

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM INDÚSTRIA 4.0

ELIELSON DE MATOS BATISTA

ESTABILIZAÇÃO DO PROCESSO COMO BASE PARA A
OTIMIZAÇÃO DE FORNO DE CAL

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO

PONTA GROSSA

2020

ELIELSON DE MATOS BATISTA

**ESTABILIZAÇÃO DO PROCESSO COMO BASE PARA A OTIMIZAÇÃO DE
FORNO DE CAL**

Trabalho de Conclusão de Curso de Especialização apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Especialista em Indústria 4.0, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Ponta Grossa.

Orientador: Prof. Dr. Rui Tadashi Yoshino

PONTA GROSSA

2020



Ministério da Educação
UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
CÂMPUS PONTA GROSSA
Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação



TERMO DE APROVAÇÃO DE TCCE

**ESTABILIZAÇÃO DO PROCESSO COMO BASE PARA A OTIMIZAÇÃO DE
FORNO DE CAL**

Elielson de Matos Batista

Este Trabalho de Conclusão de Curso de Especialização (TCCE) foi apresentado em 8 de fevereiro de 2020 como requisito parcial para a obtenção do título de Especialista em Indústria 4.0. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr Rui Tadaschi Yoshino

Prof. Orientador

Prof. Dr Max Mauro Dias Santos

Membro titular

Prof. Dr Frederic Conrad Janzen

Membro titular

**A FOLHA DE APROVAÇÃO ENCONTRA-SE ASSINADA NA SECRETARIA DO
CURSO**

Dedico este trabalho primeiramente ao soberano DEUS criador de todo universo, que me concedeu saúde e disposição para mais este desafio. Aos meus pais, família e amigos por torcerem por mim. À minha esposa e filha, minhas fontes de apoio e incentivo.

AGRADECIMENTOS

À UTFPR, professores e funcionários da instituição que contribuíram diretamente para viabilizar e promover a ampliação da minha rede de conhecimentos.

Aos colegas de curso pela possibilidade de construir amizades sólidas durante os períodos de estudos.

RESUMO

BATISTA, Elielson de Matos. **Estabilização do processo como base para otimização de forno de cal.** 2020. Monografia (Especialização em Engenharia de Indústria 4.0) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2020.

Neste projeto o objetivo central foi a redução do consumo específico de óleo combustível no forno de cal, garantindo adicionalmente uma operação estável e a especificação de variáveis importantes do processo, tais como o teor de oxigênio (O_2) e de monóxido de carbono (CO) nos gases de exaustão, temperatura da zona de queima, temperatura dos gases na zona de exaustão e do teor de carbonato residual na cal produzida ($CaCO_3$). Para atingir esse objetivo, e garantir as premissas de estabilidade e qualidade estabelecidas, foi necessário elaborar um projeto reservando atenção especial ao controle regulatório, onde as estratégias e melhorias implementadas foram fundamentadas em análises estatísticas viabilizadas pelas informações do processo produtivo disponíveis, softwares para análises de dados e do apoio e participação ativa da equipe operacional. Como resultado destas atividades, a variabilidade de variáveis importantes do processo foi reduzida em até 67%, viabilizando a implementação de algoritmos avançados para controle e otimização e contribuindo para a redução do consumo específico de óleo combustível em 7,3%. No decorrer do trabalho serão abordados os pontos-chaves na estabilização do processo, que inclui desde o acesso a dados de qualidade, passando pela aplicação de uma metodologia de diagnóstico do controle básico, mudança de estratégias de controle para estabilização do processo e gestão da cultura entre equipes multidisciplinares e fornecedores.

Palavras-chave: Forno de cal, controle regulatório, estabilização, controle avançado, eficiência energética, diagnóstico operacional.

ABSTRACT

BATISTA, Elielson de Matos. **Process stabilization as a basis for lime kiln optimization**. 2020. Work of Conclusion Course of Specialization in Automation and Control of Industrial Process - Federal Technology University - Paraná. Ponta Grossa, 2020.

