

OTIMIZAÇÃO DO TEMPO DE CORTE EM SERRAS CIRCULARES DE TUBOS UTILIZANDO CONTROLE DE FORÇA¹

Vinícius Mendes Cimini²
Aloisio Porto de Castro³

Resumo

O objetivo do trabalho foi desenvolver um método que possibilitasse o corte de feixes de tubos de materiais de baixa usinabilidade (13Cr e Super 13Cr) respeitando as exigências de rendimento de lâmina e tempo de corte, de forma a possibilitar que os cortes fossem feitos em linha, evitando assim, custos extras de produção ao mandar o material para outras linhas para ser cortado. A metodologia utilizada consistiu no cálculo e simulação das forças de corte envolvidas, seguido do desenvolvimento de um controlador de força de corte. Esse controlador foi simulado em computador, foram inseridas restrições e feitos testes na área. Com ele, foi possível reduzir em 15% o tempo de corte desses produtos sem afetar o rendimento médio das lâminas. A partir desse desenvolvimento, e em associação com outros trabalhos que visaram melhoria na qualidade do produto, foi possível reduzir uma etapa do processo produtivo, com ganhos estimados em 1,3 MR\$/ano e ainda com possibilidade de aplicação em outros produtos com propriedades mecânicas e dimensões diferentes.

Palavras-chave: Otimização; Tempo; Controle; Corte; Simulação.

OPTIMIZATION OF CUTTING TIME IN TUBES CIRCULAR SAWING MACHINES USING FORCE CONTROL

Abstract

The goal was to develop a method to allow the cutting tube bundles of materials with low machinability (13Cr and Super 13Cr) respecting requirements of blade yield and cutting time to enable cuts to be made online, thus avoiding extra costs of production to send the material for other lines to be cutted. The methodology consists in the calculation and simulation of cutting forces involved, followed by the development of a cutting force controller. This controller was simulated in the computer, restrictions were inserted and tests were done in the area. With it, it was possible to reduce by 15% cutting time of these products without affecting the average yield of the blades. From this development, and in combination with other studies that aimed the product quality improvement, it was possible to reduce a step of the process, with earnings estimated at 1,3 MR\$ / year and it's possible to apply in other products with mechanical properties and different dimensions.

Key words: Optimization; Time; Control; Cut; Simulation.

¹ Contribuição técnica ao 15º Seminário de Automação e TI Industrial, 20 a 22 de setembro de 2011, São Paulo, SP.

² Engenheiro de Controle e Automação. Engenheiro. V&M do Brasil.

³ Bacharel em Sistemas de Informação. Analista de Automação. V&M do Brasil.

1 INTRODUÇÃO

As linhas de produção de tubos sem costura da V&M do Brasil necessitam o uso de serras circulares com o objetivo de disponibilizar aos clientes internos e externos produtos com os requisitos corretos de comprimento. Na laminação contínua, existem 4 serras paralelas que executam essa etapa do processo. No entanto, a Serra 1 é gargalo para alguns produtos devido à exigência de que todos os feixes de tubos sejam cortados pelo menos uma vez nesse equipamento.

O objetivo desse trabalho foi o desenvolvimento de um novo método de corte de forma a reduzir o tempo requerido na tarefa, mantendo-se como relação de compromisso o rendimento de lâminas e a vida útil dos componentes mecânicos da serra.

Um trabalho semelhante⁽¹⁾ foi desenvolvido como dissertação de mestrado para corte de tubos metálicos peça a peça. Como resultado, foi possível obter maior rendimento de lâminas com um menor tempo de corte.

Para o desenvolvimento do presente trabalho, uma questão fundamental é a avaliação dos esforços envolvidos no processo de corte, expresso pela potência de corte⁽²⁾ dada pela Equação 1.

Equação 1

$$P_c = \frac{F_c \cdot v_c}{60000}$$

Onde P_c é a potência de corte necessária no gume da ferramenta [kW], F_c é a força de corte [N] e v_c é a velocidade de corte [m/min].

