



ALESSANDRO RODRIGUES FRIAS

**“GESTÃO DE MALHAS DE CONTROLE NO
PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE PAPEL – ESTUDO
DE CASO”**

***“CONTROL LOOP MANAGEMENT IN PAPERMAKING
PROCESS – CASE STUDY”***

CAMPINAS
2013



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA

ALESSANDRO RODRIGUES FRIAS

“GESTÃO DE MALHAS DE CONTROLE NO PROCESSO DE
FABRICAÇÃO DE PAPEL – ESTUDO DE CASO”

Orientador: Prof. Dr. Flávio Vasconcelos da Silva

*“CONTROL LOOP MANAGEMENT IN PAPERMAKING
PROCESS – CASE STUDY”*

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Química da Faculdade de Engenharia Química da Universidade Estadual de Campinas para obtenção do título de Mestre em Engenharia Química.

Master Degree thesis presented to the Chemical Engineering Postgraduation Programme of the College of Chemical Engineering of the State University of Campinas to obtain the MSc. grade in Chemical Engineering.

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO
DEFENDIDA PELO ALUNO ALESSANDRO RODRIGUES FRIAS
E ORIENTADO PELO PROF. DR. FLÁVIO VASCONCELOS DA SILVA.

Assinatura do Orientador

CAMPINAS
2013

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Rose Meire da Silva - CRB 8/5974

F91g Frias, Alessandro Rodrigues, 1977-
Gestão de malhas de controle no processo de fabricação de papel - estudo de caso / Alessandro Rodrigues Frias. – Campinas, SP : [s.n.], 2013.

Orientador: Flávio Vasconcelos da Silva.
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química.

1. Controle de processo. 2. Ferramentas de gestão. 3. Papel - Indústria - Controle de produção. 4. Variabilidade. I. Silva, Flávio Vasconcelos da, 1971-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Química. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em inglês: Control loop management in papermaking process - case study

Palavras-chave em inglês:

Process control

Management tools

Paper - Industry - Production control

Variability

Área de concentração: Sistemas de Processos Químicos e Informática

Titulação: Mestre em Engenharia Química

Banca examinadora:

Flávio Vasconcelos da Silva [Orientador]

Eduardo Stockler Tognetti

Angel Pontin Garcia

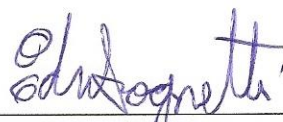
Data de defesa: 20-06-2013

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Química

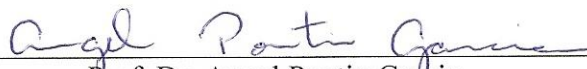
Esta versão corresponde à final da Dissertação de Mestrado defendida por Alessandro Rodrigues Frias, em 20 de Junho de 2013 e aprovada pela banca examinadora:



Prof. Dr. Flávio Vasconcelos da Silva - Orientador
DESQ/FEQ/UNICAMP



Prof. Dr. Eduardo Stockler Tognetti
ENE/FT/UnB



Prof. Dr. Angel Pontin Garcia
FEAGRI/UNICAMP

DEDICATÓRIA

À minha família.

As mulheres da minha vida: Mirela minha esposa e amiga, eterno amor, fortaleza, presente de Deus e Nossa Senhora. Maria Gabriela minha filha, milagre, benção e graça que foi enviada por Deus para ser motivo de alegria e Ágape (amor incondicional) na minha vida.

Aos meus queridos filhos Pedro (*in memorian*) e João Paulo (*in memorian*), pérolas preciosas que foram uma das maiores alegrias da minha vida aqui na terra.

"O futuro da igreja e da humanidade depende da família."

João Paulo II

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo dom da vida, proteção, sabedoria, discernimento, compaixão, misericórdia e por ser o Senhor da minha família.

Ao meu pai e minha mãe, pelo matrimônio que me gerou, educação, amor, carinho, orações e sacrifícios que fizeram por mim.

À minha esposa, Mirela, pela compreensão, paciência, incentivo, força, oração, amor, carinho e por sempre estar ao meu lado superando todas as dificuldades.

Ao meu sogro e minha sogra, pelo matrimônio que gerou a Mirela, pelo apoio em todos os momentos e por sempre estarem conosco.

Ao Prof. Dr. Flávio Vasconcelos da Silva, orientador e amigo. Obrigado pela oportunidade em realizar esta dissertação de mestrado, pelas orientações e aulas ministradas.

Aos professores Dra. Ana Maria Frattini Fileti e Dr. José Vicente Hallak D'Angelo da Faculdade de Engenharia Química (DESQ/FEQ/UNICAMP).

Ao Diego, pelo companheirismo nas disciplinas, almoços e momentos de estudos.

A todos os colegas, professores e funcionários da Faculdade de Engenharia Química, que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

Ao Daniel Schuck (Andritz AG), grande idealizador do Sindus OPP e responsável pela utilização do mesmo neste trabalho. Muito obrigado pela oportunidade de trabalharmos juntos e também por todos os ensinamentos.

A Oji Papéis Especiais Ltda., pela oportunidade em realizar os estudos de caso e concluir este trabalho. Agradeço especialmente aos Srs. Marcelino Sacchi, Ricardo Blasco, Tetsunosuke Ogata, André Rocha, Paulo César Batista, Pedro Sarco, Anderson Meca, Sérgio Delega, José Ernesto Raser, Sérgio Chinaglia e ao grande Mestre Sr. Sheik Rashid.

"Comece fazendo o que é necessário. Depois o que é possível. E de repente você estará fazendo o impossível."

São Francisco de Assis

RESUMO

A Gestão de Malhas de Controle ou CLM (*Control Loop Management*) tem-se mostrado uma ferramenta importante para monitorar o funcionamento das malhas de controle nas indústrias, permitindo aumentar a produtividade e a qualidade por meio da redução no consumo de insumos e estabilidade da planta. Com isso, têm-se as justificativas necessárias para se pesquisar e aprimorar as técnicas existentes para gestão de malhas de controle nas indústrias. Este trabalho apresenta um estudo de caso sobre Gestão de Malhas de Controle em ambiente industrial por meio de um procedimento prático utilizando a metodologia DMAIC (Definir, Medir, Analisar, Implementar e Controlar) e também os principais índices de desempenho utilizados no *software* Sindus OPP como: Variabilidade, Erro Médio, Integral do Erro Absoluto (IAE), Índice de Capabilidade do Processo (CPK), Cruzamento de *Setpoint* (SP), Percurso da Válvula, Reversão e Saturação da Válvula na gestão *on-line* de malhas de controle. A revisão bibliográfica abrange os principais conceitos de gestão de malhas de controle, fundamentação teórica sobre a metodologia proposta para gestão de malhas, indicadores de desempenho e também sobre o processo de fabricação de papel, pois o estudo de caso apresentado neste trabalho foi realizado em malhas de controle do sistema de preparação de massa para fabricação de papel. Dentre os resultados obtidos destaca-se a redução de variabilidade das malhas de controle de nível do tanque de água fresca (96,9% menor), do tanque de massa refinada (98,6% menor) e do tanque de mistura (98,3% menor). A redução dos KPIs Técnicos das malhas de controle mostra que as ferramentas de gestão *on-line* de malhas de controle utilizadas no *software* Sindus OPP são práticas e eficazes, pois, permitiram fazer a gestão das malhas com foco em redução de variabilidade e melhoria contínua do processo de fabricação de papel.

Palavras chave: Controle de processo, Ferramentas de gestão, Papel - Indústria - Controle de produção e Variabilidade.

ABSTRACT

The Control Loop Management (CLM) has been an important tool to monitoring the operation of the control loops in industry, allowing to increase productivity and quality through reducing the consumption of raw materials and plant stability. With this, there are the necessary justifications to research and improve the existing techniques for managing control loops in industry. This paper presents a case study on Control Loop Management in industrial environment by a practical procedure using the DMAIC methodology (Define, Measure, Analyze, Improve and Control) and the key performance indicators used in software Sindus OPP: Variability, Average Error, Integral of Absolute Error (IAE), Process Capability Index (CPK), Setpoint (SP) Crossing, Valve Travel, Valve Reversals and Valve Out Limit in online control loop management. The literature review includes the major concepts of Control Loop Management, the theoretical foundation of the proposed methodology for managing loops, performance indicators and also about the papermaking process, because the case study presented in this paper was performed on control loops of the stock preparation system for papermaking. Among the results highlight the variability reduction of control loops of the level of fresh water tank (96.9% less), of the refined pulp tank (98.6% less) and mixing tank (98.3% less). The reduction of Technical KPIs of control loops shows that the online management tools of control loops used in software Sindus OPP are practical and effective, because it allowed to manage the loops with focus on reducing variability and continuous improvement of papermaking process.

Keywords: Process control, Management tools, Paper - Industry - Production control and Variability.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	xxi
LISTA DE TABELAS.....	xxvii
LISTA DE ABREVIATURAS.....	xxix
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Hipótese.....	3
1.2 Objetivos	3
1.2.1 Objetivo Geral	3
1.2.2 Objetivos Específicos	3
1.3 Motivação do trabalho.....	4
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1 Fundamentação Teórica	11
2.1.1 Gestão de Malhas	11
2.1.2 Metodologia para Gestão de Malhas	14
2.1.3 Índices de Desempenho para Gestão de Malhas	16
2.1.4 Normalização dos Índices de Desempenho.....	23
2.2 Processo de Fabricação de Papel	24
2.2.1 História do Papel	24
2.2.2 Fabricação de Papel.....	24
2.2.3 Preparação de Massa	26
2.2.4 Máquina de Papel	35
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	41
3.1 Materiais utilizados para Gestão de Malhas.....	41

3.1.1	SDCD	41
3.1.2	Sindus OPP.....	44
3.1.3	PIMS.....	47
3.2	Métodos	48
3.2.1	Metodologia para Gestão de Malhas	48
3.2.2	Priorização das malhas de controle críticas da preparação de massa.....	49
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	51
4.1	Gestão de malhas de controle na fabricação de papel	51
4.2	Estudo de Caso 1: Controle de Nível do Tanque de Água Fresca	53
4.2.1	Descrição do problema.....	54
4.2.2	Solução do problema.....	56
4.2.3	Resultados obtidos.....	57
4.3	Estudo de Caso 2: Controle de Nível do Tanque de Massa Refinada ...	60
4.3.1	Descrição do problema.....	61
4.3.2	Solução do problema.....	64
4.3.3	Resultados obtidos.....	68
4.4	Estudo de Caso 3: Controle de Nível do Tanque de Mistura	72
4.4.1	Descrição do problema.....	73
4.4.2	Solução do problema.....	76
4.4.3	Resultados obtidos.....	78
4.5	Perenização dos resultados das malhas de controle críticas da preparação de massa	82
4.5.1	DMAIC: Controlar	82
5	CONCLUSÕES.....	85
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	89

7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	90
	APÊNDICE A – FLUXOGRAMA DE PREPARAÇÃO DE MASSA	96
	APÊNDICE B – ESTUDO DE CASO 4	97
	B.1 – Descrição do problema.....	97
	B.2 – Solução do problema	97
	B.3 – Resultados obtidos.....	99
	APÊNDICE C – ESTUDO DE CASO 5.....	100
	C.1 – Descrição do problema.....	100
	C.2 – Solução do problema	100
	C.3 – Resultados obtidos.....	101
	APÊNDICE D – ALGORITMOS DE CONTROLE	103
	D.1 – Controle de Nível do Tanque de Massa Refinada (LIC043)	103
	D.2 – Controle de Nível do Tanque de Mistura (LIC052)	104
	D.3 – Controle dos Refinadores	105
	D.4 – Controle de Carga Mineral	106

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Oportunidade de ganho após redução de variabilidade.....	13
Figura 2 – Fluxograma típico de preparação de massa.	25
Figura 3 – Fluxograma típico de fabricação de papel.	25
Figura 4 – Pulper ou Hidrapulper (GRANT et al., 1978).....	26
Figura 5 – Exemplo de Pulper (ARAÚJO, 2010).....	27
Figura 6 – Fibras de eucalipto não refinadas (ARAÚJO, 2010).	27
Figura 7 – Fibras de eucalipto refinadas (ARAÚJO, 2010).	28
Figura 8 – Refinador cônico (BIERMANN, 1996).	28
Figura 9 – Detalhes dos discos do refinador a disco (GRANT et al., 1978).	29
Figura 10 – Refinador a Disco utilizado no Sistema de Preparação de Massa (TAPPI, 1997).....	29
Figura 11 – Exemplo típico de tanque de mistura (ARAÚJO, 2010).	30
Figura 12 – Tanque de mistura com detalhe da malha de controle de fluxo de massa (TAPPI, 1997).	31
Figura 13 – Tanque da máquina com detalhe da malha de controle de nível (TAPPI, 1997).	32
Figura 14 – Detalhes da caixa de nível (TAPPI, 1997).....	32
Figura 15 – Exemplo de um sistema de diluição – <i>approach flow</i> (ARAÚJO, 2010).	33
Figura 16 – Exemplo de um depurador centrífugo (ARAÚJO, 2010).	34
Figura 17 – Etapas de uma máquina de papel (Adaptado TAPPI, 1997).....	35
Figura 18 – Ilustração de uma caixa de entrada antiga e exemplo de uma caixa de entrada moderna (TAPPI, 1997).	36

Figura 19 – Mesa plana com tela formadora (ARAÚJO, 2010).....	36
Figura 20 – Mesa plana com tela formadora e setas indicativas no sentido transversal CD (<i>Cross Direction</i>) e longitudinal MD (<i>Machine Direction</i>) – (TAPPI, 1997).....	37
Figura 21 – Ilustração do funcionamento de uma prensa com detalhe no NIP, folha e feltro (TAPPI, 1997).	37
Figura 22 – Exemplo de uma prensa na máquina de papel (TAPPI, 1997).	38
Figura 23 – Ilustração do processo de secagem da folha de papel em um cilindro secador com vapor (TAPPI, 1997).	38
Figura 24 – Exemplo de cilindros secadores em uma máquina de papel (TAPPI, 1997). ...	39
Figura 25 – Entrada da folha de papel em uma calandra (TAPPI, 1997).....	39
Figura 26 – Ilustração com o funcionamento de uma enroladeira (ARAÚJO, 2010).....	40
Figura 27 – Exemplo de uma enroladeira com início de enrolamento do rolo jumbo (ARAÚJO, 2010).....	40
Figura 28 – Tela de operação: setor da máquina de papel.....	42
Figura 29 – Tela de operação: visão geral do processo da máquina de papel.....	42
Figura 30 – Tela de operação: alarmes da máquina de papel.....	43
Figura 31 – Tela de operação: gráficos de tendências da máquina de papel.....	43
Figura 32 – Estrutura do Sindus OPP (SCHUCK, 2009).	44
Figura 33 – Proposta de Arquitetura do Sindus OPP (Adaptada SCHUCK, 2009).	46
Figura 34 – Arquitetura do Sistema PIMS (TORRES et al., 2003).....	47
Figura 35 – Tela para análise gráfica e indicadores de desempenho do Sindus OPP.	48
Figura 36 – Diagrama da malha de controle de nível do tanque de água fresca (LIC038). ..	53
Figura 37 – Tela para análise gráfica e indicadores de desempenho do Sindus OPP durante verificação da malha de controle de nível do tanque de água fresca (LIC038).....	54

Figura 38 – Gráfico de tendência do Sindus OPP com SP, PV e MV da malha de controle de nível do tanque de água fresca (LIC038).....	55
Figura 39 – Gráfico de pizza do Sindus OPP com distribuição percentual dos problemas relacionados ao controle, processo e válvula da malha de controle de nível do tanque de água fresca (LIC038).....	55
Figura 40 – Comparação do antes e depois da malha de controle de nível do tanque de água fresca (LIC038) por meio do Sindus OPP.....	57
Figura 41 – Diagrama da malha de controle de nível do tanque de massa refinada (LIC043).	60
Figura 42 – Tela para análise gráfica e indicadores de desempenho do Sindus OPP durante verificação da malha de controle de nível do tanque de massa refinada (LIC043) em <i>Tracking Mode</i>	62
Figura 43 – Gráfico de tendência do Sindus OPP com SP, PV e MV da malha de controle de nível do tanque de massa refinada (LIC043) em <i>Tracking Mode</i>	62
Figura 44 – Gráfico de pizza do Sindus OPP com distribuição percentual dos problemas relacionados ao controle, processo e válvula da malha de controle de nível do tanque de massa refinada (LIC043).	63
Figura 45 – Tela de operação do SDCD referente ao controle de nível do tanque de massa refinada (LIC043).	64
Figura 46 – Gráfico de tendência do SP e PV da malha de controle de nível do tanque de massa refinada (LIC043) em <i>Tracking Mode</i> , desenvolvido no Excel com aquisição dos dados por meio do Sistema PIMS.	66
Figura 47 – Nova estratégia do controle de nível do tanque de massa refinada (LIC043). .	67
Figura 48 – Receita para controle do nível do tanque de massa refinada (LIC043).	67

Figura 49 – Comparação da malha de controle de nível do tanque de massa refinada (LIC043) em <i>Tracking Mode</i> (Antes) e automático/cascata (Depois), por meio do Sindus OPP.....	68
Figura 50 – Comparação do SP e PV da malha de controle de nível do tanque de massa refinada (LIC043) operando antes em <i>Tracking Mode</i> (a) e depois em automático/cascata (b), por meio dos gráficos de tendência do Excel com aquisição dos dados pelo Sistema PIMS.....	69
Figura 51 – Diagrama da malha de controle de nível do tanque de mistura (LIC052).	72
Figura 52 – Tela para análise gráfica e indicadores de desempenho do Sindus OPP durante verificação da malha de controle de nível do tanque de mistura (LIC052) em <i>Tracking Mode</i>	74
Figura 53 – Gráfico de tendência do Sindus OPP com SP, PV e MV da malha de controle de nível do tanque de mistura (LIC052) em <i>Tracking Mode</i>	74
Figura 54 – Gráfico de pizza do Sindus OPP com distribuição percentual dos problemas relacionados ao controle, processo e válvula da malha de controle de nível do tanque de mistura (LIC052).	75
Figura 55 – Gráfico de tendência do SP e PV da malha de controle de nível do tanque de mistura (LIC052) em <i>Tracking Mode</i> , desenvolvido no Excel com aquisição dos dados por meio do Sistema PIMS.	77
Figura 56 – Nova estratégia do controle de nível do tanque de mistura (LIC052).	77
Figura 57 – Receita para controle do nível do tanque de mistura (LIC052).	77
Figura 58 – Comparação da malha de controle de nível do tanque de mistura (LIC052) em <i>Tracking Mode</i> (Antes) e automático/cascata (Depois), por meio do Sindus OPP.....	78

Figura 59 – Comparação do SP e PV da malha de controle de nível do tanque de mistura (LIC052) operando antes em <i>Tracking Mode</i> (a) e depois em automático/cascata (b), por meio dos gráficos de tendência do Excel com aquisição dos dados pelo Sistema PIMS.....	79
Figura 60 – Exemplo da Tela de Controle de KPIs do Sindus OPP.....	83
Figura 61 – Exemplo de Monitoramento das Notas Técnicas de Malhas de Controle por meio da Tela de Controle de KPIs do Sindus OPP.....	83
Figura 62: Fluxograma da Preparação de Massa – Máquina de Papel	96
Figura 63 – Tela de Operação dos Refinadores da Preparação de Massa.	98
Figura 64 – Tela de Controle dos Refinadores da Preparação de Massa.	98
Figura 65 – Redução da potência específica (KW/t) do refinador após implementação da nova estratégia de controle.	99
Figura 66 – Estratégia de controle de carga mineral.	101
Figura 67 – Gráfico <i>Blox Plot</i> representando a Carga Mineral (%) no Papel Revestido 51 g/m ² com Base 42 g/m ² antes e depois da implantação da nova estratégia de controle.	102
Figura 68 – Gráfico <i>Blox Plot</i> representando a Carga Mineral (%) no Papel Revestido 90 g/m ² com Base 63 g/m ² antes e depois da implantação da nova estratégia de controle.	102
Figura 69 – Algoritmo de controle implementado no SDCD para Controle do Nível do Tanque de Massa Refinada (LIC043).....	103
Figura 70 – Algoritmo de controle implementado no SDCD para Controle do Nível do Tanque de Mistura (LIC052).....	104
Figura 71 – Algoritmo de controle implementado no SDCD para Controle dos Refinadores da Preparação de Massa.....	105
Figura 72 – Algoritmo de controle implementado no SDCD para Controle de Carga Mineral.	106

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Medição de desempenho das malhas de controle por meio das Notas Técnicas..	52
Tabela 2: Análise de desempenho das malhas de controle por meio dos KPIs Técnicos. ...	52
Tabela 3: Comparação dos KPIs Técnicos antes e depois da implementação das melhorias na malha de controle de nível do tanque de água fresca LIC038.	58
Tabela 4: Comparação das Notas Técnicas antes e depois da implementação das melhorias na malha de controle de nível do tanque de água fresca LIC038.	59
Tabela 5: Comparação dos valores absolutos dos indicadores de desempenho da malha de controle de nível do tanque de água fresca LIC038 com os valores padrões e limites utilizados no <i>software</i> Sindus OPP.....	59
Tabela 6: Comparação dos KPIs Técnicos antes e depois da implementação das melhorias na malha de controle de nível do tanque de massa refinada LIC043.	70
Tabela 7: Comparação das Notas Técnicas antes e depois da implementação das melhorias na malha de controle de nível do tanque de massa refinada LIC043.	71
Tabela 8: Comparação dos valores absolutos dos indicadores de desempenho da malha de controle de nível do tanque de massa refinada LIC043 com os valores padrões e limites utilizados no <i>software</i> Sindus OPP.....	71
Tabela 9: Comparação dos KPIs Técnicos antes e depois da implementação das melhorias na malha de controle de nível do tanque de mistura LIC052.	80
Tabela 10: Comparação das Notas Técnicas antes e depois da implementação das melhorias na malha de controle de nível do tanque de mistura LIC052.	81

Tabela 11: Comparação dos valores absolutos dos indicadores de desempenho da malha de controle de nível do tanque de mistura LIC052 com os valores padrões e limites utilizados no <i>software</i> Sindus OPP.	81
Tabela 12: Comparação de desempenho das malhas de controle por meio das Notas Técnicas.	82
Tabela 13: Valores <i>benchmark</i> dos KPIs das malhas de controle (LIC038, 043 e 052).	83

LISTA DE ABREVIATURAS (Português)

CLP	Controlador Lógico Programável
CPK	Capabilidade do Processo
CVM	Controlador de Variância Mínima
DMAIC	Definir, Medir, Analisar, Implementar e Controlar
FIC	Controlador Indicador de Vazão
IAE	Integral do Erro Absoluto
LIC	Controlador Indicador de Nível
MV	Variável Manipulada
PV	Variável do Processo
SDCD	Sistema Digital de Controle Distribuído
VM	Variância Mínima

LISTA DE ABREVIATURAS (Inglês)

CLM	<i>Control Loop Management</i>
CLPA	<i>Control Loop Performance Assessment</i>
CLPM	<i>Control Loop Performance Monitoring</i>
CPA	<i>Control Performance Assessment</i>
CPM	<i>Control Performance Monitoring</i>
KPIs	<i>Key Performance Indicators</i>
LA	<i>Loop Auditing</i>
OPC	<i>OLE for Process Control</i>
P&ID	<i>Piping and Instrumentation Diagram</i>
PIMS	<i>Plant Information Management System</i>
SP	<i>Setpoint</i>

1 INTRODUÇÃO

As indústrias químicas possuem diversos processos que devem estar sempre sob controle para garantir a segurança necessária na planta, atender as legislações referentes ao meio ambiente e obter a qualidade especificada para o produto final. Além destes pré-requisitos, as indústrias possuem metas anuais para redução de custos e normalmente priorizam a redução de custos fixos porque tem um retorno imediato, porém faz-se necessário trabalhar na redução dos custos variáveis que estão diretamente ligados ao processo. Um dos caminhos para reduzir os custos variáveis é por meio da diminuição da variabilidade no processo de produção e, para obter esta redução, deve-se fazer uma análise geral de todas as variáveis do processo, para identificar as possíveis causas de custos desnecessários. A partir desta análise é possível adotar métodos de cálculo de variabilidade e, sendo constatados altos índices são realizadas auditorias nas malhas de controle para determinar as suas causas. De uma maneira geral, pode-se dizer que em processos industriais a alta variabilidade das variáveis de processo está diretamente ligada ao mau funcionamento das malhas de controle.

As malhas de controle, com o passar do tempo, apresentam uma deterioração de seu desempenho devido a alterações naturais e contínuas na dinâmica dos processos. Com isso, faz-se necessário identificar quais malhas não estão desempenhando seu papel adequadamente e realizar as manutenções necessárias (KEMPF, 2003).

O excesso de variabilidade nos processos industriais deve-se a vários fatores como a sintonia inadequada das malhas, válvulas de controle com perda de movimento devido aos desgastes mecânicos (*backlash*) e agarramento causado pela força de atrito de deslizamento (Stiction: S_Tatic f_rICTION), excesso de tempo morto, transmissores ineficientes, limitações de projeto, estratégias de controle inadequadas, variação das matérias primas, novos pontos de operação entre outros (MAKAROVSKY e ARBEX, 2004).

Nos últimos anos, as indústrias têm demandado recursos no monitoramento do desempenho em tempo real dos sistemas de controle, tanto de variáveis discretas quanto de analógicas, sendo que nestas últimas é aplicada a avaliação de desempenho (FONSECA et al., 2004). Devido estas demandas, vários softwares foram desenvolvidos para avaliar o

desempenho dos sistemas de controle e com isso, várias ferramentas foram disponibilizadas para gestão *on-line* das malhas de controle.

Segundo Passos (2009), as ferramentas de monitoramento em tempo real tem a finalidade de calcular uma série de índices para qualificação de desempenho, podendo gerar alarmes e notificações que auxiliam no diagnóstico de falhas. Neste contexto, as ferramentas de gestão *on-line* de malhas de controle são imprescindíveis para obter a estabilidade do processo.

Este trabalho visou realizar um estudo sobre Gestão de Malhas de Controle (CLM, do inglês *Control Loop Management*) em ambiente industrial por meio de um procedimento prático utilizando a metodologia DMAIC (Definir, Medir, Analisar, Implementar e Controlar) e também os principais índices de desempenho utilizados pelo mercado. Sabe-se que a base do controle automático de processos são as malhas de controle e para garantir que o produto final tenha a qualidade esperada, as malhas de controle devem estar sob controle, ou seja, mantendo as variáveis de controle em torno dos valores desejados.

1.1 Hipótese

A hipótese defendida neste trabalho é que a gestão de malhas de controle nas indústrias por meio da análise de um conjunto de indicadores de desempenho (% Auto, Erro Médio, Variabilidade, IAE, CPK, Cruzamento de SP, Percurso da Válvula, Reversão e Saturação da Válvula) disponíveis em *software* para gestão *on-line* de malhas de controle, é mais eficiente do que a utilização de um indicador de desempenho individual, comumente utilizado em diversos trabalhos.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho de pesquisa foi utilizar a gestão *on-line* de malhas de controle baseada em indicadores de desempenho, com foco em melhoria contínua do processo de fabricação de papel.

1.2.2 Objetivos Específicos

Considerando o objetivo geral do trabalho e as ferramentas a serem utilizadas, foram traçados os seguintes objetivos específicos:

- ✓ Avaliar a potencialidade da ferramenta de gestão de malhas de controle, presente na planta, permitindo a escolha dos indicadores de desempenho adequados à análise *on-line* das malhas de controle;
- ✓ Implementar no sistema de controle da máquina de papel as ferramentas de gestão de malhas com os respectivos indicadores de desempenho;
- ✓ Avaliar o comportamento das malhas de controle em áreas críticas do processo de fabricação de papel, priorizando as malhas com pior desempenho.

1.3 Motivação do trabalho

O que a indústria de papel precisa fazer para garantir a competitividade do papel fabricado no Brasil? Sabe-se que é necessário produzir o melhor papel, com o menor custo, ou seja, aumentando a produtividade e qualidade de seus produtos, reduzindo o consumo de insumos e custos desnecessários. Atualmente, o processo de fabricação de papel utiliza sistemas automáticos de controle que se não estiverem apropriadamente configurados, podem ser os principais causadores de variabilidade no processo.

Para garantir a melhor qualidade do produto final, reduzir gastos de produção e paradas, aumentar o lucro e competitividade da planta, o desempenho das malhas de controle é fundamental (SCHUCK, 2009). Sabe-se também que as malhas de controle são ativos industriais de alto custo e devem ser otimizadas para manter a eficiência desejada (SILVA et al., 2006), sendo assim, a Gestão *On-line* de Malhas de Controle possibilita a otimização necessária no processo.

Neste aspecto, Campos et al., (2009), desenvolveram um trabalho de avaliação *on-line* de malhas de controle numa indústria petroquímica e como ferramenta foi utilizado um software especialista em gestão *on-line* de malhas. O trabalho foi realizado numa planta de processamento de gás e os resultados obtidos mostraram um aumento de aproximadamente 4,1% na produção de LPG (Gás Liquefeito de Petróleo) e um aumento no lucro de US\$ 1.300.000,00/ano. Outro trabalho nesta área foi realizado por Longhi et al., (2009) numa unidade de geração de hidrogênio dentro de uma refinaria de petróleo. Os resultados obtidos com a redução no consumo de insumos, paradas imprevistas e estabilidade da planta permitiu um ganho de US\$ 85.000,00/mês.

Tendo em vista os resultados das aplicações de gestão de malhas de controle nas indústrias químicas acima descritos, têm-se as justificativas necessárias para continuar pesquisando e aprimorando as ferramentas para gestão de malhas de controle baseadas em indicadores de desempenho na indústria de papel devido à necessidade de aumentar a produtividade e qualidade, atrelado a redução de variabilidade das malhas de controle e consumo de insumos com foco na estabilidade da planta.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Com o advento do controle automático em processos químicos, o desempenho dos controladores é de fundamental importância e com isso, surgiu a necessidade de avaliar o comportamento das malhas de controle. As primeiras técnicas que foram utilizadas eram baseadas em análises visuais e posteriormente, em análises comparativas das respostas dos controladores após um distúrbio (degrau ou pulso) na entrada, ou seja, analisando o tempo de subida, *overshoot* e tempo de assentamento da variável de processo (PV) em comparação ao valor desejado (SP). Estas técnicas não eram adequadas para avaliação de desempenho das malhas de controle numa planta industrial, pois, além do número de controladores a serem avaliados era necessário realizar um distúrbio no processo, não permitindo assim um monitoramento automático do processo como um todo. Desde então, vários estudos foram realizados para desenvolver técnicas para avaliação automática das malhas de controle.

A Gestão de Malhas de Controle ou Avaliação de Desempenho das Malhas de Controle (CLPA, do inglês *Control Loop Performance Assessment*) é uma área relativamente nova, tendo o início dos principais estudos realizado por Harris (1989), que por meio de uma abordagem estocástica utilizou o Controlador de Variância Mínima (CVM) para avaliar desempenho de malhas de controle. Harris e Desborough (1992) e (1993) definiram o uso de um índice de desempenho baseado na razão entre a variância do erro (entre a variável de processo e o valor desejado: PV - SP) e a variância do Controlador de Variância Mínima (CVM), conforme a **equação 2.1**. O diferencial desta metodologia comparada às primeiras técnicas de análise de malhas de controle é que não necessita de intervenção no processo, ou seja, bastam apenas dados rotineiros do processo tanto em malha fechada como malha aberta e também o conhecimento do tempo morto.

$$\text{Índice}_{\text{Harris}} = \frac{\sigma_Y^2}{\sigma_{\text{CVM}}^2} \quad (2.1)$$

Onde:

σ_Y^2 = variância do processo.

σ_{CVM}^2 = variância do controlador de variância mínima.

Torres e Hori (2005) descreveram os principais efeitos que influenciam na obtenção de um correto Índice de Harris, bem como uma análise prática dos resultados. Em uma malha de controle, a sintonia lenta do controlador irá reduzir o índice e uma sintonia muito agressiva irá aumentar o Índice de Harris. Outro ponto importante que pode influenciar o Índice de Harris é a quantidade de ruído existente na variável de processo e com isso, faz-se necessário utilizar o Índice de Harris Normalizado, conforme a **equação 2.2**:

$$IHN = 1 - \frac{1}{\text{Índice_Harris}} \quad (2.2)$$

Onde:

IHN = Índice de Harris normalizado.

Segundo Torres e Hori (2005), o Índice de Harris Normalizado varia entre 0 e 1, onde valores menores indicam o melhor desempenho da malha e valores maiores indicam problemas de desempenho. Na teoria o que se espera são valores tendendo a zero, porém, na prática os menores valores não indicam o melhor desempenho da malha e somente os altos valores do Índice de Harris podem ser conclusivos, onde os valores entre 0,8 e 0,9 indicam a necessidade de verificar a sintonia da malha de controle e valores abaixo de 0,5 mostram a necessidade de uma análise detalhada e criteriosa da malha em questão (TORRES e HORI, 2005).

