

# AVALIAÇÃO E MELHORIA DE CONTROLE REGULATÓRIO EM CENTRAIS TERMELÉTRICAS A VAPOR<sup>1</sup>

Caio Henrique Vidiga<sup>2</sup>  
Carlos Eduardo Carneiro de Melo<sup>3</sup>  
Cristine Kayser<sup>4</sup>  
Fabiano Loss<sup>5</sup>  
Marcelo Beccall<sup>6</sup>  
Paulo Sergio Boni Calente<sup>7</sup>  
Valter Barbosa de Oliveira Junior<sup>8</sup>

## Resumo

Muitas plantas industriais utilizam malhas de controle regulatório para possibilitar uma operação estável de seus processos e garantir que seus produtos satisfaçam parâmetros mínimos de qualidade exigidos por seus clientes. Por outro lado, os processos de transformação das matérias primas em produtos finais podem envolver organizações complexas de equipamentos e a utilização de diferentes tipos energia (por exemplo, elétrica, química, mecânica, térmica, etc.). Neste contexto, um grande esforço é realizado pelas empresas para que suas plantas sejam operadas de maneira eficiente. Mas para que isso aconteça é essencial que o controle regulatório esteja funcionando apropriadamente. A avaliação do controle regulatório pode ser feita periodicamente, por meio de indicadores de desempenho, para que ações corretivas sejam tomadas sempre que houver uma degradação relevante de desempenho do mesmo. Considerando estas questões, decidiu-se realizar um projeto piloto para análise dos benefícios que a avaliação do controle regulatório poderia trazer a uma empresa do ramo siderúrgico. O projeto piloto foi realizado em uma central termelétrica pertencente à empresa. A abordagem da metodologia empregada, dos principais itens verificados e dos resultados alcançados neste projeto integram o escopo deste trabalho.

**Palavras-chave:** Malhas de controle; Controle de processo; Avaliação de desempenho.

## REGULATORY CONTROL EVALUATION AND IMPROVEMENT IN A STEAM POWER PLANT

### Abstract

Many industrial plants use regulatory control loops to achieve a stable operation of its processes and ensure that their products meet minimum quality parameters required by their customers. Moreover, the transformation processes of the raw materials into finished products can involve complex organization of equipment and energy use of different types (for example, electrical, chemical, mechanical, thermal, etc.). In this context, a major effort is undertaken by companies so that your plants are operated efficiently. But for that to happen it is essential that regulatory control is working properly. The evaluation of the regulatory control can be made periodically by means of indicators, so that corrective action can be taken when significant performance degradation thereof occurs. Considering these issues, it was decided to conduct a pilot project to analyze the benefits that the regulatory control evaluation could bring to a company of the steel industry. The pilot project was conducted in a steam power plant belonging to the company. The approach of the methodology employed, the main items checked and the results achieved in this project are part of the scope of this text.

**Key words:** Control loops; Process control; Performance evaluation.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 17º Seminário de Automação e TI Industrial, 24 a 27 de setembro de 2013, Vitória, ES, Brasil.

<sup>2</sup> Engenheiro de Controle e Automação, Especialista de Manutenção Eletro-Eletrônica da ArcelorMittal Brasil. Serra, ES, Brasil.

<sup>3</sup> Engenheiro Eletricista, Especialista de Engenharia Elétrica e Eletrônica da ArcelorMittal Brasil. Serra, ES, Brasil.

<sup>4</sup> Engenheira Química, Especialista de Controle e Otimização de Processos da TriSolutions Soluções em Engenharia. Porto Alegre, RS, Brasil.

<sup>5</sup> Engenheiro Eletricista, Especialista em Energia e Utilidades da ArcelorMittal Brasil. Serra, ES, Brasil.

<sup>6</sup> Técnico em Mecânica, Técnico Especializado de Energia da ArcelorMittal Brasil. Serra, ES, Brasil.

<sup>7</sup> Engenheiro Mecânico, Especialista de Manutenção Eletro-Eletrônica da ArcelorMittal Brasil. Serra, ES, Brasil.

<sup>8</sup> Engenheiro Elétricista. Mestre. Especialista de Eng. Elétrica e Eletrônica da ArcelorMittal Brasil. Serra, ES, Brasil.

# 1 INTRODUÇÃO

A hierarquia de controle nas indústrias de processos pode ser representada atualmente de acordo com a Figura 1.<sup>(1)</sup> Nota-se nesta hierarquia que o controle regulatório está diretamente relacionado com o ajuste instantâneo do processo, agindo sobre os elementos finais de controle, em períodos de tempo da ordem de 1 (um) segundo. Daí a sua importância na operação de unidades industriais e no controle da qualidade de seus produtos. Segundo Kempf,<sup>(2)</sup> avaliação do desempenho regulatório de controladores é uma área relativamente nova no meio acadêmico e pouco conhecida no ambiente industrial. Por exemplo, é comum a exigência de realização de testes de desempenho de grandes máquinas (caldeiras, turbinas, compressores, bombas, motores elétricos, etc.), ensaios e testes funcionais de outros equipamentos de menor porte (atuadores, válvulas, pequenas bombas e motores, instrumentos, etc.), mas critérios para certificação de desempenho de malhas de controle ainda não têm entrado nas pautas de negociação. A carência de estudos e normas técnicas que indiquem uma marca de referência (*benchmark*) para o desempenho regulatório de controladores associados a vários tipos de processos é, certamente, o principal motivo para que isso ainda não ocorra.

