

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E
TECNOLOGIA DE SÃO PAULO**

MARCELO MIGUEL DE AZEVEDO

**AUMENTO DE PRODUTIVIDADE EM MÁQUINA RETIFICADORA DE ANÉIS DE
ROLAMENTOS**

São Paulo

2013

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E
TECNOLOGIA DE SÃO PAULO**

MARCELO MIGUEL DE AZEVEDO

**AUMENTO DE PRODUTIVIDADE EM MÁQUINA RETIFICADORA DE ANÉIS DE
ROLAMENTOS**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre Profissional em Automação e Controle de Processos.

Orientador: Prof. Dr. João Sinohara da Silva Sousa

São Paulo

2013

A988

AZEVEDO, Marcelo Miguel de.

Aumento de produtividade em máquina retificadora de anéis de rolamentos – 2013.

82 f.: il.; 30 cm

Orientador: Prof. Dr. João Sinohara da Silva Sousa

Dissertação (Mestrado Profissional em Automação e Controle de Processos) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, IFSP, 2013.

1. Produção	2. Retífica	3. Emissão Acústica
I. AZEVEDO, Marcelo Miguel de.	II. Instituto Federal de Educação,	
Ciência e Tecnologia de São Paulo	III Título	

CDU 681.0



INSTITUTO FEDERAL
SÃO PAULO
Campus São Paulo

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SÃO PAULO
CAMPUS SÃO PAULO
DIRETORIA GERAL DO CAMPUS SÃO PAULO
Coordenadoria de Registros Escolares de Pós-Graduação

ATA DE EXAME DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

Nome do Programa: **Mestrado Profissional em Automação e Controle de Processos**

Nome do(a) Aluno(a) : Marcelo Miguel de Azevedo

Nome do Orientador: Prof. Dr. João Sinohara da Silva Sousa

Nome do Co-orientador:

Título do Trabalho: "AUMENTO DE PRODUTIVIDADE EM MÁQUINA RETIFICADORA DE ANÉIS DE ROLAMENTOS"

Abaixo o resultado de cada participante da Banca Examinadora

Nome completo dos Participantes Titulares da Banca	Sigla da Instituição	Aprovado / Não Aprovado
Prof. Dr. João Sinohara da Silva Sousa – Orientador	IFSP – SPO	<i>APROVADO</i>
Prof. Dr. Francisco Yastami Nakamoto	IFSP – SPO	<i>APROVADO</i>
Prof. Dr. José Rui Camargo	UNITAU	<i>APROVADO</i>
Nome completo do Participante Suplente da Banca	Sigla da Instituição	Aprovado / Não Aprovado
Prof. Dr. Thomas Edson Filgueiras	IFSP – SPO	
Prof. Dr. Wendell de Queiroz Lamas	UNITAU	

Considerando-o: APROVADO
 NÃO APROVADO

Assinaturas

São Paulo, 23 de abril de 2013

João Sinohara da Silva Sousa

Presidente da Banca

[Assinatura]

Membro Interno

[Assinatura]

Membro Externo

Observações:

A minha esposa Adriana e aos nossos filhos Mariana, João Paulo e Miguel Angelo. Família pela qual vale a pena lutar, sem jamais desanimar.

Aos meus pais, José e Tereza, que me ensinaram o caminho do bem.

As minhas irmãs, Renata, Vanessa e Luciana.

AGRADECIMENTOS

Diversas pessoas colaboraram para a realização deste trabalho. Reconheço que, sem esta valiosa ajuda, não seria possível concluí-lo. Gostaria de expressar os mais sinceros agradecimentos a todos, elencando aqui seus nomes e desculpando-me, desde já, por alguma omissão.

Agradeço a Deus, por me dar forças e permitir que eu chegasse até aqui.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo – IFSP – pela oportunidade de ingresso ao programa de Pós Graduação.

Ao meu caro orientador, Prof. Dr. João Sinohara da Silva Sousa, por sua paciência e pelo modo como conduziu a orientação deste trabalho.

Aos professores do IFSP, Prof. Dr. Paulo Marcos, pelo auxílio e contribuições a este trabalho, e ao Prof. Dr. Alexandre Caporali, por todo apoio ao longo do curso e pela revisão do artigo enviado para congresso.

Aos professores Dr. Paulo Barbosa e Dr. Thomas Filgueiras, pelas contribuições no Exame de Qualificação.

Aos colegas de sala de aula, especialmente aos meus amigos Sylvio Brito e André Dias, pelo companheirismo nas disciplinas e contribuições ao trabalho.

Aos amigos e colegas na empresa:

Adailton Paiato e João Andreatti, por todo apoio e pelo direcionamento do projeto de pesquisa às necessidades da empresa;

Carlos Watanabe, pelo auxílio e contribuições na implementação do projeto na máquina. Ao Gilberto Silva e André Bisetto, pelas contribuições nos trabalhos com o sistema de monitoramento. Ao Reginaldo Machado, pelo auxílio na análise dos anéis do processo. Ao Marco Ribeiro, pela contribuição no projeto mecânico.

Ao meu grande amigo Daniel F. Bighetto, pela sua valorosa colaboração em todo trabalho.

A minha irmã Renata e minha cunhada Deise, pelas revisões dos textos.

A minha esposa Adriana e todos os meus familiares, pelo seu afeto e incentivo.

À Santa Luzia de Siracusa, a quem nutro especial carinho e particular devoção.

“Aos estudantes eu desejo que possam aprender a ciência profana, sem esquecer a ciência dos santos”

São João Bosco

“Estudo, trabalho e oração: eis o que manterá os jovens bons”

São João Bosco

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo de caso onde a pesquisa e o desenvolvimento resultaram em um projeto de automação industrial que foi aplicado como melhoria na produção de rolamentos automotivos. A empresa fabricante de rolamentos solicitou aumentar a produtividade de uma máquina retificadora de anéis internos de rolamentos, de modo que ela deixasse de ser o gargalo da produção. O ciclo de retífica de cada peça é assistido por um sistema de monitoramento por emissão acústica (EA). Na situação inicial, o volume de produção estava sendo constantemente prejudicado por falhas ocorridas no sistema de movimentação dos barramentos de retífica e dressagem da máquina retificadora, pois estavam trabalhando no limite da velocidade permitida pelos motores de passo que os acionavam. Além disso, o sistema de monitoramento do ciclo de retificação por EA dependia da intervenção do operador de máquina para realizar correções ao longo do processo. Por vezes, as correções não eram feitas, o que influenciava diretamente no tempo de ciclo e, conseqüentemente, na redução do volume de produção. A proposta do trabalho foi modificar o sistema de acionamento dos barramentos, através da integração de servomotores e servoacionamentos ao CLP de controle da máquina, em substituição aos antigos motores de passo. Adicionalmente, foi incorporada uma função de ajuste automático do sistema de monitoramento no programa controlador da máquina, que dispensou o ajuste manual no amplificador do sensor de EA realizado pelo operador. Este ajuste é necessário para adequar o sistema de monitoramento à dinâmica de variação dos sinais de emissão acústica ao longo do processo de manufatura dos rolamentos. Esta ação, além de eliminar a dependência do operador nestes momentos, contribuiu para que a produtividade da máquina retificadora permanecesse constante em toda vida do rebolo abrasivo. Como resultado, o volume de produção passou de 1058 peças/hora para 1200 peças/hora após a implantação da melhoria.

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

ABSTRACT

This work presents a case study that resulted in an industrial automation project that was applied as an improvement in automotive bearings production. The manufacturer of the bearings requested to increase the productivity of a bearing inner ring grinding machine, so that it would no longer be the production bottleneck. The grinding cycle is assisted by an acoustic emission monitoring system. Currently, the production rate was being constantly undermined by failures in the drive system of grinding and dressing slides, because they were running on the speed limit allowed by stepper motors that move them. Moreover, the acoustic emission (AE) monitoring system had needed an intervention by the machine operator to perform corrections along the grinding process. Occasionally, no corrections were made by the operator, which caused an increase in the cycle time and thus production rate reduction. The purpose was to modify the drive system of the slides, by integrating servo motors and servo drives to the machine's PLC, replacing the old stepper motors. Additionally, an automatic adjustment function of the AE monitoring system on the PLC program was incorporated, which has eliminated manual adjustment made by the operator, on the AE sensor amplifier. This adjustment is necessary to adapt the monitoring system to the dynamic variations of acoustic emission signals during the bearings manufacturing process. This action, beyond eliminating the operator dependence in these moments, contributed to the grinding machine productivity, which remained constant along the all grinding wheel. As a result, the production rate have increased from 1058 pieces / hour to 1200 pieces / hour after improvement deployment.

Keywords: production, grinding, acoustic emission, bearings

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características de corrente de saída dos circuitos integrados (CI's) utilizados na placa de controle do sistema numérico MTC da máquina retificadora	52
---	----

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 – Componentes de um sistema de produção	5
Figura 2.2 – Três categorias de sistemas de produção: a) sistema de trabalho manual, b) sistema trabalhador-máquina, c) sistema automatizado	6
Figura 2.3 – Cinco níveis de automação e controle da produção	9
Figura 2.4 – Acelerômetro piezoelétrico em corte	14
Figura 2.5 – Exemplos de motores de passo comerciais das marcas AMS, Phytron e Astrosyn.....	15
Figura 2.6 – Exemplos de servomotores, fabricante: Yaskawa.....	16
Figura 2.7 – Diagrama de blocos da estrutura básica de um CLP	18
Figura 2.8 – CLP com dispositivo de programação integrado, modelo: Direct Logic 06, fabricante: Koyo	19
Figura 2.9 – Sistema de controle por realimentação	21
Figura 2.10 – Sistema de controle de malha aberta.....	21
Figura 2.11 – Rolamento de uma carreira de rolos cônicos	23
Figura 2.12 – Vista explodida de um rolamento de uma carreira de rolos cônicos.....	24
Figura 2.13 – Configuração geral de uma linha de produção automatizada	25
Figura 2.14 – Retificação plana.....	26
Figura 2.15 – Retificação cilíndrica externa.....	26
Figura 2.16 – Fontes de emissão acústica em retificação.....	29
Figura 2.17 – Exemplo de sinal de EA bruto e sinal de EA_{RMS} obtidos experimentalmente...	30
Figura 2.18 – Evolução da automação na retificação	31
Figura 2.19 – Sinal de EA em um processo de retificação cilíndrica.....	32
Figura 2.20 – Circuito integrado de 14 pinos	36
Figura 2.21 – Níveis de entrada e saída para reconhecimento dos sinais pelos componentes da família TTL.....	37
Figura 2.22 – Comparação do funcionamento de circuitos lógicos convencionais com o Schmitt trigger	38
Figura 2.23 – Característica de histerese do circuito disparador Schmitt	39
Figura 2.24 – Diagrama esquemático do circuito integrado 7414, disponível comercialmente.....	39

Figura 3.1 – Detalhe do rebolo e anéis na retificadora cilíndrica de mergulho.....	40
Figura 3.2 – Detalhe da pista e borda do anel interno do rolamento.....	41
Figura 3.3 – a) Anel interno bruto e b) Anel interno com pista e borda retificados.....	41
Figura 3.4 – Gabinete (rack) do MTC com as placas eletrônicas que compõem o sistema de controle.....	43
Figura 3.5 – Exemplo de programação em linguagem MTC.....	44
Figura 3.6 – Fluxograma de operação da máquina durante o ciclo automático de retificação	47
Figura 3.7 – Parte do esquema elétrico da placa de controle dos motores de passo. Em detalhe o CI de saída dos pulsos, 7414.....	50
Figura 3.8 – Parte do esquema elétrico da placa de controle dos motores de passo. Em detalhe o CI 7404, por onde são fornecidos os sinais de habilitação (Mot 1 enable e Mot 2 enable) e de sentido (Up / Down).....	50
Figura 3.9 – Placa eletrônica utilizada para amplificar os sinais de corrente elétrica de saída do sistema numérico MTC.....	51
Figura 3.10 – Diagrama simplificado da integração eletrônica entre os dois servoacionamentos e o sistema MTC de controle da máquina retificadora.....	52
Figura 3.11 – Transcrição de parte do programa da máquina retificadora, em linguagem MTC.....	53
Figura 3.12 – Programa de teste do sistema numérico MTC.....	55
Figura 3.13 – Atraso entre sinal de habilitação e direção de rotação dos motores de passo, registrados pelo scopemeter.....	56
Figura 3.14 – Transcrição de parte do programa da máquina retificadora, após modificação.	58
Figura 3.15 – Vista explodida do servomotor e componentes utilizados para sua fixação na unidade mecânica de avanço.	59
Figura 3.16 – Curva característica de um ciclo em um processo de retificação cilíndrica, assistido pelo sistema de monitoramento.....	60
Figura 3.17 – Equipamento de monitoramento do ciclo de retífica em operação.....	62
Figura 3.18 – Equipamento de monitoramento do ciclo de retífica em operação. Foto do dia 06/02/2013.....	63
Figura 3.19 – Equipamento de monitoramento do ciclo de retífica em operação. Foto do dia 08/02/2013.....	63
Figura 3.20 – Cronograma das atividades para implementação das melhorias na máquina retificadora.....	66

Figura 4.1 – Histórico de trabalhos referentes à máquina retificadora de anéis de rolamentos	67
Figura 4.2 – Histórico de ordens de trabalhos finalizadas na máquina retificadora.....	68
Figura 4.3 – Problemas apontados pela produção na máquina retificadora de anéis. Comparativo entre os anos 2009 e 2012.....	70

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CLP – Controlador Lógico Programável

