

APLICAÇÃO DE FERRAMENTAS ESTATÍSTICAS BASEADAS EM METODOLOGIAS DE ANÁLISE MULTIVARIÁVEL PCA E SIX SIGMA NO DIAGNÓSTICO DE DEFEITOS EM LINHA DE LAMINAÇÃO DE TIRAS À QUENTE – LTQ¹

*Constantino Seixas Filho²
Marcos Oliveira Fonseca³
Bernardo Soares Torres⁴
Antonio Carlos Bergamaschi⁵
Matheus Lage Miranda⁶*

Resumo

O objetivo deste artigo é apresentar as principais práticas e ferramentas estatísticas adotadas para análise de variáveis de processo e diagnósticos de defeitos em uma linha de Laminação de Tiras à Quente (LTQ). O artigo discute os conceitos da análise multivariável PCA e Six-sigma e ressalta que o uso de ferramentas estatísticas, aliado ao conhecimento do processo produtivo, auxilia na determinação e na seleção das variáveis mais impactantes para a eficiência operacional do processo, promovendo ganhos de produtividade e desempenho operacional.

Palavras-chave: Análise multivariável; PCA; Six-sigma; Processo LTQ.

APPLICATION OF STATISTICAL TOOLS BASED IN PCA AND SIX SIGMA MULTIVARIABLE ANALYSIS METHODOLOGIES IN THE DIAGNOSIS OF DEFECTS IN HOT STRIP MILL - HSM

Abstract

This paper aims to present the main practices and statistical tools used for process data analysis and diversion diagnosis in a hot strip mill (HSM). The article discusses the concepts of multivariate analysis PCA and Six-sigma and emphasizes that the use of statistical tools, combined with production process knowledge, assists in determining the most impacting variables in operational efficiency of the process, promoting productivity gains and operational performance.

Key words: Multivariable analysis; PCA; Six-sigma; HSM process.

¹ Contribuição técnica ao 14º Seminário de Automação de Processos, 6 a 8 de outubro de 2010, Belo Horizonte, MG.

² Engenheiro Eletrônico, M.Sc, Sênior Executive da área de Technology. Accenture Automation and Industrial Solutions (AAIS), Belo Horizonte – MG, Brasil.

³ Engenheiro Eletricista, M.Sc., Sênior Manager da área de Technology. Accenture Automation and Industrial Solutions (AAIS)

⁴ Engenheiro Eletricista, M.Sc., Manager da área de Process Optimization. Accenture Automation and Industrial Solutions (AAIS)

⁵ Engenheiro Mecânico e Eletricista, M.Sc., Manager da área de Automation. Accenture Automation and Industrial Solutions (AAIS)

⁶ Engenheiro de Controle e Automação área de Process Optimization. Accenture Automation and Industrial Solutions (AAIS)

1 INTRODUÇÃO

A constante necessidade de redução de custos e a maximização da produtividade exigem que as empresas busquem obter melhorias de eficiência operacional em seus processos produtivos. Uma das formas de atingir esses objetivos é por meio de estratégias de identificação de oportunidades e de proposição e implementação de soluções que utilizem a informação e a infra-estrutura já existentes.

Segundo Pessali et al.,⁽¹⁾ métodos e ferramentas que auxiliem na tomada de decisão estão cada vez mais sendo incorporadas ao ambiente industrial. Isso se deve à capacidade de agregar valor ao processo de análise de variáveis do processo e agilizar a etapa de diagnóstico e de identificação de oportunidades de melhoria. Além disso, essas ferramentas permitem conjugar o conhecimento advindo do comportamento histórico do processo com as práticas operacionais utilizadas e o conhecimento de especialistas para maximizar o desempenho operacional do processo.

Outra questão relevante a ser considerada é que, com o passar do tempo, as práticas produtivas se alteram devido às necessidades de adequação operacional às novas realidades de mercado. Com o advento de novos produtos do processo de laminação, a base histórica de produção necessita de análises sob a ótica de diferentes ferramentas analíticas para a determinação dos diagnósticos dos problemas produtivos, buscando melhorias de rendimento e redução da geração de defeitos nos produtos acabados.

