

FERRAMENTA DE AUDITORIA E SINTONIA DE MALHAS APLICADA PARA OTIMIZAÇÃO DO CONTROLE DE CALDEIRA EM UMA PLANTA DE ÁCIDO LÁTICO

Paulo R. R. Junior*§, Mauricio de S. Cordeiro§, Wictor H. Silva*, Icaro I. C. de M. Barros§

* Corbion Brasil

Av. Rui Barbosa, 521, Lapa, Campos dos Goytacazes RJ - CEP 28013-000

§ Programa de Pós-Graduação em Eng. de Controle de Instrumentação, UCL – Faculdade do Centro Leste
Rodovia ES 010, Km 6 - Manguihos - Serra – ES

Emails: Paulo.rangel@corbion.com, eng_mauricio1969@hotmail.com, Wictor.silva@corbion.com,
icaroigor@ucl.br

Abstract— The control loops do not always work properly in industries, resulting in problems of productivity and quality of manufactured products. Moreover, the meshes do not operate satisfactorily in standalone mode and that have high variability generate a larger number of alarms in the system interlocks and beyond, resulting in unwanted downtime of the process. On the other hand, control loops working more efficiently provide a better quality, higher yields, hence higher profitability. Thus, this study aims to develop and apply three tools, two for auditing and one for tuning, of low cost and customized to assist in performance improvement work of the control loops. The proposal has several levels of assessment tool, and can identify problems as control loops with high variability, inadequate design or wear on internal Control valves, improper tuning, among others. These features can help in the diagnosis of deviations in the performance of control loops, and in taking action to correct these deviations.

Keywords— Audit, Tuning, Loops, Control, Performance, Indicators

Resumo— As malhas de controle nem sempre funcionam de forma adequada nas indústrias, o que acarreta em problemas de produtividade e qualidade dos produtos fabricados. Além disso, as malhas que não operam satisfatoriamente em modo autônomo e que apresentam alta variabilidade, geram um número maior de alarmes no sistema e além de intertravamentos, ocasionando paradas indesejadas do processo. Por outro lado, malhas de controle trabalhando de forma mais eficiente proporcionam melhor qualidade, maior rendimento, consequentemente maior lucratividade. Sendo assim, este trabalho tem como objetivo desenvolver e aplicar três ferramentas, duas de auditoria e uma de sintonia, de baixo custo e customizadas, para auxiliar no trabalho de melhoria de desempenho das malhas de controle. As ferramentas propostas contam com diversos índices de avaliação, sendo possível identificar problemas como malhas de controle com alta variabilidade, dimensionamento inadequado ou desgaste nos internos em válvulas de controle, sintonia inadequada, entre outros. Estas funcionalidades podem auxiliar tanto no diagnóstico de desvios no desempenho das malhas de controle, quanto na tomada de ações para a correção destes desvios.

Palavras-chave— Auditoria, Sintonia, Malhas, Controle, Desempenho, Indicadores

1 Introdução

Na maioria das indústrias, sejam elas de qualquer natureza, são utilizadas tipicamente de centenas a milhares de malhas de controle (Mejía et al, 2008 apud Rodrigues, 2010).

As malhas de controle nem sempre funcionam de forma adequada, o que acarreta em problemas de produtividade e qualidade dos produtos fabricados. Além disso, malhas que não operam satisfatoriamente em modo autônomo e que apresentam alta variabilidade, geram um número maior de alarmes no sistema, além de intertravamentos, ocasionando paradas indesejadas do processo. Esta condição pode ser melhor observada na Figura 1.



Figura 1. Modelo de Condição de Processo
Fonte: ISA, 2009

Com as malhas de controle trabalhando de forma mais eficiente tem-se melhor qualidade, maior produtividade. Os benefícios com a redução da variabilidade em uma malha de controle podem ser visualizados na Figura 2.

