

**UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ**  
**Departamento de Engenharia Mecânica**

**ANÁLISE E OTIMIZAÇÃO DO SISTEMA DE  
CONTROLE REALIMENTADO DE UMA UNIDADE DE  
REVESTIMENTO DE PAPÉIS ESPECIAIS**

**Wendell de Queiróz Lamas**

Dissertação apresentada ao  
Departamento de Engenharia Mecânica  
da Universidade de Taubaté, como  
parte dos requisitos para obtenção do  
Título de Mestre em Engenharia  
Mecânica

Área de Concentração: Automação e Controle Industrial

**Taubaté, SP**  
**2004**

## COMISSÃO JULGADORA

**Data:** 27 de fevereiro de 2004.

**RESULTADO:** \_\_\_\_\_

**Orientador**

**Prof. Dr.:** Giorgio Eugenio Oscare Giacaglia

**Assinatura:** \_\_\_\_\_

**Co-Orientador**

**Prof. Dr.:** Luiz Octávio Mattos dos Reis

**Assinatura:** \_\_\_\_\_

**Convidado Externo**

**Prof. Dr.:** Sebastião Ribeiro

**Assinatura:** \_\_\_\_\_

**UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ**  
**Departamento de Engenharia Mecânica**

**ANÁLISE E OTIMIZAÇÃO DO SISTEMA DE  
CONTROLE REALIMENTADO DE UMA UNIDADE DE  
REVESTIMENTO DE PAPÉIS ESPECIAIS**

**Wendell de Queiróz Lamas**

Dissertação apresentada ao Departamento de  
Engenharia Mecânica da Universidade de Taubaté,  
como parte dos requisitos para obtenção do Título de  
Mestre em Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Automação e Controle Industrial  
Orientador: Prof. Dr. Giorgio Eugenio Oscare Giacaglia  
Co-Orientador: Prof. Dr. Luiz Octávio Mattos dos Reis

**Taubaté, SP**

**2004**

LAMAS, W.Q. Análise e Otimização do Sistema de Controle Realimentado de  
uma Unidade de Revestimento de Papéis Especiais.  
Taubaté, 2004. 117 p. Dissertação – Universidade de Taubaté.

Dedico este trabalho a  
meus pais, Bernadete e Hélio,  
e ao Prof. Giorgio E. O. Giacaglia,  
por seu apoio e incentivo  
durante a sua execução.

Ao corpo docente do  
Programa de Mestrado em  
Engenharia Mecânica da UNITAU.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Prof. Dr. Giorgio Eugenio Oscare Giacaglia por sua orientação na execução deste trabalho, além de seu apoio e incentivo durante minha participação no Programa de Pós-graduação da UNITAU.

Ao Prof. Dr. Luiz Octávio Mattos dos Reis, por sua valiosa colaboração na condução da pesquisa e na análise dos resultados.

Ao Prof. Dr. Ronaldo Rossi, por sua atenção e orientação quando da busca por informações sobre o Programa de Mestrado em Engenharia Mecânica.

Ao Prof. Dr. José Rui Camargo, Chefe do Departamento de Engenharia Mecânica, por seu incentivo e apoio na execução desse projeto.

Ao corpo docente da Universidade de Taubaté, na presença de Prof. Dr. Álvaro Manuel de Souza Soares, Prof. Dr. Giorgio Eugenio Oscare Giacaglia, Prof. Dr. Francisco José Grandinetti, Prof. Dr. Wilton Ney do Amaral Pereira, Prof. Dr. Edilson Hiroshi Tamai, Prof. Dr. Francisco Carlos Parquet Bizarria, Prof. Dr. José Rui Camargo, Prof. Dr. Luiz Octávio Mattos dos Reis, Prof. Dr. João Sinohara da Silva Sousa e Prof. Dr. Valberto Ferreira da Silva, por compartilharem conosco seus conhecimentos e suas experiências pessoais.

À Prof<sup>a</sup> Ms. Eliane da Silveira por suas constantes palavras de incentivo.

Ao Prof. Ms. Ederaldo Godoy Júnior por seu apoio e incentivo durante a execução deste trabalho.

Ao Prof. Aurélio Moreira da Silva Neto, por seu auxílio no uso dos recursos disponíveis no Laboratório de Robótica e Instrumentação.

À bibliotecária Carina por seu auxílio na busca por literatura necessária

à execução dos trabalhos propostos no decorrer do curso.

À secretária Karina Pereira Reis e ao secretário Thiago Monteiro do Amaral, por seus esforços em nos auxiliar na administração de nossa vida acadêmica.

À Universidade de Taubaté, que cedeu os laboratórios e acesso a informação, via conexão à internet.

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE TABELAS	xiii
LISTA DE EQUAÇÕES	xv
LISTA DE ABREVIATURAS	xvii
LISTA DE SÍMBOLOS	xviii
RESUMO	xix
1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	21
1.1 INTRODUÇÃO	21
1.2 REVISÃO DA LITERATURA	22
1.3 OBJETIVOS	35
1.4 MATERIAIS E MÉTODOS	35
2 DISCUSSÃO DO PROCESSO	37
2.1 ANÁLISE DA LINHA DO PROCESSO DE REVESTIMENTO DE PAPÉIS	37
2.1.1 ALIMENTAÇÃO	39
2.1.2 REVESTIMENTO	40
2.1.3 SECAGEM	40
2.1.4 ARMAZENAGEM	41
2.2 DADOS TÉCNICOS DOS COMPONENTES DO SISTEMA	42
3 MODELAGEM DOS COMPONENTES DO SISTEMA	50
3.1 MOTOR DE CORRENTE CONTÍNUA SEM CARGA	50
3.2 CONTROLADOR P-I	52
3.3 CIRCUITO DE POTÊNCIA	53
3.4 O MODELO ADOTADO	54
3.4.1 MODELAGEM DO ROLO DE ARMAZENAGEM (ENROLADEIRA)	57
4 SIMULAÇÕES E RESULTADOS	65
4.1 ESTRUTURA DO SISTEMA DE SIMULAÇÃO	65
4.2 SIMULAÇÕES, RESULTADOS E DISCUSSÕES	69
4.2.1 ANÁLISE DA PONTE DE GAERTZ	70
4.2.2 ANÁLISE EM MALHA ABERTA	73



4.2.3 ANÁLISE EM MALHA FECHADA	76
5 SUGESTÕES PARA MELHORIAS FUTURAS	78
5.1 ANÁLISE DAS SITUAÇÕES PARA SUGESTÕES DE IMPLEMENTAÇÕES	78
5.2 ARQUITETURA ATUALMENTE UTILIZADA	82
5.3 ARQUITETURAS PROPOSTAS	83
5.3.1 ANÁLISE TÉCNICO-ECONÔMICA DAS ARQUITETURAS PROPOSTAS	91
5.4 NOVAS CONFIGURAÇÕES PARA OS SETORES	93
6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	110
6.1 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	110
6.2 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	113
REFERÊNCIAS	114
ABSTRACT	116

## LISTA DE FIGURAS

FIGURAS	PÁG.
FIGURA 2.1: ESQUEMA DE FUNCIONAMENTO DE UMA UNIDADE DE REVESTIMENTO DE PAPÉIS	38
FIGURA 2.2: REPRESENTAÇÃO DO ROLO DE ORIGEM DA TIRA DE PAPEL	39
FIGURA 2.3: DIAGRAMA DO SETOR DE REVESTIMENTO	40
FIGURA 2.4: DIAGRAMA ILUSTRATIVO DO SETOR DE SECAGEM	41
FIGURA 2.5: REPRESENTAÇÃO DO SETOR DE ARMAZENAGEM DE PAPEL	41
FIGURA 2.6: MOTOR DE CORRENTE CONTÍNUA	42
FIGURA 2.7: ROLO GUIA DE PAPEL	43
FIGURA 2.8: ROLO DE APOIO	44
FIGURA 2.9: CIRCUITO DE POTÊNCIA CA/CC	45
FIGURA 2.10: TACO-GERADOR	46
FIGURA 2.11: TRANSDUTORES DE TENSÃO MECÂNICA	47
FIGURA 2.12: AMPLIFICADOR DE INSTRUMENTAÇÃO	48
FIGURA 2.13: CÉLULA DE CARGA	48
FIGURA 2.14: CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMÁVEL PREMIUM TSX P57	49

FIGURA 3.1: ESQUEMA DE MODELO PARA O MOTOR DE CORRENTE CONTÍNUA CONTROLADO POR ARMADURA	51
FIGURA 3.2: REPRESENTAÇÃO DO ROLO DE APOIO	54
FIGURA 3.3: MOTOR CC ASSOCIADO AO ROLO DE APOIO	57
FIGURA 3.4: INFLUÊNCIA DA TENSÃO DE TRAÇÃO ENTRE DOIS ROLOS	57
FIGURA 3.5: AMOSTRA DA TIRA DE PAPEL	58
FIGURA 3.6: RAIOS TOTAL EM FUNÇÃO DO TEMPO DE ENROLAMENTO DO PAPEL	60
FIGURA 3.7: VARIAÇÃO DA VELOCIDADE ANGULAR EM FUNÇÃO DA VARIAÇÃO DO RAIOS TOTAL	60
FIGURA 3.8: APROXIMAÇÃO LINEAR DA VELOCIDADE ANGULAR EM FUNÇÃO DO TEMPO DE ENROLAMENTO DA TIRA DE PAPEL	62
FIGURA 4.1: VISÃO GERAL DO SISTEMA DE SIMULAÇÃO	66
FIGURA 4.2: SUB-SISTEMAS DE ACIONAMENTO DO MOTOR DE CORRENTE CONTÍNUA	67
FIGURA 4.3: SUB-SISTEMA ELÉTRICO TRIFÁSICO	68
FIGURA 4.4: SUB-SISTEMA LÓGICA DE PULSOS	68
FIGURA 4.5: SUB-SISTEMA PONTE DE GAERTZ	69
FIGURA 4.6: INTENSIDADE DE CORRENTE ELÉTRICA NA PARTIDA DO MOTOR ELÉTRICO	70

FIGURA 4.7: TENSÃO ELÉTRICA NA PARTIDA DO MOTOR ELÉTRICO	71
FIGURA 4.8: INTENSIDADE DE CORRENTE ELÉTRICA COM A INSERÇÃO DE CARGA	72
FIGURA 4.9: TENSÃO ELÉTRICA COM A INSERÇÃO DE CARGA	72
FIGURA 4.10: PÓLOS E ZERO DE MALHA ABERTA DO SISTEMA EM ESTUDO	73
FIGURA 4.11: RESPOSTA TRANSITÓRIA DA VELOCIDADE ANGULAR DO MOTOR A DEGRAU NA TENSÃO ELÉTRICA DA ARMADURA DO MOTOR	74
FIGURA 4.12: RESPOSTA EM FREQUÊNCIA DO SISTEMA EM MALHA ABERTA	75
FIGURA 4.13: PÓLOS E ZERO EM MALHA FECHADA	76
FIGURA 4.14: RESPOSTA TRANSITÓRIA DA DEFORMAÇÃO DO PAPEL A DEGRAU NA TENSÃO ELÉTRICA DA ARMADURA DO MOTOR	77
FIGURA 5.1: PONTE TIRISTORIZADA COMO INVERSORA	79
FIGURA 5.2: MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO	80
FIGURA 5.3: INVERSOR DE FREQUÊNCIA CFW08PLUS	81
FIGURA 5.4: ARQUITETURA ATUALMENTE UTILIZADA NA UNIDADE DE REVESTIMENTO DE PAPÉIS ESPECIAIS	82
FIGURA 5.5: ARQUITETURA COM CONTROLADOR PROGRAMÁVEL	84

FIGURA 5.6: ARQUITETURA COM MÓDULOS <i>FIELD-POINT</i>	86
FIGURA 5.7: MÓDULO DE REDE	87
FIGURA 5.8: MÓDULO DE COMUNICAÇÃO	87
FIGURA 5.9: ARQUITETURA COM TECNOLOGIA PXI	89
FIGURA 5.10: GABINETE PXI E MÓDULOS DE AQUISIÇÃO DE DADOS COMERCIAIS	90
FIGURA 5.11: NOVA CONFIGURAÇÃO DO SETOR DE ALIMENTAÇÃO DE PAPEL	94
FIGURA 5.12: EQUIPAMENTO PARA AQUISIÇÃO DE IMAGENS BASEADO EM ARQUITETURA PXI	95
FIGURA 5.13: FLUXOGRAMA ANALÍTICO DA ALIMENTAÇÃO	96
FIGURA 5.14: NOVA CONFIGURAÇÃO DO SETOR DE REVESTIMENTO	97
FIGURA 5.15: MÓDULO DE AQUISIÇÃO DE DADOS PXI-8421/4	98
FIGURA 5.16: FLUXOGRAMA ANALÍTICO DA SESSÃO DE REVESTIMENTO	100
FIGURA 5.17: NOVA CONFIGURAÇÃO DO SETOR DE SECAGEM	102
FIGURA 5.18: FLUXOGRAMA ANALÍTICO DO SETOR DE SECAGEM	104
FIGURA 5.19: FLUXOGRAMA ANALÍTICO DA ARMAZENAGEM	105
FIGURA 5.20: FLUXOGRAMA ANALÍTICO DA PARTIDA DO SISTEMA	109

## LISTA DE TABELAS

TABELAS	PÁG.
TABELA 2.1: MOTOR DE CORRENTE CONTÍNUA	42
TABELA 2.2: CIRCUITO DE POTÊNCIA CA/CC	44
TABELA 2.3: TACO-GERADOR WEG 2RCP/60	45
TABELA 3.1: PARÂMETROS FÍSICOS DO MOTOR ADOTADO	51
TABELA 3.2: RESUMO DOS EFEITOS DE CADA CONTROLADOR EM UM SISTEMA DE MALHA FECHADA	53
TABELA 3.3: EXEMPLOS DE MÓDULOS DE ELASTICIDADE DOS TIPOS DE PAPEL MAIS COMUNS	56
TABELA 5.1: MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO WEG	80
TABELA 5.2: INVERSOR DE FREQUÊNCIA WEG CFW08PLUS	81
TABELA 5.3: INVESTIMENTO NECESSÁRIO PARA A IMPLANTAÇÃO DA ALTERNATIVA COM CONTROLADOR PROGRAMÁVEL	85
TABELA 5.4: INVESTIMENTO NECESSÁRIO PARA A IMPLANTAÇÃO DA ALTERNATIVA COM MÓDULOS <i>FIELDPOINT</i>	88
TABELA 5.5: INVESTIMENTO NECESSÁRIO PARA A IMPLANTAÇÃO DA ALTERNATIVA COM TECNOLOGIA PXI	90
TABELA 5.6: ESTIMATIVA DE GASTOS MENSAIS DA UNIDADE DE REVESTIMENTO DE PAPÉIS ESPECIAIS	91

TABELA 5.7: PERSPECTIVA DE ECONOMIA MENSAL COM CADA ALTERNATIVA DESENVOLVIDA PARA A UNIDADE DE REVESTIMENTO DE PAPÉIS ESPECIAIS	92
TABELA 5.8: COMPARATIVO DE INVESTIMENTOS EM TECNOLOGIA E PERSPECTIVA DE ECONOMIA MENSAL NA UNIDADE DE REVESTIMENTO DE PAPÉIS ESPECIAIS	92
TABELA 5.9: PERFIL DE TEMPERATURA DO FORNO	101

## LISTA DE EQUAÇÕES

EQUAÇÃO	PÁG.
EQUAÇÃO 3.1: FUNÇÃO GERAL NO TEMPO PARA VARIAÇÃO NA INTENSIDADE DE CORRENTE ELÉTRICA	56
EQUAÇÃO 3.2: FUNÇÃO GERAL NO TEMPO PARA VARIAÇÃO NA VELOCIDADE DE ROTAÇÃO DO MOTOR ELÉTRICO	56
EQUAÇÃO 3.3: FUNÇÃO GERAL NO TEMPO PARA VARIAÇÃO NA DEFORMAÇÃO DO PAPEL	56
EQUAÇÃO 3.4: MATRIZ DE ESTADO COM AS EQUAÇÕES DINÂMICAS	56
EQUAÇÃO 3.5: VELOCIDADE ANGULAR DO ROLO	57
EQUAÇÃO 3.6: FUNÇÃO GERAL NO TEMPO PARA VARIAÇÃO DE INÉRCIA E DE VELOCIDADE ANGULAR NA ENROLADEIRA	58
EQUAÇÃO 3.7: FUNÇÃO GERAL NO TEMPO PARA VARIAÇÃO DE INÉRCIA E DE VELOCIDADE ANGULAR NA DESENROLADEIRA	58
EQUAÇÃO 3.8: MOMENTO DE INÉRCIA DO CONJUNTO FORMADO PELO MOTOR ELÉTRICO E PELO ROLO DE APOIO	58
EQUAÇÃO 3.9: RAIOS TOTAL DO ROLO DE PAPEL NO INSTANTE $t$	59
EQUAÇÃO 3.10: ESFORÇO NECESSÁRIO AO MOTOR ELÉTRICO PARA ENROLAR A TIRA DE PAPEL NO ROLO DE APOIO	61
EQUAÇÃO 3.11: VARIAÇÃO DO ESFORÇO NA ENROLADEIRA	61



EQUAÇÃO 3.12: TRANSFORMADA DE LAPLACE PARA A VARIÇÃO DO ESFORÇO NA ENROLADEIRA	61
EQUAÇÃO 3.13: EQUAÇÃO GERAL PARA A VARIÇÃO DA VELOCIDADE ANGULAR DURANTE O ENROLAMENTO DO PAPEL	62
EQUAÇÃO 3.14: EQUAÇÃO ESPECÍFICA PARA A VARIÇÃO DA VELOCIDADE ANGULAR DURANTE O ENROLAMENTO DO PAPEL NO ROLO DE APOIO DA ENROLADEIRA	63
EQUAÇÃO 3.15: VARIÇÃO DO ESFORÇO NA ENROLADEIRA	63
EQUAÇÃO 3.16: TRANSFORMADA DE LAPLACE PARA A VARIÇÃO DO ESFORÇO NA ENROLADEIRA	63
EQUAÇÃO 3.17: TRANSFORMADA DE LAPLACE PARA A EQUAÇÃO ELÉTRICA DO MOTOR DE CORRENTE CONTÍNUA	64

## LISTA DE DE ABREVIATURAS

CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CLP	Controlador Lógico Programável – do inglês <i>Programmable Logic Controller (PLC)</i>
CP	Controlador Programável
DAQ	<i>Data Acquisition</i> – Aquisição de Dados
DO	<i>Dissolved Oxygen</i> – Oxigênio Dissolvido
GNU/Linux	Sistema operacional multi-tarefa e multi-usuário
IMAQ	<i>Image Acquisition</i> – Aquisição de Imagens
ORP	<i>Oxi-Reduction Potential</i> – Potencial de Oxi-Redução
pH	<i>Potential of Hydrogen</i> – Potencial de Hidrogênio
P-I-D	Ações de controle: Proporcional – Integral – Derivativo
SCADA	Sistema supervisorio, de controle e de aquisição de dados
SCICOS	<i>SCILAB Connected Object Simulator</i> – Simulador de Objetos Conectados do SCILAB: ferramenta do SCILAB para modelagem e simulação de sistemas dinâmicos a partir de blocos funcionais conectados entre si
SCILAB	<i>Scientific Laboratory</i> – Laboratório Científico: programa aplicativo de computação técnica utilizado na solução numérica de problemas
TCP/IP	Protocolo de comunicação de rede de dados
TDS	<i>Total Dissolved Solids</i> – Total de Sólidos Dissolvidos

## LISTA DE DE SÍMBOLOS

$\lambda$	Massa de papel em uma determinada região (kg/m)
$\theta$	Posição do eixo do motor elétrico (rd)
$\omega$	Velocidade de rotação do eixo do motor elétrico (rd/s)
$\omega_n$	Frequência natural do motor elétrico (Hz)
$b$	Constante de atrito do sistema mecânico (N.m.s)
$b_c$	Constante de atrito do sistema mecânico dos rolos (N.m.s)
$e_a$	Diferença de potencial na armadura do motor elétrico (V)
$e_b$	Força contra-eleto-motriz (V)
$i_a$	Intensidade de corrente elétrica na armadura do motor elétrico (A)
$J$	Momento de inércia do rotor do motor elétrico (kg.m <sup>2</sup> )
$J_C$	Momento de inércia dos rolos (kg.m <sup>2</sup> )
$J_M$	Momento de inércia do motor elétrico (kg.m <sup>2</sup> )
$J_R$	Momento de inércia do rolo com papel (kg.m <sup>2</sup> )
$k_e$	Constante do motor elétrico (V.s/rd)
$k_t$	Constante da armadura do motor elétrico (N.m/A)
$L_a$	Indutância elétrica (H)
$M$	Massa total no rolo com papel (kg)
$M_i$	Massa do rolo (kg)
$r$	Raio do eixo do rolo (m)
$R$	Raio total do rolo com papel (m)
$R_a$	Resistência elétrica ( $\Omega$ )
$T$	Torque do motor elétrico (N.m)
$T_C$	Torque dos rolos (N.m)
$T_F$	Tempo final do processo (s)
$TT$	Tensão mecânica de tração do papel nos rolos (N)
$v$	Velocidade periférica do rolo (m/s)
$v_a$	Velocidade da tira de papel (m/s)
$x$	Deformação do papel (m)

## RESUMO

Foi efetuada a análise do sistema de controle atual de uma unidade de revestimento de papéis especiais, da indústria da área de celulose e papel Schweitzer-Manduit, criando assim um padrão de comportamento mínimo quanto à sua estabilidade e à sua qualidade. O sistema foi re-desenhado acrescentando-se as propostas de melhorias e a análise dos novos resultados, tendo como referência os dados obtidos com o sistema nas condições atuais.

Tendo por base esse enfoque, a unidade de pintura de papéis especiais foi dividida em quatro setores, quais sejam alimentação, revestimento, secagem e armazenagem. A partir daí, cada setor teve suas particularidades observadas e analisadas com relação a possíveis melhorias.

O primeiro capítulo apresenta as considerações iniciais inerentes a este estudo, constando deste capítulo a revisão da literatura correlata ao controle de máquinas ligadas aos processos da indústria de celulose e papel, estando seu conteúdo diretamente relacionado com a pesquisa realizada. Também fazem parte deste capítulo as metas pretendidas com a execução deste trabalho. A metodologia adotada para a análise dos dados oriundos do estudo desenvolvido, assim como os equipamentos mais relevantes à sua execução, se encontram relacionados neste primeiro capítulo.

No segundo capítulo realiza-se a análise do processo e dos dispositivos que compõem o sistema de controle do mesmo. São apresentadas de forma sucinta e genérica as etapas relacionadas ao processo de revestimento de papéis adotados pelas indústrias de celulose e papel. O processo em estudo é descrito de forma geral, associando-se informações a respeito dos tipos de papéis comerciais. Após isso, cada um dos quatro setores constituintes da unidade de pintura, alimentação, revestimento, secagem e armazenagem, são descritos em detalhes, salientando sua visão sistêmica em malha aberta.

O terceiro capítulo é dedicado à elaboração de um modelo matemático a ser adotado e sua análise. Nesse capítulo também são estudados os principais componentes do sistema de controle: o motor de corrente contínua, o controlador P-I e o circuito de potência.

No quarto capítulo, os resultados obtidos para o sistema em estudo, a

partir da metodologia proposta, são relacionados, dando ênfase à análise dos gráficos gerados com o uso dos programas aplicativos SCILAB e SCICOS.

No quinto capítulo, são relatadas críticas e sugestões ao processo com o objetivo de melhorar seu desempenho geral.

Com vistas a uma menor demanda de potência e maior flexibilidade da linha de produção, foi proposta a substituição dos motores CC com acionamentos estáticos, por motores CA com inversores de frequência. Na busca por maior qualidade, foi proposta a colocação de câmeras de vídeo com o intuito de adquirir a imagem da tira de papel, comparando-se aos padrões equivalentes para cada setor, sejam alimentação, revestimento e secagem, que estão armazenados em um banco de dados e imagens. Para monitorar a qualidade da tinta, quanto às suas características químicas e ao depósito de sólidos oriundos da tira de papel, sugere-se a colocação de sensores de pH, DO, ORP e TDS no tanque de tinta, ajustados conforme as características da tira de papel e da própria solução. Sugere-se, também, a colocação de cinco termômetros no forno, sendo dois externos, para monitoramento do perfil da temperatura ao longo do duto de secagem. Para a aquisição dos dados oriundos de tal sensoriamento, propõe-se o uso de tecnologia PXI, onde um servidor de rede determinística manipula tais informações segundo a programação estabelecida em seu programa principal, em tempo real, a partir das medições originadas nos instrumentos dispostos pelo decorrer do processo. O último setor da unidade, armazenagem, não é crítico para o sistema, assim a tira de papel já chega com todas as suas características monitoradas, sendo apenas fundamental que o seu motor esteja sincronizado com os demais. Assim, é sugerido manter a configuração.

No sexto capítulo são relacionadas as conclusões baseadas nos resultados obtidos para o sistema atualmente em uso e para o sistema com as alterações propostas, além de relacionar recomendações tidas como pertinentes. Nesse capítulo também são propostas sugestões de trabalhos futuros correlacionados à pesquisa realizada.

**Palavras-Chave:** unidade de revestimento, papéis especiais, controle de processos.

## **CAPÍTULO 1**

---

### ***CONSIDERAÇÕES INICIAIS***

Neste capítulo são descritas as características gerais dos processos de revestimento de papéis nas indústrias brasileiras de celulose e papel, é apresentada a revisão da literatura utilizada na consolidação dos conhecimentos necessários e explicitados os objetivos almejados e a metodologia empregada para desenvolver este estudo.

#### ***1.1.INTRODUÇÃO***

Uma das metas da indústria em todos os setores é melhorar o desempenho com vistas à economia de energia, ao aumento de produtividade e à qualidade dos produtos oferecidos, características que agregam valor ao produto, aumentando a lucratividade em decorrência da economia obtida no processo.

Os processos de revestimento de papéis nas indústrias têm concepção muito parecida, estando as diferenças fundamentais associadas ao tipo de papel e à composição da tinta a ser utilizada.

Fundamentalmente, o processo de revestimento conta com rolos de borracha acoplados diretamente a motores elétricos os quais proporcionam a tração mecânica necessária ao funcionamento do processo. A esses, associam-se rolos de menor diâmetro, chamados guias de papel, para manter a tensão mecânica da tira de papel contínua ao longo de todo processo, evitando dobras e/ou quebras do papel. Quanto à secagem, têm em comum a presença de um forno de secagem por ar quente onde o papel passa em processo contínuo. Os

sistemas se diferenciam pela presença ou ausência de rolos para efetuar um primeiro estágio de secagem mecânica ou um resfriamento do papel após sua passagem pelo forno. Nas unidades que revestem papéis especiais voltados à indústria de fumo, a quantidade desses rolos variam entre 20 e 25 dependendo dos setores componentes da unidade de revestimento e das tecnologias utilizadas. Já para máquinas voltadas à produção de papéis para consumo, o número de rolos apenas do setor de secagem pode alcançar 45 rolos, mas está em torno de 42.

