



Otimização de Ciclo para Aumento de Produtividade em Máquina de Retífica Interna de Rolamentos

Marcelo Miguel de Azevedo¹, João Sinohara da Silva Sousa²

¹Mestrando do curso Mestrado Profissional em Automação e Controle de Processos - IFSP. e-mail: marceloazevedo.mma@gmail.com

²Prof^o Dr. e Pró-Reitor de Pesquisa e Inovação do IFSP. e-mail: joao.ss@ifsp.edu.br

Resumo: Este trabalho apresenta um estudo de caso que resultou em um projeto de automação industrial que foi aplicado como melhoria na produção de rolamentos automotivos. A empresa fabricante de rolamentos solicitou redução no tempo de ciclo de uma máquina retificadora, de 3,4 segundos para 3,0 segundos. O ciclo de retífica de cada peça é assistido por um sistema de monitoramento por emissão acústica (EA). Como premissa, as velocidades de movimentação dos barramentos de retífica e dressagem deveriam ser superiores, sobretudo durante o tempo de ciclo não produtivo, isto é, durante a retífica no ar (*gap less*) e no retorno dos barramentos à posição inicial de retífica, após a usinagem de cada peça. A análise preliminar identificou que os motores de passo que acionavam os barramentos estavam no limite de sua capacidade, impossibilitando o aumento da velocidade. A substituição de todo o sistema de controle da máquina estava descartada devido aos custos. Como parte do desenvolvimento, foram instalados servomotores em substituição aos antigos motores de passo, integrando-os ao sistema eletrônico de controle existente. Foi incorporada uma função de ajuste automático do sistema de monitoramento, no programa controlador da máquina, que dispensou o ajuste manual realizado pelo operador, no amplificador do sensor de EA, necessário para adequar o sistema de monitoramento à dinâmica de variação dos sinais de EA ao longo do processo. A mesma correção (automática) ocorre também na substituição de um reboło usado por um novo. A participação do operador tornou-se reduzida nestes momentos. Como resultado, pode-se alcançar o tempo de ciclo desejado. O volume de produção, que antes da melhoria era de 1058 peças/hora, passou para 1200 peças/hora após sua implantação.

Palavras-chave: produção, retífica, emissão acústica, rolamentos

1. INTRODUÇÃO

A busca por novas alternativas para produção visando redução de custos internos e aumento de produtividade tem sido constante entre as empresas brasileiras fabricantes de autopeças. Com o mercado interno consumidor de veículos apresentando contínua oscilação, seja por crescimento desordenado de demanda ou por retração de mercado causada, por exemplo, por crise financeira internacional, como aconteceu nos anos 2008/2009, os fabricantes de autopeças veem-se mobilizados a desenvolver soluções capazes e eficazes para reduzir os custos de manufatura, a fim de manterem sua competitividade. Segundo Chiavenato (2005), é a produtividade que permite a competitividade de uma empresa. E aumentar a produtividade significa aumentar a produção sem, contudo, aumentar a quantidade de recursos humanos ou físicos, que são os operários e as máquinas.

Neste contexto, a fabricante de rolamentos SKF do Brasil solicitou que fosse baixado o tempo de ciclo de produção por peças (PCT – do inglês *Piece Cycle Time*) de uma máquina retificadora de anéis internos de rolamentos, que era o gargalo da produção, de 3,4 segundos para 3,0 segundos. Segundo Maroueli (2008) um “gargalo” é todo ponto dentro de um sistema industrial que limita a capacidade final de produção. O trabalho com PCT de 3,0 segundos elevaria sua capacidade produtiva de 1058 peças/hora para 1200 peças/hora. A operação realizada pela máquina é retificar a pista do anel interno do rolamento, que é o lugar por onde se deslocam as partes internas móveis. A análise identificou que o sistema de acionamento dos barramentos de retificação e de dressagem do reboło abrasivo estava no limite de sua capacidade de avanço, limitado pelas características dos motores de passo que acionavam os barramentos. Dressagem, segundo Xue *et al* (2002), é o processo de condicionamento da superfície do reboło, a fim de devolver-lhe o poder de corte que fora perdido pelo desgaste, durante o processo de retificação. A instalação dos servomotores para o acionamento dos