CN – Comando numérico

CPU – (do inglês *Central Processing Unit*) – Unidade Central de Processamento, ou UCP

EA – Emissão Acústica

E/S – Entrada/saída

L.E.R. – Lesões por Esforço Repetitivo

mA – mili *Ampères* (unidade de medida de corrente elétrica)

OSHA (do inglês *Occupational Safety and Health Act*) – Ato de Segurança e Saúde Ocupacional

PCT (do inglês *Piece Cycle Time*) – Tempo de ciclo por peça

PC's (do inglês *Personal Computers*) – Computadores Pessoais

RI – Retificação Inteligente

Vca – Tensão elétrica de corrente alternada (medida em *Volt*)

Vcc – Tensão elétrica de corrente contínua (medida em *Volt*)

LISTA DE SÍMBOLOS

α – Ângulo de passo dos motores de passo [°graus]

f_p – Frequência de pulsos [pulsos/seg]

F_t – Força tangencial [N]

n_p – Número de passos do motor [passos/rev] ou [pulsos/rev]

n_s – Número de passos para o motor dar uma volta completa de rotação no seu eixo [unidade]

N – Velocidade de rotação [rev/min]

P – Potência de retificação [W]

® – Marca registrada

V_s – Velocidade do rebolo [m/seg]

V_w – Velocidade da peça [m/seg]

ω – Velocidade angular [rad/seg]

SUMÁRIO

RESUMO.....	VII
ABSTRACT.....	VIII
LISTA DE TABELAS	IX
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	X
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	XIII
LISTA DE SÍMBOLOS	XIV
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivos	2
1.2 Estrutura da dissertação	3
2. REVISÃO DA LITERATURA	4
2.1 Sistemas de produção	4
2.1.1 Evolução dos sistemas de produção.....	4
2.1.2 Classificação dos sistemas de produção.....	5
2.1.3 Justificativa para automação da produção.....	7
2.2 Sistemas de automação.....	9
2.2.1 Níveis de automação.....	9
2.2.2 Tecnologias de automação – nível dos dispositivos.....	10
2.2.2.1 Sensores.....	10
2.2.2.2 Motor de passo	14
2.2.2.3 Servomotor	16

2.2.3	Tecnologias de automação – nível das máquinas.....	17
2.2.3.1	<i>Controle numérico</i>	17
2.2.3.2	<i>Controladores lógicos Programáveis</i>	17
2.2.4	Sistemas de Controle	20
2.3	Processo de Manufatura de Rolamentos	23
2.3.1	Aspectos gerais sobre os rolamentos	23
2.3.2	Arquitetura de produção	24
2.3.3	Conceitos do processo de retificação	25
2.4	A emissão acústica no processo de retificação	28
2.4.1	Definição	28
2.4.2	Sistemas de monitoramento	31
2.4.3	Monitoramento de processo através de EA.....	32
2.5	Eletrônica de controle de pulsos para o servoacionamento	36
2.5.1	Introdução.....	36
2.5.2	As portas do tipo Schmitt Trigger.....	38
3.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	40
3.1	Máquina	40
3.2	CLP da máquina retificadora	43
3.3	Linguagem de programação	44
3.4	Ciclo de operação da máquina.....	46
3.5	Integração dos servomotores ao MTC	50
3.5.1	Modificações no programa MTC da máquina.....	52

3.5.2	Adaptação mecânica	58
3.6	Sistema de monitoramento por emissão acústica (EA)	59
3.7	Ajuste automático do sistema de monitoramento	61
3.8	Cronograma das atividades	64
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	67
4.1	Situação antes da implantação das melhorias propostas	67
4.2	Resultados após implantação das melhorias	70
5.	CONCLUSÕES.....	73
	REFERÊNCIAS.....	74
	APÊNDICE.....	77
	APÊNDICE A – Transcrição do programa utilizado no teste do sistema numérico, convertido de linguagem MTC para linguagem de diagrama de contatos (<i>Ladder</i>).....	78

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 um mercado consumidor interno 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 desenvolverem soluções eficientes e eficazes para reduzir os custos de manufatura, a fim de manterem sua competitividade. Segundo Chiavenato (2005), o aumento de produtividade é uma das maneiras que permitem aumentar a competitividade de uma empresa. Gaither e Frazier (2002), ao referirem-se às empresas norte-americanas, afirmam que os principais fatores que determinam quanto o mercado pode ser captado pelas empresas são: produtividade, custos e qualidade. Os autores apresentam como definição de produtividade de um recurso “[...] a quantidade de produtos ou serviços produzidos num intervalo de tempo dividido pela quantidade necessária deste recurso” (GAITHER; FRAZIER, 2002). Ao diminuir o tempo de produção também se reduz o tempo de espera entre o pedido do cliente e a entrega do produto, o que se torna uma vantagem para o fabricante (GROOVER, 2011). E aumentar a produtividade significa aumentar a produção sem, contudo, aumentar a quantidade de recursos humanos ou físicos utilizados, que são os operários e as máquinas.

Neste contexto, uma empresa fabricante de rolamentos do estado de São Paulo solicitou que fosse aumentada a produção de uma máquina retificadora de anéis internos de rolamentos, que era o gargalo da produção. Segundo Maroueli (2008), um “gargalo” é todo ponto dentro de um sistema industrial que limita a capacidade final de produção. A operação realizada pela máquina é retificar a pista e a borda do anel interno do rolamento. A *Pista* é o lugar por onde se deslocam as partes internas móveis no interior do rolamento. A *borda* serve como um local de apoio para os rolos, que se deslocam em contato com a pista, no interior deste tipo de rolamento. A análise identificou que o sistema de acionamento dos barramentos de retificação e de dressagem do rebolo abrasivo estava no limite de sua capacidade de avanço, limitado pelas características dos motores de passo que acionavam os barramentos. Além disso, constantes problemas ocorridos neste sistema com motores de passo ocasionavam paradas inesperadas da máquina retificadora, prejudicando todo processo produtivo. Os

motores de passo são dispositivos que fornecem boa precisão, mas que não informam ao sistema de controle se todos os pulsos enviados para a realização do movimento transformaram-se em movimento efetivo. Esta deficiência pode ser suprimida pelo servomotor controlado por um servoacionamento, onde o método de controle entre ambos utiliza uma malha de realimentação.

O sistema de monitoramento de retificação funciona como um “operador dedicado”, que observa cada ciclo de máquina. As informações obtidas são utilizadas para otimização do próprio ciclo de retificação. Nas condições iniciais deste estudo de caso, o sistema de monitoramento por emissão acústica (EA) requeria um ajuste de ganho durante o processo de retificação, que era realizado manualmente pelo operador de máquina. A melhoria proposta consistiu na implantação de um ajuste automático do sistema de monitoramento, que substituiu o ajuste manual efetuado pelo operador, no amplificador do sensor de emissão acústica (EA), e também na melhoria do sistema de movimentação dos barramentos, baseado nas vantagens obtidas pelos servomotores em oposição aos motores de passo. O trabalho relata a integração de tecnologias de monitoramento por emissão acústica (EA), programação de lógica de CLP (Controlador Lógico Programável) e integração do sistema de servoacionamentos à eletrônica de controle, relativamente antiga, da máquina retificadora.

1.1 Objetivos

O objetivo do trabalho foi aumentar a produtividade de uma máquina retificadora de anéis internos de rolamentos, de modo que a mesma deixasse de ser o gargalo da produção. O tempo de ciclo para usinagem de cada peça era de 3,4 segundos, o que resultava em uma produção de 1058 peças/hora. Com a automação sugerida, pretendeu-se chegar ao tempo de 3,0 segundos/peça, resultando em um volume de produção de 1200 peças/hora, ou seja, um aumento de 13,4% na produção atual. Secundariamente, este trabalho também teve como objetivo reduzir o número de problemas relacionados com o sistema de movimentação dos barramentos de retífica e dressagem da máquina retificadora.

1.2 Estrutura da dissertação

Este trabalho é composto pelas seguintes partes:

- Capítulo 1: Introdução ao estudo de caso, bem como sua justificativa, objetivos do trabalho e apresentação da estrutura da dissertação.
- Capítulo 2: Neste capítulo é apresentada a revisão da literatura abordada, compreendendo os seguintes temas: sistemas de produção, sistemas de automação e automação da produção, o processo de manufatura de rolamentos, o processo de retificação, monitoramento do ciclo de retificação, emissão acústica, conceitos de eletrônica digital inerentes ao sistema de controle da máquina retificadora. Também é apresentado o estado da arte das técnicas de utilização de emissão acústica em processos industriais de usinagem, como a retificação e dressagem.
- Capítulo 3: Descrição dos materiais, equipamentos e metodologia empregada no desenvolvimento do caso.
- Capítulo 4: Resultados após implementação da automação sugerida.
- Capítulo 5: Conclusões e considerações finais sobre o trabalho.
- Referências.
- Apêndice.

2. REVISÃO DA LITERATURA

Esta revisão abordará aspectos gerais sobre sistemas de produção destacando o papel da automação durante o processo de retificação, que é uma das etapas de manufatura de rolamentos. De modo especial, será enfatizada a máquina retificadora que foi o objeto deste trabalho. Também apresentará conceitos sobre eletroeletrônica industrial os quais foram aplicados no desenvolvimento do trabalho, durante os ensaios em laboratório.

2.1 Sistemas de produção

2.1.1 Evolução dos sistemas de produção

Partindo do princípio de que um sistema “é uma combinação de componentes que atuam conjuntamente para a obtenção de um objetivo [...]” (RADATZ, 1996), historicamente, pode-se notar a existência de sistemas de produção desde os povos mais antigos. As pirâmides do Egito, a Grande Muralha de China, os aquedutos e estradas do Império Romano são exemplos de produção da indústria dos povos da antiguidade. Os métodos por eles utilizados para a produção de seus produtos eram manuais e rudimentares, bem diferentes dos atuais (GAITHER; FRAZIER, 2002).

Na Revolução Industrial, iniciada na Inglaterra no ano 1700, os trabalhos manuais passaram a ser substituídos pelos sistemas mecanizados e, antes do final do século XVIII, estes sistemas tornaram-se automáticos. Aqui o termo “automático” significa ter um mecanismo de atuação própria, que seja capaz de realizar uma determinada operação por um período de tempo estabelecido (RIBEIRO, 2001).

A organização dos trabalhadores nas fábricas também acompanhou a evolução das máquinas. No início do século XX, Henry Ford (1863-1947) projetou o automóvel “Modelo T” para ser produzido em linhas de montagem. As linhas de montagem da Ford incorporavam, dentre outros, elementos importantes de administração da produção, a produção em massa e baixos custos de manufatura (GAITHER; FRAZIER, 2002). É com este

ideal de Ford, de produção *versus* custo de manufatura, que se justifica este trabalho. Segundo Chiavenato (2005), o ritmo acelerado numa produção contínua proporciona economia nos custos de manufatura.

2.1.2 Classificação dos sistemas de produção

“Um sistema de produção é um conjunto de pessoas, equipamentos e procedimentos organizados para realizar as operações de produção de uma empresa” (GROOVER, 2011). A partir desta definição, o autor estabelece uma divisão dos sistemas de produção em dois níveis:

- a) Instalações: referem-se às máquinas, ferramentas, equipamentos de inspeção e de controle, *layout* da fábrica, isto é, a organização física dos equipamentos.
- b) Sistemas de apoio à produção: compreende os procedimentos necessários para a organização e o gerenciamento da produção. São funções dos sistemas de apoio o projeto do produto, o planejamento do processo produtivo e o controle das operações físicas realizadas na fábrica. Sem os sistemas de apoio não há o planejamento necessário para o progresso da fábrica. A figura 2.1 representa a interação dos sistemas de apoio com as instalações, na composição do sistema de produção.

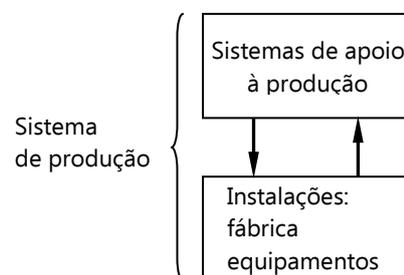


Figura 2.1 – Componentes de um sistema de produção (GROOVER, 2011)

Com relação à participação humana no processo executado pelos sistemas de produção, no nível instalações, três categorias podem ser formadas:

- a) Sistemas de trabalho manual: formado por trabalhadores que executam tarefas sem o auxílio de ferramentas motorizadas. Ribeiro (2001) considera que nesta categoria, por não existir o uso de máquinas envolvidas, não há nenhuma automação presente.
- b) Sistemas trabalhador-máquina: são aqueles nos quais um trabalhador humano opera um equipamento ou máquina motorizada para realizar a produção.
- c) Sistemas automatizados: sistemas nos quais a automação do processo é realizada por um programa de instruções e controle. Os sistemas de produção automatizados requerem uma participação reduzida do trabalhador ou operário de produção, quando comparados ao processo manual equivalente. Nos sistemas automatizados, as operações manuais são substituídas pela potência elétrica ou mecânica de atuadores, controlados por um sistema de controle inteligente, que geralmente é eletrônico (RIBEIRO, 2001). Considerações sobre sistemas de automação e seus componentes são apresentados na seção 2.2.1.

A figura 2.2 ilustra estas três categorias de sistemas de produção.

