



CENTRO UNIVERSITÁRIO DO LESTE DE MINAS GERAIS
PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA

MOCP

LABORATÓRIO DE MODELAGEM, OTIMIZAÇÃO
E CONTROLE DE PROCESSOS

**PROPOSTA DE INTERVENÇÃO EM UMA PLANTA DE
LAVAGEM DA TIRA DE AÇO UTILIZANDO
CARACTERÍSTICAS ESTÁTICAS DE MODELOS
NARMAX POLINOMIAIS**

NILTON CÉSAR LOURENÇO

Dissertação submetida à banca examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia do Centro Universitário do Leste de Minas Gerais - UnilesteMG, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Industrial.

Cel. Fabriciano, dezembro de 2010



CENTRO UNIVERSITÁRIO DO LESTE DE MINAS GERAIS
PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA

MOCP

LABORATÓRIO DE MODELAGEM, OTIMIZAÇÃO
E CONTROLE DE PROCESSOS

**PROPOSTA DE INTERVENÇÃO EM UMA PLANTA DE
LAVAGEM DA TIRA DE AÇO UTILIZANDO
CARACTERÍSTICAS ESTÁTICAS DE MODELOS
NARMAX POLINOMIAIS**

NILTON CÉSAR LOURENÇO

Banca:

Prof. Esly Ferreira da Costa Jr., Dr. - UFES.

Prof. Dair José de Oliveira , Dr. - UNIFEI.

Prof. Jorge dos Santos Ferreira , Dr. - PPGE/Unileste-MG.

Cel. Fabriciano, dezembro 2010

*Aos meus pais
Margarida e Joaquim*

Agradecimentos

Agradeço a Deus e ao Nosso Senhor Jesus Cristo, que me capacitou e me deu paciência para finalizar esse trabalho.

Agradeço aos Meus Pais, Joaquim Francisco Lourenço e a Margarida Pinto Lourenço, pelos ensinamentos.

Agradeço a Aline pela contribuição e a Ana Carolina que foi o motivo da minha persistência.

Agradeço ao Prof. Marcelo Vieira Corrêa pelas valiosas orientações, críticas, paciência e principalmente pela amizade.

Agradeço a todos os Professores do Mestrado que foram a base para realização deste trabalho. E em especial ao Prof. Roselito de Albuquerque Teixeira.

Agradeço ao amigo Ronaldo Ribeiro, pelo apoio e amizade durante a realização deste trabalho.

Agradeço a todos Colegas do Mestrado pelo apoio e incentivo constantes. E em especial agradeço Rodrigo, Cid, Hiroshi, Leonardo, Ronaldo e por último mas não menos importante Kivia.

Agradeço a ArcelorMittal Inox Brasil pela oportunidade e por ter cedido os dados do processo utilizado.

Agradeço ao Unileste-MG, pelo apoio e condições para realização deste trabalho.

Peço sinceras desculpas pelas pessoas que me esqueci e muito obrigado.

*"Water, water everywhere nor any drop to drink."
"Água, água por toda parte, nem uma gota para beber"*

Joseph B. Kushner

Resumo

Nos processos industriais envolvendo água, de forma geral, não havia uma preocupação com o consumo em função da falsa idéia de abundância. Com o fortalecimento da consciência ambiental veio a necessidade de redução dos resíduos gerados nas fábricas. Dessa forma, vislumbrou-se a necessidade de redução do consumo de água limpa na entrada do processo e, consequentemente, do resíduo líquido de lavagem em um processo de lavagem da tira de aço, em uma indústria siderúrgica. O objetivo é propor a modificação do processo de lavagem da tira de aço com base na literatura, e também, limitar a vazão de água limpa utilizada no processo de lavagem com base em características estáticas, a partir de modelos. Após a revisão bibliográfica sobre o assunto, efetuou-se a modificação no processo e, também, a inserção de instrumento de medição de vazão de água limpa. Posteriormente, utilizando a identificação caixa-preta, baseada nas condições dos rolos espremedores (rolos com desgaste, rolos novos e ao longo do tempo de operação) foram providos modelos NARMAX polinomiais. Em seguida, foram obtidas as características estáticas dos modelos. As características estáticas indicaram um ponto de máximo no pH do líquido de lavagem da zona 3 e, neste ponto, foi determinada a máxima vazão de água limpa necessária para processo de lavagem. Foi proposto um valor de vazão máxima a cada semana de utilização dos rolos espremedores. As modificações realizadas no processo e a aplicação da limitação da vazão máxima a partir das características estáticas baseadas em modelos, proporcionaram à empresa a redução do consumo de água limpa e, consequentemente, do resíduo líquido de lavagem e estabeleceram valores máximos para inserção de água limpa, que será referência operacional no processo de lavagem com a manutenção da qualidade. As modificações no processo baseadas na literatura permitem uma melhora no desempenho operacional. Também as características estáticas dos modelos NARMAX polinomial constituem uma opção para otimizar o processo de lavagem, em função de trabalhar com os dados experimentais, sem a necessidade de interferência profunda no processo industrial.

Palavras-chave: indústria do aço - NARMAX polinomial - modelo de processo.

ABSTRACT

In the industrial processes involving water, generally speaking, there was no concern as regards the consumption due to the false idea of abundance. Along with the invigoration of the environmental conscience there was the need for reduction of the amount of residues generated in the factory. So, it was noticed the need for reduction of clean water consumption in the entrance of the process and, consequently, of the rinse liquid residue in a steel strip rinsing process in a steel industry. The objective is to modify the steel strip rinsing process based on the literature, and also to limit the flow of clean water used in the rinsing process based on the static characteristics of the models. After the bibliographic revision on the subject, there was modification in the process and also the insert of measurement instrument of clean water flow. Later, using the black box identification based on the conditions of the squeezer rolls (wear out rolls, new rolls and along the operational time) NARMAX Polynomial Models were provided. Soon afterwards, the static characteristics of the models were obtained. The static characteristics indicated the saturation of the zone 3 rinsing liquid pH, and in the saturation point the maximum flow of the necessary clean water was calculated for the rinsing process. A value of maximum flow was proposed for each week of the squeezer rolls use. The modifications accomplished in the process, and the application of the limitation of the maximum flow starting from the model based static characteristics provided the company with the reduction of clean water consumption and, consequently, of the rinse liquid residue, and they established maximum values for clean water insertion, which will be operational reference in the rinsing process by keeping its quality. The modifications in the process based on the literature allow improvement in the operational performance. Also, the static characteristics of the NARX polynomial models are an option for optimizing the rinsing process because it works with experimental data without the need for great interference in the industrial process.

Keywords: steel industry - polinomial NARMAX - process model.

Sumário

Resumo	iv
Abstract	v
1 Introdução	2
1.1 Objetivos	4
1.2 Organização do texto	5
2 Identificação de sistemas - conceitos básicos	7
2.1 Introdução	7
2.2 Coleta de dados	8
2.3 A Representação NARMAX polinomial	10
2.4 Determinação da estrutura	10
2.5 Estimação de parâmetros	11
2.5.1 Polarização	11

2.5.2	Estimador mínimos quadrados	12
2.5.3	Estimador mínimos quadrados estendido	13
2.6	Validação do modelo	14
2.7	Característica estática	15
2.8	Conclusões do capítulo	18
3	DESCRIÇÃO DO PROCESSO	19
3.1	Introdução	19
3.2	A linha de recozimento e decapagem	20
3.3	O processo de lavagem da tira de aço	22
3.3.1	O processo de lavagem original	22
3.3.2	Situação atual do processo de lavagem	24
3.4	Conclusões do capítulo	25
4	Metodologia	27
4.1	Introdução	27
4.2	Identificação do processo na condição A	27
4.2.1	Coleta de dados	28
4.2.2	Obtenção dos modelos	32
4.2.3	Estimação das características estáticas	36
4.3	Identificação do processo com a condição B	38

4.3.1	Coleta de dados	38
4.3.2	Obtenção dos modelos	39
4.3.3	Estimação das características estáticas	42
4.4	Identificação do processo com a condição C	43
4.4.1	Coleta de dados	43
4.4.2	Obtenção dos modelos	44
4.4.3	Estimação de características estáticas	48
4.5	Papel das características estáticas no processo de lavagem	50
4.5.1	Vazão máxima de água obtida a partir das características estáticas	51
4.5.2	Proposta de vazão máxima de água para o processo de lavagem	52
4.6	Conclusões do capítulo	53
5	Resultados e Discussão	54
5.1	Introdução	54
5.2	O processo de lavagem original	54
5.3	O processo de lavagem atual	55
5.4	O processo com a limitação da vazão de água	57
5.5	Análises comparativas	58
5.5.1	Em termos de economia de água	58
5.5.2	Em termos de qualidade da lavagem	59

5.6	Conclusões do capítulo	61
6	Considerações Finais	62
6.1	Conclusões	62
6.2	Sugestões para trabalhos futuros	63
	Bibliografia	66
	APÊNDICE	67
A	Características dos componentes utilizados na medição	67
A.1	Medição do pH	67
A.1.1	Conceitos básicos sobre o pH	67
A.1.2	O sistema de medição	68
A.1.3	Calibração das sondas	68
A.2	Medidor de vazão eletromagnético	69
A.3	Medidor de largura da tira de aço	69
A.4	PLC	69
A.5	Sistema de supervisão e aquisição de dados (<i>SCADA</i> - do inglês " <i>Supervisory Control And Data Aquisition</i> ")	69
B	Estimação do consumo de água no Experimento 1.	71

Lista de Figuras

3.1	O fluxo do aços siliciosos, resumido, a partir da laminação a quente.	20
3.2	Linha de recozimento e decapagem 2 da ArcelorMittal Inox Brasil.	22
3.3	O processo de lavagem da tira de aço original	24
3.4	O processo de lavagem da tira de aço modificado	25
4.1	Funções de autocovariância linear do sinal de saída, para Ts: (a) 10s e (b) 900s.	31
4.2	Característica estática do modelo <i>mph42</i>	37
4.3	Característica estática do modelo <i>mph43</i>	37
4.4	Característica estática do modelo <i>mph82</i>	42
4.5	Característica estática do modelo <i>mph83</i>	43
4.6	Característica estática do modelo <i>mph912</i>	48
4.7	Característica estática do modelo <i>mph922</i>	49
4.8	Característica estática do modelo <i>mph932</i>	50
5.1	Comparação entre Experimento 2 e vazão máxima (Q_{max}).	56
5.2	Comparação entre Experimento 3 e vazão máxima (Q_{max}).	56
5.3	Comparação entre Experimento 4 e vazão máxima (Q_{max}).	58
5.4	Comparação dos resultados: Consumo de água em cada experimento.	59
5.5	Número de análises realizadas durante o período do Experimento 2.	60

5.6	Número de análises realizadas durante o período do Experimento 3.	60
5.7	Número de análises realizadas durante o período do Experimento 4.	61
A.1	<i>Lay-out</i> funcional com os equipamentos principais do processo de lavagem da tira de aço	70

Lista de Tabelas

4.1	Variáveis do processo de lavagem da tira de aço.	29
4.2	Índices <i>RMSE</i> obtidos para modelos na condição A.	36
4.3	Índices <i>RMSE</i> obtidos para modelos na condição B.	41
4.4	Índices <i>RMSE</i> obtidos para modelos na condição C.	48
4.5	Vazão máxima de água para condição A.	51
4.6	Vazão máxima de água para condição B.	51
4.7	Vazão máxima de água para condição C.	52
4.8	Vazão máxima de água sugerida pelas características estáticas dos modelos em cada condição e em cada período.	52
5.1	Resultados dos Experimentos 2 e 3.	56
5.2	Resultados do Experimento 4.	57
5.3	Consumo de água no processo de lavagem em cada experimento	59

Lista de abreviaturas e siglas

ERR	Taxa de redução do erro (<i>Error Reduction Ratio</i>)
ETE	Estação de Tratamento de Efluentes
MOCP	Grupo de pesquisa em Modelagem, Otimização e Controle de Processos
MQ	<u>M</u> ínimos <u>Q</u> uadrados
MQE	<u>M</u> ínimos <u>Q</u> uadrados <u>E</u> stendidos
NARX	Modelo não-linear auto-regressivo com entradas exógenas (<i>Nonlinear Auto Regressive model with eXogenous inputs</i>)
NARMAX	Modelo não linear auto-regressivo, de média móvel com entradas exógenas (<i>Nonlinear Auto Regressive Moving Average model with eXogenous inputs</i>)
mph42	modelo de pH para massa de dados número 4 com grau de não linearidade 2
mph43	modelo de pH para massa de dados número 4 com grau de não linearidade 3
mph82	modelo de pH para massa de dados número 8 com grau de não linearidade 2
mph83	modelo de pH para massa de dados número 8 com grau de não linearidade 3
mph912	modelo de pH para massa de dados número 9 subdivisão 1 com grau de não linearidade 2
mph922	modelo de pH para massa de dados número 9 subdivisão 2 com grau de não linearidade 2
mph932	modelo de pH para massa de dados número 9 subdivisão 3 com grau de não linearidade 2
pH	Potencial Hidrogeniônico
PI	Proporcional Integral
PIMS	Sistema de Gerenciamento de Informação da Planta (<i>Process Information Management System</i>)
PPA	Prática Padrão ArcelorMittal
RD	Rolos Deflector
RE	Rolos Espremedor
RMSE	Raiz do erro médio quadrático (<i>Root Mean Square Error</i>)

SISO

Uma Entrada e Uma Saída (*Single-Input Single-Output*)

Lista de símbolos

$b(.)$	Função não linear qualquer usada no denominador do modelo racional.
$c(.)$	Função não linear qualquer usada para modelar o ruído.
$e(k)$	Ruído ou perturbações em um sistema dinâmico.
$E\{.\}$	Esperança matemática.
$F(.)$	Função não-linear qualquer.
$f(.)$	Função escalar qualquer.
k	Intervalo de predição.
ℓ	Grau de não-linearidade de um mapeamento não-linear.
m_d	Máximo atraso presente nos termos.
n	Ordem de um sistema dinâmico.
n_e	Atraso máximo nos termos em $e(k)$, em modelos discretos.
n_y	Atraso máximo nos termos em $y(k)$, em modelos discretos.
n_ξ	Número de termos de ruído em um modelo NARX.
n_θ	Número de termos em um modelo NARX.
\mathbb{N}	Conjunto dos números naturais
Q_{max}	Vazão máxima a partir das características estáticas dos modelos.
s	Segundos.
T_{si}	Tempo de amostragem inicial.
T_s	Tempo de amostragem de trabalho.
k	Tempo ou número de amostras no caso discreto.
Y	Vetor de saídas.
$y(k)$	Sinal de saída no instante k .
Γ	Conjunto de dados de uma seqüência.
Δt	Passo de integração numérica.
ΔP	Diferencial de pressão.
$\delta(.)$	Função delta de Dirac.
Θ	Vetor de parâmetros de um modelo NARX racional, após pseudo-

	linearização.
θ	Parâmetro nominal de um sistema dinâmico representado por um modelo NARMAX.
τ	constante de tempo.
τ_d	Valor mínimo entre τ_y e τ_{y^2} .
τ_y	Tempo em que ocorre o primeiro mínimo da auto-correlação linear de um sinal.
τ_{y^2}	Tempo em que ocorre o primeiro mínimo da auto-correlação não-linear de um sinal.

Capítulo 1

Introdução

A importância da água para os seres vivos é evidente. Como constituinte celular em maior quantidade, a água participa diretamente das reações fisiológicas vitais em todos os seres humanos. Para o homem, a água tornou-se fator de sobrevivência desde os tempos pré-históricos. O uso das fontes de abastecimento foram até motivo de guerras. O homem no seu processo de aglomeração buscou sempre a proximidade com fontes de água que permitissem o desenvolvimento de suas atividades, recurso estratégico, que se pensava inesgotável. Na vida moderna, veio a necessidade de abastecimento de água nas residências, que é fator de extrema importância social, já que está intimamente ligado à higiene pessoal e, conseqüentemente, à saúde pública.

Na produção industrial a água é fundamental, uma vez que é utilizada na grande maioria dos processos industriais, na higiene, refrigeração e em várias outras etapas do processo de industrialização. Segundo Mandich (2004), os processos industriais dependentes de água são negligenciados. O custo da negligência inclui aumento do custo para tratamento da água limpa, maior geração de resíduo e aumento do custo para tratamento do resíduo.

Um importante processo na indústria siderúrgica é a lavagem da tira de aço, que tem o objetivo extrair desta a contaminação proveniente do composto, formado entre a reação do ácido clorídrico e a tira de aço, após o processo de decapagem química (Hudson, 1991; Kittisupakorn e Kaewpradit, 2003). A lavagem é obtida em uma zona de lavagem ou múltiplas zonas de lavagem. No caso das múltiplas zonas de lavagem é classificada em série (contra-corrente) e em paralelo. A lavagem em paralelo possui entrada de água limpa e descarte do resíduo em cada zona de lavagem. Na lavagem em série, a entrada de água limpa ocorre na primeira zona e a coleta do resíduo ocorre na última zona de lavagem, com fluxo de líquido de lavagem oposto ao da tira de aço (Kushner e Kushner, 1994).

Existem vários processos similares dentro da indústria siderúrgica. Em adição, há processos baseados no mesmo princípio em outras indústrias, como por exemplo, de fabricação de papel e de alimento.

A limpeza da tira de aço está condicionada à concentração do líquido de lavagem na zona anterior. Pela alimentação de água limpa dentro da zona de lavagem, a contaminação é limitada e será mantida inferior a um valor de referência.

Em função da variação dos produtos, a quantidade de ácido transferido do processo de decapagem para zonas de lavagem varia. Isto significa que a concentração do líquido de lavagem e, indiretamente, a limpeza da tira de aço dependem da produção. Três variáveis são consideradas dependentes do produto, sendo a espessura, a largura e a velocidade da tira. As variáveis são medidas, exceto espessura da tira, quando o processo está rodando.

A dinâmica do processo é caracterizada por longa constante de tempo. O processo é não linear, visto que a constante de tempo e o ganho do processo dependem das variáveis de produção e da vazão de água limpa dentro da zona de lavagem (Jacome, 1996; Sohlberg, 1998; Corrêa, 2001). O processo é também caracterizado por fluxos internos, como por exemplo, fluxo do líquido de lavagem através das zonas, fluxo pela tira de aço e evaporação em cada zona (Stein, 1988).

No processo de lavagem, alguns componentes do processo sofrem deterioração com o uso, quando estão em operação. Estes componentes são substituídos por novos, durante as paradas programadas. A eficiência do processo e, conseqüentemente, a geração de resíduos, dependem da condição dos componentes ao longo de sua utilização (Sohlberg, 1998). Há vários trabalhos que visam melhorar a eficiência do processo (Mohler, 1977; Ledding, 1986; Mandich, 2004) e reduzir o tratamento de resíduos (Schmidt et al., 2007; Wolters et al., 2008).

Por isso, há a necessidade de otimizar o consumo de insumos no processo de lavagem. Para esta aplicação, pode-se utilizar o modelo do processo para orientar o operador.

De forma geral, é possível agrupar as técnicas de modelagem em duas grandes categorias, a saber: A modelagem caixa branca que é feita mediante a obtenção das equações baseadas na física do processo, e exige um grande conhecimento das leis empíricas e teóricas que regem o comportamento dinâmico deste (Garcia, 2005) e a identificação de sistemas, onde um modelo de entrada-saída do sistema é obtido a partir de dados. A segunda categoria é também conhecida como identificação caixa-preta. Uma representação tipicamente caixa-preta é a NAR-MAX (*Nonlinear Auto Regressive Moving Average model with exogenous inputs*) polinomial (Corrêa, 2001; Aguirre et al., 2002). Segundo Correa (2002) esta representação é largamente utilizada em identificação caixa-preta.

Estudos sobre as características dos modelos NARMAX já foram publicados (Jacome, 1996; Corrêa, 2001; Corrêa et al., 2002; Aguirre et al., 2002).

Jacome et al.(1997) exemplificam com emprego de técnicas do tipo caixa preta para provir modelos NARMAX polinomiais para um forno elétrico real. Em seguida, o modelo recupera a característica estática. Como resultado, ele compara a semelhança entre a característica estática do modelo e a característica estática medida diretamente no forno elétrico.