barramentos possibilitou o deslocamento em maiores velocidades e então o sistema de monitoramento por emissão acústica, já instalado, pôde ser otimizado. A otimização consistiu em um ajuste automático do sistema de monitoramento, que substituiu o ajuste manual efetuado pelo operador no amplificador do sensor de EA, ao longo do processo de manufatura. O artigo relata a integração de tecnologias de monitoramento por EA, programação de lógica de CLP (Controlador Lógico Programável) e integração do sistema de servoacionamentos à eletrônica de controle (relativamente antiga) da máquina retificadora. O objetivo geral do trabalho consiste na redução do PCT da retificadora, dada uma solicitação formal da empresa.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção é apresentada uma breve descrição da máquina retificadora e dos subsistemas de controle e monitoramento do ciclo de retificação.

2.1 Máquina

Trata-se de uma retífica cilíndrica de mergulho, isto é, a operação de retificação é realizada pelo movimento de um barramento longitudinal que leva o rebolo em direção à peça (mergulho). A peça a ser retificada é fixada em um cabeçote giratório, por meio de uma placa de pressão pneumática. A figura 1 mostra em detalhe o rebolo, os anéis internos do rolamento e o sentido de movimento do barramento durante a retificação, que leva o rebolo contra o anel que está posicionado no cabeçote.

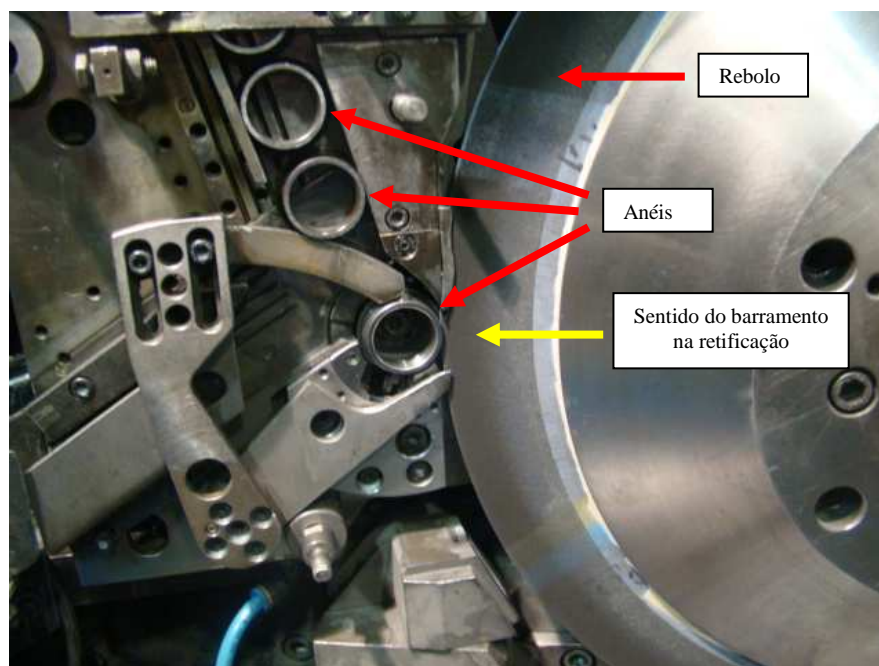


Figura 1- Detalhe do rebolo e anéis na retificadora cilíndrica de mergulho

Originalmente, os barramentos de retífica e dressagem eram movidos por motores de passo modelo SLO SYM M092 FC08, produzidos pela empresa Superior Electric. Cada motor movimenta um barramento. O ângulo de passo destes motores é de $1,8^\circ$, sendo necessários 200 pulsos para uma revolução completa em seu eixo. O movimento linear dos barramentos é obtido por meio de uma unidade mecânica composta por fuso de esfera (*ball screw*), engrenagens e rolamentos, na qual os motores são acoplados. A relação interna entre as engrenagens e o fuso de esferas da unidade mecânica proporciona o avanço linear de $1\mu\text{m}$ (um micron) para cada passo dos motores. Conforme dados de catálogo, a velocidade máxima de rotação dos motores de passo é de 600 passos/segundo, o que produz um avanço linear de $600\mu\text{m/segundo}$ nos barramentos.

