticos confiáveis;
- 6) Conhecimento fenomenológico das operações envolvidas na fabricação.

Assim sendo, será apresentada uma revisão dos principais trabalhos disponíveis na literatura que abordam o controle de processos na fabricação de papel.

ASTROM (1967) reporta o primeiro trabalho sobre a aplicação de técnicas de controle de processos à fabricação de papel. O caráter inovador de seu trabalho foi devido à tentativa de utilizar um ferramental estocástico para o controle das propriedades de uma máquina de papel.

FJELD (1978) reportou um trabalho inovador para a época. Neste trabalho, o autor apresentou a aplicação de técnicas de controle de processos para uma máquina de produção de papel Kraft.

DHULSTER (1983) apresenta um dos primeiros trabalhos envolvendo a aplicação de técnicas de controle de processos à fabricação de papel. Mais especificamente, foi utilizado o controle de processos adaptativo para o controle de propriedades do papel na caixa de entrada da máquina de fabricação.

XIA ET AL. (1994) apresentam um estudo sobre a aplicação de controle adaptativo multivariável para a fabricação de papel. Foi alcançado o controle de umidade do papel e massa da bobina a partir da manipulação da vazão de polpa e da pressão do vapor. Os autores relatam ter mantido a consistência da polpa

constante por meio do ajuste da vazão de água de diluição. O sucesso do controle, segundo os autores, foi alcançado devido ao uso de técnicas adaptativas para o modelo matemático em função de sua natureza estocástica.

MASMOUDI (1999) reportou um dos primeiros trabalhos em controle de processos aplicado à indústria de papel, considerando o tempo morto. Esta variável é de fundamental importância nestes processos, além de ser necessário o seu tratamento e compensação para que o controle seja feito forma adequada.

CARLSSON ET AL. (2001) relatam excepcionais resultados referentes ao monitoramento de processos na fabricação de papel e celulose. Os autores reportam o uso de um dispositivo denominado *língua eletrônica* cuja finalidade é a medição de características da química úmida do papel. pH, condutividade, demanda catiônica, potencial zeta e turbidimetria da polpa alimentada à máquina foram passíveis de monitoramento para futuro controle de processos.

KABORE E WANG (2001) apresentam o controle de pH e consistência de uma máquina de produção de papel em escala piloto. O estudo é de caráter teórico, mas os autores reportam resultados de simulação promissores no sentido de reduzir a variabilidade das propriedades. Além disso, ressalta-se o fato de ser utilizada uma abordagem não-linear para o controle.

LAITINEN-VELLONEN (2003) reporta uma forma alternativa para o controle do estado químico da polpa, mais especificamente controle da demanda iônica. É interessante ressaltar que a proposta não influencia o pH, fazendo com que a consistência não se altere.

SANTOS (2003) reporta a avaliação de um laço de controle de temperatura (linha de vapor de média pressão), e dois laços de controle de pressão (vapor para cilindros secadores) da secaria de papel MP7 da Klabin. A análise dos gráficos de resposta frequencial em laço fechado permitiu avaliar a existência de potenciais de melhoria utilizando o controlador de variância mínima como referência.

PESCH (2005) avalia a estrutura de controle de umidade na fabricação de papel Klabin MP7 permitindo incorporar perturbações provenientes da parte úmida da máquina e com isso reduziu a variabilidade da umidade ao final do processo.

BOISDON ET AL. (2007) relatam uma forma alternativa para o controle do pH da polpa de celulose usando a injeção de CO<sub>2</sub>.

LOPES ET AL. (2008) apresentam alguns casos de sucesso da aplicação de controle multivariável na indústria de celulose. Mais especificamente, os autores

abordam o controle preditivo e sua utilização na produção de celulose, ou seja, uma etapa anterior à fabricação do papel propriamente dito.

ANDRADE ET AL. (2009) reportam a implementação de controle avançado e otimização no processo de caustificação da Klabin Monte Alegre. Foi utilizada a técnica de controle multivariado preditivo e adaptativo. Os autores reportam a redução de mais de 50% no nível de variabilidade do processo.

LIE (2009) reporta um estudo de fundamental importância para o controle de processos, focando o estudo das incertezas do modelo. Neste trabalho, de caráter teórico, é analisada a influência da incerteza paramétrica sobre o desempenho da malha de controle, sendo feitas análises em relação ao desempenho da variável controlada, velocidade da malha e outros.

SASAKI ET AL. (2010) reportam um trabalho inovador em termos de controle de processos aplicado à fabricação de papel. Os autores apresentam um sistema de medição e controle focado para o ângulo de orientação entre as fibras durante a formação da folha, sendo que esta propriedade influencia muito as propriedades do papel. A variável manipulada é a vazão de alimentação de polpa, mais especificamente a sua posição relativa.

## 2.5 Identificação de processos na indústria de papel

Para o controle de processos adequado, **um modelo matemático representativo** deve ser utilizado. O modelo pode ser baseado em princípios fundamentais ou obtido a partir de técnicas de identificação de processos. NELLES (2001) apresenta uma revisão sobre diversas técnicas que podem ser utilizadas. No entanto, uma das principais dificuldades é a execução de testes em malha aberta, de forma a se obter o comportamento da variável controlada frente a perturbações da variável manipulada (LJUNG, 2010). Uma alternativa que pode ser utilizada com sucesso para a identificação de processos é a análise em malha fechada (FORSSELL E LJUNG, 1999). Assim, surge a dificuldade de eliminar dos resultados o comportamento dinâmico do controlador para que seja possível obter uma função de transferência realista das variáveis controlada e manipulada (MISKOVIC ET AL., 2008).

## 2.6 Análise da revisão bibliográfica

Num setor onde as capacidades instaladas estão no limite, elevados custos de mão de obra e de equipamentos. A redução de custos e ganhos em qualidade e produção através do controle de processo e controle automático parece ser um caminho inevitável.

Apesar de todos os avanços na área de controle dos últimos anos, o controlador PID ainda é o controlador mais utilizado no controle de processos industriais. Agrega a mais simples e eficiente solução em muitos problemas de controle presentes na indústria (ASTROM E HAGGULUND 2000).

A partir da revisão bibliográfica foram identificadas algumas lacunas a serem preenchidas. Mais especificamente, não foram encontrados trabalhos reportando a aplicação de técnicas de controle para o pH durante a fabricação do papel envolvendo aplicação em máquinas em escala industrial. Além disso, não foram encontrados trabalhos referentes à identificação de processos em malha fechada com aplicação à produção de papel.

Foi escolhida para o trabalho a malha de controle de pH por sua importância em relação a estabilidade do processo e manutenção dos níveis de qualidade, dentre os quais destacam-se a colagem, propriedade fundamental na produção de cartão para embalagem de alimentos líquidos. Vale salientar que apesar da malha escolhida ser a de controle de pH, os conceitos são válidos para outras malhas de controle instaladas nesta máquina.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção serão descritos os materiais e a metodologia utilizada para o desenvolvimento deste trabalho.

#### 3.1 Materiais

O pH é medido por uma sonda (Mettler Toledo, modelo M700 (X)), cuja resolução é de 0,02 unidade de pH e cuja faixa de leitura é 3 - 8 unidades de pH.

Os dados de pH foram adquiridos a cada 5 segundos e armazenados pelo software PI – System (Osi Software). Para coleta dos dados a compressão do software PI foi desabilitada, ou seja, os dados são valores que realmente foram medidos no processo sem nenhum tratamento estatístico.

O controle de pH é realizado pela dosagem de sulfato de alumínio a 12% na calha de água branca da máquina de papel.

A aquisição dos dados experimentais foi feita na caixa de entrada da camada cobertura máquina de papel 9 da Klabin Papéis de Monte Alegre. A MP9 tem três caixas de entrada para produção de cartão, sendo a camada cobertura composta de um mix de fibra curta e longa branqueada, a camada meio um mix de celulose kraft de fibra longa, curta e polpa CTMP e a camada base é composta de fibra Kraft de fibra longa.

A figura abaixo é um fluxograma simplificado de como é o controle de pH.

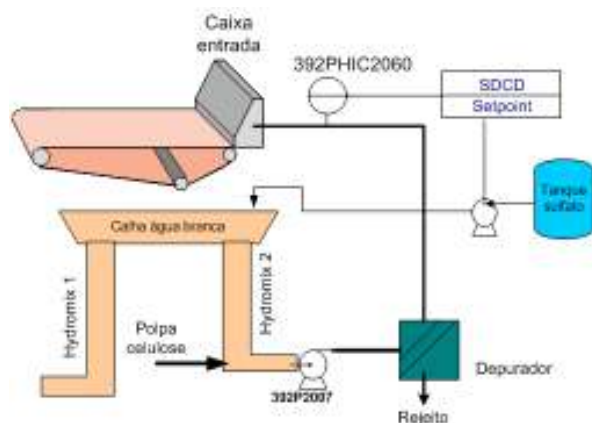


FIGURA 11 – FLUXOGRAMA DO CONTROLE DE pH.

### 3.2 Metodologia

Devido à dificuldade de modelagem do processo, foi utilizada a abordagem de identificação de processos em malha fechada. Desta forma, foi feita uma transição do setpoint de pH, via estímulo degrau, e a aquisição de dados foi feita com o **sistema em controle automático**. Por questões de segurança e operação do processo, a transição positiva de *setpoint*, ou seja, o aumento foi considerado sob a forma de uma sequência de degraus (staircase). Aumento de pH muito brusco pode provocar dificuldade de drenagem na mesa formadora e em consequência rompimento da folha nas prensas da máquina de papel. Por outro lado, a redução foi feita considerando um degrau único pois é menor o risco de rompimento da folha já que o papel chega mais seco nas prensas nesta condição.

O set point de pH foi elevado de 6,2 para 6,8, ou seja um degrau de 0,60 unidades.

Observou-se um intervalo de 145 minutos para a manutenção do *setpoint* no valor 6,8 para que pudesse ser considerado que o processo estava operando em estado estacionário. Antes de serem utilizados, os dados obtidos do processo foram transformados em variável desvio em relação ao ponto médio obtido durante o período em estado estacionário antes da adição do degrau no *setpoint* do sistema.

O controle de pH instalado é feito com base em uma técnica tipo Proporcional-Integral, cuja função de transferência é dada pela Equação (04). Esta função de transferência é especificada no próprio controlador (ABB, 2000), sendo que  $k_C$  é a constante Proporcional e  $\tau_i$  é a constante Integral.

$$G_C(s) = k_C \left( 1 + \frac{1}{\tau_i s} \right) \quad (04)$$

Durante o teste de identificação, o valor de  $k_C$  usado foi de **0,50** e valor de  $\tau_i$  foi de **40**.