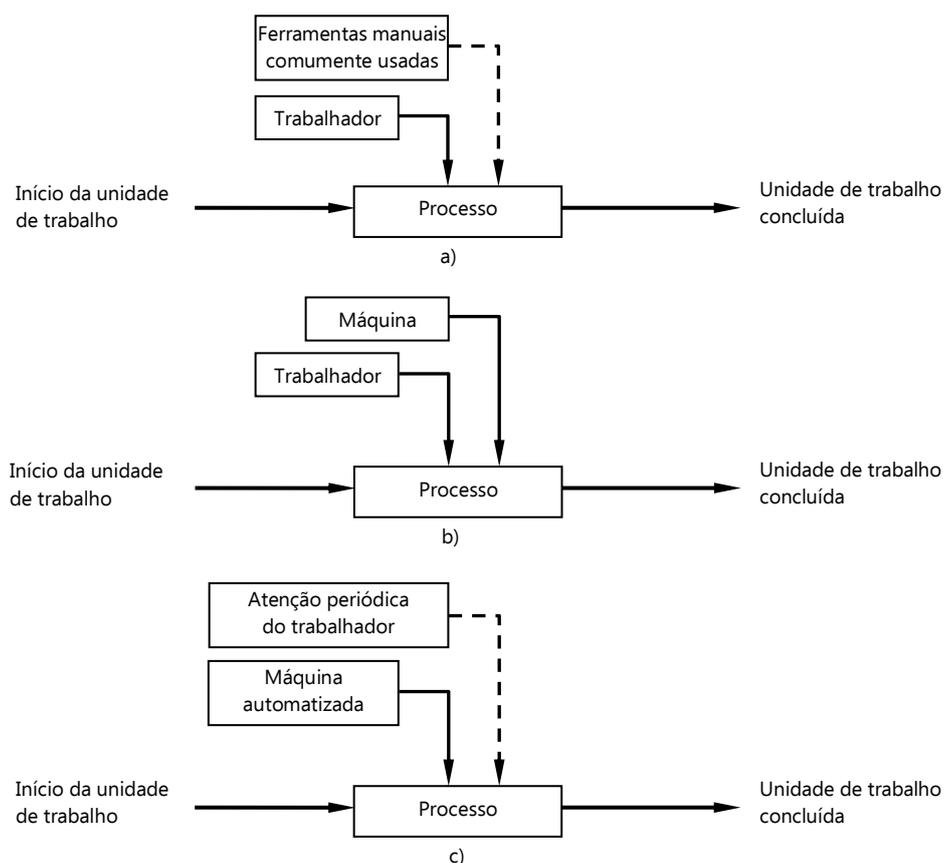


Figura 2.2 – Três categorias de sistemas de produção: a) sistema de trabalho manual, b) sistema trabalhador-máquina, c) sistema automatizado (GROOVER, 2011)

Devido ao nível de automação presente em alguns sistemas trabalhador-máquina, pode-se confundí-lo com os sistemas automatizados. Este é o caso de uma linha de produção de rolamentos. Nas linhas de produção para manufatura de rolamentos, as máquinas que efetuam as operações de retífica operam sem a necessidade de intervenção do operador a cada ciclo de operação. Além disso, a implementação de sistemas e tecnologias de monitoramento do ciclo de trabalho, conforme o trabalho desenvolvido por Felipe Jr. (1996) pode, cada vez mais, dar características de sistemas automatizados aos sistemas trabalhador-máquina. Este assunto será tratado mais adiante, quando forem estudadas as melhorias propostas para a máquina retificadora de anéis internos de rolamentos.

2.1.3 Justificativa para automação da produção

Diversos são os motivos que levam as empresas a realizarem projetos de automação da produção. Segundo Groover (2011), as razões mais comuns são:

- Aumentar a produtividade. Significa aumentar a quantidade produzida por hora de trabalho;
- Reduzir os custos do trabalho. Os investimentos em automação como forma de substituição dos trabalhos manuais são justificados economicamente pela redução das despesas sociais legais das empresas com seus trabalhadores. A automação não significa, contudo, eliminar a figura do trabalhador do chão de fábrica, mas reservar para ele apenas as tarefas mais nobres dentro do sistema de produção;
- Minimizar os efeitos da falta de trabalhadores. Aqui o autor (GROOVER, 2011) se refere à falta de mão-de-obra qualificada, que é uma realidade em muitos países, mesmo os desenvolvidos;
- Reduzir ou eliminar as rotinas manuais e das tarefas administrativas. A automação de tais rotinas e tarefas reduz a incidência de L.E.R. (Lesões por Esforço Repetitivo) dos trabalhadores, o que aumenta o nível geral das condições de trabalho (VARELLA, 2012);
- Aumentar a segurança do trabalhador. Esta exigência começou nos Estados Unidos após aprovação em congresso do Ato de Segurança e Saúde Ocupacional - OSHA (do inglês *Occupational Safety and Health Act*), de 1970. Esta foi a primeira lei federal

criada para reger a saúde e a segurança no setor privado e do governo. Projetos de automação industrial podem ser implantados a fim de se observar os objetivos da OSHA.

- Melhorar a qualidade do produto. Com a automação, consegue-se maior uniformidade daquilo que está sendo produzido. Os desvios de produção são reduzidos;
- Diminuir o tempo de produção. Quando se reduz o tempo de produção, aumenta a capacidade instalada da empresa (GAITHER; FRAZIER, 2002), novos compromissos de manufatura podem ser assumidos e o tempo de espera entre a encomenda e a entrega do produto ao cliente também se reduz. E tudo isto trás para o fabricante um aumento de competitividade (CHIAVENATO, 2005);
- Realizar processos que não podem ser executados manualmente. Alguns processos não podem ser realizados manualmente devido à precisão, complexidade geométrica ou, ainda, pela impossibilidade de exposição do ser humano a ambientes nocivos a saúde, por exemplo, como áreas com altas temperaturas ou áreas classificadas. Segundo Bega *et al* (2006), áreas classificadas são aquelas que apresentam risco de explosão devido à presença de materiais inflamáveis ou gases explosivos.
- Evitar o alto custo da não automação. As vantagens trazidas pela implantação da automação podem ser observadas em vários âmbitos como: melhoria da qualidade, aumento das vendas, melhoria no ambiente produtivo (os funcionários ficam livres das tarefas intediosas, como descrito acima), melhora da imagem da empresa. “As empresas que não optam pela automação estão mais propensas a se ver em desvantagem competitiva diante de seus clientes, empregados e público em geral” (GROOVER, 2011).

2.2 Sistemas de automação

2.2.1 Níveis de automação

Embora a automação industrial esteja quase sempre associada às máquinas de produção, cada máquina é composta por subsistemas que também podem ser automatizados. Assim, o conceito de sistemas automatizados pode ser aplicado em diferentes níveis de operação em uma planta industrial. Castrucci e Moraes (2007) e Groover (2011) definem estes níveis da seguinte forma (figura 2.3):

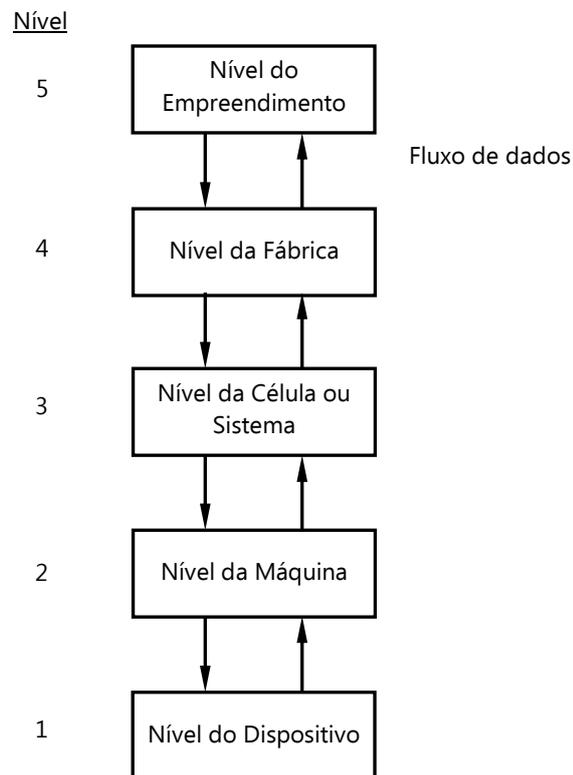


Figura 2.3 – Cinco níveis de automação e controle da produção (adaptado de GROOVER, 2011)

1. Nível do dispositivo. É o nível mais baixo da hierarquia de automação. Compreende sensores, atuadores e demais dispositivos de campo.
2. Nível da máquina. Neste nível encontram-se os equipamentos que executam o controle automático das atividades da máquina de produção.

3. Nível da célula ou do sistema. Uma célula de produção é um grupo de máquinas ou estações de trabalho conectadas, de maneira que este trabalho conjunto resulte na obtenção de um determinado processo de manufatura. As linhas de produção estão incluídas neste nível.
4. Nível da fábrica. No nível da fábrica estão as células ou linhas de produção individuais. Este nível recebe instruções de um sistema de gestão corporativo e as traduz em planos operacionais para a produção. Castrucci e Moraes (2007) também denominam este nível como “gerenciamento da planta”.
5. Nível do empreendimento. É o nível mais alto, formado pelo sistema de gestão corporativo. Este nível se preocupa com a administração dos recursos da empresa, como: vendas, financeiro, contabilidade, pesquisa, projeto e demais funções necessárias ao gerenciamento do empreendimento.

Em cada um destes níveis encontram-se diversas tecnologias de automação, necessárias para controlar as operações e também receber ou transmitir informações para outros níveis da organização. Como forma de delimitação do assunto, aqui serão abordadas apenas aquelas ligadas à automação nos níveis 1 e 2, ou seja, dos dispositivos de campo, como sensores e atuadores, até os controladores individuais de máquinas. Segundo Ribeiro (2001), o desenvolvimento das tecnologias nestes níveis foi grandemente impulsionado pela aplicação de automação eletrônica nos referidos processos.

2.2.2 Tecnologias de automação – nível dos dispositivos

2.2.2.1 Sensores

Um sensor é um transdutor, isto é, um dispositivo que converte uma variável física em outra, em geral, em um sinal de tensão elétrica. O propósito desta conversão é medir o estímulo de maneira que a variável possa ser quantificada e interpretada através de um valor numérico (GROOVER, 2011).

Os sensores podem ser classificados de diversas formas: pela natureza do estímulo ou da variável física a ser medida; podem ser classificados como analógicos ou digitais; ou ainda, podem ser classificados como ativos ou passivos.

Quanto à natureza (categoria do estímulo), diversos tipos de variáveis físicas podem ser medidas através de sensores. Alguns exemplos são mostrados a seguir:

- Mecânico: posição (deslocamento linear e angular), velocidade, aceleração, força, torque, pressão, desgaste, tensão, massa, densidade.
- Elétrico: voltagem, corrente, carga, resistência, condutividade, capacitância.
- Térmico: temperatura, calor, fluxo de calor, condutividade térmica, calor específico.
- Radiação: tipo de radiação (raios gama, raios-X, luz visível), intensidade, comprimento da onda.
- Magnético: campo magnético, fluxo, condutividade, permeabilidade.
- Químico: identidades de componentes, concentração, níveis de pH, presença de ingredientes tóxicos, poluentes.

Um sensor é denominado analógico quando produz na saída um sinal contínuo como uma tensão elétrica e o seu valor varia de modo analógico, de acordo com a variável que está sendo medida, como por exemplo: o termopar e o pirômetro de radiação, utilizados para medir temperatura.

Segundo Groover (2011), os dispositivos de medição discretos produzem como sinal de saída somente valores determinados. Eles podem ser divididos em outras duas categorias: binários e digitais.

Binário é o dispositivo que assume apenas dois estados: ligado e desligado. É comum nas chaves fim de curso, interruptores de proximidade, etc.

Um dispositivo de medição digital produz um sinal de saída digital tanto na forma de conjunto de bits paralelos (matriz de sensor fotoelétrico, por exemplo) como uma série de pulsos que podem ser contados, por exemplo, por um *encoder* ou codificador ótico.

Os sensores também podem ser ativos ou passivos. Um sensor é dito ativo quando não necessita de uma fonte de energia externa para responder ao estímulo. Como exemplo, o termopar, que produz uma tensão em milivolts como resposta a um aumento de temperatura.

O sensor passivo requer uma fonte de energia para operar, como os sensores indutivos e capacitivos.

O sensor de emissão acústica (EA)

Trata-se de um transdutor de aceleração, isto é, um dispositivo analógico utilizado para medir choque e vibração mecânica. Cabe lembrar, segundo Werneck (1996), que a aceleração pode ser determinada a partir do conhecimento da posição da peça, bastando para isto processar este sinal a fim de se obter a segunda derivada. O exemplo a seguir demonstra como o sinal de ruído se torna expressivo na análise da aceleração de componentes de máquinas (WERNECK, 1996):

Supondo que o sinal de posição de uma peça seja, simplificadaamente:

$$X(t) = x \operatorname{sen}(w_1 t) + r \operatorname{sen}(w_2 t) \quad (1)$$

onde x é a amplitude máxima do sinal de posição;

w_1 é a frequência do sinal de posição;

r é a amplitude máxima do sinal de ruído;

e w_2 sua frequência.