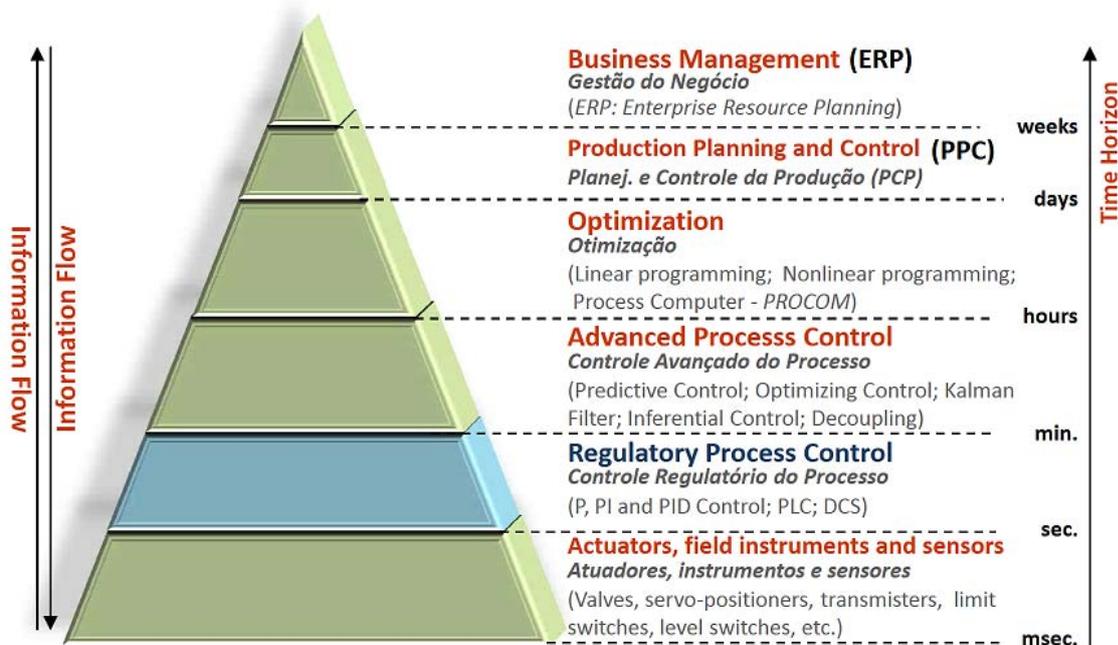


Figura 1. Hierarquia de controle.

Na maioria dos processos industriais, mesmo as malhas de controle corretamente sintonizadas após o início de operação da planta, com o decorrer dos anos passam a apresentar uma deterioração de seu desempenho devido a alterações naturais e contínuas nas dinâmicas dos processos. As razões dessas deteriorações estão relacionadas a problemas em equipamentos, tais como, defeitos em instrumentos de medição, agarramento em válvulas de controle e deficiências na configuração do sistema de controle, os quais podem causar perda de produção e de qualidade<sup>(3)</sup>. Esta afirmação é confirmada pelo estudo realizado por Desborough e Miller<sup>(4)</sup> que contemplou a avaliação de desempenho de 26.000 controladores PID, do qual um de seus resultados é mostrado na Figura 2. Por isto, observa-se um interesse cada vez maior na área industrial na busca de ferramentas para monitoração contínua de

desempenho de malhas de controle, que forneçam indicadores que possam auxiliar na detecção de problemas relacionados ao controle regulatório.



Figura 2. Resultado da avaliação de desempenho de 26.000 controladores PID.<sup>(3)</sup>

## 2 O PROJETO PILOTO

A certificação de desempenho de malhas de controle sempre foi uma questão discutida entre os especialistas de automação de uma planta siderúrgica, localizada em Serra, no Estado do Espírito Santo. Desde a sua partida em 1983, esta planta passou por duas fases de expansão de produção, vários projetos foram implantados e centenas de malhas de controle passaram a funcionar. Apesar disso, ainda hoje, com toda tecnologia de automação e informática disponível, pouco se conhece sobre o desempenho dessas malhas. Para dar o primeiro passo no sentido de compreender a real necessidade da realização de avaliação desempenho de malhas de controle na empresa, propôs-se a realização de um projeto piloto. O mesmo foi realizado entre junho de 2010 e dezembro de 2011 em uma central termelétrica a vapor (em operação desde 2004) pertencente à empresa. Ao todo, 40 malhas foram avaliadas. A metodologia adotada para condução do projeto, algumas questões relevantes observadas durante o seu desenvolvimento e os resultados alcançados são apresentados a seguir.