Correa et al.(2002) investigam o uso da informação a priori, em particular, para estimação de parâmetros de modelos NARMAX polinomial. É apresentado um procedimento para utilização da informação a priori, na estimação de parâmetros. Esta técnica é aplicada ao conversor Buck cc-cc. Existem dois resultados numéricos. Em ambos os casos são estimados os parâmetros com estimação pelo mínimo quadrado estendido e estimação de parâmetro restrita pelo algoritmo elipsóide. No primeiro exemplo, o uso da informação a priori, da característica estática do sistema, possibilita a obtenção de modelos que aproximam em regiões fora dos dados de identificação. No segundo exemplo, percebe-se que o modelo estimado com a estimação restrita pela equação estática tem um comportamento em estado estacionário bem melhor do que o estimado pelo mínimo quadrado estendido.

Aguirre et al.(2002) mostram como não linearidades são mapeadas em modelos NARX polinomial. Neste artigo é dada especial atenção às características estáticas dos modelos. Como exemplo numérico, é apresentada uma aplicação prática em um pequeno forno elétrico com ventilador desligado e ligado. Como resultado, apresenta a diferença entre a característica estática obtida do modelo, em comparação à característica estática do processo.

O desenvolvimento do sistema de coleta de dados nas indústrias siderúrgicas e o advento das técnicas de identificação caixa-preta, associadas às características dos modelos, permitem estabelecer a seguinte hipótese.

- Técnicas de identificação caixa-preta associadas às características dos modelos podem desempenhar um importante papel na otimização do sistema de lavagem da tira de aço.

1.1 Objetivos

Os objetivos deste trabalho são:

1. estimar as características estáticas de modelos NARMAX polinomial do processo de lavagem da tira de aço;

2. verificar se a estimação das características estáticas, a partir de modelos NARMAX polinomial do processo de lavagem da tira de aço sofre variação num determinado tempo;
3. otimizar o consumo de água limpa e, conseqüentemente, o resíduo líquido de lavagem, a partir das características estáticas obtidas com manutenção dos índices de qualidade da lavagem;
4. reduzir a geração de resíduos, a partir das características estáticas obtidas.

1.2 Organização do texto

Esta dissertação está organizada em 5 capítulos, além desta introdução e do Apêndice.

Capítulo 2: Identificação de Sistemas - Conceitos Básicos. Este capítulo apresenta uma revisão teórica sobre as principais etapas da identificação de sistemas (coleta de dados, escolha da representação matemática, determinação da estrutura do modelo, estimação de parâmetros e validação do modelo) com atenção particular ao modelo NARMAX polinomial e procedimentos para a obtenção das características estáticas do modelo.

Capítulo 3: Descrição do Processo. Primeiramente, é apresentado parte do processo de fabricação do aço silício em uma usina siderúrgica integrada. Em seguida, é apresentado a linha de recozimento e decapagem com breve descrição dos processos. Finalmente, descreve-se em detalhes o processo de lavagem da tira de aço.

Capítulo 4: Metodologia. Este capítulo apresenta a metodologia para obtenção das características estáticas, a partir de modelos NARMAX polinomial. A partir das características estáticas dos modelos, são feitas proposta de intervenção no processo de lavagem da tira de aço.

Capítulo 5: Resultados e Discussão. Neste capítulo, é apresentado o processo de lavagem original e, ainda, após intervenções. Em seguida, é apresentada a implementação a partir da proposta do Capítulo 4. Finalmente, são feitas análises comparativas, para a verificação da redução do consumo e sobre a qualidade da lavagem.

Capítulo 6: Considerações Finais. Este capítulo comenta as conclusões da dissertação e apresenta sugestões para trabalhos futuros.

Apêndice A: Planta de lavagem da tira de aço. Apresenta informações adicionais sobre o

processo de lavagem da tira de aço.

Apêndice B: Simulação do cálculo do consumo anterior a modificação no processo.

Capítulo 2

Identificação de sistemas - conceitos básicos

2.1 Introdução

Identificação de sistemas é a área do conhecimento que estuda e desenvolve técnicas e algoritmos para obter (identificar) modelos de sistemas dinâmicos, a partir de dados gerados pelo próprio sistema. Uma das características destas técnicas é que pouco ou nenhum conhecimento prévio do sistema é necessário e, conseqüentemente, tais métodos são referidos como identificação caixa preta ou modelagem empírica.

A identificação caixa-preta é dividida, em linhas gerais, nas seguintes etapas (Ljung, 1987; Aguirre, 2004):

1. Coleta de dados.
2. Escolha da representação matemática a ser usada.
3. Determinação da estrutura do modelo que representará o sistema.
4. Estimação dos parâmetros do modelo.
5. Validação do modelo.

Estas etapas são comuns tanto para sistemas lineares como para sistemas não lineares. As seções seguintes comentam brevemente essas etapas.

A partir da identificação caixa preta com uma entrada e uma saída é verificada a capacidade de aproximar a característica estática do sistema dentro de um intervalo. Por característica estática entende-se a relação algébrica que existe entre a entrada e a saída em estado estacionário¹(Aguirre, 2004).

2.2 Coleta de dados

Ao se buscar um modelo matemático que relacione dinamicamente duas variáveis de um sistema, parte-se do pressuposto de que há correlação significativa entre tais variáveis que justifique o modelo. Evidentemente, se não houver nenhuma relação de causa e efeito entre duas variáveis, a identificação de um modelo que as relacione torna-se injustificada (Aguirre, 2004). A coleta de dados é feita diretamente do processo em estudo, obtendo-se os dados de entrada e de saída do sistema.

A maior parte dos sistemas reais trata de processos contínuos no tempo. No entanto, em diversas aplicações científicas e tecnológicas é necessário representar variáveis contínuas de forma discreta no tempo, ou seja, deve-se trabalhar com amostras. O período entre duas amostras é chamado de período ou tempo de amostragem, T_s . É fundamental que o sinal amostrado contenha as características do sinal original. Por isso, o tempo de amostragem deve ser suficientemente curto. O teorema de Shannon diz que um sinal que não contenha componentes de frequência, acima de $1/2T_s$, pode ser determinado, unicamente, a partir de amostras de tal sinal, separados por T_s . Na prática, a frequência de amostragem é normalmente escolhida entre 5 a 10 vezes maior do que a maior frequência de interesse contida nos dados, e não apenas 2 vezes maior (chamada de frequência de Nyquist), como exigido pelo teorema de Shannon. Porém, o critério de se escolher a frequência de amostragem 5 a 10 vezes maior que a frequência de interesse nem sempre ajuda muito, uma vez que o conhecimento de tal frequência pode não existir a priori. Outra dificuldade é que, em muitos casos, será desejado verificar se um sinal previamente amostrado foi obtido com um tempo de amostragem satisfatório.

Um critério simples, que tem dado uma boa indicação da frequência de amostragem e utilizado em diversas situações reais, é apresentado abaixo.

1. Assume-se que um sinal $y^*(k)$ tenha sido registrado utilizando-se um tempo de amostragem muito pequeno, ou seja, muito menor do que o necessário. Em tais casos é comum dizer que o sinal encontra-se superamostrado. A questão passa a ser a definição de uma taxa pela qual o sinal observado $y^*(k)$ será decimado de forma a gerar o sinal de trabalho

¹Um processo é dito estacionário se as leis de probabilidade que o regem não variam com o tempo.

$y(k)$, devidamente amostrado. Ou seja, deseja-se determinar $\Delta \in N$ de forma que $y(k) = y^*(\Delta k)$. Para fazer isto, será necessário verificar o grau de correlação (redundância) entre observações adjacentes do sinal $y^*(k)$. Deve ser observado que, quanto mais superamostrado estiver o sinal $y^*(k)$, maior será a redundância entre duas observações consecutivas.

2. A fim de quantificar os efeitos causados pela sobreamostragem do sinal $y^*(k)$, serão calculadas as seguintes funções de autocovariância, uma linear e outra não-linear:

$$r_{y^*}(\tau) = E[(y^*(k) - \overline{y^*(k)}) \cdot (y^*(k - \tau) - \overline{y^*(k)})] \quad (2.1)$$

$$r_{y^{*2}}(\tau) = E[(y^{*2}(k) - \overline{y^{*2}(k)}) \cdot (y^{*2}(k - \tau) - \overline{y^{*2}(k)})], \quad (2.2)$$

sendo que $E[.]$ indica a esperança matemática e a barra indica a média com relação ao tempo. Considerando-se o sinal $y^*(k)$ ergódico², substitui-se a esperança matemática pela média temporal. A partir das funções de autocovariância, descritas pelas equações 2.1 e 2.2, chega-se a equação 2.3:

$$\tau_m^* = \min\{\tau_{y^*}, \tau_{y^{*2}}\}, \quad (2.3)$$

sendo τ_{y^*} o instante do primeiro mínimo de $r_{y^*}(\tau)$ e $\tau_{y^{*2}}$ o primeiro mínimo de $r_{y^{*2}}(\tau)$.

3. Deseja-se escolher Δ de forma que as funções de autocovariância do sinal decimado $y(k) = y^*(\Delta k)$ satisfaça a equação 2.4.

$$10 \leq \tau_m \leq 20, \quad (2.4)$$

sendo que os limites inferior e superior da equação 2.4 podem ser relaxados para 5 e 25, respectivamente.

4. Desta forma o tempo de amostragem ideal deve estar entre o intervalo apresentado na equação 2.5.

$$\frac{\tau_m}{20} \leq T_s \leq \frac{\tau_m}{10}, \quad (2.5)$$

podendo em alguns casos ser estendido com valores apresentados na equação 2.6.

²Quando a média temporal e a função de autocovariância no tempo são iguais à média estatística e à autocovariância estatística, dizemos que o processo é ergódico.

$$\frac{\tau_m}{25} \leq T_s \leq \frac{\tau_m}{5}. \quad (2.6)$$

Mais detalhes deste critério pode ser verificado em (Aguirre, 2004).

2.3 A Representação NARMAX polinomial

Os modelos NARMAX polinomial são estruturas paramétricas do tipo entrada-saída capazes de representar o comportamento dinâmico de uma ampla classe de sistemas dinâmicos não-lineares reais (Leontaritis e Billings, 1985a,b).

Um modelo *NARMAX* polinomial é representada por (Leontaritis e Billings, 1985a,b):

$$y(k) = F^l[(y(k-1), y(k-2), \dots, y(k-n_y), u(k-d), \dots, u(k-d-n_u+1), e(k), \dots, e(k-n_e))], \quad (2.7)$$

sendo F^l uma função polinomial com grau de não-linearidade $l \in Z^+$, n_y , n_u e n_e os máximos atrasos dos termos da saída $y(k)$, entrada $u(k)$ e ruído $e(k)$, respectivamente e d é o atraso medido com tempo de amostragem, T_s .

Dentre as características dos modelos NARMAX polinomiais destaca-se a possibilidade de se obter bons modelos para sistemas não-lineares, contanto que, em tais sistemas, não haja uma variação muito brusca do sinal de interesse no tempo, evitando, assim, uma taxa de variação muito elevada. Outra vantagem é a facilidade de se obter informações analíticas sobre a dinâmica e as características estáticas do modelo (Corrêa, 2001).

2.4 Determinação da estrutura

Um passo importante na identificação de um sistema dinâmico é a escolha da estrutura que será usada para representá-lo. A estrutura do modelo é o conjunto de variáveis regressoras a ser usado.

O número de termos candidatos possíveis em um modelo *NARMAX* polinomial é determinado pelo número do grau de não-linearidade l e do máximo atraso de entrada n_u , da saída n_y e dos resíduos n_e . O aumento do grau de não-linearidade, do máximo atraso de entrada, de saída e dos resíduos provocam um aumento significativo do número de termos candidatos no

modelo polinomial.

Entre as técnicas para a determinação da estrutura destaca-se o procedimento denominado ERR (*Error Reduction Ratio*) (Billings et al., 1989) que associa a cada termo-candidato um índice que corresponde à contribuição deste na explicação da variância dos dados de saída. Dessa forma, é possível ordenar os termos-candidatos, de acordo com a contribuição de cada um. Este algoritmo gera uma lista em ordem decrescente com os termos e suas contribuições na identificação do sistema.

O ERR é um critério com base num algoritmo ortogonal que eficientemente combina seleção de estrutura e estimação de parâmetros, originalmente desenvolvido por (Korenberg, 1985).

2.5 Estimação de parâmetros

Após selecionada a estrutura é possível calcular os parâmetros, por meio do algoritmo apropriado, a partir do conjunto de dados coletados do sistema. O algoritmo que realiza a estimação é conhecido na literatura com estimador.

2.5.1 Polarização

A estimação de parâmetros de um modelo linear nos parâmetros do tipo:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{P}\theta + \mathbf{e}, \quad (2.8)$$

pode ser obtida por:

$$\hat{\theta} = \mathbf{A}\mathbf{Y}, \quad (2.9)$$

sendo \mathbf{P} a matriz dos regressores e \mathbf{A} uma matriz cujos elementos dependem de alguma maneira dos regressores. Os parâmetros estimados não estarão polarizados se:

$$\mathbf{E}[\mathbf{A}\mathbf{Y}] - \theta = 0$$

$$\mathbf{E}[\mathbf{A}(\mathbf{P}\theta + \mathbf{e})] - \theta = 0$$

$$E[\mathbf{AP} - \mathbf{I}] \theta + E[\mathbf{Ae}] = 0$$

$$(E[\mathbf{AP}] - \mathbf{I}) \theta + E[\mathbf{Ae}] = 0$$

(2.10)

sendo θ determinístico. Da equação 2.10 verifica-se que a polarização será nula se:

- $E[\mathbf{AP}] = \mathbf{I}$,
- os elementos de \mathbf{A} não forem correlacionados com o ruído,
- o ruído possuir média nula.

A condição $E[\mathbf{AP}] = \mathbf{I}$ é satisfeita por meio da escolha adequada da matriz \mathbf{A} . Pode ser demonstrado que o estimador de mínimos quadrados atende à primeira condição. As duas últimas são satisfeitas pelo estimador Mínimo Quadrado Estendido (MQE).

2.5.2 Estimador mínimos quadrados

O método de mínimos quadrados (MQ) é um dos mais conhecidos e mais utilizados nas mais diversas áreas de ciência e tecnologia (Aguirre, 2004). Para estimar os parâmetros do mapa polinomial $F^l[\cdot]$ com grau de não-linearidade $l \in Z^+$, a estrutura apresentada na equação 2.7 deve ser expressa na forma de regressão linear:

$$y(k) = \psi^T(k-1) \hat{\theta} + \xi(k), \quad (2.11)$$

sendo que o símbolo $\hat{\theta}$ determina valores estimados e $\psi(k-1)$ o vetor de regressores que contém todas as combinações lineares e não lineares, dos termos de entrada, de saída e de ruído até o instante $k-1$, inclusive. Os parâmetros correspondentes, a cada termo, nestas matrizes, são os elementos do vetor $\hat{\theta}$. $\xi(k)$ representa o resíduo ou erros de predição, que são definidos como a diferença entre os dados medidos $y(k)$ e a predição de um passo a frente $\psi^T(k-1) \hat{\theta}$.

A equação 2.11 pode ser expressa, na forma matricial como:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{P} \hat{\theta} + \xi. \quad (2.12)$$

Seja um problema escrito na forma da equação 2.12. O estimador de mínimos quadrados é um estimador do tipo $\hat{\theta} = \mathbf{A}\mathbf{Y}$, sendo

$$\mathbf{A} = [\mathbf{P}^T \mathbf{P}]^{-1} \mathbf{P}^T, \quad (2.13)$$

sendo \mathbf{P} a matriz de regressores. Para o caso NARMAX polinomial o estimador é não polarizado, se o ruído for branco, com média nula.

2.5.3 Estimador mínimos quadrados estendido

O estimador Mínimo Quadrado Estendido (MQE) contorna o problema de polarização, acrescentando à matriz de regressores a parte modelada do ruído. Então, a nova matriz de regressores será composta pela equação 2.14.

$$\mathbf{P}^* = [\mathbf{P} \mathbf{P}_e], \quad (2.14)$$

sendo \mathbf{P} a matriz de regressores que contém os termos de processo, e \mathbf{P}_e a matriz que contém os termos de ruído. Dessa forma, garante-se que o estimador será não polarizado e a estimação não polarizada de $\hat{\theta}$ será dada, por um processo iterativo

$$\hat{\theta}_i^* = [\mathbf{P}_i^{*T} \mathbf{P}_i^*]^{-1} \mathbf{P}_i^{*T} \mathbf{y}. \quad (2.15)$$

Na prática, a função que modela a parte determinística do ruído não é conhecida. Porém, tem-se observado que modelos lineares de ruído com *ne* entre 5 e 20 são suficientes para redução da polarização dos estimadores.

Sendo o ruído uma grandeza que não pode ser medida, a construção da matriz \mathbf{P}_e é feita com valores estimados do ruído, determinados por

$$\xi(k)_i = \mathbf{y} - \mathbf{P}_{i-1}^* \hat{\theta}_{i-1}^*, \quad (2.16)$$

sendo que i indica o número de iterações do algoritmo MQE. No primeiro passo, $i = 1$ utiliza-se o estimador de mínimos quadrados. Em geral, com quatro iterações, $i = 4$, é suficiente para se eliminar a polarização do estimador. Detalhes a respeito de estimadores não polarizados podem ser vistos em (Aguirre, 2004).

2.6 Validação do modelo

Como etapa final, no processo de identificação, é necessária a validação dos resultados obtidos pelos modelos, para verificar se esse modelo é suficientemente bom, pois normalmente as respostas têm um caráter relativo, ou seja, o resultado deverá ser interpretado dentro de um determinado contexto. Naturalmente, o modelo deve ser avaliado. Por isso, é necessário saber como o modelo será utilizado de forma a poder julgar se ele incorpora, ou não, as características requeridas. Essa necessidade advém do fato de que nenhum modelo, por definição, representará o sistema real em todos os aspectos. Portanto, já que o modelo provavelmente é representativo do sistema, em alguns aspectos apenas, ele será considerado válido, se incorporar aquelas características do sistema que são fundamentais para a aplicação em questão.

Uma maneira comum de validar um modelo é verificar se ele reproduz, ao longo do tempo, os dados observados do sistema, ou seja, comparar a simulação do modelo obtido com a saída real do sistema. Este procedimento é muito comum, entretanto, há diversos cuidados que precisam ser observados.

Um cuidado básico é não usar os dados utilizados na identificação para obter o modelo na validação. A motivação para tal cuidado é simples. Dado um modelo obtido, a partir de um determinado conjunto de dados, deseja-se saber se o modelo serve para explicar um outro conjunto de dados observado do mesmo sistema. É comum, portanto, referir-se à capacidade de generalização do modelo.

Um procedimento é gerar dois conjuntos de dados a partir do sistema funcionando em situações idênticas, sendo um usado para a identificação do modelo e o outro para a validação. Na impossibilidade de realizar dois testes, nas mesmas condições, pode-se dividir o conjunto de dados em duas partes e usar a primeira para a identificação do modelo e a segunda para a validação (Aguirre, 2004).

Neste trabalho, foram considerados os seguintes aspectos:

1. Predição de infinitos passos à frente (simulação livre);
2. Raiz do erro médio quadrático ($RMSE$)³.

O $RMSE$ é dado pela equação 2.17.

³do inglês: *Root Mean Squared Error* (Raiz do erro médio quadrático).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N [(y)(k) - \hat{y}(k)]^2}, \quad (2.17)$$

que, normalizado, é escrito como:

$$RMSE = \frac{\sqrt{\sum_{k=1}^N (y(k) - \hat{y}(k))^2}}{\sqrt{\sum_{k=1}^N (y(k) - \bar{y})^2}}, \quad (2.18)$$

no qual $\hat{y}(k)$ é a predição livre do modelo, \bar{y} é o valor médio do sinal medido $y(k)$. Neste trabalho, serão considerados os melhores resultados os modelos que apresentarem este índice com menor valor.

2.7 Característica estática

A relação algébrica entre a entrada e a saída em um sistema estacionário, designados por \bar{u} e \bar{y} , respectivamente, de modelos NARX polinomiais, pode ser estimada utilizando os conceitos de agrupamento de termos, coeficiente de agrupamento e de pontos fixos. Uma vez conhecendo tais relações, pretende-se utilizá-las para recuperar a característica estáticas do sistema.