O controle da máquina retificadora é realizado por um CLP dedicado desenvolvido na década de 1980, denominado de MTC (do inglês *Machine Tool Control* – Controle de Máquina-Ferramenta).

O MTC é composto por gabinete em forma de rack, onde estão conectadas a fonte de alimentação, as placas de circuitos eletrônicos de I/O (*input/output* – entrada/saída), as placas utilizadas no controle ou comunicação com dispositivos externos e as placas eletrônicas de controle do sistema numérico, que é o responsável pelo controle dos motores de passo. O sistema numérico realiza o controle dos motores de passo da seguinte forma: uma placa numérica de controle, denominada NM (*Numeric Motor*) enviando sinais para duas placas numéricas de potência, denominadas NMP (*Numeric Motor Power*). Cada placa NMP envia sinais de potência para um motor.

2.2 Integração dos servomotores ao MTC

O modelo do servoacionamento e do servomotor que substituíram os motores de passo são, respectivamente, SGDV-7R6A01A e SGMSV 10A3A61, da marca Yaskawa. Sua integração com o MTC seguiu basicamente a mesma configuração de *hardware* utilizada no controle dos motores de passo, isto é, uma placa de controle (NM) enviando sinais para duas placas de potência (NMP). No novo sistema, a placa NM passou a enviar os sinais de pulsos, sentido de rotação e habilitação para os dois servoacionamentos Yaskawa, utilizando, contudo, uma placa eletrônica intermediária para reforço de corrente elétrica dos circuitos integrados (CI's) de saída da placa NM. Os pulsos são provenientes do CI 7414 e os sinais de sentido de rotação e habilitação são provenientes do CI 7404. A placa eletrônica intermediária utiliza o CI ULN 2803A para o reforço dos sinais. A tabela 1 mostra as características de corrente de saída de cada CI.

Tabela 1 – Características de corrente de saída dos circuitos integrados (CI's) utilizados na placa de controle do sistema numérico MTC da máquina retificadora

CI	Parâmetro	Descrição	Valor Max. (mA)
(1) 7404	I_{OL}	Corrente de saída de nível baixo	16
(2) 7414	I_{OL}	Corrente de saída de nível baixo	16
(3) ULN2803A	I_{CC}	Corrente contínua de coletor	500

CI = circuito integrado; I_{OL} = do inglês *Low-level output current*; I_{CC} = do inglês *Continuous collector current*.
(Fonte = extraído do datasheet de cada CI, disponível em www.alldatasheet.com)

O parâmetro I_{OL} foi o mais importante dentro da análise para conexão com os servoacionamentos. Isto porque, de acordo com o manual do fabricante, cada servoacionamento requer uma corrente elétrica de aproximadamente 9 mA para seu funcionamento correto. A ligação de dois servoacionamentos em paralelo excederia a capacidade de saída dos CI's, provocando danos à placa de controle. A adição do CI ULN2803A elevou a capacidade de corrente, possibilitando a integração dos servos ao sistema MTC. A figura 2 apresenta um diagrama simplificado desta integração.