### 3.2.1 Identificação em malha fechada

A Figura 8 descreve um laço típico de um sistema de controle *feedback*. Considerando  $G_c$  a função de transferência do controlador;  $G_d$  a função de transferência do processo frente ao distúrbio;  $G_p$  a função de transferência do processo frente ao *setpoint*;  $G_m$  a função de transferência do sensor;  $G_v$  a função de transferência do atuador; SP a mudança de *setpoint*; D um distúrbio, resulta a seguinte função de transferência para a malha fechada:

$$Y = \frac{G_d}{1 + G_c \cdot G_v \cdot G_p \cdot G_m} \cdot D + \frac{G_c \cdot G_v \cdot G_p}{1 + G_c \cdot G_v \cdot G_p \cdot G_m} \cdot SP \quad (05)$$

Neste trabalho, será inicialmente considerado que  $G_v = G_m = 1$ , ou seja, os sensores possuem dinâmica desprezível. Além disso, a função de transferência do controlador é dada pela Eq. (04). Finalmente, será considerado que a função de transferência do processo ( $G_p$ ) é de primeira ordem sem tempo morto, portanto, descrito pela seguinte expressão:

$$G_p = \frac{k_p}{\tau \cdot s + 1} \quad (06)$$

Desta forma, substituindo as respectivas funções de transferência, resulta a seguinte expressão para a função de transferência da malha de controle fechada para mudanças de *setpoint*.

$$G_{CL-SP} = \frac{k_c \cdot k_p \cdot (s + k_i)}{\tau \cdot s^2 + (1 + k_c \cdot k_p) \cdot s + k_c \cdot k_p \cdot k_i} \quad (07)$$

Portanto, a resposta de um **sistema de controle, em laço fechado**, com controle PI, ante uma mudança em SP apresenta um comportamento de 2ª ordem mesmo se o modelo do processo,  $G_p$ , for de 1ª ordem sem tempo morto. O que pode ser observado a partir da Figura 14. A presença do caráter oscilatório, o qual pode ou não ser amortecido, decorre da natureza de 2ª. ordem do sistema, mais



especificamente do posicionamento dos pólos (raízes do denominador da função de transferência). Dependendo da natureza deles, números reais ou imaginários, parte real positiva ou negativa, estes podem levar a um sistema estável ou instável. Desta forma, define-se o fator de amortecimento ( $\xi$ ) dado pela expressão a seguir para facilitar o estudo do comportamento dinâmico do sistema.

$$\xi = \frac{(1+k_p \cdot k_c)}{\sqrt{2 \cdot k_p \cdot k_c \cdot k_i \cdot (\tau + k_p \cdot k_c \cdot k_d)}} \left\{ \begin{array}{l} < 1 \text{ dois polos distintos e reais} \\ = 1 \text{ polos iguais} \\ > 1 \text{ dois polos complexos e conjugados} \end{array} \right\} \quad (08)$$

A adição de tempo morto,  $e^{-t_m \cdot s}$ , à função de transferência do processo não permite escrever a mesma função de transferência na forma polinomial racional, uma vez que esta fica dada por:

$$G_P = \frac{k_p \cdot e^{-t_m \cdot s}}{\tau \cdot s + 1} \quad (09)$$

Todavia se à exponencial do tempo morto for aplicada a transformação de Padé, por exemplo, na sua forma mais simples, Padé<sub>1,1</sub>, será produzido um denominador com ordem superior a dois, onde certamente teremos dois pólos conjugados, os quais podem invadir a região complexa dependendo dos valores de sintonia do controlador:

$$\text{Pade}_{1,1} = \frac{2 - t_m \cdot s}{2 + t_m \cdot s} \quad (10)$$

Aplicação do tempo morto na forma na forma Padé na função de transferência do processo,  $G_p$ , leva à seguinte expressão para a malha de controle fechada:

$$G_{P1-CL-SP} = \frac{k_c \cdot k_p \cdot (s + ki) \cdot (-2 + t_m \cdot s)}{s^3 \cdot t_m \cdot \tau + (2 \cdot \tau - k_c \cdot k_p \cdot t_m + t_m) \cdot s^2 + (2 \cdot k_c \cdot k_p + 2 - k_c \cdot k_p \cdot ki \cdot t_m) s + 2k_c \cdot k_p \cdot ki} \quad (11)$$

É importante observar que a resposta neste caso toma a forma de uma **resposta de processo com ordem superior a dois, neste caso, de ordem 3**. Assim, é razoável tentar aproximar a resposta em laço fechado por um modelo típico de 2ª ordem com tempo morto:

$$G_2 = \frac{k_p \cdot e^{-t_m \cdot s}}{\tau \cdot s^2 + 2 \cdot \xi \cdot \tau \cdot s + 1} \quad (12)$$

Descrevendo o tempo morto nesta função de transferência aproximada Eq. (09) pela transformação de Padé  $_{1,1}$ , obtém-se:

$$G_{P2-OL} = \frac{k_p \cdot (2 - t_m \cdot s)}{s^3 \cdot t_m \cdot \tau^2 + 2 \cdot \tau \cdot (\tau + t_m \cdot \xi) \cdot s^2 + (4 \cdot \xi \cdot \tau + t_m) \cdot s + 2} \quad (13)$$

Analisando a Eq. 13, observa-se que, pela escolha apropriada dos parâmetros  $[t_m, \xi, \tau]$ , é possível obter um polinômio com comportamento correspondente ao do sistema em laço fechado. Esta característica, do denominador, se mantém para transformações de Padé de ordem superior. A determinação experimental dos parâmetros  $[t_m, \xi, k_p, \tau]$  pode ser feita no domínio tempo. Douglas (1972) recomenda no caso do modelo Eq. (14) inferir  $t_m$  diretamente na resposta.

$$\tau^2 \cdot \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + 2 \cdot \xi \cdot \tau \cdot \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = k_p \cdot v \cdot (t - t_m) \quad (14)$$

Inferindo-se  $t_m$  diretamente da resposta é possível calcular o fator de amortecimento,  $\xi$ , a partir do overshoot, conforme a expressão a seguir:

$$\xi = \sqrt{\frac{\rho^2}{1 + \rho^2}}; \quad \rho_{\text{overshoot}} = e^{-\frac{\pi \cdot \xi}{\sqrt{1 - \xi^2}}}; \quad \rho = \frac{1}{2\pi} \cdot \ln \left[ \frac{C_{p2} - C_{ss}}{C_{p1} - C_{ss}} \right] \quad (15)$$

A constante de tempo a partir do período da oscilação da resposta é dada pelas expressões:

$$T_{\text{oscilação}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \tau}{\sqrt{1 - \xi^2}}; \quad \tau = (tp2 - tp1) \cdot \frac{\sqrt{1 - \xi^2}}{2 \cdot \pi} \quad (16)$$

O ganho estático a partir do valor de equilíbrio da resposta é dado por:

$$k_p = \frac{C_{ss}}{A}, \quad \text{onde } A \text{ é amplitude do degrau aplicado ao } \textit{setpoint} \quad (17)$$

Finalmente, tem-se que o tempo morto pode ser calculado pela expressão:

$$d = \frac{Sc}{C_{ss}} - 2.\xi.\tau, \quad \text{onde} \quad Sc = \int_0^{\infty} [C_{ss} - C(t)] dt \quad (18)$$

A figura abaixo representa a resposta típica de uma excitação degrau de um controlador PI em laço fechado, bem como os parâmetros utilizados para a modelagem do comportamento dinâmico.

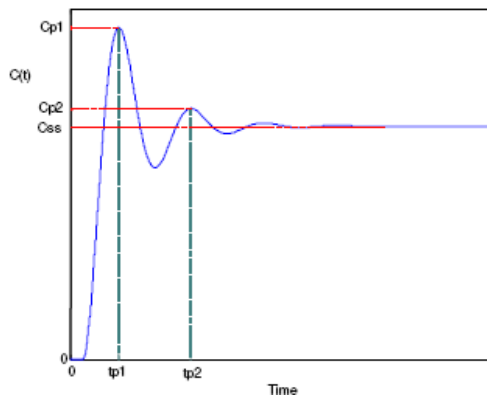


FIGURA 12 – RESPOSTA TÍPICA CONTROLADOR PI EM LAÇO FECHADO.

Os parâmetros para o modelo de primeira ordem são calculados utilizando o diagrama de bode calculando o limite de estabilidade do processo quando a fase é -180. As equações utilizadas para este fim são dadas por:

$$k_p = \frac{T_i}{K_c.Sc} . C_{ss} \quad (19)$$

$$d_p = \frac{1}{\omega_c} \left[ \tan^{-1}(\omega_c T_i) + \tan^{-1}\left(\frac{1}{\tau \omega_c}\right) \right] \quad (20)$$

$$\tau_p = \frac{\sqrt{(1+M)^2 (K_c K_p)^2 (1+T_i^2 \omega_c^2) - M^2 T_i^2 \omega_c^2}}{M \omega_c^2 T_i} . C_{ss} \quad (21)$$

Quando a resposta está contaminada com ruído de medida a técnica acima pode produzir resultados ruins. Para este caso Douglas (1972) recomenda o uso do

**método dos momentos**, que por se basear numa formulação matematicamente fraca, é menos suscetível ao ruído. Se o modelo aproximado,  $G_{OL}$ , para o comportamento em laço fechado for:

$$\tau^2 \cdot \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + 2 \cdot \xi \cdot \tau \cdot \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = k_p \cdot v \cdot (t - t_m) \quad (22)$$

A solução para uma excitação do tipo degrau para  $\xi < 1$  é:

$$y(t - t_m) = A \cdot k_p \cdot \left( 1 - \frac{e^{-\frac{\xi(t-t_m)}{\tau}}}{\sqrt{1-\xi^2}} \sin\left(\frac{(t-t_m) \cdot \sqrt{1-\xi^2}}{\tau} + \varphi\right) \right) \cdot s(t - t_m) \quad (23)$$

$$\tan(\varphi) = \frac{\sqrt{1-\xi^2}}{\xi}; \quad y_\infty = A \cdot k_p; \quad S = (t - t_m) = \begin{cases} 0 & t < t_m \\ 1 & t \geq t_m \end{cases}$$

Os momentos de ordem zero, um e dois são dados, respectivamente por:

$$\mu_0 = \int_0^\infty (y_\infty - y(t - t_m)) dt \quad (24)$$

$$\mu_1 = \int_0^\infty t \cdot (y_\infty - y(t - t_m)) dt \quad (25)$$

$$\mu_2 = \int_0^\infty t^2 \cdot (y_\infty - y(t - t_m)) dt \quad (26)$$

Estes momentos podem ser facilmente medidos, e também calculados com base nos valores do processo, sendo dados por:

$$\mu_0 = -(t_m + 2 \cdot \xi \cdot \tau) \cdot y_\infty \quad (27)$$

$$\mu_1 = \frac{-y_\infty}{2} \cdot (4 \cdot \tau \cdot \xi \cdot t_m + 8 \cdot \tau^2 \cdot \xi^2 - 2 \cdot \tau^2 + t_m^2) \quad (28)$$

$$\mu_2 = \frac{-y_\infty}{3} \cdot (24 \cdot \tau^2 \cdot t_m \cdot \xi^2 + 48 \cdot \tau^3 \cdot \xi^3 - 24 \cdot \xi \cdot \tau^3 + 6 \cdot \tau \cdot \xi \cdot t_m^2 - 6 \cdot \tau^2 \cdot t_m + t_m^3) \quad (29)$$

Resolvendo este sistema de equações podem ser calculados os parâmetros  $[t_m, \xi, \tau]$ . O ganho estático foi calculado diretamente do processo.