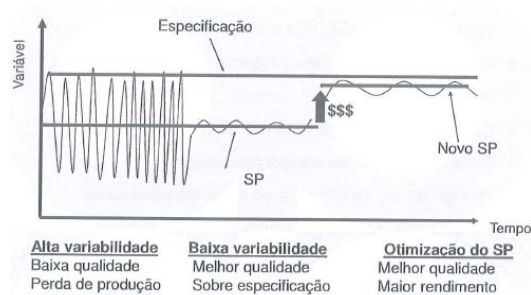


Figura 2. Efeito de Redução de Variabilidade
Fonte: Yokogawa, 2008

Uma das preocupações e ações da engenharia de controle é o monitoramento do desempenho das malhas de controle em tempo real, com o objetivo de identificar as malhas que não estão operando de forma satisfatória, ou seja, dentro de limites aceitáveis, ou que apresentam baixo desempenho (Pereira et al., 2011).

2 Auditoria nas Malhas de Controle

Apesar das empresas não darem tanta atenção ao desempenho das malhas industriais ao focarem os esforços em atender as demandas de mercado, observa-se a busca por resultados de produtividade em vários aspectos, como buscas de monitoramento em tempo real, ou RtPM. Nesta tendência do RtPM, podemos destacar três linhas de trabalho (Fonseca; Filho; Torres, 2004): **Overall Equipment Effectiveness - OEE** - voltada para os sistemas de controle automáticos dependentes de variáveis discretas, onde a produção é monitorada a partir do seu desempenho global; **Gerenciamento de ativos** - os sistemas de gerenciamento de ativos disponíveis no mercado consideram basicamente apenas os elementos de medição, como os instrumentos, transmissores, e atuadores (válvulas, posicionadores, etc.), monitorando-os para que fiquem dentro do desempenho esperado. Este sistema de análise apresenta um ponto fraco ao não considerar o controlador e o processo a ser controlado, comprometendo, assim, a análise total do desempenho; **Avaliação de Desempenho das malhas de controle** - busca efetuar uma análise global do sistema, com todos os seus componentes. Possui critérios e índices devidamente estabelecidos na área de desempenho das malhas industriais, mas receberam atenção redobrada e apresentaram um desenvolvimento considerável na década de 90.

Na maioria dos casos, as malhas de controle industriais apresentam problemas como (Pereira et al., 2011): Sintonia inadequada; Manutenção dos elementos da malha de controle; Variações na dinâmica do processo (Tempo morto, constante de tempo, etc.); Dimensionamento inadequado de componentes; Problemas de instalação; Implementação errônea dos controladores PID, principalmente quando for implementados em PLC's; Desgaste dos elementos.

3 Ferramentas de Auditoria e Sintonia de Malhas

Ao longo do tempo, mesmo as malhas de controle que estão inicialmente bem ajustadas apresentam queda no desempenho. Assim, torna-se necessário fazer a manutenção do sistema de controle. Como esta tarefa pode se tornar muito cara, é importante saber quais as malhas de controle estão causando maior problema e que possuem maior impacto financeiro (Fleck et al., 2006).

Um dos objetivos deste trabalho é desenvolver e testar duas ferramentas para auditoria de desempenho de malhas de controle. Uma dessas ferramentas, para aplicação em Múltiplas Malhas, organiza as malhas por área e as categoriza seguindo critérios pré-estabelecidos. Desta forma é possível identificar, dentro de um apanhado de malhas, quais malhas não

estão com um desempenho adequado e focar o trabalho nelas.

A segunda ferramenta, Única Malha, realiza a análise de uma única malha por vez, sendo possível avaliar o comportamento da malha antes e depois da utilização da ferramenta de sintonia, uma vez que esta evidencia, através de critérios de avaliação, os resultados obtidos.