Sobre a questão da potência de corte, varias são as formas de se obter um valor adequado para um determinado trabalho, utilizando os mais variados parâmetros de corte. Entretanto, a equação de Kienzle é a mais utilizada nos processos de usinagem, sendo que os resultados obtidos apresentam valores satisfatórios para serem utilizados na prática.⁽³⁾

A fórmula de Kienzle se mostrou válida no cálculo da força de corte nos diversos processos de usinagem com espessura h constante do cavaco (tornear, plainar, furar, brochar) como também nos processos de usinagem com espessura variável (fresagem, serramento, denteamento de engrenagens), utilizando um valor médio h_m .⁽⁴⁾

Essa fórmula, também conhecida como o modelo da resistência específica de corte⁽⁵⁾ é dada pela Equação 2.

Equação 2

$$F_c = K_c \cdot A$$

Onde A é a área de contato não deformada e K_c é a resistência específica de corte, dada pela Equação 3.

Equação 3

$$K_c = K_{c1,1} \cdot h^{-mc}$$

Na Equação 3, $K_{c1,1}$ é a constante específica de corte para um cavaco de área 1 mm^2 e depende do material a ser usinado, h é a espessura do cavaco e o coeficiente mc também é dependente do material.

Para avaliação da potência de corte e o torque, têm-se as relações expressas pela Equação 4 e Equação 5.

Equação 4
$$P_c = F_c \cdot v_c$$

Equação 5
$$T_c = \frac{P_c}{\omega}$$

Já a relação entre velocidade de corte e velocidade de avanço é expressa pela Equação 6, onde f é o percurso de avanço da lâmina por volta [mm/volta] e d é o diâmetro da serra [mm].

Equação 6
$$v_f = f \cdot \omega = \frac{1000 \cdot v_c \cdot f}{\pi d}$$

Formuladas as questões relacionadas aos esforços de corte, passa-se então a uma revisão dos conceitos para controle desse parâmetro. Isso é feito por intermédio da Engenharia de Controle. Segundo Dorf e Bishop,⁽⁶⁾ a Engenharia de Controle é baseada nos fundamentos da teoria de realimentação e na análise de sistemas lineares e integra os conceitos da teoria de redes e comunicação. No entanto, não é limitada a nenhuma disciplina de engenharia, mas é igualmente aplicável à Engenharia aeronáutica, química, mecânica, ambiental, civil e elétrica. Um sistema de controle é a interconexão de componentes formando uma configuração de sistema que vai fornecer uma resposta de sistema desejada. Um sistema de controle em malha fechada geralmente utiliza a medida de uma saída e realimenta esse sinal para compará-lo com a saída desejada. Geralmente a diferença entre a saída de processo sob controle e a entrada de referência (*setpoint*) é amplificada e utilizada para controlar o processo de forma que a diferença é continuamente reduzida. A Figura 1 mostra um diagrama típico de um sistema de controle em malha fechada.

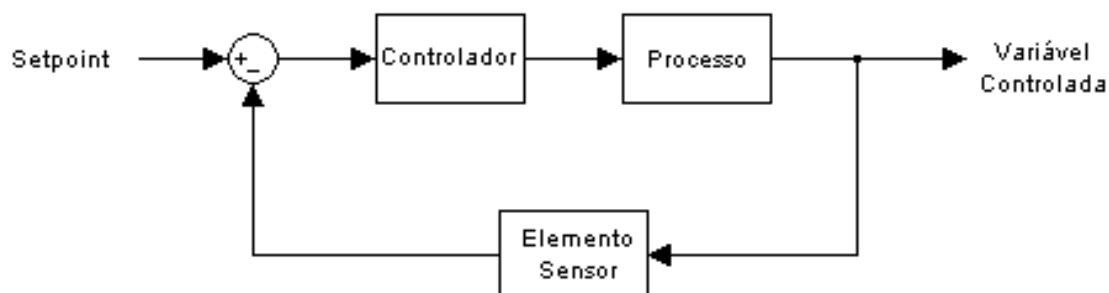


Figura 1. Sistema típico de controle em malha fechada.

2 METODOLOGIA

Em função da criticidade do processo, os produtos escolhidos para validação e testes do novo sistema de corte foram os 13Cr e 13CrSS. No entanto, é possível a

ampliação para outras composições de aço. Para isso, seriam necessários testes e ajustes de parâmetros.

O desenvolvimento do controlador de torque partiu de uma análise das variáveis manipuladas que poderiam ser utilizadas para condicionar a variável de saída (torque) ao valor desejado. Para isso, foi necessário calcular a saída como torque e não a potência, visto que é a variável disponível no sistema histórico. Assim, foi necessário efetuar o seguinte equacionamento.