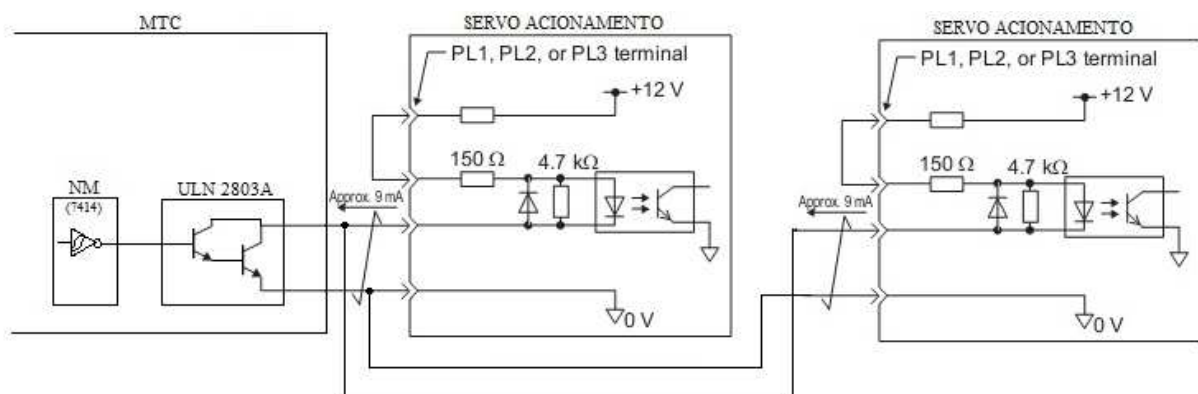


Figura 2 – Diagrama simplificado da integração eletrônica entre os dois servoacionamentos e o sistema MTC de controle da máquina retificadora

2.3 Sistema de monitoramento por emissão acústica (EA)

Segundo Ravindra *et al* (1997) *apud* Weingaertner *et al* (2011), “a emissão acústica pode ser definida como a propagação de uma onda elástica transiente, gerada por uma rápida liberação de energia de uma fonte (ou fontes) localizada em um material submetido a um estado de tensão”. De acordo com os autores, essa liberação de energia está relacionada à repentina redistribuição de tensões internas dos materiais, que são essas fontes de energia. Como consequência, uma onda de tensão é propagada pelo material (WEINGAERTNER *et al*, 2011).

Durante o processo de retificação, as fontes de tensão surgem pelo contato simultâneo das arestas dos grãos do rebolo abrasivo com a peça. As principais fontes de sinais de EA estão associadas à fratura dos grãos, fratura do elemento ligante dos grãos, trinca nos grãos, impacto elástico sobre a peça, remoção de cavaco, riscamento sem remoção de cavaco, quebra do cavaco, rachaduras e indução térmica de mudanças estruturais (KARPUSCHEWISKI, 2001 *apud* SCHÜHLI, 2007).

Os sistemas de monitoramento de processo tem papel fundamental na otimização e controle dos processos industriais. Em máquinas retificadoras, os sistemas de monitoramento possibilitam uma melhoria na confiabilidade das operações, associada a um aumento de qualidade e redução dos custos de manufatura. Segundo Dotto (2004), isto acontece porque “um sistema de monitoramento funciona como um operador dedicado, que observa com precisão o ciclo de cada peça produzida”. O sistema de monitoramento por emissão acústica desta retificadora cilíndrica de mergulho utiliza um único sensor para captar os sinais de EA resultantes do contato entre o rebolo e a peça. O sensor envia os sinais para uma unidade de controle, que se comunica com o MTC através de um conector padrão DB 25 pinos. De acordo com Júnior (1996), através do sinal de EA é possível detectar se todas as fases do processo estão sendo realizadas sem falhas. Pela figura 3, verifica-se uma divisão do processo de retificação em três fases, distintas entre si devido às diferentes as taxas de remoção estabelecidas (pelo CLP) para cada fase.