A parte determinística do modelo NARMAX polinomial da equação 2.7, ou seja NARX, pode ser reescrita como (Peyton-Jones e Billings, 1989) *apud* (Corrêa, 2001):

$$y(k) = \sum_{m=0}^l \sum_{p=0}^m \sum_{n_1, n_m}^{n_y, n_u} c_{p, m-p}(n_1, \dots, n_m) \prod_{i=1}^p y(k - n_i) \prod_{i=p+1}^m u(k - n_i) \quad (2.19)$$

sendo,

$$\sum_{n_1, n_m}^{n_y, n_u} = \sum_{n_1=1}^{n_y} \sum_{n_2=1}^{n_y} \dots \sum_{n_m=1}^{n_u} \quad (2.20)$$

para fatores do tipo $y(k - n_i)$, o limite superior é n_y e, para fatores do tipo $u(k - n_i)$, o limite superior é n_u . Considerando que o modelo 2.7 seja assintoticamente estável, em estado estacionário, excitado por um sinal constante, pode-se considerar $\bar{y} = y(k - 1) = y(k - 2) = \dots = y(k - n_y)$ e $\bar{u} = u(k - 1) = u(k - 2) = \dots = u(k - n_u)$. Sendo assim, a equação 2.19 é

reescrita da seguinte forma:

$$\bar{y} = \sum_{m=0}^l \sum_{p=0}^{l-m} \sum_{n_1, n_2}^{n_y, n_u} c_{p,m}(n_1, \dots, n_m) \bar{y}^p \bar{u}^m, \quad (2.21)$$

sendo que, para um determinado valor de entrada, \bar{u} , a solução desta equação determina os pontos fixos, ou pontos de equilíbrio, do modelo.

Por definição, as constantes $\sum_{n_1, n_m}^{n_y, n_u} c_{p,m-p}(n_1, \dots, n_m)$ na equação 2.21 são os coeficientes dos agrupamentos de termos $\Omega_{y^p u^m}$ para $m = 0, \dots, l$ e $p = 0, \dots, m$, que contêm os termos do modelo $y(k-i)^p u(k-j)^m$, para $m+p = l$ sendo i e j quaisquer atrasos de tempo. Esses coeficientes são representados por $\Sigma_{y^p u^m}$ (Aguirre e Billings, 1995).

Utilizando a definição de coeficiente de agrupamento, o modelo NARX polinomial em estado estacionário pode ser reescrita como:

$$\bar{y} = \Sigma_0 + \Sigma_y \bar{y} + \Sigma_u \bar{u} + \sum_{m=1}^{l-1} \sum_{p=1}^{l-m} \Sigma_{y^p u^m} \bar{y}^p \bar{u}^m + \sum_{p=2}^l \Sigma_{y^p} \bar{y}^p + \sum_{m=2}^l \Sigma_{u^m} \bar{u}^m. \quad (2.22)$$

sendo Σ_0 o termo constante, $\Sigma_y \bar{y}$ e $\Sigma_u \bar{u}$ os termos lineares em y e u , respectivamente, $\sum_{m=1}^{l-1} \sum_{p=1}^{l-m} \Sigma_{y^p u^m} \bar{y}^p \bar{u}^m$ os termos cruzados, $\sum_{p=2}^l \Sigma_{y^p} \bar{y}^p$ e $\sum_{m=2}^l \Sigma_{u^m} \bar{u}^m$ os termos não lineares em y e u .

Então, a partir da equação 2.22, o ganho estático estimado pode ser expresso por

$$\hat{K}_s = \frac{\bar{y}}{\bar{u}} = \frac{\frac{\Sigma_0}{\bar{u}} + \Sigma_u + \sum_{m=2}^l \Sigma_{u^m} \bar{u}^{(m-1)}}{1 - \Sigma_y - \sum_{m=1}^{l-1} \sum_{p=1}^{l-m} \Sigma_{y^p u^m} \bar{y}^{(p-1)} \bar{u}^m - \sum_{p=2}^l \Sigma_{y^p} \bar{y}^{(p-1)}} \quad (2.23)$$

Considerando que o estado estacionário na saída pode ser expresso por $\bar{y} = \hat{K}_s \bar{u}$, então a partir da equação 2.23, chega-se a:

$$\bar{y} = \frac{\Sigma_0 + \Sigma_u \bar{u} + \sum_{m=2}^l \Sigma_{u^m} \bar{u}^m}{1 - \Sigma_y - \sum_{m=1}^{l-1} \sum_{p=1}^{l-m} \Sigma_{y^p u^m} \bar{y}^{(p-1)} \bar{u}^m - \sum_{p=2}^l \Sigma_{y^p} \bar{y}^{(p-1)}}, \quad (2.24)$$

que não é uma expressão explícita de $\bar{y} = f(\bar{u})$. Uma vez que aparecem termos em Ω_{y^p} , com $p > 2$, fica impossível explicitar uma relação. Uma alternativa para contornar tal problema é através da multiplicação de ambos os membros da equação 2.24 pelo denominador do segundo membro, movendo todos os termos para o primeiro membro. Desta forma, a saída em estado estacionário de um modelo NARX polinomial com grau de não linearidade l é determinada pelas raízes do seguinte polinômio:

$$\begin{aligned} & (\Sigma_{y^l}) \bar{y}^l + \left(\sum_{i=0}^{i=1} \Sigma_{y^{l-1} u^i} \bar{u}^i \right) \bar{y}^{(l-1)} + \dots + \\ & \left(\sum_{i=0}^{i=l-2} \Sigma_{y^2 u^i} \bar{u}^i \right) \bar{y}^2 + \left(1 - \sum_{i=0}^{i=l-1} \Sigma_{y u^i} \bar{u}^i \right) \bar{y} + \sum_{i=0}^{i=l} \Sigma_{u^i} \bar{u}^i = 0, \end{aligned} \quad (2.25)$$

podendo verificar que, se $\Sigma_{y^l} \neq 0$, então o modelo terá l saídas estacionárias para cada valor de entrada \bar{u} . Em outras palavras, pode-se dizer que o número de saídas estacionárias possíveis de um modelo NARX polinomial é igual ao maior expoente que aparece nos termos em y , inclusive os termos cruzados Ω_{y^p} .

Por exemplo se $\max[p] = 2$, então, o modelo possui dois estados estacionários. "É matematicamente possível que algumas das raízes da equação 2.25 tornem-se complexas. Na maioria dos casos práticos, no entanto, esta é uma indicação de sobreparametrização" (Corrêa et al., 2002). A partir de agora, presume-se que todos os pontos fixos são reais.

Se $\max[p] = 1$, a equação 2.24 se reduz a equação 2.26.

$$\bar{y} = \frac{\Sigma_0 + \Sigma_u \bar{u} + \sum_{m=2}^l \Sigma_{u^m} \bar{u}^m}{1 - \Sigma_y - \sum_{m=1}^{l-1} \Sigma_{y u^m} \bar{u}^m}, \quad (2.26)$$

Portanto, se o modelo possui termos cruzados na forma $\Sigma_{yu^m}, m = 1, 2, \dots, m$, então, a função estática tem solução única e racional.

2.8 Conclusões do capítulo

O presente capítulo teve como objetivo familiarizar o leitor com a identificação do tipo caixa preta. As cinco principais etapas de identificação foram brevemente abordadas.

Foram abordados brevemente os conceitos sobre as características estáticas de modelos NARX polinomiais.

Capítulo 3

DESCRIÇÃO DO PROCESSO

3.1 Introdução

A usina na qual esta proposta foi aplicada pertence ao Grupo ArcelorMittal. A unidade produtiva, ArcelorMittal Inox Brasil, está situada em Timóteo, na região de Minas Gerais conhecida como Vale do Aço, e a usina fica próxima a uma das maiores reservas de minério de ferro do mundo. Ela opera nas três fases básicas que são redução, refino e laminação (IBS, 2008) e comercializa aços inoxidáveis, carbono e siliciosos sob a forma de placas, laminados planos a quente e a frio ¹. A produção de aços siliciosos planos laminados a frio consiste em diversos processos diferentes, com entrada no recozimento e decapagem, laminação e acabamento, dependendo do pedido dos clientes. O fluxo do aços siliciosos, resumido, a partir da laminação a quente até a embalagem é apresentado na Figura 3.1.

A bobina laminada a quente é conduzida ao recozimento e decapagem (*A and P 2*)². No recozimento, a tira de aço é aquecida no forno a uma temperatura de acordo com o tipo de aço. O processo de recozimento faz com que óxidos sejam formados na superfície da tira, sendo assim necessária a decapagem e a lavagem da mesma. Posteriormente, a tira de aço segue para o laminador de bobina, de forma a ter sua espessura reduzida. Após a laminação, a tira de aço é conduzida ao acabamento, sendo tratada na linha contínua de descarbonetação ou na linha contínua de recozimento e revestimento. Este trabalho tem como foco o processo de decapagem da tira de aço, especificamente, o processo de lavagem após a decapagem.

¹Informações adicionais em <http://www.arcelormittalinoxbrasil.com.br>

²*A and P 2*: do inglês, *Annealing and Pickling* e número dois por ser o segundo instalado na ArcelorMittal Inox Brasil

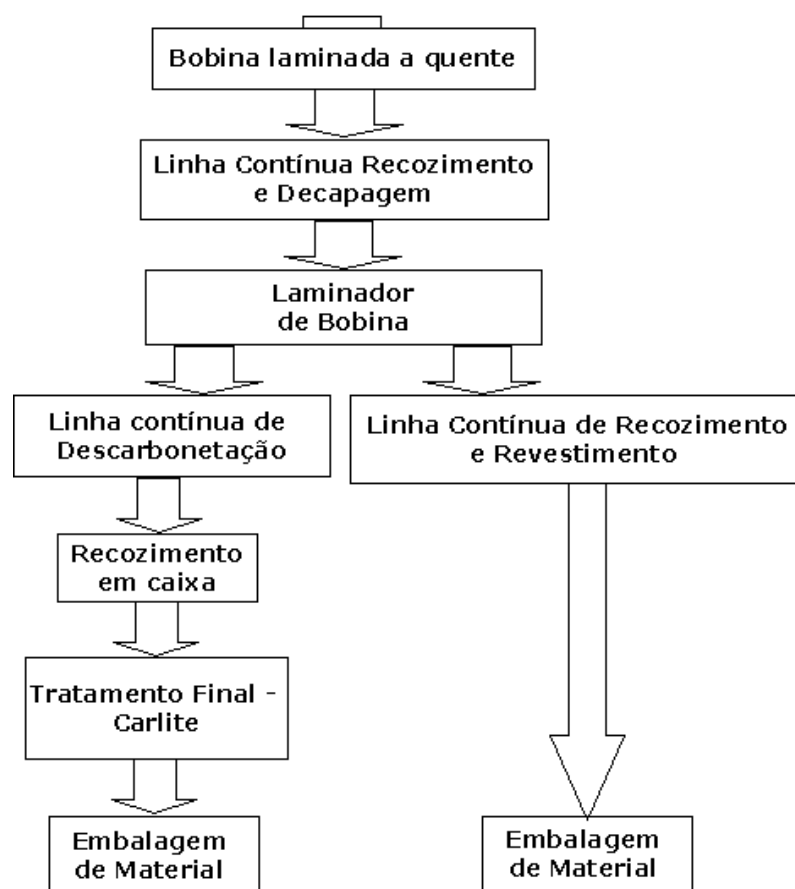


Figura 3.1: O fluxo do aço silicioso, resumido, a partir da laminação a quente.

Inicialmente, na seção 3.2, é apresentada a linha de recozimento e decapagem, com descrição das seções da entrada, do centro e saída. A seguir, na seção 3.3, é descrito o processo de lavagem da tira de aço, apresentando detalhes de suas características de funcionamento e equipamentos envolvidos no processo original e processo atual.

3.2 A linha de recozimento e decapagem

A linha contínua de recozimento e decapagem 2 (*A and P 2*), ver Figura 3.2, pertence ao fluxo de produção, e tem como objetivo manter a tira de aço sempre rodando na máxima velocidade permitida pelas condições do processo. Para que isso seja possível, a linha é dividida em três seções:

- **Seção da entrada:** Composta pela desbobinadeira, máquina de solda e acumulador da entrada. As bobinas a serem processadas são inseridas na desbobinadeira e são soldadas. Durante a inserção da bobina e o processo de solda, esta seção permanece parada, enquanto a seção do centro continua rodando, sendo alimentado pelo acumulador da entrada. Após o processo de solda, a velocidade da tira na bobinadeira acelera até a velocidade máxima, com o objetivo de abastecer parcialmente o acumulador da entrada.
- **Seção do centro:** Composta pelos processos de recozimento, resfriamento, decapagem, lavagem e secagem da tira de aço silício, sendo descritas a seguir:

Processo de recozimento da tira de aço: Responsável pela definição das propriedades mecânicas do aço, de acordo com a aplicação final no cliente. É uma técnica de tratamento térmico, onde o aço sofre aquecimento e, em seguida, é resfriado, conforme Van Vlack (1970) *apud* (Carvalho, 2003). O processo de resfriamento é composto por: (i) resfriamento estático (ii) resfriamento por camisa de água, (iii) resfriamento por *spray* de água, (iv) resfriamento por imersão em um tanque com água. Após o processo de recozimento, há formação de óxidos sobre a tira de aço.

Para o aço carbono, os óxidos formados após tratamento térmico são Wustita (FeO), Magnetita (Fe_3O_4) e Hematita (Fe_2O_3) (Hitzemann e Heimhard, 1984).

No caso do aço silício há formação de Wustita (FeO), Magnetita (Fe_3O_4), Hematita (Fe_2O_3), dióxido de silício (SiO_2), que mostra forte tendência em combinar com Wustita (FeO), formando a Faiálita (Fe_2SiO_4) (Santos, 2002).

Processo de decapagem da tira de aço: Tem a finalidade de retirar as camadas de óxidos, que se formam na superfície da tira, durante o processo de recozimento. Tal processo é composto pela decapagem mecânica, que visa retirar, com jatos de granalhas sobre a tira, os óxidos (Santos, 2002) e, posteriormente, a decapagem química que retira, com ácido clorídrico (HCL), a camada de óxidos (Plumer, 1986; Hudson, 1991; Santos, 2002; Kittisupakorn e Kaewpradit, 2003).

Processo lavagem da tira de aço: A Figura 3.2 mostra o processo de lavagem após o processo de decapagem. Após passar por este processo, tem-se uma tira de aço com camada superficial de líquido, composto por ácido clorídrico com pequena proporção de aço dissolvido. Em função disso, a mesma é lavada. O processo de lavagem será descrito em detalhes na Seção 3.3.

Processo de secagem da tira de aço: Após passar pelo processo de lavagem, a tira de aço é completamente seca. O secador consiste de um ventilador que succiona ar para dentro do secador. O ar é aquecido até 120 °C por um trocador de calor e, em seguida, é soprado pelos orifícios dos tubos sopradores, em direção à tira de aço.

- **Seção da saída:** É composta pelo acumulador da saída, mesa de inspeção e bobinadeira. O acumulador da saída permite reduzir a velocidade da tira para o corte e inspeção.

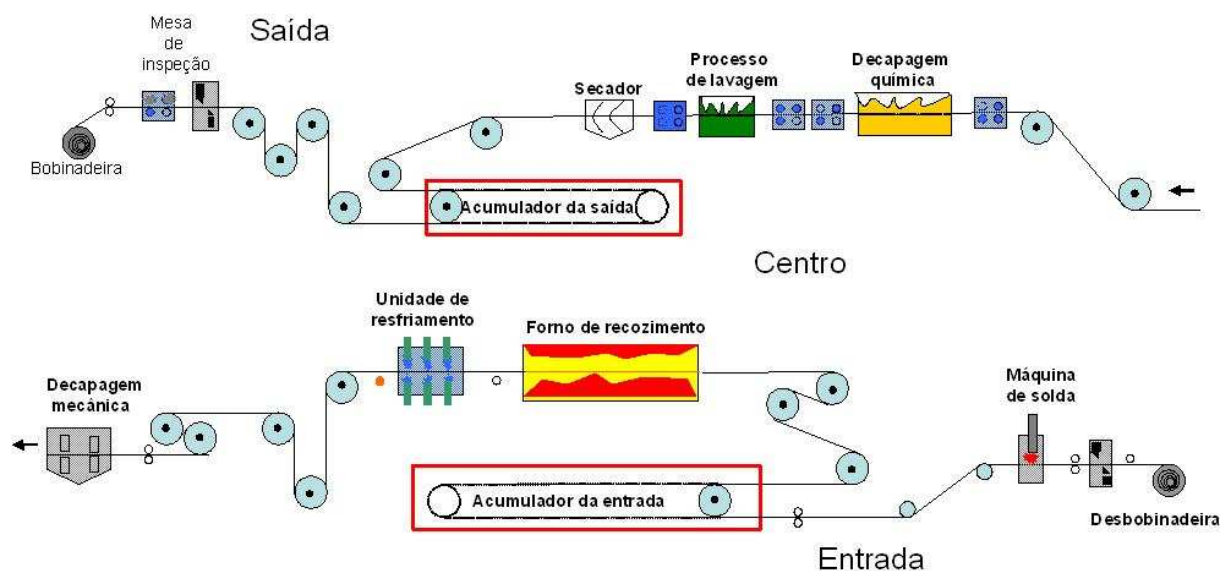


Figura 3.2: Linha de recozimento e decapagem 2 da ArcelorMittal Inox Brasil.

3.3 O processo de lavagem da tira de aço

3.3.1 O processo de lavagem original

Após o processo de decapagem, a tira de aço é pressionada por um par duplo de rolos espremedores (RE). Os rolos espremedores são constituídos de aço carbono com uma superfície de borracha. O conjunto deste rolo tem o objetivo de promover a remoção eficiente do líquido, constituído de ácido clorídrico e de pequena proporção de aço dissolvido. Entretanto, após passar pelos rolos espremedores, a tira de aço não está completamente seca, mas contém uma camada residual de líquido, que será removida pelas zonas de lavagem. Cada zona de lavagem tem o mesmo princípio de construção.

O mecanismo do processo de lavagem³ é ilustrado na Figura 3.3.1. O processo de lavagem é dividido em três (3) zonas de lavagem, em contra-corrente, com circulação de líquido de lavagem quente. A tira de aço se move em direção oposta ao fluxo do líquido de lavagem nas

³Informações adicionais em (Bohlin, 1994; Sohlberg, 1998).

zonas. O líquido de lavagem é composto de água e pequena quantidade de ácido clorídrico e aço dissolvido. Há, em cada zona, circulação independente do líquido de lavagem. O líquido de lavagem é bombeado da zona de lavagem e pulverizado sobre e sob a tira de aço. A pulverização do líquido de lavagem é feita por conjunto de bicos injetores à baixa pressão e a pulverização de água limpa (clarificada⁴ ou industrial) é feita por conjunto de bicos injetores à alta pressão. Cada conjunto possui dez bicos injetores. O líquido de lavagem desce por gravidade. Não há um mecanismo de mistura no recipiente, isto é obtido naturalmente. Esta circulação do líquido de lavagem é similar nas outras duas zonas de lavagem.

Assim, a primeira zona de lavagem possui cinco conjuntos de bicos injetores na parte superior e quatro na parte inferior da tira de aço, ambos de baixa pressão. A segunda zona de lavagem possui três conjuntos de bicos injetores, à baixa pressão na parte superior e inferior da tira de aço, e um conjunto de bicos injetores, à alta pressão, na parte superior e inferior. A terceira zona de lavagem possui três conjuntos de bicos injetores, à baixa pressão, na parte superior e inferior da tira de aço, e possui um conjunto de bico injetores à alta pressão por cima e por baixo da tira de aço e, ainda uma entrada de água limpa controlada pelo operador à baixa pressão. Na terceira zona de lavagem o líquido de lavagem é aquecido através da injeção direta de vapor. No interior de cada zona de lavagem existem os rolos deflectores (RD), que tem a finalidade de promover a inclinação da tira de aço.