Com base nesta abordagem, o presente artigo mostra alguns aspectos da aplicação dessas metodologias e ferramentas como suporte à determinação de diagnósticos relacionados com desvios e/ou defeitos em bobinas a quente (BQ) produzidas em uma linha de tiras a quente (LTQ).

2 METODOLOGIA E FERRAMENTAS

A Figura 1 ilustra a metodologia DMAIC adotada durante o projeto de diagnóstico de defeitos em uma linha de laminação LTQ.

DMAIC, acrônimo oriundo das siglas em inglês - **D**efine, **M**easure, **A**nalyze, **I**mprove and **C**ontrol, é uma ferramenta da metodologia Six-Sigma focada na melhoria incremental de processos existentes. Por meio dessas cinco etapas, procura-se estabelecer uma forma sistemática de realizar melhoria contínua de processo de forma objetiva e com auxílio de técnicas e ferramentas estatísticas. A metodologia DMAIC conduz as equipes do projeto a pensar logicamente na identificação de soluções que resolvam as causas dos problemas e assim estabelecer práticas que garantam que as soluções sejam implementadas.

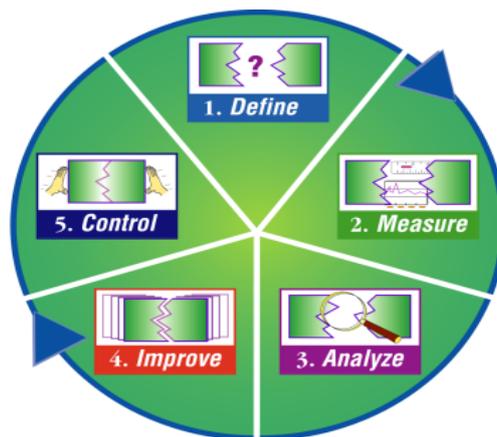


Figura 1: Esquema da metodologia DMAIC.

Em um projeto para se identificar oportunidades para melhoria operacional de processos, essa metodologia é utilizada empreendendo-se as seguintes atividades em cada uma das etapas a seguir:

2.1 Definir (Define)

São estabelecidos os objetivos do projeto e seus indicadores de desempenho e financeiros. Esta tarefa envolve o mapeamento das expectativas do cliente, transformando-as em especificações do projeto. Ressalta-se a importância de se reunir com o cliente e entender suas necessidades e os principais pontos a serem melhorados de acordo com o foco nos negócios. A partir disso, busca-se estabelecer o cenário e escopo de análise do processo produtivo. Ao final desta fase do projeto, deve-se certificar de que o time definido esteja perfeitamente alinhado, conhecendo claramente os objetivos do projeto, a importância e o papel de cada uma para o desenvolvimento do trabalho.

2.2 Medir (Measure)

Etapa dedicada ao estudo e compreensão da situação atual do processo onde são obtidas informações e coletados dados confiáveis sobre desempenho, qualidade, custos e valor agregado para serem utilizados na etapa de análise de processo. A primeira atividade desta etapa se destina às visitas ao processo produtivo para entender o funcionamento das principais operações e influências e/ou interdependências entre processos. Depois disso, parte-se para o estudo do processo onde são selecionadas as principais variáveis e indicadores de desempenho. Em seguida, inicia-se uma análise estatística preliminar das informações como, por exemplo, gráficos de pareto, histograma, gráfico de barras, etc.; como forma de traçar um mapa de processo, onde sejam estabelecidos os cenários de análise e sejam evidenciadas as atuais condições operacionais e os principais pontos de controle do processo.

2.3 Analisar (Analyze)

Por meio da análise de dados de variáveis de processo, busca-se identificar e verificar variáveis e/ou fatores que comprometem o desempenho satisfatório de um processo. Segundo Ohasaku,⁽²⁾ o diagrama de causa-efeito é uma ferramenta simples e útil para listar os prováveis fatores contribuintes para um determinado problema no processo produtivo como forma de aumentar a probabilidade de

identificar corretamente as principais causas. Geralmente, esse tipo de diagrama, também conhecido como diagrama espinha-de-peixe, é construído a partir da realização de workshops envolvendo os colaboradores de diversas áreas da empresa, como, por exemplo, produção, engenharia, qualidade, manutenção, operação etc. A Figura 2 mostra um exemplo ilustrativo do diagrama de causa-efeito.