## **1.2.REVISÃO DA LITERATURA**

Durante o estudo do sistema de controle da unidade de revestimento de papéis especiais de indústria especializada, várias obras literárias foram consultadas e serviram prontamente na orientação da pesquisa e na consolidação dos resultados obtidos.

Lamas et al. (2001) descrevem a análise de um sistema de controle realimentado do setor de secagem de uma das unidades de revestimento de papéis especiais da indústria Schweitzer-Manduit. Esse trabalho contribuiu com os dados a respeito dos componentes do processo estudado e com parte do modelo adotado. A programação em SCILAB utilizada também teve origem nesse trabalho. São salientados aspectos gerais dos componentes do sistema, os quais foram encontrados em literatura especializada. Destacaram-se as características de um motor de corrente contínua, um controlador PI, circuito de potência com tiristores, célula de carga e conversores analógico-digital e digital-analógico, além de um estudo sobre qualidade de sistemas de controle. Os autores abordam o processo em estudo, dados técnicos dos componentes do sistema e modelos matemáticos para as relações fundamentais referentes à tração do papel e para as relações inerentes ao funcionamento do sistema, bem como a metodologia adotada para a análise do sistema, baseada no programa aplicativo de computação técnica SCILAB.

A seguir são relacionados os resultados obtidos durante a análise do

sistema em estudo, salientando sua análise em malha aberta, sua análise em malha fechada com o sistema controlado, sua análise em malha fechada com observador de estados e sua análise em malha fechada com perturbação. Esses resultados são discutidos e comparados com os resultados teóricos esperados.

Por fim, os autores concluem que os resultados teóricos e práticos se aproximaram em muito, apontando, assim, para um sistema efetivamente controlado e estabilizado.

Boulter (2, 2000) disserta a respeito da influência dos rolos que compõem um sistema de revestimento de papéis, o algoritmo de controle da tensão mecânica provocada, a influência da velocidade do papel e da velocidade de rotação do motor elétrico no controle do sistema e a simulação de cada sub-sistema componente do sistema principal. A estrutura do simulador utilizado contribui para a definição dos sub-sistemas utilizados neste trabalho. O trabalho se inicia descrevendo o sistema em estudo, destacando a nomenclatura adotada e relacionando as principais equações referentes à planta a ser controlada, incluindo as equações das velocidades e das tensões mecânicas pertencentes às tiras de papel, para os mecanismos de alimentação e de armazenagem do papel. A principal equação não-linear descreve a deformação da tira de papel. A seguir, o torque, a velocidade angular e as velocidades de superfície dos rolos são relacionadas em novas equações, as quais são tipicamente não-lineares, e a estrutura do controlador a ser simulado é estudada, sendo este composto pelo regulador da tensão mecânica e pelo regulador do torque em cascata. Por sua vez, o regulador de torque em cascata é dividido em controle do torque e controle da velocidade. Vale salientar que no regulador de tensão é necessário um ajuste da frequência, onde a frequência natural está relacionada ao diâmetro do rolo e que são também relacionadas equações que possibilitam ao simulador estimar a inércia total dos rolos.

A seguir a estrutura do simulador é descrita com maior riqueza de detalhes. A simulação foi dividida em dois sub-sistemas: controlador e planta, contando com a geração de duas referências: velocidade e tensão. O sub-sistema referente à planta é representado por um diagrama em blocos baseado nas equações apresentadas no capítulo anterior, onde as equações das tiras de papel são associadas às velocidades e as de torque se relacionam com as



tensões mecânicas. O diagrama em blocos representativo das entradas e das saídas contém as equações de torque descritas para os rolos de alimentação e de armazenagem do papel e a mudança no diâmetro em função da densidade do material e da velocidade angular. As equações que compõem o diagrama em blocos do rolo de alimentação de papel modelam a mudança na inércia como uma função do diâmetro do rolo, que por sua vez é função da velocidade de rotação. Os blocos referentes a L1 e a L2 são os comprimentos das zonas de tensão mecânica e as equações não-lineares, que originam seus modelos, relacionam sua elasticidade e sua área de secção transversal, sendo que o coeficiente de amortecimento do material e sua velocidade de superfície também são considerados nessas simulações. No bloco I1 é simulado o acionamento de regulagem do torque em cascata, onde as equações relacionam o torque à inércia e à velocidade de rotação do rolo. O sub-sistema dos reguladores contém dois controladores: o controlador de torque em cascata para gerar a velocidade de referência ideal nas zonas de tensão mecânica da alimentação e de armazenagem e um regulador de tensão adaptativo não-linear.

Ao longo do texto são apresentados os resultados obtidos na simulação, onde a eficiência dos algoritmos do controlador adaptativo de 2ª ordem para o ganho e para a frequência foram testados em uma redução do diâmetro do rolo de 50" a aproximadamente 3" e no aumento do mesmo de 3" a aproximadamente 50". Os gráficos apresentados para ambos grupos são: tensões mecânicas na tira de papel; torque nos rolos de alimentação e de armazenagem; velocidade da linha de processo e diâmetro e inércia do rolo.

A análise dos resultados e as sugestões originadas não foram divulgadas ao público por pertencerem a um projeto oriundo de uma consultoria contratada.

Boulter e Fox (1, 2000) apresentam técnicas para análise e regulagem da tensão mecânica provocada nas lâminas metálicas em um linha de pintura por mergulho. Sua importância para o estudo decorre do fato da construção do sistema ser similar à utilizada na linha de revestimento de papéis especiais, incluindo as duas possibilidades de controle: monitorando o motor (nesse caso através de sua corrente de armadura) ou a tensão mecânica, guardando-se as diferenças entre a deformação provocada no papel e a no aço. A seguir são

desenvolvidos os modelos analíticos. Primeiro, o diagrama de corpo livre do sistema massa-mola-amortecedor correspondente à linha de pintura é analisado, aplicando-se a lei de Hooke nas zonas de potência estabelecidas e associando-se os resultados parciais, possibilitando o desenvolvimento do modelo matemático equivalente ao sistema em estudo. Em seguida, a função de transferência da torre de entrada é calculada para o torque, em função da tensão mecânica e em função da velocidade. Ao longo desse trabalho são elaborados modelos para identificação do sistema com o intuito de estimar o modelo a partir da observação das respostas do sistema aos estímulos adotados. Tais modelos são desenvolvidos com base em funções paramétricas, onde o primeiro passo é a adoção de um método de identificação do sistema auto-regressivo com entrada de dados externa (ARX), cujo objetivo é encontrar um conjunto de coeficientes que minimize a função de erro. A seguir, as equações obtidas na modelagem são utilizadas na elaboração do programa para a coleta de dados, visando obter as respostas do sistema aos estímulos adotados para análise. Assim, vários testes são realizados até que se possa obter a melhor correlação possível entre os estímulos e as respostas. Os resultados são obtidos com a instalação dos equipamentos e dos aplicativos necessários, principalmente o roteiro proprietário desenvolvido a partir dos modelos matemáticos elaborados. Em linhas gerais, o roteiro do Matlab associado com o *toolbox* adequado à aplicação converte a descrição do modelo polinomial ARX em descrições de funções de transferência no domínio  $z$  e desse para o domínio  $s$  com uma transformação linear previamente deslocada em cerca de 2,5 rd/s. A partir daí, são identificados os pólos e os zeros, além de utilizar os diagramas de Bode para obter as funções de transferência no domínio  $s$ . O conjunto de gráficos traçados para a amostragem elaborada segue o roteiro: estímulo de entrada pela resposta medida; as respostas medida e do modelo ARX para o estímulo anterior; diagramas de Bode (ganho e fase). A torre de entrada foi testada em quatro condições de funcionamento padronizadas a partir de situações reais observadas, para as quais foram traçados os gráficos descritos. Para cada condição foi feito o estudo das seguintes correlações: torque da torre de entrada pela função de transferência da tensão mecânica; torque da torre de entrada pela função de transferência da

velocidade. Para a torre de entrega do material (saída do processo) foi feita uma análise similar à realizada para a torre de entrada. Contudo, apenas duas condições foram estabelecidas: torque da torre de entrega pela função de transferência da tensão mecânica; torque da torre de entrega pela função de transferência da velocidade. São ainda discutidas as diferenças entre os modelos empírico e analítico e é proposto um modelo final para a planta mecânica a ser utilizado no projeto e na análise das tensões mecânicas das torres e nos reguladores de corrente elétrica. As tensões mecânicas das torres de entrada e de entrega e os reguladores de corrente elétrica utilizados durante o estudo da linha de pintura de lâminas metálicas por mergulho são integrados com o modelo mecânico final desenvolvido para a planta. As funções de transferência em malha aberta são derivadas e os diagramas de Bode são traçados usando as anotações realizadas durante a visita ao local em que o processo está funcionando. Foram avaliados os resultados da regulação de tensão mecânica na torre de entrada com malha intermediária de velocidade e com malha intermediária de corrente elétrica. A seguir, os mesmos procedimentos foram realizados para regulação de corrente elétrica na torre de entrada, sendo repetidos para a torre de entrega.

Os autores puderam observar que os resultados analíticos e os dados empíricos apresentam pequenas variações, o que indica a possibilidade de pleno uso do modelo desenvolvido e dos roteiros propostos para o controle da linha de processo, inclusive agindo em sua regulação acarretando no controle da frequência de ressonância que apresentava valores entre 2 e 3 rd/s. A partir dos dados coletados e analisados, uma série de recomendações foram realizadas para o melhor aproveitamento do modelo elaborado, destacando que o regulador de tensão mecânica da torre de entrada poderia ser utilizado na configuração do controle de tensão mecânica e em seu ajuste; e é importante confirmar que as molas do disco de Schnorr entre as correntes e a esteira não estejam ativadas durante qualquer das condições de operação normal.

Boulter (1997) realiza estudo sobre o comportamento de correias transportadoras quanto à regulação de sua tensão mecânica, que é análogo ao uso proposto pelo sistema de pintura de papéis especiais, consolidando assim um método de análise para esse tipo de processo.

O enfoque apresentado prioriza as características mecânicas dos componentes, assim como sua dinâmica sistêmica e a utilização de acionamentos elétricos em CA e em CC para os motores, onde o custo efetivo das soluções tipicamente empregadas também é considerado. De início é apresentado o problema a ser estudado, caracterizando as partes componentes do sistema e seu funcionamento. Ao longo do trabalho modelo da esteira é levantado considerando-se faixas distintas de atuação em sua análise e o regulador de tensão mecânica é analisado, utilizando-se os critérios de Bode (diagramas de ganho e de fase), ao ser comparada sua estabilidade em malha aberta a um esquema com compensador de avanço e atraso de fase, sendo assim possível elaborar nova função de transferência e simular o novo modelo para o regulador.

Em complemento ao estudo, buscando um uso mais eficaz de energia pelo sistema, é proposta a análise do custo de energia onde uma significativa redução pode ser obtida usando regulação ativa com acionamento de potência em comparação ao modelo tradicional com embreagens.

O autor conclui que as aplicações com longas esteiras transportadoras aplicando *trippers* e acionamentos estáticos CA e/ou CC podem prover uma solução efetiva caso seu regulador de tensão mecânica seja estável. Adicionalmente, o esquema apresentado acrescenta considerações sobre os benefícios da economia de energia pelas soluções apresentadas, o que muitas vezes passa despercebido nos projetos para esse tipo de aplicação.

Boulter e Fox (2, 2000) dissertam sobre um modelo matemático para estimar as perdas em dobras entre os rolos e a tensão mecânica a ser aplicada necessária para o deslocamento da rede de rolos em uma linha de processo, analisando-se a distribuição de forças ao longo da mesma, com vistas à melhor distribuição de potência.

Inicialmente a modelagem das curvas existentes no processo é explanada e é avaliado o modelo considerando as características plásticas e elásticas do material utilizado, em outras palavras, sua deformação. Em seguida a segunda parte do modelamento estuda a massa, o torque e o equilíbrio das forças para o sistema de rolos. É desenvolvida a base para o modelamento das dobras com equações algébricas, sendo apresentadas validações para as

equações de modelos de estado constante encontradas na literatura pesquisada pelo autor. Enfim, os autores apresentam um modelo numérico para as dobras durante o processo que é considerado mais genérico e mais flexível que um modelo algébrico requerendo condições de estado constante para ser válido. As deformações do material e algumas perdas são determinadas e atualizadas em uma base rolo a rolo.

Os autores concluem que o modelo numérico desenvolvido durante seu estudo foi validado e pode ser utilizado sem restrições, tomando por referência os modelos baseados nas equações algébricas encontradas.

Boulter (1, 2000) relata em detalhes a modelagem, a simulação e o esquema de controle resultante, além de recomendações para a configuração dos mecanismos a serem utilizados no setor de revestimento instalado em indústria gráfica. A relevância desse relatório para este trabalho decorre da definição das principais equações a serem utilizadas para descrever a dinâmica do sistema: a seção de resfriamento do processo de impressão é modelada como sendo uma fonte ideal de velocidade e de tensão mecânica; a saída da seção de resfriamento do revestidor é modelada como tendo absorção ideal de tensão mecânica. Já as inércias, as velocidades e as tensões mecânicas no sistema são calculadas com base na combinação das informações cedidas pelos fornecedores dos equipamentos e os modelos típicos existentes, formando assim o modelo específico para o sistema a ser simulado.

Esse relatório se inicia com a definição das principais equações a serem utilizadas para descrever a dinâmica do sistema: a seção de resfriamento do processo de impressão é modelada como sendo uma fonte ideal de velocidade e de tensão mecânica; a saída da seção de resfriamento do revestidor é modelada como tendo absorção ideal de tensão mecânica. Já as inércias, as velocidades e as tensões mecânicas no sistema são calculadas com base na combinação das informações cedidas pelos fornecedores dos equipamentos e os modelos típicos existentes, formando assim o modelo específico para o sistema a ser simulado. Segue-se a descrição das equações para o trem de direção e para o transporte da tira de papel.

Em seguida o autor apresenta a estrutura da simulação com uma breve descrição de cada bloco. O diagrama de blocos principal contém os principais

sub-sistemas da simulação: o sub-sistema de controle e o sub-sistema da planta. O sub-sistema de controle é constituído pelos sub-sistemas de controle individuais, onde cada controlador é modelado com funções no plano-s, contendo modelos para tempo de amostragem, atraso de transporte e erros de aproximação. As malhas de velocidade de impressão, do rolo de revestimento e do rolo de resfriamento são igualmente modeladas com um controlador de ação PI simples, um limitador e um compensador de avanço e atraso de fase opcional na re-alimentação. Essas malhas formam a seção de direcionamento do sistema. O regulador de posição do material a ser revestido e a tensão mecânica do rolo de resfriamento têm a mesma configuração dos demais sub-sistemas para fins de simulação. O sub-sistema da planta contém o modelo do revestidor e a dinâmica das tiras de papel, na forma de implementações das equações principais levantadas no capítulo anterior. Esse sub-sistema é dividido em três partes fundamentais: um sub-sistema que descreve a dinâmica de impressão, de revestimento e de apoio; um sub-sistema para a dinâmica dos mecanismos do rolo de resfriamento e um sub-sistema descrevendo a dinâmica do material que compõe a tira de papel. Por sua vez, o sub-sistema do rolo de impressão é composto por modelos das dinâmicas dos rolos de impressão, de revestimento e de apoio. Os sub-sistemas dos rolos de impressão e de revestimento são modelos ditos de duas massas, incluindo a inércia do motor, a inércia do seu respectivo rolo, o atrito, a fricção viscosa e um modelo de amortecimento para caixa de engrenagens simples. Já o sub-sistema do rolo de apoio é um modelo de massa simples, incluindo a inércia do rolo de apoio, o atrito e a fricção viscosa. O sub-sistema do rolo de resfriamento é similar aos demais de duas massas, porém inclui a inércia do motor do rolo de resfriamento, a inércia do rolo de resfriamento, o atrito, a fricção viscosa e o modelo de amortecimento. Por fim, o sub-sistema da tira de papel é um modelo de duas zonas de tensão mecânica e reflete a implementação das equações do fluxo de massa descritos no primeiro capítulo. Os resultados, os grupos de gráficos traçados seguem a seqüência: erro de registro, diferença entre o alinhamento ideal dos rolos de revestimento e de impressão e o alinhamento atual; erro de posição, diferença entre a posição sincronizada ideal do eixo de transmissão eletrônica da linha e a posição ideal; tensões mecânicas  $T_1$  e  $T_2$ ; torques dos

eixos dos motores dos rolos de impressão, de revestimento e de resfriamento; velocidades de superfície dos rolos de impressão, de revestimento e de resfriamento. Foram levantados dados referentes às diversas possibilidades de configurações de funcionamento para o sistema em estudo, considerando-se como referências os valores para os rolos de impressão, de revestimento, de apoio e de resfriamento, sendo traçados o grupo de gráficos padronizado para cada uma das configurações apresentadas.

Por fim, o autor realiza observações e recomendações. Segundo os gráficos traçados, observa-se que: uma pequena melhoria foi feita para compensar o atrito da engrenagem; a existência do atrito na configuração mecânica é extremamente depreciadora da precisão do registro do revestimento; o sistema é mais sensível à existência do atrito no trem de direção do rolo de impressão; pequenas melhorias no registro do sistema podem ser feitas com modificações para o controle existente; a existência dos desvios de tensão mecânica na sub-seção de resfriamento da seção de impressão causará problemas no registro da seção de revestimento.

As seguintes recomendações são baseadas nas observações feitas durante a simulação e discussões com vários engenheiros de sistemas: para o melhor casamento entre a seção de resfriamento e o rolo de impressão sugere-se o uso no rolo de impressão de um regulador de velocidade; o ajuste dos mecanismos dos rolos de impressão e de revestimento na melhor configuração para a velocidade de superfície, compensando o atrito da engrenagem; as ações anteriores resultam em uma substancial melhoria na consistência do registrador, onde a malha de registro seria habilitada e regulada.

O grupo de trabalho formado por representantes da indústria Arjo Wiggins e da Universidade de Oxford (s/d) debatem a respeito da tecnologia para revestimento de papéis por “cortinamento”. A relevância desse relatório para o trabalho é devida às características dos papéis e seu comportamento quando de seu revestimento.

São abordados detalhes referentes à velocidade ideal para a passagem do papel sob o substrato, salientando a importância para essa tecnologia da ação da gravidade e da tensão mecânica na superfície do papel. Salienta-se a importância da constância na velocidade da tira de papel para que seja mantida

a posição ideal do mesmo, possibilitando a aderência da tinta no papel com a melhor distribuição sobre a superfície, assim como agilidade no processo de secagem.

Esse processo também depende diretamente da qualidade do papel e da tinta o que propicia uma absorção ótima do substrato.

Valenzuela et al. (2002) propõem um modelo opcional aos tradicionais para controle da tensão mecânica nas máquinas de papel.

Após exporem as características do papel fundamentais ao modelo proposto, os autores dissertam a respeito das estratégias usuais de controle da tensão mecânica: controle indireto da tensão mecânica por diferença na velocidade, onde a tensão mecânica é calculada a partir da diferença das velocidades em seções distintas do processo, sendo necessário que o conteúdo da mistura (papel) permaneça constante por toda superfície; controle indireto da tensão mecânica com variação da velocidade por limitação do torque, onde o torque do motor elétrico é limitado pela corrente elétrica em sua armadura ou por sua velocidade nominal; controle de tensão mecânica com a utilização de sensores de tensão mecânica, sejam sensores de posição ou transdutores de força, que permitem estimar a tensão mecânica à qual o papel está submetido; controle da tensão mecânica sem sensoriamento, baseia-se nas características físicas da folha, onde a tensão mecânica será refletida como um componente de torque.

O artigo de Penna et al. (1999) tem relevância ao presente trabalho face ao seu estudo de sistemas de controle de processos adotados na indústria de celulose e papel, destacando os PID. A incorporação do auto-ajuste a esses controladores também é um assunto que merece destaque com relação a este trabalho, sendo a associação de um modelo matemático a ferramentas de programação o principal destaque. De início é realizada uma apresentação a respeito dos controladores mais comumente adotados em processos produtivos, sejam os de ação PID. Também é mencionada a valia das análises criteriosas com relação ao processo, com vistas à melhor definição dos parâmetros a serem utilizados pelo controlador. Salientam-se os erros que são encobertos pelos controladores PID mal-sintonizados que muitas vezes são descobertos apenas com a presença de perturbações significativas e que a função de auto-



ajuste pode ser uma ótima solução para esses casos. O auto-ajuste é incorporado aos controladores através de programas aplicativos específicos para esse fim. O trabalho apresenta noções gerais sobre ferramentas de auto-ajuste. Foi salientada a importância da adequação dos programas de auto-ajuste ao sistema, através da correta identificação do processo, onde é importante diferenciarem-se ruídos de curvas de resposta, fazendo uso de ferramentas robustas de controle com o intuito de conferir as devidas correções no andamento do processo, incluindo adequação à malha de controle e ao tipo de ação desejada para o controlador. Nota-se que a integração das ferramentas de auto-ajuste dos sistemas de controle é uma de suas características mais relevantes, permitindo a orientação do trabalho do usuário, análise automática dos resultados e atualização dos parâmetros de controle sem a necessidade de intervenção nas estações de operação. A metodologia utilizada pelos programas de auto-ajuste é outro fator que deve ser considerado. Os mais utilizados são: Modelagem Matemática, a qual se baseia na identificação do modelo do processo a partir do ajuste de curvas que se adaptem às informações coletadas; Teste Degrau, consiste na aplicação de um degrau no sinal de saída ou no ponto de operação do controlador; Oscilação Auto-mantida, sucessão rápida de perturbações em pulso no elemento final de controle, depurados até que a variável de processo oscile entre os limites máximo e mínimo em um determinado período; Técnicas Heurísticas, se referem à ajuda ao aprendizado por métodos experimentais, especificamente de tentativa e erro. Salientam os autores a necessidade de se capacitar os usuários das ferramentas de auto-ajuste, instrumentistas e operadores, com conhecimentos básicos de controle de processos e sintonia dos controladores. O uso das ferramentas de auto-ajuste fica restrito à sintonia de controladores, ou seja o aumento da eficiência do controle, não se aplicando à solução de problemas na arquitetura ou nos elementos da malha de controle. Os autores apresentam, também, as aplicações dos programas de auto-ajuste, características gerais e alguns estudos de caso para configurações de equipamento: Controladores Digitais e Controlador Programável; SDCD.

Por fim, os autores concluem que as ferramentas de auto-ajuste justificam seu uso mediante a melhoria do controle e sua economia de matérias-

primas, utilidades e mão-de-obra, pela sintonia dos controladores de ação PID.

Haapanen e Lins (1999) descrevem em artigo, aplicações com base na medição da temperatura dos rolos internos a um forno. Sua relevância está baseada na tecnologia dos sensores e dos medidores utilizados e na caracterização de um perfil de temperatura. A parte inicial do trabalho é voltada ao conhecimento da base tecnológica utilizada nos dispositivos sensores adotados para as medições propostas. Saliencia-se que as primeiras pesquisas com esses sensores de temperatura foram realizadas nos Laboratórios de Física Aplicada da Universidade John Hopkins, sob encomenda da NASA, que pretendia usá-los em seu programa espacial, destacando sua constituição: um cristal sensível à temperatura, um circuito de comunicação e uma bateria. A seguir, é vista a forma de adaptá-los às máquinas de papel, onde o dispositivo é fixado ao rolo, sendo sua bateria e seu transmissor acondicionados em uma pequena caixa, também presa a esse rolo. As características do sistema de medida de temperatura do secador são exploradas. Sua constituição é descrita, onde os sensores são interligados e conectados a um sistema central baseado em computador pessoal. O desempenho das medições, as características técnicas dos equipamentos utilizados no ensaio são descritas, assim como os critérios adotados para a obtenção dos resultados. Os benefícios potenciais do conhecimento acerca da temperatura de superfície do forno são comentados, destacando-se os aspectos de produtividade, de qualidade e de segurança do equipamento. Em termos da produção, permite-se a correção de problemas que influenciariam na busca por maximização da produção. Quanto à qualidade, mantendo-se um bom gradiente de temperatura, garante-se que o papel não seja danificado. No aspecto de segurança do equipamento, permite-se o monitoramento das condições de temperatura de funcionamento do mesmo, interferindo caso ultrapasse os valores nominais de temperatura para o seu melhor uso. Os autores descrevem as aplicações de controle utilizando-se das medições de temperatura em superfície, destacando-se as aplicações mais comuns ao processo produtivo e os tipos de controle adotados.

Por fim, os autores destacam as possibilidades futuras de seu trabalho e o seu uso na identificação de condições críticas que influenciariam negativamente o processo de produção de celulose e papel.

A dissertação de mestrado de Lima (2001) a respeito de um sistema de bobinamento de tiras de aço tem importância para este estudo pela modelagem a respeito do comportamento dinâmico dos rolos de bobinamento. De início, são descritas as considerações gerais a respeito do trabalho, incluindo conceitos a respeito de lingoteamento contínuo de tiras e um descritivo sobre a organização do trabalho. Na seqüência a tecnologia de lingoteamento contínuo de tiras utilizada na unidade de bobinamento de tiras estudada, especificamente o lingoteamento do tipo rolo duplo (*twin roll*), é descrita em detalhes, realizando-se, assim, um estudo prévio do sistema e sua conseqüente análise. É, também, desenvolvida a modelagem matemática do sistema de bobinamento em estudo, sendo consideradas as equações eletro-mecânicas do motor CC integrante do sistema "rolo bobinador" e as implicações das variações de raio e massa nesse rolo, assim como os efeitos da caixa de redução de velocidades sobre a inércia e o torque. São apresentados os resultados dos ensaios com o taco-gerador, com a caixa de redução e com o motor CC e descritas as características e os modos de funcionamento dos elementos de acionamento e de controle, especificamente do controlador lógico programável (CLP) e do retificador trifásico. O trabalho estuda também o sistema de controle do bobinamento, sendo elaborada a função de transferência do motor CC e apresentados conceitos a respeito das variações paramétricas para o sistema de controle estudado, as ações de controle adotadas, os efeitos dos sensores no sistema e a respeito de sistemas de controle em malha fechada. É realizado um estudo sobre o sistema de controle do bobinamento utilizando-se sensor ultrasônico, sendo apresentados conceitos sobre sensores ultrasônicos e analisado pelo método do Lugar das Raízes uma proposta de sistema de bobinamento utilizando controle PID com sensor ultrasônico. Outro estudo presente no trabalho refere-se a uma proposta de sistema de controle robusto. Esse estudo, em linhas gerais, consiste de: definição do problema; apresentação do sistema; estabelecimento de um sistema nominal e de um sistema real; modelagem da planta; estabelecimento dos elementos do compensador; descrição do procedimento de recuperação do sinal; definição da malha objetivo; resumo dos procedimentos do projeto; e suas observações finais.