Comparativamente o mesmo modelo obtido pelo método dos momentos foi ajustado aos dados medidos, **para uma excitação tipo degrau**, utilizando a técnica dos mínimos quadrados dos resíduos utilizando o método de Nelder & Mead, os parâmetros  $[t_m, \xi, \tau]$  podem ser também estimados. Na operação real do processo, como já mencionado, devido à por segurança operacional não foi possível alterar o *setpoint* na forma de um degrau, mas sim na forma de uma sucessão de pequenos degraus. Foi também realizado um ajuste do modelo pelo método de Nelder & Mead utilizando como **excitação o comportamento real do Set Point**, os parâmetros também foram estimados.

### 3.2.2 Identificação em malha aberta

Os testes acima foram realizados com o laço fechado e controle PI ativado. O comportamento do laço aberto pode ser estimado considerando que o processo tenha um comportamento intrínseco de 2<sup>a</sup>. ordem, logo:

$$Y = \frac{G_c \cdot G_v \cdot G_p}{1 + G_c \cdot G_v \cdot G_p \cdot G_m} \cdot SP \quad (30)$$

$$\frac{G_c \cdot G_v \cdot G_p}{1 + G_c \cdot G_v \cdot G_p \cdot G_m} \cong G_{P2} = \frac{k_p \cdot e^{-t_m \cdot s}}{\tau^2 \cdot s^2 + 2 \cdot \xi \cdot \tau \cdot s + 1} \quad (31)$$

Conhecida a função de transferência do controlador e os parâmetros  $k_c$  e  $\tau_i$ , é possível calcular a função de transferência do processo. Esta, uma vez parametrizada, permite o cálculo dos parâmetros do modelo. A estratégia está fundamentada em DOUGLAS (1972) e teve aplicações com sucesso reportadas por MAMAT & FLEMING (1995) e KEALY & ODWYER, (2002). Finalmente, pode-se

admitir uma função de transferência de primeira ordem com tempo morto para o comportamento do processo.

Alternativamente foram feitos ajustes diretamente no domínio tempo utilizando o método de Nelder & Mead para estimar os parâmetros, assumindo também que o controlador tem comportamento ideal e o processo, em laço aberto, é de primeira ordem com tempo morto. Os resultados podem ser visualizados na Tabela 2.

$$G_p^{(P1)} = \frac{k_p \cdot e^{-t_m(P1) \cdot s}}{\tau^{P1} \cdot s + 1} \quad (32)$$

O software Berkeley Madonna 8.0 (2010) foi uma das ferramentas utilizadas para fazer o tratamento dos dados.

### 3.2.3 Sintonia do controlador

A qualidade das malhas de controle e em consequência do processo controlado está diretamente ligada à correta sintonia dos ganhos do controlador PID (ANG, CHONG, 2005).

Existem diversos métodos na literatura para avaliar a qualidade da sintonia de controladores, a abordagem nesse trabalho é, por meio da modelagem do processo mostrar o potencial de melhoria na malha instalada no controle de pH através dos métodos ISE e variância mínima.

No meio industrial não existe uma cultura de estabelecimento de padrões para obtenção da melhor sintonia de controladores, geralmente o trabalho é realizado através de empirismo, o qual consiste em variar os ganhos do controlador e avaliar o impacto na variável de saída. Pela possibilidade de causar instabilidade no processo com conseqüente perda de qualidade ou produção dificilmente se trabalha na sintonia ótima do controlador.

Estatísticas apontam que, em média o tempo de meia vida da performance de laços de controle é da ordem de 6 meses (BIALKOWSKI, 1993). Como consequência direta dessa tendência, observa-se elevação nos custos de produção, redução nos níveis de produtividade de máquina e equipamentos, e comprometimento dos parâmetros de qualidade dos produtos.

Portanto, o desempenho de laços de controle exige um acompanhamento contínuo por parte dos engenheiros de controle de processos, devido ao ciclo de variabilidade do processo, o qual tem origem na flutuação nas características de matérias primas, do desgaste de válvulas, de novos pontos de operação do processo entre outros fatores.

Com o estabelecimento do modelo do processo, por meio de softwares dedicados pode-se, encontrar os parâmetros de sintonia adequados por meio da simulação dos parâmetros. O valor numérico das constantes ( $k_c, \tau_i, \tau_d$ ), deverá ser determinado de maneira que o controlador tenha um bom desempenho e não introduza instabilidades no processo. A utilização de modelos evita realização de variações diretas no processo (método empírico), causando perdas de produção ou qualidade.

Para avaliação da sintonia é necessário o estabelecimento de critérios de avaliação de desempenho do controlador. Basicamente esses métodos consistem em pesquisar valores de  $k_c, \tau_i$  que minimizem o erro de desempenho, ou seja:

- Conseguir variabilidade mínima em operação normal;
- Mínimo (ou nenhum) “Overshoot” para mudanças de “set-point”;
- Atingir rapidamente o novo “set-point” em caso de mudança;
- Operação estável do controlador mesmo para alterações significativas nos parâmetros do processo (robustez)

Na figura abaixo podem ser verificados alguns critérios simples de avaliação:

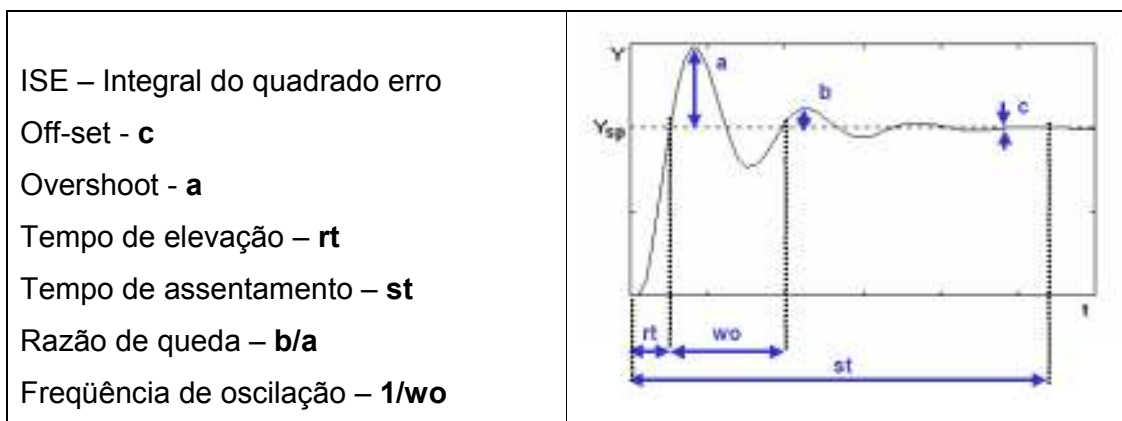


FIGURA 13 – CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO DE SINTONIA.

**ISE - Integral do Quadrado do Erro:** O índice ISE junto com outros dois índices, Integral do valor absoluto do erro (IAE), e integral do valor absoluto do erro ponderado no tempo (ITAE), constitui métricas de desempenho clássicas, e que consideram a resposta global do laço fechado. Eles foram criados como alternativas aos métodos heurísticos, os quais trabalham com decaimento dos picos na razão de  $\frac{1}{4}$ . Esses métodos tinham o inconveniente de respostas oscilatórias. Os índices ISE, IAE e ITAE são apresentados por SEBORG ET AL. (2003).

**Variância mínima:** HARRIS (1989) apresenta o uso do controle de variância mínima como melhor prática na avaliação de desempenho de malhas de controle.

Desta forma, a partir do modelo identificado para o processo em malha fechada, utilizando os parâmetros de qualidade descritos acima foi revista a sintonia do controlador de forma a obter os melhores valores para  $K_c$  e  $\tau_i$ .



## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção serão apresentados os resultados referentes ao estudo de identificação e sintonia do controle de pH da máquina de papel 9 da KLABIN Papéis.

### 4.1 Resultados teste excitação em degrau máquina papel.

A figura 14 apresenta os valores obtidos da máquina de papel 9. A excitação degrau realizada foi de 0,6 unidades de pH. Observa-se, ainda um comportamento de oscilação amortecida, típico de processos de segunda ordem, o que pode ser considerado natural, considerando que a identificação foi feita em malha fechada.

