

# AUMENTO DE PRODUTIVIDADE DO TREM ACABADOR DO LTQ2 - CSN<sup>1</sup>

Arthur Guimarães Alves<sup>2</sup>  
Fábio Oliveira Araujo<sup>3</sup>  
Sidney Ferreira da Silva<sup>4</sup>  
Thiago Vieira Lopes<sup>5</sup>

## Resumo

O presente trabalho tem por objetivo reduzir o tempo de processamento do trem acabador do laminador de tiras a quente 2 da CSN, através da variação dos parâmetros que constituem o perfil de velocidade deste equipamento. Com base na teoria das restrições, foram identificadas as dimensões das bobinas de aço ao carbono mais processadas com o trem acabador como gargalo de produção. Fazendo uso de ferramentas estatísticas para base do estudo, foi definido para quais destas dimensões seria possível ajustar os parâmetros de velocidade do trem de modo a se reduzir o tempo de processamento e com isso aumentar a produtividade global sem efeitos deletérios à qualidade. Com o uso da metodologia 6 SIGMA foi possível reduzir o tempo de processamento de bobinas processadas como gargalo acabamento de modo a aumentar a produtividade do LTQ2 da CSN.

**Palavras-chave:** Produtividade; Estatística; Trem acabador.

## INCREASE IN PRODUCTION RATE OF THE FINISHING MILL AT THE HOT STRIP MILL 2 - CSN

### Abstract

The present work aims to reduce the processing time of the finishing mill by varying the parameters that constitute the speed profile of this equipment. Based on the theory of constraints, it was identified the dimensions for the low carbon steel coils in which the process ran while the finishing mill was the bottleneck. Using statistical tools to support the study, the cases in which would be possible to adjust the speed parameters of the mill were defined so as to reduce the processing time and thereby increasing the overall productivity without side effects to the quality of the strips. Using the 6 SIGMA methodology, it was possible to reduce the processing time of coils in which the finishing mill was the production bottleneck and so increasing the production rate at the hot strip mill #2 of CSN.

**Keywords:** Production rate; Statistics; Finishing mill

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 50º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 18 a 21 de novembro de 2013, Ouro Preto, MG, Brasil.

<sup>2</sup> Engenheiro Metalúrgico. Engenheiro de Produção Sr. CSN. Volta Redonda, RJ, Brasil.

<sup>3</sup> Engenheiro Metalúrgico. Engenheiro de Produção Sr. CSN. Volta Redonda, RJ, Brasil.

<sup>4</sup> Engenheiro Metalúrgico. Engenheiro Especialista CSN. Volta Redonda, RJ, Brasil.

<sup>5</sup> Engenheiro Metalúrgico. Engenheiro de Produção Jr. CSN. Volta Redonda, RJ, Brasil.

# 1 INTRODUÇÃO

Diante da necessidade de se garantir volume de produção na fase da laminação a quente, o presente trabalho objetivou aumentar a produtividade LTQ2 da CSN por meio do aumento da produtividade do laminador de acabamento.

## 1.1 O Trem Acabador do LTQ -2 da CSN

O trem de acabamento do LTQ2 é composto por 7 cadeiras four-high, das quais 3 com roll shifting system (da segunda à quarta cadeira) e 3 com controle automático de espessura. (da quinta à sétima cadeira, usando HAGC)

A velocidade laminador varia conforme os parâmetros da Figura 1 imediatamente após a sétima cadeira, está posicionado um pirômetro que mede a temperatura de saída do acabamento.

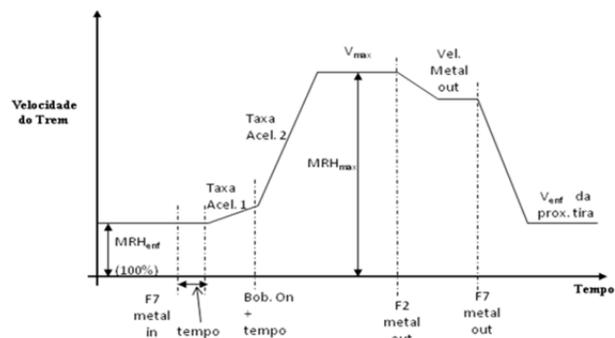


Figura 1. Perfil de velocidade do trem acabador do LTQ 2 da CSN.