Algumas das funcionalidades das ferramentas propostas são: Análise estatística de diversas malhas de controle; Vários índices de avaliação diferentes; Listagem das malhas com maior problema de controle, direcionando os recursos de manutenção; Apresentação do desempenho das malhas de controle, através de interface amigável, permitindo o monitoramento a partir de qualquer computador; Ferramenta para diagnóstico rápido de problemas.

O sistema PIMS da planta captura os dados das malhas de controle, utilizando o protocolo OPC DA, armazena em uma base de dados única e disponibiliza estas informações para que esteja acessível pelas ferramentas de auditoria de malhas de controle desenvolvidas.

As ferramentas de auditoria de malhas de controle visam facilitar a identificação dos seguintes problemas: Malhas de controle com alta variabilidade; Problemas em válvulas de controle (dimensionamento inadequado, desgaste dos internos); Sintonia da malha de controle.

A ferramenta conta com 18 índices de avaliação para análise das malhas de controle. Alguns dos principais índices são detalhados a seguir: **Erro Médio Absoluto** - Erro médio absoluto da malha em relação ao seu range de operação. Indica o desvio da malha em relação ao SetPoint. Valores mais próximos de 0% indicam que a malha operou mais próxima do valor de referência (set-point); **% Saturação** - Representa o percentual do tempo ao longo do período que a válvula está totalmente aberta ou totalmente fechada. Quanto mais próximo de 100% este valor for, maior o desgaste da válvula, pois indica que a válvula passou mais tempo operando em seus limites (totalmente aberta ou totalmente fechada); **% Automático** - Percentual de tempo que a malha operou em Automático.

Apesar das ferramentas de auditoria desenvolvidas disponibilizarem vários indicadores, é desejável que o desempenho da malha de controle possa ser simplificado por apenas alguns desses indicadores. Esses indicadores, chamados de KPI's (Key Performance Indicators – Indicadores Chave de Desempenho), irão compor a nota global. A escolha desses indicadores deve ser feita, de forma que os parâmetros escolhidos possam representar, de forma mais completa possível, a situação da malha de acordo com os fatores que possuem um maior impacto no seu desempenho. O objetivo da Nota Global, é representar o desempenho da malha de controle como um todo em

uma única nota, de forma que o usuário possa identificar as malhas com pior desempenho e que necessitam uma análise mais detalhada (Rodrigues, 2010).

A Nota Global abrange as notas dos KPI's selecionados, demonstrando o quanto a malha está próxima ou não dos limites estabelecidos. Portanto, a Nota Global indica melhor desempenho para menores valores.

Os três KPI's escolhidos para comporem a Nota Global foram: Erro Médio Absoluto; Saída Saturada; Tempo em Modo Automático.

Considerando esses índices na composição da Nota Global, é possível identificar problemas como: variabilidade da malha de controle, problema de dimensionamento de válvula de controle e grau de interferência do operador.

As ferramentas de auditoria permitem realizar auditoria de qualquer malha de controle que esteja configurada no sistema PIMS, buscando os dados por meio de *queries* em linguagem SQL. Na ferramenta Múltiplas Malhas é possível selecionar quais as malhas de controle serão auditadas, definir até dois critérios de restrição para retorno dos dados e período de consulta para a realização da auditoria. Em caso de auditoria em múltiplas malhas, a configuração pode ser realizada na tela entrada de dados – Múltiplas Malhas, conforme pode ser visualizado na Figura 3.

CONDIÇÃO				
TAG	OPERADOR	VALOR		
FLU-2753	*	1		
FLU-2755.1	*	1		

DESCRIÇÃO	Malha	AM	PV	SP
VFEZ	FC-27591	AM_FC_2701.1	PV_PL_2701.1	SP_FC
	FC-27031	AM_FC_2703.1	PV_PL_2703.1	SP_FC
	LC-2702	AM_LC_2702	PV_LL_2702	SP_LC
	LC-2703	AM_LC_2703	PV_LL_2703	SP_LC
	FC-27094	AM_FC_2701.4	PV_PL_2701.4	SP_FC
	FC-27095	AM_FC_2701.6	PV_PL_2701.6	SP_FC
	FC-27021	AM_FC_2702.1	PV_PL_2702.1	SP_FC
	FC-27591	AM_FC_2755.1	PV_PL_2755.1	SP_FC
	FC-27593	AM_FC_2755.3	PV_PL_2755.3	SP_FC
	FC-27602	AM_FC_2760.2	PV_PL_2760.2	SP_FC
VDD	LC-2766	AM_LC_2766	PV_LL_2766	SP_LC
	TC-2758	AM_TC_2758	PV_TL_2758	SP_TC