In this project the main goal was the reduction of the specific oil consumption in the lime kiln, keeping a stable operation and the specification of important process variables, as the content of oxygen (O_2) and carbon monoxide (CO) in the exhaust gases, temperature of the burning zone, temperature of the gases in the exhaust zone and the residual carbonate content in the produced lime ($CaCO_3$). To achieve this objective, and to guarantee the stability and quality requires, it was necessary to elaborate a project and giving a special attention to regulatory control, where the strategies and improvements implemented were based on statistical analyzes made through information from the production process available, software for data analysis and the support and active participation of the operational staff. As a result of these activities, the variability of important process variables was reduced by up to 67%, enabling the implementation of advanced algorithms for control and optimization and contributing to the reduction of specific fuel oil consumption by 7.3%. During the work will be approached the keys points for stabilization of the process, which includes quality data access, methodology for diagnosing basic control, changing control strategies to stabilize the process and culture management among multidisciplinary teams

Keywords: Lime kiln, regulatory control, stabilization, advanced control, energy efficiency, operational diagnosis

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	8
2 MÉTODOS.....	10
2.1 ENTENDIMENTO DO PROCESSO E DA CULTURA OPERACIONAL.....	10
2.2 DIAGNÓSTICO DO PROCESSO.....	11
2.3 AUTOMATISMO DO CONTROLE DE PRODUÇÃO - VAZÃO DE LAMA.....	13
2.2 LÓGICA AVANÇADA NO SISTEMA DE LIMPEZA DO FILTRO DE LAMA.....	14
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	16
4 CONCLUSÕES.....	18
REFERÊNCIAS.....	19

1 INTRODUÇÃO

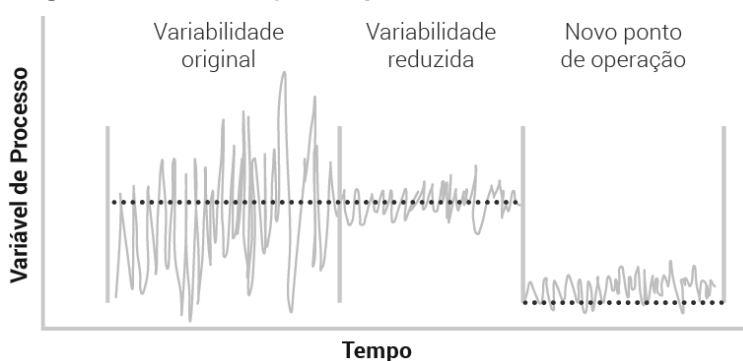
Sistemas de controle avançado de processos e otimização são uma realidade nos diversos tipos de indústria quando o objetivo é o aumento de eficiência. Os benefícios deste tipo de solução passam pelo aumento da estabilidade, segurança e lucratividade dos processos, seja pela atuação antecipatória e multivariável, exemplo o MPC (*Model Predictive Control*), seja pelos procedimentos automatizados de transição de produção, ou por via de otimização estacionária por algoritmos personalizados (Campos, et al. 2009). Estas qualidades são essenciais em processos da indústria química onde se deseja otimizar recursos, especialmente em indústrias de papel e celulose, caracterizado pelos circuitos fechados e dinâmicas complexas com elevados tempos mortos.

Outro fator relevante para a utilização de soluções avançadas em indústrias de papel e celulose é a elevada demanda energética destes processos, especialmente no forno de cal, equipamento objeto deste estudo, e o rígido controle ambiental sobre estes equipamentos. O forno converte o carbonato de cálcio (CaCO_3) em óxido de cálcio (CaO) que será utilizado em outras etapas no processo. A reação libera dióxido de carbono (CO_2) e pode liberar monóxido de carbono, emissões de enxofre (TRS) e outros contaminantes caso a reação não seja bem controlada. Para que ela ocorra é necessário a introdução de calor via queima de combustíveis, visto ser uma reação endotérmica (calcinação). O material se desloca dentro do forno em contracorrente com os gases de queima, absorvendo calor, e precisa atingir 800°C para que a reação ocorra (JÄRVENSIVU, et al. 2001).