## 1.2 Tratamento Térmico após a Laminação de Acabamento

No LTQ- 2, o sistema de resfriamento, chamado *laminar flow*, conta com quatorze bancos dispostos em série, dos quais 4 com controle de abertura individual das tuberias e 10 com abertura simultânea. Após os bancos, está posicionado um pirômetro que mede a temperatura de bobinamento. (*Coiling temperature* ou CT)

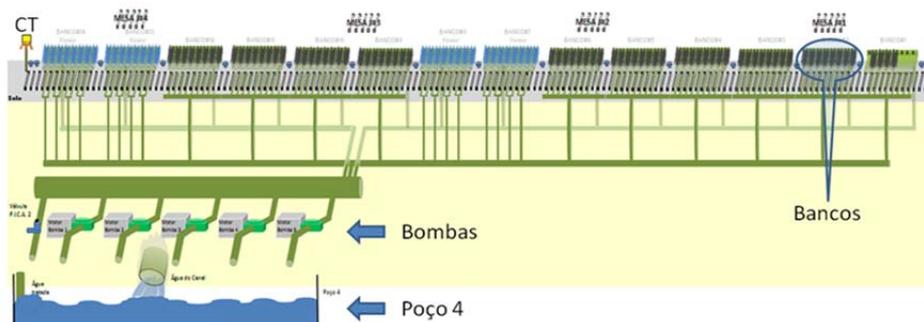


Figura 2. Layout do laminar flow do LTQ 2 da CSN.

## 1.3 Capacidade de Processo

As curvas da distribuição normal mostram a probabilidade de aceitação de lotes com variação da porcentagem de defeituosos. A curva (A) da Figura 3

representa o nível  $3\sigma$ , com variação do processo igual à tolerância de projeto. Já na curva (B) a variação é igual a 50% da variação de projeto e representa o nível  $6\sigma$ .<sup>(1)</sup>

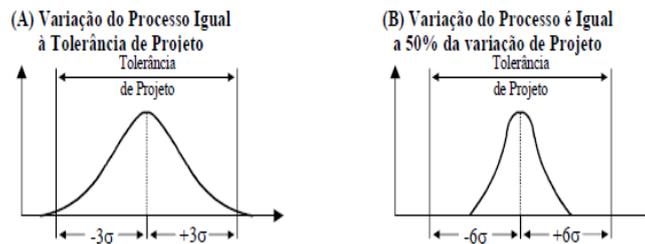


Figura 3. Os seis SIGMAS em uma distribuição normal.<sup>(2)</sup>

Com frequência a média do processo é visada em relação à faixa de especificação, ou seja, tende ao Limite de Tolerância Superior (LSE) ou para o Limite de Tolerância Inferior (LIE. Nesses casos, é necessário calcular os índices de Cpk para compreender a capacidade do processo, ao invés dos simples índices de Cp.<sup>(2)</sup>

## 1.4 Teste de Hipóteses

O procedimento utilizado para a tomada de decisões sobre hipóteses estatísticas é chamado de teste de hipóteses.

A hipótese nula é aquela que se deseja testar. A rejeição da hipótese implica na aceitação da hipótese alternativa.

O *P-value* é a probabilidade de que a estatística de teste assuma um valor que é, no mínimo, tão extremo quanto o observado da estatística quando a hipótese nula for verdadeira. (menor nível de significância para rejeição da hipótese nula).<sup>(2)</sup>

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

O projeto de aumento da produtividade do trem acabador foi desenvolvido sob a metodologia 6 Sigma, e desta forma, passou pelas etapas de Definição, Medição, Análise, Implantação de melhorias e Controle, completando o ciclo do DMAIC.