O autor apresenta os resultados e as suas discussões. São descritas,

nesse capítulo, as simulações do motor CC, do sistema de bobinamento, do sistema de controle, da proposta do sistema de controle com sensor ultrassônico e controlador PID, da proposta de controle robusto com sensor ultrassônico e a análise de todos os resultados obtidos. O autor conclui que a proposta de modelagem do sistema de bobinamento de tiras de aço e das simulações com as considerações a respeito das variações paramétricas inerentes ao sistema foi alcançada com sucesso.

### **1.3.OBJETIVOS**

O trabalho aqui proposto tem por objetivo a análise e modelagem do sistema de acionamento e controle em malha fechada de uma máquina para revestimento de papéis especiais, utilizado na fábrica de papéis Schweitzer-Manduit, visando a diminuição da demanda de energia e o aumento da produtividade no processo através de sua otimização.

### **1.4.MATERIAIS E MÉTODOS**

A metodologia aplicada à análise do sistema de acionamento e controle envolve o uso de aplicativos voltados à linguagem técnica, especificamente o SCILAB 2.7.2 e o SCICOS, em sistema operacional GNU / Linux.

De início são estabelecidas as equações de estado, fazendo-se uso das técnicas de modelamento matemático, possibilitando construir as matrizes que representem os fenômenos e as grandezas envolvidos no processo.

Em seguida, de posse das matrizes de estado, utiliza-se o SCILAB para cálculo das funções de transferência, assim como o cálculo dos pólos correspondentes a essas funções.

Identificados os dispositivos que compõem o processo, é estabelecido

um modelo matemático e, a partir desse, simula-se o processo sem a presença do controle.

O próximo passo refere-se à especificação do comportamento desejado relacionando este comportamento à posição dos pólos.

A partir daí, simula-se novamente o sistema, desta feita com a efetivação do controle.

Os procedimentos descritos podem ser sintetizados no seguinte algoritmo: modelagem; simulação do sistema sem controle; simulação do sistema com controle; especificação do comportamento desejado; relação do comportamento com os pólos.

Após ponderar-se a respeito dos componentes e dispositivos existentes no processo em que este estudo está baseado, o mesmo é caracterizado a partir de valores conferidos na prática do equipamento e do processo citados, assim como, para fins de análise, as informações pertinentes são organizadas, com o intuito de possibilitar sua adequação à metodologia proposta.

Considerando-se a similaridade entre os modelos de cada setor, foi estabelecido um modelo padrão baseado nos componentes existentes na sessão de secagem, pois sua complexidade abrange os demais setores.

## **CAPÍTULO 2**

---

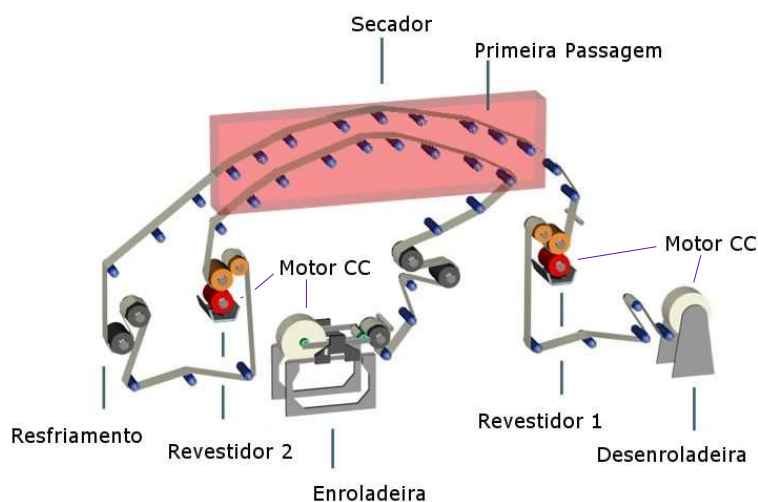
### ***DISCUSSÃO DO PROCESSO***

Neste capítulo é apresentado o processo que é objeto deste estudo, destacando suas características gerais, dividindo a unidade de revestimento de papéis especiais em setores e descrevendo o funcionamento de cada setor. Também são destacados os dados técnicos dos componentes do sistema em estudo.

#### ***2.1. ANÁLISE DA LINHA DO PROCESSO DE REVESTIMENTO DE PAPÉIS***

De forma geral, o processo de revestimento de papéis inicia-se com um rolo de onde a tira de papel é desenrolada, constituindo-se na fonte de material a ser revestido. A seguir, um conjunto de rolos guia e um rolo de apoio, que conta com um motor elétrico para tracionar o papel, passam a tira por um recipiente com tinta, onde o papel é propriamente revestido. Após ser revestida, a tira de papel tem o excesso de tinta retirado por uma lâmina colocada no último jogo de rolos desse setor, antes de seguir em direção à secagem, onde a tinta é secada por aplicação indireta de calor, através do insuflamento de ar quente, sendo o papel então enviado a um estágio que funciona como um atraso da tira de papel em relação ao processo para que essa seja resfriada. Então, a tira de papel passa por um segundo estágio de revestimento para que a face do papel ainda virgem seja revestida. Após isso, a tira de papel é novamente passada pelo forno e por um segundo estágio de resfriamento, para assim seguir para o rolo de armazenagem que, também, dispõe de um motor,

da mesma forma que os rolos principais dos estágios de revestimento. Esse processo pode ser visto na figura 2.1.



**FIGURA 2.1 – ESQUEMA DE FUNCIONAMENTO DE UMA UNIDADE DE REVESTIMENTO DE PAPÉIS.**

Com relação à desenroladeira, o rolo aí utilizado para alimentação do processo é formado pela tira de papel originada de 2 rolos menores e vindos da máquina de papel, ou seja, para o processo de papéis especiais, significa dizer que o rolo tem 2,10 m de raio contendo cerca de 7 200 m de papel, levando em média 45 minutos para serem revestidos e armazenados na enroladeira, a uma velocidade nominal de 80 m/s. A esse rolo é comumente dado o nome de "Jumbo" ou de "Rolo Mãe".

Há de se salientar que, segundo os padrões internacionais adotados pela indústria de papel e celulose, o tipo do papel é referenciado por sua densidade superficial, a qual tem valores entre 65 g/m<sup>2</sup> e 300 g/m<sup>2</sup>, tendo sua espessura entre 100 µm e 300 µm, proporcionalmente às densidades superficiais mencionadas. Por sua vez, seu revestimento, referente ao tipo de

papel (sulfite, vergê, glossy, etc.), está entre  $2 \mu\text{m}$  e  $5 \mu\text{m}$ . Com relação à sua composição, o papel é constituído por fibras de celulose com as dimensões de  $1 \text{ mm} \times 5 \mu\text{m} \times 25 \mu\text{m}$ .

Ainda com relação ao papel, em sua condição mais crítica, uma amostra de  $500 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$ , ao ser-lhe imposta uma força de tração mecânica de  $2 \text{ kN}$ , em decorrência da tração entre os rolos, tem uma deformação específica de  $0,5 \%$ . Esses valores de referência são os adotados para fins do presente estudo.

### 2.1.1. Alimentação

Este setor, também referido como desenroladeira, é constituído por um rolo com a tira de papel enrolada, de onde o sistema será alimentado. O rolo está acoplado a um motor elétrico responsável por mantê-lo na velocidade nominal do sistema, a qual é monitorada por um taco-gerador acoplado ao eixo do motor. A figura 2.2 ilustra o primeiro setor dessa unidade de pintura.

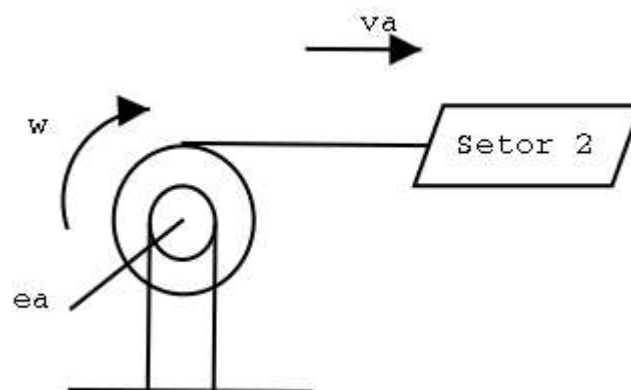


FIGURA 2.2 – REPRESENTAÇÃO DO ROLO DE ORIGEM DA TIRA DE PAPEL.



### 2.1.2.Revestimento

Neste setor há um rolo de apoio acoplado a um motor elétrico, que sincroniza a velocidade da tira de papel com os demais setores, monitorado pelo sistema através de um taco-gerador colocado em seu eixo. Esse rolo, mergulhado em um tanque com tinta, está associado a dois rolos de guia e a uma lâmina dispostos de forma que a tira de papel receba o revestimento de tinta e o excesso seja extraído do papel pela lâmina.

Na saída do sistema, há um conjunto de três rolos guias de papel, onde o central dispõe de uma célula de carga que transfere ao sistema o valor equivalente à tensão mecânica do papel nesse setor. A figura 2.3 ilustra o diagrama representativo desse setor.

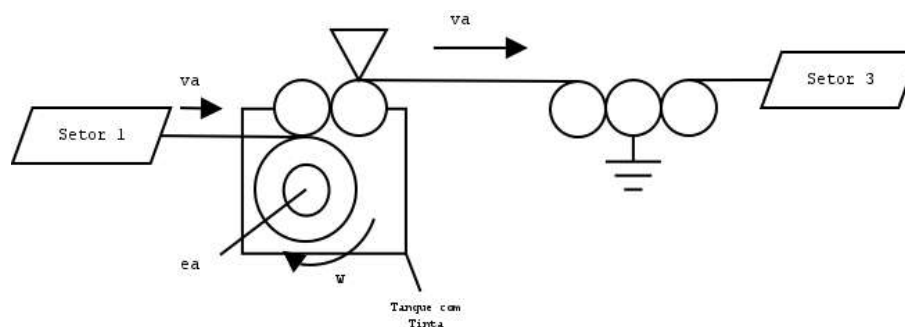


FIGURA 2.3 – DIAGRAMA DO SETOR DE REVESTIMENTO.

### 2.1.3.Secagem

Este setor é composto por um rolo de apoio acoplado a um motor elétrico que sincroniza a velocidade do papel com os demais setores, re-alimentando o sistema com as informações geradas pelo taco-gerador disposto em seu eixo. Além desses, existem treze rolos guias de papel, estando cinco dispostos na entrada do setor de forma a proporcionar um estágio de secagem mecânica (por ação da gravidade), cinco colocados no forno e três na saída,

estando o central associado a uma célula de carga que retorna a tensão mecânica no papel. A figura 2.4 mostra os elementos que compõem o setor de secagem.

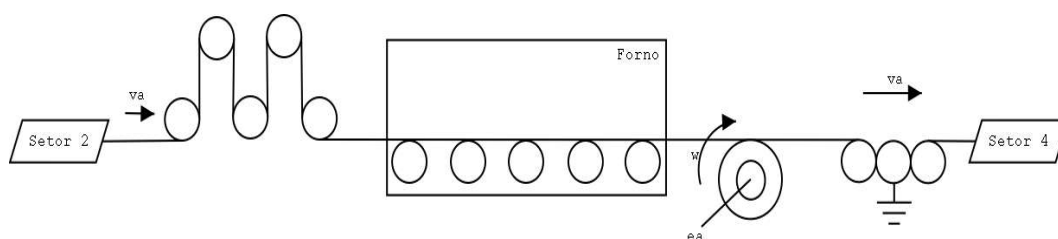


FIGURA 2.4 – DIAGRAMA ILUSTRATIVO DO SETOR DE SECAGEM.

#### 2.1.4. Armazenagem

Este setor, também conhecido como enroladeira, é composto por um rolo acoplado a um motor elétrico, que visa mantê-lo na velocidade nominal da tira de papel, a qual estará sendo armazenada nesse rolo. Ao eixo do motor está acoplado um taco-gerador que alimenta o sistema com a sua velocidade. A figura 2.5 mostra a configuração atual do setor de armazenagem da unidade de revestimento de papéis especiais.

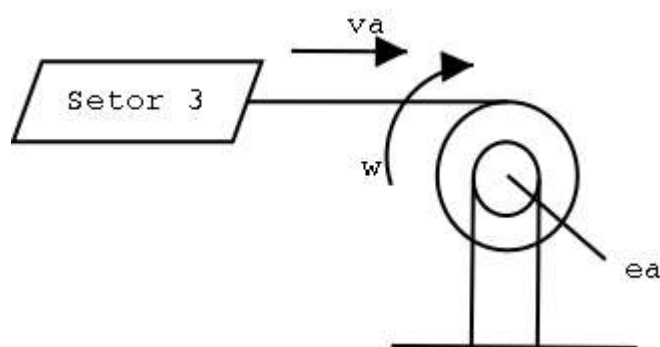


FIGURA 2.5 – REPRESENTAÇÃO DO SETOR DE ARMAZENAGEM DE PAPEL.

## 2.2.DADOS TÉCNICOS DOS COMPONENTES DO SISTEMA

A tabela 2.1 relaciona os parâmetros inerentes ao motor elétrico em uso na unidade de revestimento de papéis especiais.

TABELA 2.1 – MOTOR DE CORRENTE CONTÍNUA. (Cortesia: WEG)

<i>Parâmetro</i>	<i>Valor</i>
Potência	1,5 kW (2 CV)
Velocidade	1750 RPM
Torque máximo	8,19 N.m
Tensão de armadura	440 V
Resistência de armadura	142,9 $\Omega$
Corrente de armadura	3,09 A
Inércia	0,00532 kg.m <sup>2</sup>
Frequência	60 Hz

Na figura 2.6 pode ser visto o motor de corrente contínua, de fabricação da WEG, utilizado na unidade de revestimento de papéis especiais de uma fábrica do ramo de celulose e papel.

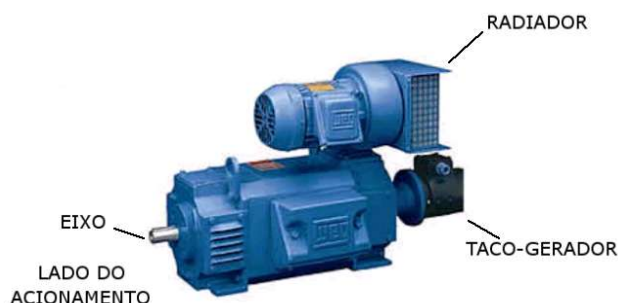
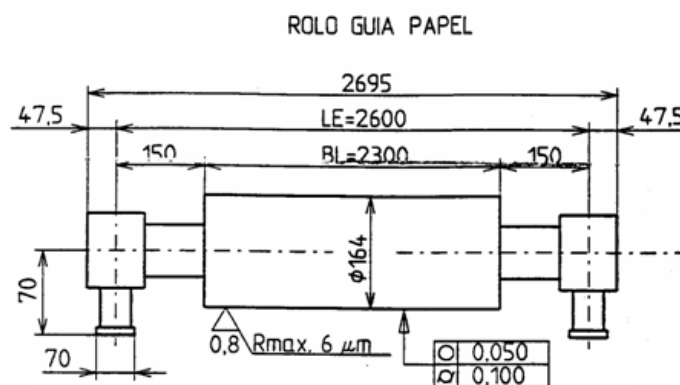


FIGURA 2.6 – MOTOR DE CORRENTE CONTÍNUA. (Cortesia: WEG)

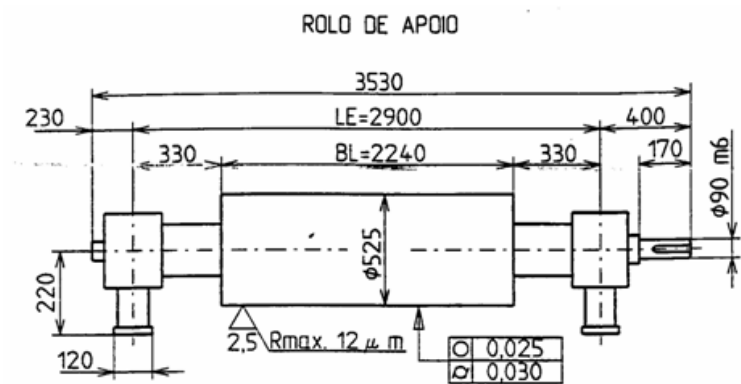
As figuras 2.7 e 2.8 ilustram as dimensões dos rolos utilizados no processo. Esses rolos têm a função de manter o papel se movimentando na velocidade imposta pelos motores aos quais estão acoplados, durante o processo de revestimento. Os mesmos estão dimensionados de modo que sua inércia e seu atrito com a tira de papel não influenciem no processo.



**FIGURA 2.7 – ROLO GUIA DE PAPEL. (Cortesia: Schweitzer-Manduit)**

Os rolos destinados a serem guias do papel têm a estrita função de manter o papel em posição, diminuindo a ação da gravidade sobre o mesmo, o que poderia causar danos à tira de papel.

Esses rolos têm um diâmetro de 164 mm, como ilustrado na figura 2.7.



**FIGURA 2.8 – ROLO DE APOIO. (Cortesia: Schweitzer-Manduit)**

Os rolos de apoio têm um diâmetro maior (525 mm), conforme ilustrado na figura 2.8, e servem de apoio à manutenção da velocidade da tira de papel, mantendo-a estável.

Neste estudo, a velocidade da tira de papel foi considerada uma entrada de referência para o sistema, com o valor nominal de 4 m/s ( $v_a$ ).

O circuito de potência para acionamento do motor de corrente contínua é de fabricação da ABB. A tabela 2.2 enumera suas principais características.

**TABELA 2.2 – CIRCUITO DE POTÊNCIA CA/CC. (Cortesia: ABB)**

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
Tensão máxima de saída	440 V (ajustáveis)
Potência	15 kW
Entrada de sinal analógico	0-10 V

A figura 2.9 ilustra o circuito de potência CA/CC da ABB utilizado na unidade de revestimento de papéis especiais.



**FIGURA 2.9 – CIRCUITO DE POTÊNCIA CA/CC. (Cortesia: ABB)**

A tabela 2.3 relaciona os parâmetros inerentes ao taco-gerador utilizado com os motores elétricos.

**TABELA 2.3 – TACO-GERADOR 2RCP/60. (Cortesia: WEG)**

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
Corrente Máxima	0,25 A
Precisão	0,06 V/RPM
Velocidade Máxima	8000 RPM

O taco-gerador é projetado para ser aplicado no servo-controle numérico, acionamento para máquinas têxteis, aceleradores e freios de elevadores e em outras aplicações que requeiram velocidade contínua e extremamente controlada ou acelerações e desacelerações de programas pré-fixados.

O modelo utilizado na unidade de revestimento de papéis especiais, segundo dados do fabricante, fornece uma tensão elétrica de saída de 60 V<sub>CC</sub> proporcional a uma velocidade angular de 1000 RPM, podendo essa tensão elétrica variar linearmente, conforme a variação de rotação do motor no qual esteja instalado.

Na figura 2.10 pode ser visto o taco-gerador de fabricação da WEG,

utilizado junto aos motores elétricos contidos na unidade de revestimento.



**FIGURA 2.10 – TACO-GERADOR. (Cortesia: WEG)**

A célula de carga é o sub-sistema que efetua o sensoriamento e a medição referente à deformação do papel, que é retornada ao sistema como sendo o erro.

O sensor propriamente dito é um dispositivo transdutor do tipo extensômetro (*strain gage*), cuja deformação é transformada em um valor de resistência diretamente associado à tensão mecânica exercida pelo sistema sobre o papel. Essa relação é representada pela equação

$$GF = \frac{\Delta R/R}{\Delta L/L} = \frac{R_{SG}}{\epsilon} ,$$

onde

GF é o fator de medida do extensômetro;

$R_{SG}$  é a variação de resistência resultante da deformação do dispositivo; e,

$\epsilon$  é a variação fracional do comprimento (deformação).

A figura 2.11 ilustra um transdutor de tensão mecânica comumente adotado em indústrias que produzem tiras, essencialmente papel e aço.



**FIGURA 2.11 – TRANSDUTORES DE TENSÃO MECÂNICA. (Cortesia: ABB)**

Como o sinal gerado não pode ser usado diretamente, o extensômetro é colocado em um circuito chamado ponte de Wheatstone, que é projetado para estar em equilíbrio quando a tensão mecânica exercida sobre o papel for a desejada, ou seja, quando o transdutor não estiver deformado.

A equação

$$E = \frac{R_1}{R_3} = \frac{R_2}{R_4}$$

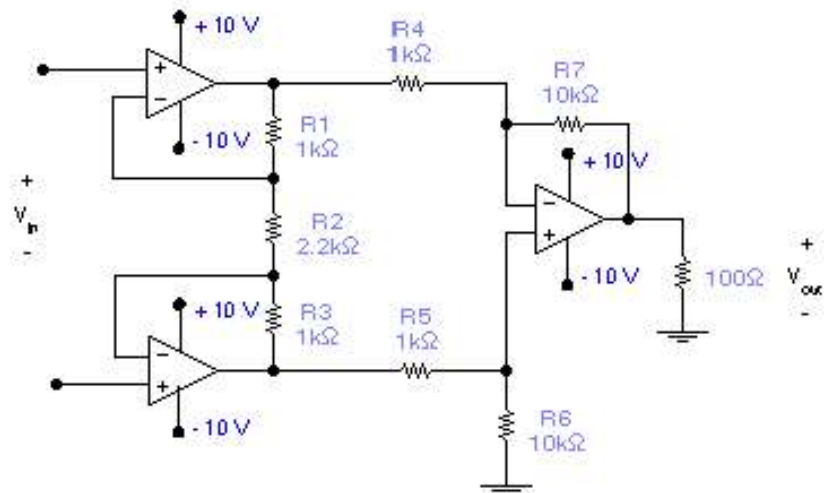
mostra as relações entre os resistores componentes da ponte de Wheatstone e o sinal elétrico transferido a seus terminais de saída.

Quando houver um tensão mecânica exercida (deformação), o extensômetro desbalanceia a ponte, pela alteração do valor de sua resistência elétrica, segundo o ganho representado pela equação

$$A = -\frac{R_1}{R_2} ,$$

a ser transferido à entrada de um amplificador operacional, devidamente configurado para que se obtenha uma diferença de potencial a ser utilizada pelo controlador, conforme ilustrado na figura 2.12.





**FIGURA 2.12 – AMPLIFICADOR DE INSTRUMENTAÇÃO.**

A célula de carga, também de fabricação da ABB, modelo QGPT 103-A, tem por principal característica sua faixa de atuação, que é de 0 a 2 kN.

A figura 2.13 ilustra uma célula de carga de fabricação da ABB, cuja configuração é tipicamente utilizada nas máquinas de papel e de revestimento.



**FIGURA 2.13 – CÉLULA DE CARGA. (Cortesia: ABB)**

Segundo Ogata (1997), os sensores dispostos em um sistema de controle re-alimentado podem ser vistos como constantes, desde que seu atraso seja desprezível com relação aos demais componentes do sistema.

Assim, considerando uma tensão elétrica de referência de 440 V e a possibilidade de leitura pela célula de carga de um valor máximo de 2000 N, adota-se a constante  $k_{cc} = 0,22 \text{ V/N}$  ou, na forma normalizada,  $k_{cc} = 0,22$  por unidade (pu).

De forma análoga, considerando uma tensão elétrica de referência de 440 V e a velocidade de rotação do motor máxima de 1730 RPM, adota-se a constante  $k_{tg} = 0,25 \text{ V/RPM}$  para o taco-gerador, ou, na forma normalizada,  $k_{tg} = 0,25$  pu.

O Controlador P-I é um Controlador Programável, do tipo CLP. As rotinas programadas para controle da unidade de revestimento de papéis especiais são gravadas na memória de programação do CLP e contêm características das ações P-I, na forma de um bloco de comando específico.

A figura 2.14 ilustra o controlador lógico programável Telemecanique Premium TSX P57 utilizado na unidade de revestimento de papéis especiais.



**FIGURA 2.14 – CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMÁVEL PREMIUM TSX P57.**  
(Cortesia: Telemecanique)

## **CAPÍTULO 3**

---

# **MODELAGEM DOS COMPONENTES DO SISTEMA**

Ao ser consultada a literatura específica, encontrou-se vasto material a respeito dos componentes do sistema em estudo.

A seguir, algumas características inerentes a esses dispositivos são relacionadas para auxiliar na adoção de critérios adequados à análise do sistema de controle mencionado, assim como funções de transferência propostas por diversos autores.

### **3.1.MOTOR DE CORRENTE CONTÍNUA SEM CARGA**

Na aplicação proposta, a velocidade de rotação do motor será o objeto de estudo, pois a tensão mecânica aplicada ao papel depende do valor dessa variável.

O esquema representativo do comportamento da armadura e do rotor do motor elétrico adotado neste estudo é visto na figura 3.1 (Messner e Tilbury, 1999).

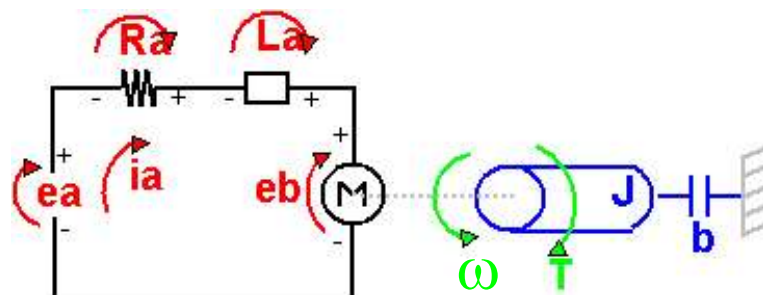


FIGURA 3.1 – ESQUEMA DE MODELO PARA O MOTOR DE CORRENTE CONTÍNUA CONTROLADO POR ARMADURA.

A tabela 3.1 relaciona os parâmetros físicos adotados neste estudo e referem-se aos motores comumente adotados na indústria de papel e celulose.

TABELA 3.1 – PARÂMETROS FÍSICOS DO MOTOR ADOTADO.