## 3 METODOLOGIA

Para avaliação de desempenho das malhas de controle é necessário estabelecer uma metodologia que possibilite quantificar o desempenho por meio de indicadores bem definidos, pois de outra forma a análise pode se tornar subjetiva. No projeto piloto, utilizou-se uma ferramenta de *software* que realiza o monitoramento de desempenho *on-line* de controladores de processo, para auxiliar na avaliação das malhas de controle. O projeto piloto foi dividido em quatro etapas, que são descritas a seguir.

### 3.1 Etapa 1: Implantação do Software de Monitoramento e Capacitação

Os métodos tradicionais de avaliação de desempenho de malhas de controle, comumente, fazem uso dos indicadores: *overshoot* (sobreelevação,  $M_p$ ); tempo de subida ( $t_r$ ); tempo de assentamento ( $t_s$ ), tempo de pico ( $t_p$ ) e *offset* (desvio). Entretanto, estes métodos requerem que testes intrusivos sejam realizados no processo (por ex., para obtenção de resposta ao degrau), consumindo tempo e recursos consideráveis. Entretanto, nas indústrias, é desejável que esta avaliação seja feita por meios não intrusivos (utilizando dados rotineiros de operação) e que

ela seja feita automaticamente (por ex., programável em software, por evento ou sob demanda) em centenas de malhas de controle. Por este motivo, optou-se pelo uso de uma ferramenta de monitoramento *on-line*. Dentre as ferramentas de software disponíveis no mercado, ao todo 11 ferramentas foram identificadas - Aspen Watch (AspenTech); ControlArts Performance Assessment Tool (ControlArts); CPM ProcessDoctor (Matrikon); Delta V Inspect (Emerson); LoopScout (Honeywell); LoopAnalyst (Invensys); Optimax (ABB); LoopBrowser (Metso); MD Pro (Shell / Yokogawa); PlantTriage (ExperTune); TriCLPM/BRPerfX (Petrobras / UFRGS / TriSolutions) - e algumas delas foram avaliadas por especialistas da empresa. A escolha do software para projeto piloto levou em consideração principalmente três critérios, a saber: (1) facilidade de uso da interface com o usuário; (2) suporte técnico no Brasil; e (3) custos de aquisição e de manutenção do software. A utilização de ferramenta de software possibilitou a geração de indicadores de desempenho para as malhas de controle e a realização de análises numéricas e gráficas. Diversos indicadores e métricas puderam ser configurados, para, então, compor uma nota geral para o desempenho de cada malha de controle (por exemplo, índice de Harris,<sup>(5)</sup> índices Nosi, Deli, Tuni e TuniPID, integral do valor absoluto do erro, índice de oscilação,<sup>(6)</sup> percurso de válvulas, dentre outros)<sup>(7,8)</sup> e também para auxiliar no diagnóstico de problemas de controle. Nesta etapa foram realizadas as reuniões para avaliação do processo e definição dos indicadores a ser utilizados para a quantificação de desempenho das malhas, gerando-se uma fotografia (*base line*) do estado inicial das malhas com relação ao desempenho. Também nesta etapa, um treinamento sobre a ferramenta de monitoramento *on-line* das malhas foi ministrado, para que as pessoas envolvidas com o projeto pudessem aproveitar todos os recursos disponíveis na mesma. Após uma análise detalhada, a equipe do projeto escolheu alguns indicadores para compor o cálculo de desempenho (ou nota) de cada malha.

### **3.1.1 Indicadores de desempenho e de serviço**

Os indicadores de desempenho permitem avaliar quantitativamente o controle relatório, ou seja, possibilitam verificar se as malhas de controle estão funcionando de maneira apropriada, de maneira a garantir estabilidade operacional e atendendo a requisitos mínimos de qualidade exigidos para o processo. Por outro lado, os indicadores de serviço possibilitam monitorar as condições de funcionamento da malha, tais como: se operam abertas (em malha aberta), se operam no seu modo normal ou se estão saturadas. Os principais indicadores utilizados no projeto piloto estão relacionados e descritos na Tabela 1.

Embora os indicadores desempenho sejam mais relevantes para avaliação das malhas de controle, os indicadores de serviço podem indicar situações atípicas de funcionamento das malhas que podem afetar significativamente o desempenho das mesmas.<sup>(9,10)</sup> Por isso, optou-se por criar equações para cálculo da nota de cada malha, que levassem em conta os indicadores de desempenho e de serviço para avaliação do desempenho da malha.