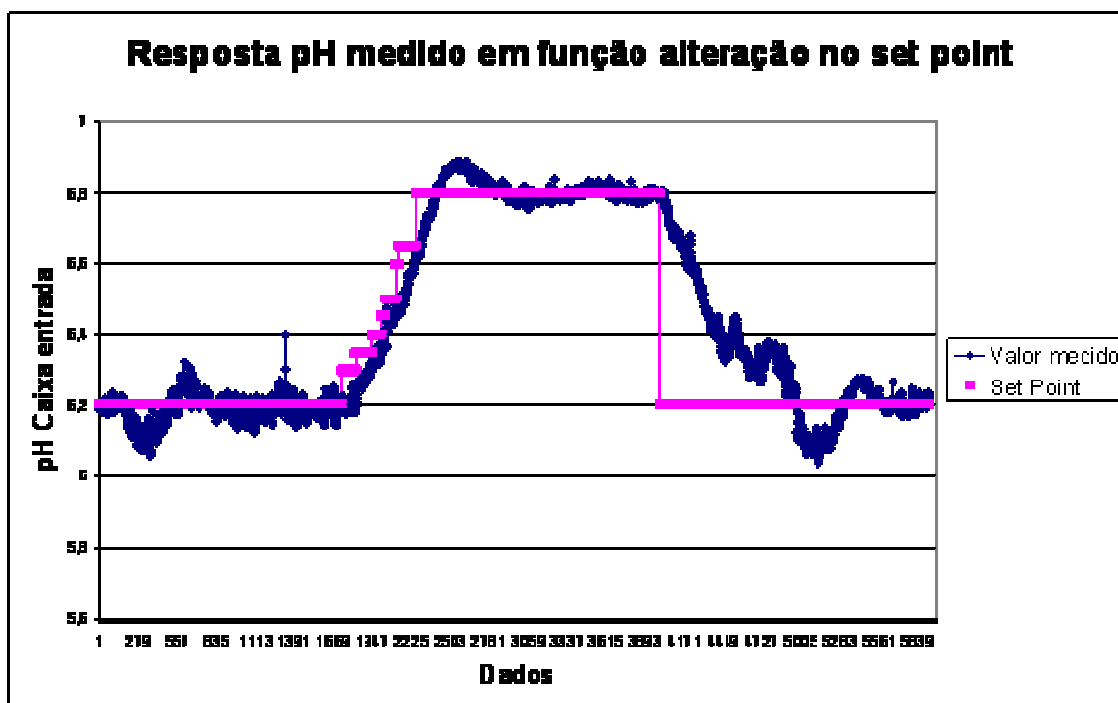


FIGURA 14 – COLETA DE DADOS NO PROCESSO.

### 4.2 Estudos de Identificação – malha fechada.

Como mencionado anteriormente, a identificação do processo foi feita a partir de testes em malha fechada. Assim, para que fosse obtido um modelo para o comportamento dinâmico do processo, os estudos de identificação foram feitos utilizando quatro abordagens distintas, apresentadas no capítulo anterior.

A Tabela 1 apresenta um resumo dos resultados obtidos na identificação do processo. Para as quatro abordagens utilizadas, foi feita a identificação de duas formas, na primeira foi considerada a mudança do setpoint como de fato ocorreu, ou seja, a partir de uma sequência de degraus (*staircase*). Na segunda abordagem, esta sequência de degraus foi idealizada e representada como sendo um degrau único. Além disso, o desempenho dos modelos identificados foi avaliado pelo critério ISE.

A figura 15 e 16 apresenta a comparação entre os dados reais do processo e o modelo identificado pelo método de Kealy & Dwyer considerando o *setpoint* real e o *setpoint* idealizado, respectivamente. A figura 17 e 18 apresenta a comparação entre os dados reais do processo e o modelo identificado pelo método dos momentos considerando o *setpoint* real e o *setpoint* idealizado, respectivamente. A figura 19 e 20 apresenta a comparação entre os dados reais da planta e o modelo identificado pelo método de Nelder & Mead considerando o *setpoint* real e o *setpoint* idealizado, respectivamente. Finalmente, a figura 21 e 22 apresenta a comparação entre os dados reais do processo e o modelo identificado pelo método de Nelder & Mead utilizando mínimos quadrados, considerando o *setpoint* real e o *setpoint* idealizado, respectivamente.

TABELA 1 – SÍNTESE DOS RESULTADOS OBTIDOS MALHA FECHADA

	Kealy & Dwyer	Momentos	Step Nelder & Mead	Staircase Nelder & Mead
	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
<b>Parâmetros da malha fechada</b>				
$K_p$	1.0211	1.0200	1.00661	1.02366
$\xi$	0.2837	0.720304	0.604385	0.344203
$\tau$	801.2336	1037.5890	1094.78	575.127
$t_m$	1441.0913	357.02270	485.465	1.0E-05
$\omega_c$	0.0011952	0.0020281	0.00161880	$\approx 1 \ddagger$
$ M_c $	0.5327	0.187907	0.24309561	3.0E-06
$\phi$	-180.00	-180.00	-180.00	-179.93
<b>Parâmetros do processo</b>				
$K_p^{(P)}$	2.6375E-05	2.63754E-05	2.63754E-05	2.63754E-05
$t_m^{(P)}$	675.2560	218.7620	317.3750	0.025 $\ddagger$
$\tau^{(P)}$	654.9113	643.5827	823.4013	170.6 $\ddagger$
<i>ISE step</i>	36.0932	31.0505	27.9333	75.2712
<i>ISE staircase</i>	358.209	263.727	308.024	201.827
Observações	ISE – step: integral do quadrado do erro entre o modelo e o valor medido experimentalmente quando a perturbação é idealizada como um pulso retangular	ISE – staircase: integral do quadrado do erro entre o modelo e o valor medido experimentalmente quando a perturbação é efetivamente implantada		$\ddagger$ calculados no mesmo valor de $\omega_c$ , e, face ao comportamento assintótico da fase não ocorrem mudanças significativas nos parâmetros