Kempf (2003) foi um dos precursores na introdução da avaliação de malhas de controle no meio acadêmico brasileiro, onde seu trabalho de pesquisa foi baseado no Controlador de Variância Mínima (CVM). Foram apresentadas as vantagens e desvantagens em utilizar o CVM como referência de desempenho, ou seja, a principal vantagem é poder estimar a variância mínima com dados normais do processo. Esta técnica é eficaz quando existe um padrão de distúrbios no processo, porém se ocorrer modificação no padrão de distúrbios bem como alteração na dinâmica do processo, haverá uma modificação do CVM e irá dificultar a caracterização da redução de desempenho de uma determinada malha de controle. Estas variações dos distúrbios estão relacionadas às

mudanças de *setpoint* (SP) ou distúrbios externos, sendo estas variações rotineiras numa planta industrial.

Algumas considerações importantes sobre a utilização do Controlador de Variância Mínima (CVM) como *benchmark* foram descritas por Neitzel et al., (2003) num dos primeiros trabalhos de avaliação de malhas de controle realizado na indústria de papel brasileira, onde os principais pontos positivos em utilizar o Índice de Harris para avaliação de desempenho são:

- ✓ Facilidade de implementar para um conjunto relativamente extenso de malhas de controle;
- ✓ Avaliação não invasiva;
- ✓ Fácil interpretação;
- ✓ Não exige conhecimento específico da dinâmica do processo, sendo necessário saber apenas o tempo morto.

Estas características descritas acima são pré-requisitos para uma ferramenta de avaliação de desempenho numa planta industrial, contudo existem alguns pontos negativos que devem ser considerados:

- ✓ O tempo morto normalmente é um parâmetro desconhecido, é considerado o único fator limitante do desempenho e varia com a dinâmica do processo;
- ✓ A comparação é realizada com um controle perfeito, sendo assim um índice não realista em algumas situações.

Além das técnicas baseadas na Variância Mínima (VM), outras técnicas também foram propostas para avaliação de desempenho de malhas de controle e dos diversos trabalhos desenvolvidos, vários autores publicaram trabalhos sobre as questões teóricas e práticas, aplicações industriais e *softwares* de monitoramento. Entre os principais trabalhos estão os artigos de Thornhill e Hägglund (1997), Qin (1998), Thornhill et al., (1999), Patwardhan e Shah (2002), Thornhill et al., (2003), Hoo et al., (2003), Horton et al., (2003), Li et al., (2003), Hugo (2006) e Thornhill e Horch (2007).

Pode-se citar alguns exemplos como a metodologia de detecção de oscilação em malhas de controle proposta por Hägglund (1995), onde a causa raiz destas oscilações normalmente está relacionada ao atrito encontrado no conjunto mecânico das válvulas de controle. Esta metodologia utiliza o cálculo da Integral do Erro Absoluto (IAE) entre sucessivos cruzamentos de zero do erro de controle. Dando continuidade aos trabalhos de pesquisa, Hägglund (2002), desenvolveu um compensador de atrito para válvulas de controle pneumáticas, ou seja, um compensador baseado na adição de pulsos no sinal de controle que deve ser implementado no controlador com objetivo de reduzir o erro de controle durante o movimento da haste da válvula pneumática. Hägglund (2007) desenvolveu também um método para detecção e estimativa de folga em válvulas de controle por meio de dados de operação normal da planta.

Horch (1999) e Stenman et al., (2003) desenvolveram trabalhos para detecção de oscilações em malhas de controle provenientes de *Stiction* (*Static friCTION*), ou seja, agarramento causado pela força de atrito de deslizamento em atuadores de válvulas de controle na indústria de papel e celulose.

Lynch e Dumont (1996) iniciaram a utilização de ferramentas para o Monitoramento do Desempenho de Malhas de Controle (CLPM, do inglês *Control Loop Performance Monitoring*), porém, como resultado houve benefícios e também limitações das ferramentas utilizadas.

Soraihi (2006) desenvolveu um trabalho sobre CLPM, destacando os principais índices utilizados para monitoramento de desempenho das malhas de controle, bem como a aplicação destes índices para monitoramento de algumas malhas de controle de nível, pressão, vazão e temperatura numa planta industrial de processamento de gás. Entre os índices utilizados pode-se destacar a utilização do Índice de Amplitude – AMP (*Amplitude Index*), Integral do Erro Absoluto ponderado pelo Tempo – ITAE (*Integral Time of Absolute Error*) e Desvio Padrão – SD (*Standard Deviation*). Segundo Soraihi (2006) a combinação dos resultados dos diferentes índices de desempenho permite uma melhor avaliação do desempenho de malhas de controle.

Jelali (2006) realizou um trabalho de pesquisa sobre gestão de malhas de controle (CLM), dando uma visão geral sobre as metodologias e procedimentos, os métodos

utilizados como *benchmarking*, bem como as principais tecnologias e aplicações de gestão de malhas de controle nas indústrias. Segundo Jelali (2006) um dos métodos *benchmarking* mais utilizado nas indústrias de papel e celulose, químicas e petroquímicas é o índice de Variância Mínima – MV (*Minimum Variance*), porém, dos produtos comerciais (*softwares*) para monitoramento do desempenho de malhas de controle, nenhum deles inclui o cálculo automático do Tempo Morto da Malha de Controle (*Time Delay*).

Farenzena (2008) desenvolveu novas métricas para gerenciamento de malhas porque as metodologias disponíveis na literatura e ferramentas comerciais que estão vinculadas ao controlador de variância mínima (CVM), têm muitas limitações e inconvenientes, fazendo com que a análise se torne confusa e o diagnóstico difícil. As limitações dos índices estocásticos baseados na variância mínima devem-se principalmente as alterações dos índices devido às mudanças de SP das Malhas de Controle e com isso, Farenzena (2008) visou elucidar a vantagem dos índices determinísticos sobre os estocásticos. As métricas propostas estão baseadas num modelo de inferência para desempenho e robustez da malha chamado PRIM (*Performance and Robustness Inference Model*), bem como um modelo de inferência para atrito estático das válvulas de controle chamado SIM (*Stiction Inference Model*) que visa quantificar a banda de agarramento em válvulas de controle e requer apenas dados de operação normal do processo. Ambas foram desenvolvidas por meio de redes neurais e no PRIM foi utilizado o modelo de inferência MFNN (*Multilayer Feedforward Neural Network*), porém, estas metodologias propostas necessitam de uma aplicação mais intensiva na indústria para consolidar os resultados obtidos.

Desde então várias pesquisas permitiram desenvolver uma teoria baseada em vários indicadores que são utilizados para avaliar a “saúde” das malhas de controle. Veronesi e Visioli (2010) e Yu et al., (2011) concentraram seus trabalhos de pesquisa em índices de desempenho baseados na Integral do Erro Absoluto (IAE).

Salahshoor e Arjomandi (2010) realizaram um trabalho sobre gestão de malhas de controle (CLM) e apresentaram uma metodologia baseada em critérios práticos que podem ser facilmente implementados em plantas industriais. Basicamente os índices de desempenho utilizados são: Integral do Erro Absoluto (IAE), Integral do Erro Quadrático

(ISE), Cruzamento de *Setpoint* (SP), Percurso da Válvula de Controle, Erro Médio, Desvio Padrão, Tempo do Controlador em Modo Automático, entre outros.

Devido às desvantagens das técnicas utilizadas para Gestão de Malhas de Controle baseadas na Variância Mínima (VM), existe uma tendência em utilizar técnicas baseadas em outros índices de desempenho, como o trabalho apresentado por Salahshoor e Arjomandi (2010) num ambiente de simulação por meio do HYSYS e MATLAB. Na prática a avaliação de desempenho de malhas de controle poderá depender da combinação dos resultados de vários índices, bem como do conhecimento específico de processo e controle.

Este trabalho apresentou os índices de desempenho para gestão de malhas de controle por meio de estudos de caso realizados numa fábrica de papel, onde os resultados evidenciaram a necessidade da utilização de um conjunto de índices de desempenho bem como a importância do conhecimento de processo e controle para obter a estabilidade necessária da planta. Os índices de desempenho obtidos após a utilização da metodologia proposta para gestão *on-line* de malhas de controle tornaram-se *benchmark* para as malhas de controle em questão devido aos excelentes resultados de redução de variabilidade e estabilidade da planta.

2.1 Fundamentação Teórica

2.1.1 Gestão de Malhas

A base do controle automático de processos são as malhas de controle e para garantir que o produto final tenha a qualidade esperada, as malhas devem estar em perfeito funcionamento, ou seja, mantendo as variáveis de controle em torno dos valores desejados. Para que isto ocorra, é necessário realizar gerenciamento de ativos para manter o desempenho operacional da planta, ou em outras palavras, fazer gestão das malhas de controle (JELALI, 2006).

Devido ao grande número de controladores em uma planta industrial, avaliar o desempenho de todos os controladores manualmente em tempo real é impossível. Isto explica o interesse crescente no meio acadêmico e na indústria, em metodologias automáticas para avaliar desempenho das malhas de controle (FARENZENA, 2008).

Segundo Fonseca et al., (2004), a monitoração de desempenho em tempo real (RtPM, do inglês *Real Time Performance Management*) é utilizada na avaliação de desempenho de malhas de controle como uma forma de manutenção pró-ativa, ou seja, monitorando o desempenho dos elementos de medição (transmissores) e atuação (válvulas e posicionadores) de uma malha de controle. Esta ferramenta utiliza diversos critérios e índices de desempenho que permitem avaliar a eficiência dos controladores e também das malhas de controle, como por exemplo: IAE, ITE, ISE, ITSE, variabilidade, tempo de acomodação, esforço da válvula, variações da dinâmica do processo, etc. Por meio destes índices de desempenho é possível avaliar o comportamento das malhas de controle na indústria, pois, uma malha de controle pode apresentar uma degradação de desempenho a cada 6 meses (FONSECA et al., 2004). Esta redução no desempenho está relacionada a problemas típicos em plantas industriais, tais como:

- ✓ Variações na dinâmica do processo;
- ✓ Estratégias de controle inadequadas;
- ✓ Erro no dimensionamento dos elementos de campo;
- ✓ Problemas nas instalações de instrumentos e atuadores;

- ✓ Configurações inadequadas e erros de calibração dos elementos de campo;
- ✓ Desgastes nos atuadores;
- ✓ Sintonia inadequada;
- ✓ Restrições e problemas operacionais.

Assim como os estudos realizados por Paulonis e Cox (2003), Makarovsky e Arbex (2004) apresentaram resultados de auditorias de variabilidades realizadas em malhas de controle na indústria, onde:

- ✓ 20% das malhas de controle tem desempenho adequado;
- ✓ 30% oscilam e aumentam a variabilidade em função da sintonia;
- ✓ 30% oscilam e aumentam a variabilidade devido aos elementos de campo;
- ✓ 15% apresentação estratégias de controle inadequadas;
- ✓ 5% necessitam de novo projeto.

Sabendo-se dos problemas típicos e das causas prováveis de variabilidades em processos industriais, é possível trabalhar na diminuição destas variabilidades e consequentemente na redução dos custos variáveis. Uma malha de controle com desempenho ruim implica em perda de energia, qualidade e produção, já uma malha de controle com bom desempenho permite aumentar a qualidade e produtividade no processo (FONSECA et al., 2004). Na figura 1 é apresentada uma comparação entre diferentes desempenhos de uma malha de controle, onde o ganho de produção é obtido por meio da redução de variabilidade e redução do SP (valor desejado) sem ultrapassar o limite de qualidade, ou seja, o limite de especificação.

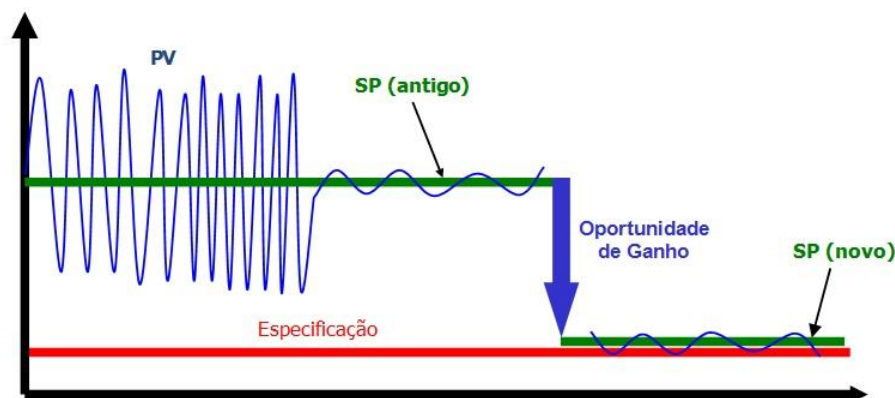


Figura 1 – Oportunidade de ganho após redução de variabilidade.

Silva et al., (2006) desenvolveram um trabalho de avaliação de desempenho em malhas de controle de temperatura e pressão em processos industriais, tendo também como premissa a redução de variabilidade centrada na operação em ponto ótimo da malha de controle, ou seja, garantindo maior estabilidade operacional e redução de consumo energético.

As ferramentas para gestão *on-line* de malhas de controle normalmente são compostas por uma interface OPC (*OLE for Process Control*), que tem por objetivo coletar informações diretamente do SDCD (Sistema Digital de Controle Distribuído) ou CLP (Controlador Lógico Programável) e um software que fornece índices quantitativos de forma automática, utilizando os dados normais de operação da planta industrial, ou seja, sem gerar distúrbios no processo (LONGHI et al., 2008).

Atualmente a Gestão de Malhas de Controle ou CLM (*Control Loop Management*) tem sido uma ferramenta importante para verificação do funcionamento das malhas de controle e otimização do processo. É possível encontrar tanto na indústria como na literatura, outros sinônimos para CLM, como: Avaliação de Desempenho do Controle (CPA, do inglês *Control Performance Assessment*), Monitoramento do Desempenho do Controle (CPM, do inglês *Control Performance Monitoring*), Auditoria de Malhas (LA, do inglês *Loop Auditing*) entre outros, entretanto, todos tem o mesmo princípio que é avaliar o desempenho dos controles no processo (SALAHSHOOR e ARJOMANDI, 2010).

2.1.2 Metodologia para Gestão de Malhas

Tradicionalmente a metodologia utilizada na indústria era baseada na observação do operador, ou seja, o setor de operação chamava o setor de manutenção (instrumentação ou automação) quando uma malha de controle estava com variação excessiva ou quando a mesma não estava “respondendo” e com isso os técnicos de manutenção avaliavam os gráficos de tendência, verificavam os elementos de campo (válvulas e transmissores) e se necessário ajustavam os parâmetros dos controladores (SCHUCK, 2009). Com o advento da avaliação de desempenho das malhas de controle, uma auditoria de malhas de controle tinha início por uma verificação dos Diagramas de Tubulação e Instrumentação – P&ID (*Piping and Instrumentation Diagram*), análise do processo, verificação da forma de operação e outros pontos importantes descritos por Makarovsky e Arbex, (2004) no procedimento abaixo:

1. Análise de Processo

- 1.1. Definição das variáveis críticas;
- 1.2. Relação causa/efeito;
- 1.3. Análise das estratégias de controle.

2. Diagnóstico

- 2.1. Levantamento dos dados;
- 2.2. Cálculo de variabilidade;
- 2.3. Determinação das causas de variabilidade.

3. Especificação de Soluções

- 3.1. Correção dos problemas de instrumentação;
- 3.2. Recomendação de alterações de projeto;
- 3.3. Sintonia de malhas;
- 3.4. Alteração de estratégias de controle.

4. Estimativa de Benefícios

Em resumo, um procedimento prático para gestão de malhas de controle e otimização de processos é definido pela metodologia **DMAIC** e descrito por Schuck (2009) seguindo os seguintes passos:

1. **Definir** o processo: por meio do Sindus OPP foram definidas as malhas críticas e com baixo desempenho no processo de fabricação de papel;
2. **Medir** o desempenho do processo: o Sindus OPP disponibilizou vários indicadores de desempenho em tempo real;
3. **Analisar** o processo: por meio dos indicadores de desempenho foi possível avaliar o desempenho das malhas de controle;
4. **Implementar** as melhorias no processo: realizar sintonia das malhas de controle, desenvolver e implementar novas estratégias de controle no SDGD;
5. **Controlar** o processo: realizar gestão *on-line* das malhas de controle por meio do Sindus OPP.

2.1.3 Índices de Desempenho para Gestão de Malhas

Com a demanda crescente das indústrias em monitorar o desempenho dos processos em tempo real, os softwares para Gestão *On-line* de Malhas de Controle utilizam índices de desempenho definidos pela teoria clássica de controle bem como índices utilizados pelo mercado, possibilitando assim que os controladores tenham o melhor desempenho, ou seja, o processo poderá atingir pontos de operação mais lucrativos (FARENZENA, 2008).

Uma malha de controle é avaliada pela sua capacidade de proporcionar um mínimo desvio da PV após uma perturbação ou variação de SP, retornando ao valor desejado no menor intervalo de tempo. Este desempenho é medido por meio da PV e representado por diversos índices utilizados na teoria clássica de controle. Neste contexto, Silva (2003) utilizou como parâmetro de desempenho os seguintes índices: máximo sobre-sinal (*overshoot*), tempo de subida, tempo de estabilização (ou acomodação) e os critérios de erro, sendo estes mais utilizados e definidos pelas seguintes equações:

Integral do Erro Quadrático (ISE)

$$ISE = \int_0^{\infty} e(t)^2 dt \quad (2.3)$$

Integral do Erro Absoluto (IAE)

$$IAE = \int_0^{\infty} |e(t)| dt \quad (2.4)$$

Integral do Erro Absoluto ponderado pelo Tempo (ITAE)

$$ITAE = \int_0^{\infty} t \cdot |e(t)| dt \quad (2.5)$$

Na prática, os principais KPIs (*Key Performance Indicators*) utilizados para avaliação de desempenho de malhas de controle estão divididos em Indicadores Estatísticos e Indicadores de Desempenho.

Entre os indicadores estatísticos, os mais utilizados são: valor mínimo, valor máximo, amplitude, média e desvio padrão. Triola (2005) apresenta os princípios básicos da estatística e demonstra os indicadores estatísticos acima citados como:

- ❖ **Amplitude:** é a diferença entre o valor máximo e valor mínimo de um conjunto de dados.

$$Amplitude = (valor_máximo) - (valor_mínimo) \quad (2.6)$$

- ❖ **Média Aritmética:** é a medida de centro encontrada pela adição dos valores e divisão do total pelo número de valores. Essa medida de centro será referida simplesmente como média.

$$\bar{x} = \frac{\sum x}{n} \quad (2.7)$$

- ❖ **Desvio Padrão:** é uma medida da dispersão dos valores em torno da média em um conjunto de dados. É uma espécie de desvio médio dos valores em relação à média.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (x - \mu)^2}{N}} \quad (2.8)$$

Os indicadores de desempenho ou KPIs de Controle são medidos por meio da PV (Variável do processo), SP (*Setpoint*), MV (Variável manipulada) e modo de operação do controlador. Schuck (2009) descreve os principais indicadores de desempenho utilizados no

Sindus OPP (*Software* utilizado para Gestão *On-line* de Malhas de Controle), bem como as principais definições e considerações para análise dos mesmos, como sendo:

- ❖ **(%) Auto:** é o (%) do tempo em que o controlador esteve em operação no modo automático.

$$(\%)Auto = \frac{Ta}{Tt} \quad (2.9)$$

Onde:

Ta = tempo em que o controlador esteve em operação no modo automático.

Tt = tempo total em que o controlador esteve em operação.

Os parâmetros utilizados no Sindus OPP para o cálculo do KPI Técnico (Índice de Desempenho Normalizado) foram:

Padrão = 100%;

Limite = 85%.

- ❖ **Erro Médio:** é o (%) do erro da PV em relação ao SP. Este índice deve ser considerado se o controlador estiver em modo automático.

$$Erro_Médio = \frac{\overline{PV} - \overline{SP}}{\overline{SP}} \quad (2.10)$$

Onde:

$\overline{PV}$ = média da PV (Variável do processo).

$\overline{SP}$ = média do SP (*Setpoint*).

Os parâmetros utilizados no Sindus OPP para o cálculo do KPI Técnico (Índice de Desempenho Normalizado) foram:

Padrão = 0%;

Limite = 1%.

- ❖ **Variabilidade:** é uma medida de dispersão dos dados da PV, pois permite comparar o desempenho do controlador mesmo quando em modo de operação manual. Este índice não deve ser considerado se o controlador estiver em modo automático/cascata.

$$Variabilidade = \frac{2 * \sigma}{\overline{PV}} \quad (2.11)$$

Onde:

σ = desvio padrão da PV com o controlador em modo automático.

$\overline{PV}$ = média da PV com o controlador em modo automático.

Os parâmetros utilizados no Sindus OPP para o cálculo do KPI Técnico (Índice de Desempenho Normalizado) foram:

Padrão = 0%;

Limite = 2%.

- ❖ **IAE (%h):** a integral do erro absoluto percentual é a somatória do erro durante um intervalo de tempo (1 hora) dividido pelo SP. Este índice deve ser considerado se o controlador estiver em modo automático.

$$IAE(\%h) = \int_0^{1hora} \left| \frac{PV - SP}{SP} \right| dt \quad (2.12)$$

Os parâmetros utilizados no Sindus OPP para o cálculo do KPI Técnico (Índice de Desempenho Normalizado) foram:

Padrão = 0%;

Limite = 84%.

- ❖ **CPK (Capabilidade do processo):** é a capacidade do controlador atender as tolerâncias do processo, ou seja, os limites de especificação. Este índice pode ser considerado se o controlador estiver em modo automático ou manual.

$$CPK = \text{Mín} \left[\frac{(LSE - Média)}{3 * DesvioPadrão}, \frac{(Média - LIE)}{3 * DesvioPadrão} \right] \quad (2.13)$$

Onde:

LIE = Limite inferior de especificação.

LSE = Limite superior de especificação.

Os limites de especificação (LIE e LSE) devem ser determinados pela equipe de engenharia de processo para cada malha de controle e posteriormente inseridos no *software* Sindus OPP.

Os parâmetros utilizados no Sindus OPP para o cálculo do KPI Técnico (Índice de Desempenho Normalizado) foram:

Padrão = 5%;

Limite = 1%.

- ❖ **Cruzamento de Setpoint:** é o número de vezes que a PV cruzou o SP. Este índice deve ser considerado se o controlador estiver em modo automático e pode ser um indicativo de ruído na medição da PV.

Os parâmetros utilizados no Sindus OPP para o cálculo do KPI Técnico (Índice de Desempenho Normalizado) foram:

Padrão = 0;

Limite = 360.

- ❖ **Percurso da Válvula:** é o (%) de movimento da válvula, ou seja, o total de incrementos de movimento da válvula durante um intervalo de tempo (1 hora). O percurso da válvula é calculado através da comparação do valor absoluto atual com o valor absoluto anterior e no caso de diferença é considerado um incremento no valor total. Este índice deve ser considerado se o controlador estiver em modo automático e caso este indicador estiver alto, pode ser um indicativo de desgaste prematuro das partes mecânicas do atuador e válvula de controle.

Os parâmetros utilizados no Sindus OPP para o cálculo do KPI Técnico (Índice de Desempenho Normalizado) foram:

Padrão = 0%/h;

Limite = 42%/h.

- ❖ **Reversão da Válvula:** é o número total de reversões no movimento da válvula durante um intervalo de tempo (1 hora), ou seja, é o número total de “picos” e “vales” da MV (Variável manipulada). Este índice deve ser considerado se o controlador estiver em modo automático, onde um alto número de reversões da válvula pode ser um indicativo de desgaste prematuro do conjunto (atuador e válvula de controle).

Os parâmetros utilizados no Sindus OPP para o cálculo do KPI Técnico (Índice de Desempenho Normalizado) foram:

Padrão = 0 n°/h;

Limite = 42 n°/h.

- ❖ **Saturação da Válvula:** é o (%) do tempo que a saída do controlador operou fora dos limites. Este índice deve ser considerado se o controlador estiver em modo automático e pode ser um indicativo de subdimensionamento ou superdimensionamento da válvula de controle.

Os limites de especificação da MV (Variável manipulada) utilizados para o cálculo do indicador de saturação da válvula neste trabalho foram:

LIE = 20;

LSE = 80.

Os parâmetros utilizados no Sindus OPP para o cálculo do KPI Técnico (Índice de Desempenho Normalizado) foram:

Padrão = 0% tempo;

Limite = 50% tempo.

2.1.4 Normalização dos Índices de Desempenho

Para avaliar várias malhas de controle por meio dos índices de desempenho faz-se necessário normalizar estes índices, pois para uma malha “x” pode ser aceitável uma variabilidade de 2% e para uma malha “y” a mesma variabilidade pode ser inaceitável. Com este objetivo, Schuck (2009) desenvolveu um padrão para normalização dos índices de desempenho (KPIs) no *software* Sindus OPP onde o cálculo deste índice normalizado, chamado de KPI Técnico, é realizado conforme a equação abaixo:

$$KPI_Técnico(\%) = \frac{Índice_Absoluto - Padrão}{Limite - Padrão} \quad (2.14)$$

Onde:

Índice Absoluto = Valor calculado pelo *software*;

Padrão = O que se espera para este índice;

Limite = Limite tolerável;

KPI Técnico = Desempenho técnico do controlador.

Com objetivo de uma melhor avaliação das malhas de controle, os KPIs Técnicos possibilitam o cálculo de uma nota técnica que tem a premissa de nivelar todas as malhas de controle tecnicamente. A nota técnica é obtida por meio da equação abaixo:

$$Nota_Técnica(\%) = \frac{\sum KPIs_Técnicos(Habilitados)}{N^{\circ} _ KPIs(Habilitados)} \quad (2.15)$$

Onde:

(Habilitados) = KPIs que estão selecionados no *software* Sindus OPP.

2.2 Processo de Fabricação de Papel

2.2.1 História do Papel

Existem relatos que a origem da fabricação de papel ocorreu com os egípcios (3000 a.C.) que utilizavam o Papyrus. Para fabricar uma folha de Papyrus os egípcios usavam folhas da árvore *Cyperus Papyrus*. Outra matéria-prima utilizada antigamente para a escrita era o pergaminho, que era extraído da pele de bezerros, cabras e ovelhas. A invenção do papel utilizando fibras de plantas e água para criar uma polpa, que depois forma uma folha que é prensada para retirar água e posteriormente passa pelo processo de secagem, ocorreu na China por meio do chinês Ts'ai Lun (105 d.C.). O procedimento de Ts'ai Lun foi utilizado por muitos anos até a invenção da máquina de papel por meio de um processo contínuo, que ocorreu no início do século XVIII, por meio dos irmãos Henry e Sealy Fourdrinier (GRANT et al., 1978). No século XIX, o processo foi aperfeiçoado com a utilização de cilindros de vapor para secar a folha de papel e a invenção do processo mecânico de fazer polpa por meio da madeira. Atualmente, as máquinas de papel possuem o mesmo processo de fabricação contínuo e a polpa de celulose é a principal matéria prima para fabricação de papel (ARAÚJO, 2010).

2.2.2 Fabricação de Papel

Segundo Araújo (2010) a fabricação de papel é constituída por operações unitárias e aplicação de vários princípios físicos e químicos. Entre as operações unitárias, as principais fases da fabricação de papel são:

- ✓ Preparação de Massa;
- ✓ Formação;
- ✓ Prensagem;
- ✓ Secagem.

Dentre as principais fases descritas acima, a preparação de massa consiste em um setor que recebe a celulose em fardos e prepara a massa que será utilizada na máquina de papel em uma fábrica de papel não integrada, ou seja, fábrica de papel que não possui uma fábrica de polpa de celulose anexa para abastecer a máquina de papel (figura). As demais fases (formação, prensagem e secagem) são as principais operações unitárias existentes em uma máquina de papel (figura).

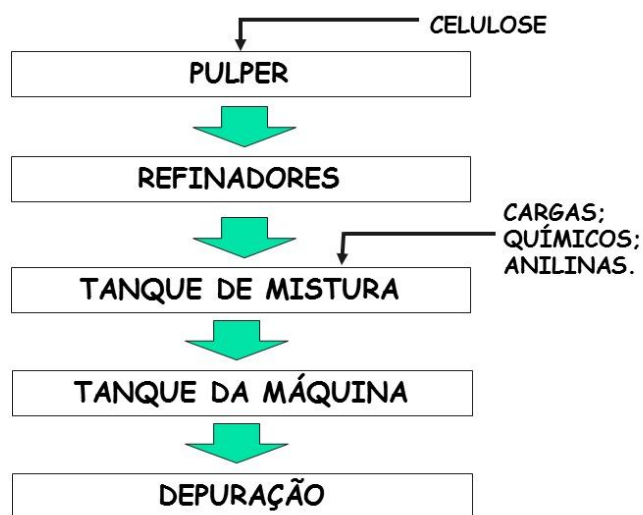


Figura 2 – Fluxograma típico de preparação de massa.

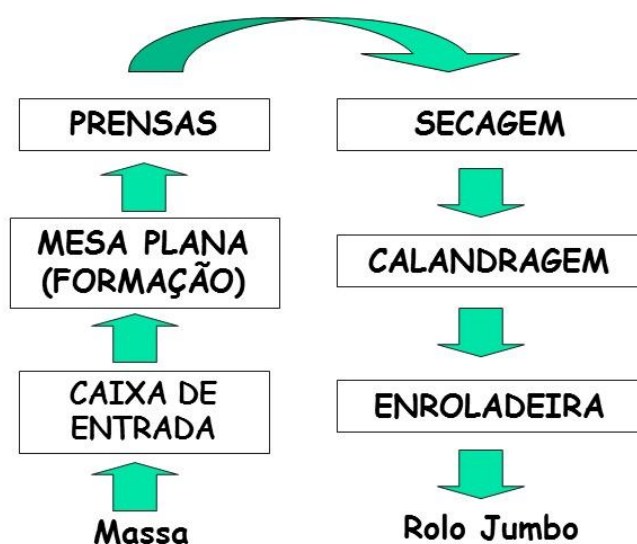


Figura 3 – Fluxograma típico de fabricação de papel.

2.2.3 Preparação de Massa

A preparação de massa tem por objetivo processar as matérias primas (celulose, cargas, químicos e anilinas), preparando assim a massa que será utilizada para produzir o papel. As principais etapas da preparação de massa são:

- ✓ Desagregação;
- ✓ Refinação;
- ✓ Depuração.

O fluxograma típico de preparação de massa ilustrado na figura 2 demonstra as principais etapas e a sequência do preparo da polpa de celulose (massa) para fabricação de papel. Estas etapas podem ser descritas como:

- ❖ **Desagregação:** a celulose é desagregada no pulper ou hidrapulper (figuras 4 e 5) para iniciar o preparo da massa.

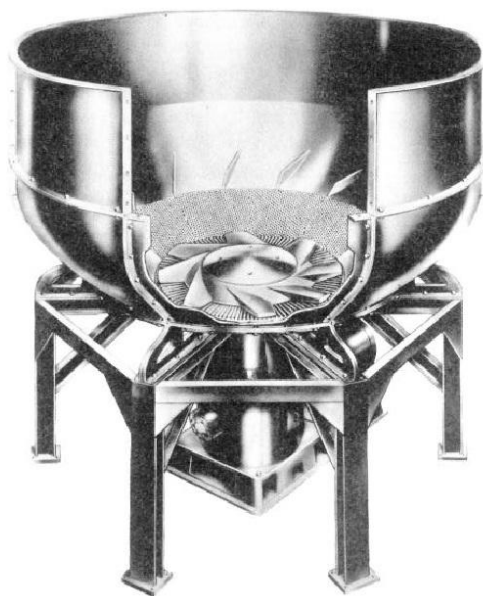


Figura 4 – Pulper ou Hidrapulper (GRANT et al., 1978).



Figura 5 – Exemplo de Pulper (ARAÚJO, 2010).

- ❖ **Refinação:** a massa passará pelo refinador que tem a função de provocar o desfibrilamento e hidratação das fibras, facilitando assim a ligação mecânica entre as fibras (figuras 6 e 7).

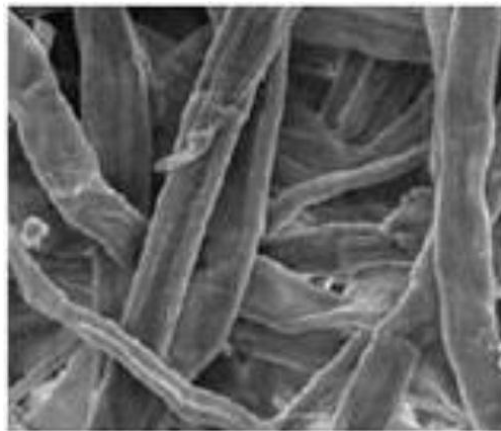


Figura 6 – Fibras de eucalipto não refinadas (ARAÚJO, 2010).