De Equação 4 e Equação 5:

Equação 7

$$T_c = \frac{K_c \cdot A \cdot v_c}{\omega}$$

Para a determinação da área de contato A, foi considerado que ela é proporcional ao segmento de círculos e à espessura da pastilha de corte e, conforme mostra a Equação 8.

Equação 8

$$A = K_1 \cdot s \cdot e$$

Por fim, da Equação 7 e Equação 8 tem-se as variáveis que influenciam no torque do corte dado pela Equação 9.

Equação 9

$$T_c = \frac{K_c \cdot K_1 \cdot s \cdot e \cdot v_c}{\omega}$$

Ou seja, para as condições fixas analisadas, onde a largura do cavaco e é dependente apenas da espessura da ferramenta de corte e o material cortado é sempre o mesmo, a resistência específica de corte K_c é uma constante, pode-se simplificar a equação transformando todas as constantes em uma só chamada K'_c , conforme mostra a Equação 10.

Equação 10

$$T_c = K'_c \cdot s \cdot v_c$$

Percebe-se então que o torque é uma função do seguimento de círculo de contato entre tubo e lâmina e da velocidade de corte. A constante K'_c , por se tratar de uma conjunção de outras constantes torna-se de difícil caracterização analítica e foi determinada empiricamente. Essa função foi utilizada para a simulação do cálculo de torque.

Para a validação da formulação sugerida, foi desenvolvido um programa computacional para simular o efeito do esforço de corte em função dos parâmetros dimensionais e dinâmicos da máquina. O programa utiliza como parâmetros de entrada o diâmetro e parede dos tubos, o número de tubos no feixe, o diâmetro da serra e a velocidade de avanço. Com esses parâmetros, o simulador utiliza uma iteração por segundo para determinar os valores de torque a cada momento. Em seguida, é gerado um gráfico torque x tempo. A Figura 2 ilustra esse cálculo para uma certa posição da lâmina.

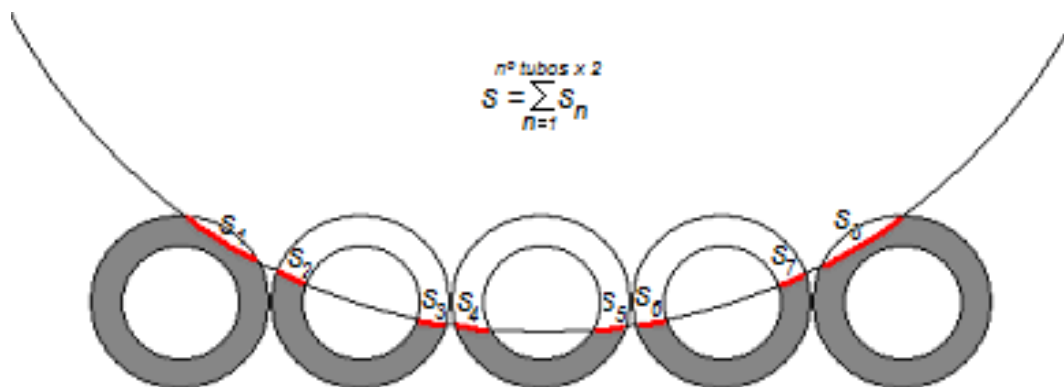


Figura 2. Cálculo do segmento de círculo instantâneo.

Assim, é possível simular os diferentes efeitos de mudanças nas variáveis de forma a determinar qual é a melhor forma de controle.

Para um caso de exemplo, considerando os parâmetros de entrada da Tabela 1 e ajustando a constante $K'_c = 0,5$ empiricamente, tem-se a comparação entre o torque real e o calculado na Figura 3.

Tabela 1. Parâmetros de entrada para simulação da força de corte

Variável	Valor
Diâmetro x parede dos tubos	140,3 mm x 7,72 mm
Número de tubos	5
Diâmetro da serra	1.080 mm
Velocidade de avanço da serra	3,78 mm/s

Com isso, foi possível validar a formulação desenvolvida e chegou-se à conclusão que a única forma de reduzir o esforço de corte seria pela redução da velocidade de corte.

Segundo a Equação 6, a velocidade de corte é uma função da velocidade de avanço. Assim, foi necessária a escolha de apenas uma variável para atuar como manipuladora para que o problema não passasse para o domínio de controle multivariável, que implicaria mais complexidade.