### 2.1 Fase de Definição

Nesta fase, usou-se da ferramenta Sipoc, na qual os especialistas levantaram todos os fornecedores, entradas, saídas e clientes do processo com foco no aumento da produtividade do trem acabador. Esta ferramenta favoreceu o entendimento do escopo do projeto.

Diante das diversas variáveis no contexto de transformação do esboço em tira, foi possível, através da matriz de causa e efeito, pontuar a correlação de cada entrada de processo definida no Sipoc, com as saídas referentes ao aumento da produtividade.

Na elaboração da matriz de causa e efeito, os especialistas pontuaram separadamente a correlação de cada entrada do processo com as saídas, volume de bobinas e qualidade das bobinas.

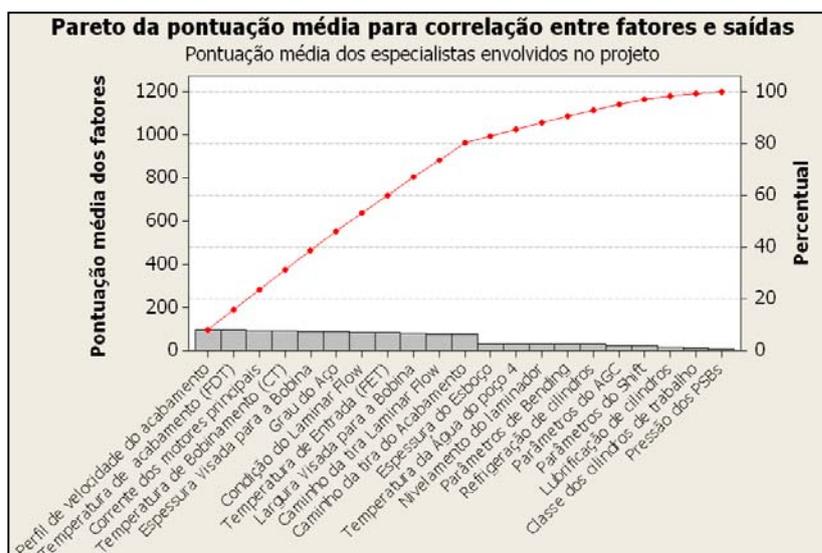


Figura 4. Gráfico de Pareto da matriz de causa e efeito.

Com o objetivo de mitigar possíveis modos de falha nas fases seguintes da metodologia, foi desenvolvida a análise de modo de falha e efeito, ou FMEA. Cada causa para os modos de falha foi pontuada conforme a capacidade de ser detectada, a frequência com que o processo está exposto a tal condição e a severidade do efeito que cada causa acarretará. Multiplicando a pontuação dos três fatores citados, se consolida o RPN (*Risk Priority Number*)

Definidas as prioridades de risco elaborou-se um plano de ações rápidas para minimizar as interferências dos modos de falha no processo.

Tabela 1. Plano de ações do FMEA

	Modo de falha	Efeito	Plano de Ação		
			What?	Who?	When?
1)	Modificação nos parâmetros de velocidade	O aumento da velocidade pode trazer o FDT e o CT para fora dos limites estabelecidos.	Avaliar os efeitos do aumento da velocidade no trem para estes parâmetros.	Arthur	31/03/2012
			Análise do FDT, CT e RDT histórica e de capacidade.	Sidney/Arthur	31/10/2012
5)	Modificação nos parâmetros de velocidade	O aumento de velocidade pode fazer com que se atinja o limite de corrente dos motores	Avaliação histórica da corrente máxima dos motores principais das cadeiras do trem acabador.	Arthur	31/03/2012
2)	Linha de passe fora nas mesas de saída do acabamento.	Embolamento nas mesas de saída, risco de sucata.	Incluir no controle do caminho da tira do laminar flow, um controle o perfil das mesas	Arthur	31/03/2012
6)	Bancos em condições limitadas de operação.	Temperatura de bobinamento fora dos limites estabelecidos	Avaliar causa do entupimento e encaminhar para equipe de manutenção.	Arthur	31/03/2012
			Criar controle dinâmico e prático para os parâmetros operacionais mais importantes do sistema de resfriamento.	Arthur	31/03/2012
3)	Erro na oscilação calculada	Temperatura de entrada no trem acabador fora dos padrões estabelecidos	Adequar o cálculo da oscilação no modelo matemático para atendimento da temperatura de entrada	Sidney/Fábio	31/03/2012
4)	Itens do caminho da tira do acabamento fora do padrão.	Instabilidade de processo e não atendimento dos parâmetros de qualidade.	Desenvolver controle do caminho da tira para o trem acabador. (Prático e dinâmico)	Arthur	25/10/2012