Figura 3. Tela entrada de dados – Múltiplas Malhas
Fonte: Autoria Própria

Em caso de auditoria em uma única malha, a configuração pode ser realizada na tela entrada de dados – Única Malha, conforme pode ser visualizado na Figura 4.

Malha	AM	PV	SP	MV	Limites (%)	M
PIC-9103/1	AM_PIC_9103_1	PV_PL_9103_1	SP_PIC_9103_1	MV_PIC_9103_1	2%	

CONDIÇÃO		
TAG	OPERADOR	VALOR
CALDEIRA_MOD_CHAMA_9103	=	1

Figura 4. Tela entrada de dados – Única Malha
Fonte: Autoria Própria

Os resultados da auditoria realizada em múltiplas malhas podem ser visualizados na tela Dados – Múltiplas Malhas, conforme mostrado na Figura 5.

Malha	N	X	S	G ²	G	SF	W	Reversões	% Sat	% Man
FC-27593	103	149.81	131.53	379.75	19.58	5.00%	5.27	64	0.00%	0.00%
LC-2786	103	1.08	1.09	0.01	0.11	78.64%	359.82	45	0.97%	0.00%
LC-2703	103	60.14	60.12	5.55	2.37	100.00%	84.96	75	0.00%	0.00%
FC-275146	103	4.81	4.11	0.53	0.73	100.00%	91.19	72	0.00%	0.00%
FC-27521	103	111.18	115.38	2.67	1.64	100.00%	47.75	58	0.00%	0.00%
FC-27541	103	5.31	5.03	0.77	0.88	89.32%	358.62	57	0.00%	0.00%
FC-27602	103	60.49	60.23	123.71	11.18	98.12%	210.29	64	0.00%	0.00%
FC-27591	103	417.31	401.48	672.78	26.07	99.03%	207.91	63	0.00%	0.00%

Figura 5. Tela com os resultados – Múltiplas Malhas
Fonte: Autoria Própria

Os resultados da auditoria realizada em uma única malha podem ser visualizados na tela Dados – Única Malha, conforme mostrado na Figura 6.

FC-9103/1		FC-9103/1	
De:	01/12/15 00:00	De:	30/01/16 00:00
Até:	03/12/15 10:00	Até:	02/02/16 07:00
Amostras (N)	285	Amostras (N)	283
Média (X)	12.51	Média (X)	12.51
Mediana (X)	12.54	Mediana (X)	12.51
Variação (σ ²)	0.53	Variação (σ ²)	0.03
Desvio Padrão (σ)	0.72	Desvio Padrão (σ)	0.15
Fator de Serviço	26.67%	Fator de Serviço	97.17%
Índice de Válvula	5609.20	Índice de Válvula	2336.65
Número de Reversões	101	Número de Reversões	177
% Saturação	36.49%	% Saturação	1.77%
% Manual	0.00%	% Manual	0.00%
% Automático	100.00%	% Automático	100.00%
Erro Médio Absoluto	1.97%	Erro Médio Absoluto	0.24%
Índice de Variabilidade	11.58%	Índice de Variabilidade	2.44%
IE	2.24	IE	2.60
IAE	140.24	IAE	16.83
ISE	148.94	ISE	6.61
ITAE	399694.52	ITAE	47682.71
ITSE	424475.81	ITSE	18710.56
Nota Global	12.82%	Nota Global	0.67%