A escolha foi manter fixa a velocidade de giro da lâmina e alterar a velocidade de avanço de forma que a velocidade de corte também fosse alterada. Essa decisão foi tomada porque a alteração da velocidade de giro não implicaria ganho de tempo.

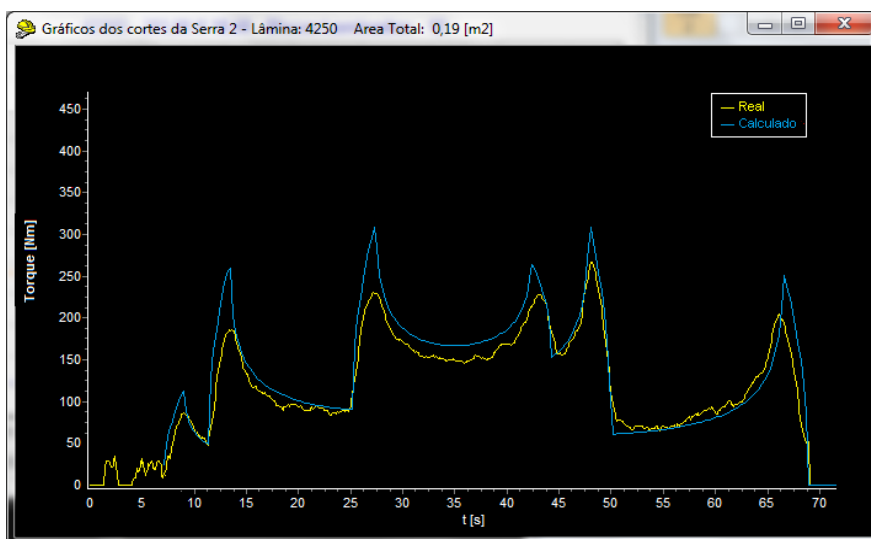


Figura 3. Validação do cálculo de esforço de corte em função do torque.

Como existe a necessidade de redução no tempo de corte, isso somente seria atingido caso a potência de corte fosse aumentada. Isso, no entanto, implicaria um aumento na força de corte em alguns intervalos de tempo quando a área de contato fosse grande. Por isso, a opção pelo controle automático foi escolhida. Assim, seria possível aumentar a velocidade de avanço de forma a ganhar tempo nos momentos de pequenos esforços e reduzir o avanço em momentos de esforço alto. Durante o corte, caso a serra opere a maior parte do tempo com velocidades de avanço maiores do que a velocidade padrão, o tempo médio de corte seria menor, evitando-se, porém, esforços excessivos.

Após as definições iniciais a respeito do funcionamento do sistema de controle, passou-se à etapa de projeto, levando em consideração as limitações dos equipamentos e os riscos inerentes a alterações de dinâmica.

Para implementação do controle de torque nas Serras foi preciso desenvolver uma lógica de funcionamento e em seguida implementá-la em um Controlador Lógico Programável Siemens S7-400-2DP conjuntamente com as demais funcionalidades das Serras.

A Figura 4 ilustra a lógica utilizada. Nela é possível perceber que existem 5 variáveis de entrada do sistema e 1 variável de saída. A primeira variável de entrada é a Referência de Torque que pode ser entendida como o torque máximo admissível para a velocidade de giro em questão considerando-se tanto a região linear quanto a de enfraquecimento de campo do motor. A segunda é o parâmetro denominado Percentual de Torque, que é o percentual configurado do torque máximo, o qual será utilizado como setpoint do controlador de torque. A terceira variável, que também está funcionando como parâmetro é o percentual de ganho. Sua função é definir um novo valor de ganho proporcional em função da velocidade de avanço do carro, atuando como uma espécie de controle adaptativo com a diferença de ter a malha adaptativa aberta e não fechada em função de alguma saída do processo. A última variável de entrada é a velocidade de avanço do carro, que é pré-definida em uma tabela no sistema de rastreamento em função do tipo de aço a ser cortado.

Como saída, tem-se a variável Valor_Ganho que é somada à velocidade de avanço do carro para determinar instantaneamente a nova velocidade.