<i>Parâmetro</i>	<i>Valor</i>
Momento de inércia do rotor (J)	0,00532 kg.m <sup>2</sup>
Constante de atrito do sistema mecânico (b)	0,01 N.m.s
Torque do motor elétrico (T)	8,19 N.m
Constante da f.c.e.m. ( $k_e$ )	2,65 N.m/A
Resistência elétrica ( $R_a$ )	142,9 $\Omega$
Indutância elétrica ( $L_a$ )	14,29 mH
Corrente de armadura ( $i_a$ )	3,09 A
Frequência da rede CA – 60 Hz ( $f$ )	376,8 rd/s
Raio do eixo do motor (r)	0,012 m
Tensão elétrica de armadura ( $e_a$ ) – entrada controlada	440 V
Velocidade de rotação do eixo do motor ( $\omega$ ) – saída	181,2 rd/s

O torque do motor,  $T$ , está relacionado com a corrente de armadura,  $i_a$ , por uma constante  $k_t$ , e a força contra-eleto-motriz,  $e$ , é relacionada à

velocidade de rotação,  $\omega$ . Essas relações são representadas pelas equações estáticas

$$T = k_t \cdot i_a$$

e

$$e_b = k_e \cdot \omega$$

Note-se que, para o presente estudo, adotou-se a constante de armadura ( $k_t$ ) igual numericamente à constante do motor ( $k_e$ ), segundo a orientação do fabricante do motor elétrico, com base nas características construtivas do mesmo.

Com base na figura 3.1 foram deduzidas as equações dinâmicas, mecânica e elétrica, baseadas na Lei de Newton combinada com a Lei de Kirchhoff, as quais foram adotadas como referência.

#### a) Equação Mecânica

$$J \cdot \frac{d\omega}{dt} + b \cdot \omega = k_t \cdot i_a$$

#### b) Equação Elétrica

$$L_a \cdot \frac{di_a}{dt} + R_a \cdot i_a = e_a - k_e \cdot \omega$$

### 3.2.CONTROLADOR PI

O bloco controlador é o principal componente do sistema de controle.

Cabe a ele comparar o nível de sinal desejado com o sinal retornado pelo processo e minimizar o erro apresentado.

O controlador depende diretamente do tipo de ação desejada. Ele pode ser desde um circuito amplificador, que amplifica um sinal de erro e o transfere ao bloco no qual está atuando (por exemplo, no motor CC em questão, essa ação não satisfaz à condição  $e_{reg} = 0$ ), até circuitos mais sofisticados baseados em integradores, diferenciadores, etc.

Os tipos fundamentais de controladores, segundo sua ação, são Proporcional, Integral e Derivativo. Um controlador Proporcional ( $K_P$ ) tem como característica a redução do tempo de subida de um sinal e do erro sistemático. Um controlador Integral ( $K_I$ ), por sua vez, tem a capacidade de eliminar o erro sistemático, porém, piora a resposta a transientes. Por fim, um controlador Derivativo ( $K_D$ ) aumenta a estabilidade do sistema, reduzindo o sobre-sinal e aperfeiçoando a resposta a transientes. A tabela 3.2 apresenta um resumo dessas características (Messner e Tilbury, 1999).

**TABELA 3.2 – RESUMO DOS EFEITOS DE CADA CONTROLADOR EM UM SISTEMA DE MALHA FECHADA.**

<i>Resposta em Malha Fechada</i>	<i>Tempo de Subida</i>	<i>Sobre-sinal</i>	<i>Tempo de Acomodação</i>	<i>Erro Sistemático</i>
Kp	Diminui	Aumenta	Pequena mudança	Diminui
Ki	Diminui	Aumenta	Aumenta	Elimina
Kd	Pequena mudança	Diminui	Diminui	Pequena mudança

### 3.3.CIRCUITO DE POTÊNCIA

O bloco circuito de potência tem por finalidade a amplificação da

corrente elétrica, disponibilizada pelo sinal emitido a partir do controlador, para que haja um sinal suficiente, que possibilite a rotação do motor de corrente contínua, por intermédio da condução ou corte do tiristor.

### 3.4. O MODELO ADOTADO

Após a análise dos setores constituintes do sistema em estudo, pode-se elaborar uma representação básica equivalente aos componentes do sistema estudado, conforme ilustrado na figura 3.2, cuja análise contempla as demais configurações de rolos da unidade de revestimento de papéis.

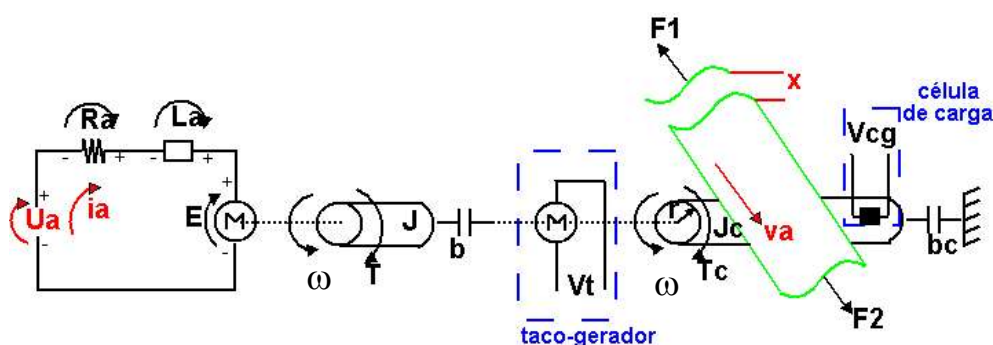


FIGURA 3.2 – REPRESENTAÇÃO DO ROLO DE APOIO.

Também em decorrência dessa análise, pode-se elaborar a matriz de espaço de estados para o sistema em estudo, a partir da mencionada adoção de um sistema representativo básico.

Com base na descrição dos fenômenos físicos que estão relacionados ao processo em estudo, pode-se chegar às variáveis de estado e aos parâmetros do sistema, ou seja, relacionar suas entradas e suas saídas.

Desse modo, são consideradas como entradas a velocidade da tira de papel ( $v_a$ ) e a diferença de potencial aplicada aos terminais de armadura do

motor de corrente contínua ( $e_a$ ). Tal escolha decorre do fato de que a tensão elétrica na armadura do motor está diretamente associada à tensão mecânica de tração do papel nos rolos ( $TT$ ), que é a variável a ser controlada, ou seja, a resposta desejada pelo sistema. Assim sendo, adotam-se como variáveis de saída do sistema a velocidade angular no motor ( $\omega$ ), pois essa provoca a tensão mecânica de tração do papel, e a sua deformação ( $x$ ).

Por sua vez, as variáveis de estado mais convenientes para expressar os fenômenos em estudo no sistema proposto são:

$\omega(t)$ , a velocidade de rotação do motor de corrente contínua; responsável pela velocidade a ser imposta pelos rolos e, por conseguinte, pela tração no papel;

$i_a(t)$ , a intensidade de corrente elétrica na armadura do motor de corrente contínua;

$x(t)$ , a deformação do papel; a partir dela é possível relacionar-se a velocidade desejada (entrada) com a velocidade real (saída).

Por meio dessas variáveis de estado, é possível se determinar as expressões matemáticas relacionadas aos fenômenos físicos em estudo.

#### *Relações fundamentais referentes à tração do papel*

$$TT = k \cdot \int (v_2 - v_1) dt$$

então,

$$TT = k \cdot x \quad ,$$

sendo  $k$  o módulo de elasticidade do papel, que varia pela influência da tinta, da temperatura, do estado de tensão mecânica da tira de papel, etc., para o presente estudo adota-se o valor médio para o tipo de papel que se está revestindo, que está entre 0,6 e 0,9 N/m<sup>2</sup>. A tabela 3.3 relaciona os módulos de elasticidade dos tipos de papel mais comuns (Valenzuela et al., 2002).



**TABELA 3.3 – EXEMPLOS DE MÓDULOS DE ELASTICIDADE DOS TIPOS DE PAPEL MAIS COMUNS.**

<b>MÓDULO DE ELASTICIDADE (N/m<sup>2</sup>)</b>				
<b>Tipo de Papel</b>	<b>Jornal</b>	<b>Fino</b>	<b>Cartão</b>	<b>Couché</b>
Mínimo	0,251	0,617	0,889	0,282
Máximo	0,466	0,896	1,040	0,532

*Relações inerentes ao funcionamento do sistema em estudo*

$$\frac{di_a}{dt} = \frac{1}{L_a} \cdot [e_a - k_e \cdot \omega - R_a \cdot i_a] \quad (3.1)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J} \cdot [k_t \cdot i_a - b \cdot \omega] \quad (3.2)$$

$$\frac{dx}{dt} = k \cdot (v_a - v) \quad (3.3)$$

Rearranjando as equações 3.1, 3.2 e 3.3, obtêm-se as equações de estado: equações dinâmicas e equações de saída, dando origem às matrizes de estado.

A equação 3.4 representa a matriz de estado com as equações dinâmicas do sistema em estudo, utilizada nas simulações do processo.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \omega \\ i_a \\ x \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} -\frac{b}{J} & \frac{k_t}{J} & 0 \\ -\frac{k_e}{L_a} & -\frac{R_a}{L_a} & 0 \\ -r & 0 & 0 \end{bmatrix}}_A \cdot \begin{bmatrix} \omega \\ i_a \\ x \end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_a} \\ 1 & 0 \end{bmatrix}}_B \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} v_a \\ e_a \end{bmatrix}}_u \quad (3.4)$$

### 3.4.1. Modelagem do Rolo de Armazenagem (Enroladeira)

Este setor tem um motor CC associado a um rolo de apoio e se caracteriza por variações em seu raio, em sua velocidade de rotação e em sua inércia à medida que a tira de papel é enrolada. A figura 3.3 ilustra essa associação e a figura 3.4 ilustra a influência da tensão de tração entre 2 rolos.

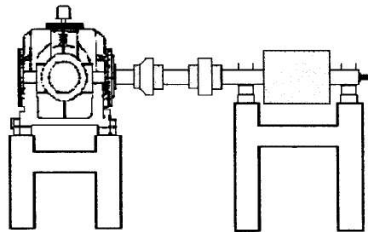


FIGURA 3.3 – MOTOR CC ASSOCIADO AO ROLO DE APOIO.

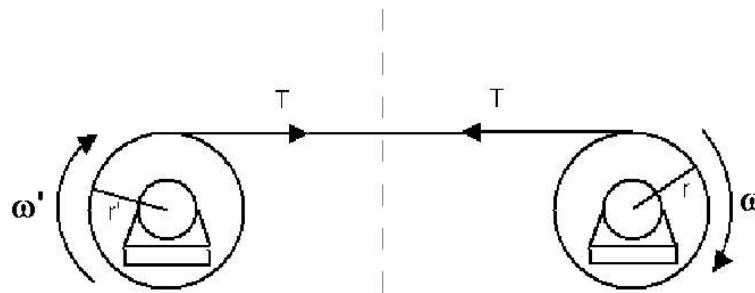


FIGURA 3.4 – INFLUÊNCIA DA TENSÃO DE TRAÇÃO ENTRE 2 ROLOS.

Dos rolos vistos na figura 3.4, podem ser observadas as relações entre as velocidades linear e angular em cada rolo, sendo

$$\omega = \frac{v_a}{r} \quad (3.5)$$

para o rolo no qual a tira de papel está sendo enrolada e

$$\omega' = \frac{v_a}{r'}$$

para o rolo de origem do papel.

Sabendo-se que as inércias e as velocidades angulares variam em ambos os rolos devido ao aumento e à diminuição dos seus raios durante o enrolamento e o desenrolamento da tira de papel, pode-se representar esses processos pelas equações 3.6 e 3.7.

$$\frac{d}{dt}(J \cdot \omega) = -TT \cdot r + k_t \cdot i_a \quad (3.6)$$

e

$$\frac{d}{dt}(J' \cdot \omega') = -TT \cdot r' + k_t' \cdot i_a' \quad (3.7)$$

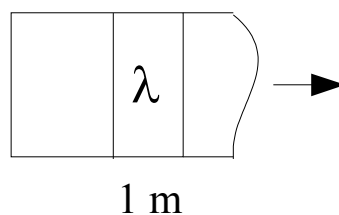
O momento de inércia do conjunto formado pelo motor elétrico e pelo rolo de apoio pode ser representado pela equação 3.8.

$$J = J_M + J_R = J_M + \frac{1}{2} \cdot M \cdot (R^2 - r^2) \quad (3.8)$$

A massa total no rolo, que varia à medida que a tira de papel é enrolada, pode ser representada pela equação

$$M = M_I + \lambda \cdot v_a \cdot t = \lambda \cdot v_a \cdot t \quad .$$

A figura 3.5 ilustra a amostra da tira de papel utilizada como referência para o cálculo da massa da tira de papel.



**FIGURA 3.5 – AMOSTRA DA TIRA DE PAPEL.**

O raio total pode ser representado pela equação

$$R = r + e \cdot \frac{\omega}{2 \cdot \pi} \cdot t \quad ,$$

onde  $\frac{\omega}{2 \cdot \pi}$  é o número de voltas por segundo;  
 $e$  é a espessura do papel;  
 $\frac{\omega \cdot e}{2 \cdot \pi}$  é a espessura acrescentada em um segundo.

Como

$$\omega = \frac{v_a}{R} \quad ,$$

pode-se escrever

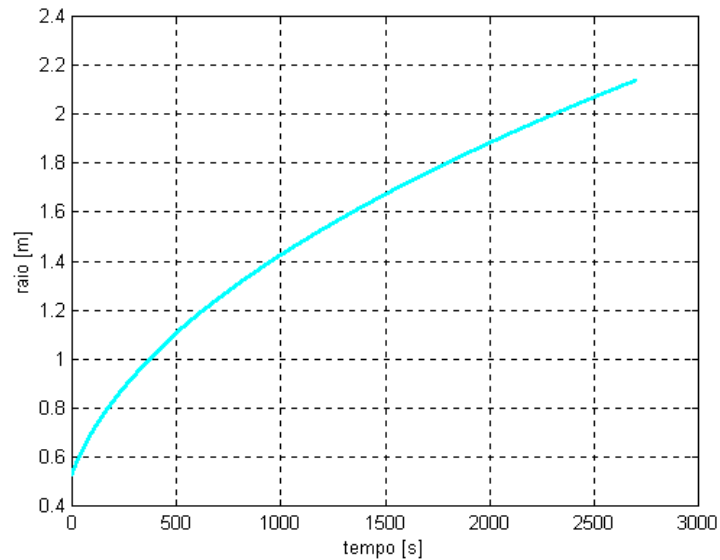
$$R = r + \frac{e}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{v_a}{R} \cdot t$$

de onde se obtém

$$R = \frac{r}{2} + \sqrt{\left(\frac{r}{2}\right)^2 + \frac{e \cdot v_a}{2 \cdot \pi} \cdot t} \quad , \quad (3.9)$$

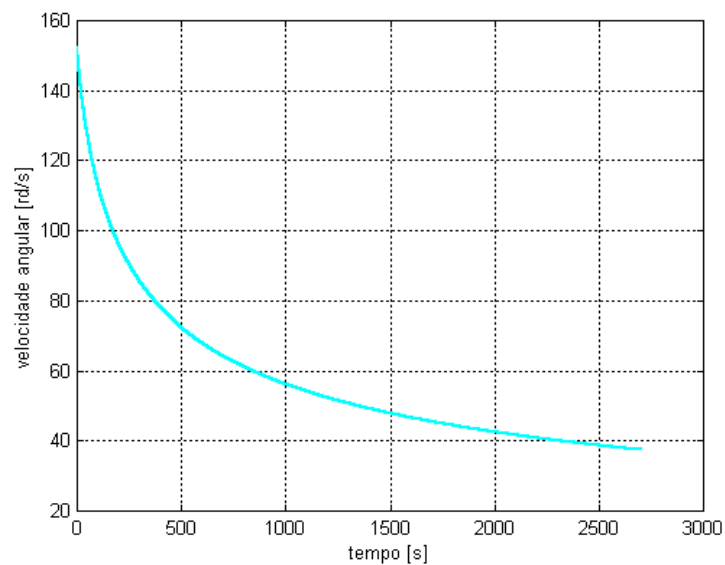
que define o raio total do rolo de papel no instante  $t$ .

A figura 3.6 ilustra o aumento do raio total em função do tempo, à medida que o papel é enrolado.



**FIGURA 3.6 – RAIOS TOTAL EM FUNÇÃO DO TEMPO DE ENROLAMENTO DA TIRA DE PAPEL.**

Aplicando-se a equação 3.9 na equação 3.5, são obtidos os valores para a variação da velocidade angular em função da variação do raio total do rolo. A figura 3.7 ilustra esses valores.



**FIGURA 3.7 – VARIAÇÃO DA VELOCIDADE ANGULAR EM FUNÇÃO DA VARIAÇÃO DO RAIOS TOTAL ( $\omega = v_a/R$ ).**

Ao substituir o raio total  $R$  na equação 3.8, pode-se chegar à equação 3.10, representativa do esforço necessário ao motor elétrico para enrolar a tira de papel no rolo de apoio.

$$\begin{aligned}
 J &= J_M + \frac{1}{2} \cdot \lambda \cdot v_a \cdot t \cdot \left[ \left( r + \frac{\omega \cdot e}{2 \cdot \pi} \cdot t \right)^2 - r^2 \right] \\
 J &= J_M + \frac{1}{2} \cdot \lambda \cdot v_a \cdot t \cdot \left[ \left( \frac{\omega \cdot e}{2 \cdot \pi} \right)^2 \cdot t^2 + \left( 2 \cdot \frac{\omega \cdot e}{2 \cdot \pi} \cdot r \right) \cdot t \right] \\
 J &= J_M + \frac{1}{2} \cdot \lambda \cdot v_a \cdot t \cdot \left[ \frac{e^2}{4 \cdot \pi^2} \cdot \omega^2 \cdot t^2 + \frac{2 \cdot e \cdot r}{2 \cdot \pi} \cdot \omega \cdot t \right] \\
 J \cdot \omega &= J_M \cdot \omega + \frac{1}{2} \cdot \lambda \cdot v_a \cdot \frac{e^2}{4 \cdot \pi^2} \cdot \omega^3 \cdot t^3 + \frac{1}{2} \cdot \lambda \cdot v_a \cdot \frac{2 \cdot e \cdot r}{2 \cdot \pi} \cdot \omega^2 \cdot t^2
 \end{aligned} \tag{3.10}$$

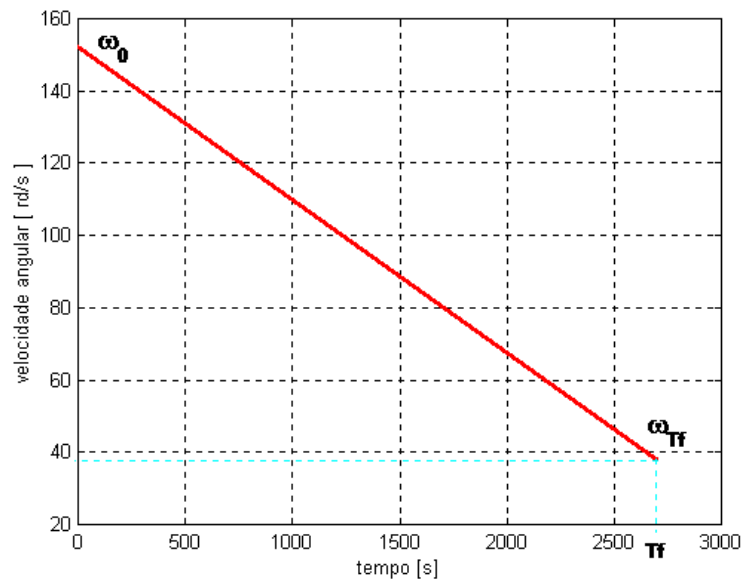
Da mesma forma, substitui-se o raio total na equação 3.6, obtendo-se a equação 3.11, o que possibilita estimar a variação do mencionado esforço à medida que o raio do papel (raio total) varia.

$$\frac{d(J \cdot \omega)}{dt} = -TT \cdot \left( r + \frac{\omega \cdot e}{2 \cdot \pi} \cdot t \right) + k_t \cdot i_a \tag{3.11}$$

Aplicando-se a Transformação de Laplace na equação 3.11 obtém-se a equação 3.12.

$$J(s) \cdot \Omega(s) \cdot s = \frac{-TT \cdot r}{s} - TT \cdot \frac{e}{2 \cdot \pi} \cdot L(\omega \cdot t) + k_t \cdot I_a(s) \tag{3.12}$$

A figura 3.8 ilustra uma aproximação linear da curva da velocidade angular em função do tempo.



**FIGURA 3.8 – APROXIMAÇÃO LINEAR DA VELOCIDADE ANGULAR EM FUNÇÃO DO TEMPO DE ENROLAMENTO.**

Pode-se desenvolver a equação 3.13, que representa a equação da reta ilustrada na figura 3.8, por conseguinte, a variação da velocidade angular no decorrer do processo.

$$\omega = a \cdot t + b$$

$$\omega_0 = b$$

$$\omega_{Tf} = a \cdot Tf + b = a \cdot Tf + \omega_0$$

$$a = \frac{\omega_{Tf} - \omega_0}{Tf}$$

$$\omega = \frac{\omega_{Tf} - \omega_0}{Tf} \cdot t + \omega_0 \quad (3.13)$$

Aplicando-se a equação 3.13 nos valores observados no gráfico da figura 3.8, pode-se obter a equação 3.14, que relaciona a variação da velocidade angular em função do tempo do processo.

$$\omega = \frac{\omega_T - \omega_0}{T} \cdot t + \omega_0 = a \cdot t + \omega_0$$

$$\omega_0 \simeq \frac{80 \text{ m/s}}{0,525 \text{ m}} \simeq 152 \text{ rd/s}$$

$$\omega_T \simeq \frac{80 \text{ m/s}}{2,1 \text{ m}} \simeq 38 \text{ rd/s}$$

$$\frac{\omega_T - \omega_0}{2700} = \frac{114}{2700} \simeq \frac{1}{25}$$

$$\omega \simeq \frac{t}{25} + 152 [\text{rd/s}] \quad (3.14)$$

No caso em estudo verifica-se que a velocidade angular do rolo de papel tem uma variação praticamente linear, pondo

$$\omega = a \cdot t + \omega_0$$

na equação 3.11, resulta

$$\frac{d(J \cdot \omega)}{dt} = -TT \cdot \left( r + \frac{e}{2 \cdot \pi} \cdot (a \cdot t^2 + \omega_0 \cdot t) \right) + k_t \cdot i_a \quad (3.15)$$

Aplicando-se a Transformação de Laplace à equação 3.15, é obtida a equação 3.16.

$$J(s) \cdot \Omega(s) \cdot s = -\frac{TT \cdot r}{s} + k_t \cdot I_a(s) - \frac{TT \cdot e}{2 \cdot \pi} \cdot \left[ a \cdot \frac{2!}{s^3} + \frac{\omega_0}{s^2} \right] \quad (3.16)$$

Sendo

$$\omega \cdot t = a \cdot t^2 + \omega_0 \cdot t \quad ,$$

então



$$L(\omega \cdot t) = a \cdot \frac{2!}{s^3} + \frac{\omega_0}{s^2} .$$

De forma análoga à equação 3.16, com base na equação elétrica do motor CC, obtém-se a equação 3.17.

$$L_a \cdot I_a(s) \cdot s + R_a \cdot I_a(s) = E_a(s) - k_e \cdot \Omega(s) \quad (3.17)$$

As equações 3.16 e 3.17 são utilizadas no programa aplicativo SCILAB para obtenção da função de transferência do sistema e para a análise do mesmo.

## **CAPÍTULO 4**

---

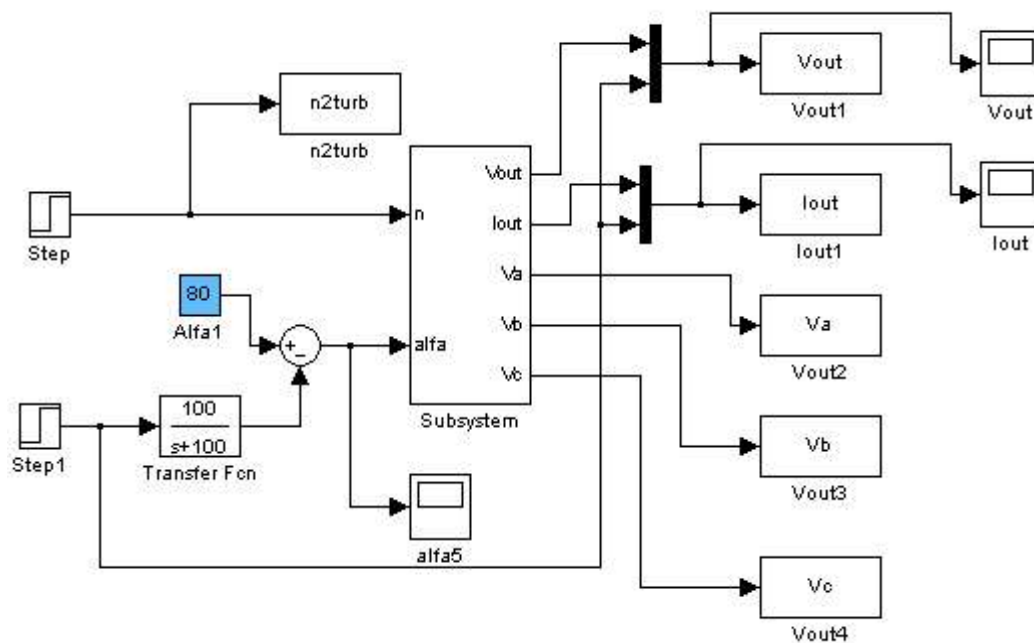
### ***SIMULAÇÕES E RESULTADOS***

Neste capítulo é descrita a estrutura do sistema de simulação adotado para este estudo, assim como são relacionadas as simulações realizadas e discutidos os resultados obtidos.

#### ***4.1. ESTRUTURA DO SISTEMA DE SIMULAÇÃO***

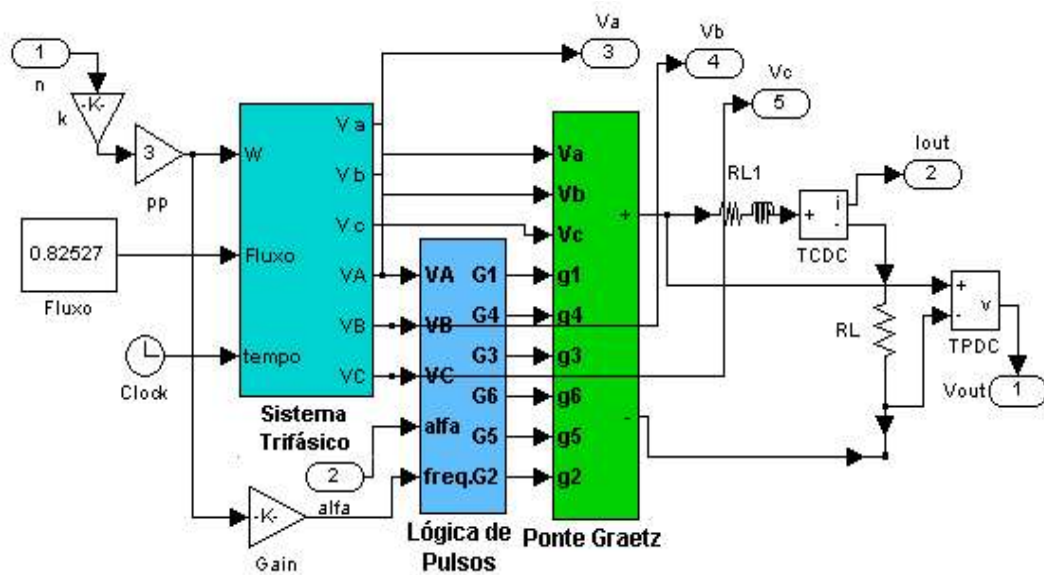
Conforme a metodologia descrita em 1.4, o pacote SCICOS, integrante do programa aplicativo SCILAB, foi utilizado na simulação do sistema em estudo.