O sucesso de algoritmos avançados é fortemente dependente da base sobre as quais estes sistemas são implementados. Sistemas bem instrumentados, equipes de operação capacitadas, e bons sistemas de controle regulatório são pré-requisitos para que estes sistemas sejam mantidos ligados (CAMPOS, et al. 2009), sendo fundamentais para qualquer progresso da Indústria 4.0, especialmente em cenários de equipes e processos cada vez mais enxutas. Assim, a análise e adequação dos sistemas de suporte pode não só influenciar no resultado alcançado pelo projeto, como na sustentabilidade destas soluções. Outro ponto a ser considerado são os benefícios alcançados diretamente com a melhoria de desempenho e de robustez destes sistemas.

A Figura 1 apresenta o comportamento clássico atribuído a projetos de controle avançado. É evidente que a operação em um novo ponto otimizado com menor consumo energético, por exemplo, só será possível quando houver redução da variabilidade característica do processo original. Além disso, os ganhos serão maiores quanto mais próximo possível for a operação dos limites operacionais, ou seja, quanto mais estável for o processo.

Figura 1 - Estabilização do processo como alicerce à otimização de processos



Fonte: Autoria própria

A abrangência das atividades ao considerar também os sistemas de suporte e fazer uma boa interface entre as diferentes ferramentas de distintos fornecedores (gerenciamento de ativos, armazenamento e análise de dados, simuladores, etc.) é muitas vezes fator chave na captura de resultados e na aceitação da nova cultura operacional pela equipe de operação, que no final das contas será sempre o cliente final da solução.

O presente trabalho mostra as soluções inovadoras desenvolvidas durante o projeto de implementação de um controle avançado no forno de cal de uma fábrica integrada de produção de celulose. Estas atividades serviram como base para que o sistema instalado pudesse alcançar o máximo retorno. A atuação abrangente, que incluiu o diagnóstico do desempenho, a avaliação de malhas e o desenvolvimento de lógicas avançadas para a estabilização do processo permitiu que um novo patamar de estabilização fosse alcançado pela unidade. Esta preparação foi fundamental para que o sistema de controle avançado (MPC) pudesse reduzir o consumo de óleo combustível, respeitando as restrições operacionais e garantindo a qualidade do produto final.

2 MÉTODOS

Para atingir o objetivo de estabilização do processo, desenvolveu-se um trabalho criterioso com o entendimento da cultura operacional, o diagnóstico da condição atual do processo, e a implementação de ações corretivas no sistema de controle. Com essas ações foi possível reduzir variações que impactariam no bom funcionamento do controle avançado, bem como a necessidade de intervenções manuais, o que contribuiu para a padronização de ações de controle. As principais intervenções serão apresentadas a seguir.

2.1 ENTENDIMENTO DO PROCESSO E DA CULTURA OPERACIONAL

A primeira ação ao iniciar um novo projeto foi o contato com as equipes responsáveis pela operação, manutenção, engenharia e gestão do processo industrial. Neste momento, além de definidas as expectativas e resultados desejados para a execução, foi estabelecida a relação entre os pontos focais das equipes envolvidas. Após estabelecida esta relação, foi dado início ao entendimento das características específicas do processo, a partir de entrevistas com os pontos focais. Todas as informações não estruturadas coletadas (dados, experiência de equipes, informações da tecnologia do processo), serviram de base para o diagnóstico do sistema e a implementação de ações corretivas. O envolvimento com a cultura operacional permitiu também a produção de materiais de apoio adequados para a equipe, com o desenvolvimento de manuais de operação, telas de acompanhamento da ferramenta, além de treinamentos personalizados para acompanhar e interagir com o sistema. Este ambiente de interação e confiança entre as equipes de trabalho, no qual todos colaboram de forma horizontal com o seu conhecimento adquirido, contribuiu fortemente para os resultados atingidos.