## 2.2 Fase de Medição

No trem acabador do laminador de tiras a quente 2 da CSN se laminam diversas espessuras e larguras de tiras em variadas composições químicas. Para a funcionalidade dos modelos matemáticos do trem acabador, os aços a serem laminados são divididos em classes de espessura, largura e grau, definição interna para as diferentes composições químicas dos aços produzidos na CSN.

Com o levantamento de dados das bobinas laminadas no período de 2011, foi possível identificar as classes de grau e espessura mais laminadas como gargalo trem acabador.

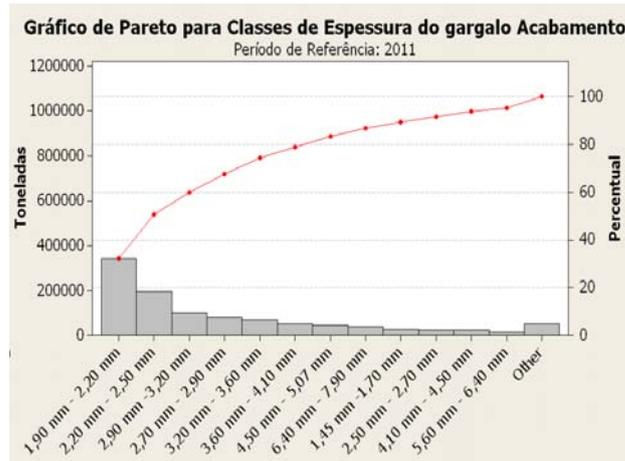


Figura 5. Gráfico de Pareto para as faixas de espessura laminadas como gargalo trem acabador.

A classe de grau 9 compreende os aços baixo carbono, que são laminados em maior volume.

Espessuras entre 1,9 e 2,5 mm levam mais tempo sob processo no trem acabador do que sob outros subprocessos, desta forma, materiais de tal espessura são, em condições normais de operação, gargalo trem acabador.

### 2.2.1 Desenvolvimento do simulador de tempos do trem acabador

Para que fosse possível prever o tempo de processamento com base nas variações de parâmetros de processo, foi levantado um banco de dados com parâmetro de velocidade do trem acabador e dimensões das bobinas laminadas e desenvolvido um simulador de tempo de processamento baseado em equações de movimento. Este foi testado com volume adequado de observações onde se comparou o tempo real e o previsto. O resultado foi um valor de  $R^2$  de 91,58 % e um erro médio de 0,71 segundos.

## 2.3 Fase de Análise

Para garantir que as modificações nos parâmetros de velocidade não trariam efeitos deletérios ao equipamento ou à qualidade, foi necessário analisar dados de temperatura de FDT e CT, além da corrente dos motores. Vale frisar que desde a fase de definição, tais parâmetros já eram considerados relevantes para o aumento de velocidade do trem acabador, na ótica dos especialistas.

### 2.3.1 Avaliação das temperaturas de acabamento e bobinamento

O atendimento da temperatura do par de saída do acabamento (FDT) e de bobinamento (CT) é fundamental para obtenção das propriedades contratadas, e naturalmente, para a qualidade do laminado a quente.

Como de praxe, os parâmetros de processo, tais como os do perfil de velocidade do trem acabador, devem modificados gradativamente até um valor ótimo. Com esta finalidade, cada classe identificada como ganho potencial em termos de redução no tempo global de processo teve a capacidade de atendimento das temperaturas de FDT e CT avaliada. Com o uso do software MINITAB, foi possível gerar gráficos que esclareceram o comportamento da temperatura e revelaram as possibilidades de ganho dentro das faixas especificadas.