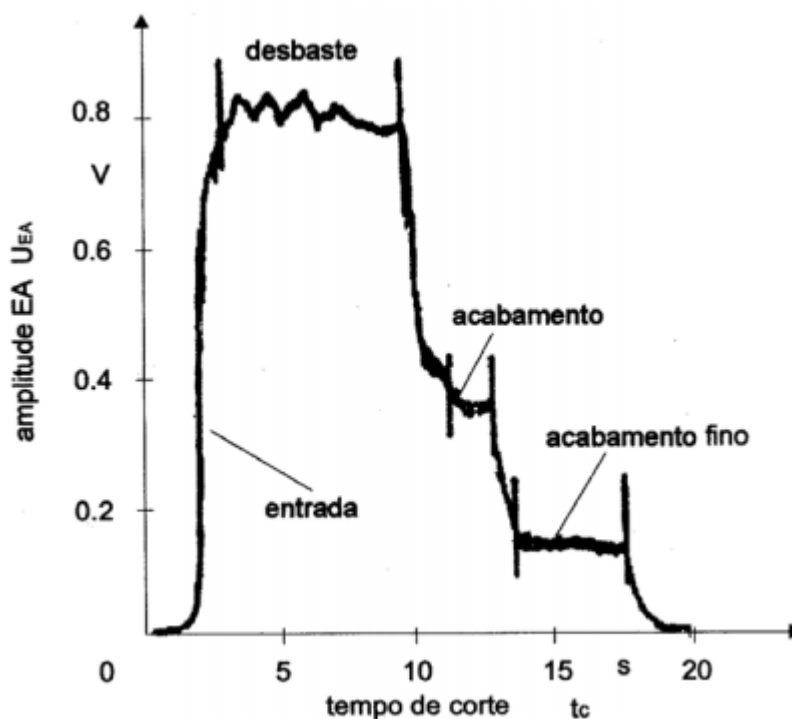


Figura 3 – Sinal de EA em um processo de retificação cilíndrica (Konig; Meyen, 1990, modificada por Júnior, 1996)

Segundo Karpuschewski *apud* Schühli (2007), diferentes tipos de avaliação podem ser aplicados à saída do sensor de EA, sendo as avaliações mais importantes: o valor da raiz quadrática média (RMS), sinais de EA brutos (não tratados) e análise da frequência. O sinal enviado pela unidade de controle ao MTC é o EA_{RMS} . O modelo do sensor de EA é: F 20038 e o da unidade de controle é: M5000, ambos produzidos pela Walter Dittel GmbH. A unidade de controle possui a capacidade de guardar 31 grupos de configurações para tratamento das informações captadas pelo sensor de EA. Cada configuração é guardada em uma “tela” (set) diferente, mostrada no visor da unidade de controle. O M5000 possui ainda 4 limites de comutação com os quais o equipamento informa ao CLP as características do processo de retificação em curso. A figura 4 mostra a curva característica de um ciclo de retificação assistido pelo sistema de monitoramento, evidenciando os limites de comutação.