2.2 DIAGNÓSTICO DO PROCESSO

A identificação de pontos de melhoria teve o objetivo de mapear as variáveis e os equipamentos que geravam os principais distúrbios no processo, os quais mereceriam a atenção antes da implementação do sistema de otimização. Para esta análise foram avaliados os comportamentos oscilatórios e identificadas as características destes sinais, como, por exemplo, a frequência e a magnitude (espectro), além da correlação cruzada dos mesmos. Estas metodologias de análise são uma ferramenta importante para identificar interações não óbvias em processos e caracterizar frequências recorrentes e dominantes, mesmo que defasadas, e que podem ser propagadas por diferentes sistemas, afetando o desempenho geral destes processos (SHAH, et al. 2005). A origem destes distúrbios pode estar associado ao comportamento de controladores regulados com ganhos excessivos, bem como a presença de perturbações externas oscilatórias. Kempf (2003) apresenta um estudo abrangente na área de avaliação de desempenho de malhas. Para diagnosticar se a causa de uma determinada oscilação pode ser atribuída à um controlador específico, é possível avaliar o comportamento das variáveis de interesse quando a malha é colocada em modo manual, segundo o método não automático sumarizado em Hägglund (1995). Estas análises enriquecem o diagnóstico em sistemas integrados como é o caso de indústrias de papel e celulose, e por isso não ficou delimitada somente às variáveis do forno, mas sim contemplaram sistemas auxiliares e eventualmente compartilhados com outros processos produtivos.

A partir dessa avaliação inicial foi possível identificar fontes de perturbações externas como o anel de distribuição de óleo combustível e o acoplamento entre os distúrbios na zona de alimentação do forno com o filtro de lama - LMD/CPR (*Lime Mud Dryer / Continuous Precoat Renewal System*). A Figura 2 mostra que a componente principal de variabilidade (com maior energia) está correlacionando três variáveis: a pressão da bomba de lavagem de alta pressão do filtro de lama, o teor de oxigênio e a temperatura na zona de exaustão dos gases (câmara de fumaça). O período de acoplamento identificado foi de 28 min, aderente ao ciclo de funcionamento do CPR do filtro. Essa conclusão não é direta pela simples análise visual dos dados históricos, visto os comportamentos dinâmicos e tempos mortos envolvidos.

Figura 2 - Análise espectral para identificação de oscilações periódicas

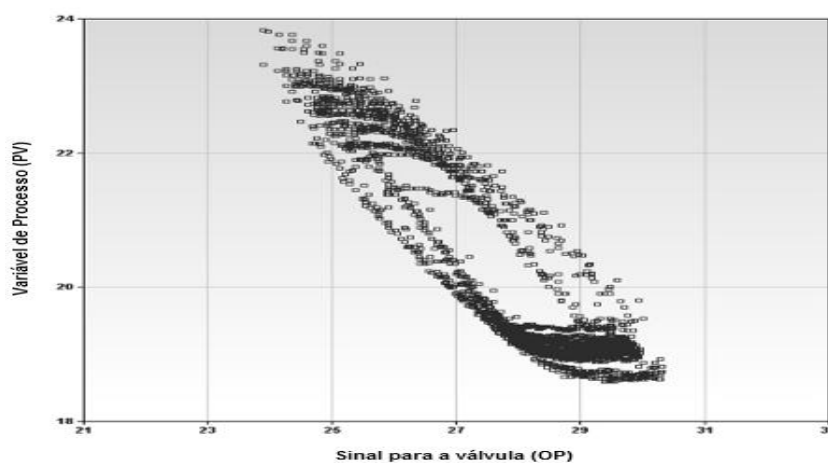
19.10.2017 01:00:00 - 19.10.2017 05:50:00, Todos dados

	Potência de variação [%] com comprimento de período [h:m:s]		
	00:28:21	00:14:19	00:09:27
	Pressão BBA lav. Alta CPR F2	72	3
Temperatura Gases F2~^0	90	9	
O2 Camera de Fumaça F2	70	20	6