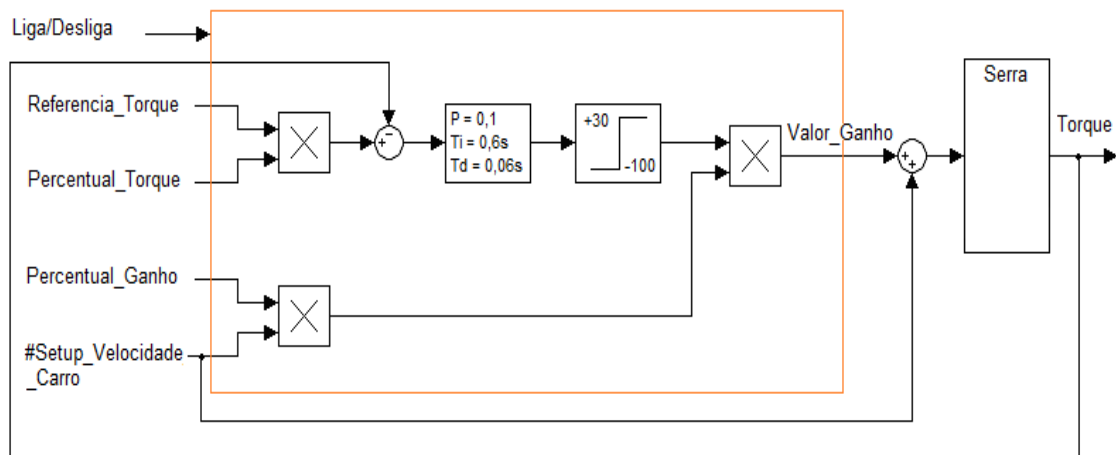


Figura 4. Lógica de controle de torque utilizada.

Como função interna relevante tem-se apenas um controlador PID. Adicionalmente têm-se a funcionalidade de desligar o controlador de torque, fazendo a variável Valor_Ganho igual a zero.

Os ajustes dos parâmetros foram feitos com base nas observações de processo por tentativa e erro e os valores otimizados são mostrados na Tabela 2.

Com o sistema implantado, passou-se finalmente à etapa de testes em produção assistida por analistas de automação, engenheiro de automação, engenheiro de processo e operadores.

Tabela 2. Parametrização do controlador de torque

Parâmetro	Valor
Percentual de Torque	30%
Percentual de Ganho	50%
Ganho Proporcional	0,1
Tempo Integral	0,6s
Tempo Derivativo	0,06s
Limite Superior da saída do PID	+30
Limite Inferior da saída do PID	-100

3 RESULTADOS

A Figura 5 ilustra o resultado do cálculo feito pelo programa. A curva superior (vermelha) mostra a tendência da variável controlada em função do torque exigido a cada instante de tempo pela curva do meio (amarela). Percebe-se, portanto, que quando o esforço de corte é alto, a velocidade de avanço da serra é reduzida e quando o esforço é baixo, a velocidade de avanço aumenta. Por fim, a curva de baixo (verde) ilustra o comportamento da posição do carro-porta lâminas. Percebe-se que sua inclinação (derivada) é maior em momentos onde a velocidade de avanço é maior e menor quando a velocidade de avanço é menor. Caso o sistema de controle estivesse desabilitado, o que ocorreria com a curva de

esforço é que as extremidades teriam patamares mais baixos e o centro teria patamares mais altos.

É importante perceber que o objetivo de qualquer sistema de controle é que a variável controlada fique constante. Nesse trabalho, no entanto, isso não é possível devido às proteções (saturações e limites) impostas como parâmetros. Essa decisão foi tomada porque o objetivo prioritário é proteger o equipamento e, somente se isso for atendido, o controle de torque deve atuar.

Para a avaliação do tempo de corte, é importante atentar para o fato de que a força de corte não é constante com o número de cortes. Isso ocorre porque a medida em que os cortes vão sendo feitos, ocorre desgaste nas pastilhas dos dentes da serra o que gera um aumento na pressão de corte e conseqüentemente obriga o motor a fornecer mais potência para realizar o mesmo trabalho. Isso pode ser ilustrado pela Figura 6, onde se tem 3 curvas de torque em função do tempo para um mesmo material, sem utilização do controle de torque. A primeira curva é referente ao 2º feixe de tubos cortado, a segunda ao 5º e a terceira ao 12º feixe. Percebe-se claramente o aumento no torque, mas a característica da curva se mantém, já que a área cortada a cada instante é a mesma e o tempo de corte também se mantém devido à velocidade de avanço ser fixa.