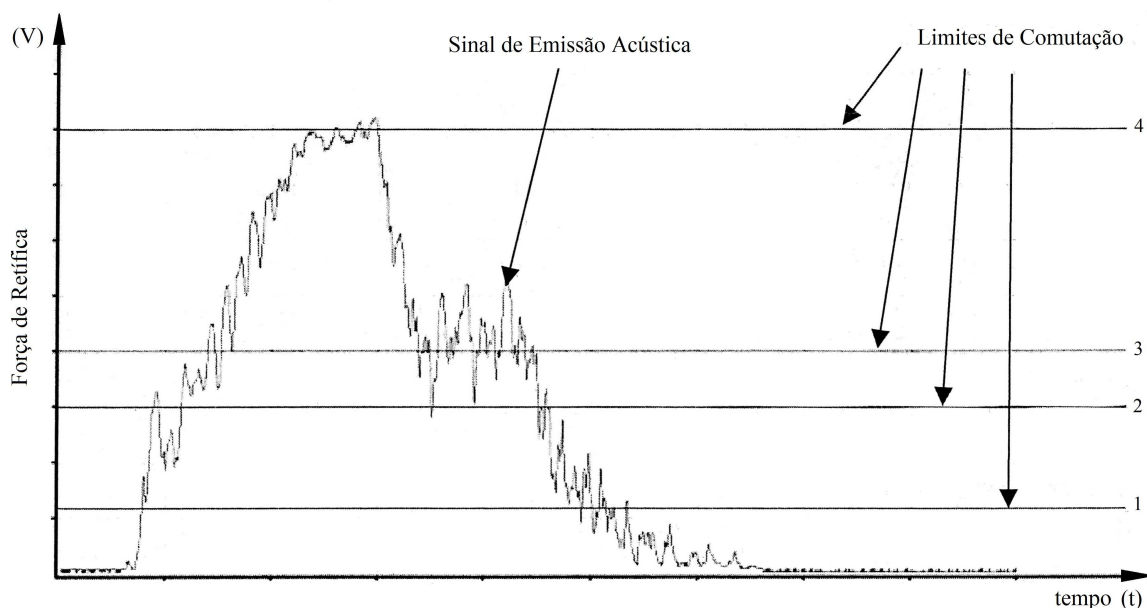


Figura 4 – Curva característica de um ciclo em um processo de retificação cilíndrica, assistido pelo sistema de monitoramento (adaptado do manual M5000)

Os limites de comutação podem ser configurados de diversas maneiras, as quais dependerão da forma como o sistema de monitoramento deverá interagir com o CLP da máquina.

O sistema por monitoramento por EA da máquina retificadora operava com um único grupo de configurações para o monitoramento do ciclo de retífica.

O sinal de emissão acústica, que é proporcional à força de retífica (ou da velocidade do mergulho do barramento de retífica), também é proporcional à área de contato entre rebolo e peça (JÚNIOR, 1996). Por isso, à medida que o diâmetro do rebolo diminuía, o operador da máquina executava uma correção manual de ganho, em decibéis (dB), na unidade de controle, para garantir uma amplitude do sinal EA_{RMS} do ciclo de retificação aproximada para todas as peças com o mesmo rebolo. Se esta correção não fosse feita, o tempo de ciclo por peça (PCT) começaria a diminuir, afetando diretamente a qualidade das peças retificadas. A mesma correção (manual) era feita na substituição de um rebolo usado por um novo. Neste caso, como a área de contato aumentava consideravelmente, o nível de EA gerado durante a retificação também era bastante elevado; o operador obrigatoriamente tinha de ajustar o ganho da unidade de controle, sob pena de aumento do tempo de ciclo.

2.4 Ajuste automático do sistema de monitoramento

A fim de eliminar a dependência do ajuste do sistema de monitoramento pela ação do operador, foi implementada uma função de ajuste automático do ganho do sinal EA_{RMS} na unidade de controle



M5000. O M5000 possui um recurso de seleção das telas de configurações através do conector DB 25, utilizado na comunicação com o MTC. Para isto, foram utilizadas cinco saídas digitais do MTC para formar uma palavra binária, que selecionava a tela com o ganho requerido para analisar o sinal. Foram utilizadas 20 telas (*settings*) com configurações idênticas, com exceção do ganho em dB, o qual foi atribuído um valor para cada tela. No programa do CLP, foi inserida uma supervisão para verificar se a amplitude máxima do sinal de EA_{RMS} está entre os limites 4 e 3, conforme o exemplo mostrado na figura 4, da unidade de controle. Se a amplitude do sinal ultrapassar o limite 4 por três ciclos seguidos significa que o valor em dB para análise do sinal está muito alto. Então, o CLP efetua a troca para uma tela com ganho em dB menor. O mesmo acontece se amplitude estiver abaixo do limite 3 por três ciclos seguidos: o CLP efetua a troca de tela de *settings* na unidade de controle para outra com ganho em dB maior. A condição de três ciclos para troca evita uma autocorreção desnecessária, em caso de uma peça com sobremetal muito diferente das demais surgir durante o processo de retificação.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A substituição dos motores de passo por servomotores proporcionou melhoria na qualidade dos anéis retificados, uma vez que os servomotores operam em malha fechada com o servoacionamento. O servoacionamento monitora se o motor executou o movimento relativo aos pulsos enviados pelo MTC, dando maior confiabilidade ao sistema. A tecnologia que utiliza motores de passo opera em malha aberta, isto é, sem informar para o controle se todos os pulsos enviados para o movimento resultaram em movimento efetivo. Para o trabalho com os motores de passo, o sistema possuía um tipo de “malha de monitoramento” formada por dois sensores posicionados próximos aos eixos dos motores. Esta malha com os sensores informava ao MTC se o erro de posição fosse maior que 180° no eixo de rotação dos motores de passo. Além da dificuldade de ajuste destes sensores, esta tecnologia não era capaz de detectar se o comando de entrada foi plenamente satisfeito. Foi constatado o que Ogata (2003) afirma: que “o sistema de controle de malha fechada é mais vantajoso que o controle efetuado em malha aberta”.