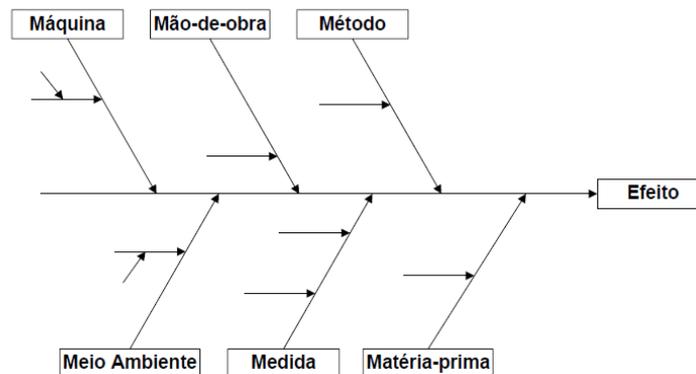


Figura 2: Exemplo de diagrama de causa-efeito.

O uso de ferramentas estatísticas auxilia na identificação da causa-raiz do problema definido a partir da análise de variáveis de processo. Um diagnóstico preliminar pode ser obtido a partir da visualização gráfica dos dados, histogramas e matriz de correlação entre variáveis. Segundo Pessali et al.,⁽¹⁾ modelos não-lineares gerados a partir de dados de processo podem ser criados com auxílio de ferramentas de software dedicado com o objetivo de realizar análises e simulações de causa-efeito baseadas em valores de decisão alternativos e hipóteses, que por sua vez, podem contribuir para identificar causa-raiz e soluções de problemas.

Segundo Theart,⁽³⁾ PCA (*Principal Component Analysis*) é uma técnica de controle estatístico multivariado que permite projetar o espaço original de variáveis num espaço de dimensão mais reduzida, formado por variáveis derivadas das originais, designadas por componentes principais. O procedimento de PCA faz uma partição da variância nos componentes principais, projetando o espaço original de variáveis num espaço de dimensão mais reduzida, sendo que cada componente principal é calculado de forma a reter a maior quantidade de variância presente nas variáveis originais.

A Figura 3 exemplifica a técnica de PCA.

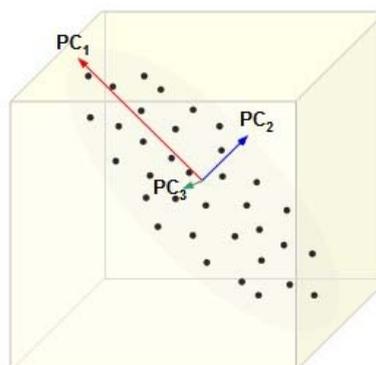


Figura 3: Exemplo da análise PCA.

Supondo um conjunto inicial de dados contendo apenas três dimensões sendo elas, X, Y e Z, conforme mostrado na Figura 3. A partir da contribuição das variáveis

originais, são gerados três novos eixos que maximizam a variabilidade capturada das medidas realizadas. Pelo exemplo da Figura, dos três eixos gerados podem ser retidas no modelo somente as duas componentes que explicam a maior parte da variabilidade (reduzindo as dimensões do grupo de variáveis), conforme ilustra a Figura 4. Essa redução de dimensões diminui a massa de dados a ser analisada com uma perda mínima de informação.

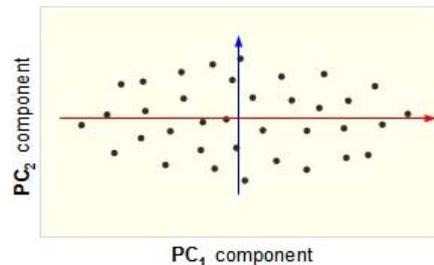


Figura 4: Exemplo de modelo PCA com duas componentes principais.

A análise PCA é uma ferramenta muito usada em reconhecimento de padrões, ou seja, medir a correlação entre variáveis de entrada e saída para poder gerar modelos preditivos de processo. Segundo Conceição,⁽⁴⁾ esta ferramenta é ainda usada para se obter uma visão geral dos dados, identificar agrupamentos e eliminar *outliers* (amostras com comportamento anômalo). Conceição⁽⁴⁾ destaca ainda que a idéia central do PCA é extrair um pequeno número de componentes principais que descrevam tanto quanto possível a variação presente nos dados, ou seja, gerar variáveis que resumam as principais fontes de variação nos dados de processo. Ao final desta etapa, para realizar as melhorias nos processos são elaborados projetos ou planos de ação acompanhados de cronogramas, dimensionamento de recursos necessários, custos e retorno do investimento.