Sabendo que cada parâmetro de velocidade atua em determinado momento do processamento no trem acabador, para identificar em qual parâmetro seria possível atuar e obter resultados sem efeitos deletérios ao atendimento da temperatura foi necessário avaliar se existia um comportamento diferente nos resultados de FDT e CT ao longo das bobinas. Desta forma, na avaliação se dividiu as bobinas em três partes: topo, meio e base, ou cauda.

Na avaliação, fez-se uso de ferramentas estatísticas do MINITAB fundamentadas basicamente em testes de hipóteses, usando o valor de “p”.

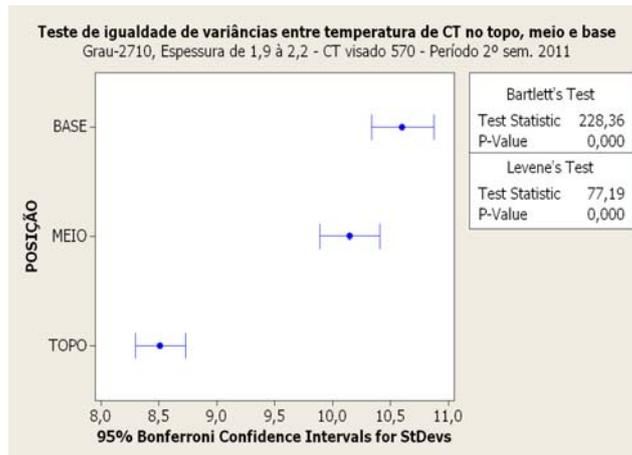
Ao exemplo dos aços SAE 1006 e de espessura de 1,9mm a 2,2mm, foi efetuada primeiramente a análise de variâncias, para identificar se o topo, meio e cauda apresentavam comportamentos diferentes de temperatura de bobinamento em termos de desvio padrão. O procedimento consiste em (1) Identificar o comportamento dos dados através de gráficos de probabilidade e avaliação do valor de “p” (2) Fazer o teste de igualdade de variâncias, para testar se o topo, meio e base são estatisticamente iguais em desvio padrão. (3) Caso topo meio e base sejam iguais em desvio padrão, é necessário fazer a análise de variância *one way*, que testa as médias do topo, meio e base e prova se são iguais estatisticamente.



**Figura 6.** Gráfico de probabilidade para temperatura de bobinamento no topo.

O mesmo teste foi feito para topo meio e base e todos apresentaram comportamento melhor explicado pela distribuição do tipo logística.

Desta forma foi possível prosseguir para o teste de igualdade de variâncias. Para dados não normais, tais como as amostras observadas, o teste de hipóteses indicado pelo Minitab é o teste de Levene. O grau 2710, denominação interna para o aço SAE 1006, é o mais laminado no LTQ e a temperatura de bobinamento visada de 570°C foi a menor observada para estas dimensões no período avaliado, o que a torna mais crítica, visto que visamos reduzir o tempo de processamento e assim também o tempo para resfriar via laminar flow.



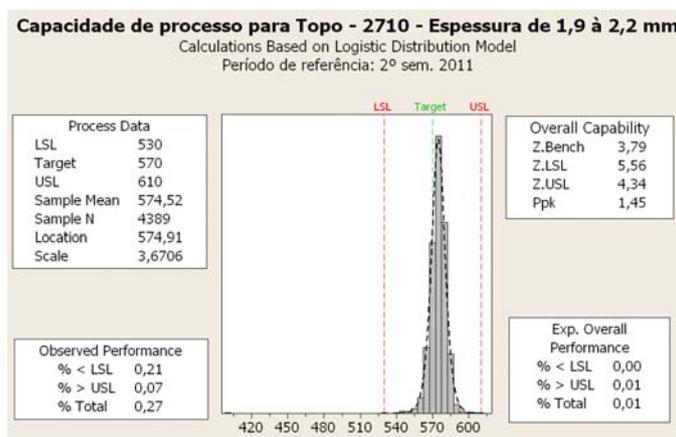
**Figura 7.** Exemplo do teste de igualdade de variâncias para temperatura de bobinamento no topo, meio e base.