Para um sinal de posição de frequência relativamente baixa, tem-se normalmente:

$$x \gg r$$

e

$$w_2 \gg w_1$$

e assim a relação sinal/ruído é:

$$\frac{x}{r} \gg 1$$

A primeira derivada do sinal de posição fornece a velocidade $V(t)$:

$$V(t) = \frac{d}{dt} \{X(t)\} = x w_1 \cos(w_1 t) + r w_2 \cos(w_2 t) \quad (2)$$

A relação sinal/ruído agora é $x/w_1/r/w_2$, que pode ser bem próxima da unidade, já que

$$x \gg r \text{ e } w_2 \gg w_1$$

Portanto, o ruído, que tinha uma mínima participação no sinal de posição, passa a ser importante no sinal de velocidade, devido à sua frequência relativamente alta. Se mais uma derivada do sinal for realizada, para se obter o sinal de aceleração, o ruído presente terá expressão muito maior. Por esta razão, os transdutores de aceleração (ou acelerômetros) são largamente empregados para medir ou monitorar vibrações e também impactos em estruturas e máquinas (WERNECK, 1996).

O sensor utilizado para medir emissão acústica (EA) é um acelerômetro piezoelétrico.

Este sensor é constituído por uma pastilha de cerâmica piezoelétrica montada em uma cápsula metálica. Segundo Werneck (1996), os elementos piezoelétricos têm a propriedade de produzir uma tensão elétrica em seus terminais quando a pastilha cerâmica é comprimida ou “achatada” (o nome piezoelétrico é derivado do grego *piezin*, que significa esmagar, achatar). Como exemplos de materiais cerâmicos utilizados na composição de tais sensores citam-se o cristal de quartzo comum (dióxido de silício) e o titanato de bário.

Alguns sensores possuem cápsulas blindadas, que permitem o funcionamento em condições típicas de retificação, próximas da peça e sujeitas a óleo, refrigerante, cavaco e calor (FELIPE JR., 1996).

A figura 2.4 apresenta um acelerômetro em corte. Um dos lados do cristal piezoelétrico é apoiado no corpo do transdutor e o outro, fixado à massa, também denominada “massa sísmica”. Quando o transdutor é submetido a qualquer aceleração, a massa comprime ou alonga o cristal e isto produz um sinal elétrico proporcional à movimentação da massa (WERNECK, 1996).

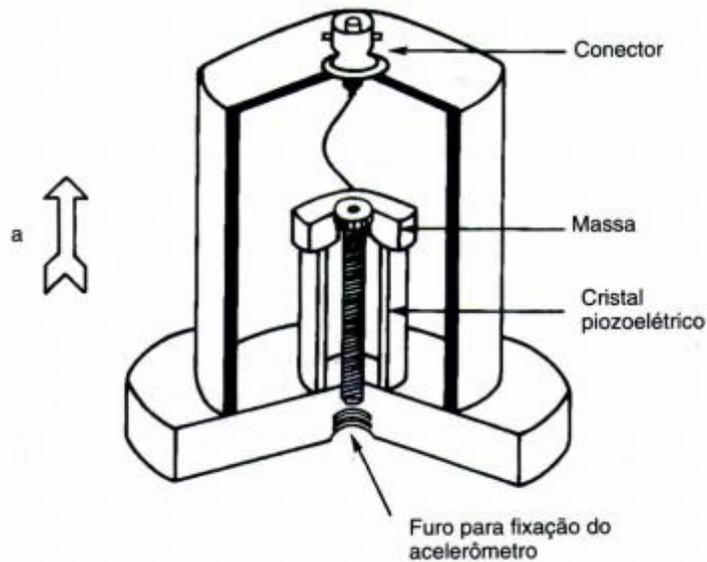


Figura 2.4 – Acelerômetro piezoelétrico em corte (WERNECK, 1996)

A seta com a letra “a” ao lado esquerdo da figura significa que somente a componente da aceleração paralela ao eixo do transdutor é que produzirá o efeito piezoelétrico; as componentes presentes no plano perpendicular ao corpo do transdutor são ignoradas.

As características de funcionamento do sensor de emissão acústica o tornam preferível entre outros tipos de sensores, especialmente em monitoramento de processos os quais requerem ultraprecisão (DORNFELD, 1999). O sensor é capaz de detectar diferentes níveis de EA mesmo quando a profundidade de corte é muito baixa, ou ainda, quando a deformação causada no processo de usinagem atingiu escalas em microns. Isto confere uma rápida velocidade de resposta ao sistema de monitoramento (LEE *et al*, 2006).

2.2.2.2 Motor de passo

Segundo Groover (2011), o motor de passo é “uma classe de motor que fornece rotação na forma de deslocamentos angulares discretos, chamados passos”. Os passos angulares são atuados por meio de pulsos elétricos discretos. A rotação angular e a velocidade do motor são controladas, respectivamente, pelo número de pulsos e pela frequência dos mesmos.

O ângulo do passo está relacionado ao número de passos para qual o motor foi projetado, segundo a relação:

$$\alpha = \frac{360}{n_s} \quad (3)$$

Onde:

α é igual ao ângulo do passo, em graus ($^\circ$) e

n_s é o número de passos para o motor dar uma volta completa de rotação no seu eixo.

Atualmente, são encontrados motores de passo comerciais com diversas características de ângulo de passo e pulsos por volta do motor. Algumas delas, comumente comercializadas, possuem ângulo de passo de: $0,9^\circ$ (400 pulsos), $1,8^\circ$ (200 pulsos) e $3,6^\circ$ (100 pulsos). A figura 2.5 mostra alguns exemplos de motores de passo comerciais, com seus respectivos ângulos de passo disponíveis.



AMS, $1,8^\circ$



Phyton, $1,8^\circ$



Astrosyn, $0,9^\circ$, $1,8^\circ$ e $3,6^\circ$

Figura 2.5 – Exemplos de motores de passo comerciais das marcas AMS, Phyton e Astrosyn

A velocidade angular e a velocidade de rotação dos motores de passo são dadas pelas expressões:

$$\omega = 2\pi f_p \quad (4)$$

$$N = \frac{60f_p}{n_p} \quad (5)$$

Em que:

ω é igual à velocidade angular [rad/seg]

N é a velocidade de rotação [rev/min]

f_p é a frequência de pulsos [pulsos/seg]

n_p é o número de passos do motor [passos/rev] ou [pulsos/rev]

Os motores de passo são largamente utilizados em máquinas-ferramentas, no setor industrial. Eles são utilizados em sistemas de controle de malha aberta.

2.2.2.3 Servomotor

O servomotor CC é um tipo comum de motor de corrente contínua. Neste motor, uma malha de realimentação é utilizada para se alcançar a velocidade estipulada pelo controlador. O servomotor CC possui a característica de manter um torque elevado quando a sua velocidade inicial é igual a zero. Também é um motor de velocidade variável de cujo sentido de rotação pode ser prontamente alterado. Estas características possibilitam a utilização deste motor em muitas aplicações industriais, especialmente naquelas em que é necessário iniciar e parar sua rotação bruscamente e em altas velocidades, ou reverter sua direção (GROOVER, 2011). Exemplos de servomotores são ilustrados na figura 2.6.



Figura 2.6 – Exemplos de servomotores, fabricante: Yaskawa

2.2.3 Tecnologias de automação – nível das máquinas

2.2.3.1 Controle numérico

O controle numérico (CN) é um tipo de automação programável, isto é, quando o equipamento é projetado com a flexibilidade de permitir com que a sequência das operações do processo de manufatura seja modificada. Todas as modificações podem ser armazenadas em forma de diferentes programas ou “receitas”, para a manufatura de diversos produtos. As máquinas que possuem um CN são controladas por um tipo de computador de uso industrial. Os comandos de posição das ferramentas são descritos em um programa de coordenadas com caracteres alfanuméricos codificados, contidos no computador. É um tipo de tecnologia muito aplicada em máquinas-ferramentas, especialmente por elevar consideravelmente a produtividade. Além disso, o sistema exige pouca habilidade do operador, que pode supervisionar mais de uma máquina (RIBEIRO, 2001).

2.2.3.2 Controladores lógicos Programáveis

Controlador Lógico programável, ou CLP, é um dispositivo eletrônico capaz de controlar máquinas e processos industriais através de programas lógicos desenvolvidos por meio de computadores pessoais (PC's). Os programas compõem-se de instruções lógicas que são armazenadas em uma memória programável contida no CLP. Os CLP's foram desenvolvidos especialmente para trabalhos em ambientes industriais, em substituição aos controles efetuados a partir de relés, bobinas, temporizadores, contadores e componentes similares, utilizados em automação industrial. Eles têm boa imunidade a ar poluído, ruídos elétricos e extremos de umidade e temperatura, condições normalmente presentes nestes ambientes (CASTRUCCI; MORAES, 2007).

Os componentes básicos que compõem um CLP são: processador, unidade de memória, fonte de energia, módulo de entrada e saída e dispositivo de programação. A figura 2.7, a seguir, ilustra a estrutura básica de um CLP.

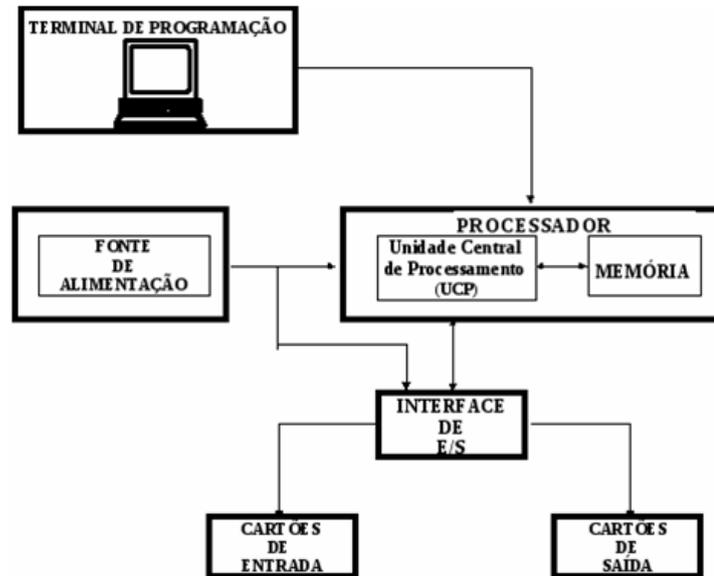


Figura 2.7 – Diagrama de blocos da estrutura básica de um CLP (VIANNA, 2012)

O processador é a unidade central de processamento (UCP, oriundo do inglês CPU – *Central Processing Unit*) do controlador programável. É responsável pela execução de funções lógicas, aritméticas e de sequenciamento, através de um programa contido no controlador que manipula as entradas do CLP. A UCP pode ser constituída de um ou mais microprocessadores, semelhantes aos utilizados em PC's, porém, com boa imunidade de trabalho às intempéries presentes em ambientes industriais, como descrito acima. No processador também está a memória do sistema operacional do controlador, que ordena a execução do programa de controle.

Na unidade de memória são armazenados os programas de lógicas, resultados das operações aritméticas, estados dos *bits* de E/S (entrada e saída do CLP), constantes de temporizadores e contadores, valores de parâmetros ou outras variáveis.

A fonte de alimentação converte energia da rede de alimentação elétrica externa, de 115Vac ou 230Vac, em valores de tensão de corrente contínua, para alimentação do próprio controlador ($\pm 5V_{cc}$) e também para os componentes de E/S (normalmente 24Vcc).

O módulo de entrada e saída é a interface do controlador com os componentes de E/S, isto é, os componentes de automação presentes no nível dos dispositivos, conforme a arquitetura apresentada acima, na figura 2.7. As entradas são sinais de sensores, interruptores, chaves, botões, ou outros dispositivos, que podem ser digitais ou analógicos. As saídas são sinais para controle de diferentes tipos de atuadores presentes nos processos industriais, tais como: válvulas, motores, bombas hidráulicas, resistências elétricas de fornos industriais, entre outros.

O dispositivo de programação é o meio por onde o programador interage com o programa do controlador. Por ele, pode-se criar ou alterar programas, enviar ou recebê-los do controlador e monitorar ciclos do processo de manufatura. O dispositivo de programação também pode não ser parte integrante do CLP. Neste caso, PC's e *notebooks* são amplamente utilizados para este fim (GROOVER, 2011). Um exemplo de CLP com dispositivo de programação integrado é mostrado na figura 2.8.



Figura 2.8 – CLP com dispositivo de programação integrado, modelo: Direct Logic 06, fabricante: Koyo

Algumas informações adicionais sobre os CLP's são apresentadas a seguir:

- *Ciclo de operação.* O ciclo de operação do CLP envolve: varredura dos sinais de entrada do processo, execução das instruções lógicas destes sinais, de acordo com o programa contido em sua memória, e alteração do estado das saídas, interagindo com os atuadores do processo ou da máquina. O termo *varredura* ou *scan*, segundo Vianna (2012), é usado para dar nome ao ciclo completo de operação do CLP (loop). O tempo gasto para execução de um ciclo completo, isto é, exame das entradas, execução do programa e atualização das saídas, é chamado “tempo de varredura” e depende da quantidade de instruções lógicas (tamanho do programa), do número de entradas e saídas utilizadas e da velocidade de processamento do próprio CLP.
- *Capacidades adicionais.* Inicialmente, o desenvolvimento dos CLP's teve como objetivo substituir a automação realizada por relés e outros componentes eletromecânicos. Posteriormente, funções aritméticas, de controle analógico, funções

de matrizes, processamento e relatório de dados, entre outros, dotaram-no de capacidades adicionais, imprescindíveis nos sistemas de automação atuais.