**Tabela 1** – Indicadores de desempenho e de serviço escolhidos para cálculo de desempenho

<b>Indicador</b>	<b>Descrição</b>	<b>Interpretação</b>
Índice de Harris (indicador de desempenho)	Medida do potencial de redução de variabilidade de uma malha de controle, tendo como base o controlador com variância mínima.	Variável: $0 \leq harris \leq 1$ . Adimensional. harris = 0 significa controle com variância mínima (ótimo); harris = 1 significa controle insatisfatório (ruim).
Erro percentual (indicador de desempenho)	Indica erro percentual ( $ SV-PV $ ) em relação ao valor do SV (ponto de ajuste do controlador), onde PV é variável de processo a ser controlada.	Variável: $0 \leq \text{percentualerror} \leq 100$ . Quanto menor o valor de percentualerror, melhor. Nota: SV também é conhecido por SP ( <i>set point</i> ).
Fator de amplificação (indicador de desempenho)	Empregado em malhas de controle de nível, com característica de pulmão, indica a relação entre os percentuais de variações da variável manipulada (MV) e a variações da variável de processo (PV).  Nota: MV também é chamado de OP ( <i>output</i> ).	Variável: $\text{amplificationfactor} \geq 0$ . Se $\text{amplificationfactor} < 1$ , indica característica de pulmão, neste caso o controlador é capaz de amortecer distúrbios da PV. Se $\text{amplificationfactor} > 1$ , é necessário grande esforço do controlador para redução de variabilidade do nível, neste caso a malha estará amplificando distúrbios.
Índice de Oscilação (indicador de desempenho)	Indica a detecção de ocorrências de oscilações na variável de processo (PV), por meio de método baseado na integral do erro absoluto (IAE) entre cruzamentos da variável de processo com o <i>setpoint</i> .	Variável: $\text{oscillation} \geq 0$ . O índice assume valores inteiros positivos para condição de oscilação e valor zero para ausência de oscilação. A magnitude do índice está relacionada com a amplitude das oscilações e com sua frequência.
Percentual do tempo em operação manual (indicador de serviço)	Indica o percentual do tempo que uma malha opera aberta.	Variável: $0 \leq \text{manualpercent} \leq 100$ . Apresenta o valor percentual do tempo que a malha operou aberta em relação ao intervalo de tempo sob avaliação.
Percentual do tempo de operação com saturação (indicador de serviço)	Indica o percentual do tempo que uma malha opera em condição de saturação.	Variável: $0 \leq \text{opsatpercent} \leq 100$ . Apresenta o valor percentual do tempo que a malha operou em condição de saturação em relação ao intervalo de tempo sob avaliação.

A Tabela 2 apresenta as equações típicas utilizadas no projeto piloto para o cálculo da nota de cada malha, em função da aplicação de cada malha no processo.

**Tabela 2** – Definição das equações típicas para cálculo das notas das malhas

Eq.	Configuração no software	Aplicação
Eq. 1	$(100 - \text{manualpercent}) * (100 - \text{opsatpercent}) / 100$	Aplicada em malhas onde se deseja apenas a monitoração dos indicadores de serviço (malha em controle manual ou em condição de saturação). Não possibilita a avaliação do desempenho da malha em relação ao controle do processo.
Eq. 2	$(1 - \text{harris}^3) * (100 - \text{manualpercent}) * (100 - \text{opsatpercent}) / 100$	Aplicável em qualquer malha, porém não recomendada para sistemas de alta ordem. Deve ser considerada como primeira opção para avaliação do desempenho.
Eq. 3	$\text{if}(\text{pvmean} > V_0, (1 - \text{harris}^3) * (100 - \text{manualpercent}) * (100 - \text{opsatpercent}) / 100, \text{nan})$	Idem Eq. 2, entretanto, aplicada em malhas que não operam de forma contínua. Neste caso, a nota da malha só é avaliada se o valor médio da PV (pvmean) for maior que $V_0$ , caso contrário a nota não é avaliada. Recomendada para malhas de controle de vazão, onde normalmente há um valor de corte no valor mínimo da medição de vazão. Valor típico adotado: $V_0 = 1$ (%) do valor final de escala ( <i>span</i> ).
Eq. 4	$\text{if}(\text{opmean} > V_0, (1 - \text{harris}^3) * (100 - \text{manualpercent}) * (100 - \text{opsatpercent}) / 100, \text{nan})$	Idem Eq. 2, entretanto, aplicada em malhas que não operam de forma contínua. Neste caso, a nota da malha só é avaliada se o valor médio da MV (opmean) for maior que $V_0$ , caso contrário a nota não é avaliada. Valor típico adotado: $V_0 = 10$ (%).
Eq. 5	$(1 / (1 + (1/E_0^2) * (\text{percentualerror} / 5)^2)) * (1 / (1 + (\text{oscillation} / 5)^2)) * (100 - \text{manualpercent}) * (100 - \text{opsatpercent}) / 100$	Aplicada em malhas de controle onde o índice de Harris é considerado um critério rigoroso para avaliação do desempenho da malha, por ex. em sistemas de alta ordem. Na equação, $E_0$ é o erro percentual ( $ SV - PV $ ) em relação ao valor do SV considerado aceitável para a malha de controle. Valor típico adotado: $E_0 = 1$ (%).
Eq. 6	$\text{if}(\text{amplificationfactor} > 1, 1 / \text{amplificationfactor} * (100 - \text{manualpercent}) * (100 - \text{opsatpercent}) / 100, (100 - \text{manualpercent}) * (100 - \text{opsatpercent}) / 100)$	Aplicada em malhas de controle de nível onde a filosofia de controle é permitir uma maior flutuação do nível quando ocorre um distúrbio, de forma a absorvê-lo lentamente e dentro de limites pré-estabelecidos, impactando o mínimo possível na vazão de descarga.