Fonte: Autoria própria

Além do comportamento oscilatório foram avaliadas outras oportunidades de melhoria a partir do diagnóstico de desempenho das malhas de controle regulatório. Longhi, et al. (2012) mostram como uma metodologia estruturada pode ser utilizada para detectar sintonias inadequadas, estruturas de controle equivocadas, malhas com atuações em excesso, além da necessidade de manutenção em instrumentos e atuadores. Este levantamento foi obtido através da ferramenta de avaliação de desempenho das malhas de controle regulatório, conversa com equipes de operação e da análise de dados de processo no sistema historiador. A Figura 3 mostra o diagrama PV x OP com um exemplo de uma malha identificada com problemas de agarramento. Todas as demandas levantadas, foram priorizadas e encaminhadas às equipes de manutenção e instrumentação da unidade as quais foram responsáveis pela implementação das ações corretivas em cada caso.

Figura 3 – Válvula detectada com agarramento - diagrama PV x OP



Fonte: Autoria própria

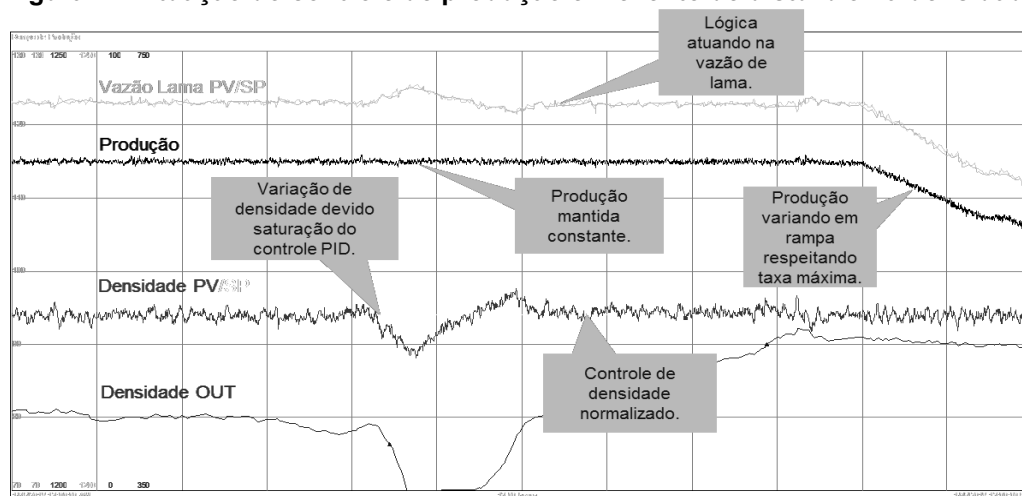
2.3 AUTOMATISMO DO CONTROLE DE PRODUÇÃO - VAZÃO DE LAMA

O objetivo desta alteração foi proporcionar uma maneira automatizada e padronizada para as transições de carga no forno, respeitando as dinâmicas de acomodação do material. Transições muito bruscas podem ocasionar a variação na composição da cal recuperada (carbonato residual) e, com isso, o descarte desse material. Seus efeitos ainda podem ser correlacionados com a formação de incrustação (anéis) e pelo empoeiramento interno do forno, com o inconveniente de gerar paradas não programadas para limpeza.

A lógica foi implementada diretamente no SDCD a partir da combinação dos blocos padrão do controlador. Com essa funcionalidade o operador define o valor desejado de produção e o algoritmo traduz esta produção em vazão de lama, considerando a curva da lama versus o teor de sólidos e o valor de densidade do analisador on-line. A lógica define o valor de *setpoint* da malha de controle de vazão, limitando a velocidade de aumento, em função da variação máxima configurada.

Esta estratégia tem uma série de vantagens como a menor variação nas temperaturas de exaustão (seção de alimentação da lama) e de entrada do ciclone, nos teores de oxigênio, nos gases de exaustão (seção de alimentação da lama) e de CaCO_3 residual na cal tratada (seção de saída). Além disso ela garante a padronização nas transições de carga e a conservação da produção no valor de referência, sem a necessidade da intervenção do operador. A Figura 4 mostra um exemplo do controle de produção com a estratégia proposta. Fica claro o desempenho satisfatório da malha ao manter a estabilidade da produção mesmo com distúrbios na densidade.