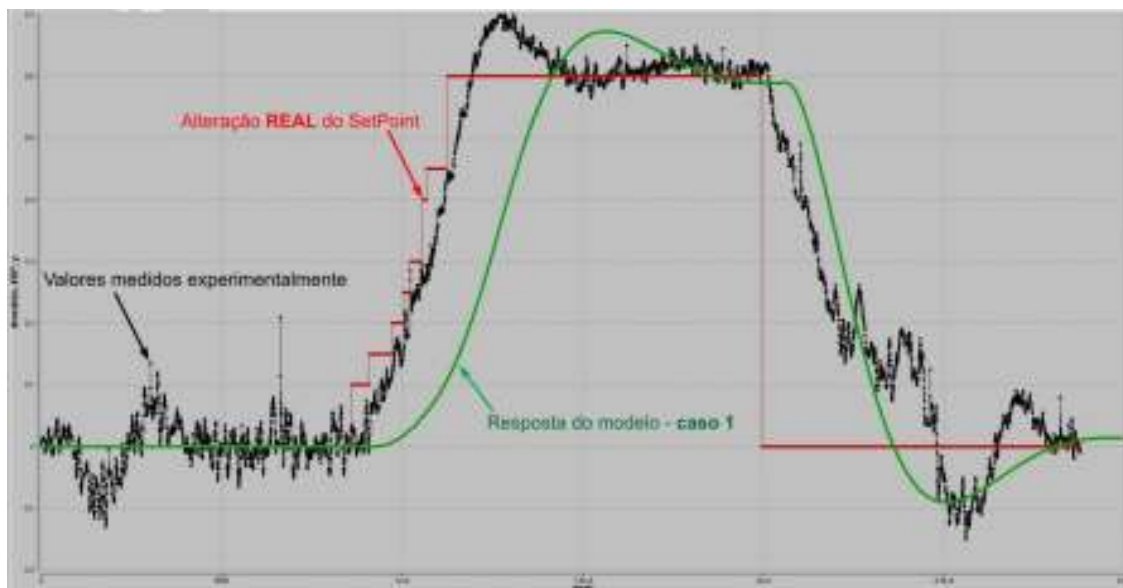


FIGURA 15 – RESPOSTA MODELO MÉTODO KEALY & DWYER – SET POINT REAL  
ISE 358,209

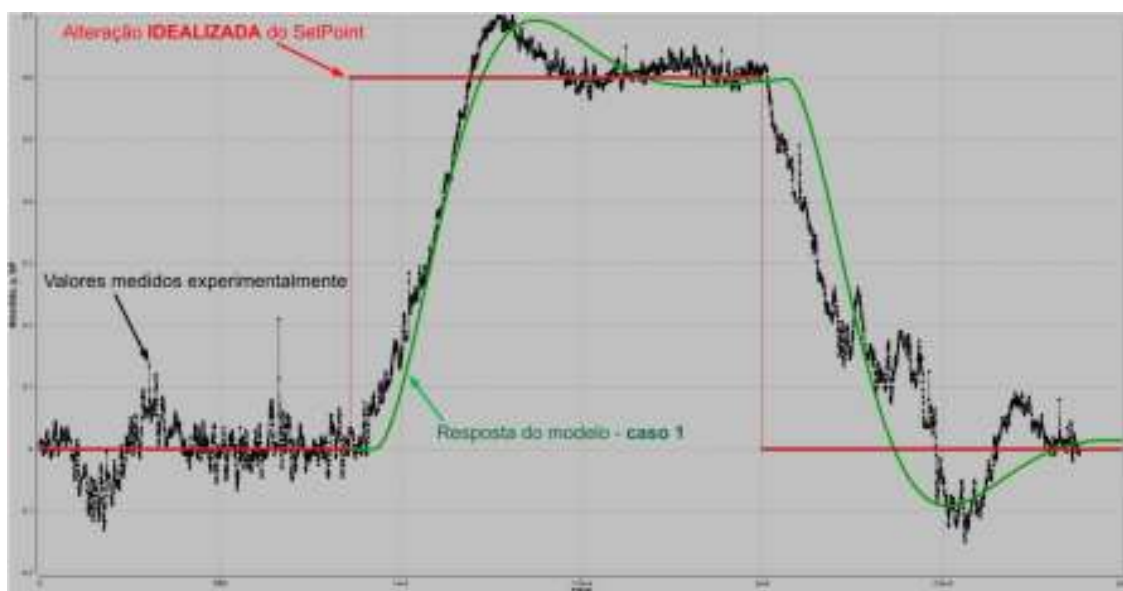


FIGURA 16 – RESPOSTA MODELO MÉTODO KEALY & DWYER – SET POINT IDEALIZADO.  
ISE – ISE 36,0932

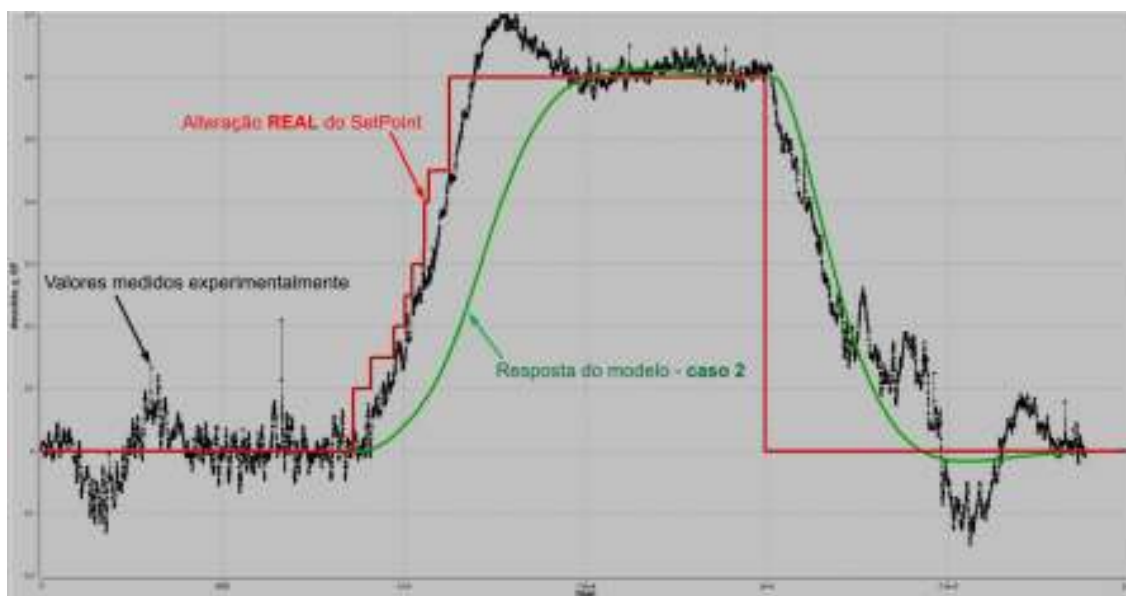


FIGURA 17 – RESPOSTA MODELO MÉTODO MOMENTOS – SET POINT REAL  
ISE 263,727

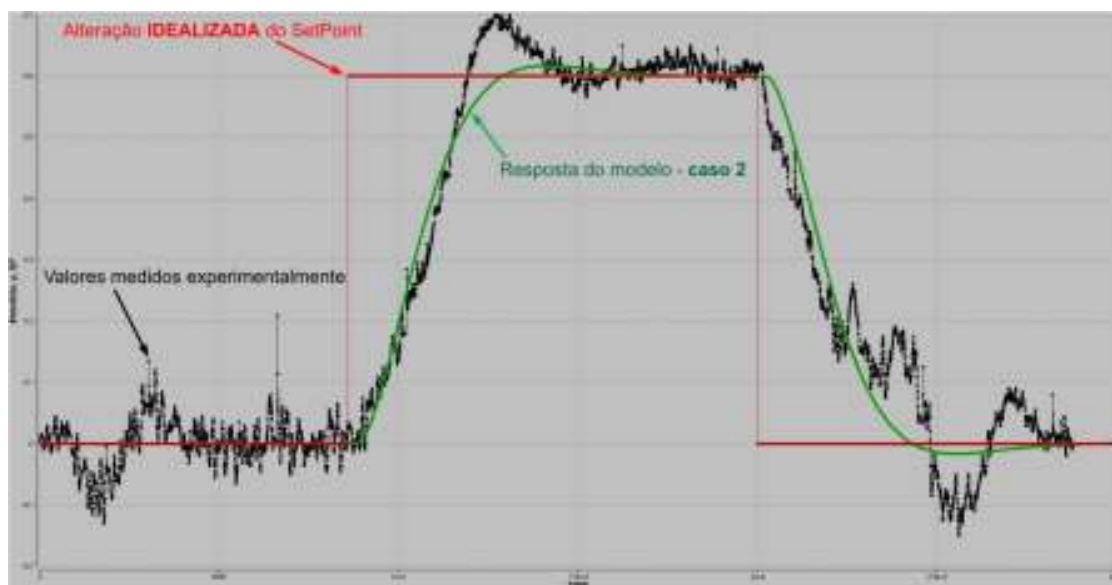


FIGURA 18 – RESPOSTA MODELO MÉTODO MOMENTOS – SET POINT IDEALIZADO  
ISE 31,0506

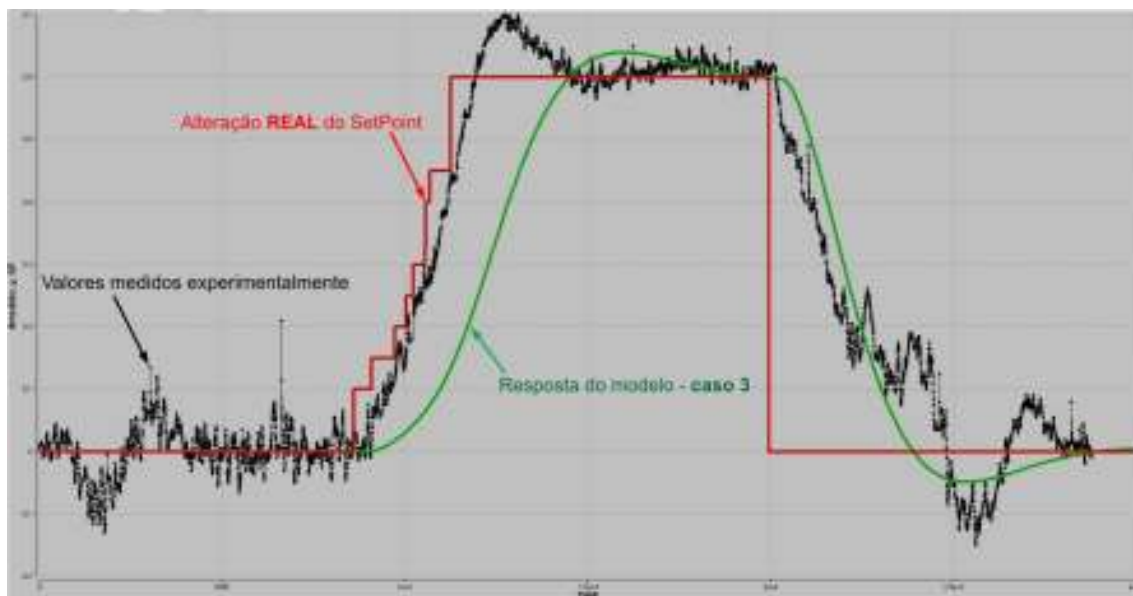


FIGURA 19 – RESPOSTA MODELO MÉTODO NELDER & MEAD – SET POINT REAL.  
ISE 308,024

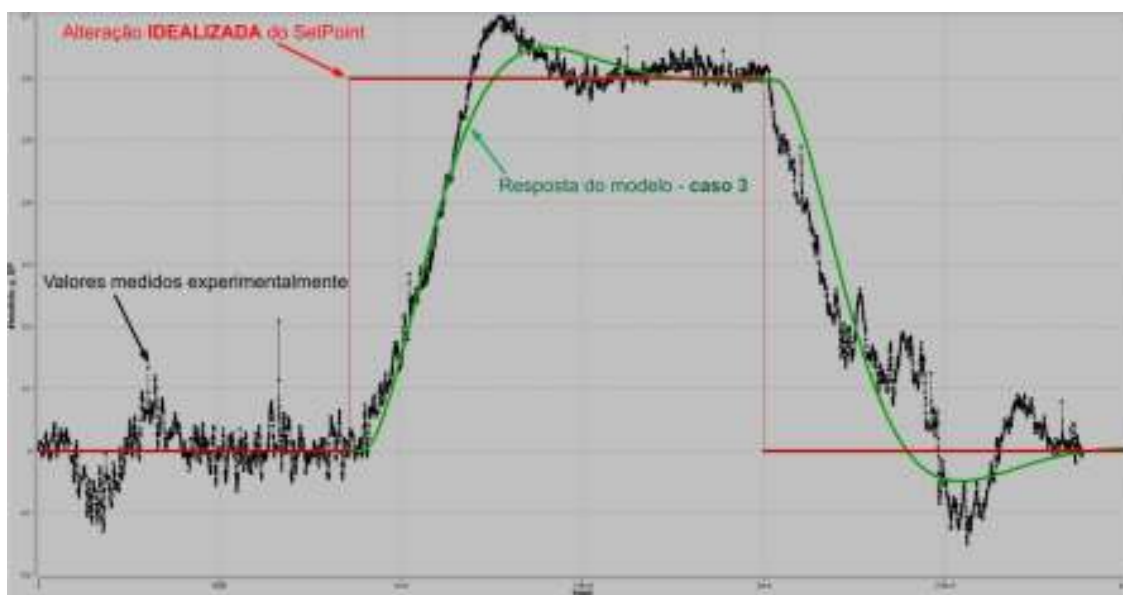


FIGURA 20 – RESPOSTA MODELO MÉTODO NELDER & MEAD – SET POINT IDEALIZADO.  
ISE 27,9333

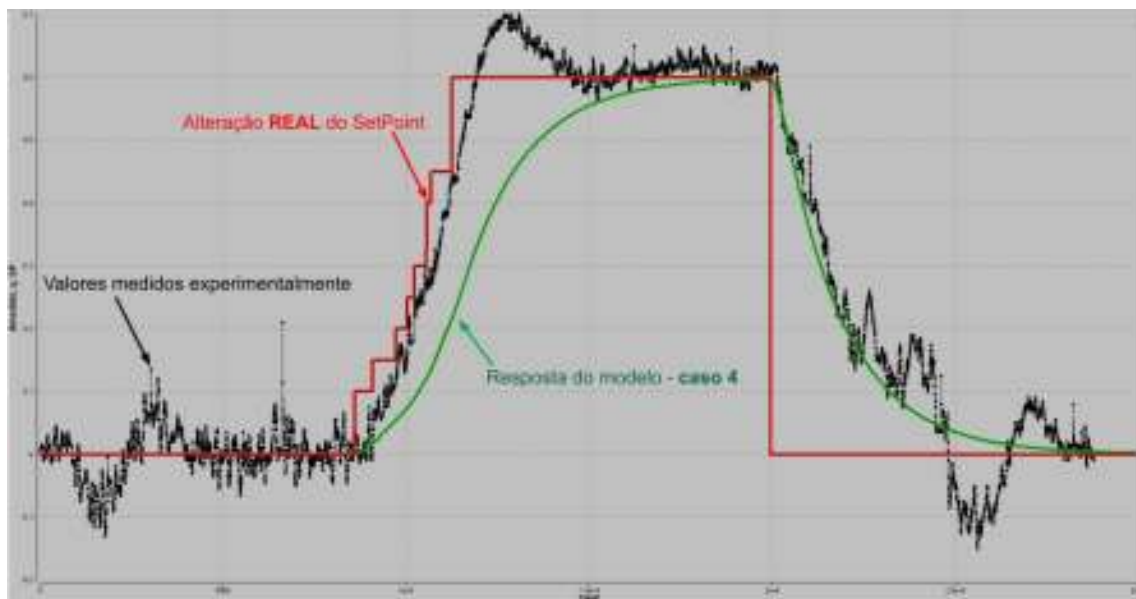


FIGURA 21 – RESPOSTA MODELO MÉTODO NELDER & MEAD – MINIMOS QUADRADOS SET POINT REAL.  
ISE 201,827

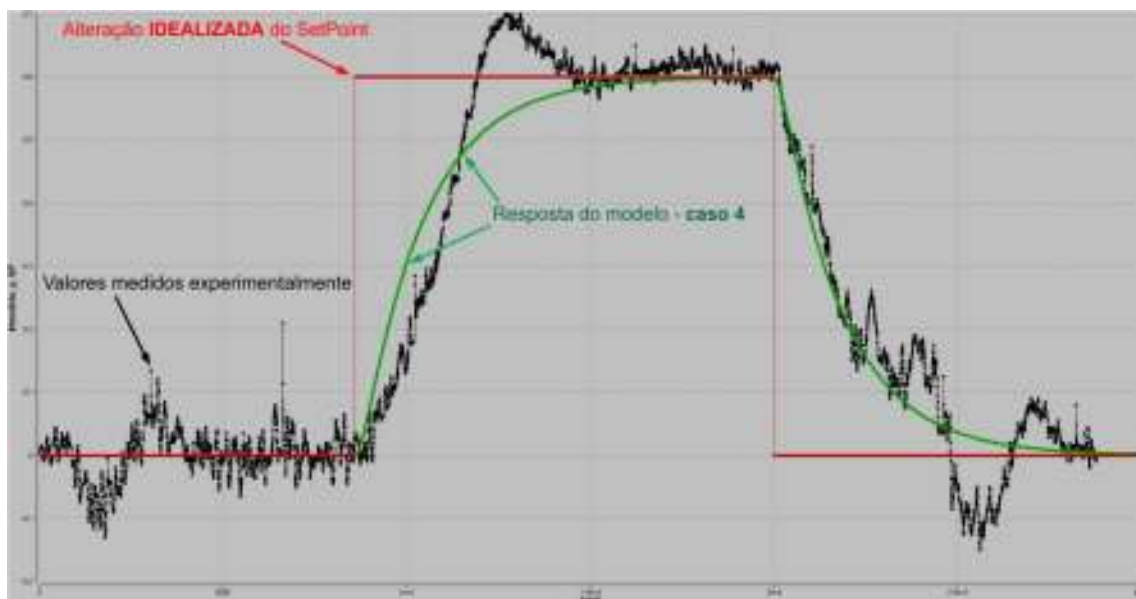


FIGURA 22 – RESPOSTA MODELO MÉTODO NELDER & MEAD – MINIMOS QUADRADOS SET POINT IDEALIZADO.  
ISE 75,2712

Conforme pode ser observado, independentemente da abordagem utilizada, a idealização do *setpoint* foi a que levou a melhores resultados. Isso provavelmente ocorreu, pois a perturbação foi totalmente inserida no sistema em um instante único. O uso da sequência de degraus faz com que as perturbações sejam introduzidas aos poucos, demorando a manifestar seu efeito. Como pode ser observado nas figuras 15, 17, 19 e 21, o modelo identificado não se apresenta sobre os pontos experimentais, principalmente durante a subida do *setpoint*. É interessante notar que justamente o oposto ocorre nas figuras 16, 18, 20 e 22, quando o modelo identificado acompanha os dados experimentais na subida.

Ainda pode-se observar que os ajustes da perturbação positiva (aumento do *setpoint*) são melhores do que os ajustes da perturbação negativa, mesmo repetindo o procedimento. Isso provavelmente pode ser atribuído a alguma outra variável que possa estar influenciando o processo sem que tenha sido considerada no controle. Além disso, pode ter ocorrido algum problema com o sensor, como por exemplo, alguma situação de histerese. Considerando o critério ISE para a avaliação do desempenho das malhas, verificou-se que o modelo identificado cujos resultados são dados pela figura 20, caso 3 representa o melhor ajuste (ISE 27,9333).