\* Eq. 5: aplicada em algumas malhas após a conclusão do projeto piloto, na fase de monitoramento contínuo.

O software de monitoramento de desempenho das malhas foi configurado para realizar leitura dos valores das variáveis de processo a cada 5 segundos, sendo estes dados lidos armazenados no servidor onde o software de monitoramento foi instalado. O processamento destes dados pelo software foi configurado para ser realizado a cada 12 horas para geração de relatórios com os indicadores calculados, pois este é o mesmo intervalo de tempo de um turno de trabalho na empresa.

### 3.2 Etapa 2: Avaliação do Controle Regulatório Existente

Após a implantação e configuração do software de monitoramento e cálculo de notas das malhas de controle, o mesmo gerou dados históricos para o desempenho das malhas de controle durante o intervalo de tempo de um mês. Nesta etapa, a equipe

do projeto utilizou os dados gerados para realizar a análise inicial do controle regulatório existente, identificar e diagnosticar problemas nas malhas de controle, identificar oportunidades de melhoria e estabelecer propostas de ações corretivas. Para facilitar a classificação dos tipos de problemas encontrados, os mesmos foram classificados em nove tipos de disposições possíveis, conforme mostrado na Tabela 3. A mesma tabela apresenta as quantidades de malhas afetadas por cada tipo de disposição (ou problema) identificado pela equipe do projeto. Vale lembrar que uma malha pode ter mais de uma disposição, de forma que o somatório dos percentuais resulta superior a 100%.

**Tabela 3** - Significado das disposições e frequências das malhas

Disposição	Significado	Nº de malhas	Percent. (%)
Nenhum problema	Nenhuma ação é requerida para a malha.	29	70,7
Config. do Sistema de Controle	Problemas na amostragem dos dados, configuração de blocos de lógica e cálculo, conversão de sinal, etc.	5	12,2
Manutenção	Problemas de manutenção de válvulas, instrumentos de medida, compressores, bombas, linhas, etc.	8	19,5
Sintonia	Configuração dos parâmetros PID do controlador	5	12,2
Config. do <i>software</i> de monitoramento de desempenho das malhas	A nota da malha, algum parâmetro de configuração ou algum <i>tag</i> (identificador) de variáveis foi configurado erroneamente no <i>software</i> .	0	0,0
Projeto	Dimensionamento de linhas, válvulas, equipamentos, seleção de válvula, etc.	0	0,0
Estrutura de controle	Erro de escolha da estratégia de controle, tipo de controlador, escolha de variáveis, erros conceituais no sinal da ação do controlador, etc.	0	0,0
Operação	Malha de controle em modo incorreto de operação, alterações de <i>setpoint</i> , uso de <i>by pass</i> , etc. Alterações de <i>setpoint</i> podem sugerir uso da malha no controle avançado.	0	0,0

O software de monitoramento de desempenho disponibiliza diversos tipos de dados, gráficos e recursos para análises. Algumas análises disponibilizadas pelo software são, dentre outros: detecção de oscilações; correlação entre malhas e causas de oscilações; condição de atuadores e válvulas de controle, como saturação, percurso, reversões, vida-útil e dimensionamento. Estes recursos auxiliaram significativamente na identificação dos problemas listados na Tabela 3.

### 3.3 Etapa 3: Aplicação de Ações Corretivas e Propostas de Melhoria

Nesta etapa, ações corretivas foram realizadas nos equipamentos e nas malhas de controle, conforme os tipos de problemas identificados na Etapa 2. Algumas ações, como manutenção em válvulas de controle, necessitaram ser realizadas durante uma parada programada da planta. As correções de configuração do sistema de controle e revisão da sintonia de malhas de controle foram realizadas com a planta em operação.

### 3.4 Etapa 4: Reavaliação do Controle Regulatório

Após execução das ações corretivas, o desempenho do controle regulatório da planta foi reavaliado e foram apurados os resultados do projeto, inclusive os ganhos financeiros obtidos. Na Figura 3 é possível comparar a situação da planta antes e após o desenvolvimento das ações corretivas. Ao todo, 18 problemas foram encontrados dentre as 40 malhas de controle avaliadas, 12 problemas foram solucionados, contudo, seis problemas relacionados à manutenção de válvulas de controle não puderam ser solucionados durante a parada programada da planta, ficando estes para ser corrigidos em outra oportunidade. A melhoria no controle do processo pode ser facilmente percebida por meio do gráfico da Figura 4, que apresenta o erro médio absoluto entre a PV e o SV da malha mestre de controle de pressão da caldeira, que é uma das principais malhas de controle da central termelétrica a vapor. Esta malha de controle apresentou uma melhoria significativa de desempenho, obtendo-se uma redução de aproximadamente 27% no erro médio absoluto. Este resultado evidencia que as ações corretivas proporcionaram, de forma efetiva, uma melhoria do controle de pressão da caldeira.