Ao entrar na primeira zona de lavagem e sair na terceira zona de lavagem, a tira de aço passa entre pares de rolos espremedores. Os rolos espremedores reduzem a quantidade do líquido de lavagem transferida pela tira de aço para a próxima zona de lavagem. Quando o processo está rodando, a superfície de borracha dos rolos sofre desgaste. Isto significa que o fluxo, através da tira de aço, aumenta, e a concentração nas zonas seguintes também aumenta. Se os rolos que sofrem desgaste não forem trocados, o risco de uma lavagem da tira ruim é eminente.

Além disso, durante a parada programada⁵ as peças do processo com desgaste, inclusive os rolos espremedores, são substituídas por peças novas. Estas paradas normalmente ocorrem a cada 60 dias. Ocasionalmente, com o uso normal dos rolos espremedores, grande parte da borracha pode ser perdida. Caso o desgaste dos rolos espremedores seja grande, a produção é interrompida para substituição dos mesmos.

A água limpa alimenta a terceira zona de lavagem e os bicos de alta pressão, e isso é feito para diluir o líquido de lavagem. Caso contrário, a concentração do ácido clorídrico seria muito alta. Uma quantidade de líquido de lavagem flui da terceira para a segunda zona de lavagem, proporcionando a mistura do líquido da segunda com o da terceira zona com baixa

⁴Quando a água passa por três etapas floculação, decantação e filtração (www.corsan.com.br, 2010).

⁵Parada para manutenção e reposição de peças com desgaste.

concentração. O fluxo do líquido de lavagem comporta-se da mesma forma da segunda para a primeira zona de lavagem.

O líquido de lavagem é drenado da primeira zona de lavagem e enviado a ETE (Estação de Tratamento de Efluentes).

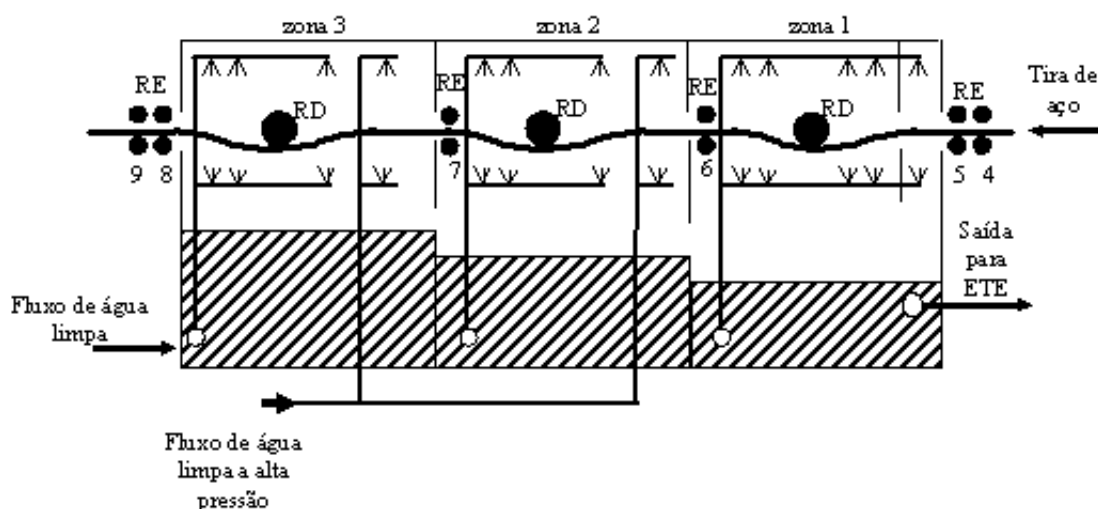


Figura 3.3: O processo de lavagem da tira de aço original

O conjunto do processo de decapagem, incluindo o processo de lavagem, é construído como um sistema enclausurado. Para prevenir a precipitação dos gases gerados, existe um exaustor instalado no recozimento e decapagem. O gás proveniente dos tanques de decapagem e tanque de lavagem é enviado ao lavador de gás. A água utilizada para a lavagem do gás é enviada para a ETE.

3.3.2 Situação atual do processo de lavagem

Um grande problema do processo de lavagem é o resíduo do líquido de lavagem, que deve ser tratado e descartado posteriormente. Este problema está associado à quantidade de água limpa utilizada em tal processo. O desafio está em reduzir o consumo de água limpa e, consequentemente, reduzir a quantidade de resíduo do líquido, com a manutenção da qualidade neste processo.

De acordo com a literatura (Kushner e Kushner, 1994; Bohlin, 1994; Sohlberg, 1998) a água limpa é inserida em uma ou mais zonas de lavagem. No processo de lavagem do recozimento e decapagem 2, há duas entradas de água limpa: uma, pela zona de lavagem 3, e outra, pelos

conjuntos de bicos injetores de alta pressão das zonas de lavagem 2 e 3. Com essa configuração, não há monitoramento da vazão de água limpa na entrada da zona 3. Neste contexto, foram realizadas algumas intervenções no processo de lavagem, ver Figura 3.3.2. Sendo:

1. Retirada de água limpa dos conjuntos dos bicos injetores de alta pressão nas zonas de lavagem 2 e 3, com a utilização do líquido de lavagem da zona de lavagem 3;
2. Direcionado o fluxo de água limpa, em sua totalidade, para a zona de lavagem 3;
3. Inserido medidor eletromagnético, ver Apêndice A.2, para monitorar a vazão de água limpa na entrada da zona de lavagem 3, com controle de vazão por válvula manual.

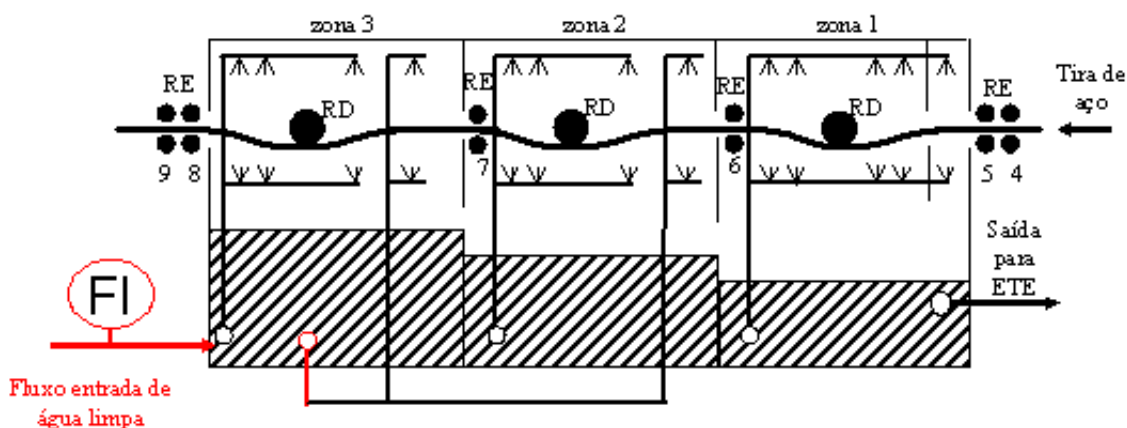


Figura 3.4: O processo de lavagem da tira de aço modificado

Outro ensinamento de Sohlberg (1998) é que a quantidade de água limpa utilizada no processo de lavagem está relacionado ao desgaste dos rolos espremedores. Com o desgaste dos rolos espremedores tem-se a necessidade de maior vazão de água limpa na entrada da terceira zona de lavagem, para retirar a camada do líquido de lavagem na superfície da tira. Em função disso, é importante a informação sobre o desgaste dos rolos espremedores para determinar a vazão de água na entrada do processo de lavagem.

3.4 Conclusões do capítulo

Neste capítulo foram apresentados os principais equipamentos do fluxo de produção do aço silício, a partir da laminação de tiras a quente. Foi enfatizado o processo de lavagem da tira que é parte do Recozimento e Decapagem 2.

Foi apresentada uma descrição detalhada dos componentes e do processo que integram a lavagem da tira de aço que será utilizada durante todo o decorrer deste trabalho. Discutiui-se a importância da redução de água limpa e, conseqüentemente, a redução do resíduo líquido de lavagem.

Com base na literatura foi proposta neste trabalho uma modificação no processo com o objetivo de reduzir o consumo de água limpa utilizada no processo de lavagem da tira de aço. Além disso, foi comentada a influência do desgaste dos rolos espremedores na eficiência do processo de lavagem.

Capítulo 4

Metodologia

4.1 Introdução

Neste capítulo é apresentada a metodologia para implementação de vazão máxima de água na saturação obtida nas características estáticas, a partir de modelos NARMAX polinomial, observando o estado dos rolos espremedores. A apresentação das características estáticas foi obtida obedecendo a três condições. Na primeira foram apresentadas as características estáticas, a partir de modelos NARMAX polinomial, considerando o pior caso, ou seja, com rolos espremedores com desgaste. Esta condição é obtida antes da parada programada. Em seguida, foram apresentadas as características estáticas considerando os rolos espremedores novos, cuja condição é obtida após a parada programada, sendo observado a variação destas características estáticas, em relação a primeira condição. E, finalmente, foram apresentadas as características estáticas em função do desgaste dos rolos espremedores, a cada semana de utilização. De posse das características estáticas foram determinados os valores para a vazão máxima de água, utilizada no processo de lavagem da tira de aço.

4.2 Identificação do processo na condição A

Nesta seção é descrita a metodologia utilizada para obtenção das características estáticas, a partir de modelos NARMAX polinomiais com a condição A. Por condição A entende-se a coleta de dados com rolos espremedores com desgaste, ou seja, antes da parada programada.

4.2.1 Coleta de dados

Para a identificação é necessário obter os dados medidos do processo. O primeiro passo é definir as variáveis disponibilizadas pela instrumentação. A seguir, são determinadas as variáveis de entrada e de saída do processo. Para determinação das variáveis de entrada é utilizado o método baseado nas funções de covariância cruzada (Aguirre, 2004) da saída e todas as outras variáveis utilizadas como entrada. E, finalmente, a determinação do tempo de amostragem, com base nas funções de autocovariância linear e não-linear (Aguirre, 2004), descrito no Capítulo 2.

4.2.1.1 Variáveis disponíveis

As variáveis disponíveis no processo de lavagem da tira de aço serão brevemente descritas.

pH do líquido de lavagem nas zonas

A concentração do ácido clorídrico é medida pela determinação do pH (Potencial hidrogeniônico), no líquido de lavagem nas três zonas. O pH permite a quantificação da força de um ácido ou base (*alcali*), ou seja, o seu grau de dissociação iônica (Bega, 2003). Detalhes, ver Apêndice A.1.

Vazão de água limpa na zona de lavagem 3

A vazão de água limpa (clarificada ou industrial) na entrada do tanque é determinada pelo operador, pela manipulação de uma válvula manual.

Temperatura do líquido de lavagem na zona 3

A temperatura do líquido de lavagem na zona 3 é mantida em um valor que depende do material processado, por meio da malha de controle baseado no controlador PI (Proporcional e Integral). A malha consiste de um termopar, um controlador e uma válvula termostática que injeta vapor diretamente no líquido de lavagem acumulado na zona 3.

Largura da tira de aço

Varia de acordo com a especificação do produto. A largura da tira varia entre 1005-1089 mm.

Velocidade da tira de aço

A Velocidade da tira dentro do tanque de lavagem varia de acordo com o tipo do aço processado. A velocidade da tira varia entre 0-65 m/min.

A Tabela 4.1 apresenta a lista com as variáveis do processo disponíveis para coleta dos dados e respectivas unidades.

Tabela 4.1: Variáveis do processo de lavagem da tira de aço.

Nome	Descrição	Unidade
pH-1	pH do líquido de lavagem na zona 1	[-]
pH-2	pH do líquido de lavagem na zona 2	[-]
pH-3	pH do líquido de lavagem na zona 3	[-]
q	Vazão de entrada de água limpa na zona 3	m ³ /h
T	Temperatura do líquido de lavagem na zona 3	°C
L	Largura da tira de aço	mm
v	Velocidade da tira de aço	m/min

Detalhes sobre as características dos componentes utilizados na medição podem ser vistos no Apêndice A.

4.2.1.2 Escolha de variáveis de entrada

As variáveis do processo foram disponibilizadas pela instrumentação, os dados foram coletados pelo sistema supervisor e processados pelo *software* PI *DataLink*®¹, que é a solução da OSI soft para o sistema de gerenciamento das informações da planta denominado PIMS², sendo utilizado o sistema operacional *Windows*®. Detalhes do processamento de sinais são apresentados no Apêndice A. A coleta de dados das sete variáveis do processo, ver Tabela 4.1, foi realizada entre 12 de outubro de 2009 e 14 de outubro de 2009. Consiste de 17701 amostras, que correspondem a 49,25 horas.

A coleta de dados foi realizada com tempo de amostragem inicial (T_{si})³, igual a 10 s. Como o objetivo é a obtenção de um modelo que explique a concentração da água de lavagem na zona

¹Version 3.1.6.

²do inglês: *Process Information Management System* (Sistema de Gerenciamento de Informação da Planta).

³O tempo de amostragem inicial refere-se a taxa utilizada para determinação do tempo de amostragem de trabalho.

3, a variável pH do líquido de lavagem na zona 3 foi escolhida para ser a saída do modelo. As outras seis variáveis foram utilizadas como entradas.

Durante a coleta de dados, as variáveis foram disponibilizadas em operação normal do processo ⁴. A vazão de água na zona de lavagem 3, controlada pelo operador, é alterada com valores entre 2-10 m^3/h . O valor maior, 10 m^3/h , é determinado pela máxima vazão de água e o valor menor, 2 m^3/h , pelo fato de ser o menor valor permitido para manter a lavagem da tira de aço. Em caso de parada da linha o valor da vazão de água é zerado. A temperatura do líquido de lavagem na zona 3 é alterada com valores entre 59-78 °C, que são determinados pelas normas internas da ArcelorMittal Inox Brasil. As outras variáveis, utilizadas como entrada, não podem ser manipuladas, a saber: pH do líquido de lavagem na zona 1, pH do líquido de lavagem na zona 2, velocidade do processo e largura da tira, sendo as duas últimas por obedecerem ao planejamento da produção.

As variáveis selecionadas na análise das funções de covariância cruzada entre as seis variáveis de entrada e a saída são:

- pH do líquido de lavagem na zona 1;
- pH do líquido de lavagem na zona 2;
- Vazão da água limpa na zona de lavagem 3;
- Temperatura da água na zona de lavagem 3.

Entretanto, a partir da análise dos gráficos das funções de covariância cruzada entre as quatro variáveis candidatas a entradas, concluiu-se que há um certo grau de redundância entre elas e uma pode ser escolhida como entrada.

Kushner; Kushner (1994) apresentaram a curva com o valor máximo da concentração do líquido de lavagem e os cálculos para determinar a quantidade suficiente de água, para reduzir a concentração de entrada em uma única zona de lavagem e múltiplas zonas de lavagem, em paralelo e em série (contra-corrente). No Capítulo 3, foi descrita a importância do consumo de água no processo de lavagem da tira de aço. Neste contexto, foi definido como entrada a vazão de água limpa na zona de lavagem 3 que também oferece disponibilidade de manipulação.

⁴Equipamento processando material destinado ao cliente.

4.2.1.3 Escolha do tempo de amostragem

Escolhidos os sinais a serem utilizados na entrada e saída e o tempo de amostragem inicial de 10 s, o próximo passo é definir o tempo de amostragem de trabalho T_s ⁵. O tempo de amostragem de trabalho foi escolhido, de acordo com o procedimento descrito na Seção 2.2.

O sinal de entrada, vazão de água limpa na zona de lavagem 3, foi aplicado ao processo, e a função de autocovariância linear da saída foi calculada (usando a equação 2.1) e utilizada para escolher T_s , conforme pode ser observado na Figura 4.1(a). Pode-se verificar por esta figura que o sinal está sobreamostrado pois, conforme Aguirre (2004), o primeiro mínimo da autocovariância, medido em atrasos, deve estar no intervalo [5, 25] e o primeiro mínimo do sinal obtido é aproximadamente 2500. Com isso, uma decimação mínima de 100 e máxima de 500 é necessária. O tempo de amostragem de trabalho escolhido foi de 900 s. No entanto, é importante salientar que, procedendo desta maneira o sinal ainda estará sobreamostrado. A razão para esta escolha está em, com o tempo de amostragem menor, se for necessário, fazer uma decimação no sinal, antes da identificação.

A Figura 4.1(b) mostra as funções de autocovariância linear do sinal de saída do processo, com um tempo de amostragem de trabalho de 900 s. Observa-se que o primeiro mínimo da função de autocovariância foi obtido no atraso de aproximadamente 28. O mesmo resultado foi obtido pela função de autocovariância não-linear.

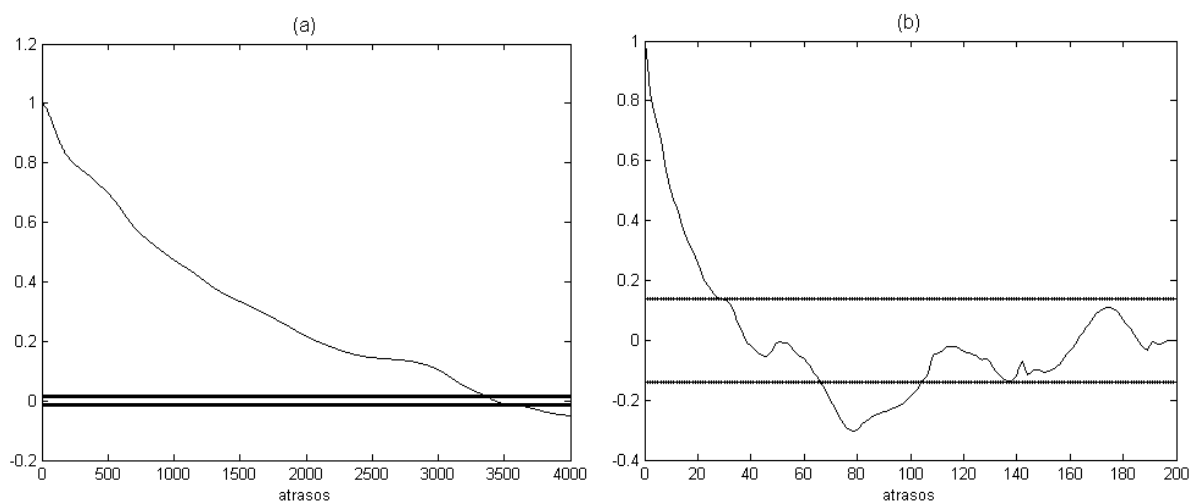


Figura 4.1: Funções de autocovariância linear do sinal de saída, para T_s : (a) 10s e (b) 900s.

⁵O tempo de amostragem de trabalho refere-se à taxa utilizada para detecção de estrutura e estimação de parâmetro do modelo.

Com base na taxa de amostragem inicial de 10 s, os dados de entrada e saída foram decimados, passando agora para uma taxa de amostragem de trabalho de 900 s, o que resulta em 197 amostras. Sendo que as primeiras 138 amostras foram utilizadas para identificação dos modelos e as últimas 69 amostras para validação dos mesmos.

Uma importante discussão está no efeito das entradas no tempo de amostragem. Para (Sohlberg, 1998) se as entradas são sinais com constantes *piece – wise* (não variam frequentemente), a decimação pode ser exata. Nos dados coletados a velocidade da tira de aço não varia frequentemente. Em função disso o tempo de amostragem é exato. Este é também o caso com a entrada vazão de água limpa na zona de lavagem 3, durante a operação normal do processo.

4.2.2 Obtenção dos modelos

Para obtenção dos modelos foram seguidos os procedimentos descritos brevemente no Capítulo 2 e envolve coleta de dados, escolha da representação matemática, determinação da estrutura, estimação de parâmetros e validação.

Neste trabalho, utilizou-se modelos *NARMAX* polinomiais para reproduzir a dinâmica do sinal de saída. Em função do grau de não linearidade (l), atrasos máximos da entrada (nu) e saída (ny) e ruído linear (ne), escolhidos de modo empírico, foi gerado o conjunto de todos os termos candidatos possíveis.

Os modelos foram identificados utilizando grau de não linearidade entre 2 a 5, com atrasos máximos de entrada e saída de 10, 20, 30 e 40. A busca dos melhores resultados foi obtida com a variação do número de termos de processo (np) de 5 a 30. Além disso, foram adicionados ao conjunto de termos 5 ou 20 termos de ruído linear, de forma a minimizar a polarização dos parâmetros do modelo. A parte média móvel não é usada para simulações, nem para calcular as características estáticas do modelo.