Figura 6. Tela com os resultados – Única Malha
Fonte: Autoria Própria

A terceira ferramenta desenvolvida neste trabalho realiza a sintonia de uma malha selecionada. Após a avaliação de um apanhado de malhas feita por Múltiplas Malhas, é possível selecionar qual malha será sintonizada e então realizar a sintonia através desta ferramenta. Esta ferramenta captura os dados de forma on-line, em intervalos de 1 segundo, através do driver de comunicação OPCtoDDE. Os dados capturados são SP (set-point), PV (variável de processo), MV (variável manipulada) e AM (Automático/Manual). Com essas informações, a ferramenta possibilita a sintonia de um sistema aproximado de primeira ordem com tempo morto.

Desta forma, a ferramenta calcula os parâmetros para o controlador PID de acordo com 7 métodos (Cohen-Coon, Ziegler e Nichols, IAE, ITAE, IMC, Lambda, Integrador) para 6 tipos de processo (temperatura, pressão, vazão, nível, pH, condutividade).

Com as três ferramentas desenvolvidas neste trabalho, a metodologia de aplicação funciona da seguinte forma: primeiro, a ferramenta Múltiplas Malhas identifica quais malhas de controle não estão com um desempenho adequado, permitindo selecionar dentro deste grupo qual será a malha que será ajustada; em seguida, a ferramenta Sintonia realiza o ajuste da malha e gera novos parâmetros para o controlador; por fim, a ferramenta Única Malha faz uma avaliação de antes e depois da malha ajustada a

fim de evidenciar as alterações que ocorreram após o ajuste.

4 Estudo de Caso

As ferramentas propostas foram aplicadas na melhoria de desempenho da caldeira em uma planta de ácido lático, após a realização do comissionamento do equipamento pelo fabricante. Com a caldeira operando de forma mais eficiente, é esperado um menor consumo de gás natural e também uma maior produção de ácido lático na unidade de destilação.

Malha de Controle de Pressão de Vapor

A aplicação das ferramentas nesta malha de controle, têm como principais objetivos: Redução da variabilidade na pressão de vapor para os consumidores; Sistema de combustão operando de forma modulante, o que reduz o desgaste dos componentes do sistema.

Por meio da ferramenta Sintonia, foi realizado o ajuste da malha de controle de pressão de vapor da caldeira. A Figura 7 abaixo mostra o resultado obtido com a realização de um teste em degrau na malha de pressão.

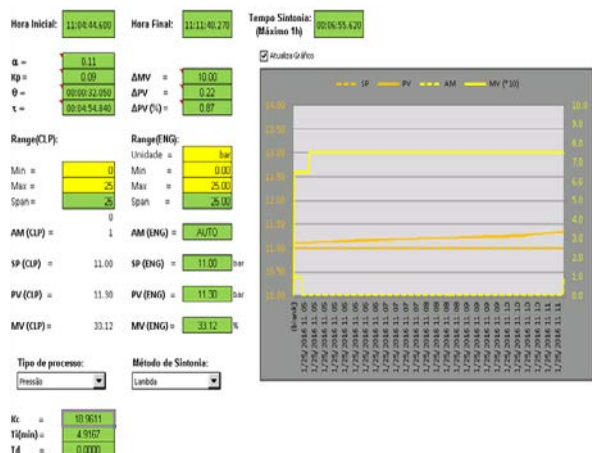


Figura 7. Teste em degrau malha de pressão
Fonte: Autoria Própria

Por meio da ferramenta Única Malha, foi realizado uma análise da malha de controle de pressão, após os ajustes realizados. A Figura 8 abaixo, mostra o resultado da auditoria realizada na malha de pressão, com destaque para os seguintes índices de desempenho:

- **Fator de serviço:** de 26,67% para 97,17%;
- **% Saturação:** de 36,49% para 1,77%;
- **Índice de Variabilidade:** de 11,58% para 2,44%.