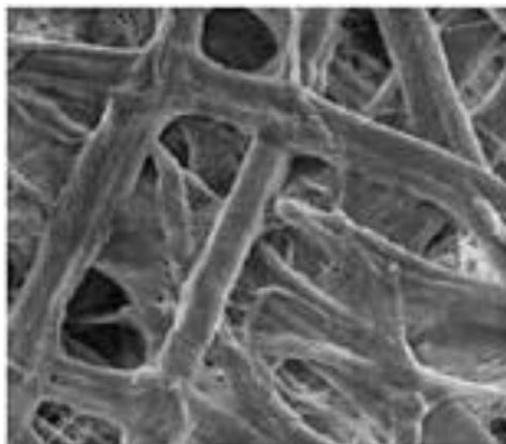


Figura 7 – Fibras de eucalipto refinadas (ARAÚJO, 2010).

Os refinadores são máquinas que maceram e/ou cortam mecanicamente as fibras antes da fabricação do papel, durante o preparo da massa de celulose. Existem 2 tipos de refinadores: refinador cônico e refinador a disco. Em 1858 Joseph Jordan patenteou o refinador cônico (figura 8) que consistia em um rotor cônico que gira contra uma carcaça (estator) e ambos com barras de metal montadas perpendicularmente a rotação, com objetivo de fazer a refinação das fibras entre as superfícies (BIERMANN, 1996).

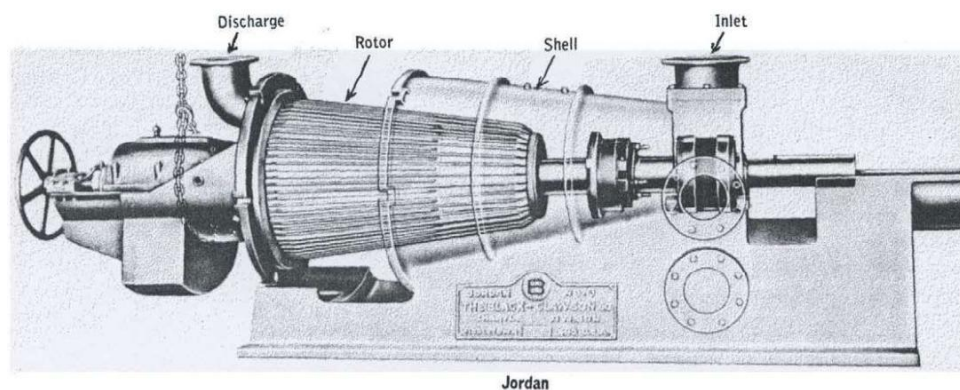


Figura 8 – Refinador cônico (BIERMANN, 1996).

O refinador a disco (figuras 9 e 10) foi utilizado na fabricação de papel em 1930 e apresentou algumas vantagens comparadas com o refinador cônico, como por exemplo: é um refinador compacto, de fácil manutenção e prático para substituição dos discos (BIERMANN, 1996).

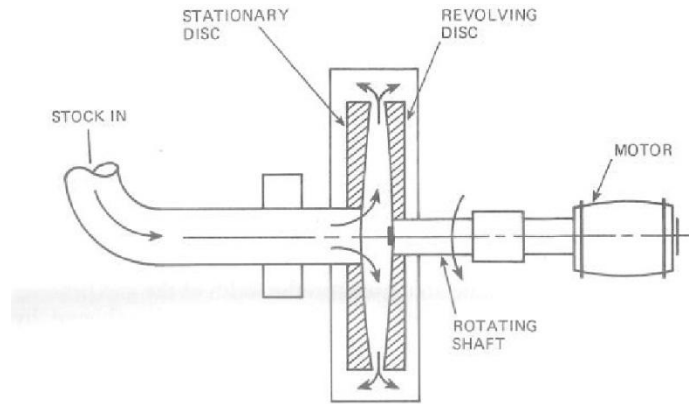


Figura 9 – Detalhes dos discos do refinador a disco (GRANT et al., 1978).



Figura 10 – Refinador a Disco utilizado no Sistema de Preparação de Massa (TAPPI, 1997).

❖ **Tanque de mistura:** tem a função de armazenar e manter a uniformidade da massa por meio de uma agitação adequada. Neste tanque também é realizada a uniformização das dosagens de aditivos, ou seja, o tanque de mistura (figuras 11 e 12) tem a função de uniformizar a dispersão das fibras e fazer também a homogeneização dos aditivos (cola, carga mineral, corantes, amidos, polímeros,...) na massa, pois, a agitação permite uma distribuição uniforme e condições de reação entre os aditivos e as fibras (ARAÚJO, 2010).

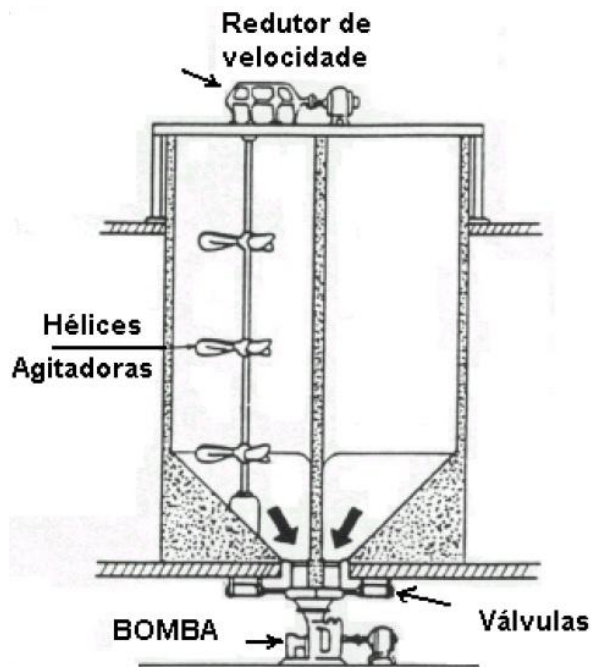


Figura 11 – Exemplo típico de tanque de mistura (ARAÚJO, 2010).

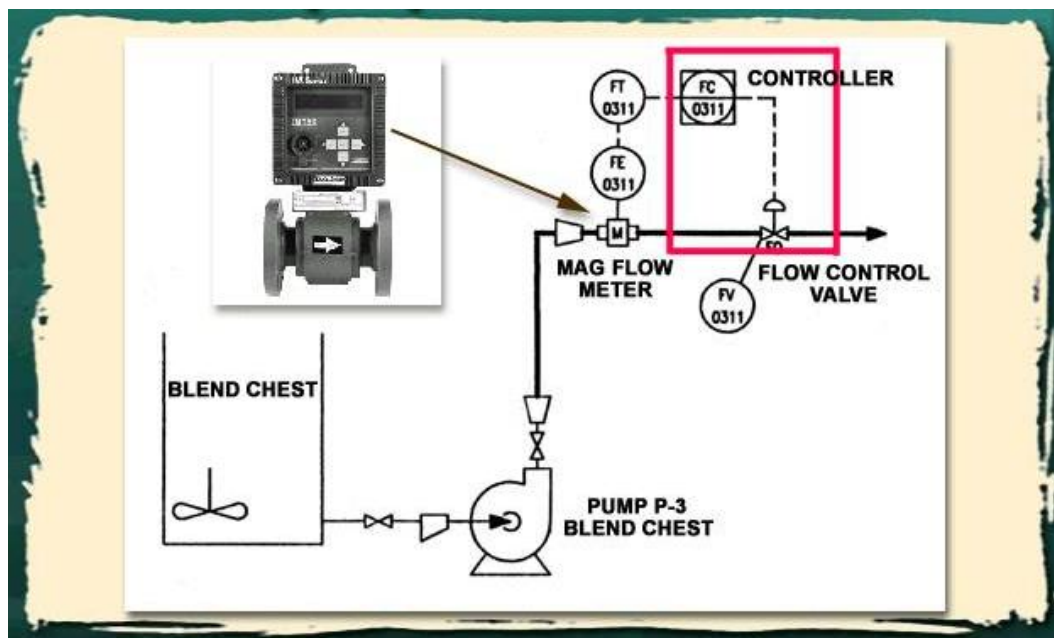


Figura 12 – Tanque de mistura com detalhe da malha de controle de fluxo de massa (TAPPI, 1997).

- ❖ **Tanque de máquina:** tem a função de armazenar a massa após a homogeneização dos aditivos que foi realizada no tanque de mistura. Para manter a uniformidade da massa, o tanque da máquina (figura 13) também possui uma agitação adequada para posteriormente por meio da bomba do tanque da máquina fazer a transferência da massa para a caixa de nível (figura 14), que tem a função de eliminar o ar contido na massa, evitar pulsações hidráulicas e manter a pressão constante sobre a válvula que controla a gramatura do papel a ser fabricado (ARAÚJO, 2010).

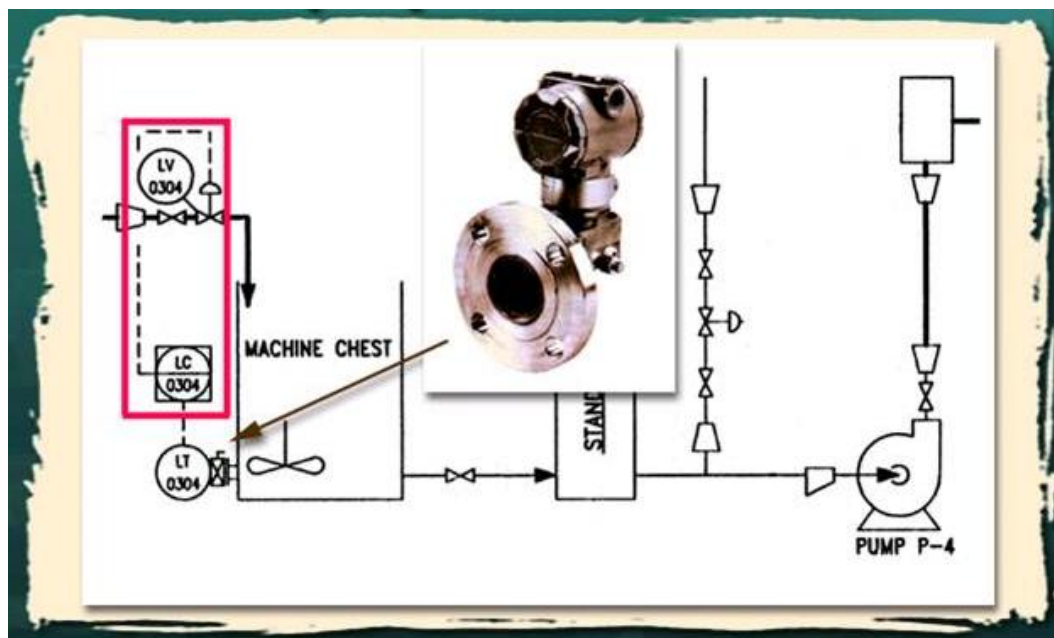


Figura 13 – Tanque da máquina com detalhe da malha de controle de nível (TAPPI, 1997).

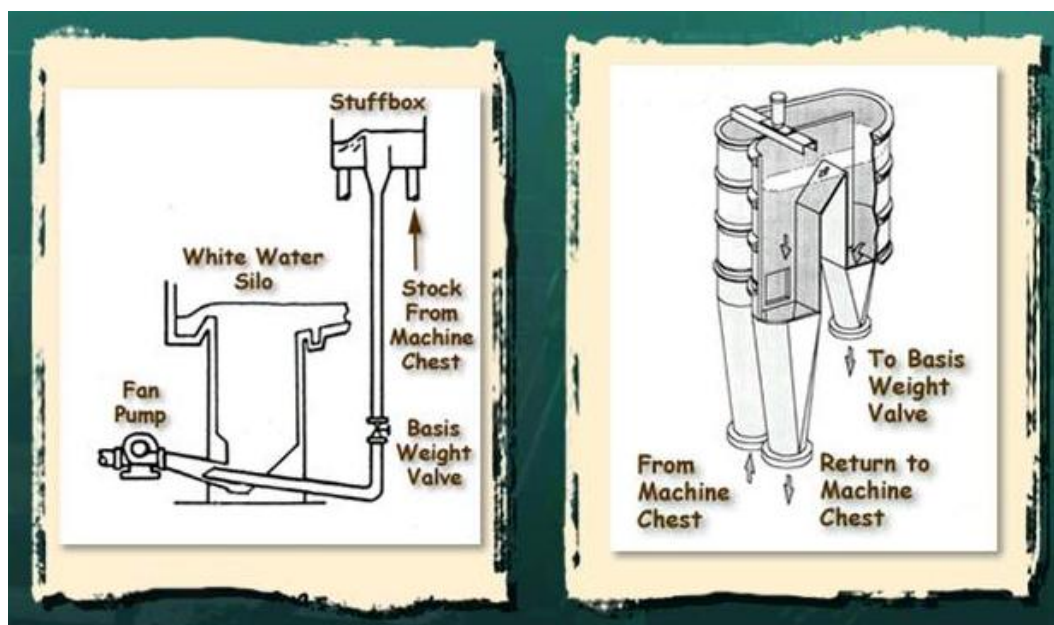


Figura 14 – Detalhes da caixa de nível (TAPPI, 1997).

Entre o tanque da máquina e a caixa de entrada da máquina de papel, existe um sistema de diluição (também chamado de *approach flow*) que tem as seguintes funções: diluir a massa, uniformizar o fluxo, retirar impurezas leves por meio da depuração, estabilizar a carga de químicos e o fluxo de massa para alimentar continuamente a caixa de entrada da máquina de papel (ARAÚJO, 2010). A figura 15 ilustra um sistema de diluição com os seus principais equipamentos.

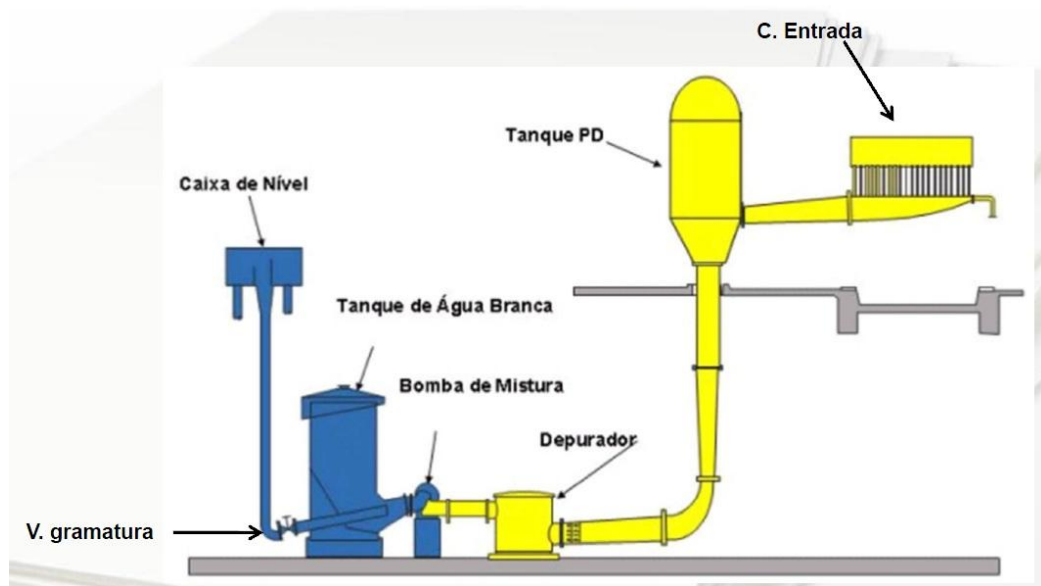


Figura 15 – Exemplo de um sistema de diluição – *approach flow* (ARAÚJO, 2010).

❖ **Depuração:** é o processo de limpeza da massa realizado pelos depuradores, que por meio da força centrífuga removem as impurezas da massa. Normalmente a depuração é realizada antes da refinação, onde os depuradores removem as impurezas pesadas e antes da caixa de entrada da máquina de papel, onde os depuradores removem as impurezas leves por meio de uma depuração centrífuga e peneiramento centrífugo (ARAÚJO, 2010). A figura abaixo exemplifica o princípio de funcionamento de um depurador centrífugo.

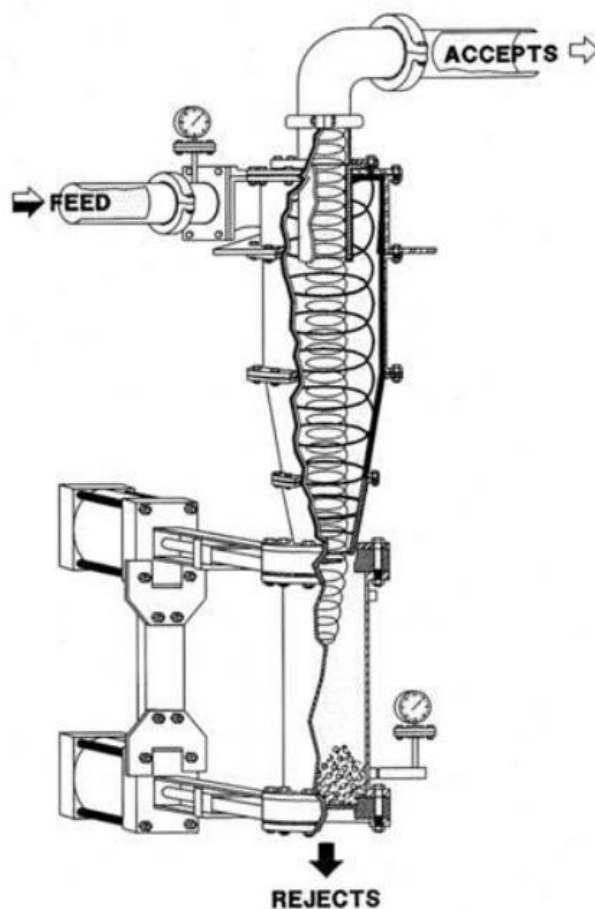


Figura 16 – Exemplo de um depurador centrífugo (ARAÚJO, 2010).

2.2.4 Máquina de Papel

A máquina de papel (figura 17) é descrita por Biermann (1996) como sendo um dispositivo para formação contínua, prensagem e secagem de uma folha de papel.

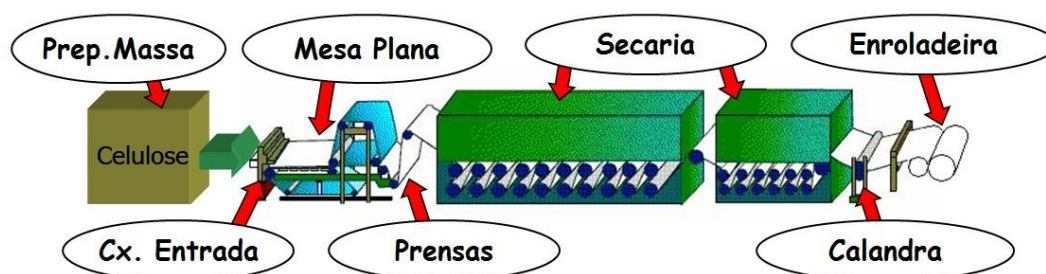


Figura 17 – Etapas de uma máquina de papel (Adaptado TAPPI, 1997).

O fluxograma típico de uma máquina de papel (figura 3) apresentou as principais etapas para fabricação de papel. Conforme já descrito anteriormente, o sistema de preparação de massa representado na figura 17 é responsável por preparar a polpa de celulose (massa) para alimentar a máquina de papel. As principais etapas de uma máquina de papel são descritas por Araújo (2010) como sendo:

- ❖ **Caixa de entrada:** recebe a suspensão fibrosa (massa + água) e distribui a mesma continuamente e uniformemente sobre a tela formadora (figura 18).

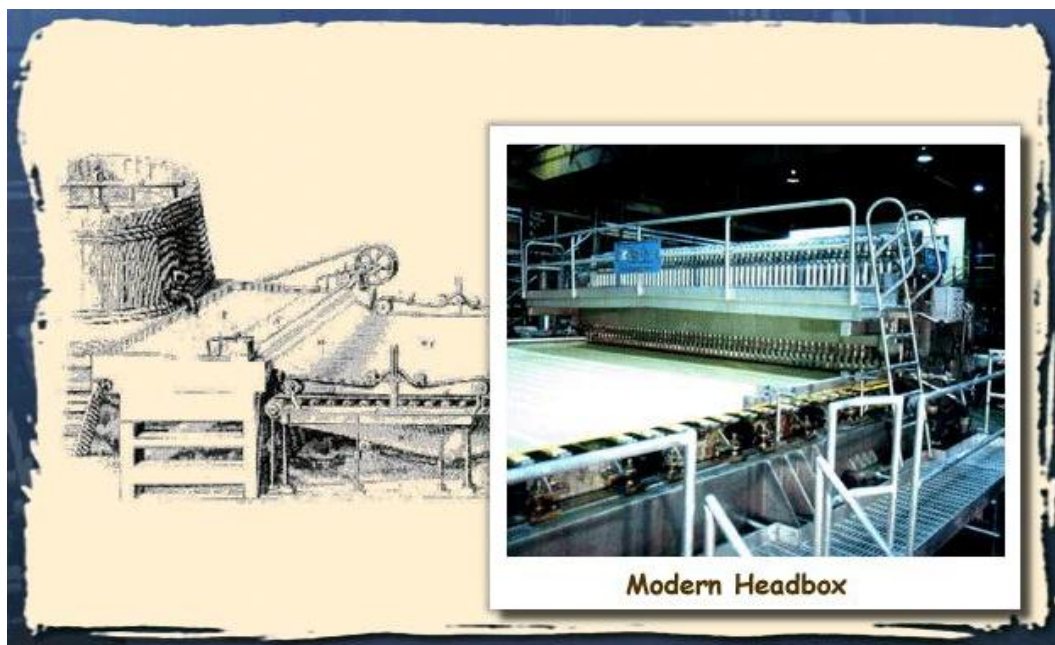


Figura 18 – Ilustração de uma caixa de entrada antiga e exemplo de uma caixa de entrada moderna (TAPPI, 1997).

- ❖ **Mesa Plana:** é composta por vários equipamentos que tem como objetivo principal fazer a drenagem gradual e uniforme da água presente na suspensão fibrosa (figuras 19 e 20).

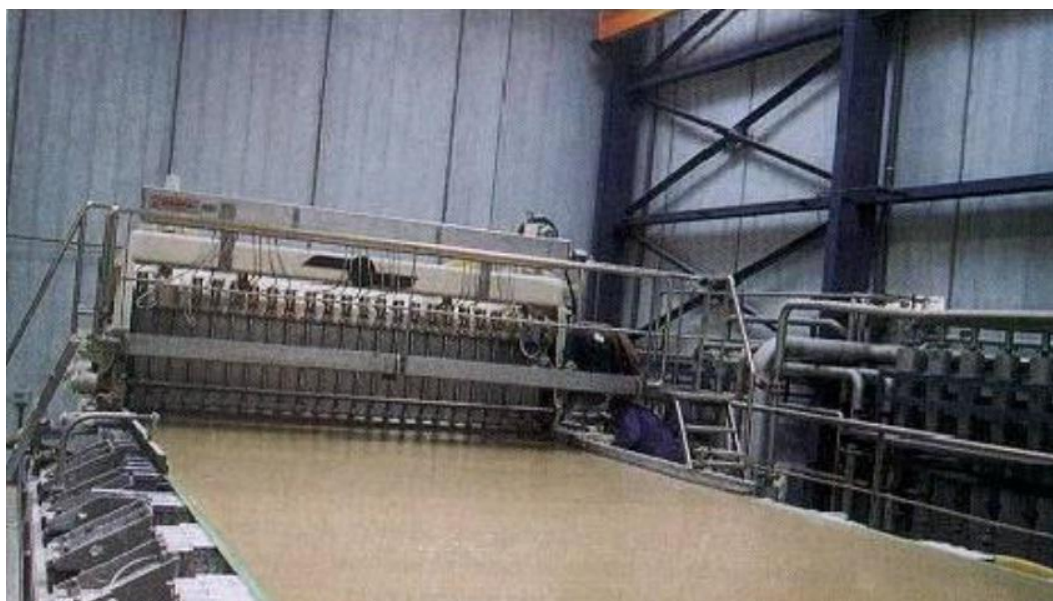


Figura 19 – Mesa plana com tela formadora (ARAÚJO, 2010).

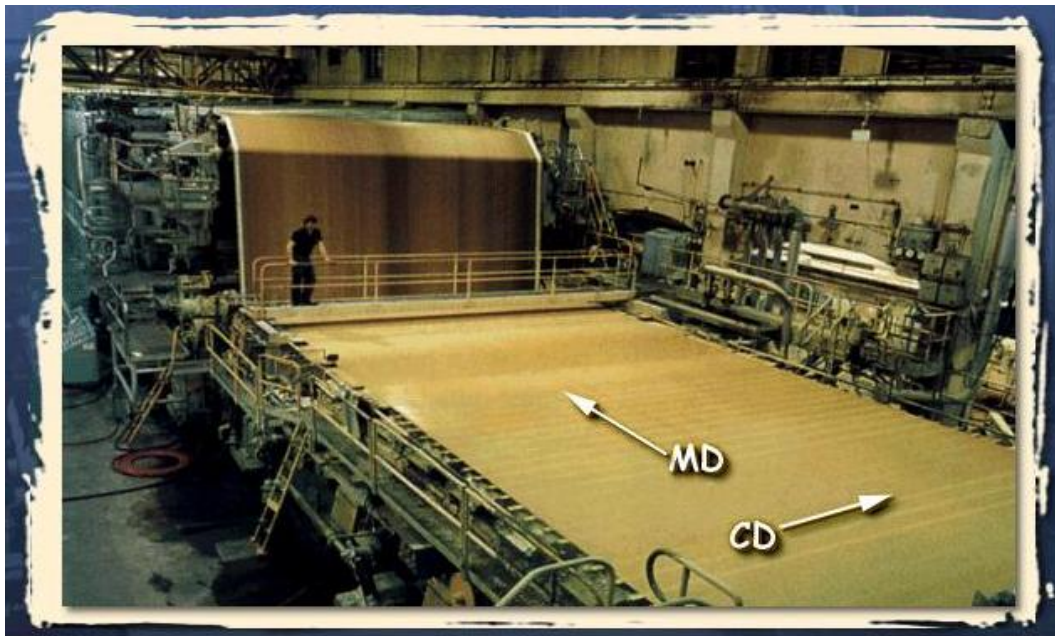


Figura 20 – Mesa plana com tela formadora e setas indicativas no sentido transversal CD (*Cross Direction*) e longitudinal MD (*Machine Direction*) – (TAPPI, 1997).

- ❖ **Prensas:** são utilizadas para retirar água da folha por meio da aplicação de força mecânica (figuras 21 e 22).

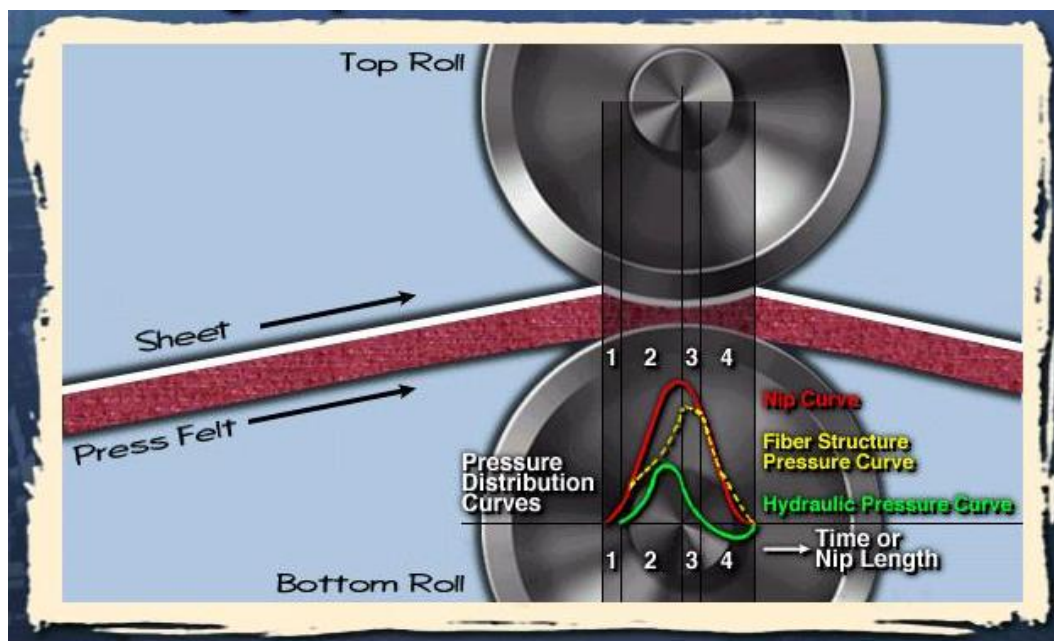


Figura 21 – Ilustração do funcionamento de uma prensa com detalhe no NIP, folha e feltro (TAPPI, 1997).



Figura 22 – Exemplo de uma prensa na máquina de papel (TAPPI, 1997).

- ❖ **Secaria:** faz a remoção da água por meio de transferência de calor, onde os cilindros secadores recebem vapor internamente e transferem calor para a folha que está em contato com a superfície externa do cilindro secador, fazendo com que a água seja evaporada (figuras 23 e 24).

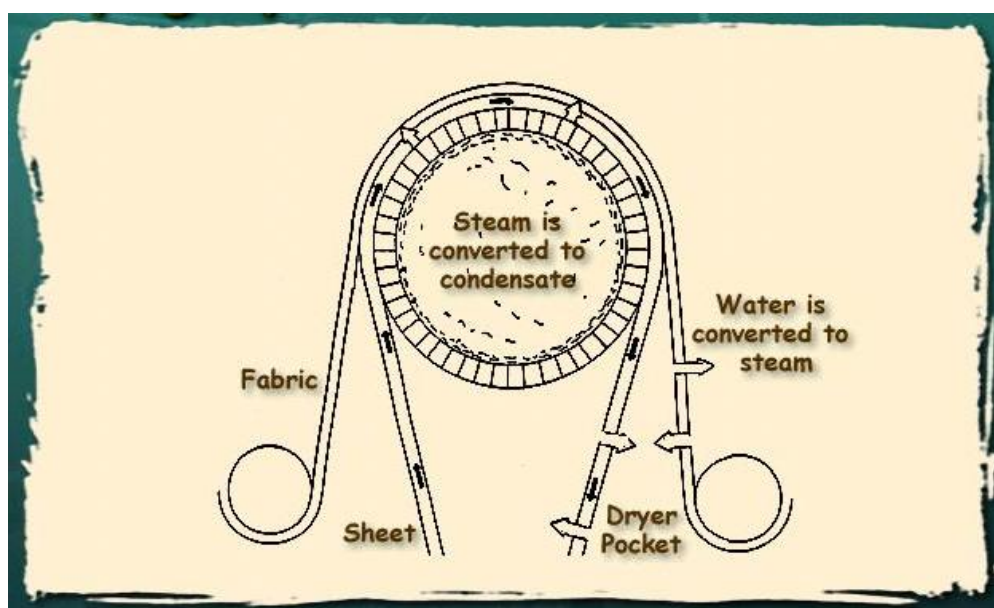


Figura 23 – Ilustração do processo de secagem da folha de papel em um cilindro secador com vapor (TAPPI, 1997).

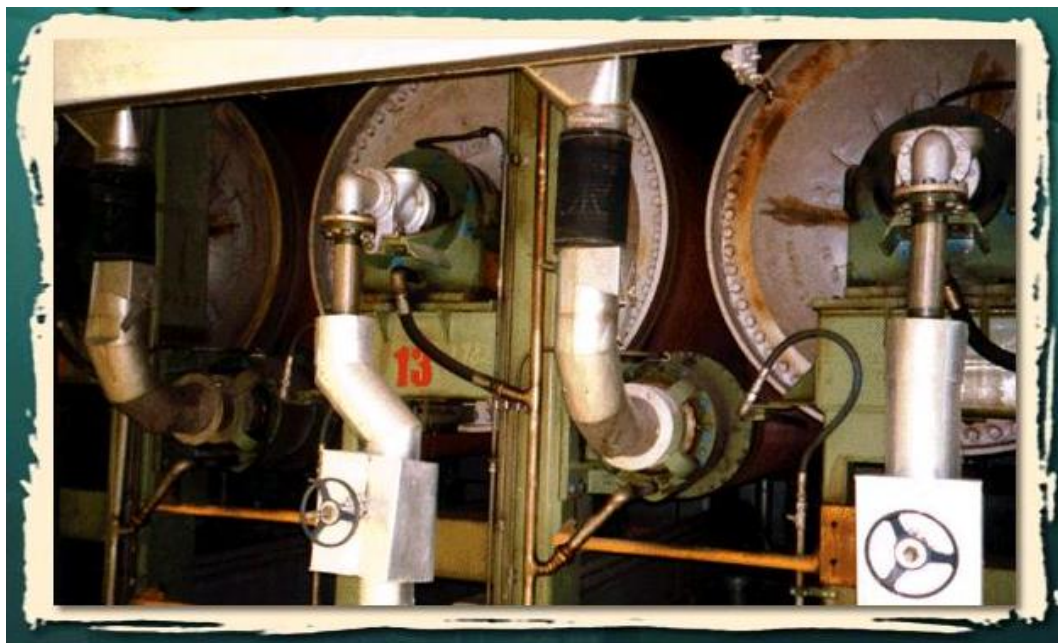


Figura 24 – Exemplo de cilindros secadores em uma máquina de papel (TAPPI, 1997).