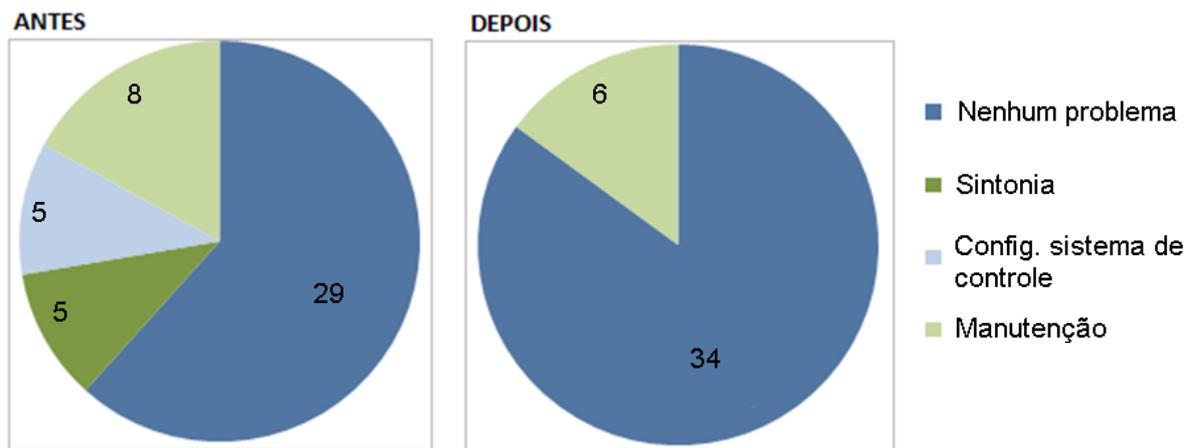


Figura 3. Distribuição das malhas por categoria de problema.

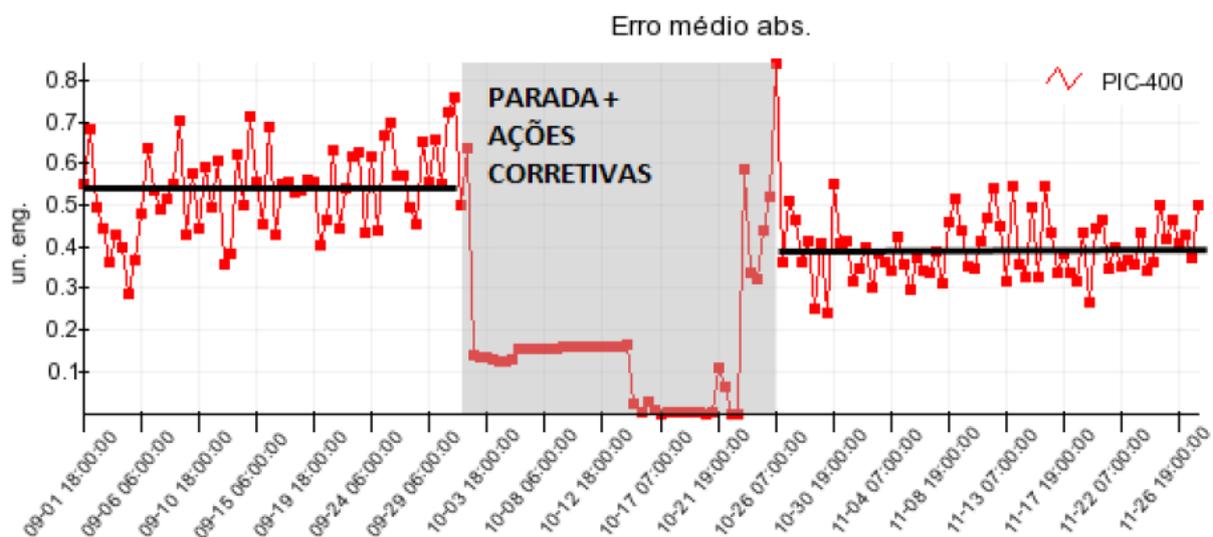


Figura 4. Variabilidade da malha PIC-400, antes e após as ações corretivas (índice: erro médio absoluto).

### 3.5 Etapa 5: Monitoramento Contínuo

A Etapa 5 constitui a fase de monitoramento dos indicadores de desempenho para avaliação da necessidade de aplicação de novas ações corretivas, podendo ser considerada como uma atividade de manutenção. Por isso, a Etapa 5 não foi considerada como uma etapa do projeto piloto. Apesar disso, a mesma tem fundamental importância para a detecção e diagnóstico de problemas rotineiros.

Na planta considerada, a equipe de Operação passou a utilizar com frequência a ferramenta de monitoramento de desempenho das malhas, que lhes fornece recursos para análise de questões operacionais.

### 3.6 Visão geral do projeto

A Tabela 4 apresenta um resumo dos objetivos e dos principais itens necessários ao desenvolvimento de cada etapa.