PC - 01/12/15		PC - 02/02/16	
De:	01/12/15 00:00	De:	30/01/16 00:00
Até:	03/12/15 10:00	Até:	02/02/16 07:00
Amostras (N)	285	Amostras (N)	283
Média (X)	12,51	Média (X)	12,51
Mediana (X)	12,54	Mediana (X)	12,51
Variação (σ²)	0,52	Variação (σ²)	0,02
Desvio Padrão (σ)	0,72	Desvio Padrão (σ)	0,15
Fator de Serviço	26,67%	Fator de Serviço	97,17%
Índice de Válvula	5609,20	Índice de Válvula	2336,65
Número de Reversões	101	Número de Reversões	177
% Saturação	36,49%	% Saturação	1,77%
% Manual	0,00%	% Manual	0,00%
% Automático	100,00%	% Automático	100,00%
Erro Médio Absoluto	1,97%	Erro Médio Absoluto	0,24%
Índice de Variabilidade	11,58%	Índice de Variabilidade	2,44%
IE	2,24	IE	2,60
IAE	140,24	IAE	16,85
ISE	148,94	ISE	6,61
ITAE	399694,52	ITAE	47682,71
ITSE	424475,81	ITSE	18710,56
Nota Global	12,82%	Nota Global	0,67%

Figura 8. Auditoria na malha de pressão
Fonte: Autoria Própria

Por meio da análise estatística mostrada na Figura 9, é possível verificar que houve uma redução significativa da variabilidade da pressão de vapor da caldeira, após os ajustes realizados com a aplicação das ferramentas.

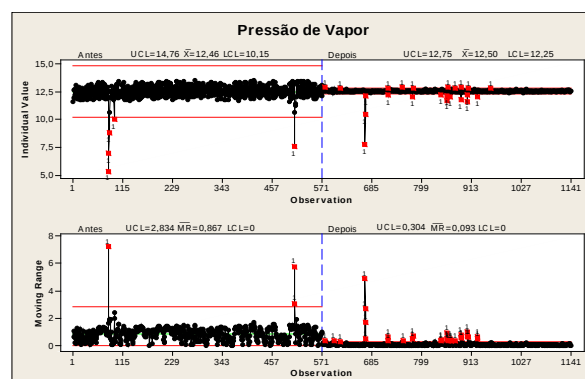


Figura 9. Controle de Pressão de Vapor
Fonte: Autoria Própria

Além da redução da variabilidade, o que proporciona uma menor oscilação na pressão de vapor para os consumidores da planta, principalmente na destilação de ácido lático, houve também uma redução na oscilação do sistema de modulação da combustão, conforme mostrado nas figuras 10 e 11 abaixo.