- ❖ **Calandra:** é responsável pelo acabamento superficial da folha de papel, como a lisura e o brilho da folha (figura 25).



Figura 25 – Entrada da folha de papel em uma calandra (TAPPI, 1997).

- ❖ **Enroladeira:** tem a função de enrolar a folha de papel com tensão uniforme e formar um rolo jumbo (figuras 26 e 27).

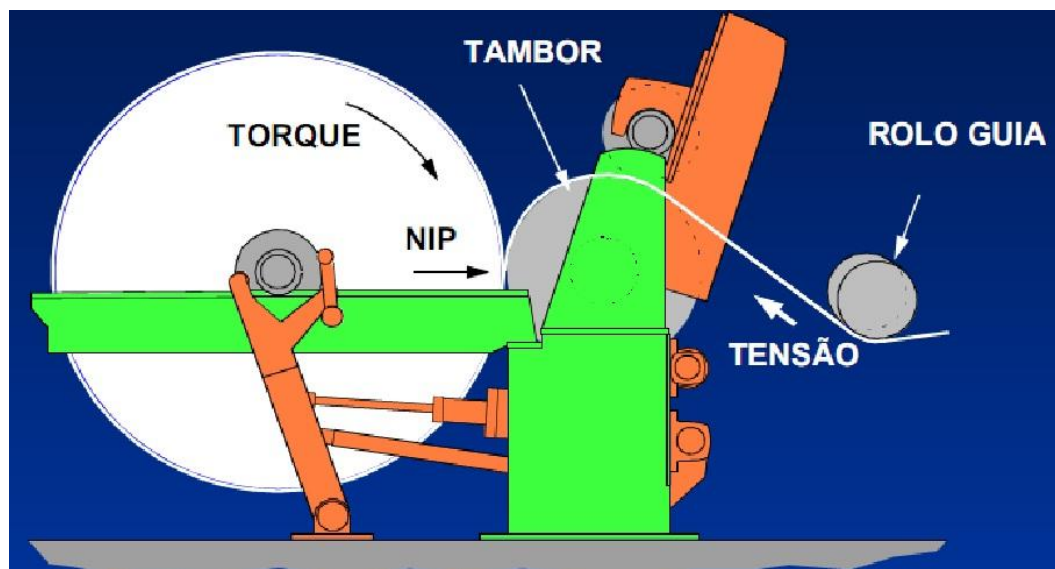


Figura 26 – Ilustração com o funcionamento de uma enroladeira (ARAÚJO, 2010).



Figura 27 – Exemplo de uma enroladeira com início de enrolamento do rolo jumbo (ARAÚJO, 2010).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais utilizados para Gestão de Malhas

Neste trabalho de pesquisa foi utilizado um SDCCD (Sistema Digital de Controle Distribuído) existente em uma máquina de papel, sendo este responsável pelo controle das principais variáveis críticas do processo de fabricação de papel e fonte de todas as informações necessárias para realizar a gestão das malhas de controle. Para fazer aquisição de dados do SDCCD, foi utilizada uma comunicação OPC (*OLE for Process Control*) com o *software* SINDUS OPP, que é uma ferramenta para gestão *on-line* de malhas de controle. Sendo necessária uma avaliação histórica das malhas de controle por meio de gráficos de tendência, poderá ser utilizado o Sistema PIMS (*Plant Information Management System*) para visualização e comparação dos dados. Com estas ferramentas, foi possível fazer uma avaliação criteriosa do comportamento das malhas de controle, tendo como objetivo principal a melhoria contínua do processo de fabricação de papel.

3.1.1 SDCCD

O Sistema Digital de Controle Distribuído (SDCCD) é um sistema de controle que foi desenvolvido para substituir os controladores analógicos dedicados para controle de processos industriais. O SDCCD é basicamente composto por três elementos: **a interface com o processo** (cartões digitais/analógicos de entradas/saídas, compostos por controladores microprocessados e unidades de aquisição de dados), **a interface com o operador** ou **Interface-Homem-Máquina** (IHM ou Sistema Supervisório) e **a via de dados**, que é o elemento de ligação entre a interface com o processo e a interface com o operador (BEGA et al., 2003). O diferencial deste sistema é a interface com o operador por meio de telas de operação e no SDCCD da máquina de papel podem-se destacar as seguintes telas de operação: telas gráficas por setor e visão geral do processo, telas de alarmes e telas de tendências (figuras 28 a 31).

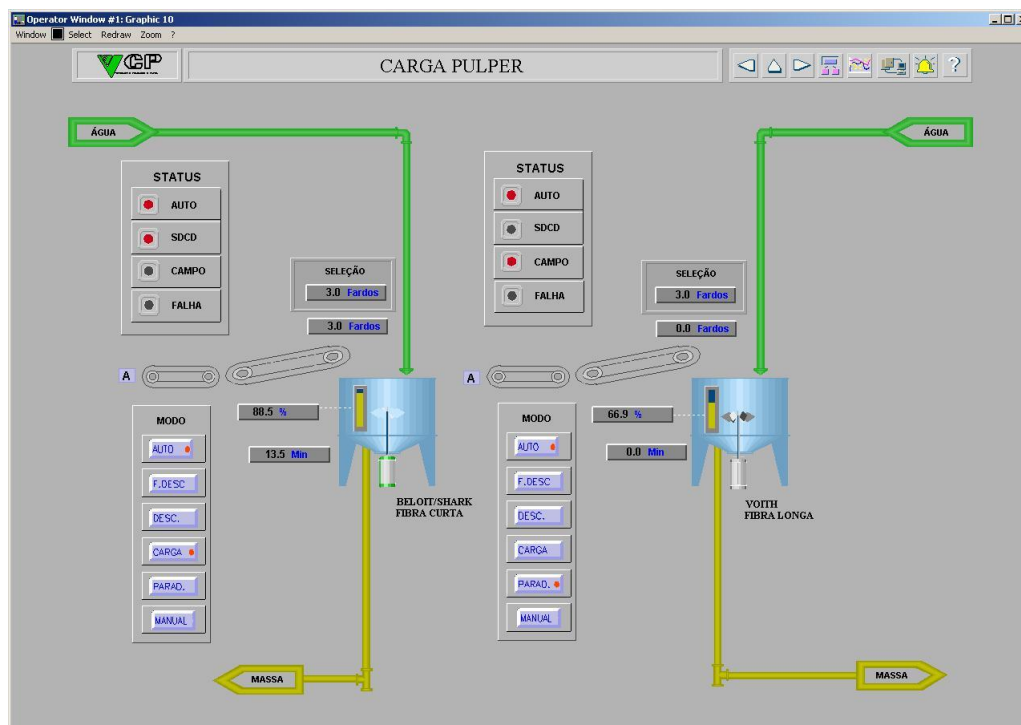


Figura 28 – Tela de operação: setor da máquina de papel.

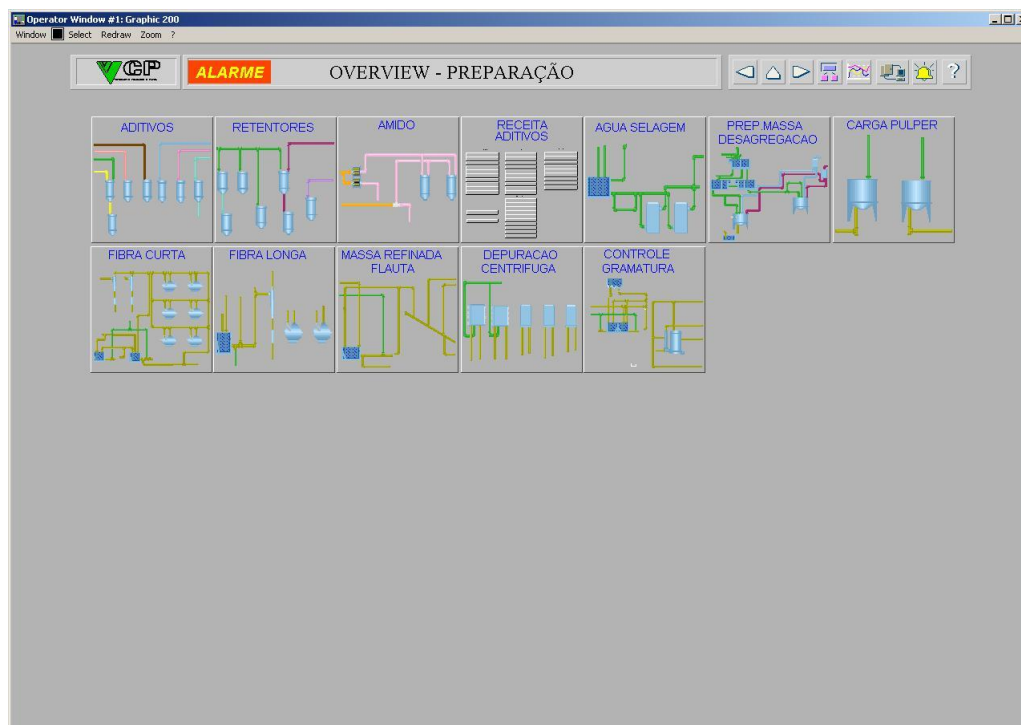


Figura 29 – Tela de operação: visão geral do processo da máquina de papel.

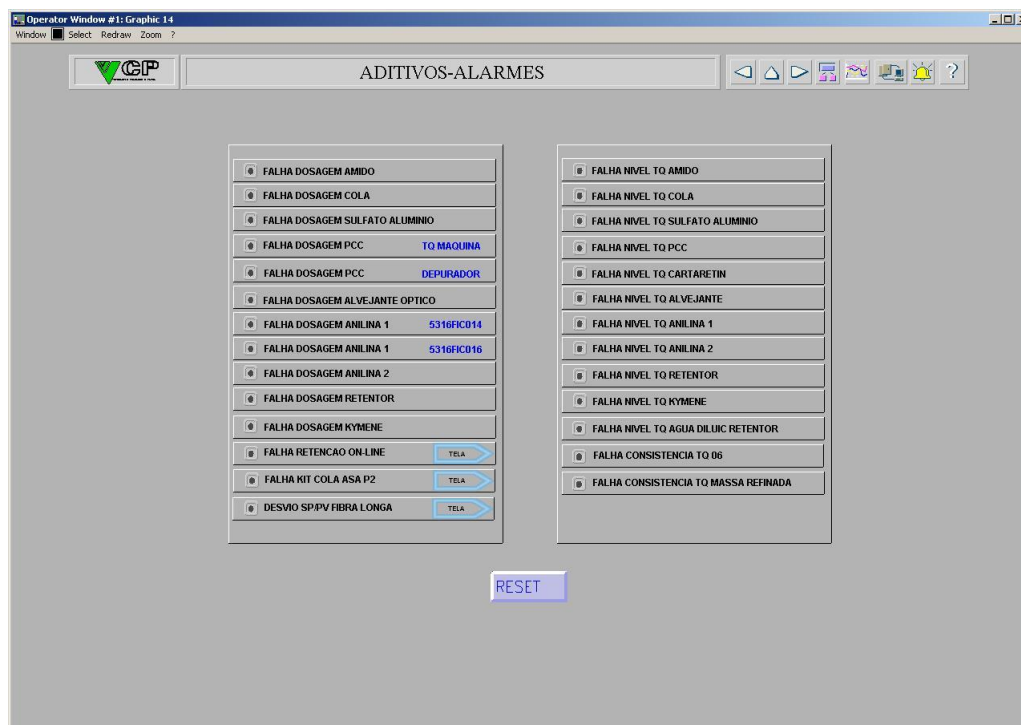


Figura 30 – Tela de operação: alarmes da máquina de papel.

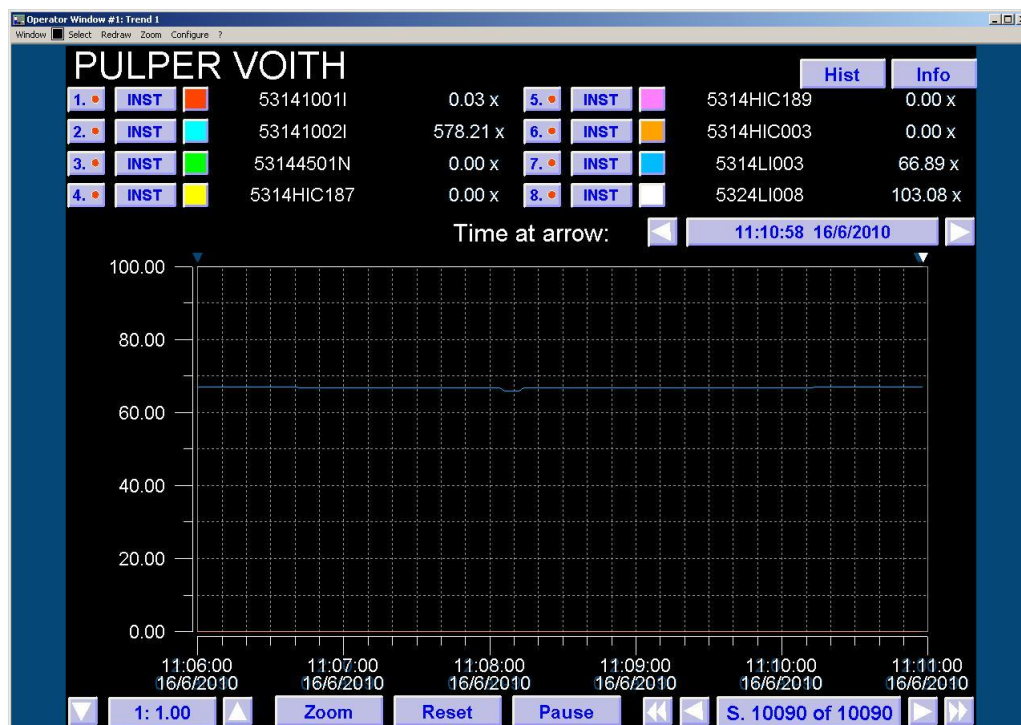


Figura 31 – Tela de operação: gráficos de tendências da máquina de papel.

3.1.2 Sindus OPP

Schuck (2009) apresentou o Sindus OPP como sendo uma plataforma de manutenção preditiva e otimização de processos *on-line* baseada num sistema supervisorio que coleta informações do processo diretamente do SDCCD, por meio de comunicação OPC (*OLE for Process Control*: protocolo padrão de comunicação entre sistemas de controle, desenvolvido pela Microsoft), permitindo assim analisar e otimizar o processo em questão. Neste trabalho a coleta de dados foi realizada através de uma amostragem fixa, ou seja, foi utilizado um *Scan* padrão de 1 (um) segundo. A opção por amostragem fixa (*Scan* fixo) foi devido ao melhor desempenho do Servidor OPC quando configurado um único grupo de *Tags* para aquisição com período de amostragem constante.

3.1.2.1 Estrutura do Sindus OPP

A estrutura padrão do software Sindus OPP pode ser representada conforme a figura abaixo:

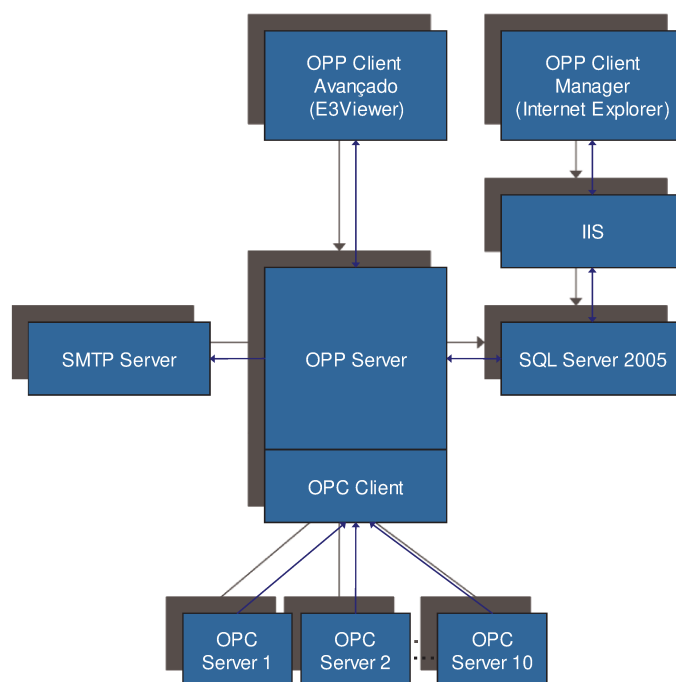


Figura 32 – Estrutura do Sindus OPP (SCHUCK, 2009).

As partes integrantes da estrutura do Sindus OPP podem ser definidas como:

OPC Server: Este servidor OPC é utilizado para coletar dados do processo, conectando o Sindus OPP com o SDCD ou CLP.

OPC Client: Conecta-se aos diversos servidores OPC para coletar dados do processo.

OPP Server: Processa todas as informações do sistema.

SMTP Server: É responsável pelo envio de e-mails.

SQL Server 2005: É o banco de dados utilizado para armazenar os dados processados.

OPP Client Avançado: É a interface com o usuário que fornece os dados para diagnóstico avançado das informações processadas pelo Sindus OPP.

IIS (*Internet Information Services*): É o *web-server* que contém o conteúdo do OPP client gerencial e também faz a conexão com os dados do SQL.

OPP Client Manager: É a interface com o usuário que fornece os dados e relatórios gerenciais das informações processadas pelo Sindus OPP.

3.1.2.2 Arquitetura do Sindus OPP

A arquitetura proposta do Sindus OPP para ser utilizada na máquina de papel, pode ser representada a partir da figura abaixo que foi adaptada de Schuck (2009):

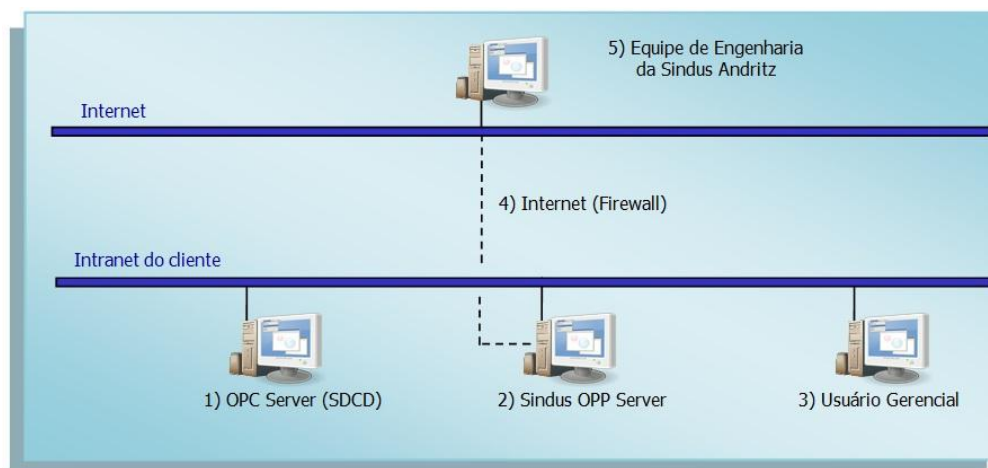


Figura 33 – Proposta de Arquitetura do Sindus OPP (Adaptada SCHUCK, 2009).

A arquitetura proposta do Sindus OPP é composta por:

OPC Server (SDCD): Servidor OPC (*OLE for Process Control*), que coleta dados do processo de produção e do sistema de controle e repassa ao Sindus OPP Server.

Sindus OPP Server: Servidor que coleta as informações do processo por meio dos servidores OPC, processa os dados e disponibiliza as informações sobre o desempenho dos processos de produção e dos equipamentos.

Usuário Gerencial: Estes usuários tem acesso aos relatórios e análises do Sindus OPP.

Internet (Firewall): Internet protegida com *Firewall*, garantindo a segurança contra invasões ao sistema por pessoas não autorizadas.

Equipe de Engenharia da Sindus Andritz: Equipe de especialistas da matriz da Sindus Andritz que analisam os dados e dão suporte na resolução de problemas complexos.

3.1.3 PIMS

Segundo Torres et al. (2003), o Sistema PIMS (*Plant Information Management Systems*) pode ser definido como um sistema de aquisição e armazenagem de dados num banco de dados temporal.

Os principais benefícios do Sistema PIMS são:

Centralização de dados de processo: O sistema PIMS concentra as informações dos PLCs e SDCDs de uma planta em uma base de dados única.

Democratização da informação: O PIMS possibilita que qualquer usuário tenha acesso aos dados da planta, desde que tenha permissão.

Visualização do processo produtivo em tempo real e histórico: a visualização pode ser feita de diversas formas, como: gráficos de tendência, relatórios, telas sinóticas, aplicações *Web*,... .

Maior interatividade com os dados do processo: Ferramentas simples, mas poderosas permitem realizar, entre outras funcionalidades, cálculos, estudos estatísticos e lógica de eventos utilizando os dados do processo.

Histórico de dados: Capaz de armazenar até 15 anos de dados de processo graças à eficiência de seu algoritmo de compressão.

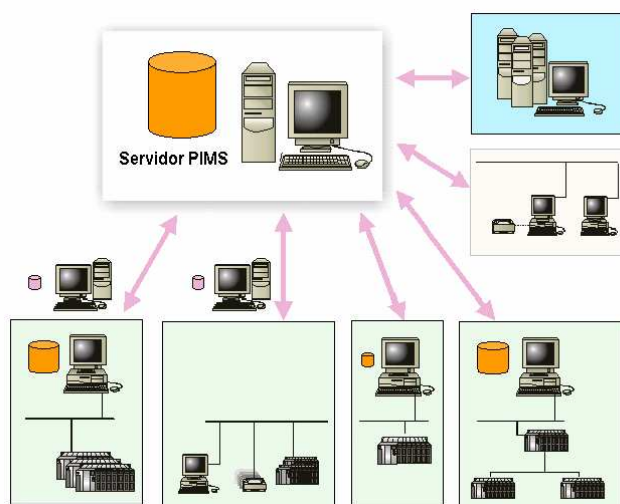


Figura 34 – Arquitetura do Sistema PIMS (TORRES et al., 2003).

3.2 Métodos

3.2.1 Metodologia para Gestão de Malhas

Este trabalho de pesquisa utilizou como principal ferramenta o Sindus OPP (figura 35), porém, para realizar as análises e avaliações das malhas de controle, foi empregada a metodologia **DMAIC** (Definir, Medir, Analisar, Implementar e Controlar).



Figura 35 – Tela para análise gráfica e indicadores de desempenho do Sindus OPP.

Para definir as malhas críticas da preparação de massa foram utilizadas as três primeiras etapas do ciclo **DMAIC** (Definir, Medir e Analisar). Após a priorização e análise das malhas foram utilizadas as duas últimas etapas do ciclo **DMAIC** (Implementar e Controlar), sendo que a etapa de implementação foi utilizada especificamente para cada malha de controle e a última etapa (Controlar) fez o fechamento deste estudo de caso com objetivo de perenizar as ações implementadas, monitorando e gerenciando o processo a partir dos indicadores de desempenho e das notas técnicas das malhas de controle.

3.2.2 Priorização das malhas de controle críticas da preparação de massa

Dentre as etapas do sistema de preparação de massa descritas no capítulo 2, foram priorizadas as principais malhas de controle tendo como premissa a exclusão da desagregação que depende basicamente do bom funcionamento do desagregador de celulose (*pulper*) e da depuração que depende do bom funcionamento dos depuradores.

3.2.2.1 DMAIC: Definir

Nesta etapa foram definidas as malhas críticas do sistema de preparação de massa a partir das malhas cadastradas no *software* Sindus OPP.

Dada à importância do controle de nível nos tanques de preparo da massa descrita por Leiviskä (2009), onde a estabilidade do nível nos tanques tem influência na variação da qualidade do produto final, foram selecionadas as principais malhas de controle de nível para medição do desempenho.

3.2.2.2 DMAIC: Medir

Após a definição das malhas críticas foi realizada a medição do desempenho das malhas de controle a partir da Nota Técnica de cada malha de controle do setor em questão.

Por meio da ferramenta Sindus OPP foi realizada a medição das malhas de controle de nível e as que apresentaram os piores desempenhos foram às malhas de controle de nível do tanque de água fresca (LIC038), nível do tanque de massa refinada (LIC043) e nível do tanque de mistura (LIC052). A malha de controle de nível do tanque de água fresca (LIC038) não é a mais crítica, porém, a mesma foi utilizada para validar a potencialidade da ferramenta Sindus OPP na gestão *on-line* de malhas de controle.

3.2.2.3 DMAIC: Analisar

A etapa de análise consistiu em verificar os indicadores de desempenho para avaliar o desempenho das malhas de controle.

Na etapa anterior foram realizadas as medições das malhas de controle de nível do tanque de água fresca (LIC038), nível do tanque de massa refinada (LIC043) e nível do tanque de mistura (LIC052), onde os desempenhos foram determinados pelas **Notas Técnicas**. Nesta etapa de análise, foram verificados os indicadores de desempenho normalizados, ou seja, os **KPIs Técnicos** com objetivo de determinar quais indicadores de desempenho contribuíram negativamente para obtenção das piores Notas Técnicas e também o impacto dos mesmos nas malhas de controle.

3.2.2.4 DMAIC: Implementar e Controlar

As demais etapas do ciclo DMAIC (Implementar e Controlar) foram utilizadas nos Estudos de Caso 1, 2 e 3. A etapa DMAIC (Implementar) foi utilizada na solução dos problemas encontrados nas malhas de controle de nível (LIC038, 043 e 052), ou seja, implementação das melhorias no processo (sintonia das malhas de controle e configuração de novas estratégias de controle no SDCCD) e no capítulo de perenização dos resultados das malhas de controle da preparação de massa foi aplicada a etapa DMAIC (Controlar) com objetivo de realizar gestão *on-line* das malhas de controle por meio do Sindus OPP.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Gestão de malhas de controle na fabricação de papel

Este trabalho sobre gestão de malhas de controle no processo de fabricação de papel foi baseado num estudo de caso desenvolvido numa fábrica de papel, cujo processo de fabricação é do tipo não integrado, ou seja, não existe uma planta de celulose que abastece diretamente a máquina de papel e com isso a principal matéria prima (celulose) é recebida em fardos para ser processada antes de abastecer a máquina de papel.

Conforme já descrito anteriormente, a fabricação de papel pode ser dividida basicamente nas seguintes etapas: preparação de massa (incluindo o sistema de diluição – *approach flow*) e máquina de papel (formação, prensagem, secagem, calandragem e enrolamento). Sabe-se que cada uma destas etapas é de fundamental importância na fabricação de papel, porém, se o início do processo não estiver sob controle, ou seja, o sistema de preparação de massa estiver com malhas de controle com alta variabilidade, haverá um impacto direto na **produtividade** (exemplo: aumento nas quebras de folha) e **qualidade** (exemplo: falhas na formação da folha de papel) porque as variações no início do processo se não corrigidas terão impacto direto no produto final. Devido à importância do sistema de preparação de massa na fabricação de papel, optou-se por desenvolver este estudo de caso nas malhas de controle que compõem as principais etapas do preparo de massa (Apêndice A).

Durante a etapa de priorização das malhas de controle do sistema de preparação de massa foram realizadas as medições e análises das malhas de nível do tanque de água fresca (LIC038), nível do tanque de massa refinada (LIC043) e nível do tanque de mistura (LIC052). A medição do desempenho das malhas de controle em questão por meio das Notas Técnicas está descrita na tabela 1, onde quanto maior o valor da nota pior é o desempenho da malha de controle e na tabela 2 são demonstrados todos os KPIs Técnicos analisados, bem como a possibilidade de comparação das malhas de controle.

Entre os principais indicadores de desempenho, o **KPI Técnico de Variabilidade** (indicador de desempenho normalizado) foi o que mais contribuiu negativamente para as Notas Técnicas, ou seja, as malhas de controle de nível (LIC038, 043 e 052) apresentaram

alta variabilidade durante a medição. Outros **KPIs Técnicos** como **IAE**, **CPK**, **Percorso da Válvula**, **Reversão da Válvula** e **Saturação da Válvula** também apresentaram valores altos indicando que as malhas não estavam trabalhando corretamente, já os **KPIs Técnicos de % Auto**, **Erro Médio** e **Cruzamento de SP** se analisados separadamente não apresentam o real desempenho das malhas, por isso a importância das **Notas Técnicas** e também a análise de vários **KPIs Técnicos** para uma correta priorização.

Tabela 1: Medição de desempenho das malhas de controle por meio das Notas Técnicas.

KPI	Malhas de Controle		
	LIC - 038	LIC - 043	LIC - 052
Nota Técnica	567,4	373,7	311,8

Tabela 2: Análise de desempenho das malhas de controle por meio dos KPIs Técnicos.

Indicadores de Desempenho	KPI Técnico		
	LIC - 038	LIC - 043	LIC - 052
% Auto	0	0	0
Erro Médio	0	5	0
Variabilidade	592	3028	1955
IAE	210	6	1
CPK	64	101	96
Cruzamento de SP	10	0	0
Percorso da Válvula	4079	13	407
Reversão da Válvula	45	10	206
Saturação da Válvula	107	200	141

4.2 Estudo de Caso 1: Controle de Nível do Tanque de Água Fresca

Conforme descrito anteriormente, a malha de controle de nível do tanque de água fresca (LIC038) foi utilizada para validar a potencialidade da ferramenta Sindus OPP. A figura 36 demonstra o diagrama da malha de controle de nível do tanque de água fresca, onde a malha em questão trata-se de um SISO com uma única linha de abastecimento do tanque e controle por meio de controlador PID que atua em uma válvula de controle na entrada do tanque, já a linha de saída do tanque é composta por uma bomba com vazão constante.

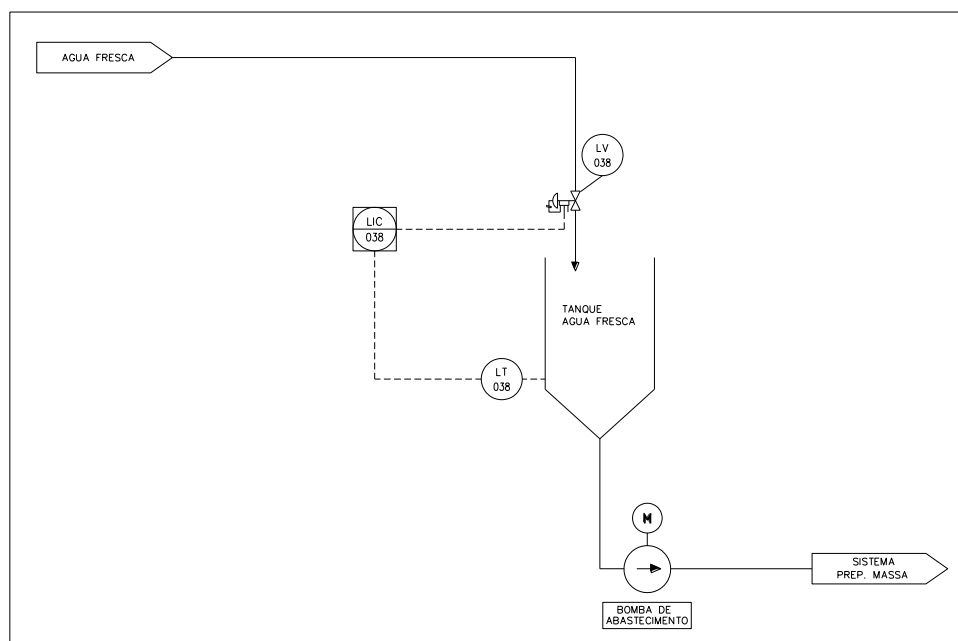


Figura 36 – Diagrama da malha de controle de nível do tanque de água fresca (LIC038).

4.2.1 Descrição do problema

Durante a primeira verificação do comportamento da malha de controle foi possível observar alta variabilidade da malha (PV e MV) por meio das ferramentas gráficas de análise de tendência (figura 38) e também obter uma classificação preliminar dos problemas quanto a **controle**, **processo** e **válvula** utilizando o gráfico de pizza (figura 39). Na figura 37 é apresentada a tela principal de análise do Sindus OPP durante o primeiro monitoramento para medição e posterior análise dos índices de desempenho.