A velocidade máxima de movimento dos barramentos estava limitada a $600\mu\text{m}/\text{segundo}$, de acordo com as características dos motores de passo. Com os servomotores, a velocidade de recuo dos barramentos após o fim de cada ciclo de retificação foi ajustada para $1200\mu\text{m}/\text{segundo}$. A característica de controle efetuada pelo servoacionamento também permitiu um incremento na força de retificação de desbaste, onde a velocidade passou de $280\mu\text{m}/\text{segundo}$ para $380\mu\text{m}/\text{segundo}$.

A implementação do ajuste automático do sistema de monitoramento por EA reduziu o número de intervenções do operador na correção das medidas geométricas das peças produzidas ao longo do processo, deixando-o com mais tempo disponível para a observação e operação do restante da linha de produção.

A somatória de todas estas ações resultou na redução do tempo de ciclo da máquina retificadora de 3,4 segundos para 2,93 segundos por peça produzida. A retificadora deixou de ser a máquina gargalo da produção.

4. CONCLUSÕES

O trabalho apresentado buscou solucionar, em uma linha de produção de rolamentos, algumas das principais exigências que estão presentes nas empresas de manufatura do mundo globalizado: aumentar a produtividade sem aumentar a quantidade de recursos humanos (pessoas) ou físicos (máquinas) e com o menor investimento financeiro possível.

A integração do servossistema Yaskawa (servomotor e servoacionamento) com o controlador MTC da máquina retificadora mostrou-se de baixa complexidade, justificando-se por evitar a substituição de todo sistema eletrônico de controle por um novo CLP com controle numérico (CNC), que seria necessário para se obter o novo tempo de ciclo requerido.

Finalmente, a automação sugerida utilizou de recursos disponíveis na unidade de controle do sistema de monitoramento por EA que não estavam sendo aproveitados. O método de chamada das “telas” de monitoramento do M5000, com ganhos em dB diferentes, através das saídas digitais do



sistema MTC, constituiu um importante aperfeiçoamento na técnica de monitoramento do processo de retificação, além de disponibilizar o tempo do operador para outras atividades na linha de produção.

REFERÊNCIAS

CHIAVENATO, I. **Administração da produção: uma abordagem introdutória** – Rio de Janeiro: ELSEVIER, 2005 – 5ª Reimpressão.

DOTTO, F. R. L. **Sistema de Detecção Automática de Danos Térmicos no Processo de Retificação com Monitoramento via Internet**. 2004. 221p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial). UNESP Bauru, 2004.

JÚNIOR, J. F. **Contribuição para Implementação de Funções de Retificação Inteligente (RI) Utilizando Técnicas de Monitoramento por Emissão Acústica**. 1996. 138p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1996.

MAROUELI, C.A. **Gargalos de produção**. Disponível em: <<http://www.administradores.com.br/informe-se/artigos/gargalos-de-produção/21678/>> Acesso em: 08 jul 2012.

OGATA, K. **Engenharia de controle Moderno**. 4ª Ed. São Paulo. ED: Person Prentice Hall. 2003.

SCHÜHLI, L. A. **Monitoramento de Operações de Retificação usando Fusão de Sensores**. 2007. 119p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção Mecânica). Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

WEINGAERTNER, W.L.; BOARON, A.; MARTINENGI, G. **Aplicação Industrial do Reconhecimento de Contato Entre Rebolo e Peça**. Revista Máquinas e Metais ano 48 nº550 pg 50-71. Aranda Editora. Novembro de 2011.

XUE, L.; NAGHDY, F.; COOK, C. **Monitoring of wheel dressing operations for precision grinding**. FIEEE International Conference on Industrial Technology, 11 – 14 December 2002, 2, 1296-1299. Bangkok, Thailand 2002.