Com essa informação, a análise dos tempos de corte de cada feixe com o controle de torque ativado mostra que são sempre menores que o tempo de corte com o controle de torque desativado. Além disso, percebe-se que o tempo é crescente com o passar dos cortes. Isso ocorre justamente porque a cada feixe, o esforço requerido é maior e como o *setpoint* de torque é fixo, é necessário desacelerar cada vez mais a lâmina para que o nível de torque controlado não seja excedido.

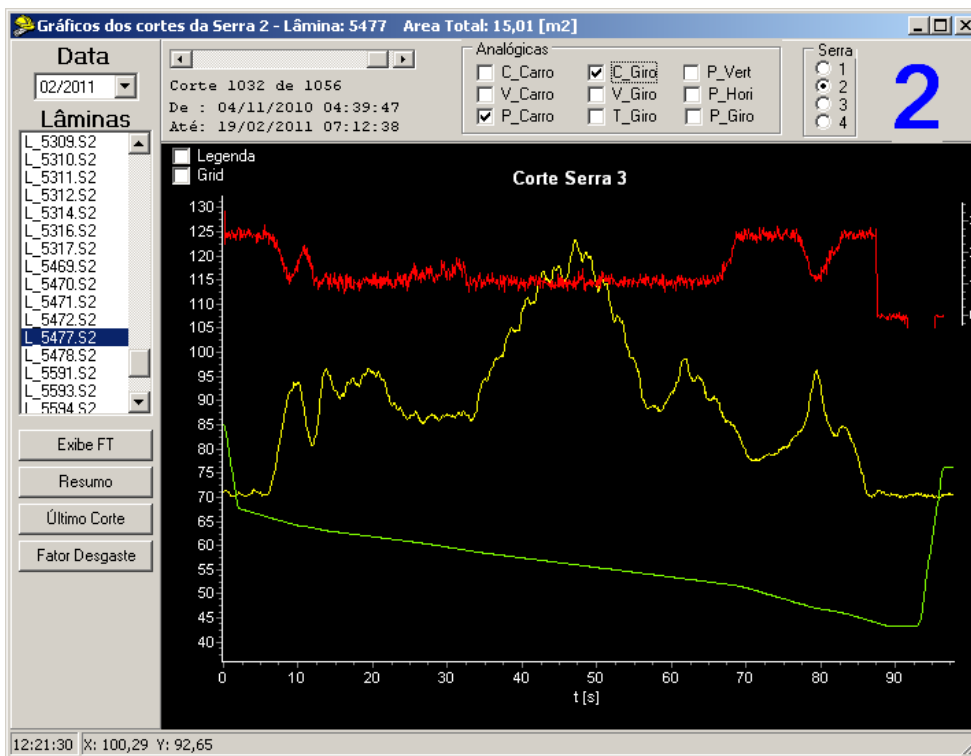


Figura 5. Operação do controlador de torque.

Mesmo com essa tendência crescente do tempo de corte, as análises mostraram que o tempo médio de corte por lâmina é cerca de 15% a 20% menor com o controle de torque ativado do que com a velocidade de avanço fixa.