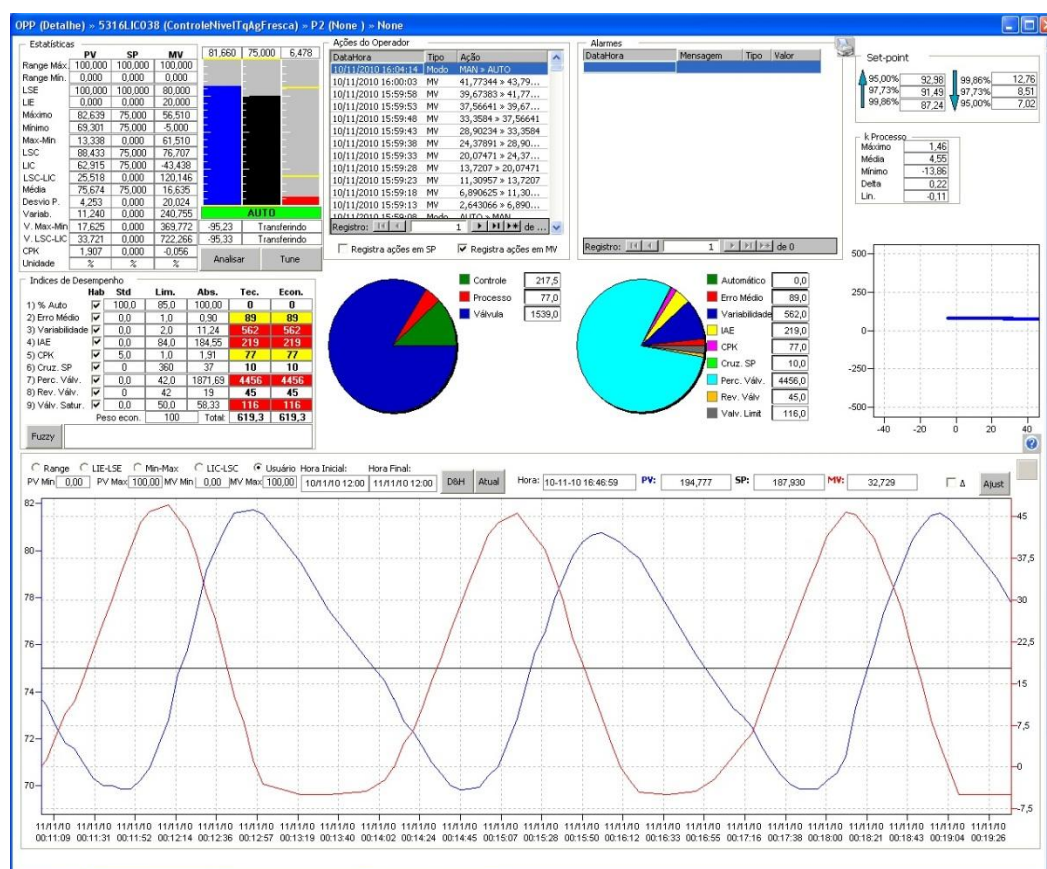


Figura 37 – Tela para análise gráfica e indicadores de desempenho do Sindus OPP durante verificação da malha de controle de nível do tanque de água fresca (LIC038).

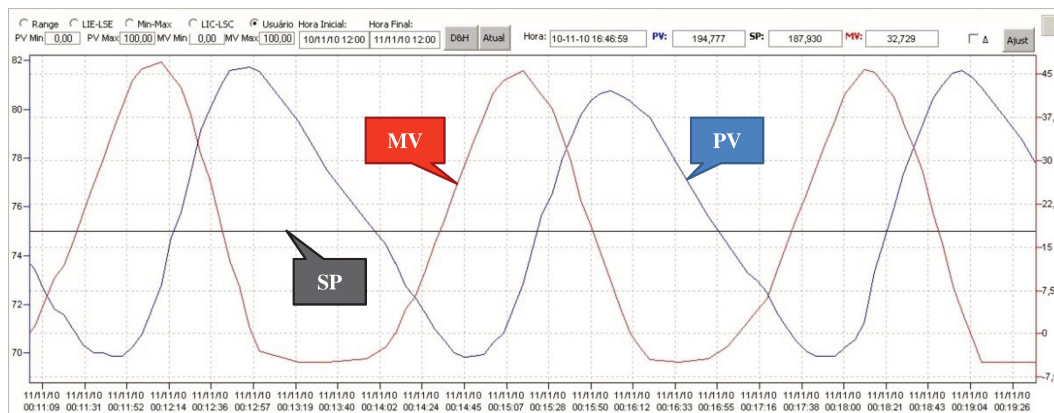


Figura 38 – Gráfico de tendência do Sindus OPP com SP, PV e MV da malha de controle de nível do tanque de água fresca (LIC038).

O gráfico de pizza (figura 39) é formado pelos KPIs Técnicos Normalizados distribuídos pelas áreas de controle, processo e válvula da seguinte forma:

- **Controle:** % Auto, Erro Médio, Variabilidade e IAE;
- **Processo:** CPK;
- **Válvula:** Cruzamento de SP, Percurso, Reversão e Saturação da válvula.



Figura 39 – Gráfico de pizza do Sindus OPP com distribuição percentual dos problemas relacionados ao controle, processo e válvula da malha de controle de nível do tanque de água fresca (LIC038).

Em resumo, esta malha de controle apresentava alta variabilidade da variável de processo (PV) e os movimentos da válvula poderiam estar ocorrendo para tentar reduzir a variação de nível no tanque, conforme observado na figura 38.

4.2.2 Solução do problema

A etapa de implementação (DMAIC: Implementar) consistiu em realizar as melhorias possíveis e necessárias no processo para solucionar os problemas encontrados na malha de controle (LIC038).

Com objetivo de verificar a causa de variabilidade da malha de controle de nível (LIC038), inicialmente foi utilizado o resultado do gráfico da figura 39 como ponto de partida, ou seja, de acordo com o gráfico as principais causas raízes estavam relacionadas à válvula e ao controle. Com isso, foi verificado primeiramente o funcionamento da válvula de controle e do posicionador da válvula no campo (na área) por meio de uma inspeção de manutenção e o funcionamento da mesma nos testes realizados estavam dentro da normalidade.

Após análise dos índices de desempenho realizada com o Sindus OPP, a malha de controle de nível do tanque de água fresca (LIC038) apresentou resultados elevados de variabilidade, IAE, CPK, Percurso e Saturação da Válvula. Os demais KPIs Técnicos seguem a regra do quanto menor, melhor é o desempenho da malha, porém, como não se faz um diagnóstico completo verificando os KPIs individualmente foi possível verificar que a malha em questão estava trabalhando 100% do tempo no modo automático (% Auto = 0), erro médio dentro do padrão (Erro Médio = 0), baixo número de vezes que a PV cruzou o SP (Cruzamento de SP = 10) e quantidade moderada de reversões da válvula (Reversão da Válvula = 45).

O próximo passo foi verificar o funcionamento do controle, que é realizado por meio de um controlador PID existente no SDCCD (Sistema Digital de Controle Distribuído). Após a coleta e análise dos dados do processo, foi realizada uma nova sintonia da malha de controle, sendo que para analisar os dados não houve necessidade de fazer *Bump Test*, ou seja, os dados analisados foram obtidos por meio de dados normais do processo.

A solução dos problemas desta malha de controle de nível foi obtida apenas com a sintonia da malha de controle, pois houve redução da variabilidade e do movimento da válvula.

4.2.3 Resultados obtidos

Durante as etapas de definição, medição, análise e implementação, o Sindus OPP demonstrou ser uma ferramenta prática e eficaz para gestão de malhas. Este primeiro estudo de caso foi importante para aplicação da metodologia e ferramentas propostas para gestão *on-line* de malhas de controle, pois, demonstrou claramente o comportamento da malha de controle de nível (LIC038) antes e após a implementação das melhorias (Figura 40).

Após coletar dados do processo e realizar uma nova sintonia foi possível observar os principais resultados com a **redução na variabilidade do nível** (96,9% menor) e também **na atividade da válvula** (98,3% menor). Além dos resultados obtidos por meio dos KPIs Técnicos de **Variabilidade, Percurso e Saturação da Válvula**, os KPIs Técnicos de **IAE e CPK** também apresentaram resultados expressivos que podem ser comprovados por meio da tabela 3.

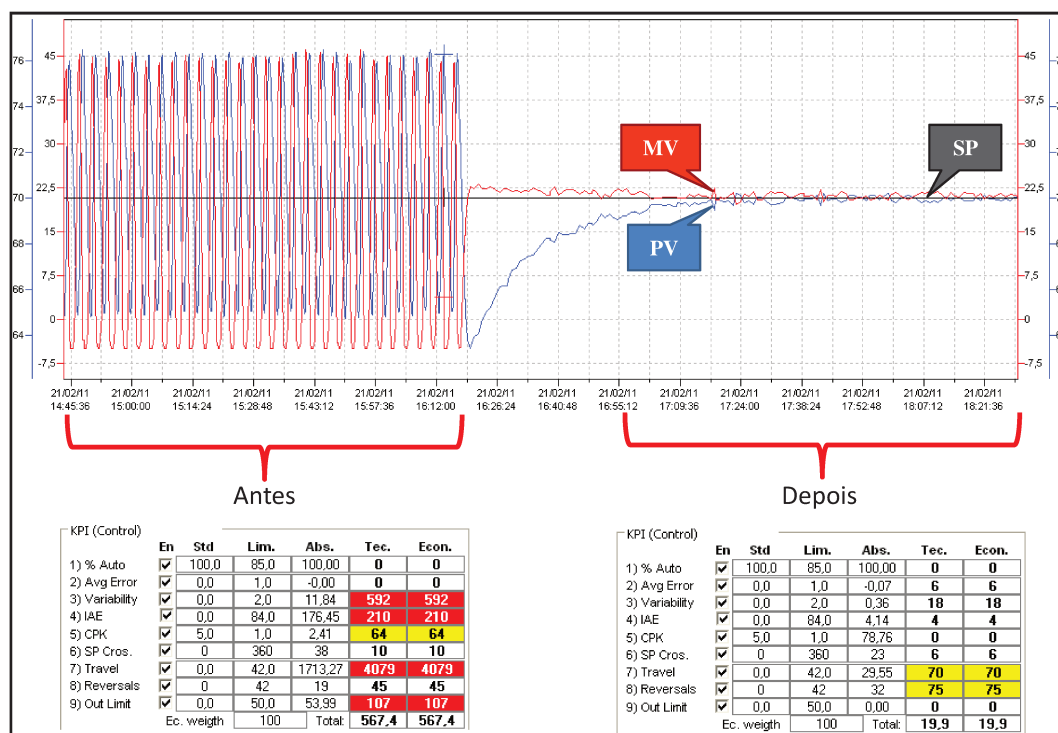


Figura 40 – Comparação do antes e depois da malha de controle de nível do tanque de água fresca (LIC038) por meio do Sindus OPP.

Tabela 3: Comparação dos KPIs Técnicos antes e depois da implementação das melhorias na malha de controle de nível do tanque de água fresca LIC038.

Indicadores de Desempenho	KPI Técnico (LIC - 038)	
	Antes	Depois
% Auto	0	0
Erro Médio	0	6
Variabilidade	592	18
IAE	210	4
CPK	64	0
Cruzamento de SP	10	6
Percurso da Válvula	4079	70
Reversão da Válvula	45	75
Saturação da Válvula	107	0

4.2.3.1 Análise dos resultados do Estudo de Caso 1

Os resultados apresentados na tabela 3 do Estudo de Caso 1 que foi realizado no controle de nível do tanque de água fresca (LIC038), mostram por meio da comparação dos KPIs Técnicos antes e depois da implementação das melhorias que os problemas relacionados ao controle, processo e válvula foram resolvidos. Assim como os KPIs Técnicos, as Notas Técnicas da malha de controle apresentam uma redução drástica (96,5% menor) conforme mostra a tabela 4, porém, nota-se que os indicadores de desempenho normalizados (Erro Médio e Reversão da Válvula) descritos na tabela 3 apresentaram valores “piores” comparados com valores encontrados antes da implementação das melhorias. Se a análise por meio do Sindus OPP fosse pontual poderia concluir que a maioria dos indicadores “melhoraram” e alguns “pioraram”, mas o *software* Sindus OPP possui na tela para análise gráfica dos indicadores de desempenho os valores **Padrões** e **Limites** para os KPIs Técnicos Absolutos (Figura 40) e fazendo uma análise dos valores absolutos de Erro Médio e Reversão da Válvula com relação aos padrões e limites tem-se valores dentro do esperado conforme está descrito na tabela 5. Da mesma forma que os indicadores de desempenho normalizados, os valores absolutos do KPIs Técnicos (Variabilidade, IAE, CPK, Percurso e Saturação da Válvula) mostraram que a malha de controle de nível do tanque de água fresca (LIC038) está sob controle.

As lições aprendidas com este primeiro estudo de caso, que foi utilizado para validação do uso do *software* Sindus OPP para gestão *on-line* de malhas de controle na fabricação de papel, mostram que não é recomendado utilizar indicadores de desempenho individualmente para analisar o comportamento de uma malha de controle e sim um conjunto de KPIs Técnicos, no qual direcionam para as três grandes áreas com possíveis problemas (controle, processo e válvula). Outro ponto importante é a utilização da Nota Técnica como *benchmark*, pois permite monitorar *on-line* o funcionamento da malha de controle após a implementação das melhorias, garantindo assim que a malha esteja sob controle.

Tabela 4: Comparação das Notas Técnicas antes e depois da implementação das melhorias na malha de controle de nível do tanque de água fresca LIC038.

KPI	Malha de Controle
	LIC - 038
Nota Técnica - Antes	567,4
Nota Técnica - Depois	19,9

Tabela 5: Comparação dos valores absolutos dos indicadores de desempenho da malha de controle de nível do tanque de água fresca LIC038 com os valores padrões e limites utilizados no *software* Sindus OPP.

Indicadores de Desempenho	Valor Absoluto (LIC - 038)			
	Antes	Depois	Padrão	Limite
% Auto	100	100	100	85
Erro Médio	0	-0,07	0	1
Variabilidade	11,84	0,36	0	2
IAE	176,45	4,14	0	84
CPK	2,41	78,76	5	1
Cruzamento de SP	38	23	0	360
Percurso da Válvula	1713,27	29,55	0	42
Reversão da Válvula	19	32	0	42
Saturação da Válvula	53,99	0	0	50

4.3 Estudo de Caso 2: Controle de Nível do Tanque de Massa Refinada

Após os resultados obtidos com as ferramentas de gestão de malhas de controle do Sindus OPP no primeiro estudo de caso, desenvolveu-se este segundo estudo de caso na malha de controle de nível do tanque de massa refinada (LIC043). O diagrama da malha de controle de nível do tanque de massa refinada (Figura 41) representa a estratégia de controle para controlar o nível através dos fluxos das linhas de massa refinada, onde para controlar o nível do tanque de massa refinada existia uma estratégia de controle mestre/escravo, ou seja, o controlador PID mestre é o LIC043 que em modo de operação automático envia SP Remoto para os controladores PID escravos (FIC041 e FIC042) que em modo automático/cascata controlam os fluxos de massa refinada através das válvulas de controle FV041 e FV042.

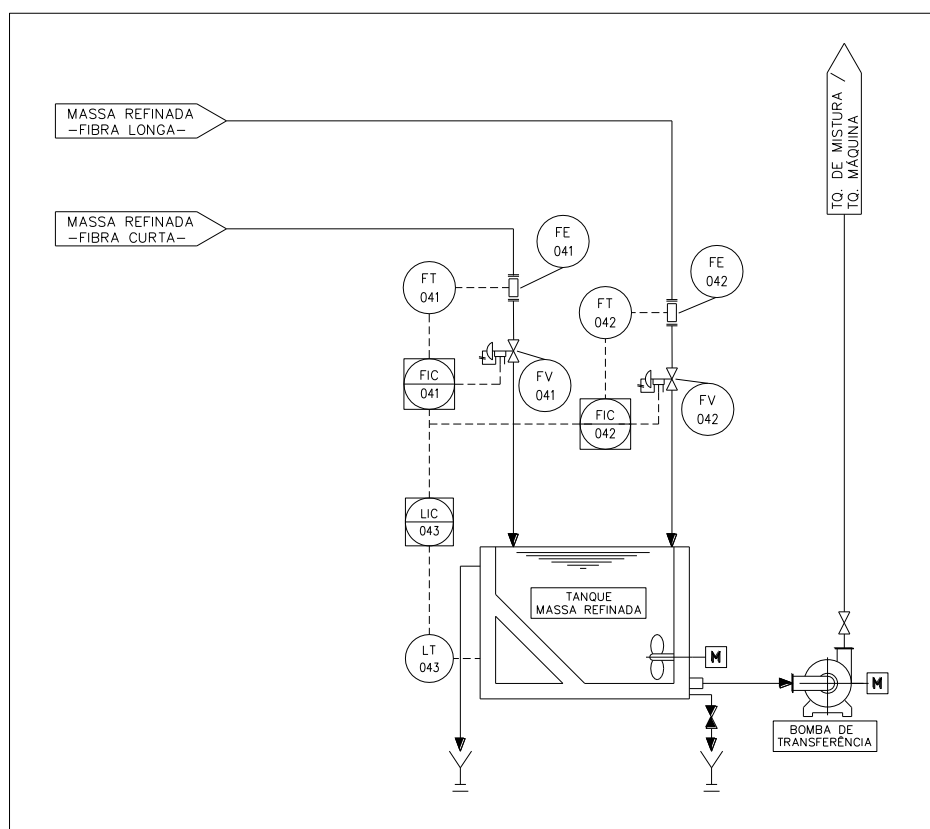


Figura 41 – Diagrama da malha de controle de nível do tanque de massa refinada (LIC043).

4.3.1 Descrição do problema

Inicialmente foi verificado o comportamento da malha de controle por meio das ferramentas gráficas de análise de tendência (figura 43) e observou-se alta variabilidade da variável de processo (PV) e também obteve-se uma classificação preliminar dos problemas quanto a **controle, processo e válvula** (figura 44).

Durante o primeiro monitoramento para medição dos índices de desempenho (Figura 42), foi observado que a malha de controle LIC043 estava em modo de operação manual devido à necessidade operacional de controlar os fluxos de massa refinada (FIC041 e FIC042) em modo de operação automático/local para manter uma relação entre as linhas de fibra curta e fibra longa, ou seja, os operadores ajustavam constantemente os SP (*Setpoints*) dos controladores (FIC041 e FIC042) para controlar os fluxos de massa refinada das linhas de abastecimento do tanque de massa refinada. Com isso, não estava sendo utilizada a estratégia de controle que permitia controlar os fluxos de massa refinada (FIC041 e FIC042) em modo automático/cascata, porém, quando os controladores PID escravos (FIC041 e FIC042) operavam em modo automático/local o controlador PID mestre (LIC043) tanto no modo automático como manual estava configurado para manter o SP (*Setpoint*) igual a PV (Variável de processo), ou seja, o SP estava em *Tracking Mode* com a PV.

Sabendo-se que as malhas de controle (FIC041 e FIC042) não estavam operando em automático/cascata, a malha de controle de nível do tanque de massa refinada (LIC043) tinha o mesmo comportamento nos modos de operação manual e automático. Com isso, a análise dos índices de desempenho foi realizada por meio dos KPIs calculados com a malha de controle (LIC043) em modo manual, pois, o *software* Sindus OPP calcula todos os índices em qualquer modo de operação (manual ou automático). Neste caso, os índices de desempenho referentes ao comportamento da válvula não foram considerados durante a análise como indicadores de problema na válvula de controle porque a MV (Variável manipulada) do controlador PID (LIC043) não estava atuando diretamente em uma válvula de controle e sim estava configurada para enviar SP (*Setpoint*) Remoto se os controladores PID (FIC041 e FIC042) estivessem em modo de operação automático/cascata.

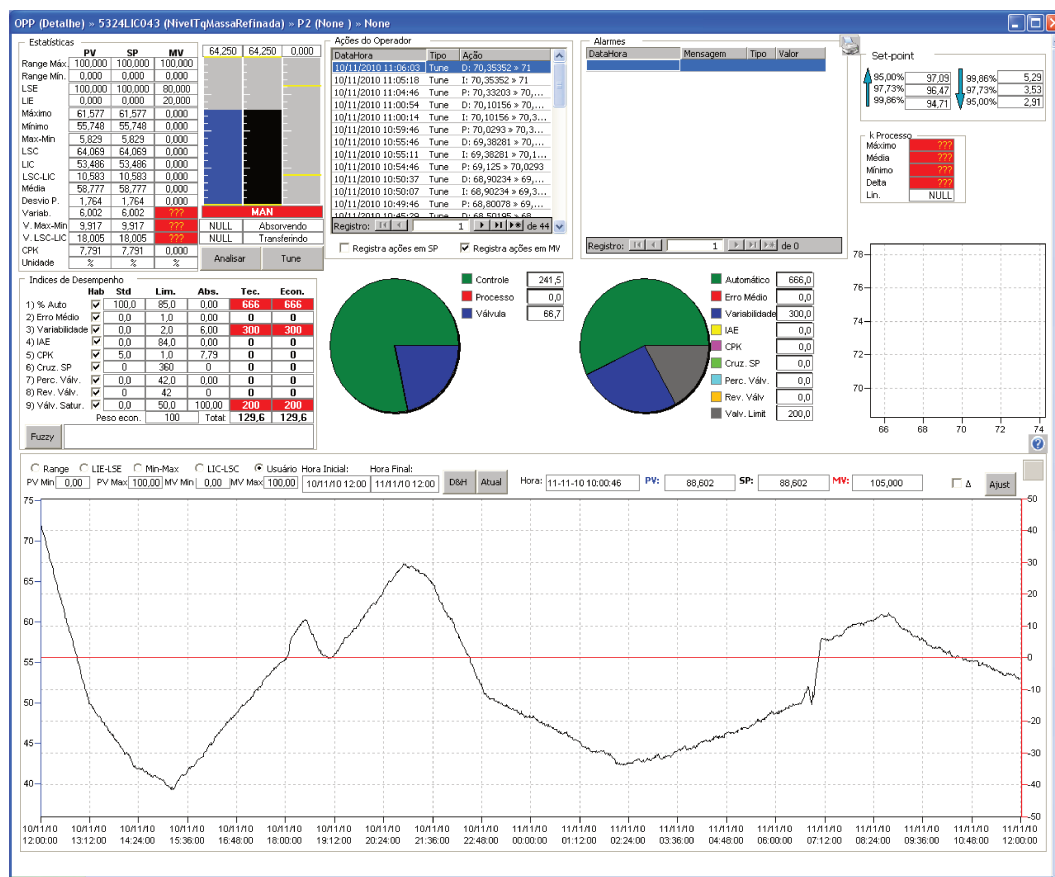


Figura 42 – Tela para análise gráfica e indicadores de desempenho do Sindus OPP durante verificação da malha de controle de nível do tanque de massa refinada (LIC043) em *Tracking Mode*.

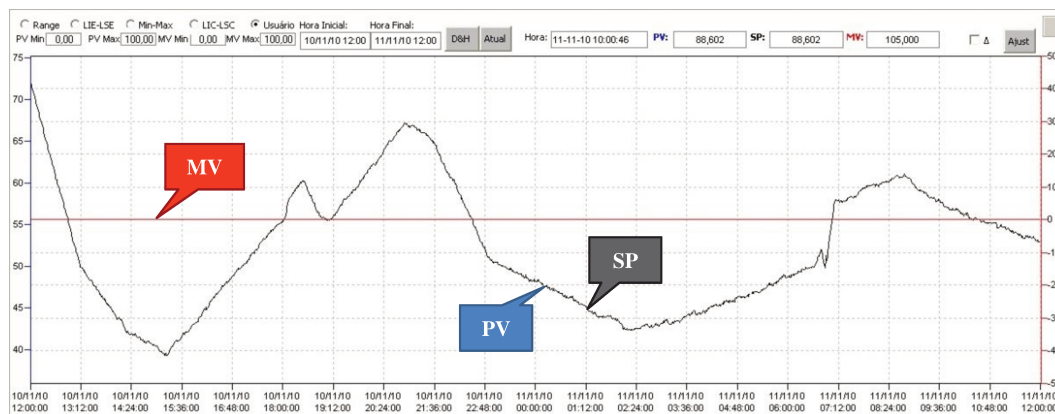


Figura 43 – Gráfico de tendência do Sindus OPP com SP, PV e MV da malha de controle de nível do tanque de massa refinada (LIC043) em *Tracking Mode*.

O gráfico de pizza (figura 44) é formado pelos KPIs Técnicos Normalizados distribuídos pelas áreas de controle e válvula da seguinte forma:

- **Controle:** % Auto, Erro Médio, Variabilidade e IAE;
- **Válvula:** Cruzamento de SP, Percurso, Reversão e Saturação da válvula.

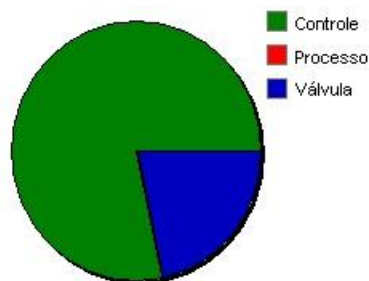


Figura 44 – Gráfico de pizza do Sindus OPP com distribuição percentual dos problemas relacionados ao controle, processo e válvula da malha de controle de nível do tanque de massa refinada (LIC043).

Em resumo, esta malha de controle apresentava alta variabilidade da variável de processo (PV) e de acordo com o gráfico da figura 44 a principal causa raiz estava relacionada com o controle devido ao modo de operação da malha de controle de nível (LIC043), ou seja, o nível do tanque de massa refinada não estava sendo controlado em modo de operação automático.

4.3.2 Solução do problema

Para solucionar os problemas encontrados na malha de controle (LIC043) tendo como base o resultado da figura 44, onde a principal causa de variabilidade era o controle, foi necessário verificar o processo e a estratégia de controle que estava sendo utilizada.

Com relação ao processo, existe a necessidade de controlar o nível do tanque de massa refinada (LIC043) e ao mesmo tempo manter uma relação entre o fluxo de massa refinada da linha de fibra curta (FIC041) e o fluxo de massa refinada da linha de fibra longa (FIC042) na entrada do tanque de massa refinada, conforme ilustrado na figura 45. Como a variação da relação dos fluxos de massa refinada da linha de fibra curta e longa na entrada do tanque de massa refinada tem impacto direto na estabilidade da máquina de papel, a equipe de operação da preparação de massa tinha como premissa manter a relação dos fluxos constante na entrada do tanque de massa refinada e com isso havia variações no nível do tanque porque a malha de controle de nível (LIC043) era controlada manualmente, ou seja, os operadores faziam alterações frequentes nos SP (*Setpoints*) dos controladores (FIC041 e FIC042) para evitar transbordo no tanque de massa refinada.

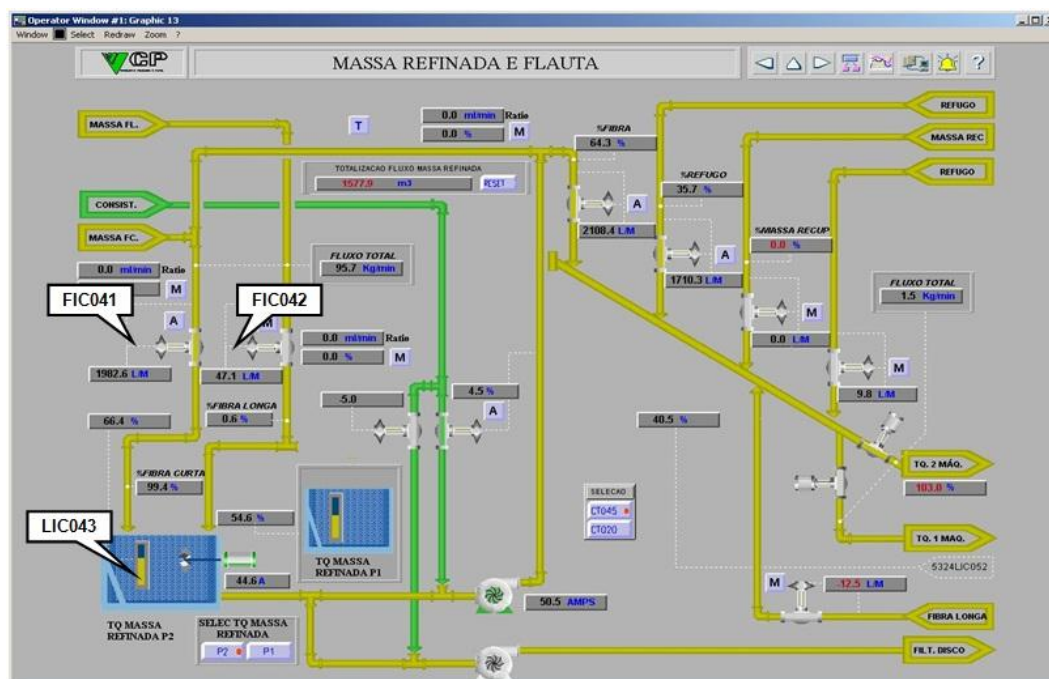


Figura 45 – Tela de operação do SDCCD referente ao controle de nível do tanque de massa refinada (LIC043).

A estratégia de controle que estava implementada não permitia um controle adequado do nível do tanque de massa refinada, pois de acordo com o descritivo de processo acima detalhado não era possível manter relação de entrada dos fluxos (FIC041 e FIC042) e nível do tanque (LIC043) constante automaticamente sem ação do operador. A melhor estratégia de controle para controlar nível de tanques que são controlados por fluxos de entrada foi descrita por Leiviskä (2009) referente a um tanque de mistura de massa, onde o mesmo divide a ação de controle proporcionalmente para os fluxos de entrada com objetivo de manter estável o nível do tanque de mistura.

Os problemas relacionados ao processo e controle foram comprovados na análise dos índices de desempenho realizada com o Sindus OPP, onde a malha de controle de nível do tanque de massa refinada (LIC043) apresentou resultados elevados de variabilidade e CPK. Os demais KPIs Técnicos apresentaram valores dentro da normalidade, ou seja, a malha em questão está com erro médio moderado (Erro Médio = 5) e baixo IAE (6). Os KPIs referentes ao comportamento da válvula de controle não foram considerados na análise devido ao modo de operação e estratégia de controle existente, mesmo apresentando valores dentro do esperado.

Antes de implementar uma solução para a malha de controle de nível do tanque de massa refinada (LIC043), foi utilizada outra ferramenta para verificação e confirmação do comportamento da malha por meio de gráficos de tendência. Por meio do Sistema PIMS (*Plant Information Management Systems*) foram utilizados os gráficos de tendência do *Software Excel* (Planilha Eletrônica da *Microsoft*) para visualização do comportamento das variáveis da malha de controle (PV, SP e MV). Isto foi possível devido a um suplemento do Sistema PIMS, chamado PI - *DataLink* que está disponível no Excel dos computadores da rede corporativa da TI na fábrica de papel, ou seja, na sala de controle do SDCCD da preparação de massa existem máquinas (computadores) da rede da TI que são utilizados pela operação e nestas máquinas é possível qualquer operador que tenha acesso à rede, verificar os gráficos de tendência por meio do Excel. O gráfico de tendência representado na figura 46 confirmou o mesmo comportamento das variáveis da malha de controle de nível (LIC043) mostradas na figura 43, ou seja, alta variabilidade da variável de processo (PV).

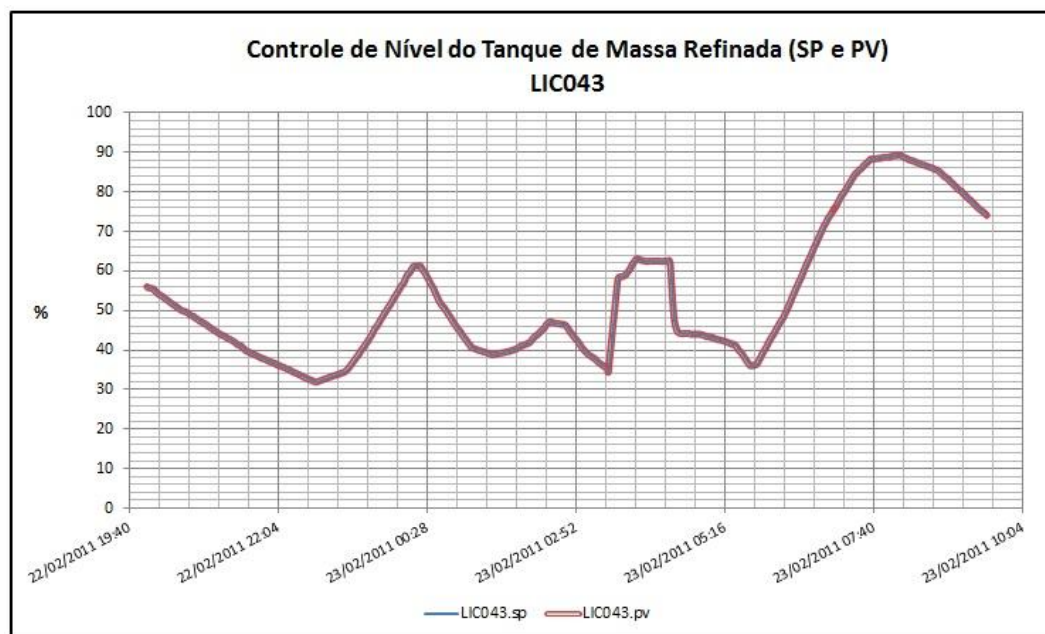


Figura 46 – Gráfico de tendência do SP e PV da malha de controle de nível do tanque de massa refinada (LIC043) em *Tracking Mode*, desenvolvido no Excel com aquisição dos dados por meio do Sistema PIMS.