#### **4.3 Estudos de Identificação – malha aberta**

A Tabela 2 apresentada a seguir reporta os ajustes feitos no domínio do tempo, assumindo que o controlador tem comportamento ideal e o processo em laço aberto é de primeira ordem. Ao se considerar o ISE como critério de avaliação, nesta abordagem em malha aberta, a consideração do *setpoint* como sendo uma sequência de degraus levou ao melhor (menor) valor, portanto o ajuste mais adequado. A comparação entre resultados de simulação e valores experimentais para o uso do *setpoint* como sendo um pulso retangular é dada pela figura 23. A figura 24, por sua vez, apresenta comparação similar, mas envolvendo resultados considerando a mudança de *setpoint* como uma sequência de degraus. Finalmente, comparando-se os valores de ISE entre a Tabela 1 e a Tabela 2, conclui-se que o melhor modelo para o processo é dado pelo caso 6, cuja representação gráfica é dada pela figura 24 (ISE 17,3956)



TABELA 2 – SÍNTESE DOS RESULTADOS OBTIDOS MALHA ABERTA.

	Melhor ajuste no domínio tempo Set Point idealizado como pulso retangular	Melhor ajuste domínio tempo Set Point real
	<b>Caso 5</b>	<b>Caso 6</b>
$K_p^{(P)}$	2.80728E-05	1.3226E-04
$t_m^{(P)}$	474.283	2.19558E-05
$\tau^{(P)}$	620.917	931.249
<i>ISE step</i>	23.8014	-
<i>ISE staircase</i>	-	17.3956
Observações	ISE – step: integral do quadrado do erro entre o modelo e o valor medido experimentalmente quando a perturbação é idealizada como um pulso retangular	ISE – staircase: integral do quadrado do erro entre o modelo e o valor medido experimentalmente quando a perturbação é a efetivamente implantada

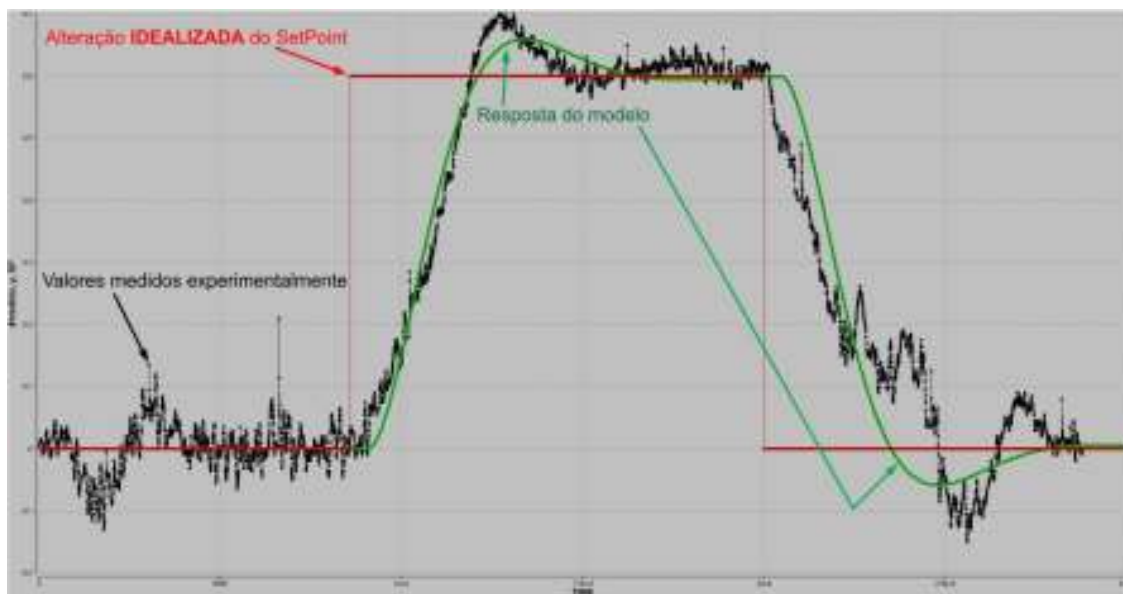


FIGURA 23 – MELHOR AJUSTE NO DOMÍNIO DO TEMPO COM SET POINT IDEALIZADO ISE 23,8014.

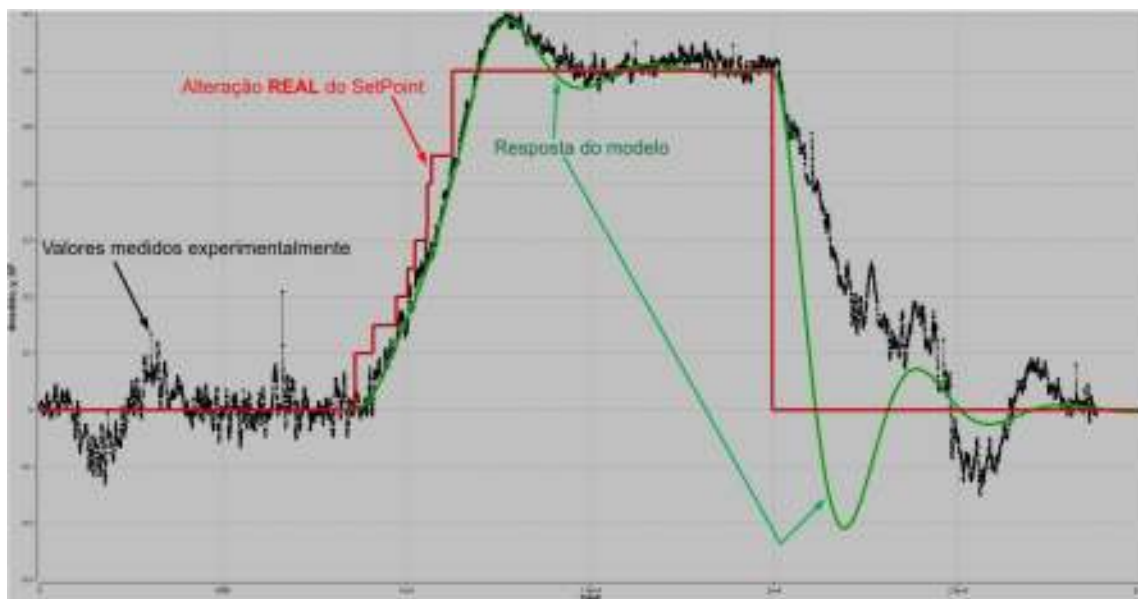


FIGURA 24 – MELHOR AJUSTE NO DOMÍNIO DO TEMPO COM SET POINT REAL.  
ISE 17,3956.