Foram escolhidos, então, o grau de não linearidade, os atrasos máximos, o número de termos de processo e de ruído, para compor o modelo. O procedimento de detecção da estrutura dos modelos foi implementado, a partir do critério do ERR, enquanto que o algoritmo que utiliza o MQE (Mínimos Quadrados Estendido), apresentado na Seção 2.5, foi utilizado para estimar os parâmetros.

A validação dinâmica dos modelos foi feita a partir da comparação entre a resposta dos modelos, as entradas das massas de dados e a resposta do processo de lavagem da tira de aço, a estas mesmas entradas. Foi utilizado o RMSE (Raiz do Erro Médio Quadrático), discutido na Seção 2.6, para verificar se o modelo é capaz de representar a dinâmica do sistema.

Os melhores modelos foram obtidos com grau de não linearidade igual a dois e três e são apresentados a seguir. Do conjunto de termos candidatos foram excluídos os termos do agrupamento $\Omega_{y^p u^m}$ com $p > 1$, de forma a garantir a existência de apenas um estado estacionário para a saída.

O modelo NARMAX polinomial, nomeado *mph42*, é representado pela equação 4.1. O grau de não linearidade é igual a 2. Os atrasos máximos de saída e de entrada são iguais a 20 e possui 20 termos de ruído linear. É constituído por 9 termos de processo. Sendo assim o seguinte modelo foi obtido:

$$\begin{aligned}
y_0(k) = & +0,9499 \times 10^{+0} y_1(k-1) \\
& +0,77664 \times 10^{+0} u_1(k-1) \\
& +0,14093 \times 10^{-2} u_1(k-2)u_1(k-1) \\
& +0,45381 \times 10^{-2} u_1(k-2)u_1(k-2) \\
& +0,80607 \times 10^{-1} u_1(k-2)y_1(k-2) \\
& +0,14891 \times 10^{-3} u_1(k-20)u_1(k-6) \\
& -0,95997 \times 10^{-2} u_1(k-1)u_1(k-1) \\
& -0,65083 \times 10^{+0} u_1(k-2) \\
& -0,878 \times 10^{-1} u_1(k-1)y_1(k-2) \\
& +0,25467 \times 10^{+0} e_1(k-1) \\
& -0,22012 \times 10^{+0} e_1(k-13) \\
& +0,13113 \times 10^{+0} e_1(k-9) \\
& -0,16565 \times 10^{+0} e_1(k-3) \\
& +0,12561 \times 10^{+0} e_1(k-8) \\
& -0,14779 \times 10^{+0} e_1(k-11) \\
& -0,13601 \times 10^{+0} e_1(k-15) \\
& -0,12951 \times 10^{+0} e_1(k-12) \\
& -0,10237 \times 10^{+0} e_1(k-4) \\
& -0,88778 \times 10^{-1} e_1(k-5) \\
& -0,96912 \times 10^{-1} e_1(k-19) \\
& -0,8448 \times 10^{-1} e_1(k-16) \\
& -0,76975 \times 10^{-1} e_1(k-14) \\
& -0,57225 \times 10^{-1} e_1(k-20) \\
& -0,38312 \times 10^{-1} e_1(k-17) \\
& -0,32787 \times 10^{-1} e_1(k-2) \\
& +0,27986 \times 10^{-1} e_1(k-10) \\
& -0,25293 \times 10^{-1} e_1(k-6) \\
& +0,18552 \times 10^{-1} e_1(k-7) \\
& +0,71349 \times 10^{-2} e_1(k-18)
\end{aligned} \tag{4.1}$$

O modelo NARMAX polinomial, nomeado *mph43*, é representado pela equação 4.2. O grau de não linearidade é igual a 3. Os atrasos máximos de saída e de entrada são iguais a 10

e possui 20 termos de ruído linear. É constituído por 9 termos de processo. Sendo assim o seguinte modelo foi obtido:

$$\begin{aligned}
y_0(k) = & +0,97725 \times 10^{+0} y_1(k-1) \\
& +0,15387 \times 10^{+0} u_1(k-1) \\
& -0,12324 \times 10^{-2} u_1(k-2)u_1(k-1)u_1(k-1) \\
& +0,59579 \times 10^{-3} u_1(k-2)u_1(k-2)u_1(k-2) \\
& -0,24392 \times 10^{-1} u_1(k-2)y_1(k-2) \\
& +0,32364 \times 10^{-4} u_1(k-9)u_1(k-6)u_1(k-6) \\
& -0,68064 \times 10^{-3} u_1(k-9)u_1(k-7)u_1(k-1) \\
& +0,65607 \times 10^{-3} u_1(k-9)u_1(k-7)u_1(k-2) \\
& +0,14355 \times 10^{-2} u_1(k-2)u_1(k-1)y_1(k-2) \\
& +0,19634 \times 10^{+0} e_1(k-8) \\
& -0,19966 \times 10^{+0} e_1(k-13) \\
& -0,17534 \times 10^{+0} e_1(k-11) \\
& -0,10454 \times 10^{+0} e_1(k-10) \\
& -0,10603 \times 10^{+0} e_1(k-1) \\
& +0,95669 \times 10^{-1} e_1(k-7) \\
& -0,1097 \times 10^{+0} e_1(k-15) \\
& +0,93153 \times 10^{-1} e_1(k-9) \\
& -0,97128 \times 10^{-1} e_1(k-12) \\
& -0,61604 \times 10^{-1} e_1(k-5) \\
& +0,43426 \times 10^{-1} e_1(k-2) \\
& +0,40079 \times 10^{-1} e_1(k-18) \\
& -0,48639 \times 10^{-1} e_1(k-14) \\
& -0,40408 \times 10^{-1} e_1(k-19) \\
& -0,40354 \times 10^{-1} e_1(k-4) \\
& -0,30234 \times 10^{-1} e_1(k-3) \\
& -0,22173 \times 10^{-1} e_1(k-16) \\
& +0,1746 \times 10^{-1} e_1(k-17) \\
& -0,162 \times 10^{-1} e_1(k-20) \\
& +0,73853 \times 10^{-3} e_1(k-6)
\end{aligned} \tag{4.2}$$

A Tabela 4.2 apresenta o comparativo dos índices *RMSE* dos modelos identificados para condição A. Os índices *RMSE* estão divididos em: **DI** - Dados de identificação, **DV** - Dados de validação. Analisando os índices do RMSE (Ver coluna DV da Tabela 4.2), pode-se verificar que o modelo NARMAX, com grau de não linearidade igual a três, não apresentou vantagens

relevantes, do ponto de vista da dinâmica do sistema, em relação ao modelo com grau de não linearidade igual a dois.

Tabela 4.2: Índices *RMSE* obtidos para modelos na condição A.

Modelo	RMSE	
	DI	DV
mph42	0,2146	0,7691
mph43	0,1799	0,7535

4.2.3 Estimação das características estáticas

A partir da representação escolhida, NARMAX polinomial, foram estimadas as características estáticas utilizando os conceitos descritos na Seção 2.7.

A partir da estrutura selecionada para o modelo 4.1, nomeado *mph42*, a seguinte expressão que relaciona $\bar{y} = f(\bar{u})$ pode ser escrita como a equação 4.3.

$$\bar{y} = \frac{0,1258\bar{u} - 0,0035\bar{u}^2}{0,0501 + 0,0072\bar{u}}. \quad (4.3)$$

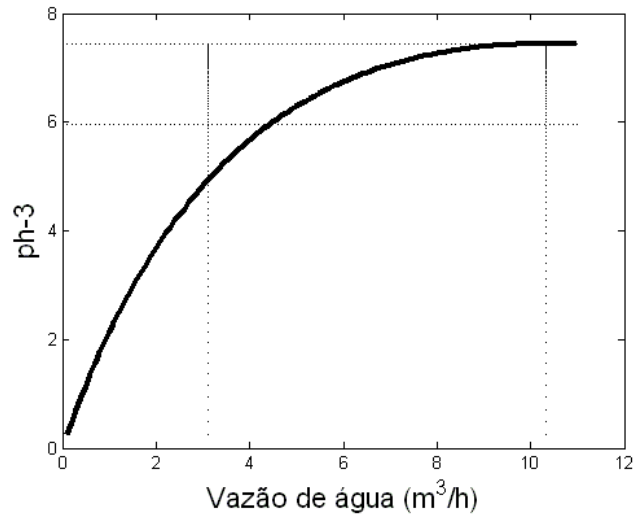
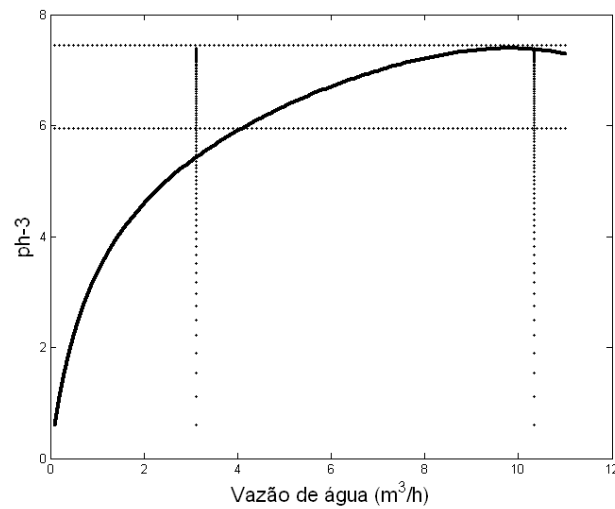
A característica estática obtida da equação 4.3 está apresentada na Figura 4.2. As linhas tracejadas mostram a região dos dados de identificação.

A partir da estrutura selecionada para o modelo 4.2, nomeado *mph43*, a seguinte expressão que relaciona $\bar{y} = f(\bar{u})$ pode ser escrita como a equação 4.4.

$$\bar{y} = \frac{0,1539\bar{u} - 0,0006\bar{u}^3}{0,0228 + 0,0244\bar{u} - 0,0014\bar{u}^2}. \quad (4.4)$$

A característica estática obtida da equação 4.4 está apresentada na Figura 4.3. As linhas tracejadas mostram a região dos dados de identificação.

Como pode ser observado, nas características estáticas dos modelos apresentados, dentro da região dos dados de identificação, o pH do líquido de lavagem da zona 3 atinge um ponto de máximo, a partir de um determinado valor de vazão de água, na zona de lavagem 3. Após o ponto de máximo, o aumento da vazão de água na entrada da zona 3 não influenciará o valor do pH do líquido de lavagem da zona 3.

Figura 4.2: Característica estática do modelo *mph42*.Figura 4.3: Característica estática do modelo *mph43*.

O valor do pH do líquido de lavagem da zona 3, no ponto de máximo, está em torno de sete, o que caracteriza a isenção de ácido clorídrico no líquido de lavagem. Portanto, nesta condição, não há necessidade de aumento de vazão de água, no processo de lavagem.

4.3 Identificação do processo com a condição B

Aguirre et al. (2002) exemplifica a variação das características estáticas em função do tempo, em um pequeno forno elétrico com ventilador ligado e desligado, utilizando a estimação recursiva ⁶.

E, segundo Bohlin (1994), o desgaste dos rolos espremedores interfere na eficiência do processo de lavagem, ou seja, há um maior consumo de água limpa na entrada do processo.

Dessa forma, optou-se por uma nova coleta de dados, obedecendo os procedimentos re-tromencionados, com os rolos espremedores novos, definida como condição B. O motivo da escolha desta condição dos rolos espremedores foi em função de ser o oposto em comparação a coleta de dados na condição A. O objetivo é verificar se o desgaste dos rolos espremedores interferem no ponto de máximo nas características estáticas dos modelos obtidos. Esta coleta foi obtida após a parada programada. Durante a parada programada, realizada em outubro de 2010, foram trocados os conjuntos dos rolos espremedores 4,5,6 e 7.

4.3.1 Coleta de dados

A coleta foi realizada entre 16 de outubro de 2009 e 21 de outubro de 2009, o que representou 46800 amostras, que correspondem 130 horas.

4.3.1.1 Escolha de variáveis de entrada

As variáveis utilizadas como entrada e saída foram determinadas na Seção 4.2.1, sendo a vazão de água na zona de lavagem 3 e o pH da água da zona de lavagem 3 como entrada e saída, respectivamente. Durante a coleta de dados, as variáveis, no processo de lavagem da tira de aço, foram disponibilizadas em operação normal do processo. A vazão de água na zona de lavagem 3, controlada pelo operador, é alterada com valores entre 2-10 m^3/h . Em caso de parada da linha, o valor da vazão de água é zerado. A temperatura do líquido de lavagem na zona 3 é alterada com valores entre 46-83 °C, valor determinado em função do material processado.

4.3.1.2 Escolha do tempo de amostragem

O tempo de amostragem inicial escolhido foi igual a 10 s. Seguindo o mesmo procedimento utilizado para a escolha do tempo de amostragem na Seção 4.2.1, chegou-se a um fator de decimação mínima de 56 e máxima de 280. Por uma questão de simplicidade, será usado o

⁶(Aguirre, 2004).

mesmo tempo de amostragem da Seção 4.2.1, que será igual a 900 s.

Com base no tempo de amostragem inicial de 10 s, os dados de entrada e saída foram decimados, passando agora para um tempo de amostragem de trabalho de 900 s, o que resulta em 520 amostras. Assim, as primeiras 364 amostras foram utilizadas para identificação dos modelos e as últimas 182, para validação dos mesmos.

4.3.2 Obtenção dos modelos

Para obtenção do modelo foi seguido o mesmo procedimento adotado em 4.2.2. Os melhores modelos foram obtidos com grau de não linearidade igual a dois e três e são apresentados a seguir. Do conjunto de termos candidatos foram excluídos os termos do agrupamento $\Omega_{y^{p_u}u^m}$ com $p > 1$, de forma a garantir a existência de apenas um estado estacionário para a saída.

O modelo NARMAX polinomial, nomeado *mph82*, é representado pela equação 4.5. O grau de não linearidade é igual a 2. Os atrasos máximos de saída e de entrada são iguais a 20 e possuem 20 termos de ruído linear. É constituído por 9 termos de processo. Sendo assim, o seguinte modelo foi obtido:

$$\begin{aligned}
y_0(k) = & +0,98925 \times 10^{+0} y_1(k-1) \\
& +0,78077 \times 10^{-1} u_1(k-1) \\
& -0,1463 \times 10^{-1} u_1(k-1) y_1(k-2) \\
& -0,88227 \times 10^{-2} u_1(k-8) u_1(k-8) \\
& +0,32007 \times 10^{-2} u_1(k-8) y_1(k-4) \\
& +0,10827 \times 10^{-1} u_1(k-8) u_1(k-1) \\
& +0,36706 \times 10^{-2} u_1(k-3) y_1(k-8) \\
& -0,29234 \times 10^{-2} u_1(k-3) u_1(k-1) \\
& -0,62064 \times 10^{-3} u_1(k-17) u_1(k-10) \\
& -0,18591 \times 10^{+0} e_1(k-2) \\
& -0,91419 \times 10^{-1} e_1(k-1) \\
& -0,112 \times 10^{+0} e_1(k-3) \\
& +0,53412 \times 10^{-1} e_1(k-10) \\
& +0,39604 \times 10^{-1} e_1(k-11) \\
& -0,44227 \times 10^{-1} e_1(k-6) \\
& -0,4654 \times 10^{-1} e_1(k-4) \\
& -0,3414 \times 10^{-1} e_1(k-12) \\
& -0,2471 \times 10^{-1} e_1(k-13) \\
& -0,216 \times 10^{-1} e_1(k-14) \\
& +0,20182 \times 10^{-1} e_1(k-20) \\
& -0,1581 \times 10^{-1} e_1(k-5) \\
& -0,95851 \times 10^{-2} e_1(k-7) \\
& +0,93538 \times 10^{-2} e_1(k-18) \\
& +0,79768 \times 10^{-2} e_1(k-15) \\
& +0,66368 \times 10^{-2} e_1(k-9) \\
& +0,58476 \times 10^{-2} e_1(k-19) \\
& -0,52862 \times 10^{-2} e_1(k-8) \\
& -0,874 \times 10^{-3} e_1(k-17) \\
& +0,38522 \times 10^{-3} e_1(k-16)
\end{aligned} \tag{4.5}$$

O modelo NARMAX polinomial, nomeado *mph83*, é representado pela equação 4.6. O grau de não linearidade é igual a 3. Os atrasos máximos de saída e de entrada são iguais a 20

e possuem 5 termos de ruído linear. É constituído por 11 termos de processo. Sendo assim, o seguinte modelo foi obtido:

$$\begin{aligned}
y_0(k) = & +0,98607 \times 10^{+0} y_1(k-1) \\
& +0,76876 \times 10^{-1} u_1(k-1) \\
& -0,21677 \times 10^{-2} u_1(k-1)u_1(k-1)y_1(k-2) \\
& +0,80234 \times 10^{-3} u_1(k-1)u_1(k-1)y_1(k-9) \\
& -0,66513 \times 10^{-3} u_1(k-17)u_1(k-10)u_1(k-9) \\
& +0,42243 \times 10^{-3} u_1(k-9)u_1(k-3)u_1(k-1) \\
& +0,15458 \times 10^{-2} u_1(k-17)u_1(k-10)u_1(k-1) \\
& -0,11954 \times 10^{-2} u_1(k-17)u_1(k-10)y_1(k-1) \\
& +0,92631 \times 10^{-3} u_1(k-14)u_1(k-5)y_1(k-4) \\
& -0,40442 \times 10^{-3} u_1(k-14)u_1(k-14)u_1(k-4) \\
& -0,50955 \times 10^{-3} u_1(k-5)u_1(k-1)y_1(k-2) \\
& -0,44093 \times 10^{-1} e_1(k-2) \\
& +0,4627 \times 10^{-1} e_1(k-1) \\
& -0,11795 \times 10^{-1} e_1(k-5) \\
& +0,12834 \times 10^{-1} e_1(k-3) \\
& +0,84384 \times 10^{-2} e_1(k-4)
\end{aligned} \tag{4.6}$$

A Tabela 4.3 apresenta o comparativo dos índices *RMSE* dos modelos identificados para condição B. Os índices *RMSE* estão divididos em: **DI** - Dados de identificação, **DV** - Dados de validação. Analisando os índices do *RMSE* (Ver coluna DV da Tabela 4.3) para condição B, pode-se verificar que o modelo NARMAX com grau de não linearidade igual a três não apresentou vantagens relevantes, do ponto de vista da dinâmica do sistema, em relação ao modelo com grau de não linearidade igual a dois.

Tabela 4.3: Índices *RMSE* obtidos para modelos na condição B.

Modelo	RMSE	
	DI	DV
mph82	0,6072	0,9452
mph83	0,7095	0,8592

4.3.3 Estimação das características estáticas

A partir da estrutura selecionada para o modelo 4.5, nomeado *mph82*, a seguinte expressão que relaciona $\bar{y} = f(\bar{u})$ pode ser escrita como a equação 4.7.

$$\bar{y} = \frac{0,0781\bar{u} - 0,0009\bar{u}^2}{0,0108 + 0,0077\bar{u}}. \quad (4.7)$$

A característica estática obtida da equação 4.7 está apresentada na Figura 4.4. As linhas tracejadas mostram a região dos dados de identificação.