Para solucionar os problemas desta malha de controle de nível foi desenvolvida uma nova estratégia de controle (Receita) mantendo a configuração mestre/escravo existente, onde o controlador PID mestre (LIC043) quando em modo de operação automático envia SP Remoto para os controladores PID escravos (FIC041 e FIC042) quando em modo de operação automático/cascata. Com esta solução a operação ajusta o nível desejado à relação desejada e por meio de um controle multi-variável é definida qual a melhor vazão para manter o nível controlado no SP (*setpoint*) e também a relação desejada, conforme mostram as figuras 47 e 48. O algoritmo implementado encontra-se no Apêndice D.

Além da implementação da nova estratégia de controle, foi realizada também uma sintonia da malha de controle e como resultado houve redução da variabilidade e do CPK.

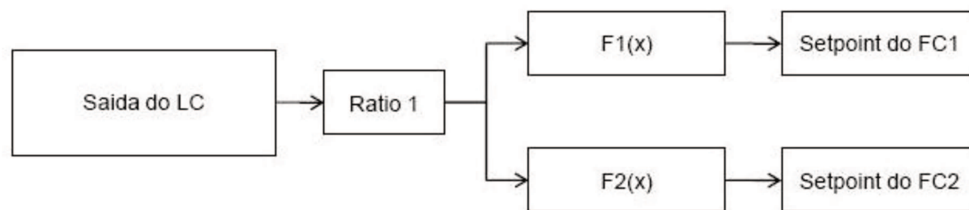


Figura 47 – Nova estratégia do controle de nível do tanque de massa refinada (LIC043).

	LC043 (%)	RATIO	CsI	SP (L/MIN)	REAL (L/MIN)	T/H	%
FC041	25,71	60	4,5	2285,7	2285,7	6,2	60
FC042		40	4	1714,3	1714,3	4,1	40
				4000,0	10,3		

Figura 48 – Receita para controle do nível do tanque de massa refinada (LIC043).

4.3.3 Resultados obtidos

Neste segundo estudo de caso, o Sindus OPP comprovou sua eficácia em gestão de malhas de controle devido à assertividade nos diagnósticos da deficiência no controle e processo por meio dos KPIs Técnicos. A redução da variabilidade da malha de controle de nível (LIC043) pôde ser confirmada por meio das ferramentas do Sindus OPP (figura 49) e comprovada nos gráficos de tendência da Planilha Excel com dados do Sistema PIMS (figura 50).

Após a implementação da nova estratégia de controle e a realização da sintonia de malha, foi possível observar os principais resultados com a **redução na variabilidade do nível** (98,6% menor) e também **no CPK**.

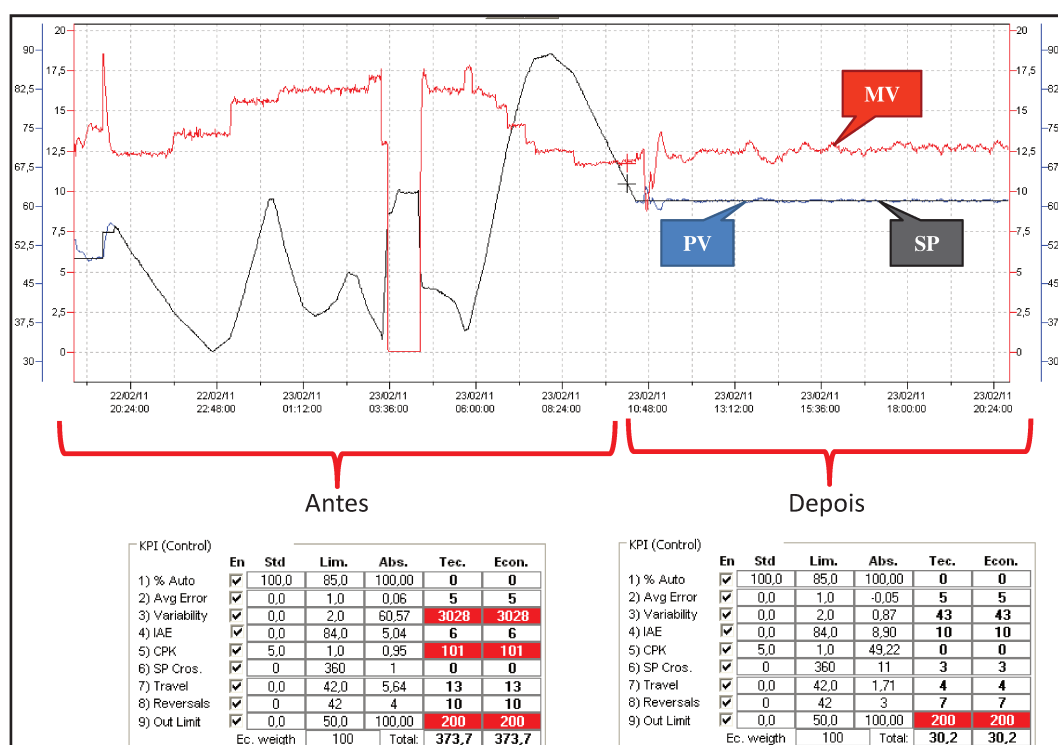
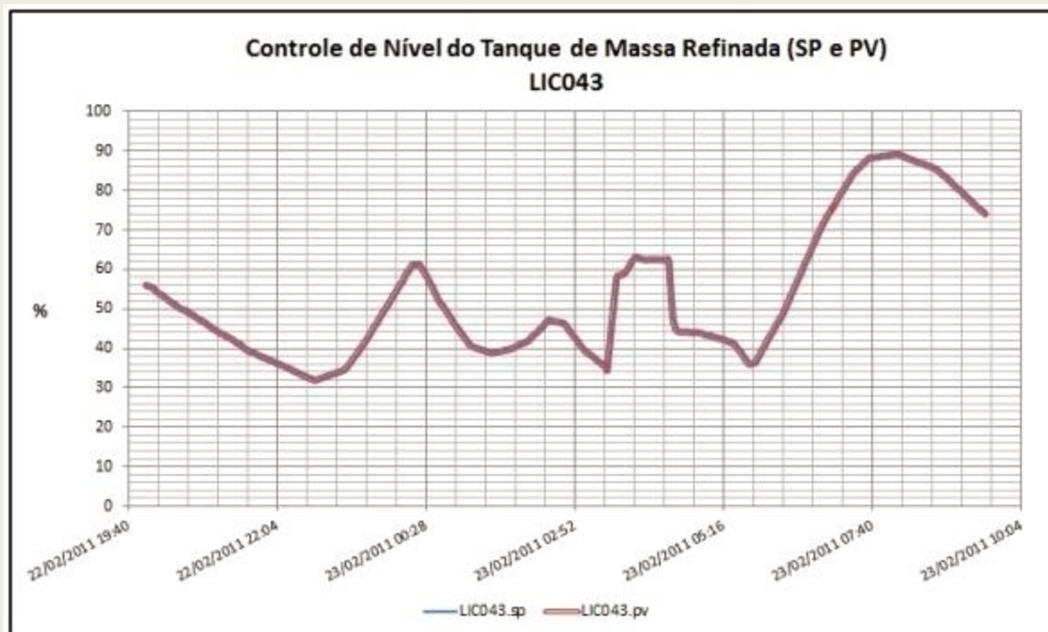
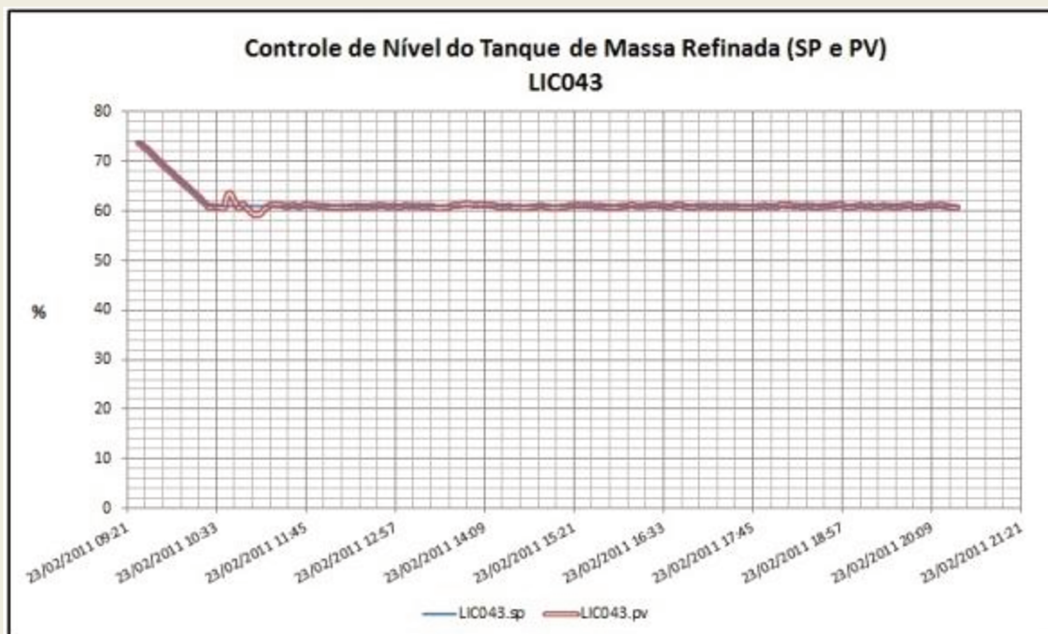


Figura 49 – Comparação da malha de controle de nível do tanque de massa refinada (LIC043) em *Tracking Mode* (Antes) e automático/cascata (Depois), por meio do Sindus OPP.



(a)



(b)

Figura 50 – Comparação do SP e PV da malha de controle de nível do tanque de massa refinada (LIC043) operando antes em *Tracking Mode* (a) e depois em automático/cascata (b), por meio dos gráficos de tendência do Excel com aquisição dos dados pelo Sistema PIMS.

Além dos resultados obtidos por meio dos KPIs Técnicos de **Variabilidade** e **CPK**, os demais KPIs Técnicos também apresentaram excelentes resultados que podem ser comprovados por meio da tabela 6.

Tabela 6: Comparação dos KPIs Técnicos antes e depois da implementação das melhorias na malha de controle de nível do tanque de massa refinada LIC043.

Indicadores de Desempenho	KPI Técnico (LIC - 043)	
	Antes	Depois
% Auto	0	0
Erro Médio	5	5
Variabilidade	3028	43
IAE	6	10
CPK	101	0
Cruzamento de SP	0	3
Percurso da Válvula	13	4
Reversão da Válvula	10	7
Saturação da Válvula	200	200

4.3.3.1 Análise dos resultados do Estudo de Caso 2

No Estudo de Caso 2 realizado na malha de controle de nível do tanque de massa refinada (LIC043), os resultados descritos na tabela 6 por meio da comparação dos KPIs Técnicos mostram claramente a redução de variabilidade após a implementação das melhorias. Além dos KPIs Técnicos, as Notas Técnicas da malha de controle descritas na tabela 7 apresentam uma redução expressiva (91,9% menor). Já o indicador de desempenho normalizado (IAE) descrito na tabela 6 apresentou um valor “pior” que antes da implementação das melhorias, porém, se comparar o valor absoluto com o valor padrão e limite (Figura 49) tem-se o valor dentro do esperado conforme está descrito na tabela 8. Assim como os KPIs Técnicos normalizados, os valores absolutos dos KPIs Técnicos de Variabilidade e CPK mostraram a melhora significativa da malha de controle de nível do tanque de massa refinada (LIC043) com relação à estabilidade da variável de processo (PV).

Tabela 7: Comparação das Notas Técnicas antes e depois da implementação das melhorias na malha de controle de nível do tanque de massa refinada LIC043.

KPI	Malha de Controle
	LIC - 043
Nota Técnica - Antes	373,7
Nota Técnica - Depois	30,2

Tabela 8: Comparação dos valores absolutos dos indicadores de desempenho da malha de controle de nível do tanque de massa refinada LIC043 com os valores padrões e limites utilizados no *software* Sindus OPP.

Indicadores de Desempenho	Valor Absoluto (LIC - 043)			
	Antes	Depois	Padrão	Limite
% Auto	100	100	100	85
Erro Médio	0,06	-0,05	0	1
Variabilidade	60,57	0,87	0	2
IAE	5,04	8,9	0	84
CPK	0,95	49,22	5	1
Cruzamento de SP	1	11	0	360
Percurso da Válvula	5,64	1,71	0	42
Reversão da Válvula	4	3	0	42
Saturação da Válvula	100	100	0	50

4.4 Estudo de Caso 3: Controle de Nível do Tanque de Mistura

Após os excelentes resultados obtidos com as ferramentas de gestão de malhas de controle do Sindus OPP nos estudos de caso 1 e 2, desenvolveu-se um terceiro estudo de caso na malha de controle de nível do tanque de mistura (LIC052), tanque este anteriormente identificado como tanque de máquina nº 1 por ser conjugado com o atual tanque de máquina por meio de transbordo (Figura 51).

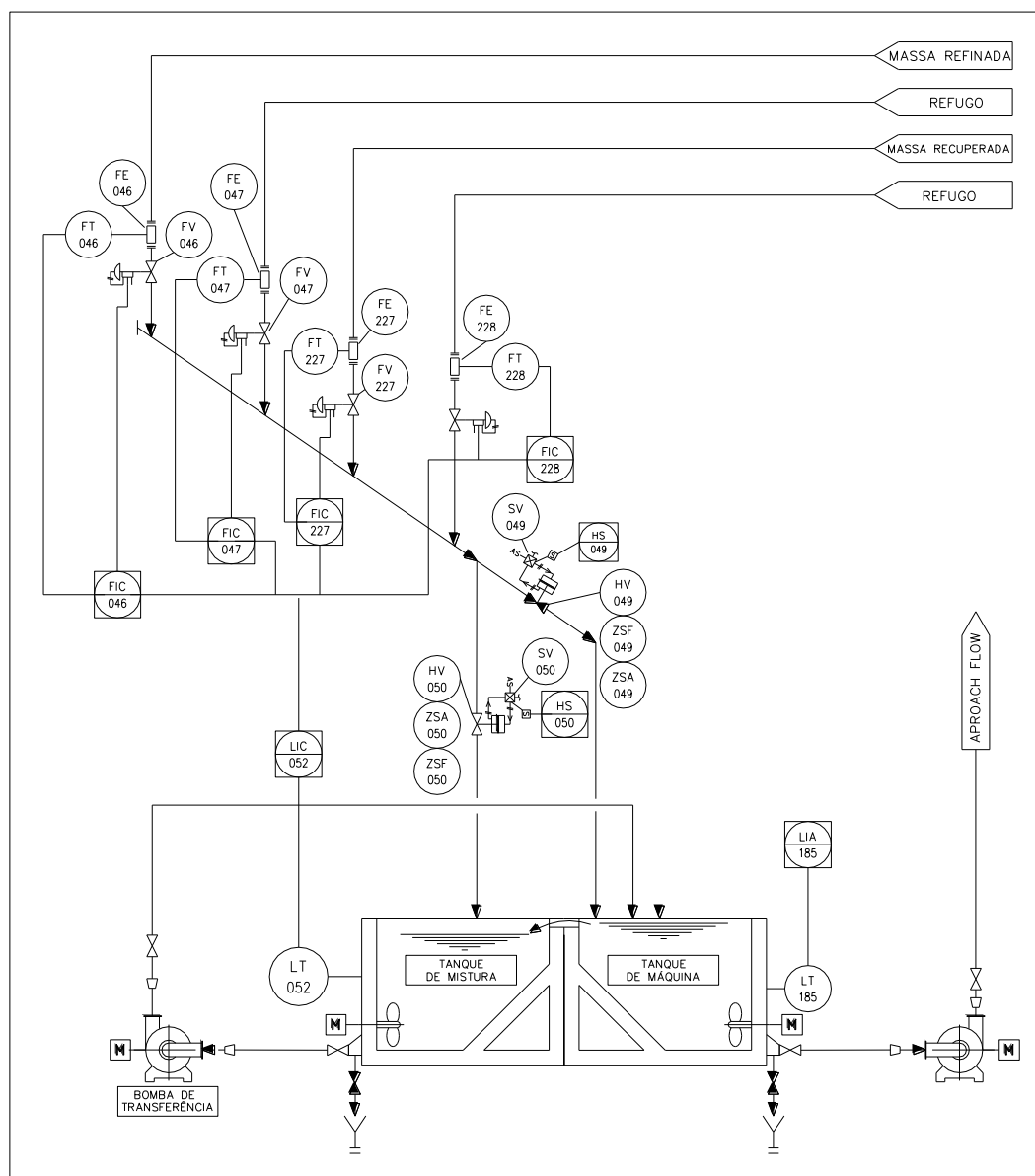


Figura 51 – Diagrama da malha de controle de nível do tanque de mistura (LIC052).

4.4.1 Descrição do problema

Inicialmente foi verificado o comportamento da malha de controle por meio das ferramentas gráficas de análise de tendência (Figura 53) e observou-se alta variabilidade da variável de processo (PV) e também obteve-se uma classificação preliminar dos problemas quanto a **controle, processo e válvula** (Figura 54). Assim como descrito no estudo de caso 2, durante o primeiro monitoramento para medição dos índices de desempenho (Figura 52), foi observado que a malha de controle LIC052 estava em modo de operação manual devido à necessidade operacional de controlar os fluxos de massa refinada, massa recuperada e refugo (FIC046, FIC227, FIC047 e FIC228). A malha de controle de nível do tanque de mistura (LIC052) estava em modo de operação manual da mesma forma que a malha de controle de nível do tanque de massa refinada (LIC043), porém, a única diferença é que os operadores ajustavam constantemente os SP (*Setpoints*) de quatro controladores (FIC046, FIC227, FIC047 e FIC228) para controlar os fluxos de abastecimento do tanque de mistura.

Da mesma forma que no estudo de caso anterior, não estava sendo utilizada a estratégia de controle que permitia controlar os fluxos de massa refinada, massa recuperada e refugo (FIC046, FIC227, FIC047 e FIC228) em modo automático/cascata, porém, quando os controladores PID escravos (FIC046, FIC227, FIC047 e FIC228) operavam em modo automático/local o controlador PID mestre (LIC052) tanto no modo automático como manual estava configurado para manter o SP (*Setpoint*) igual a PV (Variável de processo), ou seja, o SP estava em *Tracking Mode* com a PV e a malha de controle de nível do tanque de mistura (LIC052) tinha o mesmo comportamento nos modos de operação manual e automático. Com isso, a análise dos índices de desempenho foi realizada por meio dos KPIs calculados com a malha de controle (LIC052) em modo manual e os índices de desempenho referentes ao comportamento da válvula não foram considerados durante a análise como indicadores de problema na válvula de controle porque a MV (Variável manipulada) do controlador PID (LIC052) não estava atuando diretamente em uma válvula de controle.

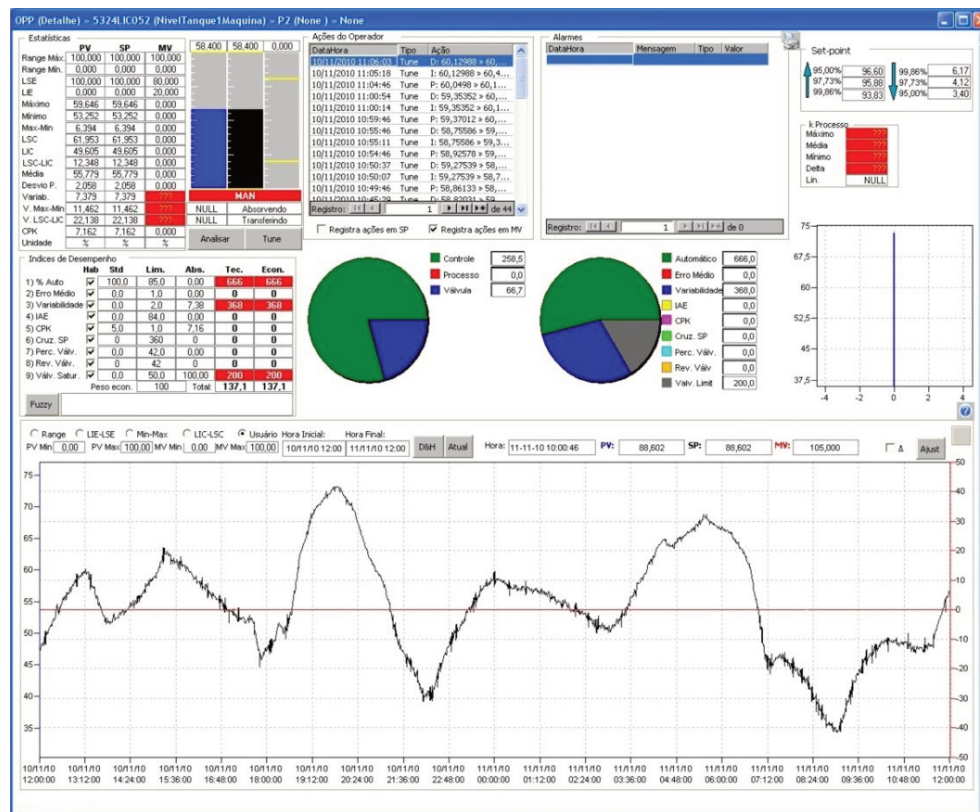


Figura 52 – Tela para análise gráfica e indicadores de desempenho do Sindus OPP durante verificação da malha de controle de nível do tanque de mistura (LIC052) em *Tracking Mode*.

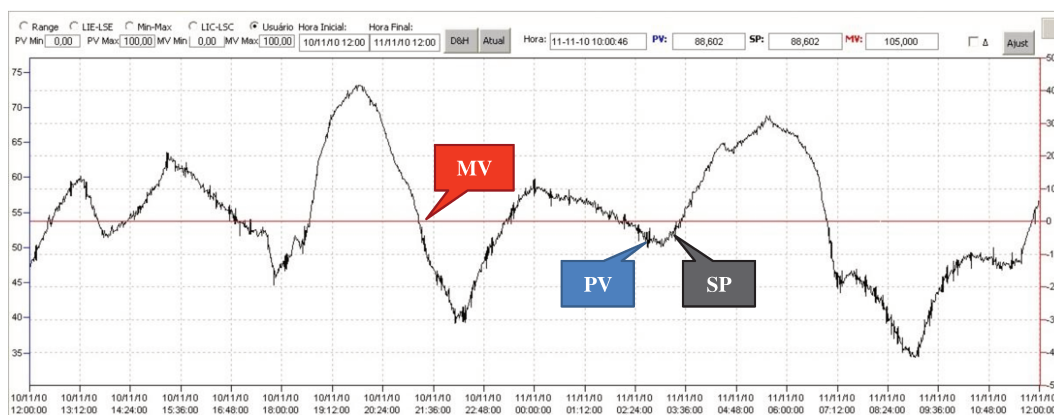


Figura 53 – Gráfico de tendência do Sindus OPP com SP, PV e MV da malha de controle de nível do tanque de mistura (LIC052) em *Tracking Mode*.

O gráfico de pizza (figura 54) é formado pelos KPIs Técnicos Normalizados distribuídos pelas áreas de controle e válvula da seguinte forma:

- **Controle:** % Auto, Erro Médio, Variabilidade e IAE;
- **Válvula:** Cruzamento de SP, Percurso, Reversão e Saturação da válvula.

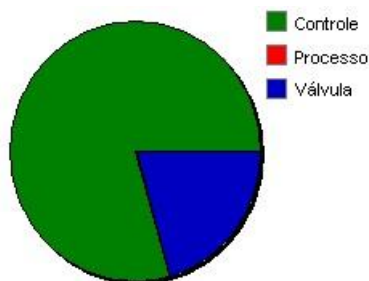


Figura 54 – Gráfico de pizza do Sindus OPP com distribuição percentual dos problemas relacionados ao controle, processo e válvula da malha de controle de nível do tanque de mistura (LIC052).

Assim como no estudo de caso 2, a malha de controle de nível do tanque de mistura (LIC052) apresentava alta variabilidade da variável de processo (PV) e de acordo com o gráfico da figura 54 a principal causa raiz estava relacionada com o controle devido ao modo de operação da malha de controle de nível (LIC052), ou seja, o nível do tanque de mistura não estava sendo controlado por meio da estratégia de controle existente em modo de operação automático.

4.4.2 Solução do problema

Para solucionar os problemas encontrados na malha de controle (LIC052) tendo como base o resultado da figura 54, onde a principal causa de variabilidade era o controle, foi necessário verificar o processo e a estratégia de controle que estava sendo utilizada.

Os problemas relacionados ao controle foram diagnosticados também na análise dos índices de desempenho realizada com o Sindus OPP, onde a malha de controle de nível do tanque de mistura (LIC052) apresentou resultado elevado de variabilidade e CPK. Os demais KPIs Técnicos apresentaram valores dentro da normalidade, ou seja, a malha em questão está com erro médio dentro do padrão (Erro Médio = 0) e baixo IAE (1). Os KPIs referentes ao comportamento da válvula de controle não foram considerados na análise devido ao modo de operação e estratégia de controle existente, mesmo apresentando valores dentro do esperado. Foi utilizado também o Sistema PIMS (*Plant Information Management Systems*) por meio dos gráficos de tendência do *Software* Excel para verificação e confirmação do comportamento da malha de controle. O gráfico de tendência representado na figura 55 confirmou o mesmo comportamento das variáveis da malha de controle de nível (LIC052) mostradas na figura 53, ou seja, alta variabilidade da variável de processo (PV). Assim como na malha de controle de nível do tanque de massa refinada (LIC043), tem-se que manter sob controle o nível do tanque de mistura (LIC052) e também manter a relação dos fluxos de entrada, porém, neste caso o agravante é que são quatro relações (quatro malhas de controle de fluxo). Para solucionar os problemas da malha de controle de nível do tanque de mistura (LIC052) foi utilizada a referência de Leiviskä (2009) para controle de nível de tanques de mistura que são controlados por fluxos de entrada, ou seja, foi desenvolvida uma nova estratégia de controle (Apêndice D) e receita similares às implementadas no controle de nível do tanque de massa refinada (LIC043) conforme as figuras 56 e 57, porém, mantendo a configuração mestre/escravo existente, onde o controlador PID mestre (LIC052) quando em modo de operação automático envia SP Remoto para os controladores PID escravos (FIC046, FIC047, FIC227 e FIC228) quando em modo de operação automático/cascata. Após a implementação da nova estratégia de controle, foi realizada também uma sintonia da malha de controle e como resultado houve redução da variabilidade e do CPK.

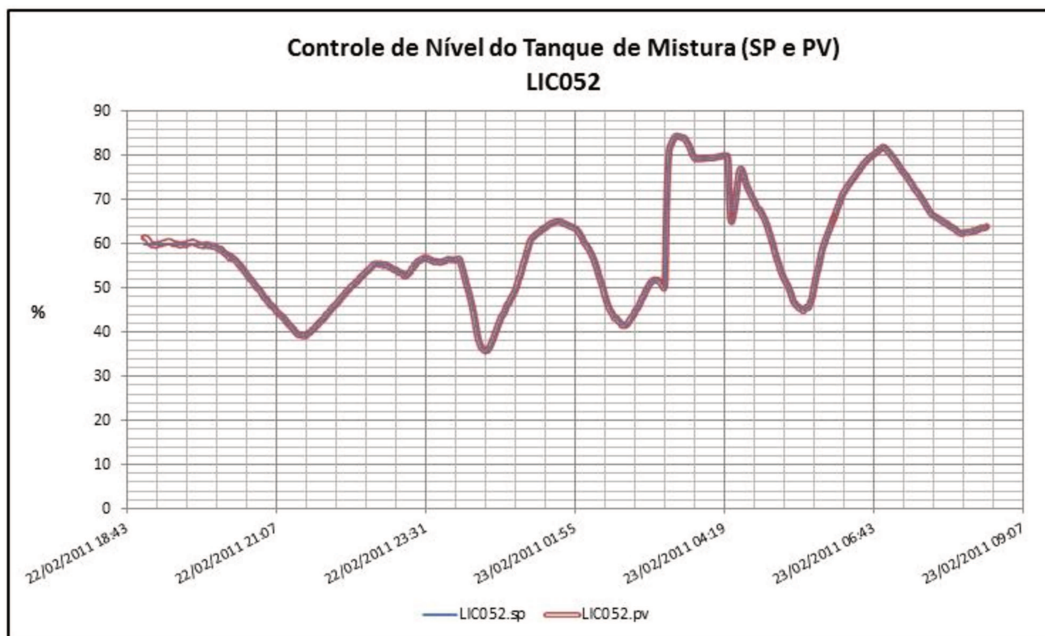


Figura 55 – Gráfico de tendência do SP e PV da malha de controle de nível do tanque de mistura (LIC052) em *Tracking Mode*, desenvolvido no Excel com aquisição dos dados por meio do Sistema PIMS.

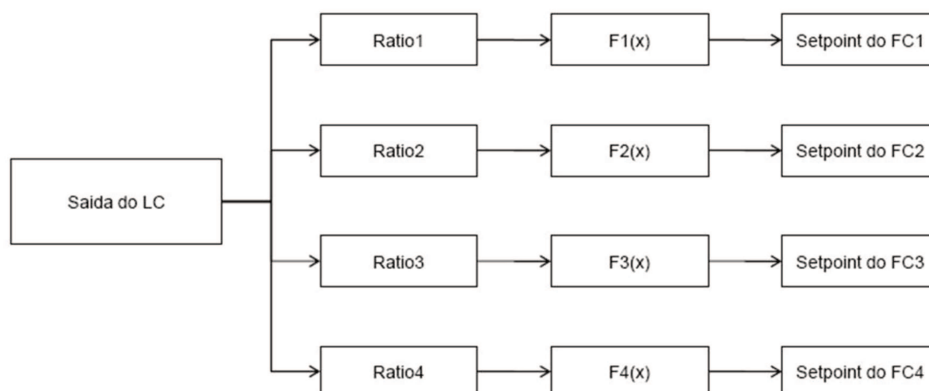


Figura 56 – Nova estratégia do controle de nível do tanque de mistura (LIC052).

	LC052 (%)	RATIO	CsI	SP (L/MIN)	REAL (L/MIN)	T/H	%
FC046 (MASSA REFINADA)	25,71	60	4,5	2285,7	2285,7	6,2	60
FC047 (REFUGO)		35	4	1500,0	1500,0	3,6	35
FC227 (RECUPERADA)		5	4	214,3	214,3	0,5	5
FC228 (REFUGO)		0	3	0,0	0,0	0,0	0
					4000,0	10,3	

Figura 57 – Receita para controle do nível do tanque de mistura (LIC052).

4.4.3 Resultados obtidos

No terceiro estudo de caso, o Sindus OPP foi novamente eficiente no diagnóstico por meio dos KPIs Técnicos. A redução da variabilidade da malha de controle de nível (LIC052) foi possível após a implementação da nova estratégia de controle e a realização da sintonia de malha. Os principais resultados como a **redução na variabilidade do nível** (98,3% menor) e também **no CPK** podem ser comprovados no Sindus OPP (figura 58) e nos gráficos de tendência da Planilha Excel com dados do Sistema PIMS (figura 59).