O teste de igualdade de variâncias mostrou que topo, meio e base não podem ser considerados iguais em desvio padrão. Esta constatação já é suficiente para que seja necessário seguir com a avaliação de capacidade separadamente para topo, meio e base. O mesmo ocorreu para o FDT.

Dentre os índices de capacidade temos a capacidade global (*Overall capability*), capacidade melhorada (*Potential within capability*) e índices de desempenho, com percentual de bobinas desviadas entre as observações e o esperado para a capacidade calculada.

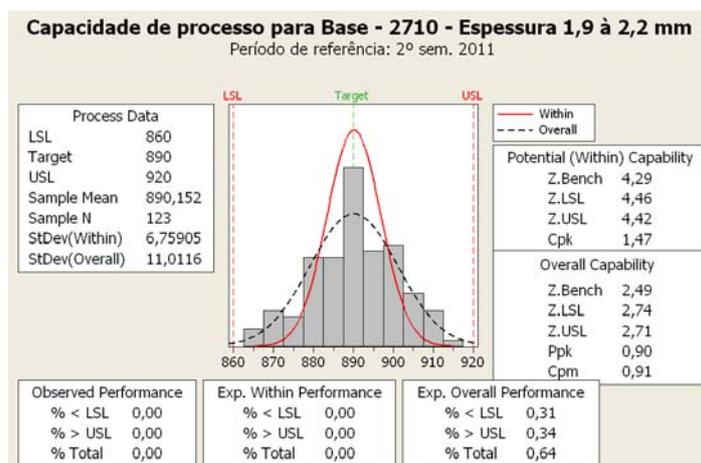
Primeiramente foram feitas as análises para a temperatura de CT.

Os limites de especificação inferior e superior para a classe escolhida como exemplo são respectivamente 530°C e 610 °C.

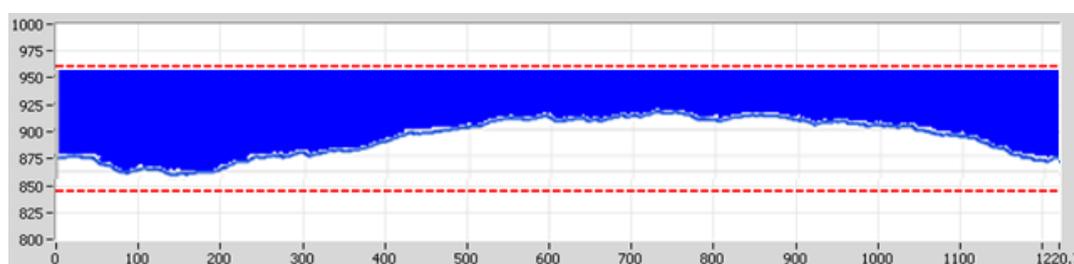


**Figura 8.** Exemplo da avaliação de capacidade de processo para topo da temperatura de bobinamento do grau 2710 (SAE 1006) na faixa de espessura de 1,9 mm até 2,2 mm.

Os limites de especificação do FDT para a classe avaliada são 860°C e 920°C.



**Figura 9.** Exemplo da avaliação de capacidade de processo para base da temperatura de acabamento do grau 2710 (SAE 1006) na faixa de espessura de 1,9 mm até 2,2 mm.