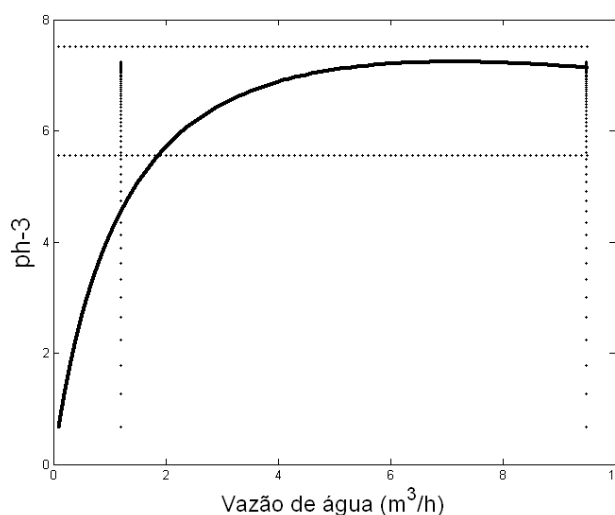


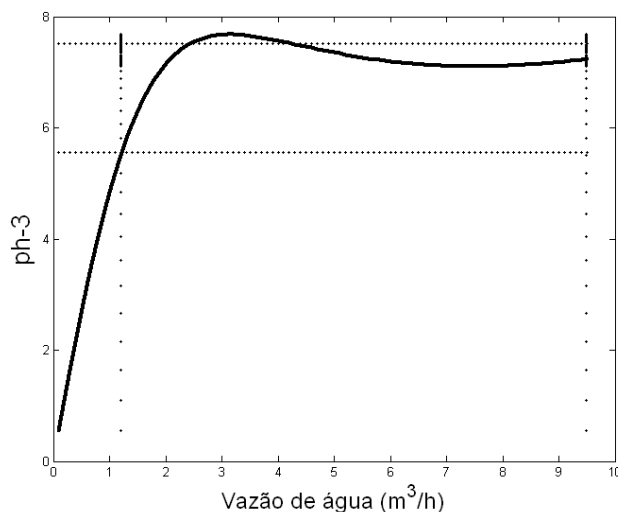
Figura 4.4: Característica estática do modelo *mph82*.

A partir da estrutura selecionada para o modelo 4.6, nomeado *mph83*, a seguinte expressão que relaciona $\bar{y} = f(\bar{u})$ pode ser escrita como a equação 4.8.

$$\bar{y} = \frac{0,0769\bar{u} + 0,0008\bar{u}^3}{0,0193 + 0,0022\bar{u}^2}. \quad (4.8)$$

A característica estática obtida da equação 4.8 está apresentada na Figura 4.5. As linhas tracejadas mostram a região dos dados de identificação.

Pode-se verificar, nas características estáticas dos modelos apresentados, dentro da região dos dados para obtenção dos modelos, que o pH da água na zona de lavagem 3 atinge o ponto de máximo para um valor de vazão de água na zona de lavagem 3, nos dois modelos.

Figura 4.5: Característica estática do modelo *mph83*.

Além disso, nas Figuras 4.2 e 4.3 o ponto de máximo ocorre em um valor maior de vazão de água em comparação às Figuras 4.4 e 4.5.

Portanto, nos rolos com desgaste há um consumo maior de água limpa para atingir o ponto de máximo do pH do líquido de lavagem da zona 3, em comparação ao consumo de água para atingir o ponto de máximo do pH, com rolos espremedores novos.

4.4 Identificação do processo com a condição C

As características estáticas apresentadas na Seção 4.2.3 obtidas com rolos espremedores novos e na Seção 4.3.3 obtidas com rolos espremedores com desgaste representam os extremos em relação ao estado dos rolos espremedores. Em função disso, optou-se pela obtenção de modelos para diferentes estados dos rolos espremedores. O objetivo é apresentar uma característica estática, obtida do modelo, a cada semana de utilização dos rolos espremedores.

4.4.1 Coleta de dados

A coleta dos dados foi realizada entre 23 de dezembro de 2009 e 23 de fevereiro de 2010, que representou 5948 amostras, que correspondem a 1487 horas. A coleta foi iniciada uma semana após a parada programada, realizada em dezembro de 2009 e finalizada uma semana antes da parada programada, realizada em fevereiro de 2010, ou seja, início a partir da segunda

semana de utilização dos rolos espremedores e final na sétima semana de utilização dos mesmos.

Durante a coleta, as variáveis no processo de lavagem da tira de aço foram disponibilizadas em operação normal do processo. A entrada, vazão de água limpa na zona de lavagem 3, foi alterada em função da necessidade do processo. Como o objetivo é o levantamento da característica estática, a cada semana de operação, a massa de dados foi dividida em seis massas de dados. As massas de dados obtidas foram nomeadas de *dad31* a *dad36*.

4.4.1.1 Escolha de variáveis de entrada

As variáveis utilizadas como entrada e saída nesta seção são as mesmas determinadas na Seção 4.2.1, sendo a vazão de água limpa na zona de lavagem 3 e o pH do líquido de lavagem da zona 3 como entrada e saída, respectivamente.

4.4.1.2 Escolha do tempo de amostragem

O tempo de amostragem inicial (T_{si}) foi de 900 s. Uma vez que as condições desta coleta são diferentes das condições das duas coletas precedentes, em cuja entrada foi manipulada pelo operador entre os patamares pré-estabelecidos, houve a necessidade da decimação dos dados. Por uma questão de simplicidade, o tempo de amostragem de trabalho determinado com a utilização dos gráficos das funções de autocovariância linear foi considerado idêntico nas seis massas de dados, sendo de 4500 s. Os mesmos resultados foram obtidos nas massas de dados para os gráficos da função de autocovariância não linear. Os últimos 35% dos dados coletados foram utilizados na validação.

4.4.2 Obtenção dos modelos

Para obtenção do modelo foi seguido o mesmo procedimento adotado em 4.2.2. Os melhores modelos foram obtidos com grau de não linearidade igual a dois. Do conjunto de termos candidatos foram excluídos os termos do agrupamento Ω_{ypum} com $p > 1$, de forma a garantir a existência de apenas um estado estacionário para a saída.

Das seis massas de dados disponíveis, foram obtidos três modelos para a segunda, terceira e quarta semana de utilização dos rolos espremedores, denominados *mph912*, *mph922* e *mph932*, respectivamente. Para quinta, sexta e sétima semanas de utilização dos rolos espremedores, denominados *mph942*, *mph952* e *mph962* não foram obtidos modelos com índice RMSE menor que a unidade.

O modelo NARMAX polinomial, nomeado *mph912*, é representado pela equação 4.9. Os atrasos máximos de saída e de entrada são iguais a 20 e possuem 20 termos de ruído linear. É constituído por 5 termos de processo. Sendo assim o seguinte modelo foi obtido:

$$\begin{aligned}
y_0(k) = & +0,90512 \times 10^{+0} y_1(k-1) \\
& -0,15811 \times 10^{-2} u_1(k-1)y_1(k-20) \\
& -0,71428 \times 10^{-2} u_1(k-4)u_1(k-3) \\
& +0,39902 \times 10^{+0} u_1(k-1) \\
& -0,30694 \times 10^{-1} u_1(k-1)y_1(k-2) \\
& -0,21301 \times 10^{+0} e_1(k-14) \\
& -0,15852 \times 10^{+0} e_1(k-6) \\
& -0,1564 \times 10^{+0} e_1(k-15) \\
& -0,16958 \times 10^{+0} e_1(k-18) \\
& +0,8475 \times 10^{-1} e_1(k-10) \\
& -0,13015 \times 10^{+0} e_1(k-20) \\
& -0,11283 \times 10^{+0} e_1(k-9) \\
& +0,75317 \times 10^{-1} e_1(k-3) \\
& -0,8303 \times 10^{-1} e_1(k-12) \\
& -0,75943 \times 10^{-1} e_1(k-13) \\
& -0,73198 \times 10^{-1} e_1(k-5) \\
& -0,72134 \times 10^{-1} e_1(k-19) \\
& -0,56598 \times 10^{-1} e_1(k-1) \\
& -0,59572 \times 10^{-1} e_1(k-8) \\
& -0,43258 \times 10^{-1} e_1(k-7) \\
& -0,35441 \times 10^{-1} e_1(k-16) \\
& +0,30753 \times 10^{-1} e_1(k-17) \\
& +0,13221 \times 10^{-1} e_1(k-4) \\
& -0,70631 \times 10^{-2} e_1(k-11) \\
& +0,27487 \times 10^{-3} e_1(k-2)
\end{aligned} \tag{4.9}$$

O modelo NARMAX polinomial, nomeado *mph922*, é representado pela equação 4.10. Os atrasos máximos de saída e de entrada são iguais a 20 e possuem 5 termos de ruído linear. É constituído por 15 termos de processo. Sendo assim o seguinte modelo foi obtido:

$$\begin{aligned}
y_0(k) = & +0,89929 \times 10^{+0} y_1(k-1) \\
& +0,3388 \times 10^{-1} y_1(k-5) \\
& +0,24425 \times 10^{-1} u_1(k-19)y_1(k-16) \\
& -0,23952 \times 10^{-1} u_1(k-19)y_1(k-18) \\
& -0,43045 \times 10^{-1} u_1(k-13)y_1(k-13) \\
& +0,47808 \times 10^{-2} u_1(k-12)u_1(k-6) \\
& +0,41141 \times 10^{-1} u_1(k-13)y_1(k-12) \\
& +0,3275 \times 10^{-1} u_1(k-17)y_1(k-14) \\
& -0,24378 \times 10^{-1} u_1(k-17)y_1(k-15) \\
& +0,73744 \times 10^{-2} u_1(k-11)y_1(k-17) \\
& -0,33182 \times 10^{-1} u_1(k-9)y_1(k-10) \\
& +0,23134 \times 10^{-1} u_1(k-9)y_1(k-9) \\
& +0,10704 \times 10^{+0} u_1(k-7) \\
& -0,45522 \times 10^{-2} u_1(k-15)u_1(k-3) \\
& -0,98797 \times 10^{-2} u_1(k-13)u_1(k-7) \\
& -0,116 \times 10^{+0} e_1(k-2) \\
& -0,59198 \times 10^{-1} e_1(k-4) \\
& +0,29827 \times 10^{-1} e_1(k-1) \\
& +0,20208 \times 10^{-1} e_1(k-3) \\
& -0,16626 \times 10^{-2} e_1(k-5)
\end{aligned} \tag{4.10}$$

O modelo NARMAX polinomial, nomeado *mph932*, é representado pela equação 4.11. Os atrasos máximos de saída e de entrada são iguais a 10 e possuem 20 termos de ruído linear. É constituído por 7 termos de processo. Sendo assim o seguinte modelo foi obtido:

$$\begin{aligned}
y_0(k) = & +0,69258 \times 10^{+0} y_1(k-1) \\
& +0,2328 \times 10^{+0} u_1(k-1) \\
& -0,13786 \times 10^{-1} u_1(k-1)u_1(k-1) \\
& +0,17084 \times 10^{+0} y_1(k-3) \\
& -0,13504 \times 10^{-1} u_1(k-10)u_1(k-5) \\
& +0,82852 \times 10^{-2} u_1(k-10)u_1(k-4) \\
& +0,62415 \times 10^{-2} u_1(k-7)y_1(k-6) \\
& -0,2201 \times 10^{+0} e_1(k-19) \\
& -0,15223 \times 10^{+0} e_1(k-14) \\
& -0,11267 \times 10^{+0} e_1(k-4) \\
& -0,1209 \times 10^{+0} e_1(k-20) \\
& +0,81794 \times 10^{-1} e_1(k-3) \\
& +0,55192 \times 10^{-1} e_1(k-13) \\
& +0,61317 \times 10^{-1} e_1(k-12) \\
& +0,536 \times 10^{-1} e_1(k-17) \\
& -0,58278 \times 10^{-1} e_1(k-15) \\
& -0,48132 \times 10^{-1} e_1(k-10) \\
& -0,4886 \times 10^{-1} e_1(k-7) \\
& +0,48358 \times 10^{-1} e_1(k-6) \\
& +0,56089 \times 10^{-1} e_1(k-9) \\
& -0,60887 \times 10^{-1} e_1(k-2) \\
& -0,30877 \times 10^{-1} e_1(k-16) \\
& -0,31157 \times 10^{-1} e_1(k-18) \\
& -0,36563 \times 10^{-1} e_1(k-1) \\
& +0,19321 \times 10^{-1} e_1(k-5) \\
& -0,1701 \times 10^{-1} e_1(k-8) \\
& +0,16502 \times 10^{-4} e_1(k-11)
\end{aligned} \tag{4.11}$$

A Tabela 4.4 apresenta o comparativo dos índices *RMSE* dos modelos identificados para condição C. Os índices *RMSE* estão divididos em: **DI** - Dados de identificação, **DV** - Dados de validação. Analisando os índices do RMSE (Ver coluna DV da Tabela 4.4), fica claro que o modelo *mph912* apresentou melhor resultado, RMSE com menor valor, em comparação aos modelos *mph922* e *mph932*. Esse fato pode ser justificado pelos dados de identificação. A entrada utilizada para o primeiro modelo sofreu variações em patamares maiores que do segundo e do terceiro modelo.

Tabela 4.4: Índices *RMSE* obtidos para modelos na condição C.

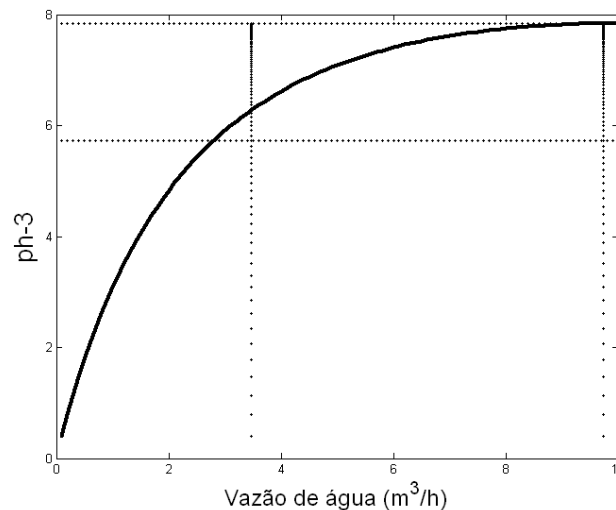
Modelo	RMSE	
	DI	DV
mph912	0,6699	0,8094
mph922	0,8042	0,9447
mph932	0,5906	0,9920

4.4.3 Estimação de características estáticas

A partir da estrutura selecionada para o modelo 4.9, nomeado *mph912*, a seguinte expressão que relaciona $\bar{y} = f(\bar{u})$ pode ser escrita como a equação 4.12.

$$\bar{y} = \frac{0,399\bar{u} - 0,0071\bar{u}^2}{0,0949 + 0,0323\bar{u}}. \quad (4.12)$$

A característica estática obtida da equação 4.12 está apresentada na Figura 4.6. As linhas tracejadas mostram a região dos dados de identificação.

Figura 4.6: Característica estática do modelo *mph912*.

A partir da estrutura selecionada para o modelo 4.10, nomeado *mph922*, a seguinte expressão que relaciona $\bar{y} = f(\bar{u})$ pode ser escrita como a equação 4.13.

$$\bar{y} = \frac{0,107\bar{u} - 0,0097\bar{u}^2}{0,0668 - 0,0042\bar{u}}. \quad (4.13)$$

A característica estática obtida da equação 4.13 está apresentada na Figura 4.7. As linhas tracejadas mostram a região dos dados de identificação.

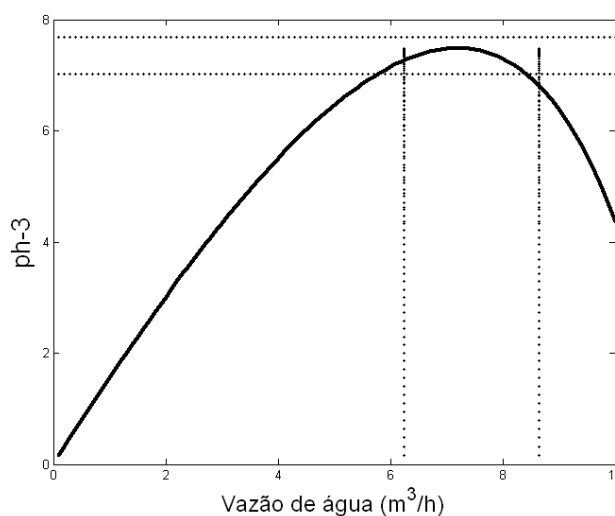


Figura 4.7: Característica estática do modelo *mph922*.

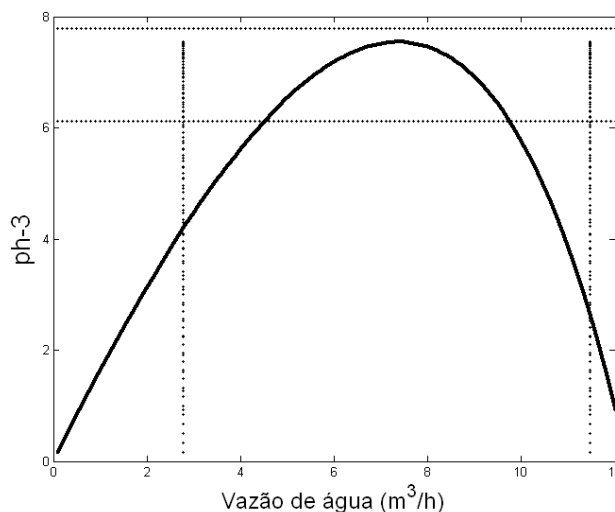
A partir da estrutura selecionada para o modelo 4.11, nomeado *mph932*, a seguinte expressão que relaciona $\bar{y} = f(\bar{u})$ pode ser escrita como a equação 4.14.

$$\bar{y} = \frac{0,2328\bar{u} - 0,019\bar{u}^2}{0,1366 - 0,0062\bar{u}}. \quad (4.14)$$

A característica estática obtida da equação 4.14 está apresentada na Figura 4.8. As linhas tracejadas mostram a região dos dados de identificação.

Nas características estáticas dos modelos apresentados, dentro da região dos dados de identificação, o pH da água na zona de lavagem 3 atinge o ponto de máximo para diferentes valores de vazão de água na zona de lavagem 3. Este fato é justificado, em função do valor do pH do líquido de lavagem da zona 3 atingir o valor do pH da água limpa, em torno de sete.

Também nas características estáticas obtidas a partir dos modelos *mph922* e *mph932* foi observado um valor decrescente, ganho negativo, a partir do ponto de máximo na saída. Este fato é justificado pela massa de dados utilizada para identificação. A partir deste valor, há

Figura 4.8: Característica estática do modelo *mph932*.

poucos dados disponíveis, em função da massa de dados ser coletada em operação normal do processo. Esta situação não é verificada na característica estática apresentada na Figura 4.6, obtida com maior variação dos patamares na entrada. Além disso, o RMSE com melhor resultado foi apresentado para o modelo *mph912*, em comparação aos modelos *mph922* e *mph932*.

4.5 Papel das características estáticas no processo de lavagem

Um ponto importante a ser tratado é sobre a quantidade de água suficiente para reduzir a concentração na zona de lavagem 3. O objetivo é utilizar as características estáticas obtidas a partir dos modelos NARMAX polinomial, para estabelecer os valores de vazão máxima de água, a ser utilizada na zona de lavagem 3, em função dos desgastes dos rolos espremedores.

Para encontrar a vazão máxima de água, necessária para o início do ponto de máximo do pH da água de lavagem na zona 3, determinou-se que na derivada da característica estática é encontrado o valor 10% acima do zero.

Foram obtidas características estáticas em três condições. Na condição A, com rolos espremedores com desgaste, na condição B, com rolos espremedores novos e na condição C, para diferentes estados dos rolos espremedores.

4.5.1 Vazão máxima de água obtida a partir das características estáticas

A seguir são apresentados os valores obtidos para vazão máxima de água na zona de lavagem 3, a partir das características estáticas nas três condições.

Na Tabela 4.5 são apresentados os resultados obtidos para a condição A. Como pode ser observado, nas características estáticas obtidas, a partir dos modelos *mph42* e *mph43*, ou seja, com rolos espremedores com desgaste, os valores da vazão máxima de água na zona de lavagem 3 apresentaram uma diferença da ordem de 10%.

Tabela 4.5: Vazão máxima de água para condição A.

Modelos	Vazão máxima de água (m^3/h)
<i>mph42</i>	8,6
<i>mph43</i>	7,8

Na Tabela 4.6 são apresentados os resultados obtidos para a condição B. Nas características estáticas obtidas a partir dos modelos *mph82* e *mph83*, ou seja, com rolos espremedores novos, os valores da vazão máxima de água na zona de lavagem 3 apresentaram uma diferença da ordem de 40%.

Tabela 4.6: Vazão máxima de água para condição B.