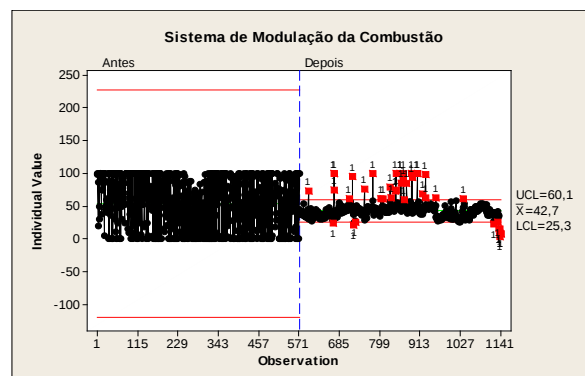


Figura 10. Modulação sistema de combustão
Fonte: Autoria Própria

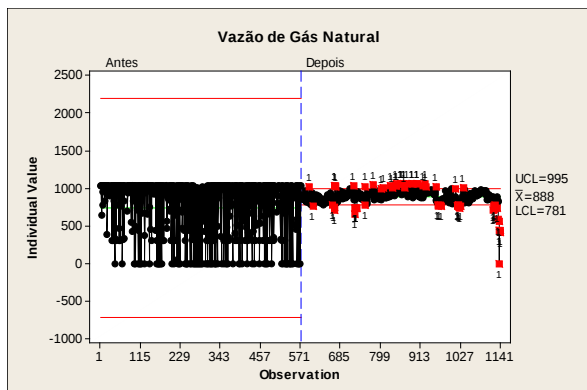


Figura 11. Vazão de gás natural

Fonte: Autoria Própria

Malha de Controle de Nível da Caldeira

A aplicação das ferramentas nesta malha de controle têm como principais objetivos: Redução da variabilidade no nível da caldeira; Vazão de água operando de forma modulante. Na condição anterior, o controle de nível da caldeira apresentava um comportamento similar ao ON-OFF;

Por meio da ferramenta Sintonia, foi realizado o ajuste da malha de controle de nível da caldeira. A Figura 12 abaixo, mostra o resultado obtido com a realização de um teste em degrau na malha de nível.



Figura 12. Teste em degrau malha de nível

Fonte: Autoria Própria

Por meio da análise estatística mostrada na Figura 13, é possível verificar que houve uma redução significativa da variabilidade no nível da caldeira, após os ajustes realizados com a aplicação da ferramenta.

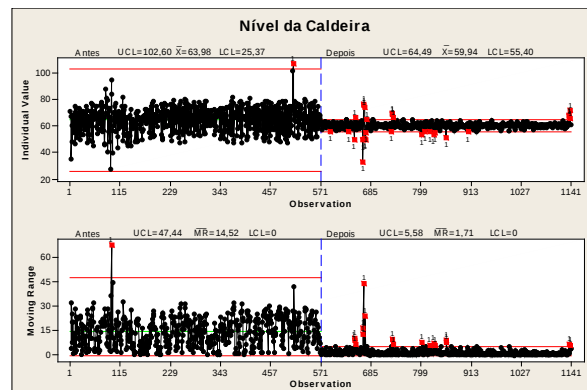


Figura 13. Controle de Nível da Caldeira

Fonte: Autoria Própria

Além da redução da variação do nível dentro da caldeira, houve também uma redução na oscilação da rotação da bomba de alimentação de água e consequentemente menor variação do fluxo de água que entra na caldeira. Podemos visualizar melhor pelas figuras 14 e 15 abaixo.

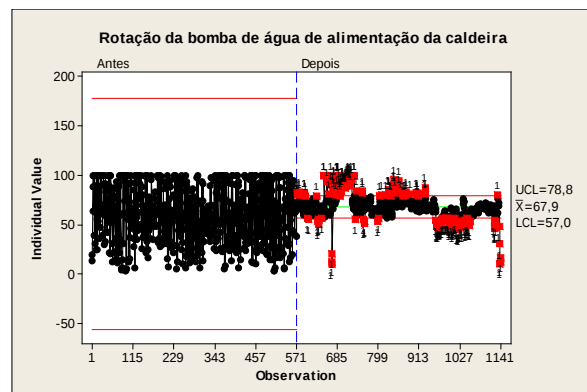


Figura 14. Rotação Bomba de Água

Fonte: Autoria Própria

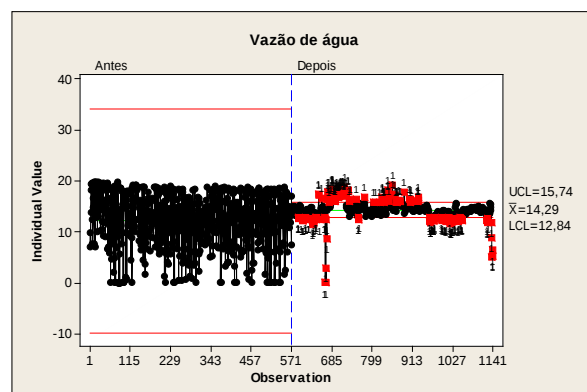


Figura 15. Vazão de água

Fonte: Autoria Própria

Malha de Controle de Oxigênio

Com as malhas de controle de nível e pressão operando de forma mais eficiente e com menor

variabilidade, foi possível manter a concentração de oxigênio operando próximo aos limites de controle, conforme podemos verificar pela Figura 16 abaixo.