Em linhas gerais, foi elaborado um sistema de simulação baseado no acionamento de um motor de corrente contínua, onde são observadas as tensões de linha ( $V_a$ ,  $V_b$  e  $V_c$ ) e os sinais de saída ( $V_{out}$  e  $I_{out}$ ), nas condições de partida do motor elétrico e na incidência de uma carga, especificamente nessa simulação, o rolo de apoio, fornecendo como resposta a tensão de armadura e a corrente de armadura. A figura 4.1 ilustra uma visão geral do sistema de simulação elaborado.



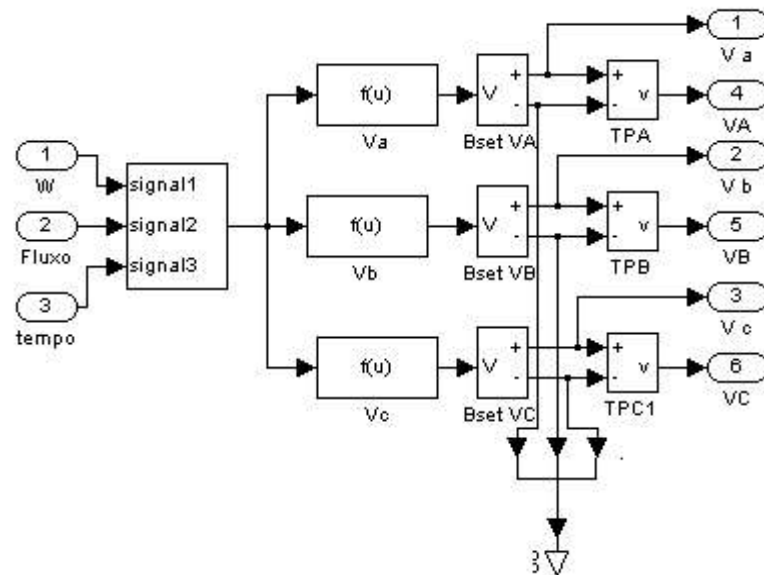
**FIGURA 4.1 – VISÃO GERAL DO SISTEMA DE SIMULAÇÃO.**

Esse sistema é composto pelos sub-sistemas: Sistema Elétrico de Tensão Trifásico, Lógica de Pulsos e Ponte de Graetz. A figura 4.2 ilustra esses sub-sistemas.



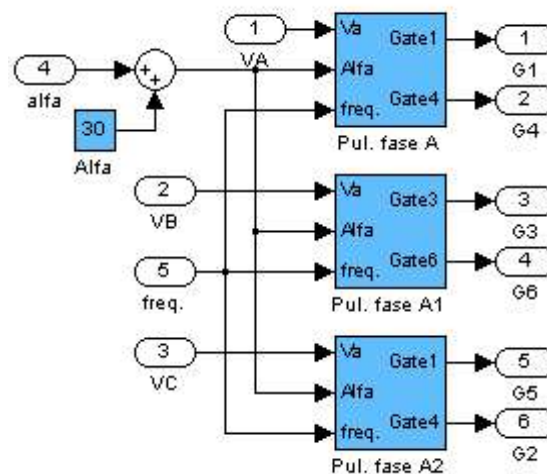
**FIGURA 4.2 – SUB-SISTEMAS DE ACIONAMENTO DO MOTOR DE CORRENTE CONTÍNUA.**

O sub-sistema das Tensões Trifásicas tem a função de gerar um sinal senoidal com amplitude e frequência constantes, simulando a rede elétrica. A figura 4.3 ilustra esse sub-sistema de simulação.



**FIGURA 4.3 – SUB-SISTEMA ELÉTRICO TRIFÁSICO.**

O sub-sistema Lógica de Pulsos tem a função de gerar o pulso responsável pelas condições de condução e de corte dos tiristores da ponte de Graetz. A figura 4.4 ilustra o sub-sistema de lógica de pulsos.



**FIGURA 4.4 – SUB-SISTEMA LÓGICA DE PULSOS.**

O sub-sistema Ponte de Graetz simula um acionamento de motor elétrico através de ponte controlada por tiristores. A figura 4.5 ilustra esse sub-sistema.

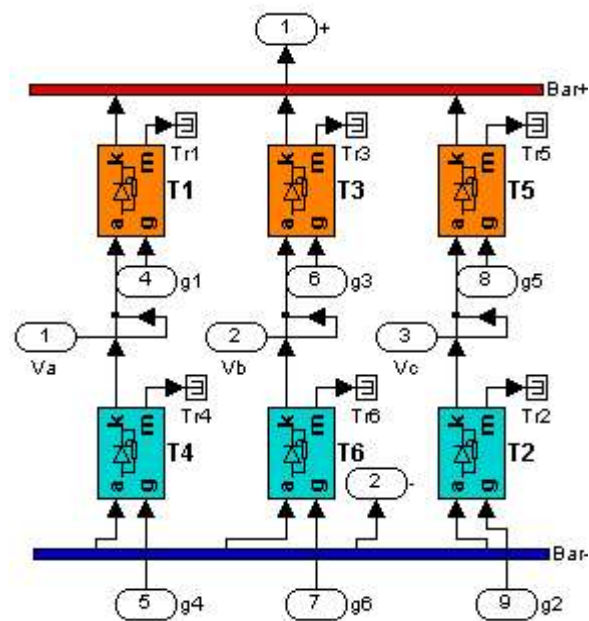


FIGURA 4.5 – SUB-SISTEMA PONTE DE GRAETZ.

## 4.2. SIMULAÇÕES, RESULTADOS E DISCUSSÕES

Segundo o proposto no item 1.4 como metodologia para a análise do processo, são relacionados os resultados obtidos no estudo do sistema. Contudo, apenas o setor de secagem foi submetido às avaliações por ser o setor mais complexo, junto com o de revestimento, estando os demais, alimentação e armazenagem, abrangidos nesse setor.

Assim, com o uso de sistemas computacionais especializados, SCILAB e SCICOS, foram traçados os gráficos correspondentes aos pólos do sistema em estudo, as respostas desse sistema para degrau, nas quatro combinações

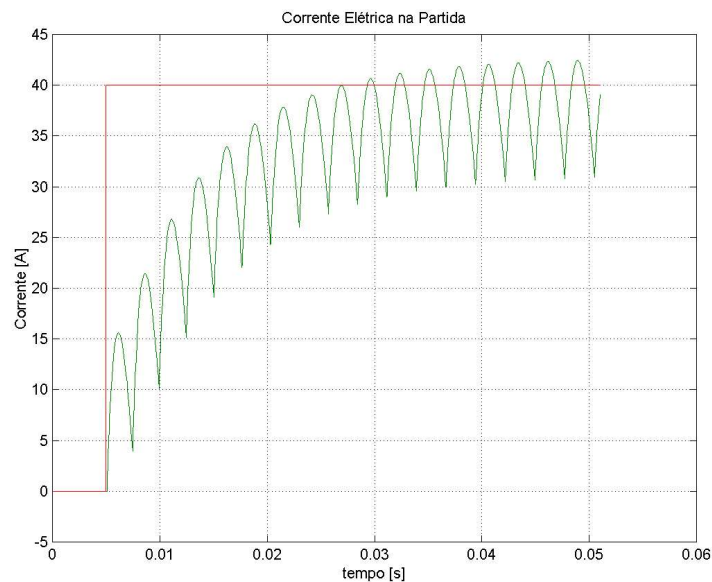
possíveis de entrada e saída, e seus diagramas de Bode, para as condições de malha aberta e malha fechada.

#### 4.2.1. Análise da Ponte de Gaertz

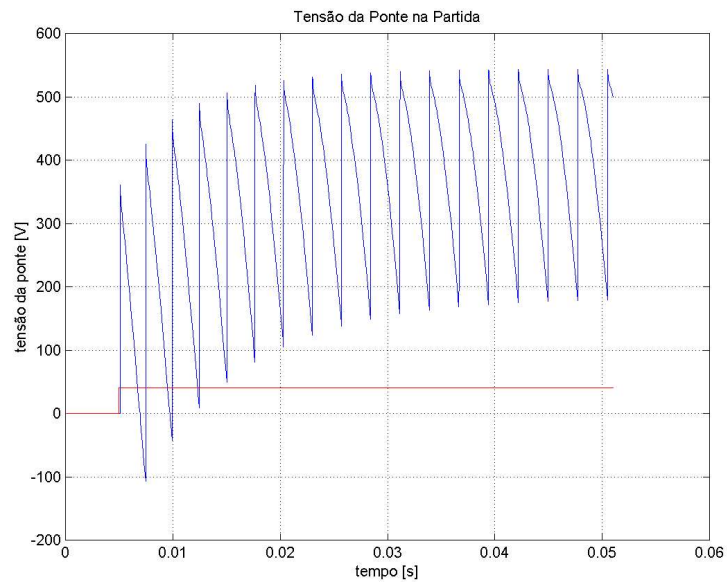
O acionamento dos motores é um ponto de grande importância no sistema em estudo, assim como a manutenção da velocidade nominal.

Assim, as condições de intensidade de corrente elétrica e de tensão elétrica na armadura do motor são analisadas nas condições de partida do motor elétrico e de incidência de carga, sendo essa carga, o torque resistivo do próprio motor associado ao do rolo.

A figura 4.6 ilustra a intensidade de corrente elétrica na partida do motor elétrico e a figura 4.7 ilustra o comportamento dessa corrente elétrica à incidência de uma carga.



**FIGURA 4.6 – INTENSIDADE DE CORRENTE ELÉTRICA NA PARTIDA DO MOTOR ELÉTRICO.**

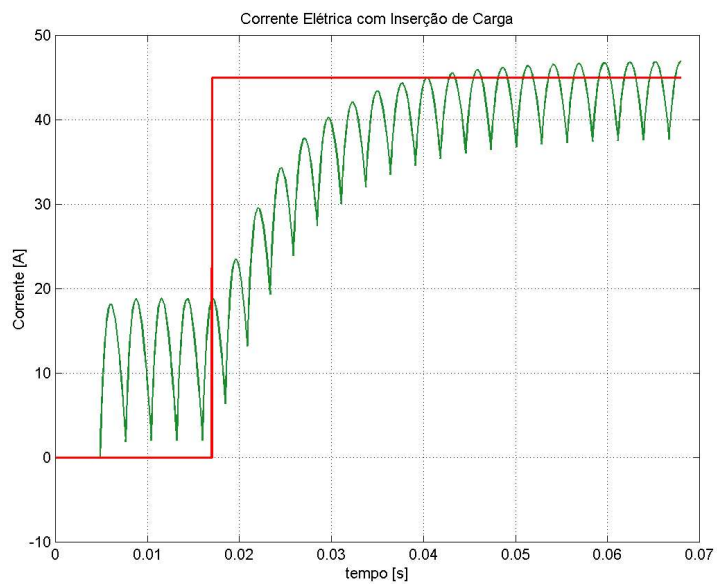


**FIGURA 4.7 – TENSÃO ELÉTRICA NA PARTIDA DO MOTOR ELÉTRICO.**

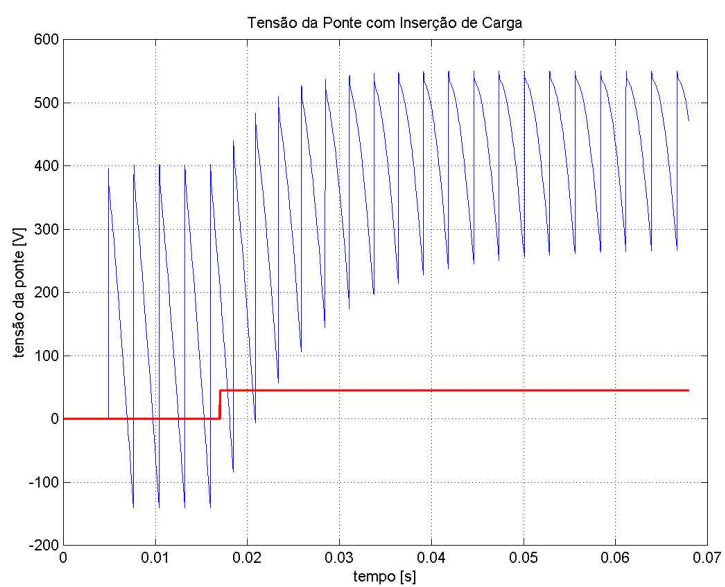
As figuras 4.6 e 4.7 ilustram as condições da intensidade de corrente elétrica e da tensão elétrica na partida do motor elétrico, sendo que a partida do motor elétrico está representada, nesse caso, por um degrau, aplicado na referência do controlador de disparo dos tiristores da ponte.

A seguir, as figuras 4.8 e 4.9 ilustram as condições de intensidade de corrente e de tensão elétrica com a inserção de uma carga, no caso o motor elétrico e o rolo.





**FIGURA 4.8 – INTENSIDADE DE CORRENTE ELÉTRICA COM A INSERÇÃO DE CARGA.**



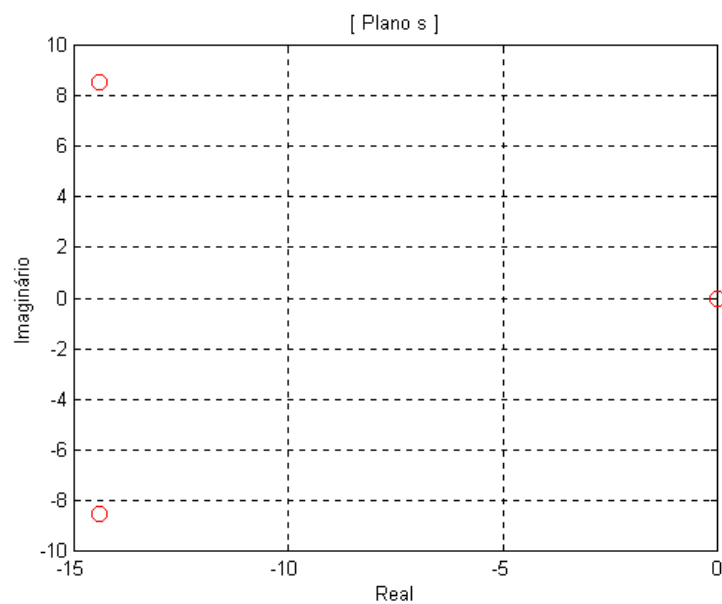
**FIGURA 4.9 – TENSÃO ELÉTRICA COM A INSERÇÃO DE CARGA.**

Note-se que para as figuras 4.8 e 4.9 a inserção de carga, motor elétrico e rolo, é representada por um degrau, que representa a entrada de carga no eixo do motor de corrente contínua.

#### 4.2.2. Análise em Malha Aberta

Para o estudo do sistema em malha aberta foram realizadas análises da sua resposta transitória em tempo contínuo, degrau, e sua resposta de frequência, diagramas de Bode.

Antes de tais análises, foi traçado o gráfico referente aos pólos e ao zero do sistema em malha aberta, obtendo-se o resultado visto na figura 4.10.

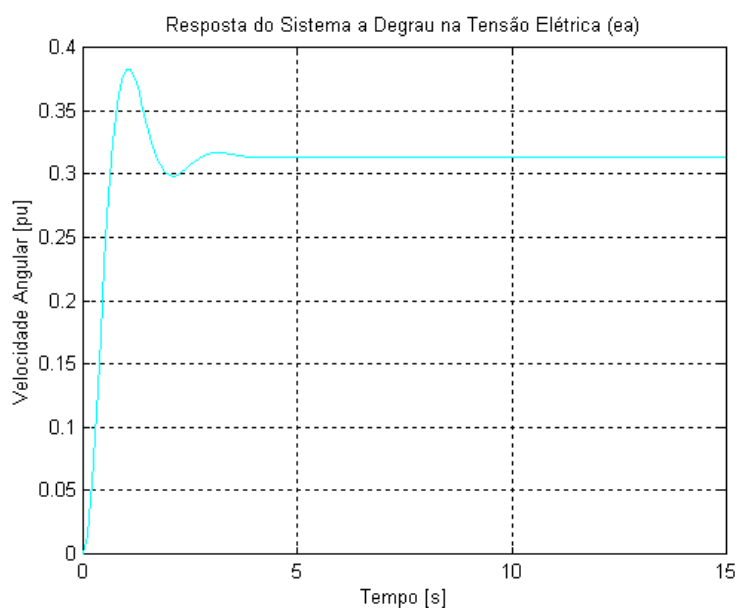


**FIGURA 4.10 – PÓLOS E ZERO EM MALHA ABERTA DO SISTEMA EM ESTUDO.**

Note-se que o sistema tem apenas um zero, na origem do plano  $s$ , e dois pólos, representativos das duas grandezas físicas que provocam atraso no

sistema: intensidade de corrente elétrica ( $i$ ) e velocidade angular ( $\omega$ ).

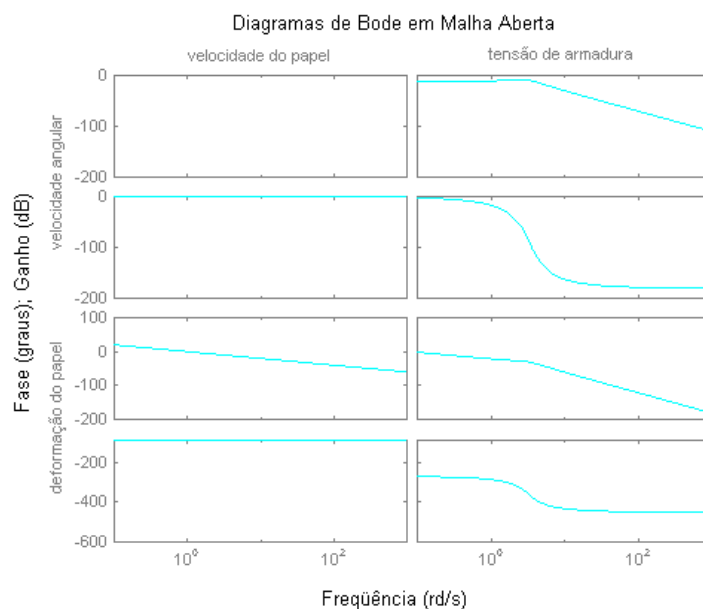
A figura 4.11 ilustra o sistema respondendo a um degrau na entrada correspondente à tensão elétrica da armadura do motor ( $e_a$ ), em termos de sua velocidade angular ( $\omega$ ), a segunda saída do sistema em estudo.



**FIGURA 4.11 – RESPOSTA TRANSITÓRIA DA VELOCIDADE DE ROTAÇÃO DO MOTOR A DEGRAU NA TENSÃO ELÉTRICA DA ARMADURA DO MOTOR.**

Segundo os critérios de projeto de Messner e Tilbury (1999), um sistema estável deve apresentar em sua resposta a degrau um tempo de acomodação inferior a dois segundos, um sobre-sinal menor que cinco por cento e um erro de regime inferior a um por cento, o que o sistema em estudo, na condição de sua malha aberta, não atinge.

A figura 4.12 ilustra os diagramas de Bode traçados a partir da resposta em frequência do sistema em estudo, em sua condição de malha aberta.



**FIGURA 4.12 – RESPOSTA EM FREQUÊNCIA DO SISTEMA EM MALHA ABERTA.**

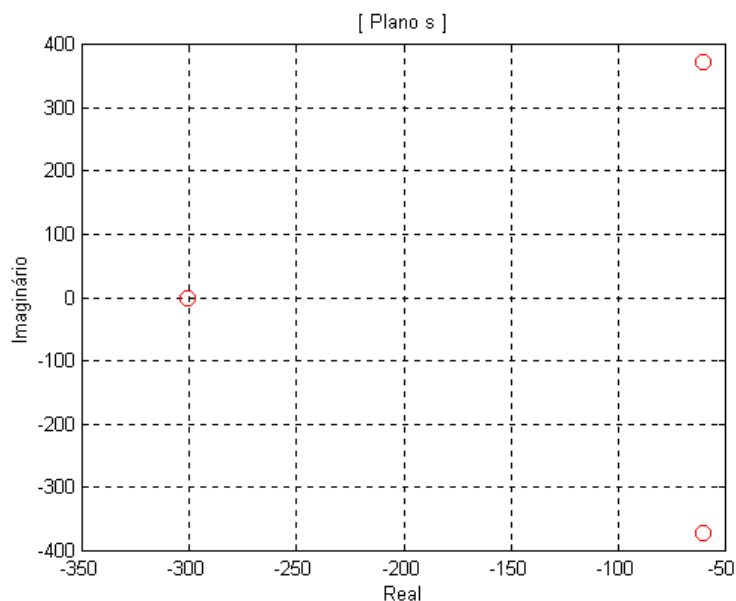
A figura 4.12 apresenta o comportamento do sistema, em termos das influências entre as entradas e as saídas. O gráfico apresenta a amplitude dos ganhos das saídas em relação às entradas do sistema e o desvio de fase entre suas saídas e suas entradas. (Ogata, 1997)

Nos gráficos ilustrados na figura 4.12 pode-se observar que a velocidade do papel está em fase com a deformação do papel e com a velocidade de rotação do motor elétrico, não exercendo qualquer influência nessa, porém influencia diretamente a deformação do papel. Já a tensão de armadura do motor elétrico influencia diretamente a sua própria velocidade de rotação e indiretamente, através da velocidade de rotação do seu eixo, a deformação do papel, além disso, vê-se os atrasos proporcionados pelas partes mecânicas, do próprio motor CC, visto na defasagem da velocidade de rotação, e do sistema, visto na defasagem do sinal de deformação do papel.

### 4.2.3. Análise em Malha Fechada

Os mesmos critérios de projeto (Messner e Tilbury, 1999) adotados para a análise em malha aberta do sistema em estudo foram utilizados para a sua análise em malha fechada, levando-se em conta os dados referentes à sua realimentação previamente estabelecidos pelos dados oriundos da indústria de celulose e papel.

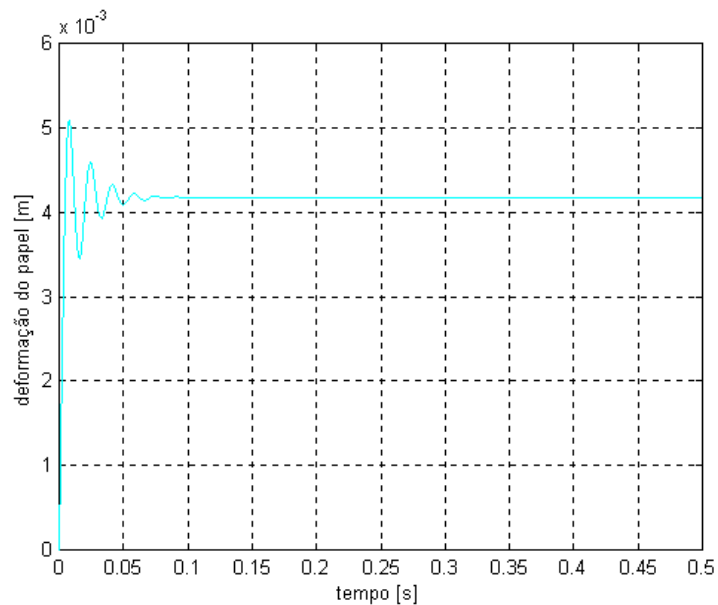
A figura 4.13 ilustra os pólos e o zero do sistema em estudo, em malha fechada. Deve-se salientar que, originalmente, é utilizado um controlador PI no sistema de controle da máquina de revestimento de papéis especiais.



**FIGURA 4.13 – PÓLOS E ZERO EM MALHA FECHADA.**

A ação do controlador PI deslocou os pólos e o zero do sistema, colocando-os ainda mais à esquerda do eixo imaginário.

A figura 4.14 ilustra a resposta transitória da deformação do papel a degrau na tensão elétrica da armadura do motor.



**FIGURA 4.14 – RESPOSTA TRANSITÓRIA DA DEFORMAÇÃO DO PAPEL A DEGRAU NA TENSÃO ELÉTRICA DA ARMADURA DO MOTOR.**

A análise do gráfico da figura 4.14 acentua a adequação dos valores de sobre e sub-sinal, tempo de acomodação e erro de regime aos critérios de projeto adotados (Messner e Tilbury, 1999): um tempo de acomodação inferior a 2 s; um sobre-sinal menor que 5 % e um erro de regime inferior a 1 %. Como consequência do sinal injetado no sistema em estudo, observa-se uma diminuta tendência do papel a retrair-se, o que formaria dobras na extensão do papel.

## **CAPÍTULO 5**

---

### ***SUGESTÕES PARA MELHORIAS FUTURAS***

Com base nas análises realizadas e nos resultados obtidos, as diversas situações encontradas no estudo do processo de revestimento de papéis especiais são analisadas e sugestões para melhorias no processo são feitas.

Ainda neste capítulo, a arquitetura atualmente utilizada é descrita e, a partir dessa arquitetura, são feitas propostas de arquiteturas baseadas em 3 tecnologias distintas. A seguir, as novas configurações propostas para cada setor são descritas.

#### ***5.1. ANÁLISE DAS SITUAÇÕES PARA SUGESTÕES DE IMPLEMENTAÇÕES***

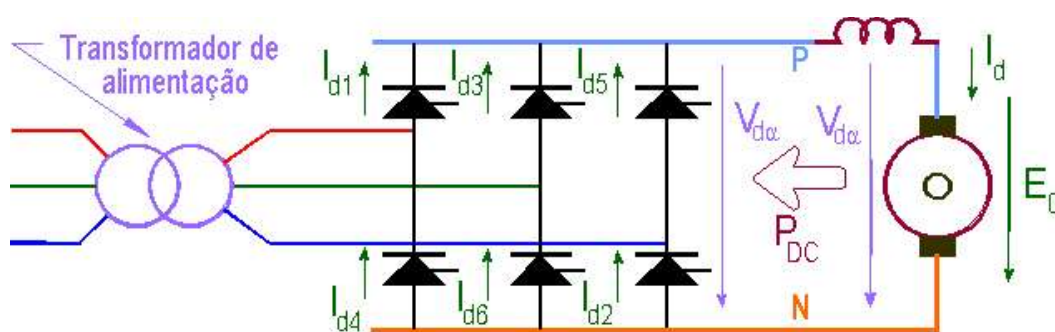
O controle do sistema em estudo foi submetido à avaliação de sua estabilidade pela análise dos diagramas de Bode e Lugar das Raízes, concluindo-se que a configuração atualmente adotada para a unidade de revestimento de papéis especiais apresenta respostas consistentes com os padrões encontrados em literatura específica (Ogata, 1997; Messner e Tilbury, 1999).