- *Programação do CLP.* A programação do CLP é realizada através de *software*. Os diversos formatos de escrita de programa para os CLP's são denominados "linguagens de programação", dos quais citam-se: diagrama *ladder*, blocos de funções, diagrama de funções sequenciais (GRAFCET), lista de instruções e texto estruturado. Segundo Groover (2011), estas são as 5 linguagens de programação especificadas pelo padrão IEC 1131-3 (*International Electromechanical Comision*), publicado em 1993. O maior objetivo da norma IEC1131-3 é ampliar a compreensão dos programas de CLP. O reconhecimento da necessidade de um padrão para CLP's surgiu devido às diversas aplicações industriais, sendo muitas delas voltadas à segurança. A programação dos CLP's deve ser relativamente de fácil compreensão tanto para os técnicos industriais, gerentes de plantas e engenheiros de processo, como para os programadores (LEWIS, 1998). De acordo com Wohlchlaeger (2006), a partir do ano de 1996 o nome da norma foi alterado para IEC 61131-3, como é conhecida atualmente.

2.2.4 Sistemas de Controle

Segundo Groover (2011), o dispositivo controlador de um sistema automatizado executa um programa de instruções, através do qual são realizadas as operações de manufatura. De acordo com o modo de efetuar o controle, os sistemas podem ser classificados como: *sistema de controle de malha fechada* e *sistema de controle de malha aberta*.

Um sistema de controle de malha fechada, ou com realimentação, é aquele onde a variável de saída se compara a um parâmetro de entrada, e qualquer diferença entre eles é utilizada para fazer com que a saída esteja em conformidade com a entrada. A comparação é realizada através de um sensor que faz a realimentação do sinal de saída para a entrada. O controlador, por sua vez, efetuará o controle do sistema não somente a partir dos parâmetros de entrada, mas também considerando o desempenho da saída, conforme as informações da realimentação. O controle com realimentação é utilizado para minimizar o erro do sistema

(OGATA, 2003), ou para garantir que as instruções de controle tenham sido efetivamente executadas (GROOVER, 2011). Os elementos básicos que compõem um sistema de controle de malha fechada são: (1) parâmetro de entrada, (2) processo, (3) variável de saída, (4) sensor de realimentação, (5) controlador e (6) atuador. A figura 2.9 apresenta um diagrama de interação destes elementos.

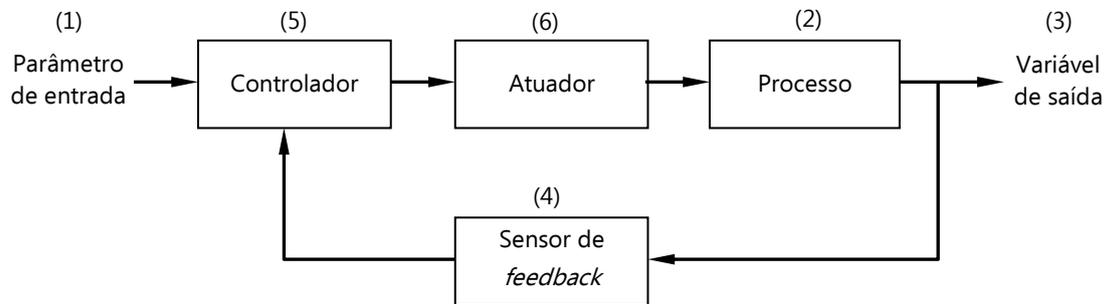


Figura 2.9 – Sistema de controle por realimentação (GROOVER, 2011)

Parâmetro de entrada é o valor ou a função que é aplicada ao sistema para se obter a variável de saída desejada. *Processo* é a operação que está sendo controlada. *Variável de saída* é, normalmente, uma variável do processo. O *sensor de feedback* é responsável pelo fechamento da malha de controle, pela função de realimentação. O *controlador* faz a comparação entre os sinais de saída e entrada e envia informações ao *atuador*, que fará as correções necessárias para o ajuste do sistema.

O controle de malha aberta não utiliza nenhum sinal de realimentação da saída para a entrada, ou seja, o sinal de saída não exerce ação alguma sobre o controle do sistema. Neste sistema, as condições de operação são fixadas pelas entradas de referência. E ainda “[...] qualquer sistema de controle cujas operações são efetuadas em uma sequência em função do tempo é um sistema de malha aberta [...]” (OGATA, 2003). Um exemplo de sistema de controle de malha aberta é mostrado na figura 2.10.

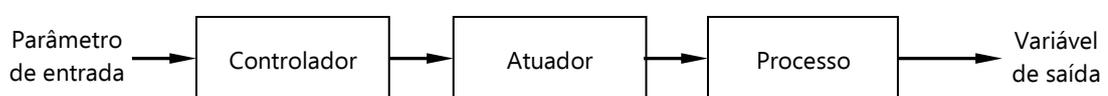


Figura 2.10 – Sistema de controle de malha aberta (GROOVER, 2011)

O sistema de controle de malha fechada se mostra mais vantajoso ao controle de malha aberta, uma vez que o sistema responde a distúrbios ou variações decorrentes do processo. Desta forma, os valores de referência das entradas ajustam-se de forma a atingir o melhor desempenho como resultado de saída do sistema (OGATA, 2003).

2.3 Processo de Manufatura de Rolamentos

2.3.1 Aspectos gerais sobre os rolamentos

Os insumos do processo de produção de rolamentos são barras de aço carbono. Segundo Felipe (2010), utiliza-se atualmente o aço SAE52100 na fabricação da grande maioria dos rolamentos. Estas barras de aço passam sequencialmente pelos processos de: forjamento, torneamento, tratamento térmico, retificação, brunimento, montagem, embalagem e expedição final.

Os rolamentos automotivos são compostos de anéis internos, anéis externos, elementos rolantes (que podem ser esferas ou rolos) e “gaiolas” feitas de aço ou de polímero semicristalino, para o alojamento dos elementos rolantes. Podem conter uma, duas ou quatro carreiras de elementos rolantes. Em determinados tipos de rolamentos, anéis de vedação são utilizados para fechar o conjunto e impedir a entrada de corpos estranhos ao interior do componente. A figura 2.11 mostra como exemplo um rolamento de uma carreira de rolos cônicos, montado. O mesmo tipo de rolamento é apresentado na figura 2.12, porém em vista explodida, onde estão destacados cada um de seus componentes.



Figura 2.11 – Rolamento de uma carreira de rolos cônicos (Fonte: fabricante de rolamentos SP)

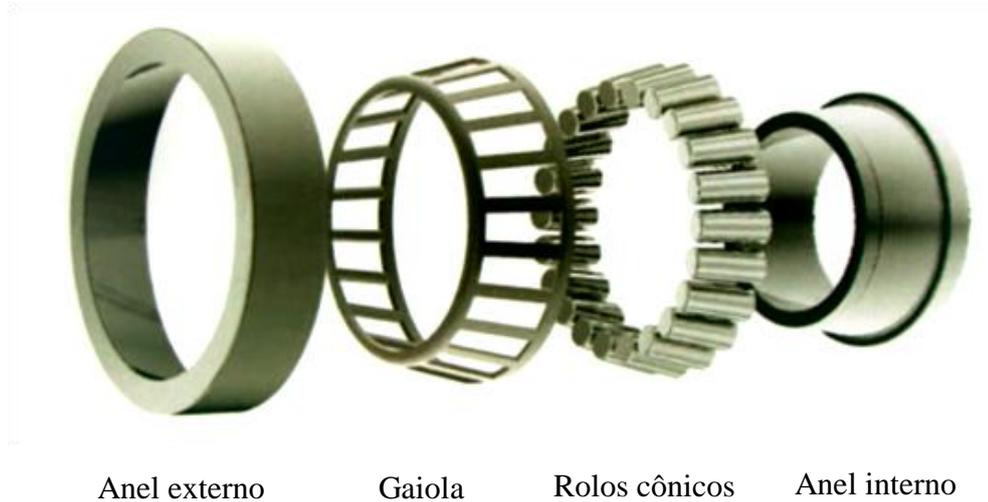


Figura 2.12 – Vista explodida de um rolamento de uma carreira de rolos cônicos (Fonte: fabricante de rolamentos SP)

A máquina retificadora a qual este trabalho se refere realiza a usinagem do anel interno deste tipo de rolamento. Maiores detalhes sobre a operação de retificação do anel interno e sobre a máquina serão apresentados na seção 3.1.

2.3.2 Arquitetura de produção

O processo de manufatura de rolamentos se enquadra no tipo de automação denominado por Gaither e Frazier (2002) como “linha automatizada de fluxo” ou “linha de produção automatizada” (GROOVER, 2011). Os anéis externos e internos dos rolamentos são usinados separadamente, por várias máquinas. Cada máquina realiza uma operação diferente nos anéis. Por isso, os anéis de rolamentos devem passar por todas elas. Um sistema de esteiras de transporte faz a integração de toda a linha, de modo que os anéis sejam levados da saída de uma máquina até a entrada da outra, para a próxima operação. O conceito de linha de produção é mostrado na figura 2.13.

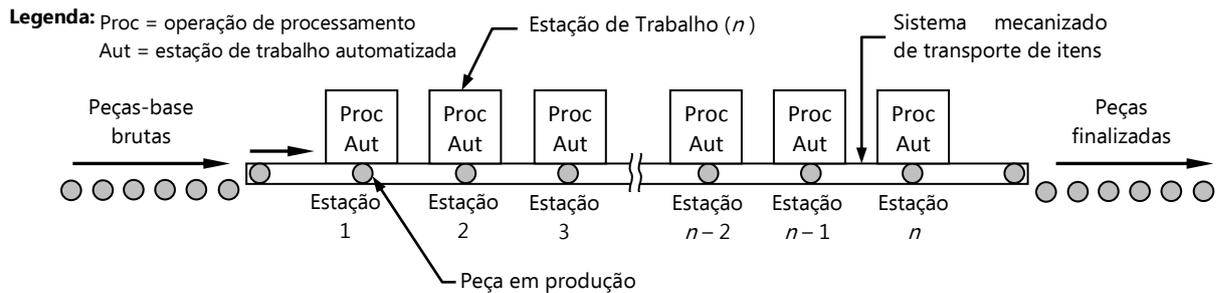


Figura 2.13 – Configuração geral de uma linha de produção automatizada (GROOVER, 2011)

Na figura 2.13, as peças-bases ou brutas representam os insumos do processo de retificação, que são os anéis tratados termicamente, em uma etapa anterior. As máquinas de retífica estão representadas pelas estações 1, 2, ..., n . Nota-se que existe uma ligação entre elas, que é o sistema de esteiras de transporte responsável pela transferência das peças de uma máquina para outra, de forma automatizada, integrando todo o processo. Ao final da linha, têm-se os anéis retificados e prontos para a próxima etapa de manufatura dos rolamentos.

2.3.3 Conceitos do processo de retificação

Segundo Aguiar (1997), a retificação é uma operação de usinagem utilizada quando se deseja uma elevada qualidade superficial, dimensional ou geométrica. Por isso, ela normalmente é uma das últimas etapas do processo de manufatura. Assim, a operação de retificação tem especial importância dentro do processo, uma vez que um erro nesta etapa constitui a perda de material com elevado valor agregado, devido aos processos anteriores (SOARES; OLIVEIRA, 2002). Para a operação de retificação, são utilizados rebolos abrasivos para produzir acabamentos dentro de tolerâncias dimensionais e de rugosidade pré-estabelecidas para os anéis internos e externos dos rolamentos (NUSSBAUM, 1988). O rebolo em movimento interage com os anéis, removendo material de sua superfície, de acordo com a força de retífica empregada. “O nível da força determina o quão rápido as taxas de remoção de material serão, qual será a rugosidade superficial resultante e se a peça será metalurgicamente danificada ou não” (HELLMEISTER, 2004). O nível da força de retificação na usinagem de anéis de rolamentos é influenciado pelos seguintes fatores: propriedades mecânicas dos anéis, área de contato entre o rebolo e os anéis, e a velocidade ou taxa de avanço do eixo do rebolo (HEKMAN; LIANG, 1999 *apud* KHENAIFES, 2006).

Com relação à rugosidade final da usinagem, a retificação pode ser classificada como: de “desbaste” ou de “precisão”; de acordo com a forma de interação da máquina com o material, ela pode ser: interna, externa, de mergulho, *centerless*; pode utilizar rebolos com abrasivos convencionais ou especiais, também denominados de superabrasivos. As figuras 2.14 e 2.15 ilustram, respectivamente, as operações de retificação cilíndrica externa de mergulho e plana, com alguns de seus parâmetros.