2.4 Melhorar (Improve)

Objetiva-se implementar as melhorias ou otimizar seus processos baseados no mapeamento feito nos projetos ou planos de ação. Geralmente é feita uma estimativa de viabilidade econômica das ações identificadas com o objetivo de definir o seqüenciamento e a prioridade das mesmas segundo critérios de tempo, recursos e resultados esperados. A verificação e quantificação dos benefícios deverão ser delineados nesta fase, por meio de uma análise comparativa antes versus depois das ações de melhoria. Espera-se que um novo patamar de desempenho seja alcançado, gerando novos valores de níveis Sigma do processo, comprovando a eficiência das ações implementadas. Ressalta-se que o comprometimento das pessoas envolvidas na execução das ações é um fator vital para o sucesso da implementação e dos resultados a serem obtidos a partir desta etapa.

2.5 Controlar (Control)

Objetiva-se garantir sustentabilidade das ações executadas na etapa anterior. Segundo Oliveira,⁽⁵⁾ o estabelecimento de um sistema permanente de avaliação e controle é fundamental para garantia da qualidade alcançada e identificação de desvios ou novos problemas, os quais devem exigir ações corretivas e padronizações de procedimentos.

3 EXEMPLO DE UTILIZAÇÃO DA METODOLOGIA DE ANÁLISE EM UMA LINHA DE LAMINAÇÃO DE TIRAS A QUENTE – LTQ

Os resultados obtidos para um projeto de diagnóstico foram baseados na premissa de redução de desvios e/ou defeitos no produto final de uma linha de laminação de tiras a quente (LTQ). O atual índice de desvios de processo era considerado elevado, gerando impacto na produtividade uma vez que aumentava o custo de produção e paradas na linha de produção. Além disso, os desvios de processo acarretavam em redução de margem de venda das bobinas que apresentavam alguma anomalia. O projeto objetivou definir planos de melhoria de processos que reduziram a taxa de desvios de processo.

Uma análise preliminar realizada na base de dados históricos de produção mostrou que diversos defeitos eram gerados e/ou causados por diversas fontes em partes distintas dos processos de produção. Além disso, havia situações onde ocorriam mais de um tipo de defeito em um único produto final.

Devido à quantidade das variáveis envolvidas nos processos da LTQ, a dimensão da análise do problema aumenta, tornando as investigações e os diagnósticos de prováveis causas raízes bem mais complexos. Para abordagem dos problemas foi necessário estruturar o projeto em fases da seguinte forma:

- formalização do escopo – área, processo, produto, recursos, equipes;
- fixação de parâmetros de controle de projeto – resultados esperados;
- levantamento de dados – análise dos defeitos, perdas e desvios de produtos;
- geração de diagnósticos e relatórios de evidências – aplicação de ferramentas analíticas; e
- programa de melhorias – foco nos curtos e médios prazos.

Desde as etapas de preparação e mapeamento de informações, passando pelas atividades para a identificação dos problemas, e finalizando a etapa de implantação das ações corretivas, diversos recursos e abordagens tiveram que ser aplicadas com a integração de metodologias e ferramentas.

Dentre as macro-atividades para a obtenção dos diagnósticos, citam-se as principais que foram necessárias para a integração dos recursos e ferramentas:

- análise de causa-raiz para determinar oportunidades de melhorias que objetivaram reduzir o índice de defeitos de processo;
- desenvolvimento de um modelo para entender o impacto dos defeitos nos processos à jusante e à montante a laminação de tiras a quente – LTQ;
- identificação e implementação de ações de melhoria operacional tendo como foco as áreas do forno de reaquecimento de placas e da bobinadeira final de tiras a quente; e
- geração de um plano de ação e matriz das oportunidades de melhorias no processo de laminação de tiras a quente - LTQ.

Para exemplificar o processo de análise, considera-se o defeito de dobramento da tira na região da cauda, o qual é observado na fase final de bobinamento.