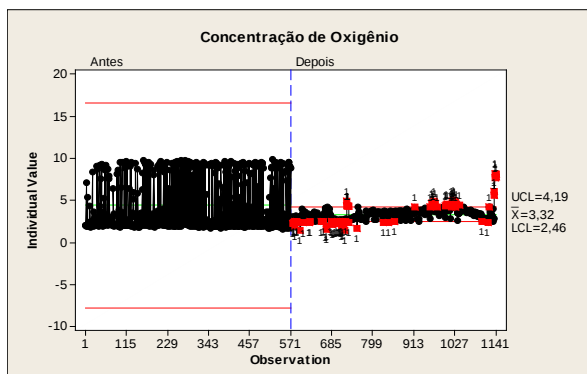


Figura 16. Controle de Oxigênio
Fonte: Autoria Própria

5 Conclusão

Com relação a aplicação das ferramentas para otimização das malhas de controle na cadeia, foram obtidos os seguintes resultados: Redução da variabilidade na pressão de vapor para os consumidores; Sistema de combustão operando de forma modulante, o que reduz o desgaste dos componentes do sistema. Na condição anterior, o sistema de combustão apresentava um comportamento similar ao ON-OFF; Redução da variabilidade no nível da caldeira; Vazão de água operando de forma modulante. Na condição anterior, o controle de nível da caldeira apresentava um comportamento similar ao ON-OFF; Concentração de oxigênio operando próximo aos limites de controle.

Em relação ao processo, com a melhoria no desempenho da caldeira, podemos destacar os principais resultados obtidos: Ganho de 1% na eficiência da caldeira (m³ gás/ton de vapor), conforme mostrado na figura 17. Este ganho de eficiência, representa uma economia em torno de R\$10.000,00 por mês de gás natural; Ganho de 12% na produção de ácido láctico destilado por dia.

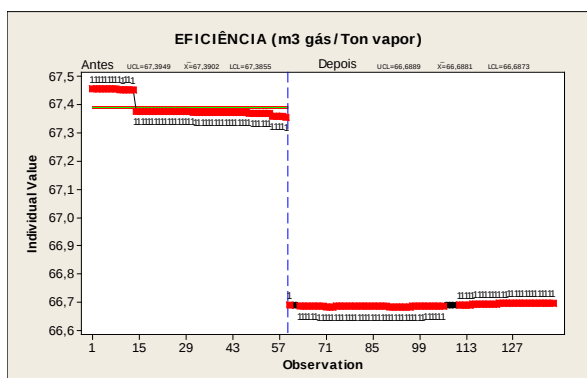


Figura 17. Eficiência Caldeira
Fonte: Autoria Própria

Referências Bibliográficas

- Fleck, T. D. and Kempf, A. O. (2006). Desenvolvimento de uma Ferramenta para Auditoria On-Line de Malhas de Controle. UFRGS.
- Fonseca, M. O.; FILHO, C. S.; TORRES, B. S (2004). Avaliação de Desempenho e Auditoria de Malhas de Controle. InTech.
- Kempf, A. O. (2003). Avaliação de Desempenho de Malhas de Controle. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS.
- Pereira, G. G. M. et al. (2011). Por que a Auditoria em Malhas de Controle Seria mais Importante no Ensino da Graduação do que o Controle Avançado. XXXIX Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia. 03 a 06 de outubro. Blumenau, SC.
- Rodrigues, B. H. S. (2010). Avaliação de Desempenho de Malhas de Controle. Monografia de Graduação em Engenharia de Controle e Automação. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, MG.