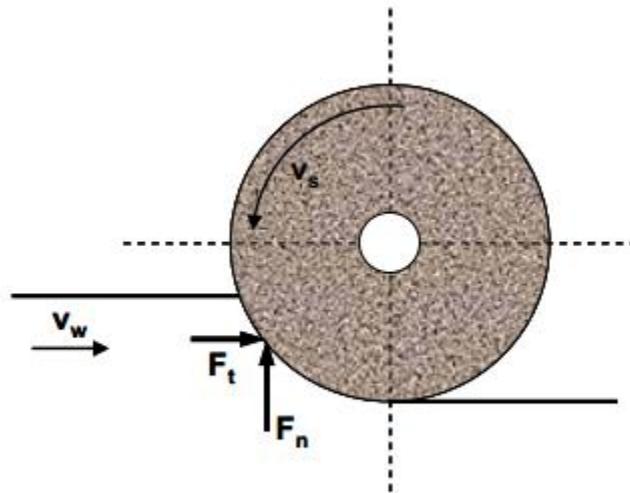


Figura 2.14 – Retificação plana (MALKIN, 1989 apud SCHÜHLI, 2007)

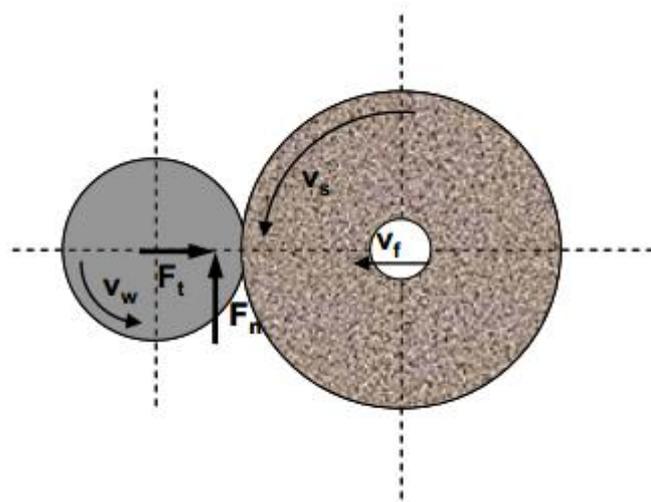


Figura 2.15 – Retificação cilíndrica externa (MALKIN, 1989 apud SCHÜHLI, 2007)

Durante o processo de retificação, algumas forças são desenvolvidas no contato rebolo-peça. Nos dois exemplos que foram apresentados, isto é, na retificação cilíndrica externa e na retificação plana (figura 2.14 e figura 2.15), a força total resultante pode ser

decomposta em uma componente de força tangencial (F_t) e uma componente de força normal (F_n). A força tangencial tem especial importância dentro do processo de retificação, pois possui uma relação direta com a potência de retificação, de acordo com a expressão (MALKIN, 1989):

$$P = F_t (V_s \pm V_w) \quad (6)$$

Onde:

P é potência de retificação

V_s é a velocidade do rebolo e

V_w é a velocidade da peça

O sinal de “+” na equação é utilizado para retificação discordante, ou seja, V_s e V_w têm direções opostas na região de corte. O sinal de “-” é utilizado para retificação concordante, onde as velocidades têm mesma direção.

O último parâmetro, ainda não comentado, é a velocidade de mergulho V_f , presente na retificação cilíndrica. A velocidade de mergulho também tem relação direta com potência de retificação, pois interfere diretamente na força tangencial F_t , durante a interação rebolo-peça.

A potência de retificação exerce influência sobre o desgaste do rebolo, acabamento superficial e queima da peça, vibrações da máquina, aumento de temperatura com possibilidade de danos térmicos, entre outros (MALKIN, 1989). Todos estes parâmetros são consideráveis durante o desenvolvimento e aplicação dos sistemas de monitoramento de diversos processos de usinagem.

2.4 A emissão acústica no processo de retificação

2.4.1 Definição

Segundo 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). Para que a emissão acústica possa ser medida de forma contínua é necessário que este estado de tensões seja variável ao longo do tempo. Se não houvesse nenhuma mudança no estado, novas ondas de tensão não seriam geradas e não seria possível a medição contínua do sinal (SILVA, 2010).

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, conforme a figura 2.16 (KARPUSCHEWISKI, 2001 *apud* SCHÜHLI, 2007).

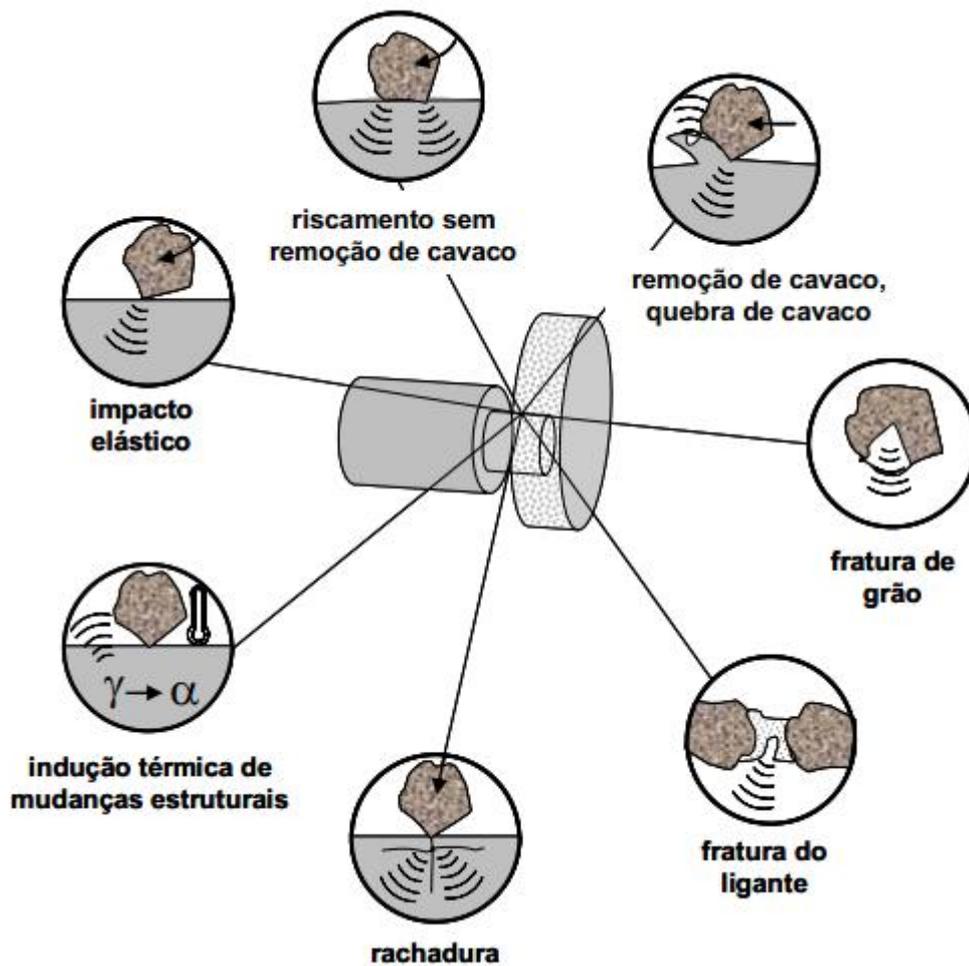


Figura 2.16 – Fontes de emissão acústica em retificação (KARPUSCHEWISKI, 2001 apud SCHÜHLI, 2007)

Os sinais de EA são captados por transdutores de aceleração baseados no efeito piezoelétrico (WEBSTER *et al*, 1994), já comentado na *seção 2.2.2.1*. Comumente, esses transdutores são denominados, simplesmente, de sensores de EA (FELIPE JR., 1996; XUE, 2002; SCHÜHLI, 2007).

Segundo Karpuschewiski (2001) *apud* Schühli (2007), diferentes tipos de avaliação podem ser aplicados à saída do sensor de emissão acústica (EA), sendo as avaliações mais importantes: o valor da raiz quadrática média (RMS), sinais de EA brutos (não tratados) e análise da frequência.

Jemielniak (2001), em seu trabalho sobre pré-processamento de sinais de EA, obteve o sinal de RMS a partir do tratamento do sinal bruto de emissão acústica captados pelo sensor. Ambos os sinais, bruto e RMS de EA, podem ser verificados na figura 2.17.

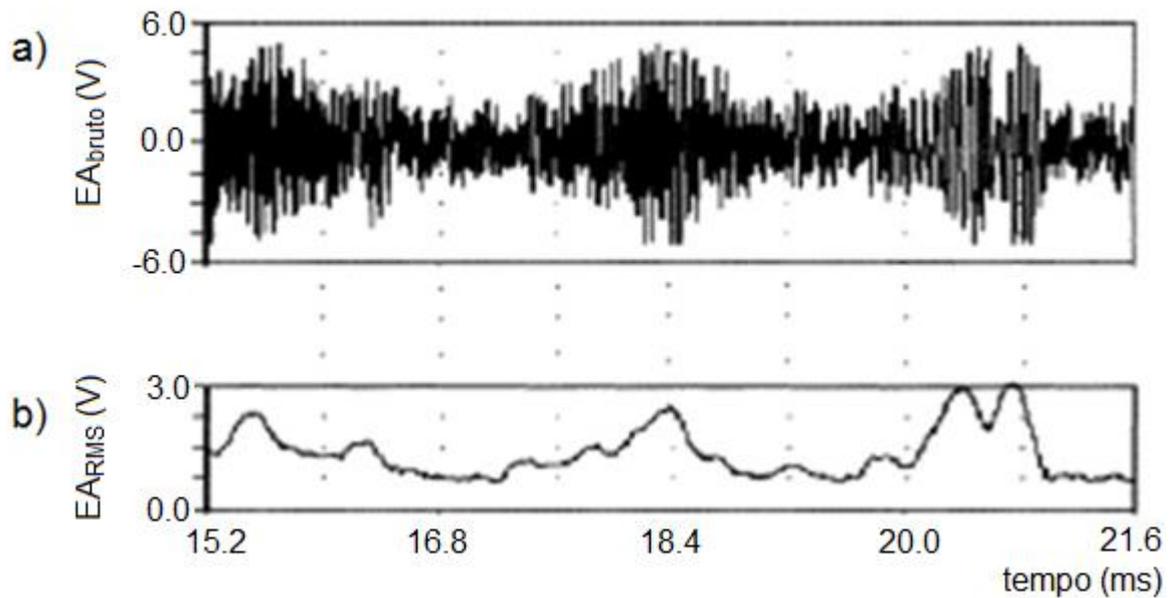


Figura 2.17 – Exemplo de sinal de EA bruto e sinal de EA_{RMS} obtidos experimentalmente (modificado de JEMIELNIAK, 2001)

A partir do sinal EA bruto é possível extrair informações relacionadas com a formação e propagação de trincas pelo material, bem como a impactos ou embaraçamento do cavaco, ou ainda, se o processo de retificação causou deformações plásticas em materiais dúcteis (INASAKI, 1998).

Entretanto, o sinal bruto de emissão acústica caracteriza-se por abranger diferentes frequências, em diversos níveis e de difícil interpretação. Segundo Weingaertner *et al* (2011), a utilização do valor médio quadrático (RMS, do inglês *root mean square*) dos sinais de EA é uma das técnicas mais empregadas para se extrair informações úteis dos sinais de EA. O sinal de EA_{RMS} representa uma medida da intensidade do sinal de EA e depende da quantidade e da dispersão da tensão no material (MEYEN, 1991 *apud* WEINGAERTNER *et al*, 2011). A definição do sinal de EA_{RMS} é dada por (HWANG *et al*, 2000):

$$EA_{RMS} = \left[\frac{1}{\Delta T} \int_0^{\Delta T} V^2(t) dt \right]^{1/2} \quad (7)$$

Onde:

V = sinal bruto de EA e

ΔT = constante de integração no tempo do sinal de bruto de EA

2.4.2 Sistemas de monitoramento

Os sistemas de monitoramento de processo têm papel fundamental na otimização e controle dos processos industriais. Em máquinas retificadoras, os sistemas de monitoramento possibilitam uma melhoria na confiabilidade nas 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”. As informações captadas durante o processo são enviadas ao sistema de controle, interagindo para um melhor desempenho do processo de retificação. Segundo Felipe Jr. (1996), é uma dependência cada vez menor do elemento humano para as tomadas de decisões sobre o processo, que o autor intitulou de Retificação Inteligente (RI). A figura 2.18 mostra a evolução da automação nos processos de retificação, apresentando as mudanças nas relações entre os subsistemas humano (H), Controle CNC (C) e máquina (M).

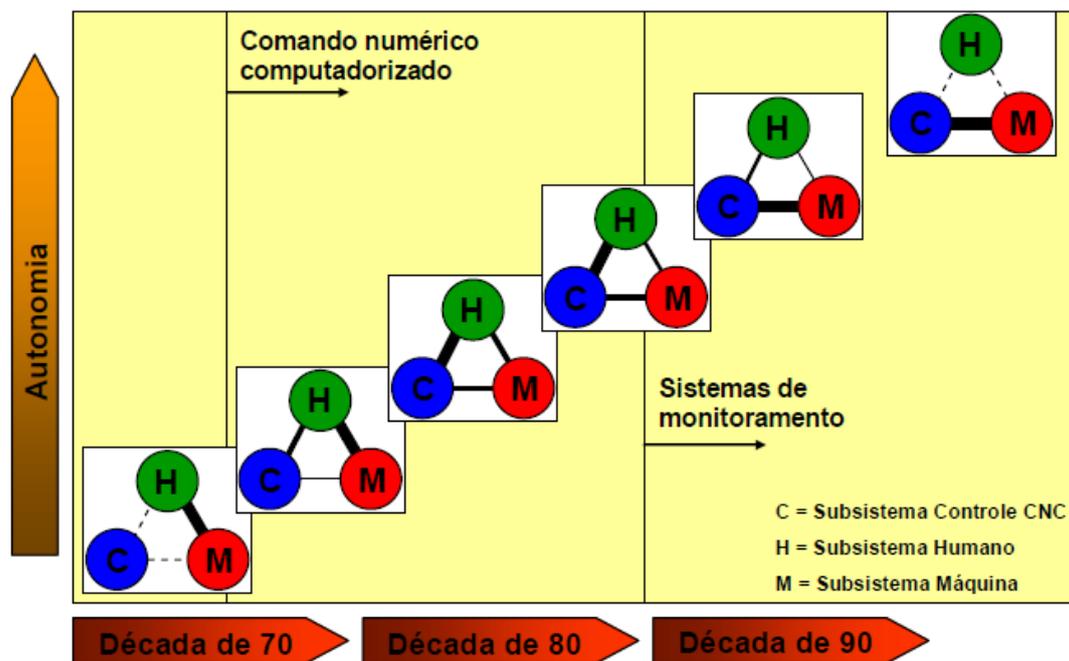


Figura 2.18 – Evolução da automação na retificação (OLIVEIRA, 1995 *apud* SCHÜHLI, 2007)

Pela figura, observa-se que a relação homem/máquina, que era direta antes do Comando Numérico Computadorizado (CNC), começou a diminuir na medida em que a relação controle/máquina se intensificou, com o advento do CNC. O objetivo dos sistemas de

monitoramento é fortalecer cada vez mais a relação entre o controle e a máquina, com mínima participação do elemento humano para as tomadas de decisões (FELIPE JR., 1996).