Para diagnosticar este problema, buscou-se o maior número possível de registros históricos e informações disponíveis nas bases de dados de produção e nas bases de dados dos sistemas de automação sobre o comportamento das variáveis relacionadas aos equipamentos principais e periféricos relacionados.

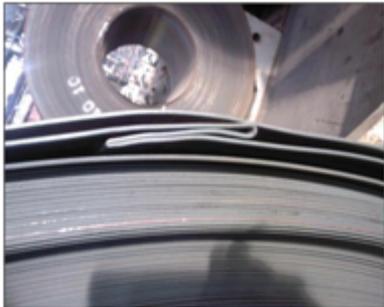
A partir disso, realizou-se workshops com as equipes de operação, manutenção, automação e processo na identificação de possíveis causas do problema e, na seqüência, foi gerado um macro-diagrama de causa-efeito (indicado na Figura 2).

As informações de anomalias foram obtidas a partir da geração da “descrição do defeito” conforme ilustra a Figura 5. Para cada defeito relevante obtiveram-se todas

as informações disponíveis a partir de registros e evidências ocorrida por problemas operacionais e por intervenções corretivas nos equipamentos e sistemas.

❑ Descrição do Defeito “Dobras da Tira na Região da Cauda”

- Dobras são encontradas geralmente nas espiras finais da bobina (cauda da bobina – final de bobinamento).
- O metal é dobrado sobre si mesmo ocorrendo ao longo de toda a seção transversal da tira/chapa.
- O mecanismo de formação do dobramento está relacionado no modo como o material está sendo impulsionado a velocidades altas numa região de restrição física e mecânica.
- Observou-se a possibilidade de ocorrência do dobramento na seção entre as mesas de rolos e o rolo puxador e entre o rolo puxador e o mandril da bobinadeira.
- Os parâmetros de processo relacionados com as velocidades lineares dos acionamentos devem ser analisados.



- Equipamentos e sistemas relacionados :
- Mesas de Rolos da Saída - Oscilação da tira devido falta de sincronismo nas velocidades da seção;
- Rolo Puxador da Saída – Analisar pressão, abertura e velocidades dos rolos no final do bobinamento;
- Bobinadeira Final - Analisar sincronismo de velocidade do mandril no final do bobinamento;
- Guias Laterais e Rolo Puxador – Analisar ações do controle de posição das Guias Laterais.

Figura 5: Exemplo de descrição de defeito.

Além do diagrama de causa-efeito, foram feitas análises de agrupamento com o objetivo de relacionar o tipo de defeito com as características intrínsecas dos produtos, como, por exemplo, espessura final, tipo de aço, composição química. A Figura 6 ilustra este tipo de análise.

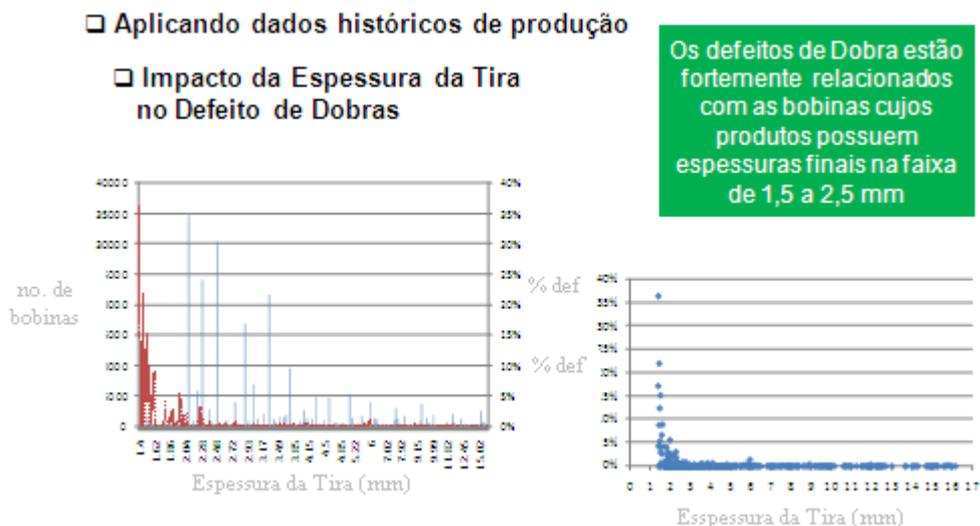


Figura 6: Análise de agrupamento.