#### 4.4 Estudos de Sintonia

A partir do modelo identificado, foram utilizados outros critérios para avaliação dos parâmetros da sintonia utilizados pelo controlador durante a execução do teste. Esta tarefa é de fundamental importância, uma vez que não necessariamente o conjunto de parâmetros de sintonia utilizado é o melhor conjunto. Assim, a Tabela 03 apresenta um resumo dos parâmetros obtidos.

A **coluna A** estabelece os métodos de avaliação sintonia utilizados para encontrar os melhores parâmetros para o controle. A **coluna B** apresenta a Constante proporcional do controlador, sendo (-0,50) o valor original especificado antes da sintonia. O método de sintonia seguido do índice “modelo” indicará que o parâmetro utilizado é o parâmetro original especificado no controlador. A **coluna C** apresenta a constante integral do controlador. Sendo (0,025) o valor original especificado antes da sintonia. O método de sintonia seguido do índice “modelo” indicará que o parâmetro utilizado é o parâmetro original especificado no controlador. A **coluna D** define o *Overshoot* máximo encontrado como resposta ao desvio padrão introduzido no controle pelo método da mínima variância e resposta ao degrau introduzido para os outros métodos. A **coluna E** define o *Overshoot*

mínimo encontrado como resposta ao desvio padrão introduzido no controlador pelo método da mínima variância e resposta ao degrau introduzido para os outros métodos. Na **coluna F** é apresentada a amplitude entre o *Overshoot* máximo e mínimo. Para casos onde não ocorre *Overshoot* mínimo considera-se o valor da amplitude como a diferença entre *Overshoot* máximo e *setpoint*. Na **coluna G** é apresentada a variância máxima encontrada em resposta ao desvio padrão que foi introduzido no controle pelo método da mínima variância. Na **coluna H** é apresentado o tempo de resposta, definido como sendo o tempo necessário para resposta ficar na janela *Set point*  $\pm 5\%$ . A **coluna I** lista os valores de ISE. A **coluna J** define o número de picos com desvio positivo em relação ao valor médio até a resposta ficar na janela *Set point*  $\pm 5\%$ . Finalmente, a **coluna K** define o número de picos com desvio negativo em relação ao valor médio até a resposta ficar na janela *Set point*  $\pm 5\%$ .

TABELA 3 – RESULTADOS DAS SINTONIAS REALIZADAS.

A	Constantes proporcional e integral		Parâmetros utilizados para medir qualidade sintonia realizada							
	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
<b>Métodos Sintonia</b>	Kc	Ki	Overshoot maximo	Overshoot minimo	Amplitude	Variância	Tempo resposta	ISE	Picos +	Picos -
<b>Variância (modelo)</b>	-0,50	0,02500	6,56	5,89	0,67	352,94	27190			
Variância	-39,15	0,37004	6,43	5,94	0,50	122,93	0			
<b>ISE (modelo)</b>	-0,50	0,02500	11,96	4,48	7,48		5308	33912	2	1
ISE	-60,38	0,00317	7,81	5,95	1,86		596	380	5	4

Não existe a pretensão com esse trabalho de indicar quais são os parâmetros ótimos para o controlador avaliado, pois se sabe que existem diversas perturbações que não foram descritas pelo modelo. O principal objetivo é mostrar o potencial da utilização de técnicas oferecidas em literatura na sintonia de controladores e consequente aumento na estabilidade do processo.

Neste contexto, ressalta-se a importância dos resultados apresentados pelas figuras 25 e 26. Nestas simulações, pode-se analisar claramente a melhoria do desempenho do controlador. Por meio da figura 25, observa-se a considerável

redução na variância da saída do controlador, indicando uma melhor estabilidade do mesmo, ou seja, menos flutuações garantindo propriedades mais uniformes para o papel produzido.

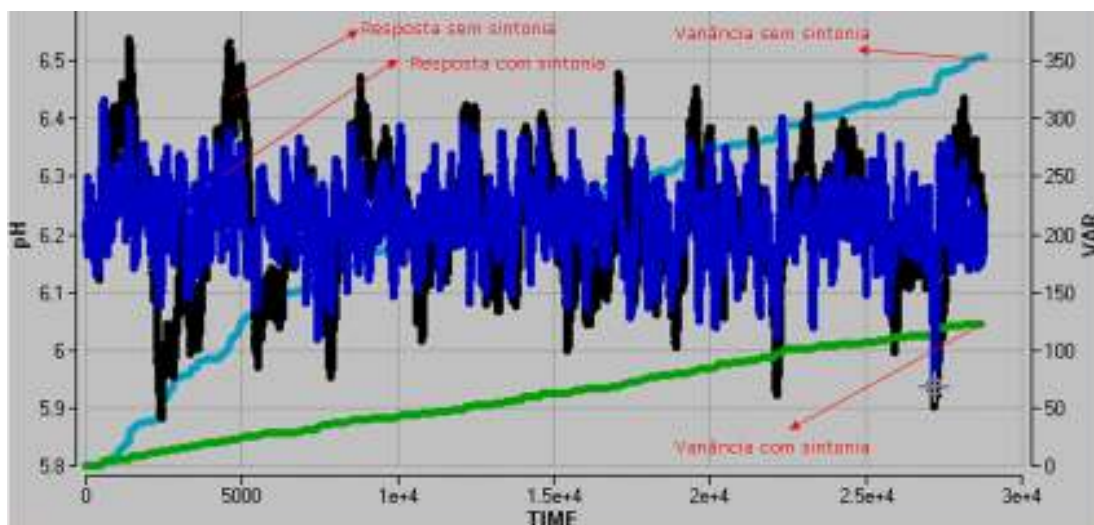


FIGURA 25 – COMPARATIVO ENTRE VARIÂNCIAS ANTES E APÓS SINTONIA DO MODELO.

Por outro lado, figura 26 mostra que um conjunto adequado de parâmetros de sintonia do controlador leva a uma redução do caráter oscilatório e ao aumento da velocidade da malha, fazendo com que atinja o *setpoint* mais rapidamente.



FIGURA 26 – COMPARATIVO DE RESPOSTA PELO MÉTODO ISE.

**Testes de sensibilidade** também devem ser conduzidos testes para avaliar o comportamento do modelo dinâmico através da influência dos valores dos parâmetros.

A robustez de um laço de controle é uma medida da capacidade de um sistema de controle em desempenhar sua função na presença de flutuações na planta (MARLIN, 2000). Portanto, a robustez de um sistema de controle deve ser levada em consideração na avaliação da performance.

Desta forma, pode-se avaliar a robustez do modelo variando um ou mais parâmetros. Para avaliação foi utilizada a ferramenta “sensitivity” do software Berkeley Madonna.

A Tabela 04 abaixo traz um resumo das avaliações realizadas onde é possível comparar a influência de cada variável no modelo. Também é possível fazer um comparativo entre os modelos antes e após sintonia.

TABELA 4 – RESULTADOS DE AVALIAÇÃO SENSIBILIDADE.

Variável alterada para avaliar robustez do sistema	Critérios utilizados para avaliar sensibilidade utilizando modelo <b>após sintonia</b>			Variável alterada para avaliar robustez do sistema	Critérios utilizados para avaliar sensibilidade utilizando modelo <b>antes sintonia</b>		
	ISE	Overshoot	VAR		ISE	Overshoot	VAR
Kv	1,47764	-0,12461	0,0432288	Kv	-10249,7	-54,6094	13,5241
Kp2	448,142	-74,9533	12,6237	Kp2	-6,18E+06	-314,409	8142,29
Tau	-0,876361	-0,00140791	-0,298292	Tau	-0,0159671	-0,00238701	-0,566624
Tm2	13,0484	0,0128601	1,33643	Tm2	81,90	0,0050415	0,654297
KC	-0,0367447	0,0614596	-0,00159637	KC	61160	3,11328	-80,625
Ki	88,7092	-6,7764	0	Ki	-1,09E+06	-54,6094	2581,25

Pelos resultados obtidos é possível evidenciar que o sistema torna-se mais robusto após a sintonia realizada, ou seja, o processo se torna mais estável á oscilações.

Mesmo para o modelo sintonizado observa-se que existe variáveis que apresentam baixa robustez, isso pode ser função do modelo obtido não ser o ideal em função das dinâmicas do mesmo (ajuste de descida e subida) e variações do processo não descritas no modelo.

#### 4.5 Avaliação econômica

Nessa seção, o objetivo é mostrar o potencial econômico da utilização das técnicas de sintonia. Os valores obtidos podem não ser representar o valor real, mas demonstram o potencial existente na utilização dessas técnicas. Na Tabela 05 abaixo se observa um potencial de ganho de 88%.

Para realizar a simulação foram utilizadas as seguintes considerações:

- 1) Utilizado o método avaliação sintonia ISE com os valores da constante proporcional e integral real e após sintonia;
- 2) *Setpoint* do pH processo definido em 6,20;
- 3) Valores de pH acima de 6,50 e abaixo de 5,90 são os limites críticos do processo e trazem problema de qualidade. Com valores fora dessa faixa o cartão classificado em um grade com menor valor agregado;
- 4) Após introduzir degrau no sistema relativo ao desvio padrão da variável é medido o tempo para o pH entrar nos limites de especificação. Foi considerado o desvio padrão relativo a um histórico de um mês de produção;
- 5) Considerado o preço médio de cartões no mercado para calcular o valor médio em R\$/minuto para restabelecer as condições de base.
- 6) Estimado 2 ocorrências por ano para avaliação de retorno.

TABELA 5 – SIMULAÇÕES DE RESULTADO ECONÔMICO

Método Sintonia		Kc	Ki	Tempo atender Especificação (minutos)	R\$/minuto Restabelecer condição base	R\$/evento	Considerando 2 eventos mês (R\$/ano)
ISE	Padrão	-0,50	0,02500	89,08	145,30	12.943,81	310.651,40
	Otimizado	-60,38	0,00317	9,98		1.450,09	34.802,26
Valor agregado sintonia realizada							<b>88,80%</b>

## 5 CONCLUSÕES

---

Neste trabalho foi proposto avaliar um malha de controle de pH, variável que tem grande influência na produção de papel e cartão por estar diretamente relacionada a escolha de outros químicos utilizados, a qualidade final do produto e estabilidade do processo.

A abordagem utilizada foi a resposta a uma excitação em degrau do controlador PI em laço fechado para obter o modelo do comportamento dinâmico do processo.