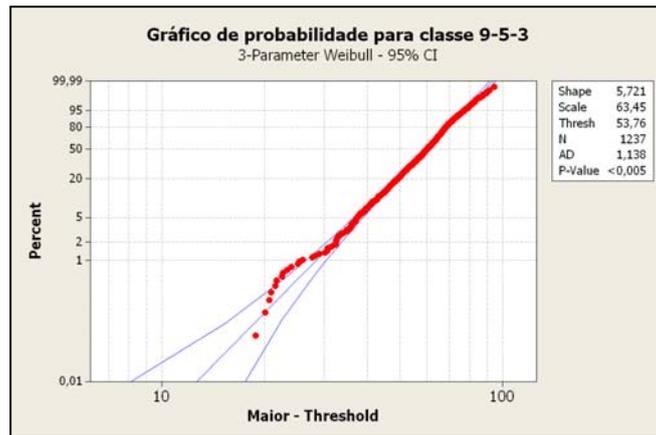
**Figura 10.** Exemplo representando a faixa disponível na temperatura de acabamento que pode ser explorada com aumento de velocidade do trem acabador.

### 2.3.2 Avaliação da corrente

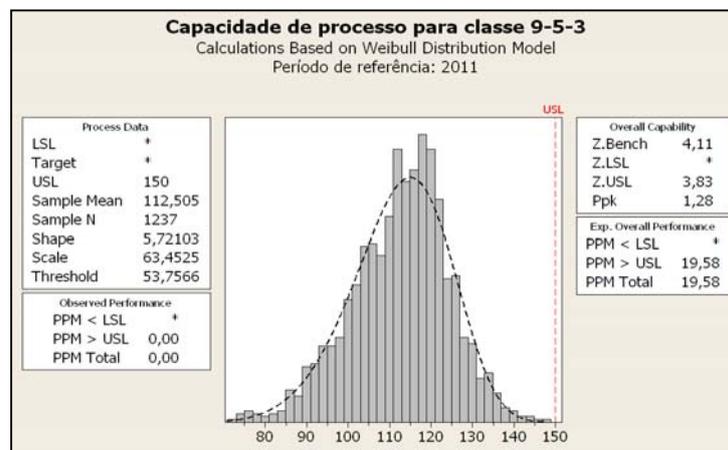
A corrente está diretamente relacionada com a velocidade de rotação do motor e o torque, solicitado para que ocorra o processo de conformação.

Partindo o banco de dados, foram selecionadas todas as bobinas que ultrapassaram o limite de 150% da corrente, o limite operacional estipulado pelo fabricante, e para cada bobina, foi verificada a carta de controle de corrente, com o intuito de identificar e remover condições atípicas de processamento, tais como laminação da tira com a borda dobrada ou instabilidades na saída da tira do trem. Após isso, avaliou-se a capacidade para o limite superior de 150% de corrente.

Para esta avaliação, a variável largura da tira tem grande influência sobre os valores de corrente. Ao exemplo do SAE 1006, (designado no LTQ2 como classe 9) com espessura de 1,9 mm à 2,2 mm (chamada classe 5) e largura de 950 mm a 1050 mm (chamada classe 3), é identificada a melhor forma de representar a distribuição dos dados utilizando do gráfico de probabilidade, e posteriormente, avaliada a capacidade de atendimento do limite especificado.



**Figura 11.** Identificação da distribuição dos dados de corrente máxima na classe dos aços baixo carbono com espessura de 1,9mm até 2,2 mm e largura de 950 mm até 1050 mm.



**Figura 12.** Avaliação da capacidade de atendimento do limite de 150% da corrente dos motores principais no processamento dos aços baixo carbono com espessura de 1,9 até 2,2 mm e largura de 950 mm até 1050 mm.

## 2.4 Implantação das Melhorias

Os parâmetros de velocidade do trem acabador são informados pelo modelo matemático desenvolvido em linguagem Fortran, que armazena as informações e modificações realizadas e mantém os parâmetros de velocidade informados constantes para cada classe de grau, espessura e largura especificada.

## 2.5 Fase de Controle

As ferramentas desenvolvidas na fase de controle focaram na manutenção das condições mínimas de atendimento do projeto para que se pudessem manter os novos parâmetros de velocidade do trem acabador, sem necessitar redução de velocidade do trem para compensar limitações oriundas da máquina. O acabamento envolve mais de 500 itens de controle.



**Figura 13.** Ambiente de trabalho do controle do caminho da tira do trem acabador incluindo planilha de controle dos cilindros de encosto da cadeira F2.