Contudo, pode-se observar que paradas para manutenção dos motores de corrente contínua são uma constante, associando-se a seu custo elevado em relação aos motores de corrente alternada e a demanda de energia para alcançar a velocidade desejada.

Para inibir as constantes paradas para manutenção, possibilitar economia na demanda de energia pelo sistema e tornar o processo mais

flexível, propõe-se a troca do motor de corrente contínua com acionamento estático por um motor de corrente alternada de igual velocidade nominal com acionamento dinâmico, sendo usado um inversor de frequência.

No caso do acionamento da planta através de motores de corrente contínua, tem-se ilustrada na figura 5.1 uma ponte de Graetz a tiristores sendo utilizada como inversora, ou seja invertendo o fluxo de potência CC para CA. Nesse caso, a máquina de corrente contínua está freando o sistema.



**FIGURA 5.1 – PONTE TIRISTORIZADA COMO INVERSORA.**

Atualmente, estão em uso, nos setores da unidade de revestimento de papéis especiais da fábrica Schweitzer-Manduit, motores de corrente contínua da marca WEG de 1,5 kW (2 C.V.) de potência, associados a circuitos de acionamento de potência da ABB. O custo desse sistema, considerando-se os valores do motor CC e do seu acionamento, para a potência de 2,25 kW (3 C.V.), está em torno de R\$ 8.000,00 (oito mil reais), variando um pouco a mais ou a menos, conforme o fabricante (WEG, Eberle, SEW, Siemens, Bosch, ABB, entre outras).

O sistema constante de motor de corrente alternada e de inversor de frequência que é proposto para o lugar dos atualmente utilizados, com potência de 2,25 kW tem um custo estimado de R\$ 1.800,00 (hum mil e oitocentos reais), tendo sido consultada a fabricante de motores WEG.

Ao consultar a tabela 2.1, que mostra as características técnicas para o



motor CC WEG em uso, relaciona-se a velocidade nominal máxima do motor (1750 RPM) a uma demanda de 1,5 kW. Já o circuito de potência, conforme visto na tabela 2.2, é aplicável a motores de até 15 kW, a 440 V, utilizando-se apenas o padrão de comunicação 0-10 V.

A figura 5.2 ilustra o motor de indução trifásico da WEG sugerido para substituição dos atuais motores CC.



**FIGURA 5.2 – MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO. (Cortesia: WEG)**

A tabela 5.1 relaciona as principais características do motor de indução trifásico, de fabricação da WEG, proposto em substituição dos atuais motores de corrente contínua.

**TABELA 5.1 – MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO WEG.**

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
Potência	0,75 kW (1 CV)
Velocidade	1730 RPM
Torque	29 N.m
Tensão de estator	440 V
Resistência de estator	245 $\Omega$
Corrente de estator	1,8 A
Inércia	0,00230 kgm <sup>2</sup>

Na figura 5.3 pode ser visto o inversor de frequência WEG CFW08Plus adotado na proposta para melhorias do sistema de acionamento dos motores.



**FIGURA 5.3 – INVERSOR DE FREQUÊNCIA CFW08PLUS. (Cortesia: WEG)**

Na tabela 5.2 estão relacionadas as principais características do inversor de frequência CFW08Plus.

**TABELA 5.2 – INVERSOR DE FREQUÊNCIA WEG CFW08PLUS.**

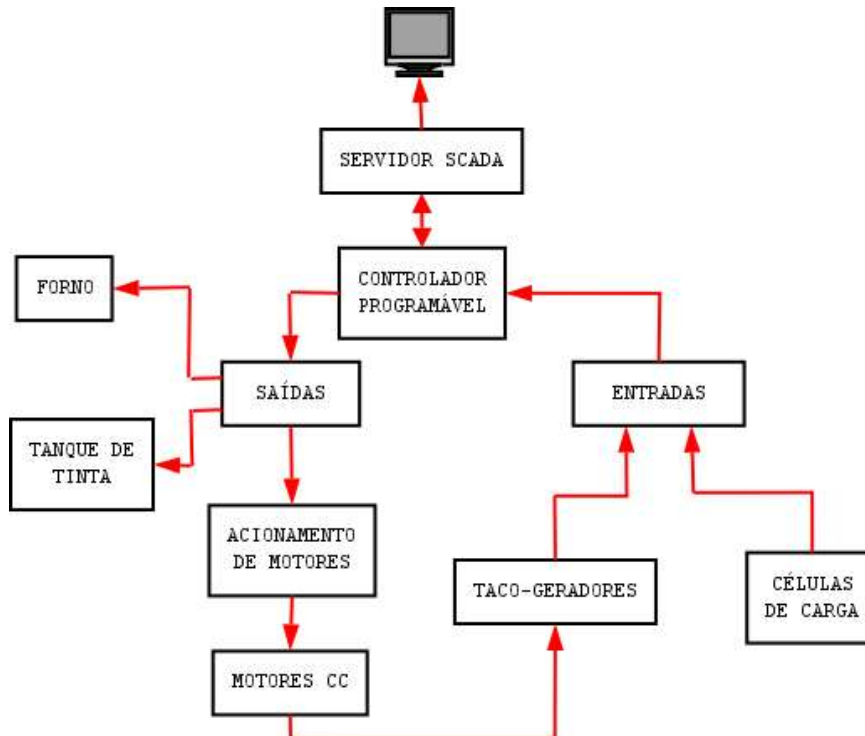
<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
Potência	1,5 kW (2 CV)
Tensão de saída	440 V
Corrente de saída	4,0 A
Entradas	0-10 Vcc 0-20 mA 4-20 mA

As tabelas 5.1 e 5.2 permitem observar que, para uma velocidade de 1730 RPM, um motor CA demanda 0,75 kW (1 C.V.). Já o inversor compatível com o motor proposto aciona motores de até 1,5 kW (2 C.V.), em 3 padrões de comunicação, garantindo enorme flexibilidade em sua programação e controle.

## 5.2. ARQUITETURA ATUALMENTE UTILIZADA

Atualmente, a unidade de revestimento de papéis conta com uma arquitetura constante de um controlador programável conectado a um computador central com um sistema de supervisão SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition System*) que monitora todas as atividades de aquisição, condicionamento e processamento dos dados. A partir desses dados é realizada a programação do controlador programável que tem conectado às suas entradas analógicas os 4 taco-gerados, que estão associados aos motores de corrente contínua, e as 2 células de carga, que estão posicionadas pela linha do processo. Às saídas digitais do controlador programável estão conectados os circuitos de potência para acionamento dos 4 motores de corrente contínua, o acionamento do forno e o controle da válvula da saída do misturador de tinta.

A figura 5.4 ilustra a arquitetura descrita.



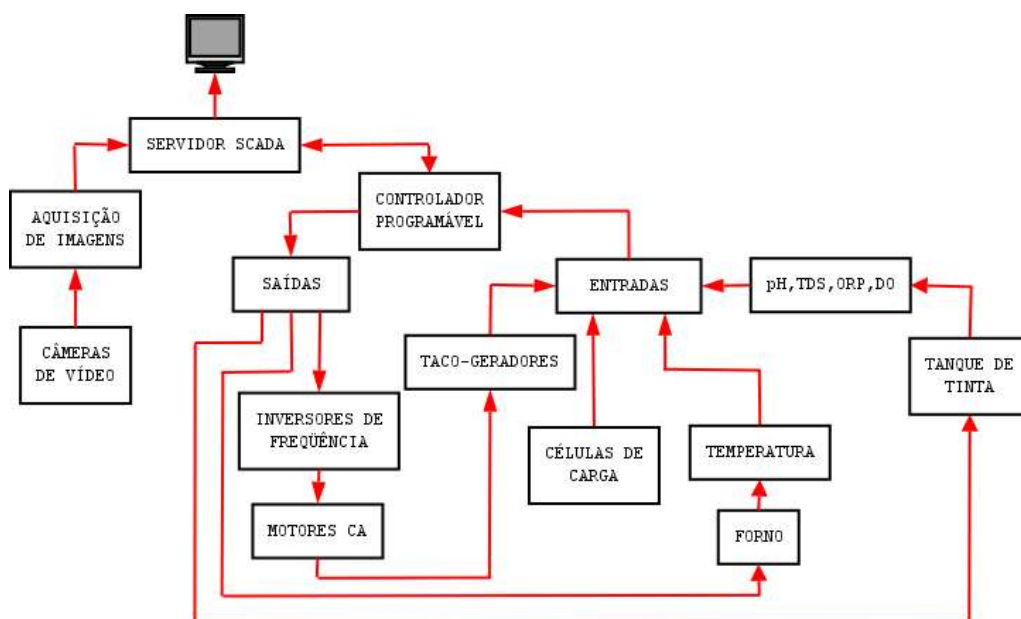
**FIGURA 5.4 – ARQUITETURA ATUALMENTE UTILIZADA NA UNIDADE DE REVESTIMENTO DE PAPÉIS ESPECIAIS. (fonte: Schweitzer-Manduit)**

Na arquitetura atualmente empregada, a cada hora parada deixa-se de produzir o equivalente, em papel, a R\$ 17 840,00, considerando-se o desempenho máximo da máquina, ou seja revestindo a tira de papel à velocidade de 4 m/s. No caso de perdas de papel no processo, cada metro desperdiçado custa R\$ 1,20. Assim, as paradas do sistema para a manutenção dos motores de corrente contínua têm um custo mensal de R\$ 89 000,00, aproximadamente, equivalente às 16 horas trimestrais sugeridas no manual dos referidos motores. As perdas com outras contingências, como quebra do papel, é o equivalente a 5 horas mensais, ou seja R\$ 89 000,00. A produção mensal de papéis especiais é de aproximadamente 7 776 000 m de papel, o equivalente a R\$ 9 331 200,00, sendo cerca de 1,5 % desse montante de perdas por qualidade – revestimento, papel chamuscado, papel com furos -, cerca de R\$ 139 968,00. Quanto à demanda de energia, considerando o custo típico do kW/h como sendo R\$ 0,11, por mês, são destinados R\$ 28 512,00 para despesas com a energia demandada pelos 4 motores CC da máquina de revestimento. (fonte: Schweitzer-Manduit)

### **5.3.ARQUITETURAS PROPOSTAS**

Durante a pesquisa por uma arquitetura a ser adotada para a instrumentação e para o sistema de supervisão e de controle, três possibilidades se destacaram: arquitetura com Controlador Programável; arquitetura com módulos *FieldPoint*; arquitetura com tecnologia PXI.

A figura 5.5 ilustra uma alternativa de arquitetura baseada em Controlador Programável.



**FIGURA 5.5 – ARQUITETURA COM CONTROLADOR PROGRAMÁVEL.**

Essa arquitetura tem a instrumentação e o acionamento conectados diretamente a um Controlador Programável que, através de seu programa principal, com supervisão do sistema SCADA, realiza as atividades de sensoriamento e de atuação no sistema.

Sua principal característica é a sua arquitetura aberta, pois praticamente qualquer programa supervisório e qualquer controlador programável estariam aptos a serem usados nesse sistema de controle. A principal restrição estaria na compatibilidade do programa de aquisição de imagens e o sistema supervisório.

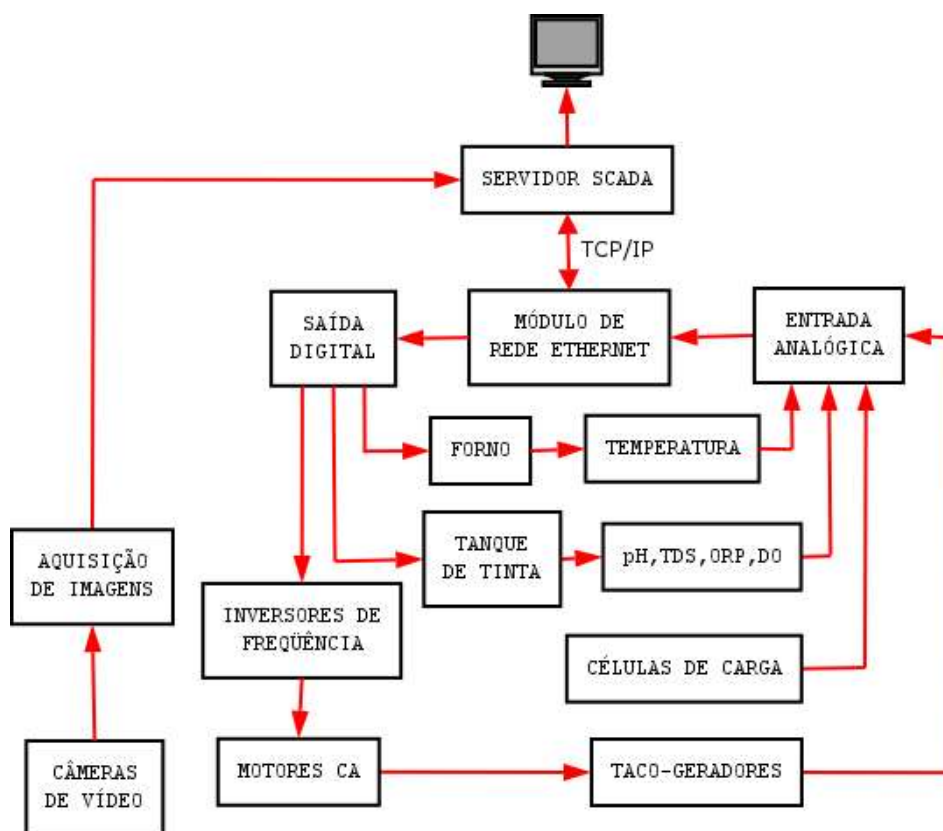
A tabela 5.3 apresenta o investimento necessário para implantação da arquitetura baseada em um Controlador Programável. Esses valores estão fundamentados em consultas realizadas junto a diversos fabricantes e distribuidores de equipamentos e programas aplicativos voltados à automação industrial.

**TABELA 5.3 – INVESTIMENTO NECESSÁRIO PARA A IMPLANTAÇÃO DA ALTERNATIVA COM CONTROLADOR PROGRAMÁVEL.**

<b>Descrição</b>	<b>Qtde</b>	<b>Valor</b>	<b>Total</b>
Placa de aquisição de imagens	1	R\$ 1.200,00	R\$ 1.200,00
Aplicativo para aquisição de imagens	1	R\$ 1.425,00	R\$ 1.425,00
Câmeras de video	3	R\$ 800,00	R\$ 2.400,00
Inversor de frequência	4	R\$ 950,00	R\$ 3.800,00
Motor CA	4	R\$ 850,00	R\$ 3.400,00
Sensores de temperatura	5	R\$ 2.100,00	R\$ 10.500,00
Instrumentação analítica	4	R\$ 1.200,00	R\$ 4.800,00
<b>TOTAL</b>			<b>R\$ 27.525,00</b>

Note-se que o sistema supervisorio, o controlador programavel e seu aplicativo de programação, assim como os taco-geradores e as células de carga já se encontram disponíveis na planta.

A figura 5.6 ilustra uma arquitetura baseada em módulos *FieldPoint*.



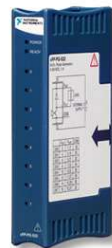
**FIGURA 5.6 – ARQUITETURA COM MÓDULOS *FIELDPOINT*.**

O Sistema Modular de Entradas e Saídas Distribuídas *FieldPoint* é caracterizado por um módulo de rede, onde é definido o protocolo e/ou o padrão de comunicação a ser utilizado, *Ethernet TCP/IP*, *Wireless*, *RS-232*, *RS-485* ou *Foundation Fieldbus*, associado a módulos de entrada e saída, com diversas configurações de sinal analógico e de sinal digital, e um terminal de base, que acomoda os módulos descritos anteriormente, assim como os acessórios de suporte necessários, como fonte de alimentação.

As figuras 5.7 e 5.8 ilustram, respectivamente, um módulo de rede e um módulo de comunicação, com tecnologia *FieldPoint*.



**FIGURA 5.7 – MÓDULO DE REDE. (Cortesia: National Instruments)**



**FIGURA 5.8 – MÓDULO DE COMUNICAÇÃO. (Cortesia: National Instruments)**

Com base nessa estrutura, os instrumentos de sensoriamento e de atuação ficam conectados, respectivamente, em um módulo de entradas analógicas e em um módulo de saídas digitais. O sistema *FieldPoint* conecta-se a um servidor SCADA, via rede *Ethernet* por TCP/IP, o qual supervisiona a instrumentação e o acionamento dos motores.

A principal característica dessa arquitetura é a compatibilidade com um grande número de instrumentos de sensoriamento. Embora o sistema de aquisição de imagens não seja conectado diretamente a um módulo *FieldPoint*, ambos são compatíveis pois funcionam sob o mesmo sistema de supervisão: LabVIEW.

A tabela 5.4 apresenta o investimento necessário para implantação da arquitetura baseada em Tecnologia *FieldPoint*. Esses valores estão fundamentados em consultas realizadas junto a diversos fabricantes e



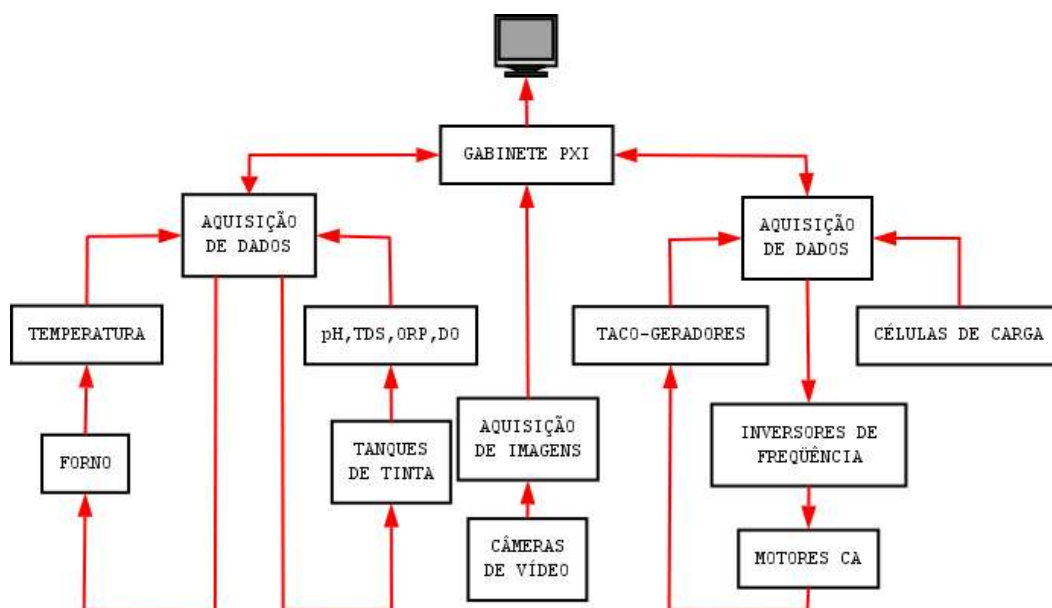
distribuidores de equipamentos e programas aplicativos voltados à automação industrial.

**TABELA 5.4 – INVESTIMENTO NECESSÁRIO PARA A IMPLANTAÇÃO DA ALTERNATIVA COM MÓDULOS *FIELDPOINT*.**

<b>Descrição</b>	<b>Qtde</b>	<b>Valor</b>	<b>Total</b>
Sistema Supervisório	1	R\$ 30.945,00	R\$ 30.945,00
Estrutura <i>FieldPoint</i>	1	R\$ 17.625,00	R\$ 17.625,00
Placa de aquisição de imagens	1	R\$ 1.200,00	R\$ 1.200,00
Aplicativo para aquisição de imagens	1	R\$ 1.425,00	R\$ 1.425,00
Câmeras de vídeo	3	R\$ 800,00	R\$ 2.400,00
Inversor de frequência	4	R\$ 950,00	R\$ 3.800,00
Motor CA	4	R\$ 850,00	R\$ 3.400,00
Sensores de temperatura	5	R\$ 2.100,00	R\$ 10.500,00
Instrumentação analítica	4	R\$ 1.200,00	R\$ 4.800,00
<b>TOTAL</b>			<b>R\$ 76.095,00</b>

Deve ser observado que os taco-geradores e as células de carga constituintes dessa alternativa já se encontram instalados na unidade de revestimentos de papéis especiais.

A figura 5.9 ilustra uma arquitetura baseada em tecnologia PXI.



**FIGURA 5.9 – ARQUITETURA COM TECNOLOGIA PXI.**

Essa arquitetura, embora tenha a restrição do uso de um sistema supervísório proprietário, apresenta grande compatibilidade entre os sensores, os atuadores e o sistema de aquisição de imagens, pois baseia-se em um sistema computacional com arquitetura fundamentada no padrão comercial PCI, com as devidas adaptações ao uso na indústria.

Em linhas gerais, é um equipamento com processamento central e módulos de aquisição de dados e de aquisição de imagens conectados a sua placa principal. Associando esses equipamentos aos programas aplicativos necessários às leituras dos instrumentos e às atuações nos acionamentos, tem-se um sistema robusto e estável, apresentando compatibilidade total entre os sub-sistemas.

A tabela 5.5 apresenta o investimento necessário para implantação da arquitetura baseada em Tecnologia PXI. Esses valores estão fundamentados em consultas realizadas junto a diversos fabricantes e distribuidores de equipamentos e programas aplicativos voltados à automação industrial.

Note-se que os taco-geradores e as células de carga constituintes

dessa alternativa já se encontram instalados na unidade de revestimentos de papéis especiais.

**TABELA 5.5 – INVESTIMENTO NECESSÁRIO PARA A IMPLANTAÇÃO DA ALTERNATIVA COM TECNOLOGIA PXI.**

<i>Descrição</i>	<i>Qtde</i>	<i>Valor</i>	<i>Total</i>
Sistema Supervisório	1	R\$ 5.370,00	R\$ 5.370,00
Gabinete e Controlador PXI	1	R\$ 27.420,00	R\$ 27.420,00
Placas de aquisição de dados	1	R\$ 7.260,00	R\$ 7.260,00
Aplicativos para aquisição e processamento de dados	1	R\$ 4.845,00	R\$ 4.845,00
Placa de aquisição de imagens	1	R\$ 5.655,00	R\$ 5.655,00
Aplicativo para aquisição de imagens	1	R\$ 1.425,00	R\$ 1.425,00
Câmeras de vídeo	3	R\$ 1.685,00	R\$ 5.055,00
Inversor de frequência	4	R\$ 950,00	R\$ 3.800,00
Motor CA	4	R\$ 850,00	R\$ 3.400,00
Sensores de temperatura	5	R\$ 2.100,00	R\$ 10.500,00
Instrumentação analítica	4	R\$ 1.200,00	R\$ 4.800,00
<b>TOTAL</b>			<b>R\$ 79.530,00</b>

A figura 5.10 ilustra o gabinete PXI e alguns módulos de aquisição de dados existentes no mercado.



**FIGURA 5.10 – GABINETE PXI E MÓDULOS DE AQUISIÇÃO DE DADOS COMERCIAIS. (Cortesia: National Instruments)**

### 5.3.1. Análise Técnico-Econômica das Arquiteturas Propostas

Para fins comparativos, as 3 alternativas de arquiteturas são analisadas economicamente, com referência à estimativa de gastos mensais da unidade de revestimentos de papéis especiais, conforme relacionado na tabela 5.6.

**TABELA 5.6 – ESTIMATIVA DE GASTOS MENSAIS DA UNIDADE DE REVESTIMENTO DE PAPÉIS ESPECIAIS. (Fonte: Schweitzer-Manduit)**

	<b>REFERÊNCIA</b>	<b>GASTO MENSAL</b>
<b>DEMANDA DE ENERGIA</b>	2592 MW / mês	R\$ 28.512,00
<b>MANUTENÇÃO DOS MOTORES</b>	16 h / trimestre	R\$ 89.000,00
<b>CONTINGÊNCIAS</b>	5 h / mês	R\$ 89.000,00
<b>CONTROLE DA QUALIDADE</b>	1,5 % de perdas	R\$ 139.968,00

Com relação à tabela 5.6, há de se salientar que a manutenção das escovas dos motores de corrente contínua, segundo dados do fabricante, deve ser realizada a cada trimestre, tendo sido relacionado o número de horas nesse período em que o referido motor CC fica parado. Porém, o valor mencionado equivale à média mensal dentro desse período trimestral.

Na tabela 5.7 pode ser visto um comparativo entre as arquiteturas – Controlador Programável (CP), Módulos *FieldPoint* (FP) e Tecnologia PXI (PXI) – em termos de suas perspectivas de economia mensal após sua efetiva implantação na unidade de revestimento de papéis especiais.

**TABELA 5.7 – PERSPECTIVA DE ECONOMIA MENSAL COM CADA ALTERNATIVA DESENVOLVIDA PARA A UNIDADE DE REVESTIMENTO DE PAPÉIS ESPECIAIS.**

(Fonte: Schweitzer-Manduit)

	CP		FP		PXI	
<b>DEMANDA DE ENERGIA</b>	R\$ 14.266,00	50%	R\$ 14.266,00	50%	R\$ 14.266,00	50%
<b>MANUTENÇÃO DOS MOTORES</b>	R\$ 26.700,00	30%	R\$ 26.700,00	30%	R\$ 26.700,00	30%
<b>CONTINGÊNCIAS</b>	R\$ 35.600,00	40%	R\$ 44.500,00	50%	R\$ 44.500,00	50%
<b>CONTROLE DA QUALIDADE</b>	R\$ 41.990,40	30%	R\$ 69.984,00	50%	R\$ 69.984,00	50%

A tabela 5.8 relaciona os investimentos necessários à implementação de cada alternativa e a sua respectiva perspectiva de economia mensal para a unidade de revestimento de papéis especiais.

**TABELA 5.8 – COMPARATIVO ENTRE INVESTIMENTOS EM TECNOLOGIA E PERSPECTIVA DE ECONOMIA MENSAL NA UNIDADE DE REVESTIMENTO DE PAPÉIS ESPECIAIS. (Fonte: Schweitzer-Manduit)**

	INVESTIMENTOS	ECONOMIA
<b>CONTROLADOR PROGRAMÁVEL</b>	R\$ 27.525,00	R\$ 118.556,40
<b>MÓDULOS <i>FIELDPOINT</i></b>	R\$ 76.095,00	R\$ 155.450,00
<b>TECNOLOGIA PXI</b>	R\$ 79.530,00	R\$ 155.450,00

Após serem comparadas as 3 alternativas, com relação aos aspectos técnicos e econômicos, optou-se por propor a implementação da arquitetura com tecnologia PXI para o sistema de controle da unidade de revestimento de papéis especiais estudada.