Figura 4 – Atuação do controle de produção em evento de distúrbio na densidade



Fonte: Autoria própria

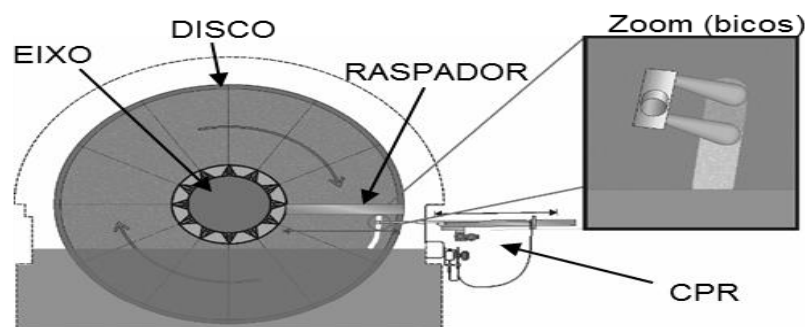
2.4 LÓGICA AVANÇADA NO SISTEMA DE LIMPEZA DO FILTRO DE LAMA-CPR

O objetivo desta alteração foi de minimizar as perturbações na carga do forno, permitindo um controle mais preciso das temperaturas e do teor de oxigênio na seção de secagem da lama e viabilizando a implementação de estratégias avançadas de controle. Para isso foi projetada uma modificação nos parâmetros de funcionamento do equipamento que faz a limpeza e a renovação da camada dos discos do filtro de lama (CPR). A renovação é feita de maneira simultânea e intermitente em cada disco do filtro, sendo um único disco por vez, iniciando pela parte externa e indo em direção ao centro do disco (área menor) e depois retornando à parte externa. A lógica avançada consiste na automatização na operação do equipamento de renovação com novos parâmetros para os perfis de pressão (média e alta) ao longo do percurso, a velocidade dos carros, a sequência de abertura das válvulas de limpeza e o número de bicos utilizados e a sincronização dos carros em cada filtro.

Sempre que os bicos de lavagem estão na parte mais externa do disco (área maior), percebe-se uma tendência de maior corrente no motor da esteira transportadora, indicativo de maior quantidade de material transportado e como consequência, uma menor temperatura e menor teor de O₂ nos gases de exaustão

do forno (seção de alimentação da lama). A Figura 5 ilustra o esquema do CPR atuando em um disco do filtro de lama.

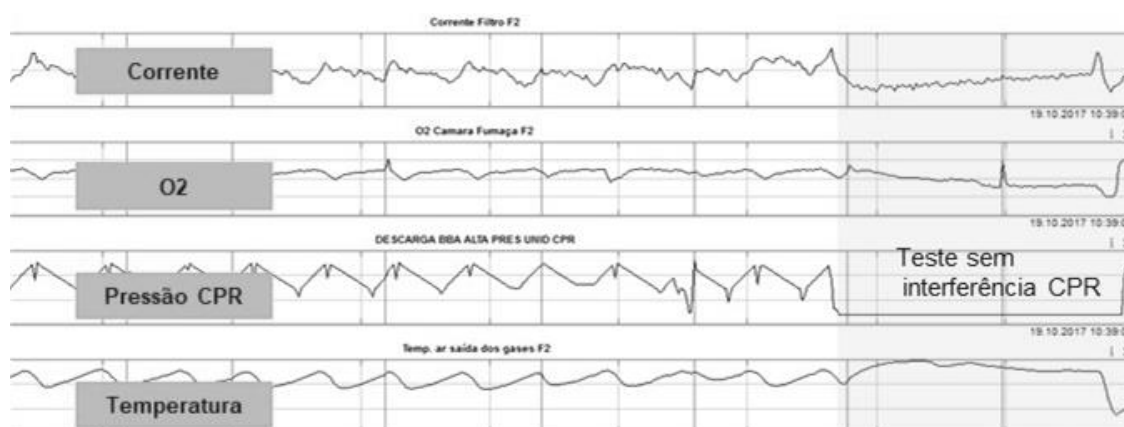
Figura 5 – Esquema do funcionamento do CPR