Modelos	Vazão máxima de água (m^3/h)
<i>mph82</i>	4,4
<i>mph83</i>	2,5

Os valores da vazão máxima de água na zona de lavagem 3, obtidos com os modelos *mph42* e *mph43*, apresentaram valores maiores, em comparação aos modelos *mph82* e *mph83*. De fato comprova o aumento do consumo de água com a utilização de rolos espremedores com desgaste, em comparação à utilização com rolos espremedores novos no processo de lavagem.

Os resultados obtidos, a partir das características estáticas dos modelos para condição C, são mostrados na Tabela 4.7. Os modelos *mph912*, *mph922* e *mph932* representam a segunda,

a terceira e a quarta semana, respectivamente, de utilização dos rolos espremedores. Os valores demonstram o aumento do valor da vazão máxima de água, na zona de lavagem 3, com o desgaste dos rolos espremedores.

Tabela 4.7: Vazão máxima de água para condição C.

Modelos	Vazão máxima de água (m^3/h)
<i>mph912</i>	5,2
<i>mph922</i>	6,9
<i>mph932</i>	7,0

4.5.2 Proposta de vazão máxima de água para o processo de lavagem

A Tabela 4.8 apresenta o valor da vazão máxima de água, na zona de lavagem 3, a cada semana de utilização dos rolos espremedores, no processo de lavagem. Na primeira semana foi considerado o maior valor de vazão máxima, entre os modelos *mph82* e *mph83*, ou seja, 4,4, apresentado na Tabela 4.6. Na segunda, terceira e quarta semana de utilização dos rolos espremedores foram utilizados os valores obtidos pelos modelos *mph912*, *mph922* e *mph932*, respectivamente, valores apresentados na Tabela 4.7. Entre a quinta e a oitava semana, o valor utilizado, como referência, foi o maior valor entre os modelos *mph42* e *mph43*, ou seja, 8,6, apresentado na Tabela 4.5.

Tabela 4.8: Vazão máxima de água sugerida pelas características estáticas dos modelos em cada condição e em cada período.

Período	Modelos utilizados	Vazão máxima de água (m^3/h)
1 ^a semana	<i>mph82</i>	4,4
2 ^a semana	<i>mph912</i>	5,2
3 ^a semana	<i>mph922</i>	6,9
4 ^a semana	<i>mph932</i>	7,0
5 ^a – 8 ^a semana	<i>mph42</i>	8,6

4.6 Conclusões do capítulo

Foram abordados, neste capítulo, a metodologia para obtenção dos valores de vazão máxima, a partir das características estáticas de modelos NARMAX polinomial, descritas no Capítulo 2.

Analisando os índices do RMSE para os modelos identificados em batelada, fica claro que os modelos identificados na condição A e B apresentaram melhores resultados, RMSE com menor valor, que os modelos na condição C. Esse fato pode ser justificado pelos dados para obtenção do modelo. A entrada utilizada para os modelos na condição A e B foi efetuada com patamares máximo e mínimo pré-definidos. Na condição C a entrada foi alterada pelo operador, conforme necessidade do processo.

Nas características estáticas apresentadas há um ponto de máximo para o valor do pH do líquido de lavagem da zona 3. O ponto de máximo variou com o desgaste dos rolos espreme-dores. A partir dos valores de vazão máxima obtidos no ponto de máximo, em cada caracterís-tica estática dos modelos, foi proposta a Tabela 4.8, que contém os valores de vazão máxima de água, no processo de lavagem da tira de aço, a cada semana de utilização dos rolos espreme-dores.

Capítulo 5

Resultados e Discussão

5.1 Introdução

Neste capítulo são apresentados os resultados antes e após a modificação no processo e, posteriormente, a implantação da proposta de vazão máxima de água, a partir das características estáticas dos modelos NARMAX polinomiais, obtidas em função do desgaste dos rolos espremedores, no processo de lavagem da tira de aço, determinadas no Capítulo 4. São apresentadas análises comparativas em termos de economia de água, com o consumo de água entre os períodos das paradas programadas, e qualidade da lavagem com o número de análises de pH das zonas 1, 2 e 3, fora de faixa estabelecida pelo fabricante da unidade de lavagem da tira de aço.

Inicialmente, na Seção 5.2, é estimado o consumo de água no processo de lavagem original. Na Seção 5.3, são apresentados os resultados no processo de lavagem, após implementação da vazão máxima e, finalmente, na Seção 5.4, são apresentadas as comparações dos resultados obtidos nos experimentos preliminares e na implementação da limitação máxima de vazão, em termos de economia de água e de qualidade da lavagem.

5.2 O processo de lavagem original

Em julho de 2009, o tanque de lavagem foi substituído durante RCO¹ (retorno as condições originais) da decapagem. Em função disso, não foi possível mensurar o consumo antes da

¹Reforma no processo operacional.

modificação do processo. Entretanto, entre o período de 16 de agosto a 10 de outubro de 2009 ou 1320 horas (55 dias), o consumo total de água na unidade de lavagem foi estimado, esta estimativa é denominada Experimento 1. O consumo total de água é determinado pela soma do consumo de água no conjunto dos bicos de alta pressão na zona 2 e zona 3 e consumo medido pela entrada de água da zona 3 (Silva, 1999).

Assim, o consumo total de água, no processo de lavagem da tira de aço, durante o período de 1320 horas (55 dias), foi de $25911 m^3$, ver Apêndice B. A vazão média foi de $19,6 m^3/h$.

5.3 O processo de lavagem atual

Com o objetivo de comparar os valores de vazão máxima, após modificação no processo com o vazão máxima, sugerida pelas características estáticas dos modelos, foram realizados dois experimentos, denominado Experimento 2 e 3. Nesse período, os valores sugeridos não influíram nas decisões operacionais, servindo de referência para a avaliação dos resultados.

O Experimento 2 foi realizado entre 18 de outubro de 2009 e 12 de dezembro de 2009. O Experimento 3 foi realizado entre 20 de dezembro de 2009 e 13 de fevereiro de 2010. Os experimentos foram inicializados com rolos espremedores novos e finalizados com rolos espremedores com desgaste. Ambos consistem de 5280 amostras, que correspondem a 1320 horas (55 dias). A verificação do consumo de água limpa no processo foi obtida pela monitoração no PIMS.

Na Tabela 5.1, são apresentados os valores propostos para limitação da máxima vazão de água, no processo de lavagem, a partir das características estáticas dos modelos (Q_{max}) e o valor médio, a cada semana de operação para os Experimentos 2 e 3, ambas a cada semana de operação. Nota-se, que entre a primeira e quarta semanas os valores de vazão máxima, a partir das características estáticas dos modelos, estão abaixo da vazão média real, no segundo e terceiro experimentos. Durante a quinta semana, o terceiro experimento apresentou valor menor em função de problema na unidade de lavagem. Neste período, não houve medição de vazão total na entrada da zona de lavagem 3. Entre a quinta e oitava semanas, os valores de vazão máxima sugeridos a partir das características estáticas dos modelos, estão acima dos valores médio real, isto é explicado pelo fato da utilização do valor máximo, a partir da característica estática do modelo obtido para a oitava semana.

Tabela 5.1: Resultados dos Experimentos 2 e 3.

Período	Q_{max} (m^3/h)	Experimento 2 (m^3/h)	Experimento 3 (m^3/h)
1º semana	4,4	7,39	6,56
2º semana	5,2	6,20	6,54
3º semana	6,9	6,82	7,44
4º semana	7,0	7,85	7,50
5º semana	8,6	8,34	6,22
6º semana	8,6	7,33	6,90
7º semana	8,6	6,23	7,22
8º semana	8,6	7,60	7,11

As Figuras 5.1 e 5.2 apresentam os gráficos com a comparação entre o valor instantâneo da vazão real de água utilizada no processo de lavagem para o Experimento 2 e 3 (linha pontilhada) e os valores de vazão máxima de água (Q_{max}), a partir das características estáticas dos modelos a cada semana (linha contínua). Em caso de parada do processo, a válvula de controle de vazão de água na zona 3 é fechada. Isto justifica o valor de vazão real zerado no segundo e terceiro experimento. Pode ser observado que, no período entre a primeira e quarta semanas, os valores da vazão real estão acima dos valores da vazão máxima, a partir das características estáticas dos modelos, o que demonstra o excesso no consumo de água no processo de lavagem da tira de aço. Entre a quinta e oitava semanas, não houve o mesmo comportamento em função da utilização do valor obtido, para a oitava semana, no período entre quinta e sétima semanas.

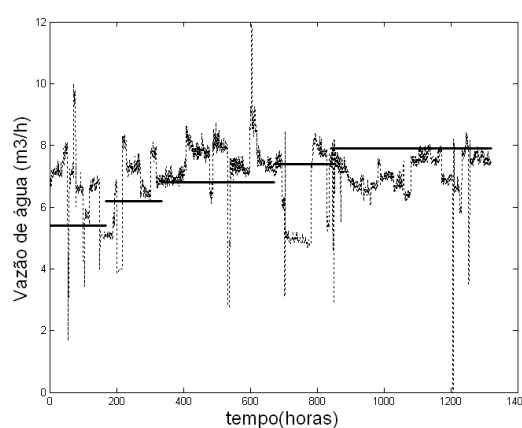
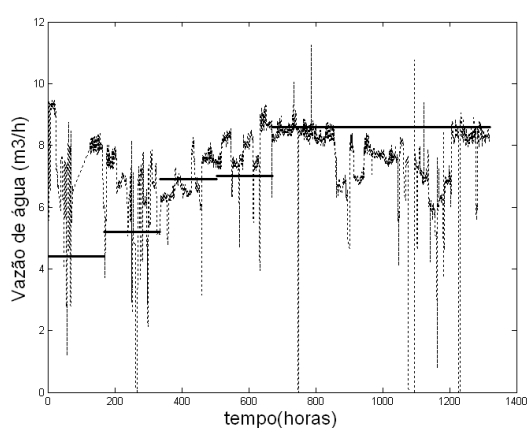


Figura 5.1: Comparação entre Experimento 2 e Figura 5.2: Comparação entre Experimento 3 e vazão máxima (Q_{max}).

5.4 O processo com a limitação da vazão de água

A proposta é utilizar os valores da vazão máxima obtidos, a partir das características estáticas dos modelos, a cada semana de utilização dos rolos espremedores, obtidas no Capítulo 4, para orientação do operador no processo de lavagem.

A implementação da vazão máxima de água no processo de lavagem da tira, denominada Experimento 4, foi realizada com a limitação da vazão de água pela válvula manual controlada pelo operador. Foi realizada entre 28 fevereiro e 24 de abril de 2010, ou seja, iniciando com rolos espremedores novos e finalizando com rolos espremedores com desgaste, o que representou 5280 amostras, que correspondem a 1320 horas (55 dias).

A unidade de lavagem foi projetada para trabalhar com água clarificada, mas acredita-se que, em função do alto consumo e oscilação de pressão, o processo utiliza água de emergência. Entretanto, neste experimento foi utilizado água clarificada, ao invés de água de emergência, em função de problemas com fornecimento da água de emergência.

Na Tabela 5.2 são apresentados os valores de vazão máxima de água (Q_{max}), a partir das características estáticas dos modelos e o valor médio real da vazão de água, no processo de lavagem, ambas a cada semana de operação. Em todas as semanas, os valores máximo de vazão foi superior aos valores médio real. Na oitava semana de teste, o conjunto de rolos espremedores número seis (6) apresentaram problemas, sendo necessária a inserção de água clarificada pelo conjunto de bicos a alta pressão, obtida pela válvula manual de emergência, tornando inviável a experiência neste período.

Tabela 5.2: Resultados do Experimento 4.

Período	$Q_{max}(m^3/h)$	Experimento 4 (m^3/h)
1° semana	4,4	4,04
2° semana	5,2	5,32
3° semana	6,9	5,75
4° semana	7,0	5,83
5° semana	8,6	5,91
6° semana	8,6	5,22
7° semana	8,6	5,73
8° semana	8,6	-

A Figura 5.3 apresenta o gráfico com a comparação entre a vazão real de água durante

o Experimento 4 (linha pontilhada) e a vazão máxima de água (Q_{max}) sugerida, a partir das características estáticas dos modelos (linha contínua), exceto a oitava semana. Pode-se verificar que o valor de vazão real no Experimento 4, considerando valor médio, é menor que o valor de vazão máxima de água. Em função da oscilação da pressão de entrada de água clarificada, não foi possível manter a vazão de água real em valores fixados pelos operadores.

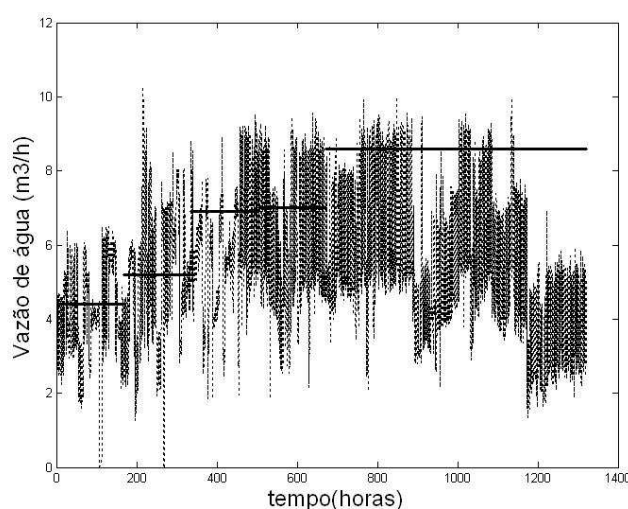


Figura 5.3: Comparação entre Experimento 4 e vazão máxima (Q_{max}).

5.5 Análises comparativas

A seguir, serão analisados os resultados obtidos pelos Experimentos 1, 2, 3 e 4, em termos de economia de água e em função da qualidade da lavagem, exceto o experimento 1, que foi avaliado somente em termos de economia de água, em função do consumo de água ter sido estimado.

5.5.1 Em termos de economia de água

A Tabela 5.3 apresenta os valores do consumo de água em cada experimento, durante o período de 1152 horas (48 dias), excluía a oitava semana, em função do problema com os rolos espremedores. O consumo de água durante o primeiro experimento, ou seja, consumo de água estimado anterior a modificação do processo foi de $22625 m^3$, ver Apêndice B. O consumo de água, medido, durante o segundo e o terceiro experimento, ou seja, anterior a implementação da vazão máxima de água, a partir das características estáticas dos modelos foram de $7827 m^3$

e $8237 m^3$, respectivamente. O consumo de água, medido, no quarto experimento, ou seja, posterior a implementação da vazão máxima de água, a partir das características estáticas dos modelos foi de $6522 m^3$.

Tabela 5.3: Consumo de água no processo de lavagem em cada experimento

Experimentos	Consumo (m^3)
1	22625
2	7827
3	8237
4	6522

A Figura 5.4 apresenta um comparativo entre o consumo de água estimado anterior a modificação do processo (Experimento 1) e, ainda, a situação anterior (Experimentos 2 e 3) e posterior (Experimento 4) à implementação da vazão máxima de água, a partir das características estáticas dos modelos.

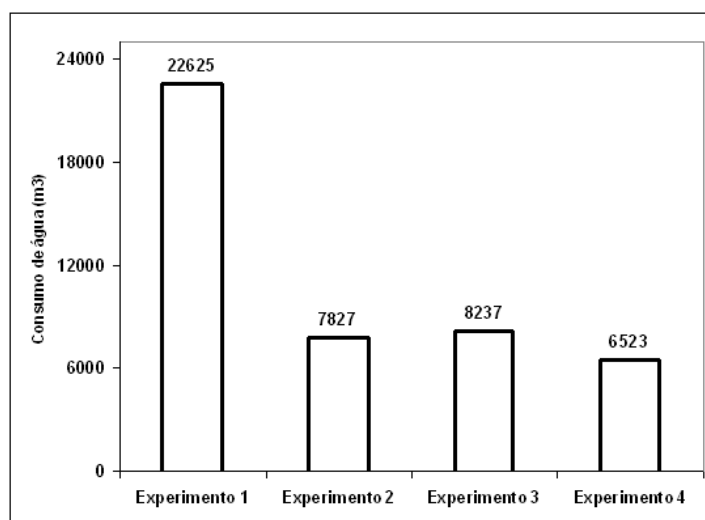


Figura 5.4: Comparação dos resultados: Consumo de água em cada experimento.

5.5.2 Em termos de qualidade da lavagem

Visando manter a qualidade da lavagem, durante o processo de redução do consumo de água no processo de lavagem, foram verificados se o pH das zonas de lavagem estão dentro

da faixa estabelecida pelas normas internas da ArcelorMittal Inox Brasil. Foram verificadas o número de análises de pH das zonas 1, 2 e 3, durante os períodos dos Experimentos 2, 3 e 4. Os valores das variáveis não podem ser divulgados, por se tratar de propriedade industrial.

5.5.2.1 Número de análises de pH

A Figura 5.5 apresenta o número de análises de pH, para o Experimento 2, realizada entre 18 de outubro de 2009 e 05 de dezembro de 2009. Pode ser observado que, na zona 1, foram 20 análises fora da faixa, ou seja, 8,13%, na zona 2 foram 88 análises fora da faixa, ou seja, 35,63% e na zona 3 foram 24 análises fora da faixa, 9,79%.

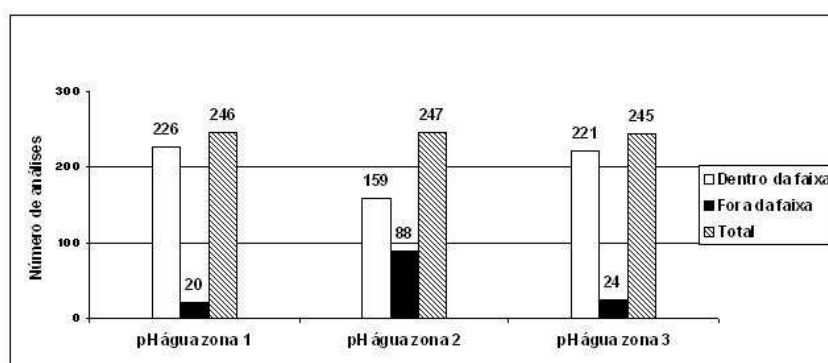


Figura 5.5: Número de análises realizadas durante o período do Experimento 2.

A Figura 5.6 apresenta o número de análises de pH, para o Experimento 3, realizada entre 20 de dezembro de 2009 e 06 de fevereiro de 2010. Pode ser notado que, na zona 1, foram 8 análises fora da faixa, ou seja, 2,95%, na zona 2, foram 65 análises fora da faixa, ou seja, 24,43% e, na zona 3, foram 27 análises fora da faixa, 10,19%.

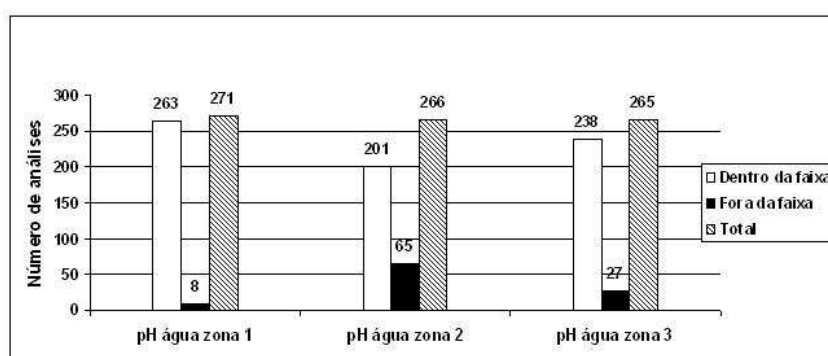


Figura 5.6: Número de análises realizadas durante o período do Experimento 3.

A Figura 5.7 apresenta o número de análises de pH, para o Experimento 4, realizada entre 28 de fevereiro e 17 de abril de 2010. Pode ser observado que, na zona 1, foram 3 análises fora da faixa, ou seja, 1,18%, na zona 2, foram 45 análises fora da faixa, ou seja, 17,86% e, na zona 3, foram 22 análises fora da faixa, 8,80%.