É necessário deixar registrado que algumas perturbações não foram descritas pelo modelo e que determinadas condições foram assumidas para cálculo das sintonias. Entretanto mesmo com as considerações utilizadas é possível evidenciar que a escolha adequada dos parâmetros do controlador, afeta de maneira decisiva a variabilidade da resposta da malha de controle. Os resultados obtidos mostraram ganhos consideráveis na estabilidade e robustez do processo.

A implementação de um sistema de avaliação e sintonia de malhas de controle não é por si só garantia que os benefícios irão continuar ao longo do tempo. A sistematização do modelo de gestão das malhas de controle incluindo avaliações como o tempo do processo em controle, avaliação periódica de sintonias são fatores imprescindíveis na manutenção dos ganhos obtidos.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

ABB AUTOMATION SYSTEMS AB, **Manual Operacional**. Functional Unit Pid01A Functional Description, 2000.

ANDRADE, A.A.; SARTORI, C.R.F.; COSTA, V.L.; FREITAS, M.; ROTHEN, T.; d'ANGELO, J.V.H. **Implementação de controle avançado e otimização no processo de caustificação**. O Papel. 70, 66-77, 2009.

ANG, K.H; CHONG, G. E LI. **PID Control System Analysis, Design, and Technology**. Control System Technology, IEEE Transactions on 13 (4):559-576, 2005

ASTROM, K.J. **Computer control of a paper machine-an application of linear stochastic control theory**. IBM Journal of Research and Development. 11, 389, 1967.

ASTROM, K.J E HAGGÇIMD. **The Future of PID Control**. Proc.IFAC Workshop on Digital Control: Past, Present and Future of PID Control, Terrassa, Spain, 19-30, 2000.

BERKELEY-MADONNA. **Modeling and analysis of dynamic systems**. Version 8, 2010.

BIALKOWSKI, W.J. **Dream VS. Reality: A view from the both sides of the Gap**. Pulp paper Canada, 94,19, 1993.

BOISDON, V.; EPINEY, M.; SUNDARAM, M.; ARAUJO, A.; MUGUET, M. **Controlling pH in cellulose pulp in a paper machine, involves injecting carbon dioxide into aqueous media circulating in the wet end, the amount injected being a function of the saturation pH for calcium carbonate**. Patent Number: EP1816259-A1. 2007.

BRACELPA. **Associação Brasileira de Celulose e Papel**. WWW.Bracelpa.org.br. Dados estatísticos. 2009.

CAMACHO, E.F.; BORDONS, C. **Model Predictive Control**. 1<sup>ST</sup>. Ed. Springer-Verlag: London, 1999.

CAMPOS, M.M.;SAITO, K. **Sistemas Inteligentes em Controle e Automação de Processos**. 1<sup>a</sup>. Ed. Editora Ciência Moderna: Rio de Janeiro, 2004.

CARLSSON, A.; KRANTZ-RULCKER, C.; WINQUIST, F. An electronic tongue as a tool for wet-end monitoring. **Nordic Pulp & Paper Research Journal**. 16, 319-326, 2001.

CHIEN, K.L.; HRONES, J.A.; RESWICK, J.B. **On the automatic tuning of generalized passive systems**. Transactions of ASME. 74, 175-185, 1952.  
COHEN, G.H.; COON, G.A. **Theoretical Consideration of Retarded Control**. Transactions of ASME, 75, 827-834, 1953.



DHULSTER, F.M. **Simulations of adaptive controllers for a paper-machine headbox.** Automatica. 19, 407-414, 1983.

DOUGLAS, J.M. **Process Dynamics and Control. Volume 1.** 1<sup>ST</sup>. Ed. Prentice-Hall: Upper Saddle River, 1972.

EK, M., GELLERSTEDT, G.; HENRIKSSON, G. **Pulp and Paper Chemistry and Technology. Volume 3 - Paper Chemistry and Technology.** 1<sup>ST</sup>. Ed. de Gruyter GmbH: Berlin, 2009.

EMBIRUÇU, M.; LIMA, E.L.; PINTO, J.C. **A survey of advanced control of polymerization reactors.** Polymer Engineering and Science. 36, 433-447, 1996.

FJELD, M. **Application of modern control concepts on a kraft paper-machine.** Automatica. 14, 107-117, 1978.

FORSSELL, U.; LJUNG, L. **Closed-loop identification revisited.** Automatica. 35, 1215-1241, 1999.

GARCIA, C.E.; MORARI, M. **Internal model control I. A unifying review and some new results.** Industrial Engineering & Chemistry. Process Design & Development. 21, 308-323, 1982.

GULLISHEN, J., AND PAULAPURO, H. **Paper Physics**, book 16, Henlink University of Technology, Finland, 2000.

HARRIS, T.J. **Assessment of Control Performance.** Canadian Journal of Chemical Engineering. 67, 856-861, 1989.

HICKS, J.; MOHAN, A.; RAY, W.H. **The optimal control of polymerization reactors.** Canadian Journal of Chemical Engineering. 47, 590-597, 1969.

ISIDORI, A. **Nonlinear Control Systems.** 3<sup>RD</sup>. Ed. Springer-Verlag: Berlin, 1995.

JOHAN GULLICHSEN AND HANNY PAULAPURO, H. **Paper and Paperboard Converting.** Book 11, Helsinki University of Technology, Finland, 2000.

KANTER, J.M.; SOROUSH, M.; SEIDER, W.D. **Continuous-time, nonlinear feedback control of stable processes.** Industrial Engineering and Chemistry Research. 40, 2069-2078, 2001.

KABORE, P.; WANG, H. **Design of fault diagnosis filters and fault-tolerant control for a class of nonlinear systems.** IEEE Transactions on Automatic Control. 46, 1805-1810, 2001.

KEALY, T.; O'DWYER, A. **Closed loop identification of a first order plus dead-time process model under PI control.** Proceedings of the Irish Signals and Systems Conference, 2002.

LAITINEN-VELLONEN, S. **Paper or pulp process for controlling chemical state of pulp and circulation water system involves regulating electrochemical state of raw material component and/or stock without affecting its pH.** Patent Number: WO2003018908-A1. 2003

LEHTINEN, E. **Pigment Coating and Surface Sizing of Paper.** Papermaking Science & Technology Series – Volume 11:. 1<sup>ST</sup>. Ed. TAPPI: New York, 1999.

LEIVISKA, K. **Process Control.** Papermaking Science & Technology Series – Volume 14:. 1<sup>ST</sup>. Ed. TAPPI: New York, 2000.

LIE, B. **Model uncertainty and control consequences: a paper machine study.** Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems. 15, 463-477, 2009.

LJUNG, L. **Perspectives on system identification.** Annual Reviews in Control. 34, 1–12, 2010  
LOPES, R.; VAN FLEET, R.; FIGUEIREDO, D. Aplicações de controle de processo multivariável na indústria de celulose. O Papel. 69, 75-86, 2008.

MAMAT, R.; FLEMING, P.J. **Method for on-line identification of a first order plus dead-time process model.** Electronic Letters. 31, 1297-1298, 1995

MARLIN, T.E. **Process Control.** 2nd ed. New York, USA. McGraw-Hill, Inc., 2000.

MASMOUDI, R.A. **Improved color and pH control using adaptive deadtime compensation.** TAPPI Journal. 82, 124-132, 1999.

MISKOVIC, L.; KARIMIA, A.; BONVINA, D.; GEVERSB, M. **Closed-loop identification of multivariable systems: With or without excitation of all references.** Automatica. 44, 2048–2056, 2008.

MORARI, M.; ZAFIRIOU, E. **Robust Process Control.** 1<sup>ST</sup> Ed. Prentice-Hall: Englewood Cliffs, 1989.

NELLES,O. **Nonlinear System Identification: From classical approaches to neural networks and fuzzy models.** 1<sup>ST</sup> Ed. Springer-Verlag: Berlin, 2001.

NISKANEN, K. **Paper Physics.** Papermaking Science & Technology Series – Volume 16:. 1<sup>ST</sup>. Ed. TAPPI: New York, 2000.

OHSHIMA, M.; TANIGAKI, M. **Quality control of polymer production processes.** Journal of Process Control. 10, 135-148, 2000.

OVIEDO, J.J, T.BOELEN AND VAN OVERSCHEE. **Robust Advanced PID control (RaPID): PID tuning based on engineering specifications.** IEEE Control Systems Magazine, Vol. 26, n° 1, pp. 15-19, 2006.

PAULAPURO, H. **Stock Preparation and Wet End.** Papermaking Science & Technology Series – Volume 8: Paper Making – Part1. 1<sup>ST</sup>. Ed. TAPPI: New York, 2000.

PESCH. **Uma Estrutura para Controle de Umidade na Fabricação de Papel.** Dissertação - Universidade Estadual de Maringá-PEQ, 2005

SANTOS, WELLINGTON PEREIRA. **Avaliação de Performance de Laços de Controle.** Dissertação - Universidade Estadual de Maringá-PEQ, 2003.

SARGENT, R.W.H. **Optimal Control.** *Journal of Computational and Applied Mathematics.* 124, 361-371, 2000.

SASAKI, T.; SANO, H.; YAMAMOTO, J.; TODOROKI, H.; ONO, K.; OCHI, T. **On-line fiber orientation measurement and control.** *Pulp & Paper.* 111, 35-39, 2010.

SCHORK, F.J.; DESHPANDE, P.B.; LEFFEW, K.W. **Control of Polymerization Reactors.** 1<sup>ST</sup>. Ed. Marcel Dekker: New York, 1993.

SCOTT, WILLIAN E. **Principles of wet end chemistry.** pp8, 1940.

SEBORG, D.E.; EDGAR, T.F.; MELLICHAMP, D.A. **Process Dynamics and Control.** John Wiley & Sons: New York, 2003.

SEBORG, D.E. **A perspective on advanced strategies for process control (Revisited).** European Control Conference. August, pp. 01-32, 1999.

SECCHI, A.R.; LIMA, E.L.; PINTO, J.C. **Constrained optimal batch polymerization reactor control.** *Polymer Engineering Science.* 30, 1209-1219, 1990.

SELL NANCY J. – **Process control fundamental for pulp & paper industry.** pp 08 -11-65, 1945.

SUNDHOLM, J. **Mechanical Pulping.** Papermaking Science & Technology Series – Volume 5:. 1<sup>ST</sup>. Ed. TAPPI: New York, 1999.

VOITH PAPER. **Treinamento Operacional,** Telêmaco Borba, 2001.

XIA, Q.; RAO, M.; SHEN, X.; ZHU, H. **Adaptive-control of a paperboard machine.** *Pulp & Paper.* 95, 51-55, 1994.