Fonte: Autoria própria

A Figura 6 mostra os testes realizados durante a implementação da lógica avançada para a limpeza dos filtros. Nota-se o efeito imediato na redução das oscilações da corrente do motor acionador da esteira de alimentação, do teor de oxigênio e da temperatura nos gases de exaustão quando o sistema foi desligado. Posteriormente, foram executados testes mais elaborados para a determinação dos parâmetros da lógica que geravam o menor impacto possível no forno, visto que a operação deste sistema é fundamental para o funcionamento do forno.

Figura 6 – Testes durante implementação da lógica avançada para limpeza dos filtros



Fonte: Autoria própria

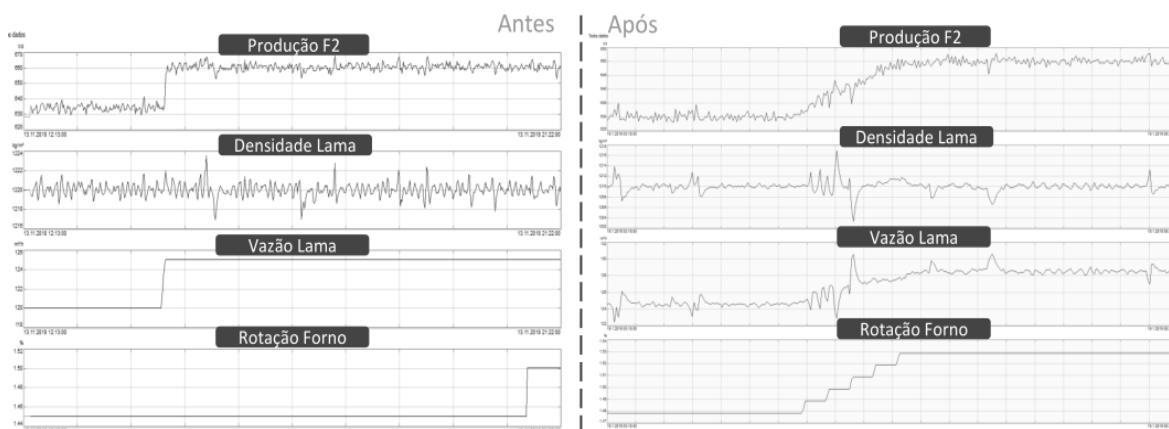
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O trabalho de análise dinâmica e posteriores adequações no controle regulatório e desenvolvimento de algoritmos foram decisivos para a redução em 67% na magnitude das oscilações na temperatura dos gases na zona de exaustão e de 50% no teor de oxigênio, aprimorando de forma imediata o processo de queima do forno e o melhor aproveitamento da energia na recuperação da cal.

A Figura 7 mostra o comportamento do processo antes e após as ações corretivas. É possível observar a maior estabilidade da produção do forno a partir da configuração da lógica para controle automático desta variável. Com ela as mudanças de ponto de operação ocorrem em rampa e a medida de densidade é considerada na definição da vazão de lama. Nota-se também a adequação da rotação do forno à medida em que a carga do forno aumenta. A Figura 8 apresenta os resultados destas modificações na redução da variabilidade de variáveis importantes, neste caso a temperatura e o teor de O₂ nos gases de exaustão.