### 3 RESULTADOS

Assim como para classe de grau 9, onde estão basicamente os aços baixo carbono, classe de espessura de 1,9mm até 2,2 mm e classe de largura de 950 mm até 1050 mm, todas as avaliações de temperatura e corrente foram desenvolvidas sob o mesmo método para as outras classes de bobinas.

**Tabela 2.** Resultados por classes

Classe de Grau	Classe de Espessura (mm)	Classe de Largura (mm)	Produtividade 2011 média	Nova Produtividade	Diferença	Percentual em massa do total laminado %	Aumento na produtividade Global do LTV (t/h)
			(t/h)	(t/h)	(t/h)		
9	1,9- 2,2	1150 - 1250	692,77	704,81	12,03	0,033	0,402
9	1,9- 2,2	800 - 950	611,07	622,01	10,94	0,022	0,246
9	2,2-2,5	800 - 950	663,22	676,26	13,04	0,046	0,594
9	1,9- 2,2	950 - 1050	627,69	639,21	11,52	0,011	0,123
9	2,2-2,5	1150 - 1250	776,22	814,77	38,56	0,040	1,534
9	2,2-2,5	950 - 1050	722,14	729,16	7,02	0,020	0,137
9	1,9- 2,2	1050 - 1150	672,38	678,01	5,63	0,001	0,006
33	1,9- 2,2	1150 - 1250	644,93	665,73	20,80	0,006	0,130
17	1,9- 2,2	800 - 950	594,09	604,67	10,58	0,013	0,133
17	1,9- 2,2	950 - 1050	638,93	650,27	11,34	0,003	0,030
17	1,9- 2,2	1150 - 1250	692,30	698,06	5,75	0,002	0,013
25	1,9- 2,2	1150 - 1250	666,82	672,15	5,33	0,006	0,029
25	2,2- 2,5	<800	561,45	565,52	4,07	0,006	0,026
25	2,2- 2,5	800 - 950	664,65	670,96	6,31	0,011	0,067
25	2,2- 2,5	950 - 1050	706,49	720,83	14,34	0,001	0,008
<b>Total</b>							<b>3,480</b>

### 4 DISCUSSÃO

- De acordo com os perfis de temperatura observados, foi possível modificar as taxas de aceleração e/ou velocidade máxima do trem acabador para diversas classes de bobinas laminadas como gargalo trem acabador, sem efeitos deletérios ao atendimento das temperaturas de bobinamento e acabamento especificadas.
- Como os parâmetros de velocidade informados pelo modelo não mudam sem que os engenheiros efetuem novas modificações, tais parâmetros ajustados serão aplicados para todas as bobinas laminadas, respeitando a composição química (internamente designada pelo grau do aço), espessura e largura para quais os novos parâmetros de velocidade foram ajustados. Isso permite que

possamos fazer uma projeção e estimar a redução anual de tempo com base na produção de tais dimensões e composição química no ano de 2011.

- A avaliação da corrente mostrou que para as classes em que foram modificados parâmetros de velocidade do trem não havia riscos de atingir o limite de corrente de 150%, usado como forma de controle para proteção dos motores e do processo de um modo geral.

## **5 CONCLUSÃO**

Com base na Tabela 2, ponderando o aumento de produtividade e percentual laminado de cada classe, observa-se o aumento da produtividade global do LTQ#2 em 3,480 t/h. O trabalho executado para as classes em questão pode ser estendido à outras classes laminadas com o trem acabador como gargalo da linha.

## **Agradecimentos**

Agradecemos a todos que colaboraram direta ou indiretamente para realização do presente trabalho.

## **REFERÊNCIAS**

- 1 DAVIS, M. M.; AQUILANO N. J.; CHASE R. B. Fundamentos da administração da produção. 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 2001.
- 2 SLACK, N.; CHAMBERS, S.; HARLAND, C.; HARRISON, A.; JOHNSTON, R. Administração da Produção. São Paulo: Atlas, 1996.