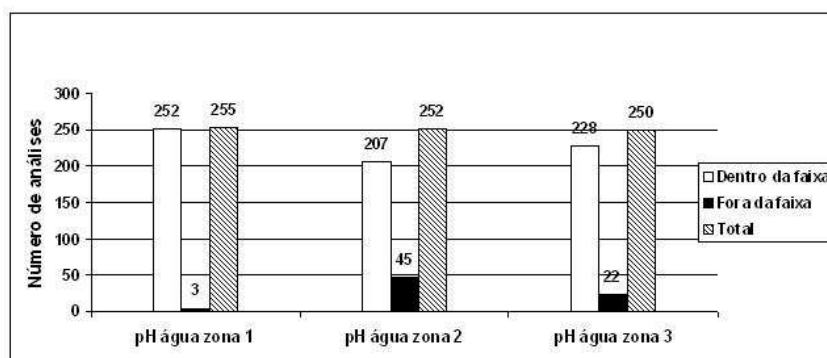


Figura 5.7: Número de análises realizadas durante o período do Experimento 4.

5.6 Conclusões do capítulo

Neste capítulo, foram apresentados os resultados para a estimação do consumo anterior à modificação do processo e, ainda, para a situação anterior e posterior à implementação da vazão máxima de água a partir das características estáticas dos modelos.

Com relação à economia de água, é possível concluir que, no teste final, onde foram comparados os valores estimados do consumo de água, antes da modificação do processo e as sete semanas anterior e posterior à implementação da máxima vazão, a partir das características estáticas dos modelos, o processo de lavagem operou com uma redução da ordem de 71% de volume de água limpa e, conseqüentemente, do resíduo líquido de lavagem.

Com relação a qualidade da lavagem, o total de análises de pH fora de faixa foram da ordem de 18%, 12% e 9% para Experimento 2, Experimento 3 e no Experimento 4, respectivamente. O número alto de análises fora de faixa na zona 2, em relação a zona 1 e 3, se deve ao fato de termos água da zona 3 alimentando os bicos de alta pressão da zona 2.

Capítulo 6

Considerações Finais

6.1 Conclusões

A partir dos resultados obtidos no processo de lavagem da tira de aço com a modificação do processo de lavagem e com a implementação da limitação da vazão de água sugerida pelas características estáticas dos modelos, pode-se estabelecer as seguintes conclusões:

- a - a modificação do processo, baseado na literatura, melhora o desempenho operacional e capacita o processo no fornecimento de dados experimentais;
- b - as características estáticas aplicadas aos modelos NARMAX polinomial mostrou ser uma ferramenta poderosa, na solução de problemas relacionados ao processo de lavagem da tira de aço;
- c - as características estáticas levantadas expressam a proposta na literatura com a saturação do pH da água de lavagem da zona 3 e demonstram o aumento no consumo de água limpa, utilizada em função do desgaste dos rolos espremedores;
- d - o processo de lavagem da tira de aço, mediante as modificações realizadas (Experimentos 2 e 3), apresenta uma redução da ordem de 63% no consumo de água limpa e, conseqüentemente, na geração de resíduos líquido de lavagem, em relação ao processo original (Experimento 1);
- e - o processo de lavagem da tira de aço, mediante limitação da vazão de água sugerida, a partir das características estáticas dos modelos(Experimento 4), promove uma redução

adicional da ordem de 20% no consumo de água limpa e, conseqüentemente, na geração de resíduo líquido de lavagem, em relação ao processo anterior à implementação da limitação da vazão de água (Experimentos 2 e 3);

- f - a redução no consumo de água limpa, no processo de lavagem da tira de aço, com relação ao processo original (Experimento 1) e limitação da vazão de água sugerida, a partir das características estáticas dos modelos (Experimento 4), é da ordem de 71%;
- g - com relação à qualidade da lavagem, a quantidade de análise dentro da faixa estão dentro dos valores permitidos para o processo de lavagem, conforme norma interna da Arcelor-Mittal Inox Brasil.

6.2 Sugestões para trabalhos futuros

Como continuidade do trabalho aqui apresentado, ficam algumas propostas a seguir que irão complementar o que foi desenvolvido até aqui:

1. Estimar os parâmetros através do algoritmo de estimação recursiva, com o objetivo de obter uma característica estática, a cada tempo de amostragem;
2. Obter a modelagem caixa-branca e utilizá-la na identificação caixa-cinza, com o objetivo de melhorar os resultados dos modelos;
3. Utilização das técnicas de redes neurais artificiais para a obtenção de modelos do processo de lavagem da tira de aço, com os dados obtidos nesta dissertação;
4. Aplicar técnica utilizada, neste trabalho, a outros processos, como por exemplo, decapagem química.

Bibliografia

- Aguirre, L. (2004). *Introdução à identificação de Sistemas: técnicas lineares e não-lineares aplicadas a sistemas reais*. Universidade Federal de Minas Gerais, Editora UFMG- Belo Horizonte, Minas Gerais, 2 edição.
- Aguirre, L., Corrêa, M., e Cassini, C. (2002). Use of a priori information in the identification of global nonlinear models - a case study using a buck converter. *IEEE proceedings-Control Theory Applications*, 9(149):1081–1089.
- Aguirre, L. A. e Billings, S. A. (1995). Improved structure for nonlinear models based on term clustering. *International Journal of Control*, 62(3):569–587.
- Aguirre, L. A., Rodrigues, G. G., e Jácome, C. (1997). Identificação de sistemas não lineares utilizando modelos narmax polinomiais - uma revisão e novos resultados. *Revista Controle e Automação*, 9(2):90–106.
- Bega, E. A. (2003). *Instrumentação Industrial*. Interciência: IBP, Rio de Janeiro, nd edição.
- Billings, S. A., Chen, S., e Korenberg, M. J. (1989). Identification of mimo non-linear systems using a forward-regression orthogonal estimator. *International Journal of Control*, 49(6):2157–2189.
- Bohlin, T. (1994). *A case study of grey box identification*. Number 2. Automática, Great Britain, 30 edição.
- Carvalho, S. R. (2003). Desenvolvimento de um modelo matemático e computacional de um forno de recozimento. Dissertação, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia - Minas Geraes.
- Corrêa, M., Aguirre, L., e Saldanha, R. R. (2002). Using steady-state prior knowledge to constrain parameter estimates in nonlinear system identification. *IEEE Transactions on Circuits and Systems-I: Fundamental theory and applications*, 49(9):1376–1381.

- Corrêa, M. V. (2001). *Identificação caixa-cinza de sistemas não-lineares utilizando modelos NARMAX racionais e polinomiais*. Tese doutorado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte - Minas Geraes.
- Hitzemann, G. e Heimhard, H. (1984). Modern pickling techniques. Technical report, Keram-chemie GmbH, Siershahn.
- Hudson, R. M. (1991). Pickling of hot rolled strip: an overview. *Iron and Steelmaker (IS)*, 18(9):31–39.
- IBS (2008). Instituto brasileiro de siderurgia. <http://www.ibs.org.br>. Acesso em: 28 de junho de 2008.
- Jacome, C. R. F. (1996). Uso do conhecimento prévio na identificação de modelos polinomiais narmax. Dissertação de Mestrado, UFMG, Belo Horizonte - MG.
- Kittisupakorn, P. e Kaewpradit, P. (2003). Integrated data reconciliation with generic model control for the steel pickling process. *Korean Journal Chemical Engineering*, 20:985.
- Korenberg, M. (1985). Orthogonal identification of nonlinear difference equation models. *Mid. West Symposium on Circuits and Systems*.
- Kushner, J. B. e Kushner, A. S. (1994). *Water and Waste Control for the Plating Shop*. Gardner Publications inc., Cincinnati- OH, 3 edição.
- Ledding, A. E. (1986). Estimation chemical concentration in rinse tanks. *Metal Finishing*, pp. 85–87.
- Leontaritis, I. J. e Billings, S. (1985a). Input-output parametric models for non-linear systems part i: deterministic non-linear systems. *International Journal of Control*, 41(2):303–328.
- Leontaritis, I. J. e Billings, S. (1985b). Input-output parametric models for non-linear systems part ii: stochastic non-linear systems. *International Journal of Control*, 41(2):329–344.
- Ljung, L. (1987). *System Identification: Theory for the user*. Prentice Hall PTR, New Jersey - USA, 1 edição.
- Mandich, N. V. (2004). Rinsing efficiency revisited. *Metal Finishing*, 102:33–38.
- Mettler-Toledo (2006). *Instruction Manual pH Transmitter 2100*. Mettler-Toledo GmbH, Process Analytics, Industrie Nord., CH-8902 Urdorf, Switzerland.
- Mohler, J. B. (1977). Non-equilibrium rising. *Metal Finishing*, pp. 55–60.

- Peyton-Jones, J. e Billings, S. (1989). Recursive algorithm for computing the frequency response of a class of non-linear difference equation models. *International Journal of Control*, 50(5):1925–1940.
- Plumer, V. L. (1986). Grundlagen des beizens (título traduzido: Princípios de decapagem). Technical report, Hamburgo.
- Santos, C. P. (2002). Revisão bibliográfica sobre formação de carepa e processos de decapagem em aços carbono e ao silício. Technical report, ArcelorMittal Inox Brasil, Timóteo.
- Schmidt, B., Wolters, R., Kaplin, J., Schneiker, T., Lobo-Recio, M. A., López, F., López-Delgado, A., e Alguacil, F. J. (2007). Rinse water regeneration in stainless steel pickling. *Desalination*, 211:64–71.
- Silva, P. S. d. (1999). Modernização da decapagem e seção de lavagem da linha de recozimento e decapagem - rb2. Technical report, ArcelorMittal Inox Brasil, Timóteo.
- Sohlberg, B. (1998). *Supervision and control for industrial processes. Advances in industrial control*. Springer-verlag, London, 1 edição.
- Stein, B. (1988). *Recuperative rising; a mathematical approach*. Metal Finishing, London, 1 edição.
- Wolters, R., Wendler, B., Schmidt, B., Holdinghausen, A., e Prade, A. (2008). Rinsing water recovery in the steel industry a combined uf/nf treatment. *Desalination*, 224:209–214.
- www.corsan.com.br (2010). sistemas. <http://www.corsan.com.br>. Acesso em: 15 de maio de 2010.

Apêndice A

Características dos componentes utilizados na medição

Neste apêndice, são apresentados os equipamentos utilizados para medição e coleta de dados, no processo de lavagem da tira de aço, bem como seus fabricantes e modelos.

A.1 Medição do pH

A.1.1 Conceitos básicos sobre o pH

As concentrações *hidrogeniônica* [H^+] e *hidroxiliônica* [OH^-] em uma solução são inversamente correlacionadas, ou seja, o aumento de uma acarreta a diminuição da outra e vice-versa. Em uma solução ácida há mais íons de H^+ do que íons de OH^- e o inverso para soluções alcalinas. Em uma solução neutra, as concentrações dos íons de H^+ e OH^- são iguais. A classificação dos líquidos quanto à acidez, alcalinidade e neutralidade são:

$$\{H^+\} > \{OH^-\} \Rightarrow \text{ácido}$$

$$\{H^+\} = \{OH^-\} \Rightarrow \text{neutro}$$

$$\{H^+\} < \{OH^-\} \Rightarrow \text{alcalino}$$

Para medição do nível de acidez de uma solução usa-se a escala do pH (potencial hidrogeniônico), que por razões de convenção tem sua variação entre 0 a 14. O pH é definido como:

$$pH = -\log_{10}\{H^+\} \quad (\text{A.1})$$

sendo que, a concentração de H^+ está em mol/l .

A $25^{\circ}C$, a neutralidade de uma solução é dada por:

$pH < 7 \Rightarrow$ ácido

$pH = 7 \Rightarrow$ neutro

$pH > 7 \Rightarrow$ alcalino

A.1.2 O sistema de medição

O sistema de medição de pH especificado é de fabricação da Mettler Toledo composto por sonda para submersão modelo HA405-DPA-SC-S8/120[®] para as zonas 1 e 2, e modelo HA405-DXK-S8/120[®], para a zona 3. O transmissor da Mettler Toledo, modelo 2100[®], com saída de 4 a 20 mA .

A.1.3 Calibração das sondas

Para calibração das sondas de pH são necessárias as soluções *Buffer* de diferentes valores conhecidos de pH (solução *Buffer* pH 4,01 e pH 7,00). No caso do processo estudado a calibração é feita de forma similar para os eletrodos das zonas 1, 2 e 3, conforme procedimento a seguir:

1. Limpa-se a sonda de pH utilizando água destilada e seca-se o eletrodo com papel absorvente macio.
2. Insere-se o eletrodo, na solução padrão com pH 4,01.
3. Aguarda-se o tempo de estabilização de 10 segundos e, posteriormente, calibra-se o instrumento para o valor de pH 4,01.
4. Repete-se o passo 1.
5. Introduz-se o eletrodo na solução padrão com pH 7,00.
6. Aguarda-se o tempo de estabilização de 10 segundos e, posteriormente, calibra-se o instrumento para o valor de pH 7,00.

Este procedimento de calibração é sugerido pelo fabricante da sonda de pH (Mettler-Toledo, 2006).

A.2 Medidor de vazão eletromagnético

Equipamento responsável pela medição de vazão de água limpa, na entrada da zona de lavagem 3. O medidor eletromagnético de vazão microprocessado é de fabricação da Fisher-Rosemount pelo conversor 8732 e pelo tubo medidor 570TM. Os conversores eletromagnéticos de vazão 8732 contêm indicadores e display, gerenciados por um microprocessador, que permite vários tipos de saídas e funções de autodiagnóstico. O medidor eletromagnético de vazão modelo 570TM é um detector compacto de fluxo volumétrico de líquidos. O instrumento utiliza, como método de transdução de processo, o princípio segundo o qual, um fluido condutivo gera uma tensão induzida, quando este flui através de um campo magnético. A amplitude da tensão é diretamente proporcional à vazão do fluido medido e representa a soma das tensões incrementais, geradas em cada partícula do fluido que passa sob a influência do campo magnético.

A.3 Medidor de largura da tira de aço

Responsável pela medição da variável, largura da tira de aço, é o medidor digital de largura e é de fabricação da Harris Instrument Corporation modelo Scan-A-Line[®].

A.4 PLC

Controlador lógico programável responsável pelo tratamento dos sinais provenientes dos elementos de campo. Fabricado pela Allen-Bradley modelo SLC 500[®], (ver Figura (A.1)).

A.5 Sistema de supervisão e aquisição de dados (*SCADA - do inglês "Supervisory Control And Data Aquisition"*)

Neste caso é o computador responsável pela supervisão e aquisição de dados no processo de lavagem da tira de aço silício. Para supervisionar, será usado o software Eclipse E3 2.5.0.134[®] versão 7.05, desenvolvido pela Eclipse Software (ver Figura (A.1)).

A.5 Sistema de supervisão e aquisição de dados (SCADA - do inglês "Supervisory Control And Data Aquisition")

A Figura (A.1) apresenta a representação esquemática do processamento de sinal, no processo de lavagem da tira de aço. O sinal das variáveis é enviado ao PLC para processamento e, posteriormente, ao sistema supervisorio para monitoração do operador. O sinal é enviado diretamente do PLC para o PIMS.

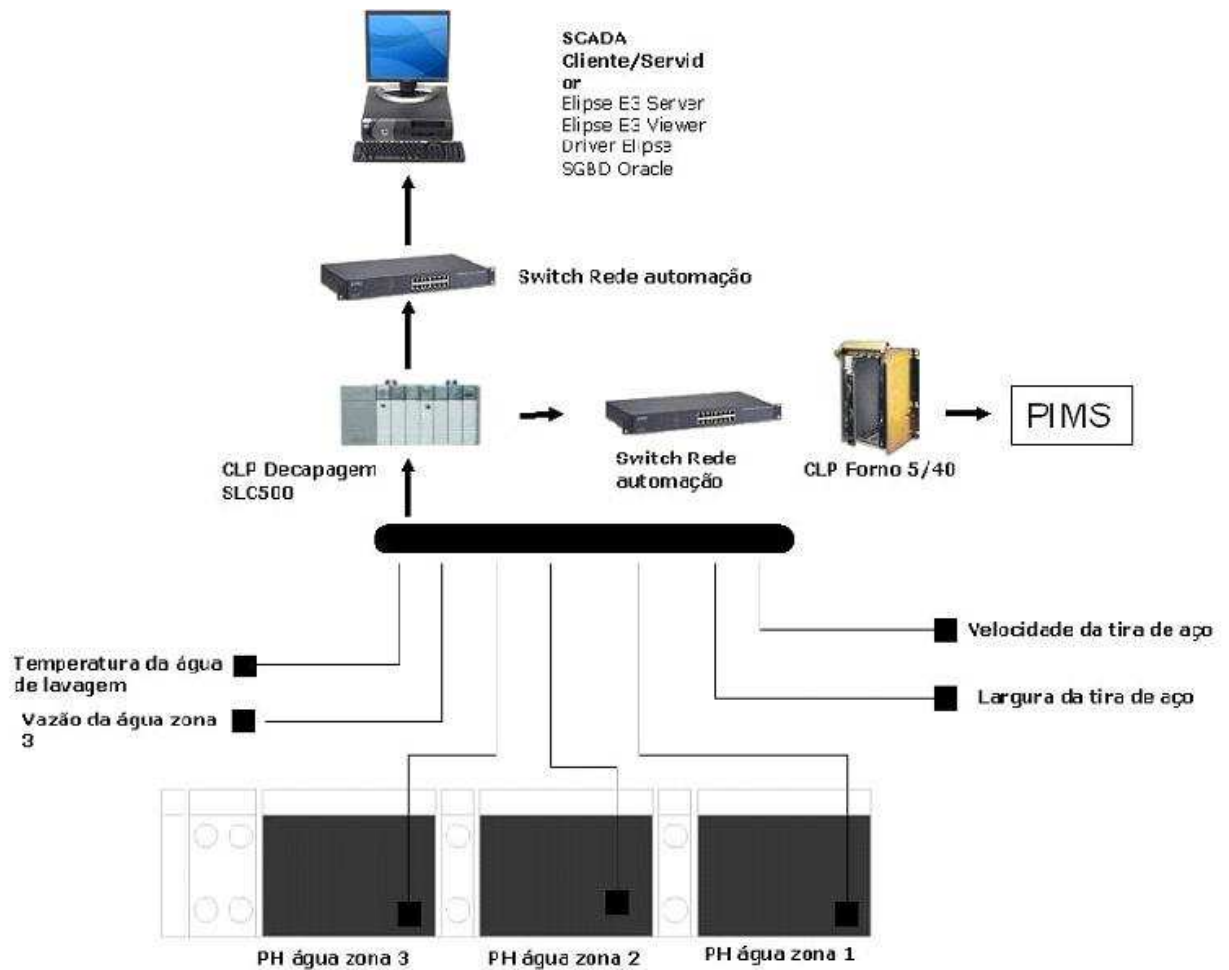


Figura A.1: Lay-out funcional com os equipamentos principais do processo de lavagem da tira de aço

Apêndice B

Estimação do consumo de água no Experimento 1.

Característica do bico de alta pressão:

Modelo: MEG 2505 - *Spraying Systems*

Pressão: 25kgf/cm^2

Vazão por bico: $5,7\text{l/min} = 0,342\text{m}^3/\text{h}$

Quantidade de bicos por zona: 20 bicos.

$\text{volume total}(\text{m}^3) = \text{volume pelos bicos da zona 2}(\text{m}^3) + \text{volume pelos bicos da zona 3}(\text{m}^3) + \text{volume da entrada de água pela zona 3}(\text{m}^3)$

$\text{volume pelos conjuntos de bicos da zona}(\text{m}^3) = \text{vazão por bico}(\text{m}^3/\text{h}) * \text{quantidade de bicos} * \text{período}(\text{h})$

Para o período de 1320 horas (55 dias):

volume da entrada de água pela zona 3 (medido) = 7854m^3 .

volume pelos bicos da zona = $0,342\text{m}^3/\text{h} * 20 * 1320\text{h}$

volume pelos bicos da zona = 9029m^3

volume total = $9029\text{m}^3 + 9029\text{m}^3 + 7854\text{m}^3$

volume total = 25911m^3 .

Para o período de 1152 horas (48 dias):

volume da entrada de água pela zona 3 (medido) = 7854m^3

volume pelos bicos da zona = $0,342\text{m}^3/\text{h} * 20 * 1152\text{h}$

volume pelos bicos da zona = 7880m^3

$$\text{volume total} = 7880m^3 + 7880m^3 + 6865m^3$$

$$\text{volume total} = 22625m^3.$$