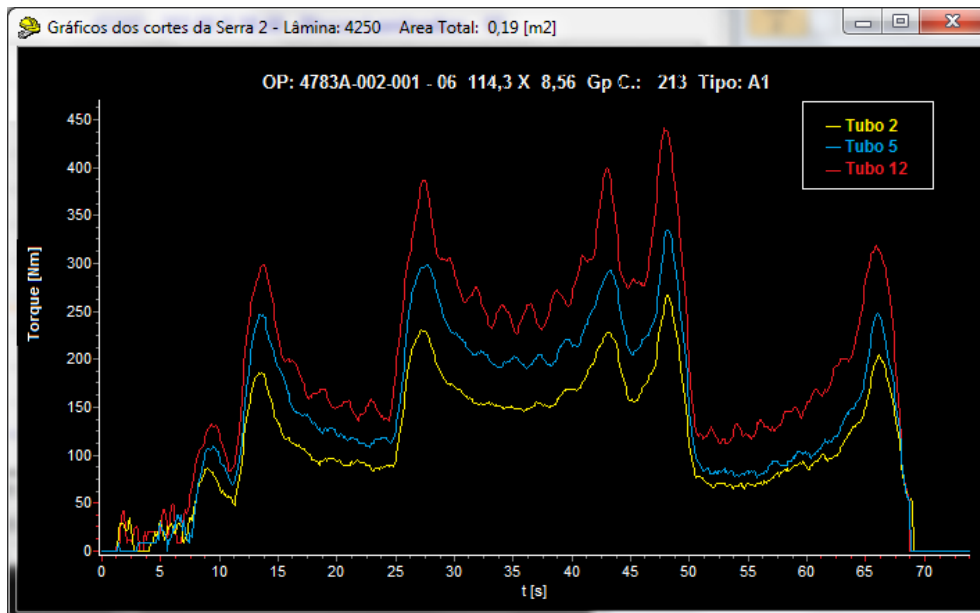


Figura 6. Aumento de esforço em função do desgaste da ferramenta.

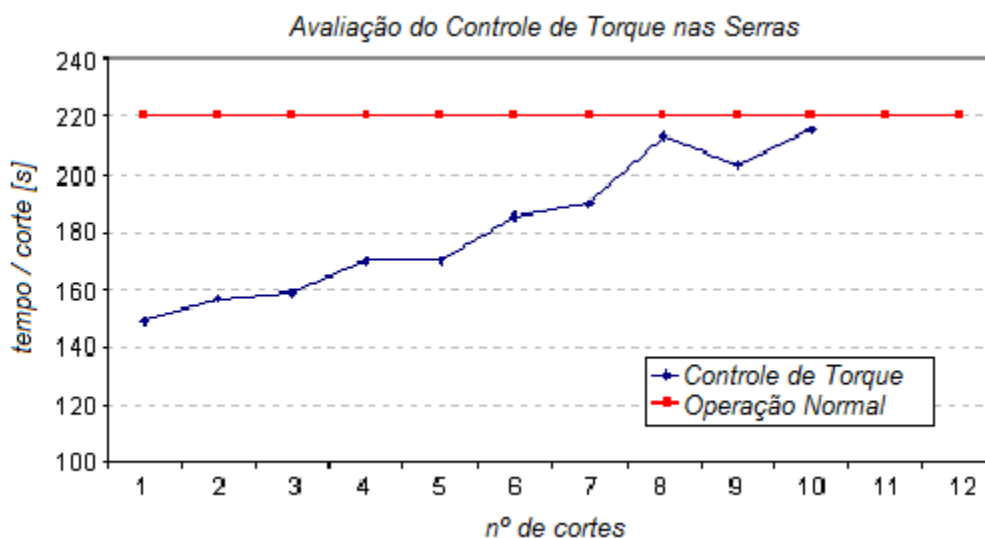


Figura 7. Comparação de tempos entre operação com e sem controle de torque.

A análise do rendimento de lâmina também mostra para os casos de corte de cromo que o número de cortes por lâmina não foi reduzido (Tabela 3). As análises de corte sem o controle de torque mostraram que a média de cortes por lâmina era de 14 e após implementá-lo a média permaneceu praticamente a mesma.

Tabela 3. Rendimento de lâminas (teste em produção)

Data	Nº lâmina	Serra	Ø [mm] x parede [mm]	Aço	Nº de cortes	Área [mm ²]
22/02/11	4243	2	140,5 x 7,72	X20 Cr13	12	0,14
22/02/11	4698	2	140,5 x 7,72	X20 Cr13	22	0,32
22/02/11	38441	2	140,5 x 7,72	X20 Cr13	12	0,17
22/02/11	4702	2	140,5 x 7,72	X20 Cr13	11	0,17
22/02/11	4250	2	140,5 x 7,72	X20 Cr13	15	0,22
22/02/11	4244	3	140,5 x 7,72	X20 Cr13	18	0,20
22/02/11	4703	3	140,5 x 7,72	X20 Cr13	18	0,24
22/02/11	4712	3	140,5 x 7,72	X20 Cr13	16	0,24
22/02/11	4693	3	140,5 x 7,72	X20 Cr13	12	0,17
22/02/11	4249	3	140,5 x 7,72	X20 Cr13	10	0,16

Para análise geral do rendimento de lâminas, considerando todo o mix produtivo, constatou-se um resultado ruim. Percebeu-se uma redução no rendimento de lâminas e também no número de lâminas quebradas. Não se sabe ao certo se esse efeito foi devido ao controle de torque ou outra variável (fixação dos mordentes, critério de retirada pela operação, qualidade do acabamento, etc.). Para melhoria no rendimento geral de lâminas, está sendo estudada uma alteração no *software* de forma a controlar tanto a velocidade de avanço quanto de corte simultaneamente. Os resultados preliminares indicaram bons resultados, mas ainda precisam ser validados.