Economicamente, a arquitetura baseada em um controlador programável é a mais atraente, principalmente por contar com grande parte dos equipamentos e programas aplicativos necessários já em funcionamento. Contudo, em termos de controle da qualidade, a aquisição, condicionamento e processamento das imagens tem seus resultados comprometidos em

decorrência de adaptações que são necessárias na implantação do sub-sistema de aquisição e processamento de imagens.

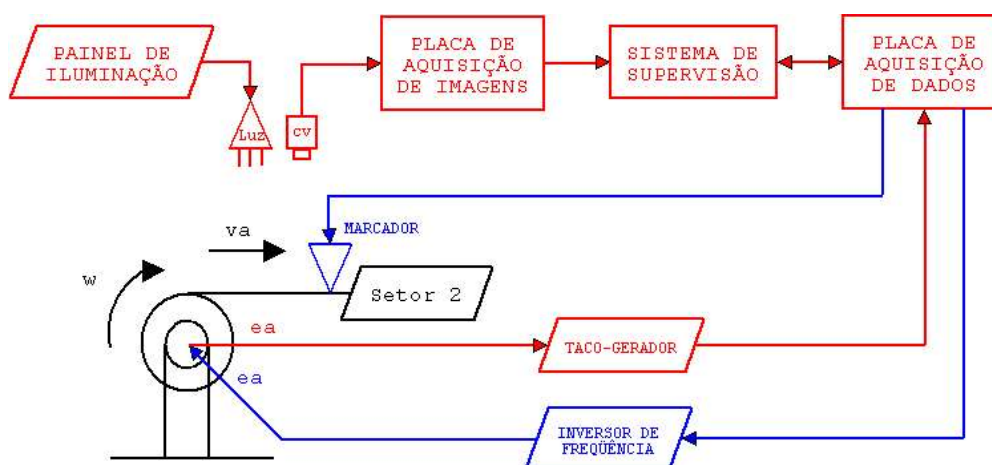
Assim, optou-se pela tecnologia PXI, que necessita de um investimento um pouco maior que a arquitetura com módulos *FieldPoint*, pois essa arquitetura baseada em tecnologia PXI proporciona os mesmos valores em termos de perspectiva de economia, contudo a integração mais fácil e quase imediata de todos os sub-sistemas apontam para uma implantação mais eficiente e em menor tempo, justificando o emprego dessa tecnologia em detrimento das demais alternativas.

#### **5.4.NOVAS CONFIGURAÇÕES PARA OS SETORES**

Durante as observações com relação ao processo em estudo, viu-se que a colocação de alguns novos sensores pela linha de processo, em locais estratégicos, possibilitaria um melhor monitoramento no tocante à qualidade.

Para o primeiro dos setores constituintes da unidade de pintura, a alimentação, propõe-se a colocação de uma câmera de vídeo com o intuito de captar a imagem da tira de papel, comparando-se aos padrões armazenados em um banco de dados e imagens, quando o papel estiver passando por esse setor, para que se possa verificar a qualidade do mesmo quanto à estrutura desse papel. Havendo algum problema estrutural, o sistema aciona um circuito pneumático, ao qual está acoplado um pincel, para marcar a região do dano, com vistas a sua manutenção após o papel ser completamente enrolado.

A figura 5.11 ilustra a nova configuração proposta para o setor.



**FIGURA 5.11 – NOVA CONFIGURAÇÃO DO SETOR DE ALIMENTAÇÃO DE PAPEL.**

O sistema de aquisição de imagens proposto é baseado na solução da National Instruments LabVIEW IMAQ Vision. Esse sistema é basicamente composto por um chassis de oito baias (*slots*) PXI-1000, controlador do sistema Pentium 866 MHz PXI-8175, módulo de aquisição de imagens de quatro canais PXI-1409, módulo de Entrada / Saída multi-função PXI-6040E, câmeras de vídeo padrão IEEE 1394 Sony XCD-X700/SX900, *driver* NI-IMAQ 1394, LabVIEW e IMAQ Vision, além de monitor de vídeo padrão RGB, de teclado padrão PS/2 e de *mouse* padrão PS/2.

Existem alguns aspectos que devem ser considerados antes da efetiva implantação do sistema, visando seu melhor desempenho. A iluminação nos locais escolhidos para aquisição das imagens deve ser analisada e observado se é suficiente para uma boa aquisição. Verifica-se, também, se a tira de papel ao passar por esses locais, está sujeita a sombreamento ou brilho ofuscante, o que pode ser resolvido com a colocação de filtros apropriados. A partir de tais considerações, opta-se pelo jogo de lentes mais adequado para cada situação.

Uma das características mais atraentes, que apontou para a escolha dessa plataforma é sua compatibilidade com aplicações geradas em NI LabVIEW, NI Measurement Studio, MS Visual Basic ou MS Visual C/C++, o que garante a possibilidade de associar seus resultados a uma vasta gama de outras aplicações. Além disso, o sensoriamento a ser realizado nos demais setores,

opcionalmente, é compatível com esse equipamento, garantindo maior interação com os demais componentes do sistema e maior eficácia em seu controle.

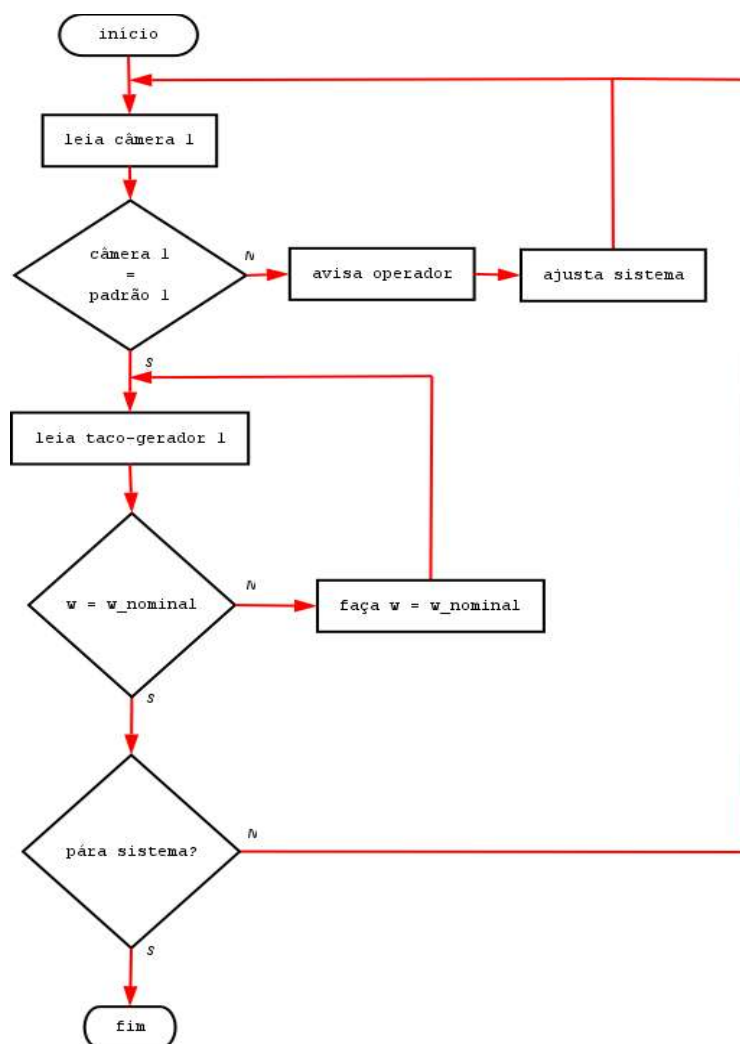
O sistema mencionado pode ser visto na figura 5.12.



**FIGURA 5.12 – EQUIPAMENTO PARA AQUISIÇÃO DE IMAGENS BASEADO EM ARQUITETURA PXI. (Cortesia: Los Alamos National Laboratory)**

Com relação a seu funcionamento, esse setor pode ser representado pelo fluxograma analítico ilustrado na figura 5.13.





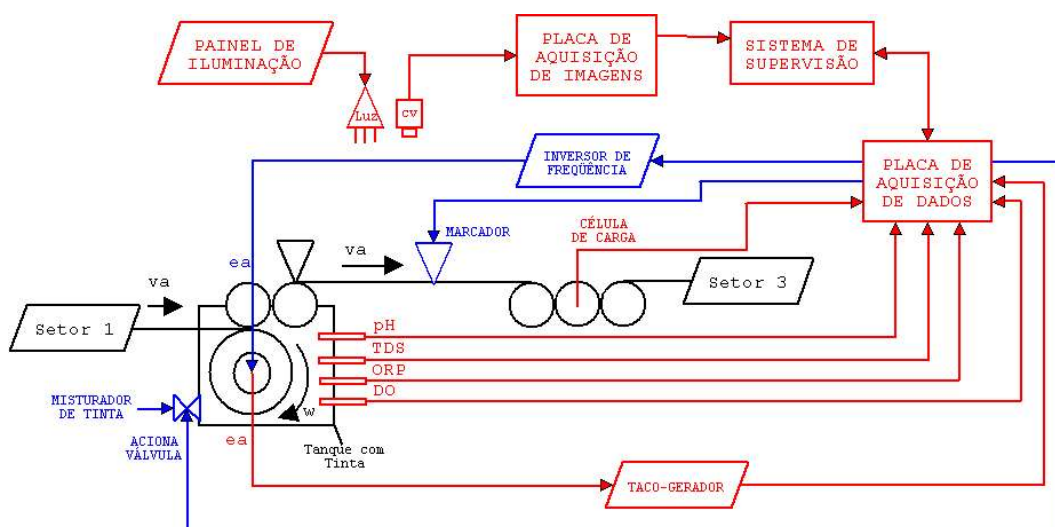
**FIGURA 5.13 – FLUXOGRAMA ANALÍTICO DO SETOR DE ALIMENTAÇÃO.**

Para o segundo setor, revestimento, propõe-se a colocação de uma câmera de vídeo para que, de forma análoga ao setor anterior, seja feita a verificação de rupturas na tira de papel e de falhas no revestimento. Havendo algum problema estrutural, o sistema aciona um circuito pneumático, ao qual está acoplado um pincel, para marcar a região do dano, com vistas a sua manutenção após o papel ser completamente enrolado.

Para monitorar a qualidade da tinta, com relação à sua acidez, ao oxigênio dissolvido, ao potencial de oxi-redução e à quantidade de sólidos

dissolvidos, sugere-se a colocação de sensores de pH, DO, ORP e TDS no tanque de tinta, ajustados conforme as características da tira de papel e da própria solução. Havendo alguma medida fora dos padrões, a eletro-válvula de controle do fluxo da tinta é acionada e posicionada para que haja a compensação de algum dos componentes da tinta.

A figura 5.14 ilustra a nova configuração proposta para o setor.



**FIGURA 5.14 – NOVA CONFIGURAÇÃO DO SETOR DE REVESTIMENTO.**

Os sensores de pH, de TDS, de ORP e de DO devem estar associados a transmissores, que são intermediários entre o sensor e o padrão de comunicação RS-485/422. Por sua vez, ao sistema PXI descrito anteriormente propõe-se acrescentar um módulo de aquisição de dados serial com quatro entradas PXI-8421/4, além do *driver* NI-Serial e do aplicativo NI Measurement Studio, opcionalmente pode ser utilizado o NI Lookout com a mesma eficiência. Vale salientar que tanto os sensores quanto os transmissores avaliados são da marca ANALION.

A viscosidade e a densidade da tinta são características que são monitoradas pelo processo por meio de sensores dispostos nos dutos que levam

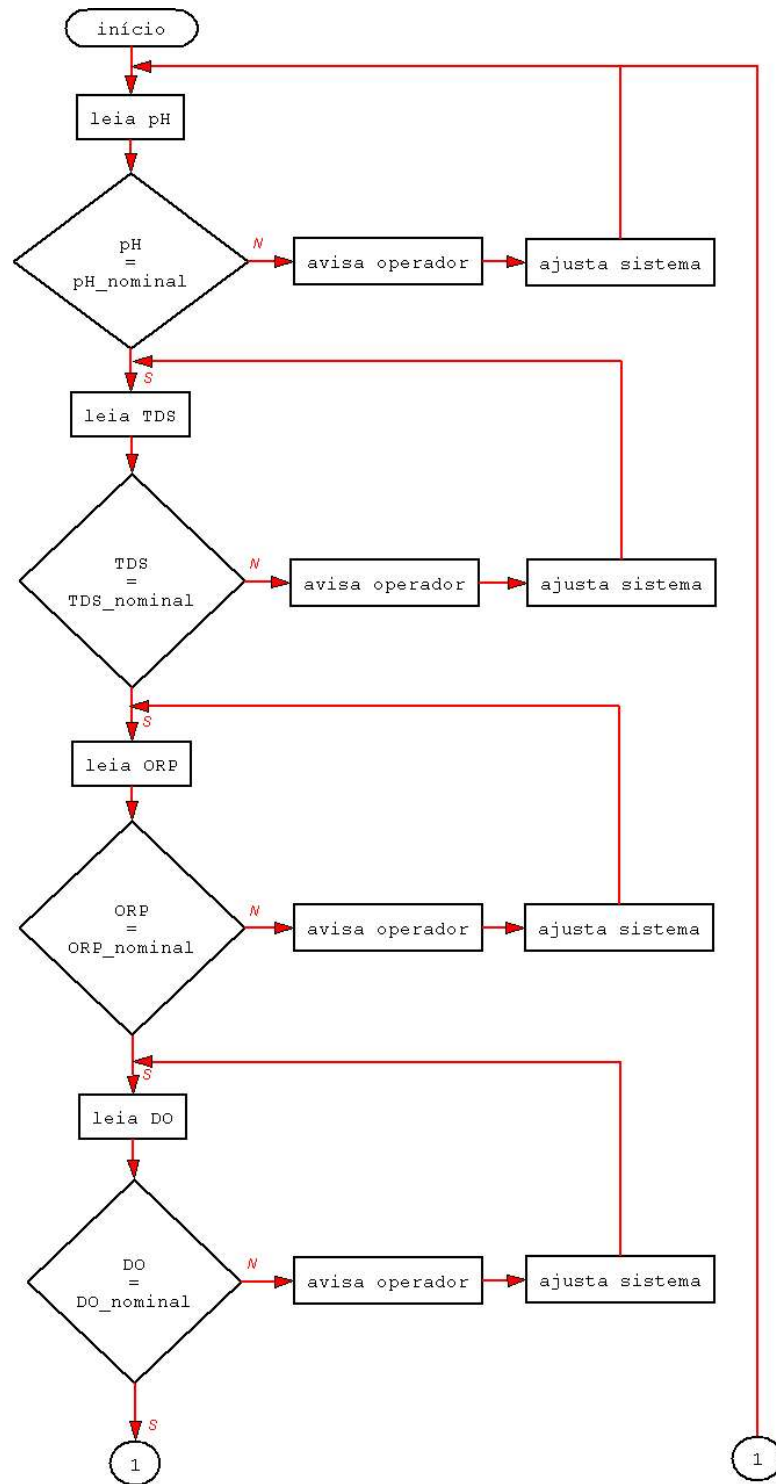
essa tinta do misturador até o tanque, contudo a colocação dos sensores de TDS, de ORP e de DO possibilitam ao programa principal, por meio dos dados originados pelas leituras realizadas nesses sensores, estar realizando uma medição indireta da viscosidade.

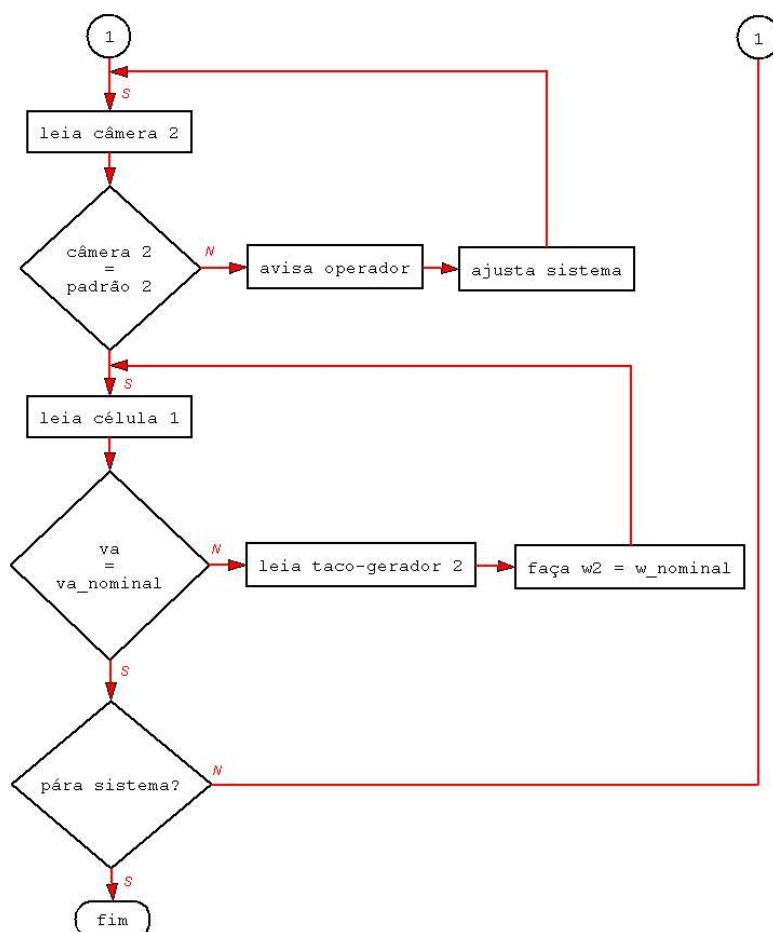
O módulo de aquisição de dados pode ser visto na figura 5.15.



**FIGURA 5.15 – MÓDULO DE AQUISIÇÃO DE DADOS PXI-8421/4. (Cortesia: National Instruments)**

Com relação a seu funcionamento, esse setor pode ser representado pelo fluxograma analítico da figura 5.16.





**FIGURA 5.16 – FLUXOGRAMA ANALÍTICO DO SETOR DE REVESTIMENTO.**

Para o terceiro setor, secagem, propõe-se a colocação de uma câmera de vídeo para que, de forma análoga aos setores anteriores, seja feita a verificação de rupturas na tira de papel e de danos provocados pelo aquecimento no forno. Havendo algum problema estrutural, o sistema aciona um circuito pneumático, ao qual está acoplado um pincel, para marcar a região do dano, com vistas a sua manutenção após o papel ser completamente enrolado.

Sugere-se, também, a colocação de cinco termômetros no forno, sendo dois externamente, para monitoramento do perfil da temperatura ao longo do duto de secagem.

Considerando-se que o ar seja insuflado no forno por entrada disposta

no seu teto, na região central, o perfil de temperatura em seu interior e arredores, segue os limites mínimo e máximo relacionados na tabela 5.9, assim como um perfil de temperatura considerado como sendo ótimo.

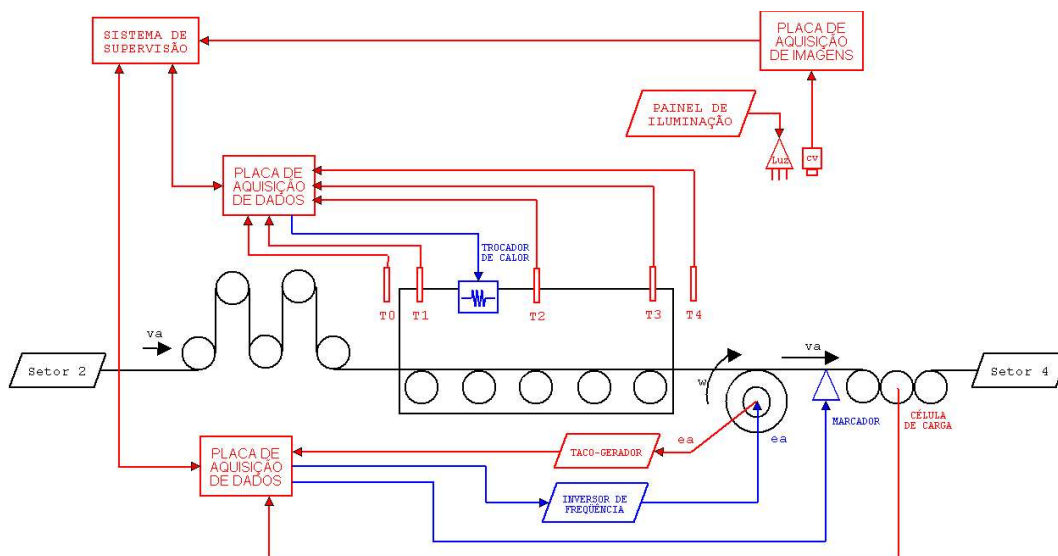
Havendo qualquer medição fora dos padrões estabelecidos, o sistema interferirá no forno através do sistema de troca de calor do mesmo.

**TABELA 5.9 – PERFIL DE TEMPERATURA DO FORNO.**

<i>Dispositivo</i>	<i>Perfil Mínimo</i>	<i>Perfil Máximo</i>	<i>Perfil Ótimo</i>
T0	35 °C	70 °C	45 °C
T1	35 °C	70 °C	52,5 °C
T2	100 °C	138 °C	119 °C
T3	35 °C	70 °C	52,5 °C
T4	35 °C	70 °C	45 °C

Há de se salientar que, havendo um estágio de resfriamento após o forno, os dispositivos T3 e T4 passam a ter perfis idênticos ao perfil do dispositivo T2.

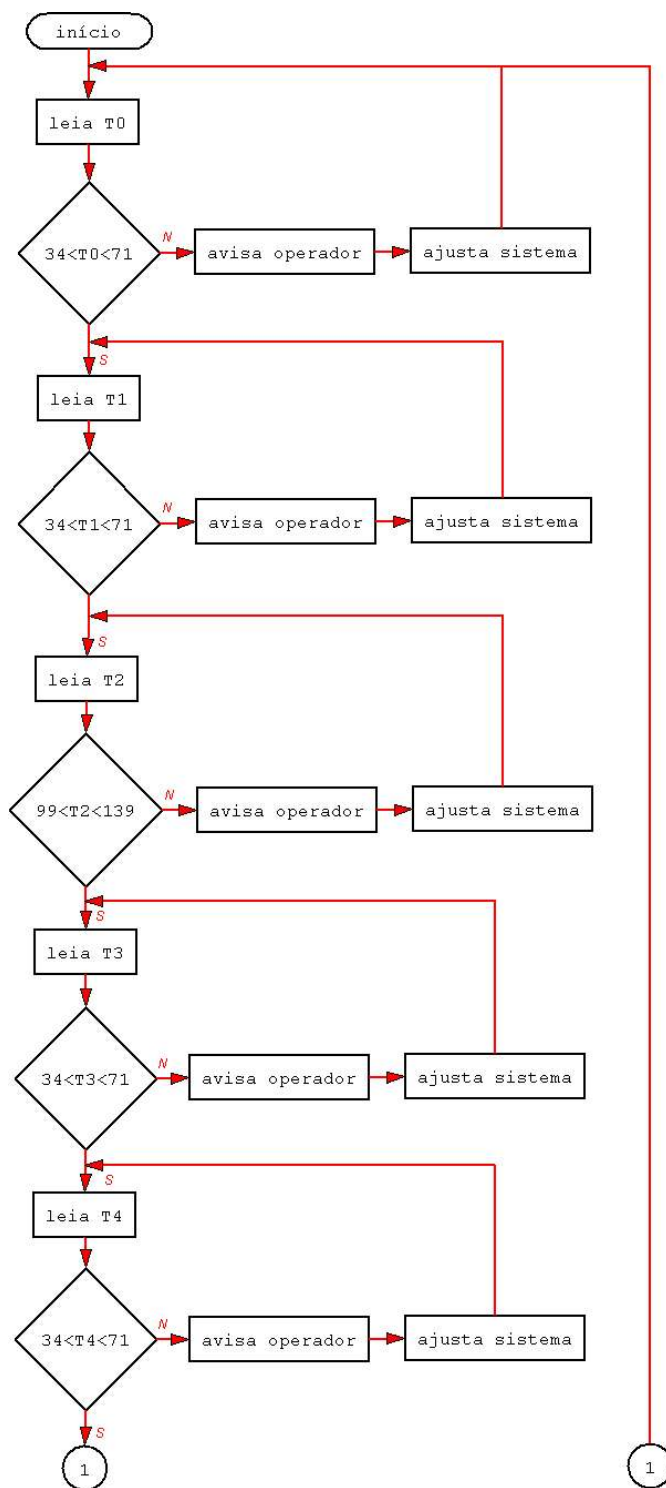
A figura 5.17 ilustra a nova configuração proposta para o setor.



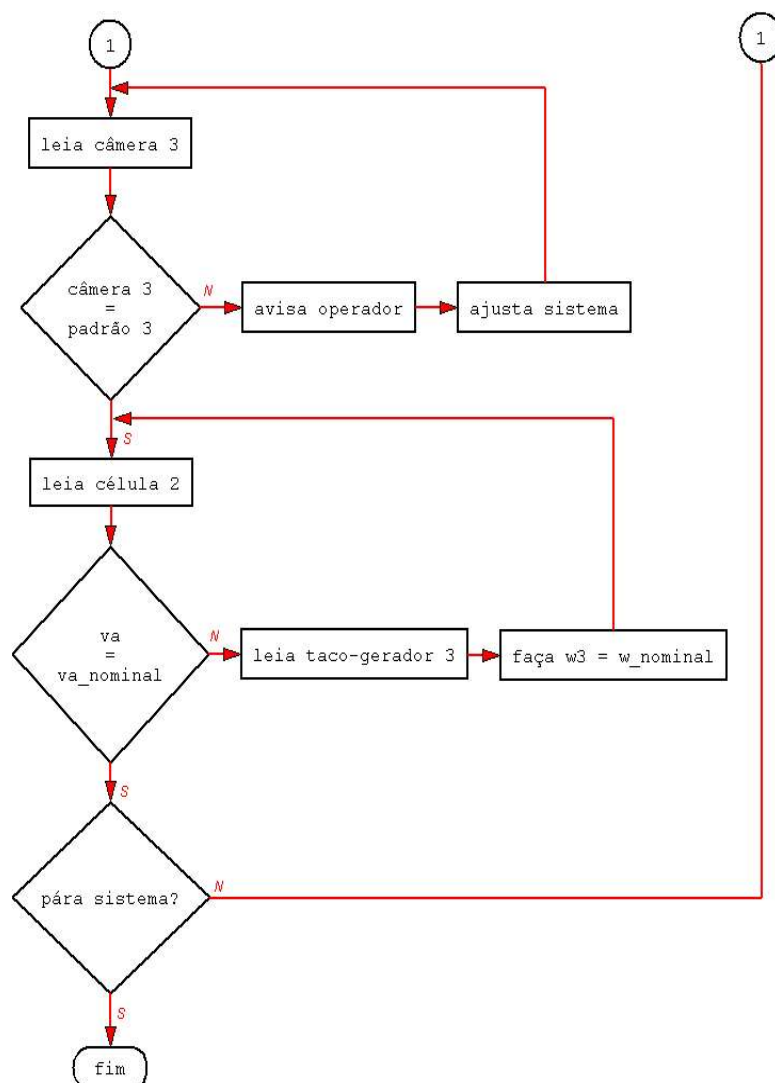
**FIGURA 5.17 – NOVA CONFIGURAÇÃO DO SETOR DE SECAGEM.**

Nessa etapa do desenvolvimento, propõe-se acrescentar ao sistema para aquisição dos dados oriundos dos sensores de temperatura, um novo módulo PXI-8421/8, com oito entradas. Para medir a temperatura dentro do forno, optou-se por termistores e seu respectivos transmissores de sinal (RS-485/422) por sua alta sensibilidade a mudanças de temperatura.