Além das análises conclusivas obtidas pelas ferramentas estatísticas clássicas, outras análises de relevância realizadas eram os diagnósticos obtidos pela técnica de PCA, que permitiram a identificação de causa-raiz através da interpretação gráfica dos resultados da análise multivariada das variáveis de processo. As Figuras 7 e 8 ilustram este tipo de análise.

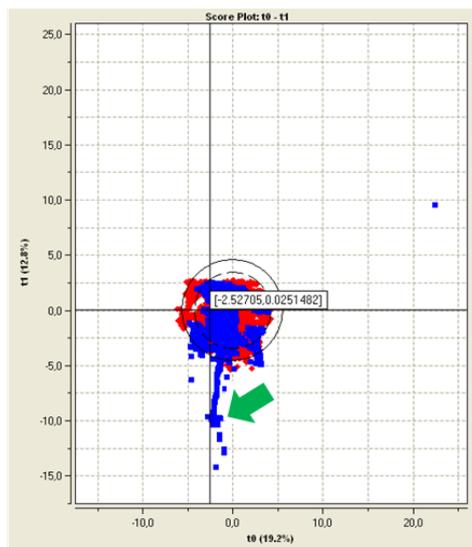
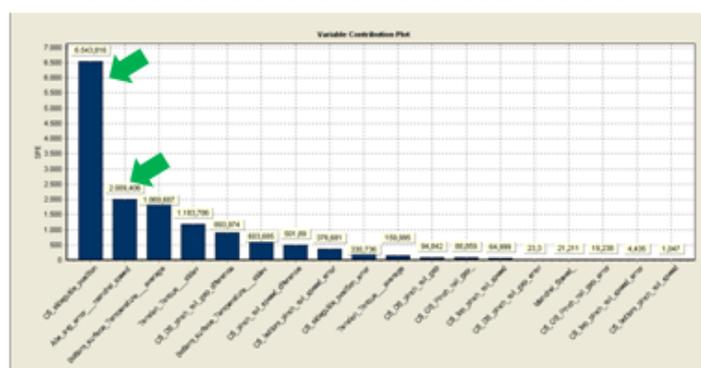


Figura 7: Exemplo de aplicação do PCA para determinação de causa-raiz.

DIAGRAMA DE VARIÁVEIS DE CONTRIBUIÇÃO
Defeito de Dobramento da Tira na Cauda da Bobina



- Neste diagrama é mostrado que do grupo de variáveis envolvidas no bobinamento a Causa Potencial que motiva o defeito Dobramento da Tira na Cauda da Bobina está fortemente vinculado a:
 - Posição da Guia Lateral - (Sideguide position)
 - Erro de velocidade do mandril – (Mandrel speed "error")

Figura 8: Exemplo de aplicação do PCA – Diagrama de Variáveis.

O exemplo mostrado na Figura 7 apresenta a interpretação gráfica da comparação de um conjunto de variáveis para bobinas de bom estado, em vermelho com bobinas com defeito, em azul.

Segundo Theart,⁽³⁾ a técnica PCA converte o conjunto de dados para nestes padrões gráficos onde a diferença entre os grupos de variáveis entre as bobinas de bom estado e com defeito pode ser destacada.

Neste exemplo, para a análise do defeito em questão (defeito de dobramento da tira da região da cauda da bobina), pode-se ver claramente a diferença entre os padrões de formação entre o azul e o vermelho, indicando que algumas variáveis levadas em consideração na análise contribuíram para a causa do defeito nas bobinas produzidas.

Além disso, a técnica de análise permite também identificar quais variáveis têm a maior contribuição na diferença entre os dois padrões de bobinas produzidas.

Na Figura 8, as variáveis que contribuíram de forma mais relevante para o defeito podem então ser analisadas através do seu comportamento nos sistemas de

controle, na operação dos equipamentos, nos procedimentos de operação e no controle dos processos.

Com base nas análises realizadas para os defeitos mais relevantes, elaborou-se um plano de ação e composto por uma matriz com as oportunidades de melhorias no processo de laminação de tiras a quente. Para cada tipo de ação documentada, foi realizado um estudo de viabilidade em termos de custos, prazos e benefícios potenciais que nortearam a definição das prioridades e o estabelecimento do cronograma das atividades de melhoria operacional.