Tabela 4 – Objetivos e principais requisitos de cada etapa

Etapa	Objetivos	Itens necessários
<b>Etapa 1</b> (Monitoramento e capacitação)	<ol style="list-style-type: none"><li>1) Capacitar a equipe do projeto;</li><li>2) Definir a equação para cálculo de desempenho de cada malha;</li><li>3) Monitorar as malhas de controle e calcular periodicamente o desempenho do controle regulatório de cada malha.</li></ol>	<ol style="list-style-type: none"><li>1) Ferramenta de avaliação de malhas com índices de desempenho e métricas para diagnóstico.</li><li>2) Capacitação da equipe do projeto para avaliação dos índices e métricas e definição de ações de melhoria.</li></ol>
<b>Etapa 2</b> (Avaliação - Caso Base)	<ol style="list-style-type: none"><li>1) Analisar o desempenho do controle regulatório;</li><li>2) Identificar e diagnosticar problemas;</li><li>3) Identificar oportunidades de melhoria;</li><li>4) Estabelecer ações corretivas.</li></ol>	<ol style="list-style-type: none"><li>1) Ferramenta de avaliação de malhas com índices de desempenho e métricas para diagnóstico.</li><li>2) Equipe qualificada para avaliar os índices e métricas e definir ações de melhoria.</li></ol>
<b>Etapa 3</b> (Ações corretivas)	<ol style="list-style-type: none"><li>1) Configurar instrumentos de medida;</li><li>2) Realizar a manutenção de válvulas de controle;</li><li>3) Sintonizar parâmetros de controladores;</li><li>4) Alterar estratégias de controle, se necessário.</li></ol>	<ol style="list-style-type: none"><li>1) Planejamento das atividades;</li><li>2) Empenho da equipe do projeto para execução das ações corretivas estabelecidas.</li></ol>
<b>Etapa 4</b> (Reavaliação)	<ol style="list-style-type: none"><li>1) Reavaliar o desempenho do controle regulatório;</li><li>2) Identificar oportunidades de melhoria.</li><li>3) Apurar os resultados do projeto.</li></ol>	Idem Etapa 2.
<b>Etapa 5</b> (Monitoramento contínuo)	<ol style="list-style-type: none"><li>1) Acompanhamento periódico do desempenho;</li><li>2) Identificação da deterioração do desempenho e pronta atuação;</li><li>3) Melhoria contínua.</li></ol>	<ol style="list-style-type: none"><li>1) Ferramenta de avaliação de malhas com índices de desempenho e métricas para diagnóstico.</li><li>2) Tratar o desempenho das malhas de controle como um indicador de manutenção do controle de processo.</li></ol>

## 4 RESULTADOS

A melhoria no controle de pressão da caldeira proporcionou uma redução significativa de eventos de abertura da válvula de alívio de pressão (*blow off*) da caldeira (Figura 5) e da válvula de *by pass* (desvio) da turbina, por pressão alta,

reduzindo-se perdas de vapor. Além disso, as melhorias realizadas nas malhas de controle de vazão de ar de combustão e de controle de pressão da fornalha contribuíram para redução de perdas de energia por combustão incompleta de gases.

Os totais de perdas do processo apurados antes e após as ações corretivas são apresentados na Tabela 5. A redução destas perdas gerou para a empresa uma economia no consumo de combustíveis da central termelétrica. Outros ganhos obtidos com o projeto foram a redução de intervenções do operador no sistema para compensação de desvios do processo e a redução do número de eventos de alarmes nas estações de operação.