Com relação a seu funcionamento, esse setor pode ser representado pelo fluxograma analítico da figura 5.18.



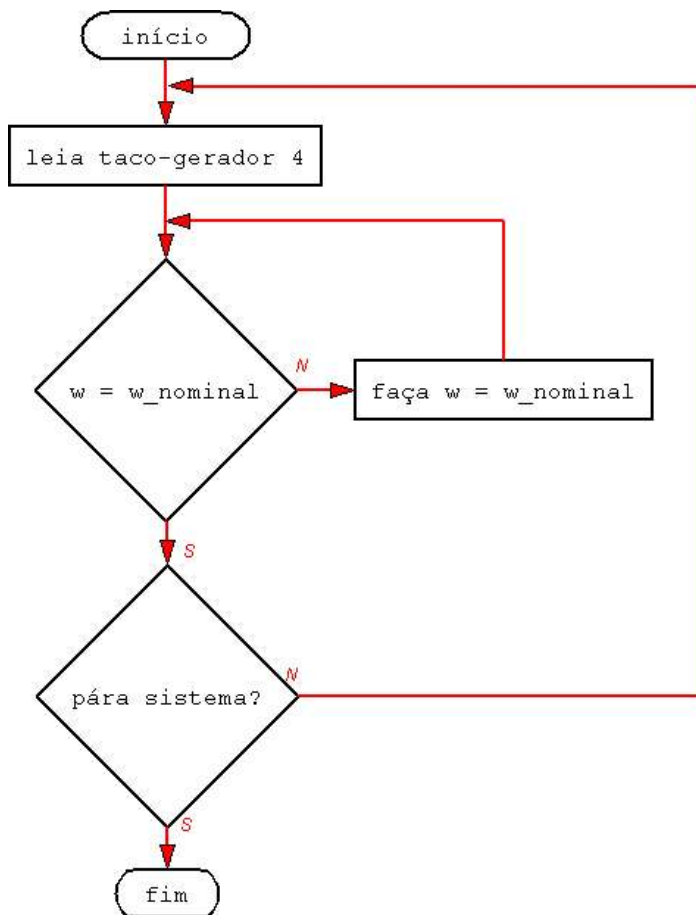




**FIGURA 5.18 – FLUXOGRAMA ANALÍTICO DO SETOR DE SECAGEM.**

O último setor da unidade, armazenagem, não é crítico para o sistema, assim a tira de papel já chega com todas as suas características monitoradas, sendo apenas fundamental que o seu motor esteja mantendo a velocidade nominal do papel, conforme os motores dos demais setores. Assim, a configuração atual pode ser mantida.

Com relação a seu funcionamento, esse setor pode ser representado pelo fluxograma analítico da figura 5.19.



**FIGURA 5.19 – FLUXOGRAMA ANALÍTICO DA ARMAZENAGEM.**

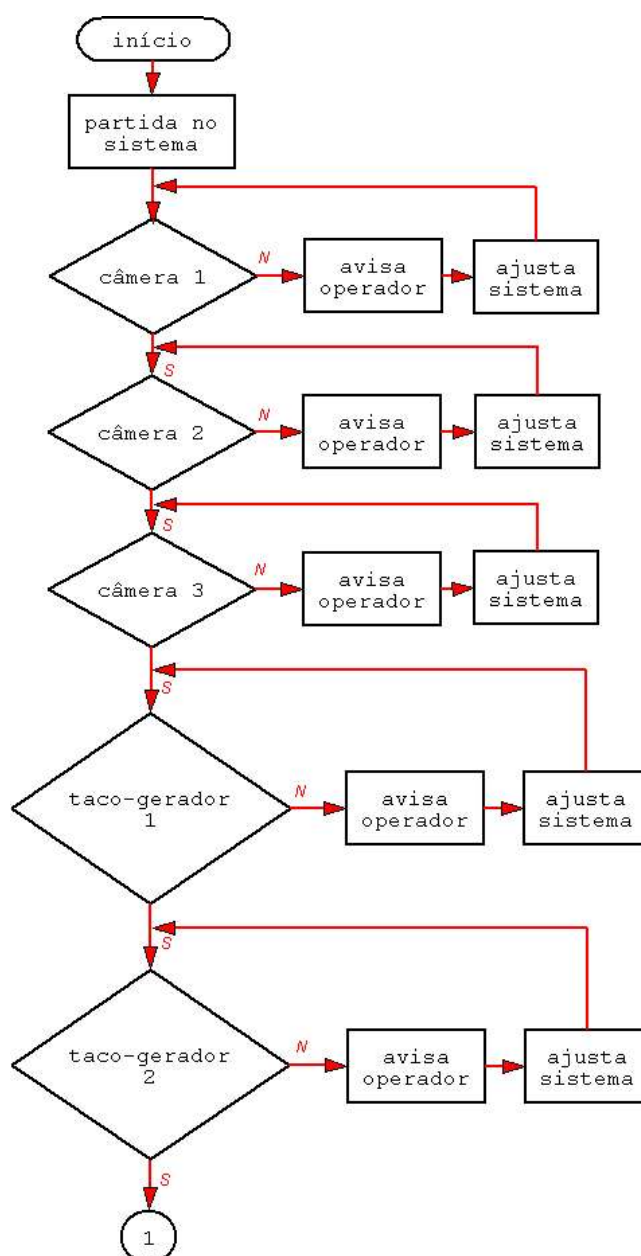
Há de se salientar que ao observar os setores como um sistema deve-se ter cuidados quando de sua partida.

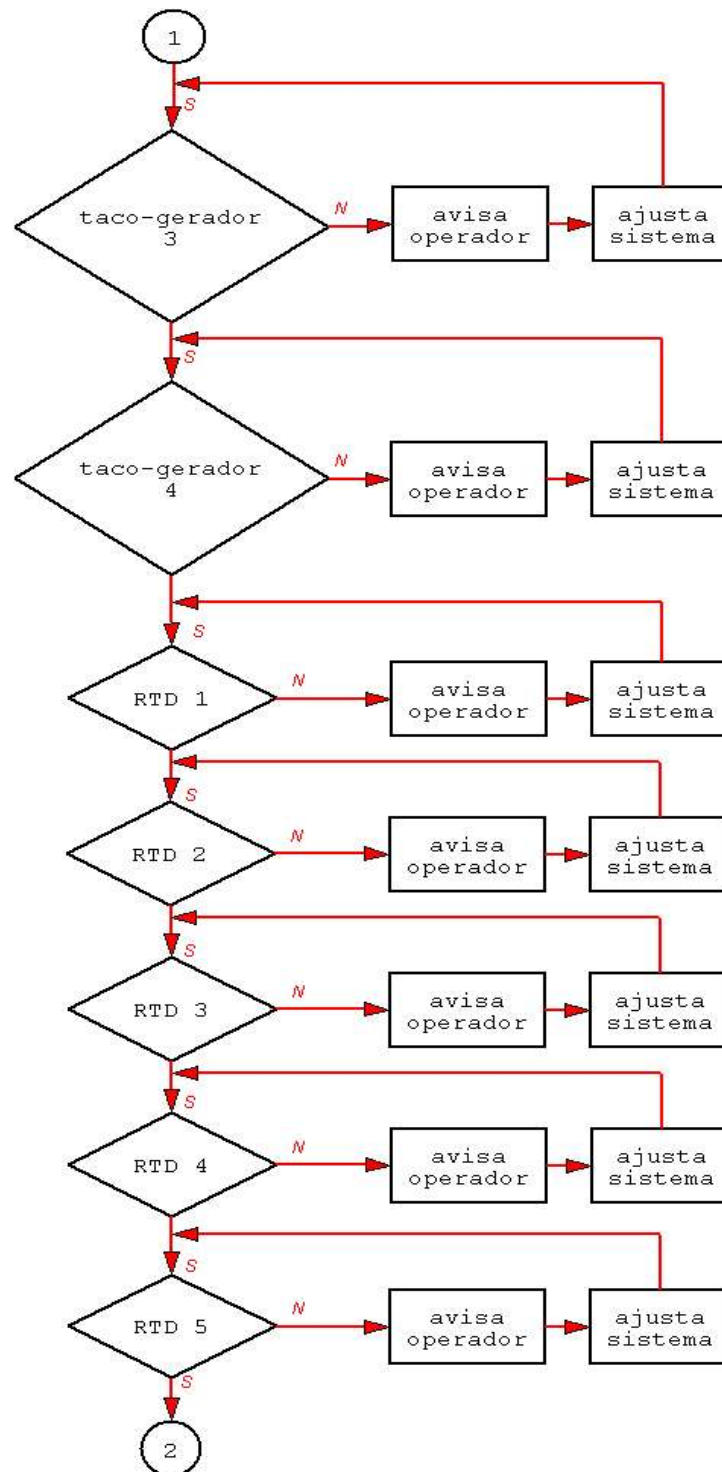
Após dar partida aos sistemas responsáveis pelo controle, deve-se iniciar o sensoriamento, sem a necessidade de muito rigor na ordem proposta. O sistema apenas deve ser iniciado com a conformidade dos parâmetros do substrato e do perfil de temperatura do forno, sob pena de causar danos à tira de papel.

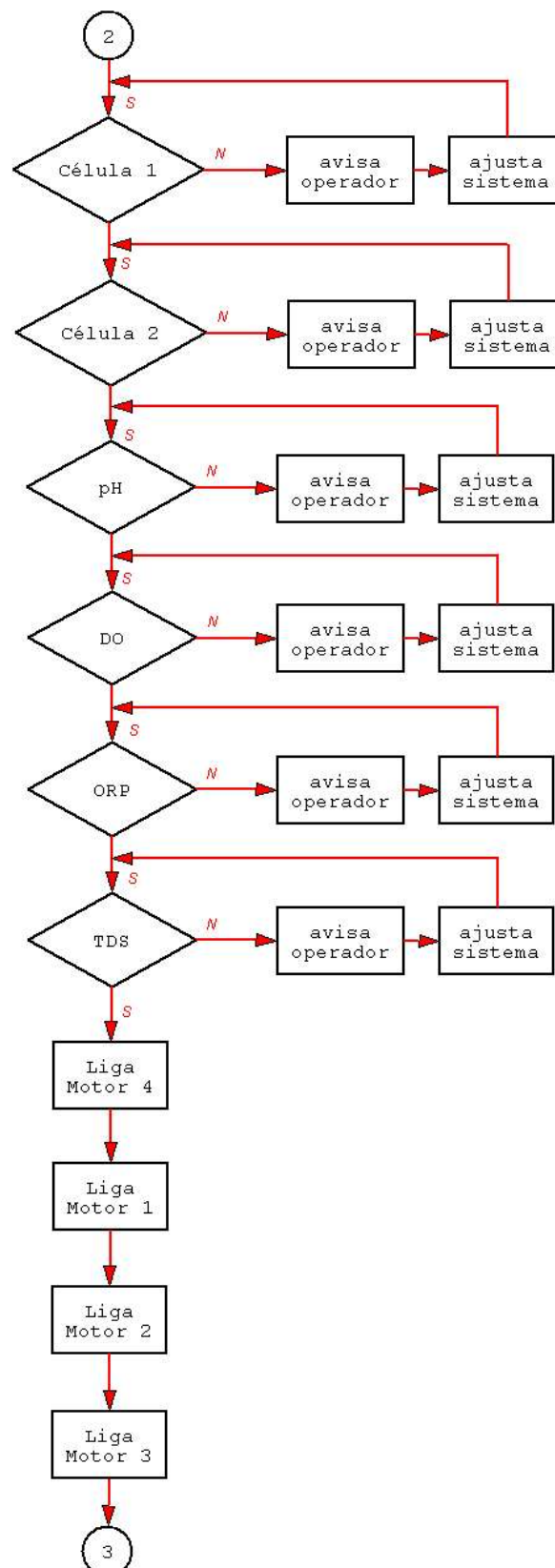
Com relação à partida dos motores, face ao grande consumo de energia e a picos de corrente que são transferidos à rede elétrica, esses devem ser ligados, com cerca de 10 s de diferença entre o regime do motor ligado e o

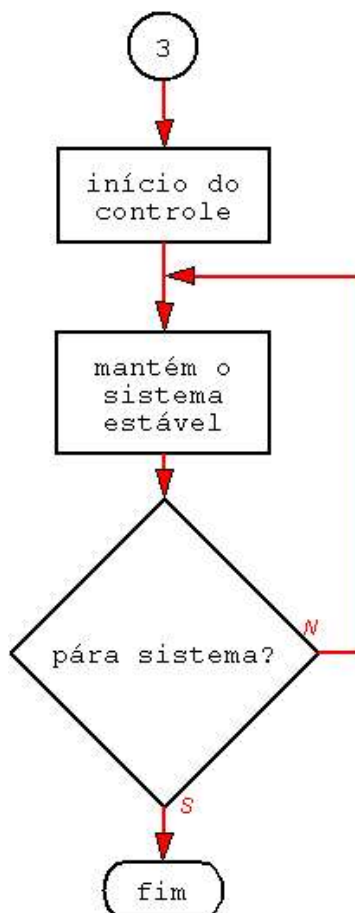
início do seguinte, pela ordem de setores: motores 4, 1, 2 e 3. Esse acionamento é monitorado e realizado pelo programa principal, o qual comanda os circuitos de acionamento, baseados em inversores de frequência, na seqüência proposta por meio de temporização interna a esse programa.

A figura 5.20 ilustra o fluxograma analítico referente aos procedimentos de partida do sistema em estudo.









**FIGURA 5.20 – FLUXOGRAMA ANALÍTICO DA PARTIDA DO SISTEMA.**

Deve ser salientado que, com relação ao fluxograma analítico da partida do sistema, que o procedimento "manter estável" resume os procedimentos inerentes à programação de controle. Por exemplo, o monitoramento constante dos dispositivos sensores, das câmeras de vídeo, comparação dessas leituras com os bancos de dados e de imagens, assim como alertas aos operadores e as medidas de contingência estabelecidas no programa. Tais procedimentos podem ser vistos nos fluxogramas analíticos de cada setor.

## **CAPÍTULO 6**

---

# **CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS**

Neste capítulo são relacionadas as conclusões do estudo realizado, assim como são feitas recomendações para melhoria do processo. A seguir, são relacionadas sugestões de trabalhos que podem ser realizados com base nas observações feitas durante o desenvolvimento desse estudo.

### **6.1. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES**

Embora deva ser destacado que, por basear-se em um projeto real, de ante-mão sabia-se que o sistema estaria, com boa probabilidade, em conformidade com os quesitos mínimos relativos à qualidade, à estabilidade, à controlabilidade e à observabilidade, sua avaliação através dos conceitos de controle de processos e do uso dos programas aplicativos de computação técnica SCILAB e SCICOS foram plenamente satisfatórios. Contudo, não era sabido se o controlador desenvolvido era o mais adequado, daí a necessidade do estudo, das análises e das simulações.

Como os tempos de resposta dos componentes elétricos do motor são muito inferiores aos da parte mecânica, o sistema, por sua própria natureza constitutiva, responde aos estímulos que lhe são impostos tão rápido quanto seja suficiente ao seu bom funcionamento.

A partir da análise do sistema em estudo, pode-se observar que a configuração atual do sistema atende às necessidades da unidade de

revestimento de papéis especiais. Em particular, a ação de controle PI é suficiente para manter o sistema estável, proporcionando um baixo tempo de subida e eliminando o erro de regime, embora o sobre-sinal e o tempo de acomodação tenham aumentado.

Após ser observado o comportamento dos componentes do sistema em estudo, em malha aberta, pode-se compará-los à expectativa criada pelos resultados empíricos. Ao fechar-se a malha, com ação de controle PI, verificou-se o comportamento das saídas do sistema, a velocidade de rotação do motor ( $\omega$ ) e a deformação do papel ( $x$ ), em função de suas entradas, a tensão elétrica na armadura do motor ( $e_a$ ) e a velocidade do papel ( $v_a$ ).

Com relação à estabilidade, o sistema em estudo mostrou-se pleno, porque, além de atender à definição onde pólos negativos implicam na estabilidade do sistema, ao avaliar os gráficos gerados, podem-se observar as respostas adequadas às entradas propostas, apesar de até mesmo serem deslocados os pólos ou alterados os sinais de entrada ou, ainda, ser injetado um sinal de perturbação ao sistema.

Embora não haja a confirmação experimental de que o método adotado para medir a deformação do papel usado na empresa seja o mais adequado, o sistema controlado consegue limitar de fato a deformação do papel a um nível aceitável, com a perturbação imposta nas simulações. Segundo dados coletados junto à fábrica, uma deformação aceitável é de até 0,5% (deformação de 0,00125 m para cada 0,25 m<sup>2</sup>), em sua condição mais crítica, uma força de tensão mecânica de 2 kN.

O sobre-sinal na deformação do papel que aparece nos resultados é aceitável. Observou-se que o sinal degrau ali injetado (1 m/s) é quatro vezes menor que a velocidade nominal do papel. Assim, baseando-se na proporcionalidade a partir dessa diferença, estimou-se o pico máximo de deformação próximo a 0,92 mm, o que se encontra abaixo do valor determinado como crítico para esse sistema (1,25 mm). Notou-se, também, que o sistema em estudo se estabiliza com uma deformação aproximada de 0,75 mm.

A configuração atual do sistema conta com motores de corrente contínua e acionamentos estáticos, o que aponta para a necessidade de grande demanda de energia e baixa flexibilidade de configuração para a obtenção dos



resultados desejados. Assim, foi recomendada a mudança para motores de corrente alternada com acionamentos dinâmicos, sejam inversores de frequência, que proporcionaria, após as devidas configurações desses equipamentos para seu melhor desempenho, uma economia na demanda de energia de cerca de 50% para a obtenção dos mesmos resultados dos motores de corrente contínua, além de uma diminuição superior a 30% nas paradas para manutenção dos motores, segundo dados do fabricante WEG, queda no custo do equipamento de aproximadamente 75%, motores e acionamentos, e uma maior flexibilidade na configuração da linha de produção.

A configuração de uma ação derivativa em seu controlador, manteria o sobre-sinal e o tempo de acomodação dentro dos valores recomendados para um funcionamento ótimo, propiciando maior vida útil aos motores e agregando maior estabilidade ao sistema.

Por fim, com o intuito de manter a qualidade do material revestido em nível alto, segundo os padrões adotados pela indústria de celulose e papel, recomendou-se a colocação de sensores analíticos e de câmeras de vídeo em pontos estratégicos da linha de produção, sob supervisão de um programa aplicativo específico para tal função, o que possibilitaria uma maior interação dos operadores com o sistema de controle, afim de tomar as providências necessárias relacionadas às alterações na programação ou intervenções em casos de contingências que não tenham sido previstas no programa principal.

As implementações propostas pela arquitetura baseada em tecnologia PXI necessitam de investimentos de R\$ 79 530,00, porém proporcionam uma economia mensal de R\$ 155 450,00 à fábrica de celulose e papel, o que garante o retorno do investimento já no primeiro mês de sua atividade.

Assim, ao seguir as recomendações propostas, o sistema que hoje é estável, passaria a ser ótimo em termos de controle, de produtividade e de qualidade, conforme o desejado quando do início desse estudo.

## **6.2. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS**

A partir do estudo realizado, pode-se notar a possibilidade de estudos correlatos aos assuntos aqui abordados.

Seria muito interessante o desenvolvimento de uma metodologia baseada em matrizes de espaço de estados para a análise de sistemas de controle, pois todos os métodos de análise encontrados na literatura referenciada nesse trabalho são voltados para algum critério de projeto (Ogata, 1997; Messner e Tilbury, 1999).

Tal necessidade justifica-se no fato de que, durante as etapas de análise de um sistema de controle, é estabelecido um modelo matemático para o sistema, a partir do qual realiza-se a análise propriamente dita. Contudo, notou-se que as propostas de métodos de análise convergem para métodos de projeto, onde, em algum momento, são estabelecidos novos valores para os pólos e/ou ganhos do sistema.

Outro trabalho interessante seria um estudo comparativo entre as soluções comerciais para o controle do processo estudado. Esse trabalho foi baseado nas soluções de tecnologia PXI da National Instruments e da Aliansa Brasil, contudo outros fabricantes e distribuidores de equipamentos para automação industrial, ou grupos deles, provêm produtos que se adequam às necessidades apresentadas, possibilitando uma análise técnico-econômica de sua viabilidade.

Tendo em vista a viabilidade técnico-econômica dos programas baseados em Programas Aplicativos Livres, especialmente baseados em soluções GNU/Linux, seria interessante se estar avaliando as propostas que vêm sendo desenvolvidas, como MatPLC, JavaPLC, ClassicLadder, PuffinPLC, Comedi, entre outros, pois esses aplicativos são ótimas opções de sistema supervisorio, abrangendo uma grande quantidade de aplicações comerciais, inclusive integrando-se com ERP (*Enterprise Resource Planning*), a custo muito baixo, com maior estabilidade e confiabilidade que as soluções baseadas em sistema proprietário.

## REFERÊNCIAS

---

1. BENTO, C.R. Sistemas de Controle: Teoria e Projetos. Livros Érica Editora Ltda., São Paulo, 1989, 194 p., 89-0221-629.801.
2. BOULTER, B.T. Analysis of a Printing Line Coating Section. ApICS LLC Training Course Material, Seven Hills, OH, 2000, 82 p., site visitado em 14 de julho de 2003.
3. BOULTER, B.T. Tripper Assisted Belt Conveyor Tension Regulation. Proceedings of 1997 AISE Annual Meeting, 1997, 17 p., site visitado em 14 de julho de 2003.
4. BOULTER, B.T. Winder Tension Control Simulation & A Robust Winder Tension Control Algorithm. ApICS LLC Training Course Material, Seven Hills, OH, 2000, 33 p., site visitado em 14 de julho de 2003.
5. BOULTER, B.T. FOX, H.W. Accumulator Tower Tension Regulation and System Identification Techniques. ApICS LLC Training Course Material, Seven Hills, OH, 2000, 57 p., site visitado em 14 de julho de 2003.
6. BOULTER, B.T. FOX, H.W. Bending Loss Calculations. ApICS LLC Training Course Material, Seven Hills, OH, 2000, 22 p., site visitado em 14 de julho de 2003.
7. GARCIA, C. Modelagem e Simulação de Processos Industriais e de Sistemas Eletromecânicos. EDUSP - Editora da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997, 462 p., 85-314-0402-9.
8. HAAPANEN, A.P. LINS, A. On-line Temperature Measurement for Paper Machine Dryers: A New Way to Monitor and Improve Performance. In: 32º Congresso Anual de Celulose e Papel. ABTCP, São Paulo, 1999, p. 27-33.
9. LAMAS, W.Q. GROH, F. RIBEIRO, G.W. Análise do Sistema de Controle Realimentado de Motor CC Aplicado em Máquina de Revestimento de Papéis Especiais. Taubaté, 2001, 69 p. Monografia – Universidade de Taubaté.

- 10.LIMA, F. Modelagem, Análise e Controle de um Sistema de Bobinamento de Tiras de Aço. São Carlos, 2001, 128 p. Dissertação – Universidade de São Paulo.
- 11.MESSNER, W.C. TILBURY, D. Control Tutorials for MATLAB and Simulink: A Web-Based Approach. Prentice-Hall, Michigan, 1999, 32 p., 0-201-47700-9.
- 12.OGATA, K. Modern Control Engineering, Third Edition. Prentice Hall, Upper Saddle River, 1997, 997 p., 0-13-227307-1.
- 13.OXFORD UNIVERSITY. Report on Curtain Coating Technology Workshop with Arjo Wiggins. Oxford University, Oxford, s/d, 4 p. Site visitado em 14 de julho de 2003.
- 14.PENNA, M.G. GUIMARÃES, F.M.Q. RUBIÃO, L.E.G. ALMEIDA NETO, F.J de; Incorporação de Funções de Auto-Ajuste a Sistemas de Controle de Processos. In: 32º Congresso Anual de Celulose e Papel. ABTCP, São Paulo, 1999, p. 17-26.
- 15.VALENZUELA, M.A. BENTLEY, J.M. LORENZ, R.D. Sensorless Tension Control in Paper Machines. In Proc. Of IEEE IAS Pulp & Paper Industry Conference. IEEE, Toronto, June 17-20, 2002, 10 p.

## **ABSTRACT**

---

LAMAS, W.Q. Analysis and Optimization of Closed-loop Control System Applied in Special Papers Coating Machine. Taubaté, 2003. 117 p. Dissertation - University of Taubaté.

This work deals with the analysis of a coating unit for special papers of a large paper and pulp plant by proposing improvements in its control system.

This analysis is justified by a necessary increase in productivity and quality as demanded by the commercial paper market. Moreover, a decrease in energy consumption is an important factor in favor of improved financial performance. In view of the continuous increase in market competition, a constant analysis and reassessment of production processes is an important scope of our study.

For analysis purpose, the coating unit was broken into four sectors, paper unwinder, coating, drying and winder. From this point on, each sector is analyzed in view of possible improvements. Our methodology is based on the existing control system, producing a minimum behavioral pattern with respect to stability and coating quality. After this is done, the system is re-designed by adding proposed improvements and analyzing new performance criteria, as compared with the present situation.

Mathematical models of each sector are defined and analyzed by specialized software packages. Transfer functions are then obtained for each sector and subjected to a simulation computer software. Results of the existing model and of the proposed model are compared and evaluated with respect to the overall control and to energy consumption.

Based on the results, the proposed system stability, flexibility and energy consumption are improved and paint as well as paper quality are better monitored along the process.

**Key-Words:** paper coating machine, special papers, process control.