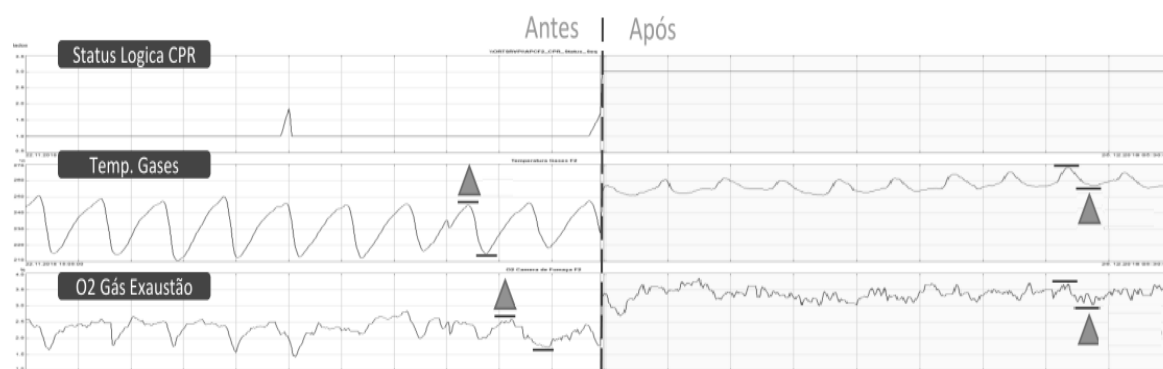
Além do resultado direto, este novo patamar de estabilidade permitiu que o controle avançado pudesse trabalhar de forma adequada, reduzindo o consumo de óleo combustível e assegurando a especificação de variáveis importantes. O projeto atingiu resultado global em redução no consumo específico de óleo na ordem de 7,3%. Em acréscimo, espera-se que a nova cultura operacional contribua para o menor número de intervenções e paradas não programadas no equipamento, bem como preservação dos revestimentos do forno.

Figura 7 – Variáveis de estabilização do forno antes e após as ações corretivas



Fonte: Autoria própria

Figura 8 – Comportamento da Temperatura e O₂ nos gases de exaustão antes e após as ações corretivas



Fonte: Autoria própria

4 CONCLUSÕES

O presente trabalho apresentou como as soluções de controle regulatório são importantes para projetos de otimização de processos. Quando as atividades de estabilização do processo são efetivas, elas contribuem para que os sistemas atinjam o máximo retorno possível. A atuação abrangente com a utilização de ferramentas e técnicas de identificação e análise de distúrbios somadas à sinergia entre as equipes participantes do projeto foram fundamentais para o correto diagnóstico e o desenvolvimento de lógicas personalizadas que contribuíram para que um novo patamar de estabilização fosse alcançado pela unidade. Esta atuação na estabilização do processo foi uma medida efetiva e fundamental para o sucesso do projeto de otimização.

REFERÊNCIAS

CAMPOS, M., TEIXEIRA, H., LIPORACE, F. E GOMES, M., **Challenges and problems with advanced control and optimization technologies**, International Symposium on Advanced Control of Chemical Process, Turkey, July 12-15, ADCHEM, 2009.

HÄGGLUND, T.; **A Control Loop Performance Monitor**, Control Engineering Practice, Vol. 3, pp. 1543-1551, 1995.

JÄRVENSIVU, M., SAARI, K., JÄMSÄ-JOUNELA, S-L. **Intelligent control system of an industrial lime kiln process**. Control Engineering Practice. 9. 589-606, 2001.

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.

LONGHI, L.G.S., REGINATO, A.S., TEIXEIRA, H.C.G., CORTEZ, C.A.C., LUSA, L.P., GONZALEZ, S.S., & FLECK, T.D. 2012. **Control loop performance assessment and improvement of an industrial hydrotreating unit and its economical benefits**. Sba: Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automatica, 23(1), 60-77, 2012.

YLINIEMI, L. **Advanced Control of Rotary Dryer**. 1999. f.114. Dissertação (Departamento de Engenharia de Processos) – University of Oulu, FIN. Oulu. 31 May, 1999.

SHAH, S. L., TANGIRALA, A. K., THORNHILL, N. F., **PSCMAP: A new tool for plant-wide oscillation detection**. Journal of Process Control 15, pp. 931–941, 2005.