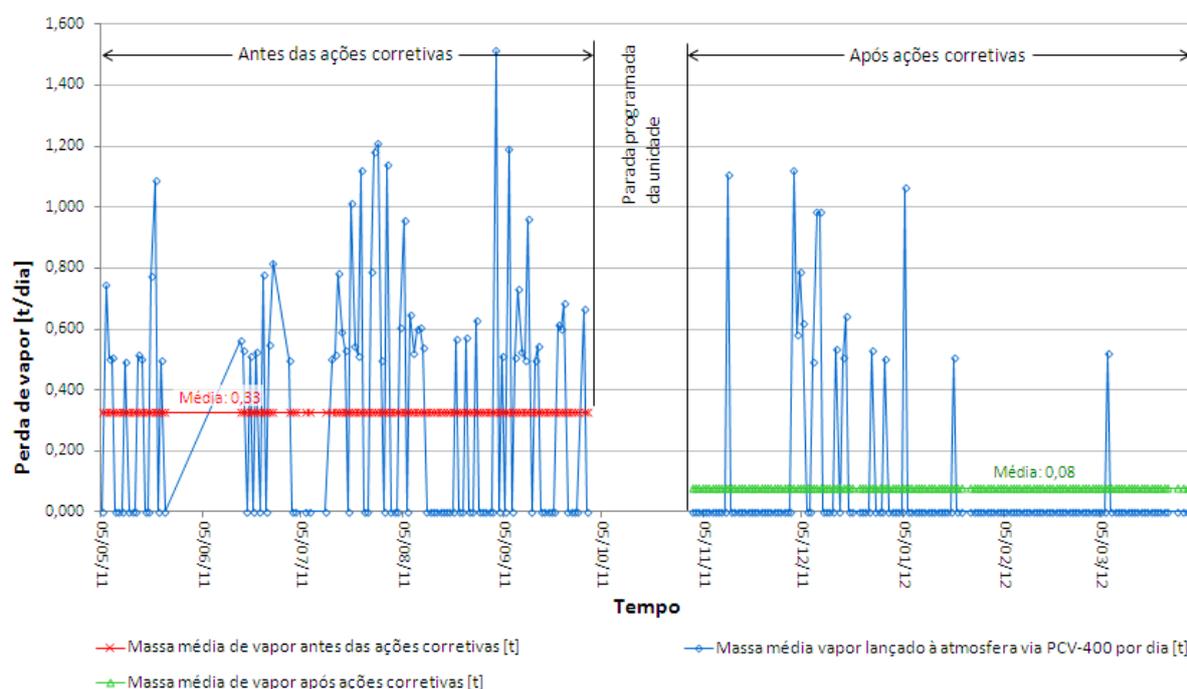


Figura 5. Perdas de vapor pela válvula de alívio de pressão (blow off).

Tabela 5 – Redução de perdas do processo

Perdas do processo	Antes das ações corretivas	Após ações corretivas	Percentual de Redução
Perda de energia por incombustos gasosos	0,91 Gcal/dia	0,55 Gcal/dia	39,6 %
Perda de vapor via válvula de alívio ( <i>blow off</i> )	0,33 t/dia	0,08 t/dia	73,9 %
	0,23 Gcal/dia	0,06 Gcal/dia	
Perda de vapor via válvula de desvio ( <i>by pass</i> ) da turbina	0,22 t/dia	0,20 t/dia	6,7 %
	0,15 Gcal/dia	0,14 Gcal/dia	
<b>Total de Perdas</b>	<b>1,29 Gcal/dia</b>	<b>0,74 Gcal/dia</b>	<b>42,6 %</b>

Estes resultados alcançados com o projeto piloto motivaram a implantação da monitoração de desempenho em outras três centrais termelétricas da empresa, com características similares a esta aplicada no projeto piloto. Dessa maneira, atualmente é possível comparar o desempenho de uma unidade em relação à outra, tornando mais fácil a identificação de oportunidades de melhorias.

## 5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

A implantação do projeto piloto para avaliação de desempenho do controle regulatório possibilitou a identificação de problemas no controle do processo e justificou a necessidade de aplicação de ações corretivas que proporcionaram melhorias no desempenho global da central termelétrica a vapor, na qual o projeto piloto foi desenvolvido, gerando ganhos operacionais e financeiros. Os resultados alcançados neste projeto piloto motivaram a realização da monitoração de desempenho de malhas de controle de outras três centrais termelétricas a vapor da empresa. Isso possibilitou comparar os desempenhos das malhas de cada central termelétrica, permitindo a uma fácil identificação de malhas que apresentam algum tipo de problema. A metodologia utilizada neste projeto se mostrou ser eficaz. A experiência obtida com o projeto piloto subsidiará a adoção de práticas similares em outras plantas.

### Agradecimentos

Os autores agradecem a importante colaboração dos técnicos e especialistas de Manutenção e de Operação da área de Utilidades e à Gerência de Produção de Energia da ArcelorMittal Tubarão.

### REFERÊNCIAS

- 1 MACIEJOWSKI, J.M. Predictive Control with Constraints, 1st ed., Prentice Hall, New York, 2002.
- 2 KEMPF, Ariel de Oliveira. Avaliação de Desempenho de Malhas de Controle. 2003. 165 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.
- 3 DESBOROUGH, L.; MILLER, R. Increasing Customer Value of Industrial Control Performance Monitoring: Honeywell's Experience, Proc. 6th Int. Conf. on Chemical Process Control (CPC VI), Arizona, USA, 2001, 172–192.
- 4 DESBOROUGH, L.; NORDH, P.; MILLER, R. L. Control System – Process out of Control, Industrial Computing, August 2001, 52 – 55.
- 5 HÄGGLUND, Tore. Industrial implementation of on-line performance monitoring tools, Control Engineering Practice, 2005, 13: p. 1383-1390.
- 6 HARRIS, Thomas J. Assessment of control loop performance. Canadian Journal of Chemical Engineering, 67(10): p. 856-861, 1989.
- 7 ORDYS, Andrzej; UDUEHI, Damien; JOHNSON, Michael A. Process Control Performance Assessment: From Theory to Implementation (Advances in Industrial Control), 1st ed., Springer-Verlag, London, 2010.
- 8 JELALI, Mohieddine; HUANG, Biao. Detection and Diagnosis of Stiction in Control Loops: State of the Art and Advanced Methods (Advances in Industrial Control), 2nd Printing ed., Springer-Verlag, London, 2010.
- 9 TriSolutions Soluções em Engenharia Ltda. TriCLPM - TriSolutions Control Loop Performance Monitor: Manual de Usuário, Versão 1.3, TriSolutions Soluções em Engenharia Ltda, Porto Alegre, 2010.
- 10 SORAIHI, Ghassan Al. Control Loop Performance Monitoring in An Industrial Setting: Basics, Concepts, Methods, 1st ed., VDM Verlag Dr. Müller, Saarbrücken, 2008.