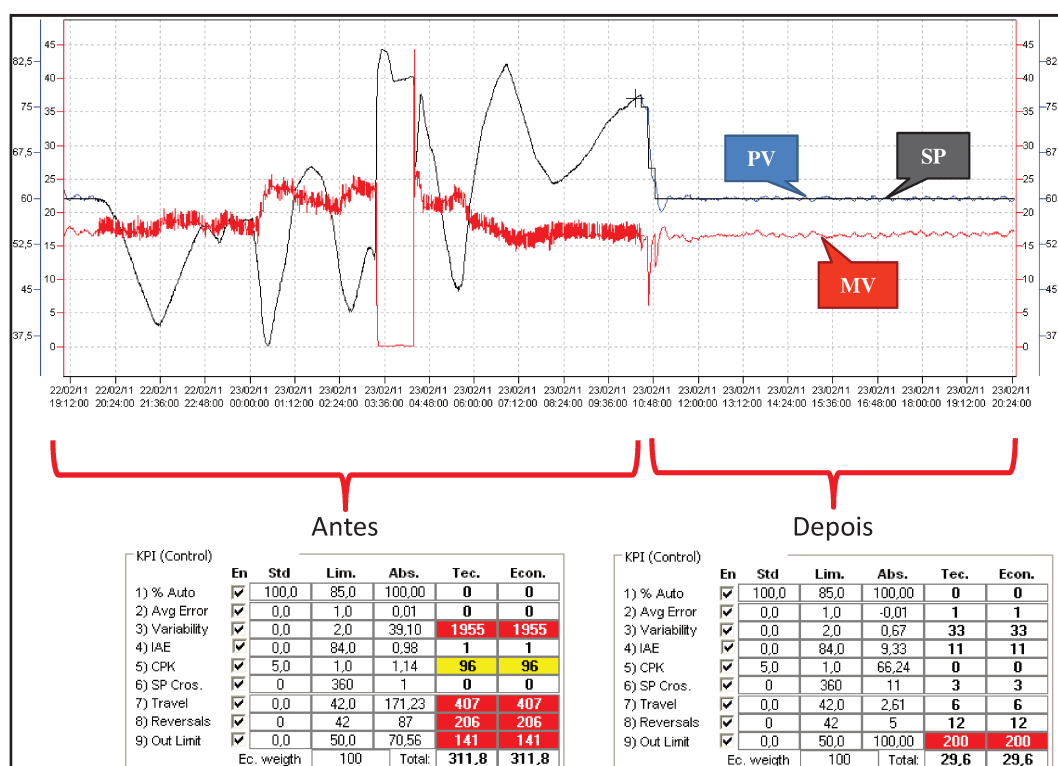
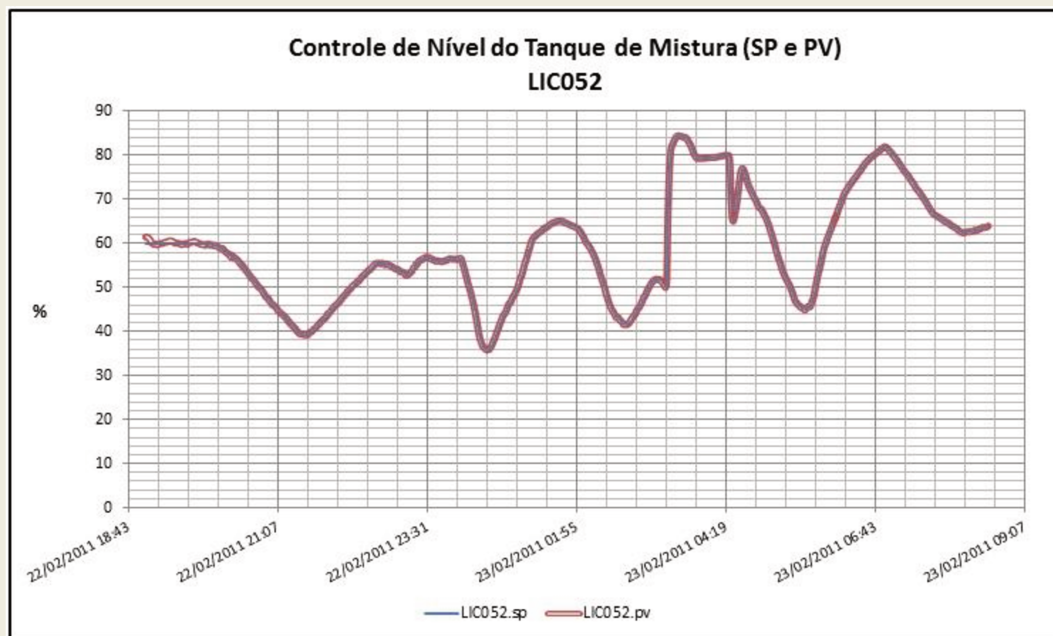
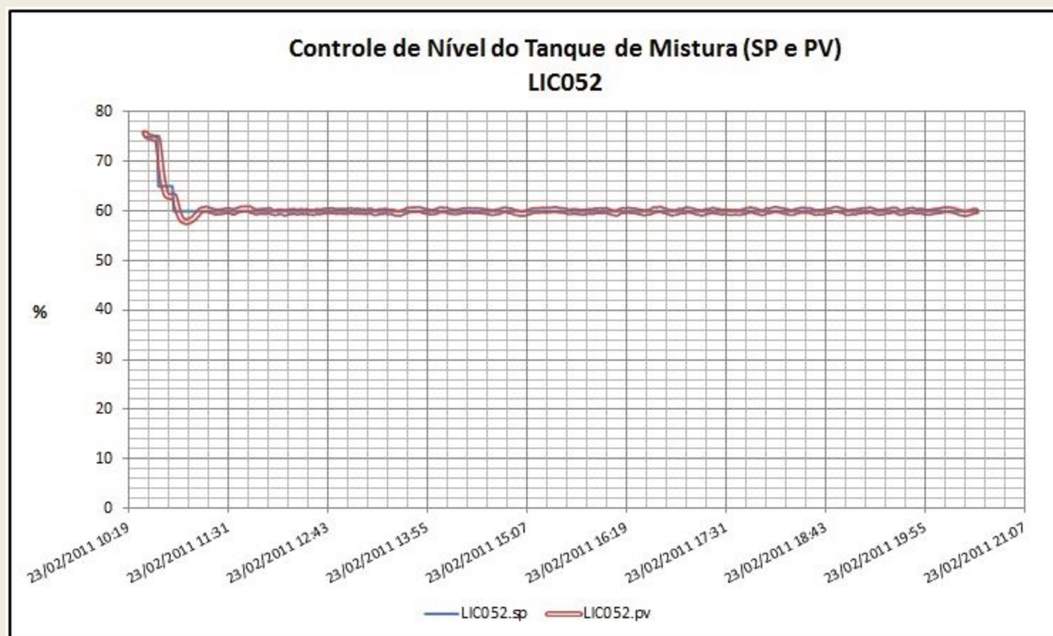


Figura 58 – Comparação da malha de controle de nível do tanque de mistura (LIC052) em *Tracking Mode* (Antes) e automático/cascata (Depois), por meio do Sindus OPP.



(a)



(b)

Figura 59 – Comparação do SP e PV da malha de controle de nível do tanque de mistura (LIC052) operando antes em *Tracking Mode* (a) e depois em automático/cascata (b), por meio dos gráficos de tendência do Excel com aquisição dos dados pelo Sistema PIMS.

Na tabela 9 é apresentado um comparativo dos KPIs Técnicos antes e depois da implementação das melhorias na malha de controle de nível do tanque de mistura (LIC052).

Tabela 9: Comparação dos KPIs Técnicos antes e depois da implementação das melhorias na malha de controle de nível do tanque de mistura LIC052.

Indicadores de Desempenho	KPI Técnico (LIC - 052)	
	Antes	Depois
% Auto	0	0
Erro Médio	0	1
Variabilidade	1955	33
IAE	1	11
CPK	96	0
Cruzamento de SP	0	3
Percurso da Válvula	407	6
Reversão da Válvula	206	12
Saturação da Válvula	141	200

4.4.3.1 Análise dos resultados do Estudo de Caso 3

Com relação ao Estudo de Caso 3, os resultados da malha de controle de nível do tanque de mistura (LIC052) descritos na tabela 9, apresentaram valores excelentes dos KPIs Técnicos de Variabilidade e CPK após a solução dos problemas. As Notas Técnicas da malha de controle descritas na tabela 10 confirmam os resultados com uma redução considerável (90,5% menor). Após a implementação das melhorias, o valor absoluto do indicador de desempenho (IAE) descrito na tabela 9 apresenta um valor “pior”, mas se comparado com os valores padrão e limite o mesmo está dentro da faixa esperada (Tabela 11). Em resumo, por meio dos KPIs Técnicos foi possível “fotografar” a malha de controle antes e depois para comparar o desempenho da mesma, ou seja, permitiu observar com maior facilidade os pontos críticos e confirmar a estabilidade desejada.

Tabela 10: Comparação das Notas Técnicas antes e depois da implementação das melhorias na malha de controle de nível do tanque de mistura LIC052.

KPI	Malha de Controle
	LIC - 052
Nota Técnica - Antes	311,8
Nota Técnica - Depois	29,6

Tabela 11: Comparação dos valores absolutos dos indicadores de desempenho da malha de controle de nível do tanque de mistura LIC052 com os valores padrões e limites utilizados no *software* Sindus OPP.

Indicadores de Desempenho	Valor Absoluto (LIC - 052)			
	Antes	Depois	Padrão	Limite
% Auto	100	100	100	85
Erro Médio	0,01	-0,01	0	1
Variabilidade	39,1	0,67	0	2
IAE	0,98	9,33	0	84
CPK	1,14	66,24	5	1
Cruzamento de SP	1	11	0	360
Percurso da Válvula	171,23	2,61	0	42
Reversão da Válvula	87	5	0	42
Saturação da Válvula	70,56	100	0	50

4.5 Perenização dos resultados das malhas de controle críticas da preparação de massa

Com objetivo de perenizar os resultados obtidos e fechar o ciclo DMAIC na metodologia proposta, foi utilizada a etapa de controle, que visa controlar o processo utilizando as ferramentas de gestão *on-line* das malhas do Sindus OPP.

4.5.1 DMAIC: Controlar

Nesta etapa foi realizada a gestão *on-line* das malhas de controle utilizando o Sindus OPP, ou seja, o *software* Sindus OPP permitiu monitorar em tempo real as Notas Técnicas das malhas de controle e com isso fazer o controle do processo por meio de KPIs.

A medição do desempenho das malhas de controle dos estudos de caso 1, 2 e 3 por meio das **Notas Técnicas** descrita na tabela 12, apresentou um excelente resultado que foi obtido após a implementação das melhorias e para manter estes resultados deve-se comparar as Notas Técnicas da Tela de Controle de KPIs no Sindus OPP (figuras 60 e 61) com os valores *benchmark* das respectivas malhas de controle, que neste caso estão descritos na tabela 13.

Tabela 12: Comparação de desempenho das malhas de controle por meio das Notas Técnicas.

KPI	Malhas de Controle		
	LIC - 038	LIC - 043	LIC - 052
Nota Técnica - Antes	567,4	373,7	311,8
Nota Técnica - Depois	19,9	30,2	29,6

Home OPP-Process

OPP-Process » KPIs (Control) » Analysis by Loops

538LIC041 (TqSeparador CondensA4) » P2 (None) » None

DET TUNE PSD \$\$\$ PRODC INFO

Tag	Nota Econ.	Nota Tec.	% Auto	Erro Médio	Variab	IAE	CPK	Cruz. SP	Perc. Valv.	Rev. Valv.	Valv. Lim.
538LIC041	5945	5945	0,0	-223,53	600,72	102,0	-0,11	0	0,0	0	100,0
5330FC061	4517	4517	0,0	-94,43	523,52	3399,2	0,13	2	0,0	0	100,0
5330FC058	3578	3578	0,0	160,43	144,62	6676,6	0,46	16	0,0	0	100,0
5330FC063	3236	3236	0,0	-96,25	287,59	3465,0	-0,13	0	0,0	0	100,0
5330FC060	2738	2738	0,0	-89,80	216,48	3235,9	0,31	2	0,0	0	100,0
5330FC057	2718	2718	0,0	-99,45	185,54	3580,3	0,36	0	0,0	0	100,0
5316FC008	2288	2288	100,0	-99,24	122,18	3572,7	0,55	0	0,0	0	100,0
5320FC105	2249	2249	100,0	-99,37	114,76	3577,3	0,58	0	0,0	0	100,0
5326FC138	2179	2179	0,0	-100,09	85,99	3603,4	-0,70	0	0,0	0	100,0
5330FC073	1944	1944	100,0	-106,06	39,53	3818,0	-1,69	0	0,0	0	100,0
5320LIC090	1880	1880	100,0	-110,82	2,65	3989,7	-25,16	0	0,0	0	100,0
5320FC008	1876	1876	100,0	-99,80	46,77	3592,9	1,43	0	0,0	0	100,0
5322LIC131	1873	1873	100,0	-103,37	0,97	3721,3	-68,85	0	0,0	0	100,0
5320FC106	1863	1863	100,0	-98,43	48,38	3543,3	1,38	0	0,0	0	100,0
5330FC059	1844	1844	0,0	-99,28	29,62	3574,1	2,25	0	0,0	0	100,0
5334LIC001	1805	1805	0,0	-101,52	2,71	3654,6	-24,58	0	0,0	0	100,0
5324FC045	1779	1779	0,0	-99,87	16,99	3595,4	3,92	0	0,0	0	100,0
5324LIC056	1768	1768	0,0	-100,22	4,19	3608,1	-15,92	0	0,0	0	100,0
5345LIC026	1765	1765	100,0	108,10	0,88	3891,7	-2,96	0	0,0	0	100,0
5316FC025	1755	1755	100,0	-100,24	21,42	3608,9	-3,11	0	0,0	0	100,0
5012FC482	1751	1751	0,0	-99,33	14,01	3575,8	4,76	0	0,0	0	100,0
5324LIC005	1737	1737	0,0	-99,86	10,08	3595,2	6,62	0	0,0	0	100,0
5324FC018	1720	1720	0,0	-99,86	6,93	3594,9	9,62	0	0,0	0	100,0
5324LIC007	1719	1719	0,0	-99,78	6,95	3592,3	9,59	0	0,0	0	100,0
5324LIC008	1717	1717	0,0	-99,90	6,41	3596,6	10,39	0	0,0	0	100,0
5324LIC004	1711	1711	0,0	-99,83	5,51	3594,0	12,09	0	0,0	0	100,0
5330FC062	1711	1711	0,0	-99,76	5,63	3591,3	11,84	0	0,0	0	100,0
5330FC004	1710	1710	100,0	-98,53	21,31	3547,2	3,13	0	0,0	0	100,0
5322LIC132	1708	1708	100,0	-99,64	18,07	3587,0	3,69	0	0,0	0	100,0
5324LIC006	1705	1705	0,0	-99,79	4,51	3592,4	14,77	0	0,0	0	100,0
5324LIC010	1691	1691	0,0	-99,84	1,80	3594,2	37,03	0	0,0	0	100,0
5324LIC009	1685	1685	0,0	-99,82	0,82	3593,6	80,95	0	0,0	0	100,0
5324FC041	1670	1670	0,0	-97,69	4,13	3517,0	16,14	0	0,0	0	100,0
5324LIC052	1378	1378	100,0	84,65	0,21	3047,6	0,90	0	0,0	0	100,0
5012LIC483	1313	1313	0,0	-75,60	0,21	2757,6	321,59	0	0,0	0	100,0
5320FC104	1282	1282	0,0	-74,44	0,78	2679,8	85,85	0	0,0	0	100,0
5324FC014	1276	1276	0,0	-74,11	0,66	2668,0	101,63	0	0,0	0	100,0
5336LIC120	1273	1273	100,0	-78,59	0,62	2829,2	107,56	0	0,0	0	100,0
5322FC134	1264	1264	0,0	-73,31	0,83	2639,1	80,72	0	0,0	0	100,0
5322FC137	1129	1129	0,0	-64,01	3,11	2394,4	21,41	0	0,0	0	100,0
5320FC108	1096	1096	0,0	0,00	0,19	0,0	-354,68	0	0,0	0	100,0
5320FC089	1006	1006	0,0	0,00	161,55	0,0	0,41	0	0,0	0	100,0
5324FC051	809	809	0,0	-44,79	0,42	1612,3	157,86	0	0,0	0	100,0
5330LIC187	809	809	0,0	0,00	0,27	0,0	-251,25	0	0,0	0	100,0
5320FC003	750	750	100,0	-45,34	1,50	1632,3	44,33	0	0,0	0	100,0
5380FC017	744	744	0,0	0,00	0,29	0,0	-227,52	0	0,0	0	100,0
5324LIC660	721	721	0,0	0,00	110,35	0,0	0,60	0	0,0	0	100,0
5380FC045	689	689	0,0	0,00	104,48	0,0	0,64	0	0,0	0	100,0
5380FC012	652	652	0,0	-0,49	96,75	10,1	0,69	0	0,0	0	100,0
5324FC020	639	639	0,0	33,90	0,95	1220,5	69,89	0	0,0	0	100,0
5320FC111	634	634	0,0	-31,79	5,97	1144,3	11,17	0	0,0	0	100,0

Registro: 1 de 165

Figura 60 – Exemplo da Tela de Controle de KPIs do Sindus OPP.

Home OPP-Process

OPP-Process » KPIs (Control) » Analysis by Loops

538LIC041 (TqSeparador CondensA4) » P2 (None) » None

DET TUNE PSD \$\$\$ PRODC INFO

Tag	Nota Econ.	Nota Tec.	% Auto	Erro Médio	Variab	IAE	CPK	Cruz. SP	Perc. Valv.	Rev. Valv.	Valv. Lim.
5330FC061	4517	4517	0,0	-94,43	523,52	3399,2	0,13	2	0,0	0	100,0
5330FC058	3578	3578	0,0	160,43	144,62	6676,6	0,46	16	0,0	0	100,0
5330FC063	3236	3236	0,0	-96,25	287,59	3465,0	-0,13	0	0,0	0	100,0

Figura 61 – Exemplo de Monitoramento das Notas Técnicas de Malhas de Controle por meio da Tela de Controle de KPIs do Sindus OPP.

Tabela 13: Valores *benchmark* dos KPIs das malhas de controle (LIC038, 043 e 052).

KPI	Malhas de Controle		
	LIC - 038	LIC - 043	LIC - 052
Nota Técnica	19,9	30,2	29,6

A utilização do *software* Sindus OPP para gestão das malhas de controle descritas nos Estudos de Caso 1, 2 e 3 foi de fundamental importância para obter a estabilidade de processo necessária no Sistema de Preparação de Massa da Máquina de Papel. Após a utilização da etapa de controle fechou-se o ciclo DMAIC e com este objetivo alcançado foi possível verificar outros sistemas importantes dentro da preparação de massa, que é o sistema de refinação (Apêndice B) e o controle de carga mineral na fabricação de papel (Apêndice C).

5 CONCLUSÕES

Por meio dos resultados obtidos com os estudos de caso realizados numa fábrica de papel, mais especificamente no Sistema de Preparação de Massa de uma Máquina de Papel, foi possível concluir que as ferramentas de gestão *on-line* de malhas de controle baseadas nos indicadores de desempenho (% Auto, Erro Médio, Variabilidade, IAE, CPK, Cruzamento de SP, Percurso da Válvula, Reversão e Saturação da Válvula) utilizadas no *software* Sindus OPP são eficazes, pois, além de práticas, permitiram fazer a gestão das malhas com foco em redução de variabilidade e também obter ganhos reais (qualitativos e quantitativos) após as melhorias realizadas nas malhas de controle.

Sendo assim, a hipótese defendida neste trabalho é verdadeira, pois, a partir dos indicadores de desempenho (KPIs) foi possível avaliar, analisar e solucionar os problemas das malhas de controle, ou seja, a eficácia dos indicadores de desempenho para gestão de malhas de controle foi comprovada com os resultados obtidos. Na malha de controle de nível do tanque de água fresca (**LIC038**) os principais resultados foram com a redução na variabilidade do nível (96,9% menor) e também na atividade da válvula (98,3% menor). Além dos excelentes resultados obtidos por meio dos KPIs Técnicos de Variabilidade, Percurso da Válvula, IAE e CPK, as Notas Técnicas da malha de controle também apresentaram uma redução drástica (96,5% menor). A redução da variabilidade da malha de controle de nível do tanque de massa refinada (**LIC043**) pôde ser confirmada por meio dos KPIs Técnicos de Variabilidade (98,6% menor), CPK e as Notas Técnicas da malha de controle que apresentaram uma redução expressiva (91,9% menor). Na malha de controle de nível do tanque de mistura (**LIC052**) os KPIs Técnicos de Variabilidade e CPK apresentaram valores excelentes, com destaque para a redução da variabilidade do nível (98,3% menor).

Além disso, o objetivo geral deste trabalho foi alcançado a partir dos objetivos específicos, ou seja, foi avaliada a potencialidade da ferramenta de gestão de malhas de controle (Sindus OPP) e escolhidos os indicadores de desempenho adequados à análise *on-line* das malhas de controle; foram implementadas as ferramentas de gestão de malhas com os respectivos indicadores de desempenho no sistema de controle da máquina de papel; e depois, foi possível avaliar o comportamento das malhas de controle na preparação de

massa da máquina de papel, priorizando as malhas com pior desempenho. Em resumo, foi utilizada a metodologia de gestão *on-line* de malhas de controle baseada em indicadores de desempenho, com foco em melhoria contínua no processo de fabricação de papel.

Alguns pontos importantes foram observados na utilização dos indicadores de desempenho para gestão *on-line* de malhas de controle, sendo estes:

- ✓ Não é possível ter uma avaliação assertiva quanto ao desempenho de uma malha de controle se utilizar indicadores de desempenho individualmente, seja o mesmo normalizado ou valor absoluto;
- ✓ Uma análise correta de uma malha de controle deve ser feita a partir da avaliação dos indicadores de desempenho normalizados (KPIs Técnicos) e dos valores absolutos dos indicadores de desempenho com relação ao padrão e limites;
- ✓ O gráfico de pizza utilizado para demonstrar um resumo dos indicadores de desempenho quanto a controle, processo e válvula, mostrou-se uma ferramenta prática no diagnóstico inicial em conjunto com o gráfico de tendência;
- ✓ Os indicadores de desempenho de válvulas de controle, se fora dos limites, podem ser um reflexo de problemas no controle como foi o estudo de caso 1, onde não havia problemas na válvula de controle e sim na sintonia da malha de controle;
- ✓ Para fazer uma correta comparação entre malhas de controle, faz-se necessário utilizar a Nota Técnica, pois a mesma é composta por todos os KPIs Técnicos (indicadores de desempenho normalizados);
- ✓ Nem sempre um valor “pior” de indicadores de desempenho após uma mudança de estratégia de controle, sintonia de malha ou revisão de válvula de controle é sinal de que a malha de controle continua com um desempenho ruim, porém, estes indicadores de desempenho (em valores absolutos) devem estar dentro dos valores limites e padrões;
- ✓ Os valores *benchmark* (KPIs Técnicos e Nota Técnica) para malhas de controle devem ser obtidos quando todos os indicadores de desempenho em valores absolutos estiverem dentro dos valores limites e padrões;

- ✓ A gestão *on-line* das malhas de controle deve ser realizada a partir da Nota Técnica para gerenciamento global, ou seja, gestão de todas as malhas de controle do processo em questão, podendo assim comparar o desempenho das malhas e priorizar as malhas com os piores desempenhos;
- ✓ A Nota Técnica (*benchmark*) deve ser um gatilho quando a Nota Técnica *on-line* de uma malha de controle estiver maior, ou seja, neste caso deverão ser verificados se os indicadores de desempenho estão dentro dos valores limites e padrões, assim como utilizar as ferramentas gráficas para um melhor diagnóstico;

O *software* Sindus OPP por meio dos indicadores de desempenho mostrou-se uma ferramenta prática e de fácil interpretação num ambiente industrial, pois, as ferramentas gráficas permitem um diagnóstico inicial da malha e os indicadores de desempenho com seus valores normalizados e absolutos permitem uma análise mais criteriosa a partir dos valores limites e padrões propostos pelo *software*, ou seja, a equipe técnica de automação e controle de processo consegue trabalhar com o Sindus OPP e gerenciar as malhas de controle sem grandes complicações.

Um fator decisivo para obter os resultados apresentados nos estudos de caso foi o conhecimento de processo, pois para encontrar as soluções das novas estratégias de controle foi necessário um trabalho em equipe (automação, processo e operação). Primeiramente a equipe de operação apresentou as dificuldades e os padrões de operação, posteriormente a equipe de processo em conjunto com a equipe de automação descreveram as novas estratégias de controle que foram traduzidas em novos algoritmos de controle para o SDCD (Sistema Digital de Controle Distribuído). A sinergia entre as equipes de automação, processo e operação fazem a diferença num ambiente industrial por meio do compartilhamento de informações e a disseminação de conhecimento.

A Gestão de Malhas de Controle ou CLM (*Control Loop Management*) baseada em metodologias automáticas para avaliar desempenho das malhas de controle tem-se mostrado uma ferramenta importante para manter o perfeito funcionamento das malhas de controle e garantir a estabilidade do processo. Este trabalho conseguiu a partir do *software* Sindus OPP seguir a tendência citada nos trabalhos de Veronesi e Visioli (2010),

Salahshoor e Arjomandi (2010) e Yu et al., (2011) e justificar a utilização de indicadores de desempenho como: IAE, CPK, Cruzamento de SP, Percurso da Válvula de Controle, Erro Médio, Variabilidade, entre outros na gestão *on-line* de malhas de controle.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para trabalhos futuros em Gestão de Malhas de Controle pode-se citar os seguintes tópicos:

- ✓ Desenvolver trabalhos de pesquisa que utilizem a metodologia para detecção de oscilação em malhas de controle provenientes de *Stiction* (Horch, 1999 e Stenman et al., 2003) em conjunto a metodologia DMAIC e indicadores de desempenho, com objetivo de avaliação não intrusiva do funcionamento das válvulas de controle;
- ✓ Elaborar um *troubleshooting* automático para um diagnóstico mais preciso a partir do gráfico de pizza que representa as três grandes áreas com possíveis problemas (controle, processo e válvula), ou seja, baseado nos KPIs Técnicos o *software* poderá sugerir mais detalhadamente os problemas referentes ao controle, processo e válvulas de controle;
- ✓ Utilizar redes neurais para gestão de malhas de controle, dando continuidade ao trabalho desenvolvido por Farenzena (2008) e desenvolver estudos de caso na indústria com objetivo de superar o maior desafio referente à tomada de decisão na solução dos problemas das malhas de controle: o conhecimento de processo;
- ✓ Desenvolver aplicativos baseados em novas tecnologias que permitam fazer gestão *on-line* das malhas de controle num determinado processo de forma remota via telefonia móvel;
- ✓ Avaliar os benefícios e funcionalidades da ferramenta *Treemap* na visualização gráfica de indicadores de desempenho, tendo em vista uma nova tendência de mercado que está sendo utilizada pelo *software* Sindus OPP da Andritz AG.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAÚJO, C. P. **Curso Básico de Fabricação de Papel**. São Paulo: ABTCP - Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel, 2010.

BEGA, E. A.; DELMÉE, G. J.; COHN, P. E.; BULGARELLI, R.; KOCH, R.; FINKEL, V. S. **Instrumentação Industrial**. Rio de Janeiro: Interciência e Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás, 2003. ISBN 85-7193-089-9.

BIERMANN, C. **Handbook of Pulping and Papermaking**. Oregon: Academic Press - Oregon State University, 1996. ISBN 978-0-12-097362-0.

BUDEIZ, S. D. **O uso do carbonato de cálcio precipitado (PCC) na indústria de papel como carga mineral**. 2007. Monografia de Pós-Graduação *Lato Sensu* em Tecnologia de Celulose e Papel – Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Viçosa – UFV, Viçosa, MG.

CAMPOS, M. C. M.; GOMES, M. V. C.; MOREIRA, V. D.; LIMA, M. F.; SILVA, J. R. Advanced control and optimization of a natural gas plant – Benefits of the new regulatory control strategy. **10th International Symposium on Process Systems Engineering**, Elsevier, p. 1683-1688, 2009.

FARENZENA, M. **Novel methodologies for assessment and diagnostics in control loop management**. 2008. Tese de Doutorado – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre, RS.

FONSECA, M. O.; SILVA, C.; TORRES, B. S. Avaliação de desempenho e auditoria de malhas de controle. **Revista InTech**, n. 63, p. 32-37, 2004.

GRANT, J.; YOUNG, J. H.; WATSON, B. G. **Paper and Board Manufacture: A general account of its history, processes and applications**. London: Technical Division - The British Paper and Board Industry Federation, 1978.

HÄGGLUND, T. A control loop performance monitor. **Control Engineering Practice**, 3, p. 1543-1551, 1995.

HÄGGLUND, T. Industrial application of automatic monitoring tools. **Control Engineering Practice**, Proceed. 15th IFAC., 2002.

HÄGGLUND, T. Automatic on-line estimation of backlash in control loops. **Journal of Process Control**, 17, p. 489-499, 2007.

HARRIS, T. Assessment of closed loop performance. **Canadian Journal of Chemical Engineering**, 67, p. 856-861, 1989.

HARRIS, T.; DESBOROUGH, L. Performance assessment measures for univariate feedback control. **Canadian Journal of Chemical Engineering**, 70, p. 1186-1197, 1992.

HARRIS, T.; DESBOROUGH, L. Performance assessment measures for univariate feedforward/feedback control. **Canadian Journal of Chemical Engineering**, 71, p. 605-616, 1993.

HOO, K. A.; PIOVOSO, M. J.; SCHNELLE, P. D.; ROWAN, D. A. Process and controller performance monitoring: overview with industrial applications. **International Journal of Adaptive Control and Signal Processing**, v. 17, p. 635-662, 2003.

HORCH, A. A simple method for detection of stiction in control valves. **Control Engineering Practice**, v. 7, p. 1221-1231, 1999.

HORTON, E. C.; FOLEY, M. W.; KWOK, K. E. Performance assessment of level controllers. **International Journal of Adaptive Control and Signal Processing**, v. 17, p. 663-684, 2003.

HUGO, A. J. Performance assessment of single-loop industrial controllers. **Journal of Process Control**, v. 16, p. 785-794, 2006.

JELALI, M. An overview of control performance assessment technology and industrial applications. **Control Engineering Practice**, 14, p. 441-466, 2006.

KEMPF, A. O. **Avaliação de desempenho de malhas de controle**. 2003. Dissertação de Mestrado – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre, RS.

LEIVISKÄ, K. **Papermaking Science and Technology: Process and Maintenance Management**. Helsinki: Fapet Oy, 2009.

LI, Q.; WHITELEY, J. R.; RHINEHART, R. R. A relative performance monitor for process controllers. **International Journal of Adaptive Control and Signal Processing**, v. 17, p. 685-708, 2003.

LONGHI, L. G. S.; KEMPF, A.; LUSA, L. P.; CAUMO, L.; FLECK, T. D.; TEIXEIRA, H. C. G.; CORTEZ, C. A. C.; TRIERWEILER, J. O. Solução em tempo real para o gerenciamento de malhas de controle aplicada a uma Unidade de Coqueamento Retardado. **Revista Petro e Química**, v. 30, p. 74-79, 2008.

LONGHI, L. G. S.; REGINATO, A. S.; LUSA, L. P.; GONZALES, S. S.; FLECK, T. D.; CORTEZ, C. A. C.; TEIXEIRA, H. C. G. Control loop performance assessment and improvement of an industrial hydrogen generation unit. **10th International Symposium on Process Systems Engineering**, Elsevier, p. 1677-1682, 2009.

LYNCH, C. B.; DUMONT, G. A. Control Loop Performance Monitoring. **IEEE Transactions on Control Systems Technology**, v. 4, n. 2, p. 185-192, 1996.

MAKAROVSKY, C.; ARBEX, R. T. Reduzindo custos variáveis, diminuindo as variabilidades dos processos. **Revista InTech**, n. 63, p. 38-44, 2004.

NEITZEL, I.; SANTOS, W. P.; PESCH, L. R. Ferramentas para identificação de processos, sintonia de controladores e avaliação de performance de laços de controle. **Revista Controle & Instrumentação**, p. 70-76, 2003.

PASSOS, L. F. D. **Metodologia para Auditoria e Validação Ampla de Malhas de Controle – Estudo de Caso para uma Caldeira Industrial**. 2009. Dissertação de Mestrado – Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, Belo Horizonte, MG.

PATWARDHAN, R. S.; SHAH, S. L. Issues in performance diagnostics of model-based controllers. **Journal of Process Control**, v. 12, p. 413-427, 2002.

PAULONIS, M. A.; COX, J. W. A practical approach for large scale controller performance assessment, diagnosis and improvement. **Journal of Process Control**, 13, p. 155-168, 2003.

QIN, S. J. Control performance monitoring – a review and assessment. **Computers and Chemical Engineering**, v. 23, p. 173-186, 1998.

SALAHSHOOR, K.; ARJOMANDI, R. K. Comparative Evaluation of Control Loop Performance Assessment Schemes in an Industrial Chemical Process Plant. **Chinese Control and Decision Conference**, p. 2603-2608, 2010.

SCHUCK, D. **Módulo Sindus Process – Manual de Conceitos**. Porto Alegre: Sindus Andritz, 2009.