2.4.3 Monitoramento de processo através de EA

De acordo com Dotto (2004) e Souza (2009), entre outros, o monitoramento de ciclo de retificação através de sinais de Emissão Acústica (EA) é um dos mais estudados nos últimos anos. O monitoramento da retificação por EA possui a vantagem de não interferir no processo, uma vez que o sistema capta os sinais de EA gerados na retificação através de um sensor fixado em algum ponto na estrutura da máquina. Além disso, com o uso de um único sensor pode-se monitorar diversos fenômenos ocorridos durante a retificação, tais como: detecção de contato (*gap less*), detecção de falhas (ocasionadas por sobremetal insuficiente), calibração de rebole e colisão.

Segundo Felipe Jr. (1996), através do sinal de EA é possível detectar se todas as fases do processo estão sendo realizadas sem falhas. Pela figura 2.19, 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.

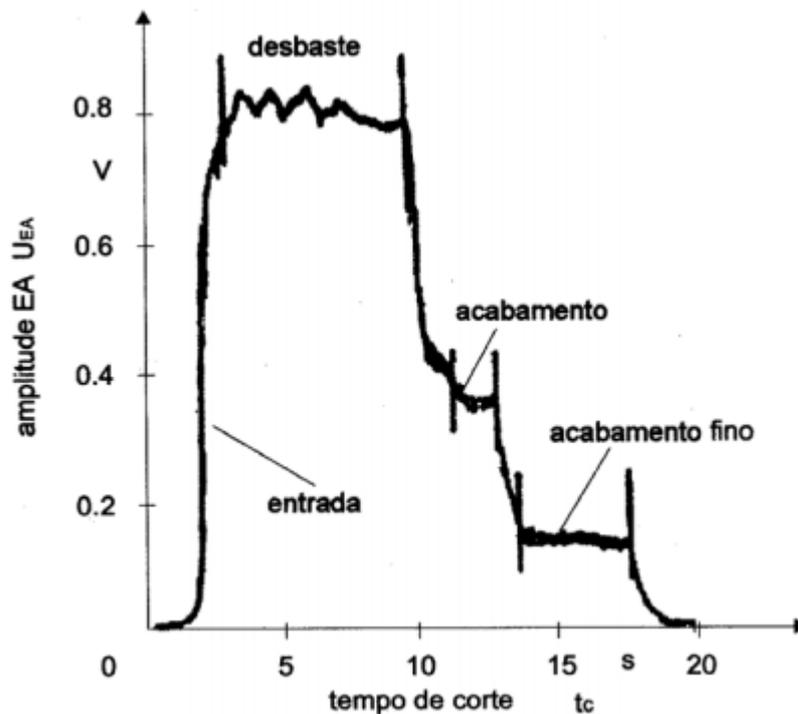


Figura 2.19 – Sinal de EA em um processo de retificação cilíndrica (Konig; Meyen, 1990, modificada por Felipe Jr., 1996)

Em seu trabalho sobre Retificação Inteligente (RI), Felipe Jr. (1996) apresentou o uso de sinais de emissão acústica em diversas fases do processo de retificação como alternativa de otimização de tempo de ciclo, racionalização do rebolo abrasivo utilizado no processo, melhoria da qualidade das peças acabadas, aumento de vida útil do rebolo e aumento de produtividade da máquina. Conforme estudos, o uso do sensor de EA se mostrou eficaz na detecção de contato entre rebolo e a peça (também chamado de *gap less*), no controle da potência de retificação desenvolvida pelo *spindle* ou fuso de retífica e no controle de dressagem do rebolo, através da eliminação das imperfeições com o mínimo de material removido. O mesmo é afirmado por Soares e Oliveira (2002), ao referirem-se sobre a técnica de funções de RI com emissão acústica. Dressagem, segundo Xue *et al* (2002), é o processo de condicionamento da superfície do rebolo, a fim de devolver-lhe o poder de corte que fora perdido pelo desgaste, durante o processo de retificação.

Aguiar (1997) demonstrou que os sinais RMS de EA e o sinal de potência de corte combinados podem fornecer parâmetros importantes sobre queima superficial da peça em retificação plana. Baseado nisso, Dotto (2004) desenvolveu um sistema dedicado capaz de detectar a queima superficial no processo de retificação tangencial plana utilizando, para isto, os sinais de EA e potência elétrica do motor de acionamento do rebolo. Utilizou o sinal RMS de EA extraído do sinal puro, captado pelo sensor, através de um algoritmo computacional.

Da mesma forma, Khenafes (2006) utilizou sinais de EA e potência elétrica de acionamento do rebolo, no monitoramento da queima do aço 1020 em retificadora plana tangencial. Servindo-se da eficácia do sistema de monitoramento, estudou aplicabilidade de ferramentas estatísticas que pudessem auxiliar no monitoramento da queima, de forma a quantificar e qualificar a qualidade do produto ou, de outra forma, o dano da queima.

Oliveira *et al* (2000) realizaram um trabalho através do qual se pôde monitorar o rebolo durante o processo de dressagem. Utilizando um software computacional, os autores construíram uma metodologia capaz de gerar a imagem do rebolo, a fim de avaliar sua *performance*. O sistema de monitoramento utilizado trabalhou com sinais RMS de emissão acústica.

O sinal puro (ou bruto, como denominam alguns autores) de EA também tem sido explorado como recurso usado no monitoramento de processos de usinagem. Segundo

Pensanato *et al* (2002) *apud* Dotto (2004), o sinal puro de emissão acústica apresenta maior flexibilidade de análises no monitoramento, pois possui muitas informações geradas durante o processo, que normalmente são desprezadas na análise do sinal EA_{RMS} .

Hellmeister (2004) utilizou como base o para monitoramento da dressagem em retificação plana o sinal puro de emissão acústica. Confeccionou um programa de aquisição de dados que amostrou os sinais de EA a uma taxa de 2,5 milhões de amostras por segundo. A técnica mostrou-se eficiente no monitoramento, uma vez que uma qualidade constante foi obtida em toda superfície do rebolo.

Souza (2009) utilizou parâmetros que utilizam o sinal de RMS de emissão acústica e de potência de corte em uma retífica tangencial plana de forma a reduzir o tempo da operação de dressagem e também evitar a remoção em excesso do material do rebolo. Seu trabalho se embasa em uma série de experimentos realizados por Xue *et al* (2002), onde estes autores confirmaram a eficiência do sensor de emissão acústica na monitoração da dressagem tanto quanto para o processo de retificação.

Schühli (2007) desenvolveu um trabalho de monitoramento de operações de retificação utilizando *fusão de sensores*. A fusão é realizada entre os sinais de potência e emissão acústica para a obtenção do parâmetro FAP – *Fast Abrasive Power* desenvolvido por Valente (2003). Os resultados foram superiores aos comparados com o de potência e emissão acústica separados (FACELI, 2001 *apud* SCHÜHLI, 2007). No presente trabalho, porém, a técnica de fusão de sensores não é explorada, uma vez que as altas velocidades relativas entre rebolo e a peça garantem uma fonte significativa de EA, e variação da potência elétrica do motor de acionamento do rebolo é pequena durante o processo de retificação.

Trabalhos desenvolvidos com sistemas de monitoramento de ciclo de máquina através de sinais de emissão acústica também podem trazer ganhos em linhas de produção industrial, conforme afirmado por Azevedo e Sousa (2012). Em seu trabalho, os autores relatam as melhorias realizadas no sistema de movimentação dos barramentos de retífica e dressagem de uma retificadora cilíndrica de mergulho, unidas à implementação de um ajuste automático de ganho no sistema de monitoramento por EA, durante o processo de retificação. O ajuste automático consistiu em adequar as velocidades de avanço dos barramentos (avanço de corte) em função do nível de emissão acústica gerado durante o processo. Esta técnica, além de

substituir o ajuste manual efetuado pelos operadores de produção, eliminou o problema de baixa produtividade ocasionado por ajustes inadequados de ganho na unidade de controle do sistema de monitoramento (AZEVEDO; SOUSA, 2012).

Estes trabalhos, entre outros muitos, atestam a eficiência do sistema de monitoramento baseado em emissão acústica. Embora a maior parte destes trabalhos tenha um caráter experimental, o uso da técnica pode, conforme demonstrado, ser igualmente utilizada para se obter ganhos em ambiente industrial.

2.5 Eletrônica de controle de pulsos para o servoacionamento

Nesta seção serão apresentados alguns conceitos básicos de eletrônica digital, focalizando os circuitos integrados (CI's) que compõem a etapa final de *hardware* do sistema de controle dos barramentos da máquina retificadora. O entendimento sobre o funcionamento destes componentes ajudará na compreensão da integração entre o CLP de controle da máquina e o servossistema sugerido para a nova automação.

2.5.1 Introdução

A eletrônica está presente no cotidiano do homem moderno. Máquinas e equipamentos industriais, eletrodomésticos, equipamentos médico-hospitalares, transporte e comunicação das mais variadas formas, enfim, em todos estes setores existem circuitos eletrônicos. A automação de diversos processos em todas estas áreas foi, segundo Ribeiro (2001), grandemente impulsionada pelo desenvolvimento obtido com automação eletrônica.

Dentre os componentes eletrônicos presentes nestes circuitos destacam-se os circuitos integrados (CI's). Os CI's são formados por pastilhas muito pequenas de material semicondutor, de forma que grandes circuitos, isto é, circuitos formados por muitos componentes, possam ser incluídos dentro de um único componente. A figura 2.20 ilustra um circuito integrado comercial.

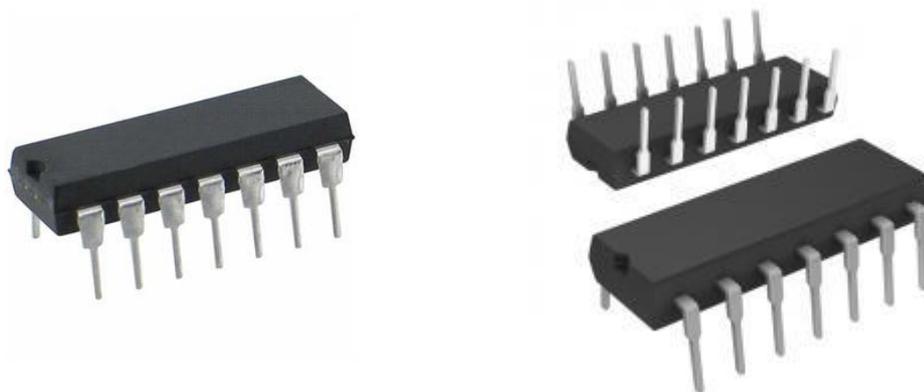


Figura 2.20 – Circuito integrado de 14 pinos (Disponível em: <http://www.castroelectronica.pt> acesso: 19/08/2012)

O desenvolvimento desta tecnologia tornou possível a confecção de CI's padronizados. No campo da eletrônica digital, estes componentes podem ser distinguidos, basicamente, em duas “famílias” principais: os CI's com tecnologia TTL (do inglês *transistor-transistor logic*) e os de tecnologia CMOS (do inglês *complementary metal-oxide-semiconductor*). A tensão elétrica de alimentação dos componentes TTL é $5V_{cc}$, com tolerância de 5%, ou seja, de $4,75V_{cc}$ até $5,25V_{cc}$. Os componentes CMOS são capazes de operar com tensões de $3V_{cc}$ a $15V_{cc}$.

Os componentes eletrônicos de sistemas digitais possuem dois níveis de operação: o *nível 1*, que representa a presença de sinal, e o *nível 0*, que representa a falta dele. Entretanto, para que um sinal seja reconhecido como nível 1 ou nível 0, seu valor analógico deve respeitar alguns limites, que são padrões para todos os componentes da família.

Os limites para identificação dos níveis de sinais dos componentes produzidos com tecnologia TTL são ilustrados na figura 2.21.

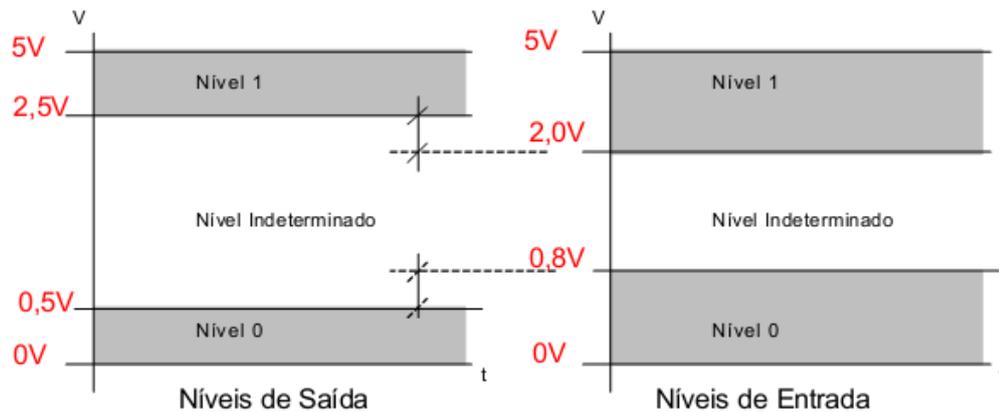


Figura 2.21 – Níveis de entrada e saída para reconhecimento dos sinais pelos componentes da família TTL (Disponível em <http://www.pessoal.utfpr.edu.br/bertoldo/Downloads/FamiliasDig.PDF> acesso: 19/08/2012)

Nota-se que os sinais de entrada compreendidos entre 0,8V e 2,0V são considerados sinais de nível indeterminado. O mesmo observa-se com os sinais entre 0,5V e 2,5V na saída do CI. Para seu correto funcionamento, sinais classificados como sendo de nível indeterminado devem ser evitados.