Como maior ganho conseguido com a implantação do controle de torque, tem-se a possibilidade de cortar toda produção de materiais 13Cr e Super 13Cr na própria laminação. Antes, era necessário retirar os produtos dessa linha e enviá-los a uma linha de ajustagem para que as peças fossem retrabalhadas e cortadas. Grandes melhorias foram feitas em outro desenvolvimento para redução do retrabalho nesses materiais e com a possibilidade de corte em linha foi possível reduzir uma etapa do processo produtivo. Com isso, estimou-se um ganho de 1,3 MR\$ no ano de 2011, que pode variar em função da demanda por esses materiais.

4 DISCUSSÃO

- Percebeu-se uma redução na produtividade geral de lâminas da linha sem que isso impactasse significativamente nos custos. Isso leva a uma discussão sobre a necessidade de definição de indicadores que representem os objetivos da organização e que, na maioria das vezes, saem do domínio de processo e passam para o domínio de custos;
- para esse trabalho, o enfoque multidisciplinar foi fundamental na condução e sucesso. Muitas vezes, o diálogo entre equipes com visões, experiências e objetivos diferentes pode ser um obstáculo. No entanto, caso seja possível ultrapassá-los, em geral tem-se ganhos importantes e maiores do que os conseguidos individualmente ou em equipes muito homogêneas.
- não foram encontradas referências sobre trabalhos similares;
- para o desenvolvimento do trabalho, o estudo e entendimento de usinagem foi fundamental. Como é uma área muito distante da área de automação,

leva-se a uma discussão sobre o papel do profissional inovador que não se contenta em repetir práticas, mas está sempre em busca de novos desenvolvimentos; e

- existe a possibilidade de controle utilizando-se velocidade de avanço fixa. Isso seria feito alterando tanto o percurso de avanço por volta f quanto a velocidade de corte na Equação 6.

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho partiu de um estudo teórico sobre usinagem e foi validado por meio de simulação. Em seguida passou-se à fase de desenvolvimento e implantação a partir de conhecimentos de automação e, por fim, foi testado por equipes de produção e manutenção. Essa versatilidade foi fundamental para seu sucesso.

Mais uma vez, como em muitas citações da literatura, a utilização de controladores possibilitou a otimização de processos, garantindo retornos consideráveis em termos financeiros.

O resultado do trabalho pode ser resumido na redução média de 15% no tempo de corte sem que isso impactasse no custo de lâminas. Com isso, foi possível reduzir uma etapa do processo produtivo, gerando ganhos estimados em 1,3 MR\$ por ano.

REFERÊNCIAS

- 1 MACHADO, C. M. R. Sistema Inteligente para Auto-parametrização em Tempo Real de Serra Circular para Corte de Tubos Metálicos. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrônica Industrial) - Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Guimarães, Portugal.
- 2 FERRARESI, D. Fundamentos da Usinagem dos Metais. São Paulo: Edgard Blücher, 1970.
- 3 FILHO, J. B. R., SOUSA, L. P. N., ALVES, M. F., MOREIRA, A. P., RICARTE, C., MOTA, E. C. Aplicação da equação de Kienzle na determinação da força e potência de corte na usinagem em torno convencional. In: V CONNEPI - Congresso Norte Nordeste de Pesquisa e Inovação, 2010, Maceió. Anais do V Connepi, 2010.
- 4 STEMMER, G. E. Ferramentas de Corte II. 4.ed. Florianópolis: Ed. Da UFSC, 1995.
- 5 KIENZLE, O.; VICTOR, H. Spezifische Schnittkraefte bei der Metall-bearbeitung, Werkstattstechnik und Maschinenbau, 1957. Bd. 47, H.5.
- 6 DORF, R. C.; BISHOP, R. H. Modern Control Systems. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2008.