4 RESULTADOS

Os principais ganhos identificados após a execução das atividades para o diagnóstico do processo de laminação – LTQ foram os seguintes:

- identificados e priorizados o elenco dos principais agrupamentos de problemas-chave ou defeitos que contribuíam com as maiores perdas na linha de produção e com os índices mais relevantes de desvios nas bobinas produzidas;
- identificadas as causas raízes para os defeitos classificados como os mais relevantes nas bobinas produzidas na linha de tiras a quente resultando, em 64 ações de melhorias diretas no processo de produção;
- implantação de plano de ação com medidas de curto prazo e médio prazo, sendo identificado uma redução de 53% no índice global de desvios nas bobinas produzidas com as aplicações de melhorias de curto prazo;
- melhoria de produtividade e rendimento na linha de produção com impacto na redução global de desvios, com medidas de adequação de processos, alteração de práticas operacionais, otimização de sistemas de controle e ações de governança, com contribuição global em torno de R\$ 6 Milhões/ano.
- atualmente, encontra-se em curso medidas para a extensão das análises e dos diagnósticos de problemas para as linhas de produção após o LTQ, ou seja, para as linhas de laminação a frio.

5 CONCLUSÕES

O uso de métodos e ferramentas de análise multivariável PCA e Six-sigma agrega valor à etapa de análise de variáveis e agilizam o diagnóstico das condições operacionais de um processo. Além disso, segundo Torres, Silva e Carvalho,⁽⁶⁾ essas ferramentas permitem conjugar o conhecimento advindo do comportamento histórico do processo com as práticas operacionais utilizadas e o conhecimento de especialistas para identificar oportunidades que maximizem o desempenho operacional do processo.

A partir da implantação das atividades mapeadas no plano de ação foi possível mensurar os benefícios e o impacto dessas ações na redução do índice de defeitos do processo de laminação de tiras a quente – LTQ.

A metodologia e as ferramentas aqui aplicadas para a análise e obtenção dos diagnósticos de perdas e desvios de produto final para a planta de laminação de tiras a quente – LTQ podem ser, de forma similar, amplamente aplicadas nos demais processos siderúrgicos.

Um projeto com esta abordagem pode ser conduzido tanto para análise e identificação de problemas conhecidos, caracterizando-se como oportunidades de melhorias, bem como uma busca pela melhoria de desempenho a partir de situações não muito claras e definidas, a princípio numa zona-alvo da planta a ser investigada.

Como mensagem final ressalta-se que o foco será sempre o de atuar na identificação e priorização das oportunidades de curto e longo prazo, buscando com cada implantação soluções que acrescentem e sustentem valor para o negócio.

REFERÊNCIAS

- 1 Pessali, G.L.A., Frigo, L.B., Silva, D.H.C., Rodrigues, F.M., Carvalho, F.R. "Identificação de Oportunidades para Melhoria Operacional em Processos Minerometalúrgicos com uma Abordagem Quick-Wins", Congresso ABM, 2009.
- 2 Ohasaku, R.T., "Aplicação da metodologia DMAIC para aumento de produtividade em um call center de uma agência de viagens de grande porte", Trabalho de conclusão de curso, Departamento de Engenharia de Produção, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2005.
- 3 Theart, A., "Saldanha Steel boosts its yield by getting the kink out of its coil", Note 3, Saldanha Steel Application Note - Arcelor Mittal Group, 2008.
- 4 Conceição, P.R.N., "Utilização da análise multivariada de dados na otimização de misturas de minerais industriais para a formação de tintas", 2006, 166f, Tese (Doutorado em Engenharia), Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio do Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.
- 5 Oliveira, G. N., "A metodologia DMAIC: uma alternativa robusta para melhoria de processos". Monografia de conclusão do curso de pós-graduação *Lato Sensu* em Matemática e Estatística, Universidade Federal de Lavras, Minas Gerais, 2005.
- 6 Torres, B.S., Silva, J.L., Carvalho, F.B., "Achieving high performance in industrial processes – A methodology for enhancing process performance", 2009, artigo Accenture, 16f.