SILVA, F. V. **Comparação do desempenho de um sistema de refrigeração para resfriamento de líquido, controlado a diferentes modos de controle**. 2003. Tese de Doutorado – Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, Campinas, SP.

SILVA, L. A.; TORRES, B. S.; REIS, W. Avaliação de desempenho e sintonia de malhas de controle de temperatura e pressão. **Revista Controle e Instrumentação**, n. 113, p. 73-77, 2006.

SORAIHI, G. H. A. **Control loop performance monitoring in an industrial setting**. 2006. Thesis for degree of Master of Engineering – School of Electrical and Computer Engineering Science, RMIT University, Melbourne – Australia.

STENMAN, A.; GUSTAFSSON, F.; FORSMAN, K. A segmentation-based method for detection of stiction in control valves. **International Journal of Adaptive Control and Signal Processing**, v. 17, p. 625-634, 2003.

TAPPI. **How paper is made: An overview of pulping and papermaking from woodyard to finished product**. Atlanta: TAPPI PRESS, 1997. 10 CD-ROM.

THORNHILL, N. F.; HÄGGLUND, T. Detection and diagnosis of oscillation in control loops. **Control Engineering Practice**, v. 5, n. 10, p. 1343-1354, 1997.

THORNHILL, N. F.; HORCH, A. Advances and new directions in plant-wide disturbance detection and diagnosis. **Control Engineering Practice**, v. 15, p. 1196-1206, 2007.

THORNHILL, N. F.; HUANG, B.; SHAH, S. L. Controller performance assessment in set point tracking and regulatory control. **International Journal of Adaptive Control and Signal Processing**, v. 17, p. 709-727, 2003.

THORNHILL, N. F.; OETTINGER, M.; FEDENCZUK, P. Refinery-wide control loop performance assessment. **Journal of Process Control**, v. 9, p. 109-124, 1999.

TORRES, B. S.; SANTOS, D. G.; FONSECA, M. O. Implementação de estratégias de controle multimalha utilizando a norma IEC 61131-3 e ferramentas de PIMS. **3º Congresso Internacional de Automação, Sistemas e Instrumentação (ISA)**, 2003.

TORRES, B. S.; HORI, E. S. Análise de desempenho de malhas de controle em indústrias petroquímicas. **4º Seminário Nacional de Controle e Automação (SNCA)**, 2005.

TRIOLA, M. F. **Introdução à Estatística**. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos, 2005. ISBN 85-216-1431-4.

VERONESI, M.; VISIOLI, A. An industrial application of a performance assessment and retuning technique for PI controllers. **ISA Transactions**, Elsevier, v. 49, p. 244-248, 2010.

YU, Z.; WANG, J.; HUANG, B.; BI, Z. Performance assessment of PID control loops subject to setpoint changes. **Journal of Process Control**, v. 21, p. 1164-1171, 2011.

APÊNDICE A – FLUXOGRAMA DE PREPARAÇÃO DE MASSA

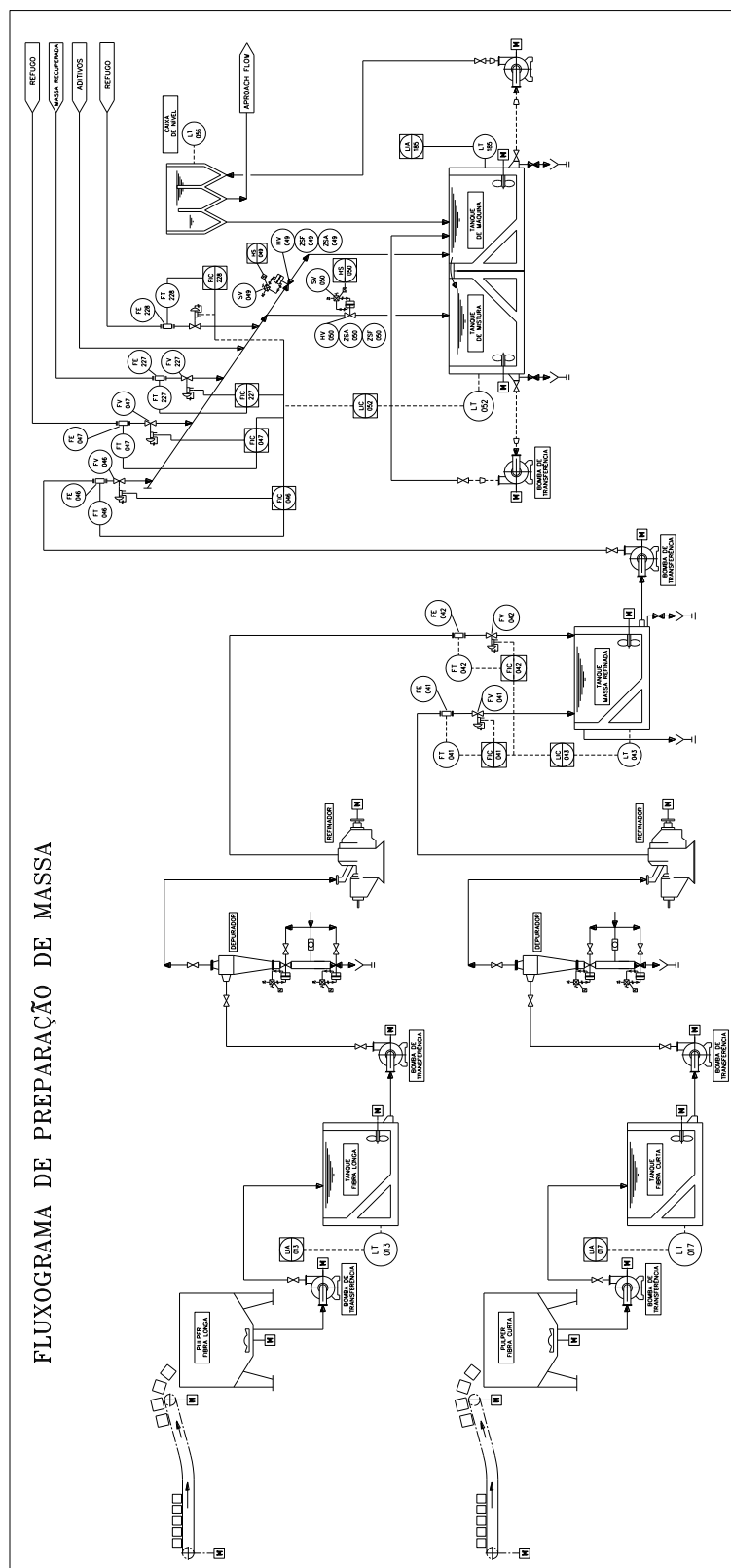


Figura 62: Fluxograma da Preparação de Massa – Máquina de Papel

APÊNDICE B – ESTUDO DE CASO 4

Neste Estudo de Caso 4 é apresentado o problema, solução proposta e resultados obtidos após as melhorias realizadas no Controle dos Refinadores.

B.1 – Descrição do problema

O controle da refinação era realizado de forma manual, o que ocasionava um sério problema, pois, toda vez que os operadores da preparação de massa reduziam ou aumentavam o SP (*Setpoint*) de vazão para os refinadores, acabavam reduzindo ou aumentando também o SP (*Setpoint*) de corrente dos refinadores e isto causava variações na qualidade do papel, com perda de estabilidade operacional. Outro ponto importante, é que pelo fato da refinação estar em manual, muitas vezes a corrente do refinador estava acima do necessário, fazendo com que tivesse um consumo de energia sem necessidade.

B.2 – Solução do problema

O objetivo de controlar a refinação é manter o °SR estável e dentro da especificação. Outro ponto importante é que o °SR tem relação com a drenabilidade da celulose e isto impacta diretamente na estabilidade da máquina de papel. Para resolver este controle (Figura 63), foi desenvolvido primeiramente um controle de potência específica do refinador baseado na vazão e consistência da polpa da celulose na entrada do refinador que automaticamente definirá qual SP (*Setpoint*) de corrente é necessário para esta produção. Depois foi implementado um controle de °SR, onde os operadores da preparação de massa definem um objetivo e de acordo com a análise de laboratório, este controle automaticamente define qual a melhor potência específica, fazendo com que o °SR seja controlado de forma uniforme, com o menor consumo de energia elétrica possível. O algoritmo encontra-se descrito no Apêndice D.

Foi desenvolvida também uma tela para que a operação entre com alguns parâmetros deste controle conforme ilustra a figura 64.

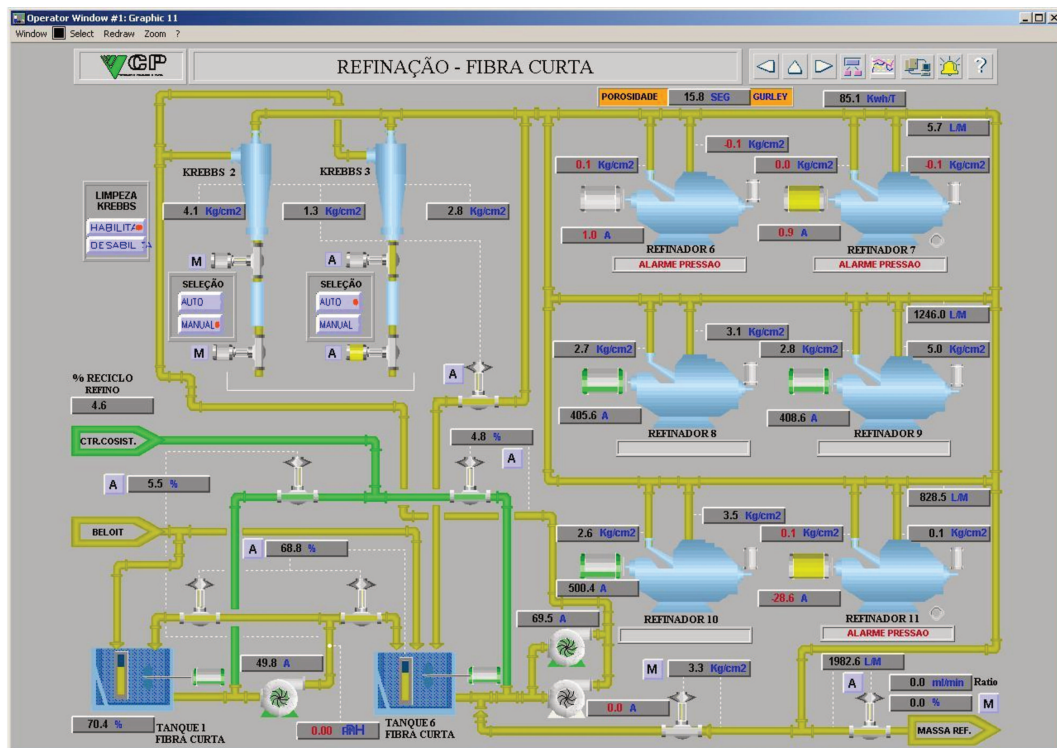


Figura 63 – Tela de Operação dos Refinadores da Preparação de Massa.

	VAZÃO (L/MIN)	CONSIST. (%)	PRODUÇÃO (T/H)	*SR LAB	*SR SETPOINT	SETPOINT POT ESP.	RATIO (%)	SETPOINT CORRENTE	CONTROLE POT. ESPEC.	CONTROLE *SR	ATUALIZA ANÁLISE
Refinador 4	0,00	4,80	0,00	100,00	100,00	100,00	55,00	0,0	CASCATA	LIGADO	OK
Refinador 5	0,00	4,80	0,00	100,00	100,00	100,00	55,00	0,0	CASCATA	LIGADO	OK
Refinador 6	1246,00	4,80	3,59	100,00	100,00	152,91	50,00	400,0	CASCATA	LIGADO	OK
Refinador 7	1246,00	4,80	3,59	100,00	100,00	152,91	50,00	400,0	CASCATA	LIGADO	OK
Refinador 8	828,00	4,80	2,38	100,00	100,00	143,81	100,00	500,0	CASCATA	LIGADO	OK
Refinador 9	828,00	4,80	2,38	100,00	100,00	143,81	100,00	0,0	CASCATA	LIGADO	OK
Refinador 10	0,00	4,80	0,00	100,00	100,00	100,00	50,00	0,0	CASCATA	LIGADO	OK
Refinador 11	0,00	4,80	0,00	100,00	100,00	100,00	50,00	0,0	CASCATA	LIGADO	OK

Figura 64 – Tela de Controle dos Refinadores da Preparação de Massa.

B.3 – Resultados obtidos

Após a implementação do controle foi possível identificar que o controle começou a reduzir a potência específica do refinador (Figura 65), o que na média foi 5,2% menor.

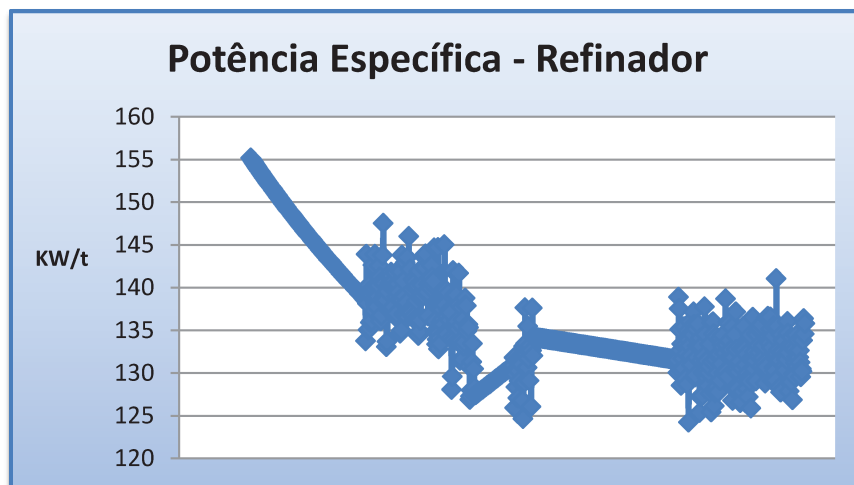


Figura 65 – Redução da potência específica (KW/t) do refinador após implementação da nova estratégia de controle.

APÊNDICE C – ESTUDO DE CASO 5

O Estudo de Caso 5 tem por objetivo apresentar uma solução para melhorar o controle de carga mineral na fabricação de papel após as melhorias realizadas no Sistema de Preparação de Massa. O objetivo específico é reduzir a variabilidade da carga mineral e consequentemente melhorar a qualidade do produto final.

C.1 – Descrição do problema

O desafio de toda máquina de papel é poder controlar a carga mineral. Quanto maior a carga mineral, menor é a quantidade necessária de celulose para se produzir uma tonelada de papel e consequentemente, menor o custo de produção do papel. Segundo Budeiz (2009) as cargas minerais além de substituírem as fibras vegetais (celulose) com menor custo, são utilizadas também para otimizar o produto final (papel) com objetivo de atender as necessidades das modernas impressoras gráficas.

C.2 – Solução do problema

A solução proposta foi desenvolver uma estratégia de controle (Figura 66) com predição da carga mineral e controle automático sem a utilização de um analisador de processo. O controle está baseado na utilização da análise de laboratório e da medição da vazão de refugo, para antecipadamente realizar a correção necessária de carga mineral (controle *feedforward*) e também por meio da análise de laboratório fazer o ajuste fino (controle *feedback*). O algoritmo implementado neste controle está descrito no Apêndice D.

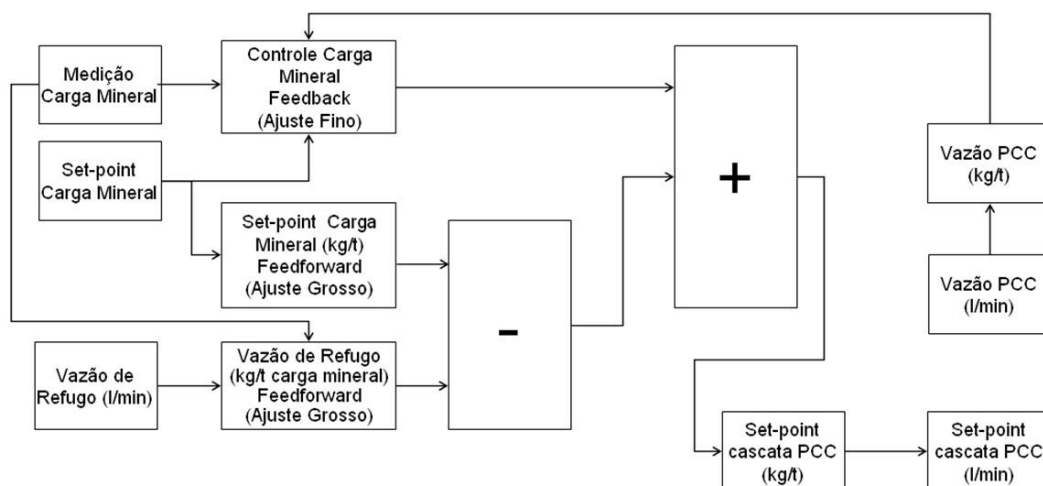


Figura 66 – Estratégia de controle de carga mineral.

C.3 – Resultados obtidos

Após a implementação da nova estratégia de controle, foi possível verificar uma redução na variabilidade da carga mineral (Figura 67). Após a redução de variabilidade, foi possível alterar o SP (*Setpoint*) para reduzir o custo de produção na máquina de papel, ou seja, aumentando a carga mineral (Figura 68).

Os resultados obtidos com o aumento médio de 2% de carga mineral (PCC, do inglês *Calcium Carbonate Precipitated*) na produção de papel permitiu um ganho médio de US\$ 16/t de papel produzido. Considerando uma produção média de 240 t/d tem-se um *saving* médio de US\$ 115.200,00/mês. Vale lembrar que este resultado é mensurável (quantitativo) e foi obtido somente com a nova estratégia de controle de carga mineral, porém, os demais resultados obtidos nos estudos de caso 1, 2 e 3 descritos anteriormente são qualitativos e permitiram uma melhor estabilidade do processo de fabricação de papel.

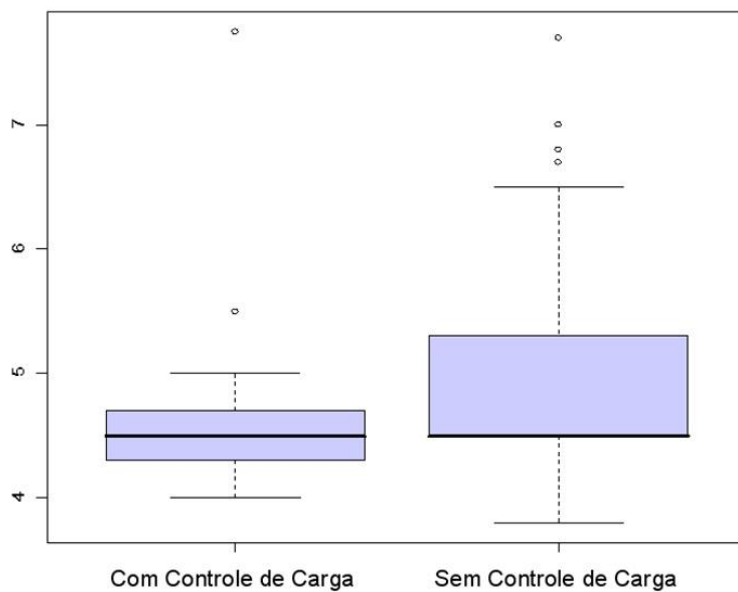


Figura 67 – Gráfico *Blox Plot* representando a Carga Mineral (%) no Papel Revestido 51 g/m² com Base 42 g/m² antes e depois da implantação da nova estratégia de controle.

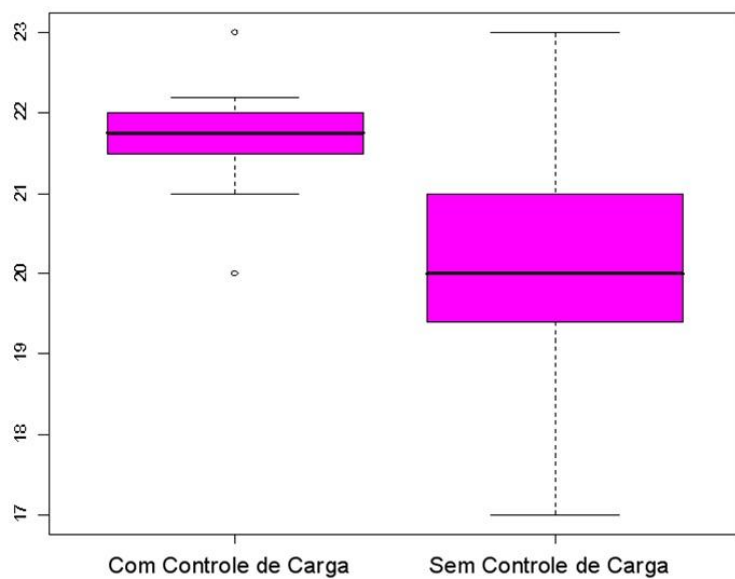


Figura 68 – Gráfico *Blox Plot* representando a Carga Mineral (%) no Papel Revestido 90 g/m² com Base 63 g/m² antes e depois da implantação da nova estratégia de controle.

APÊNDICE D – ALGORITMOS DE CONTROLE

Para o sucesso das novas estratégias de controle implementadas nos Estudos de Caso 2, 3, 4 e 5 foi necessário inserir novos algoritmos de controle no SDCD (Sistema Digital de Controle Distribuído) da Máquina Papel. Os mesmos estão descritos nas figuras abaixo com as TAGs (identificações) das malhas de controle envolvidas em cada controle, bem como equações padrões utilizadas como embasamento teórico.

D.1 – Controle de Nível do Tanque de Massa Refinada (LIC043)

$$\begin{aligned}
 Fator(\% \rightarrow t/h) &= 0,4 \\
 Setpoint_{FC041}(l/min) &= \frac{LC043.OUT(\%) \times Fator(\% \rightarrow t/h) \times \frac{HIC041_RATIO}{100}}{0,06 \times \frac{CI020}{100}} \\
 Setpoint_{FC042}(l/min) &= \frac{LC043.OUT(\%) \times Fator(\% \rightarrow t/h) \times \frac{100 - HIC041_RATIO}{100}}{0,06 \times \frac{CI014}{100}} \\
 Track_LC043(t/h) &= \left(FI041 \times 0,06 \times \frac{CI020}{100} \right) + \left(FI042 \times 0,06 \times \frac{CI014}{100} \right) \\
 Track_LC043(\%) &= \frac{Track_LC043(t/h)}{Fator(\% \rightarrow t/h)} \\
 Track_HIC041_RATIO(\%) &= \frac{FI041 \times 0,06 \times \frac{CI020}{100}}{Track_LC043(t/h)} \times 100
 \end{aligned}$$

Figura 69 – Algoritmo de controle implementado no SDCD para Controle do Nível do Tanque de Massa Refinada (LIC043).

D.2 – Controle de Nível do Tanque de Mistura (LIC052)

$$\begin{aligned}
 Fator(\% \rightarrow t/h) &= 0,4 \\
 Setpoint_{FC046}(l/min) &= \frac{LC042.OUT(\%) \times Fator(\% \rightarrow t/h) \times \frac{RATIO_1}{100}}{0,06 \times \frac{CsI045}{100}} \\
 Setpoint_{FC047}(l/min) &= \frac{LC042.OUT(\%) \times Fator(\% \rightarrow t/h) \times \frac{RATIO_2}{100}}{0,06 \times \frac{CsI111}{100}} \\
 Setpoint_{FC227}(l/min) &= \frac{LC042.OUT(\%) \times Fator(\% \rightarrow t/h) \times \frac{RATIO_3}{100}}{0,06 \times \frac{CsI104}{100}} \\
 Setpoint_{FC228}(l/min) &= \frac{LC042.OUT(\%) \times Fator(\% \rightarrow t/h) \times \frac{RATIO_4}{100}}{0,06 \times \frac{CsI044}{100}} \\
 \\
 Producao_1(t/h) &= FI046 \times 0,06 \times \frac{CsI045}{100} \\
 Producao_2(t/h) &= FI047 \times 0,06 \times \frac{CsI111}{100} \\
 Producao_3(t/h) &= FI227 \times 0,06 \times \frac{CsI104}{100} \\
 Producao_4(t/h) &= FI228 \times 0,06 \times \frac{CsI044}{100} \\
 \\
 Track_LC042(t/h) &= Producao_1 + Producao_2 + Producao_3 + Producao_4 \\
 Track_LC042(\%) &= \frac{Track_LC042(t/h)}{Fator(\% \rightarrow t/h)} \\
 Track_Ratio_1(\%) &= \frac{Producao_1}{Track_LC042(t/h)} \times 100 \\
 Track_Ratio_2(\%) &= \frac{Producao_2}{Track_LC042(t/h)} \times 100 \\
 Track_Ratio_3(\%) &= \frac{Producao_3}{Track_LC042(t/h)} \times 100 \\
 Track_Ratio_4(\%) &= \frac{Producao_4}{Track_LC042(t/h)} \times 100
 \end{aligned}$$

Figura 70 – Algoritmo de controle implementado no SDCD para Controle do Nível do Tanque de Mistura (LIC052).

D.3 – Controle dos Refinadores

$$\begin{aligned}
 ProdRe f4_5(t/h) &= \frac{FI175(l/min) \times 0,06 \times CsI014}{100} & PotEspRe f4(kwh/t) &= \frac{PotRe f4(kwh)}{ProdRe f4_5(t/h)} \\
 ProdRe f6_7(t/h) &= \frac{FI181(l/min) \times 0,06 \times CsI020}{100} & PotEspRe f5(kwh/t) &= \frac{PotRe f5(kwh)}{ProdRe f4_5(t/h)} \\
 ProdRe f8_9(t/h) &= \frac{FI182(l/min) \times 0,06 \times CsI020}{100} & PotEspRe f4_5(kwh/t) &= \frac{PotRe f4(kwh)}{ProdRe f4_5(t/h)} \cdot \frac{PotRe f5(kwh)}{ProdRe f4_5(t/h)} \\
 ProdRe f10_11(t/h) &= \frac{FI183(l/min) \times 0,06 \times CsI020}{100} & PotEspRe f6(kwh/t) &= \frac{PotRe f6(kwh)}{ProdRe f6_7(t/h)} \\
 PotRe f4(kwh) &= \frac{II004(A) \times 440(V) \times \sqrt{3} \times FP}{1000} & PotEspRe f7(kwh/t) &= \frac{PotRe f7(kwh)}{ProdRe f6_7(t/h)} \\
 PotRe f5(kwh) &= \frac{II005(A) \times 440(V) \times \sqrt{3} \times FP}{1000} & PotEspRe f6_7(kwh/t) &= \frac{PotRe f6(kwh) + PotRe f7(kwh)}{ProdRe f6_7(t/h)} \\
 PotRe f6(kwh) &= \frac{II006(A) \times 440(V) \times \sqrt{3} \times FP}{1000} & PotEspRe f8(kwh/t) &= \frac{PotRe f8(kwh)}{ProdRe f8_9(t/h)} \\
 PotRe f7(kwh) &= \frac{II007(A) \times 440(V) \times \sqrt{3} \times FP}{1000} & PotEspRe f9(kwh/t) &= \frac{PotRe f9(kwh)}{ProdRe f8_9(t/h)} \\
 PotRe f8(kwh) &= \frac{II008(A) \times 440(V) \times \sqrt{3} \times FP}{1000} & PotEspRe f8_9(kwh/t) &= \frac{PotRe f8(kwh) + PotRe f9(kwh)}{ProdRe f8_9(t/h)} \\
 PotRe f9(kwh) &= \frac{II009(A) \times 440(V) \times \sqrt{3} \times FP}{1000} & PotEspRe f10(kwh/t) &= \frac{PotRe f10(kwh)}{ProdRe f10_11(t/h)} \\
 PotRe f10(kwh) &= \frac{II010(A) \times 440(V) \times \sqrt{3} \times FP}{1000} & PotEspRe f11(kwh/t) &= \frac{PotRe f11(kwh)}{ProdRe f10_11(t/h)} \\
 PotRe f11(kwh) &= \frac{II011(A) \times 440(V) \times \sqrt{3} \times FP}{1000} & PotEspRe f10_11(kwh/t) &= \frac{PotRe f10(kwh) + PotRe f11(kwh)}{ProdRe f10_11(t/h)} \\
 \frac{440(V) \times \sqrt{3} \times FP}{1000} &= 0,685892 & & \\
 \\
 SPPotEsp4_5(kwh/t) &= SPPotEsp4_5(kwh/t) + (^{\circ}SRLaboratorio4_5 - ^{\circ}SRSetPoint4_5) \times Ganho4_5 \\
 NovaIRe f4(A) &= \frac{SPPotEsp4_5(kwh/t) \times 1000 \times \frac{RATIO4_5}{100} \times ProdRe f4_5(t/h)}{440(V) \times \sqrt{3} \times FP} \\
 NovaIRe f5(A) &= \frac{SPPotEsp4_5(kwh/t) \times 1000 \times \frac{100 - RATIO4_5}{100} \times ProdRe f4_5(t/h)}{440(V) \times \sqrt{3} \times FP} \\
 TrackRATIO4_5 &= \frac{PotEspRe f4(kwh/t)}{PotEsp4_5(kwh/t)} \times 100 \\
 TrackSPPotEsp4_5(kwh/t) &= PotEspRe f4_5(kwh/t) \\
 SPPotEsp6_7(kwh/t) &= SPPotEsp6_7(kwh/t) + (^{\circ}SRLaboratorio6_7 - ^{\circ}SRSetPoint6_7) \times Ganho6_7 \\
 NovaIRe f6(A) &= \frac{SPPotEsp6_7(kwh/t) \times 1000 \times \frac{RATIO6_7}{100} \times ProdRe f6_7(t/h)}{440(V) \times \sqrt{3} \times FP} \\
 NovaIRe f7(A) &= \frac{SPPotEsp6_7(kwh/t) \times 1000 \times \frac{100 - RATIO6_7}{100} \times ProdRe f6_7(t/h)}{440(V) \times \sqrt{3} \times FP} \\
 TrackRATIO6_7 &= \frac{PotEspRe f6(kwh/t)}{PotEsp6_7(kwh/t)} \times 100 \\
 TrackSPPotEsp6_7(kwh/t) &= PotEspRe f6_7(kwh/t) \\
 \frac{1000}{440(V) \times \sqrt{3} \times FP} &= 1,457955
 \end{aligned}$$

Figura 71 – Algoritmo de controle implementado no SDCCD para Controle dos Refinadores da Preparação de Massa.

D.4 – Controle de Carga Mineral

$$\begin{aligned}
 Producao_1(t/h) &= FI046 \times 0,06 \times \frac{CsI045}{100} \\
 Producao_2(t/h) &= FI047 \times 0,06 \times \frac{CsI111}{100} \\
 Producao_3(t/h) &= FI227 \times 0,06 \times \frac{CsI104}{100} \\
 Producao_4(t/h) &= FI228 \times 0,06 \times \frac{CsI044}{100} \\
 Producao_Total(t/h) &= Producao_1 + Producao_2 + Producao_3 + Producao_4 \\
 Carga_mineral_Tanque_Mistura(t/h) &= (Producao_2 + Producao_3 + Producao_4) \times Carga_Mineral_Laboratório \\
 Carga_mineral_Tanque_Mistura(\%) &= \frac{Carga_mineral_Tanque_Mistura(t/h)}{Producao_Total(t/h)} \times 100 \\
 Total_Polpa(t/h) &= Producao_Total(t/h) - Carga_mineral_Tanque_Mistura(t/h) \\
 Total(t/h) &= \frac{Total_Polpa(t/h)}{1 - \frac{Setpoint_Carga_Mineral(\%)}{100}} \\
 Carga_mineral_Necessária(\%) &= Setpoint_Carga_Mineral(\%) - Carga_mineral_Tanque_Mistura(\%) \\
 Setpoint_Carga_PCC(\%) &= Carga_mineral_Necessária(\%) + Carga_Offset(\%) \\
 Setpoint_Carga_PCC(kg/t) &= Setpoint_Carga_PCC(\%) \times 10 \\
 Carga_Offset_Track(\%) &= Carga_PCC_Real - Carga_mineral_Necessária(\%) \\
 Carga_Offset(\%) &= (Setpoint_Carga_Mineral(\%) - Medição_Carga_Mineral(\%)) \times 0,5 \\
 &\quad \frac{Carga_PCC(kg/t) \times Producao(t/h)}{Concentração(\%)} \\
 SetPoint_Vazão_PCC(l/h) &= \frac{100}{Densidade(g/cm^3)} \\
 Carga_PCC_Real(kg/t) &= \frac{Vazão_PCC(l/h) \times Densidade(g/cm^3) \times \frac{Concentração(\%)}{100}}{Producao(t/h)}
 \end{aligned}$$

Figura 72 – Algoritmo de controle implementado no SDCD para Controle de Carga Mineral.