2.5.2 As portas do tipo Schmitt Trigger

“O circuito tipo *Schmitt Trigger* tem uma interessante e útil característica: a histerese” (FREGNI; SARAIVA, 1995). Segundo os autores, o Schmitt trigger, ou disparador schmitt, é utilizado em duas situações típicas: a primeira ocorre quando os sinais de entrada variam muito lentamente, passando pela região proibida (entre 0,8volts e 2,0volts para a família TTL, e nos 40% centrais da faixa de alimentação na família CMOS), por um tempo não desprezível, e podendo levar a oscilações na saída, ou a estados espúrios. A segunda situação ocorre quando se processa sinais ruidosos, dos quais a amplitude oscila dentro da região proibida, provocando nas portas lógicas convencionais igualmente oscilações na saída. Uma comparação de circuitos lógicos convencionais com o Schmitt trigger é ilustrada na figura 2.22.

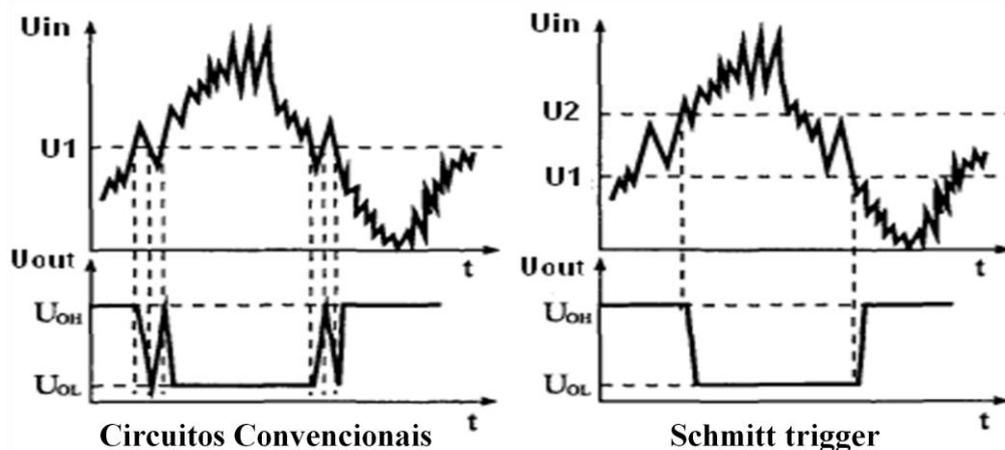


Figura 2.22 – Comparação do funcionamento de circuitos lógicos convencionais com o Schmitt trigger (modificado de <http://www2.eletronica.org/hack-s-dicas/schmitt-trigger-x-inversor-tradicional/> acesso: 06/05/2012)

Analisando os gráficos da figura, nota-se que existem dois pontos distintos (U_1 e U_2) para avaliação do sinal de entrada U_{in} e comutação do nível alto para o nível baixo, e vice-versa, na saída (U_{out}) do Schmitt trigger. Esta propriedade é denominada *histerese* do Schmitt trigger. “A histerese é desejável em um Schmitt trigger porque ela evita que ruídos provoquem disparos falsos [...]” (MALVINO, 1995). Os outros parâmetros presentes nas figuras são: U_{OH} – tensão de saída de nível alto e U_{OL} – tensão de saída de nível baixo. Estes são os níveis distintos para operação na saída do componente. A característica de histerese do circuito disparador Schmitt é apresentada na figura 2.23.

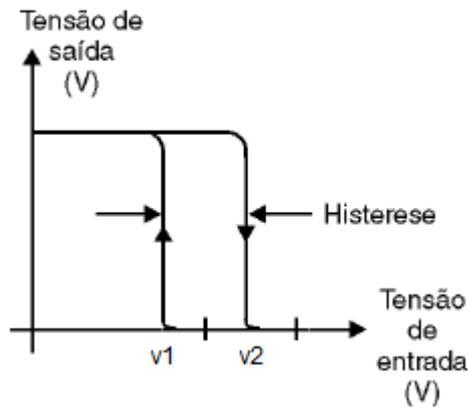


Figura 2.23 – Característica de histerese do circuito disparador Schmitt (modificado de <http://sabereletrico.com/leituraartigos.asp?valor=51> acesso: 15/02/2013)

Pela figura, observa-se que a transição do sinal de saída, do nível alto para o nível baixo e vice-versa, ocorre em níveis de tensões de entrada diferentes, representados por v_1 e v_2 .

Para concluir, a figura 2.24 mostra a simbologia padronizada do circuito integrado 7414, que contém seis portas lógicas com Schmitt trigger.

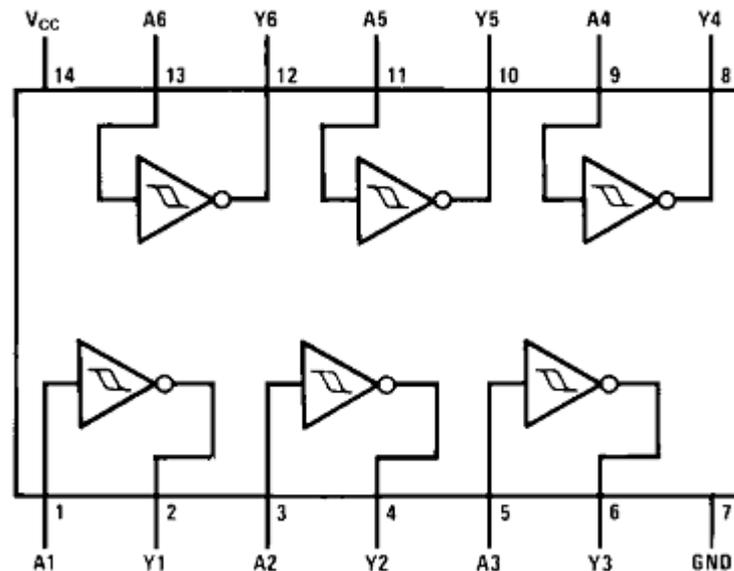


Figura 2.24 – Diagrama esquemático do circuito integrado 7414, disponível comercialmente (Fonte: www.alldatasheet.com)

3. MATERIAIS E MÉTODOS

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

3.1 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 3.1 mostra em detalhe o rebolo, os anéis internos do rolamento, o sentido de giro do rebolo e o sentido de movimento do barramento durante a retificação, que leva o rebolo contra o anel que está posicionado no cabeçote.

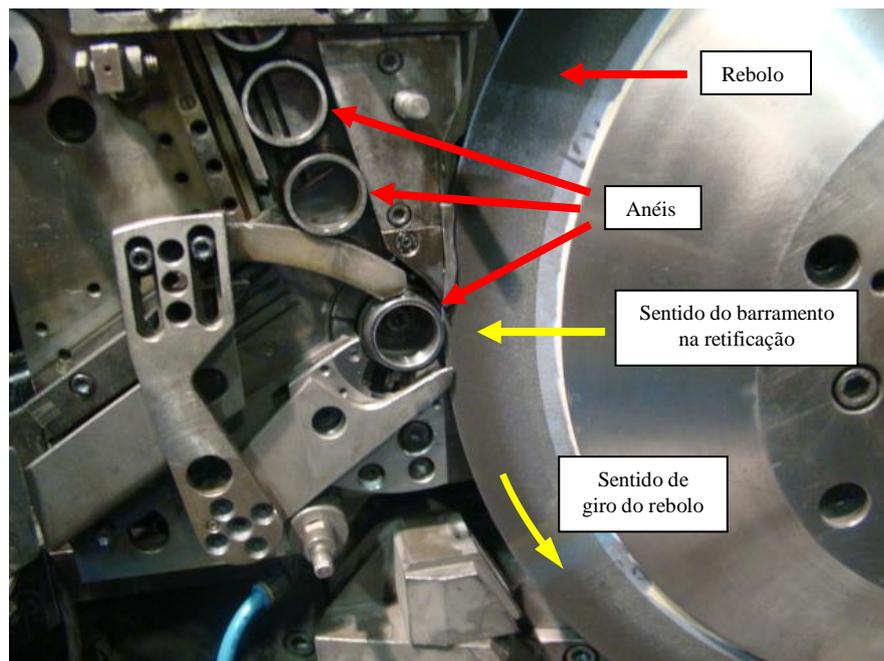


Figura 3.1 – Detalhe do rebolo e anéis na retificadora cilíndrica de mergulho

A operação realizada por esta retífica cilíndrica de mergulho é retificar a pista e a borda dos anéis internos do rolamento. A *Pista* é local por onde se deslocam os elementos rolantes no interior do rolamento, que neste caso são rolos cônicos. É o lugar de menor rugosidade superficial do componente. A *borda* serve de apoio para os rolos, dentro do rolamento. A ilustração a seguir (figura 3.2) apresenta o anel interno do rolamento, identificando os locais usinados pela máquina retificadora.

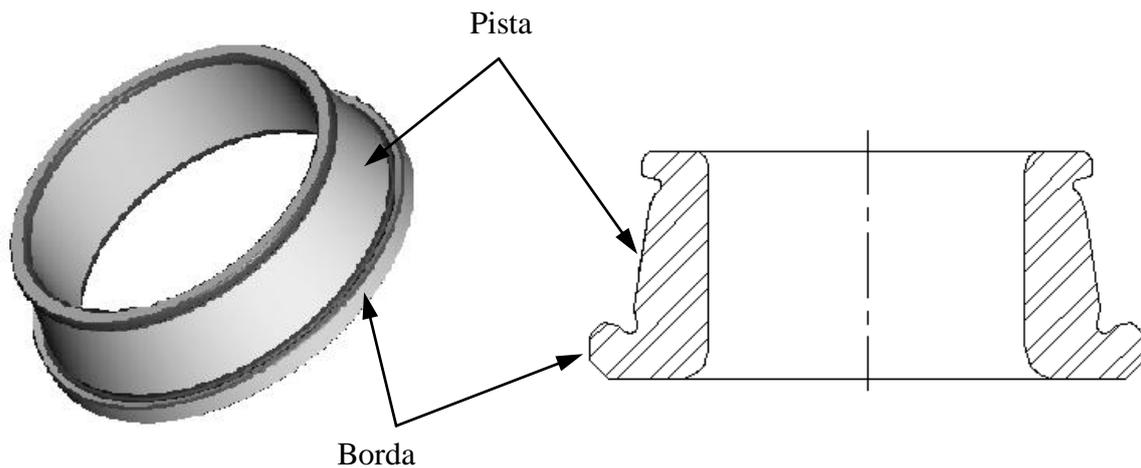


Figura 3.2 – Detalhe da pista e borda do anel interno do rolamento

A figura 3.3 apresenta, respectivamente, um anel interno bruto (a) e um anel interno com pista e borda retificados (b).



Figura 3.3 – a) Anel interno bruto e b) Anel interno com pista e borda retificados

Originalmente, os barramentos de retífica e dressagem eram movidos por motores de passo modelo SLO SYN 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 micrón) para cada passo dos motores. Conforme dados de catálogo da máquina retificadora, a velocidade máxima de rotação dos motores de passo acoplados à unidade mecânica de avanço é de 600 passos/segundo, o que produz um avanço linear de $600\mu\text{m}/\text{segundo}$ nos barramentos.

3.2 CLP da máquina retificadora

O controle da máquina retificadora é realizado por um CLP dedicado desenvolvido na década de 1980, denominado 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. A figura 3.4 apresenta o gabinete (rack) do MTC com as placas eletrônicas que compõem o sistema de controle.



Figura 3.4 – Gabinete (rack) do MTC com as placas eletrônicas que compõem o sistema de controle

3.3 Linguagem de programação

A linguagem de programação do CLP da máquina retificadora é denominada “linguagem MTC”. Considerando que este CLP foi desenvolvido na década de 1980, e de acordo com a síntese de linguagens de programação apresentada por Bega (2006), a linguagem MTC pode ser classificada como uma linguagem de alto nível de programação, onde não é necessário ao programador um profundo conhecimento sobre funcionamento do processador e suas funções de comando. O sistema eletrônico dispõe de um compilador que converte o programa MTC em linguagem de máquina, isto é, em códigos hexadecimais, para ser processado pelo CLP. Os códigos hexadecimais são gravados em memórias do tipo EPROM modelo 27128. A EPROM 27128 é uma memória com capacidade para armazenar 128K bits, ou 16K bytes.

As instruções lógicas dentro do programa são escritas utilizando-se caracteres previamente conhecidos pelo compilador, para realização de funções lógicas comuns a outros tipos de CLP's, como *lógica AND* (E) e *lógica OR* (OU), por exemplo. Comandos referentes à movimentação dos barramentos também utilizam mnemônicos específicos. As demais variáveis presentes no programa devem ser escritas em uma tabela de declarações de hardware e de software, para serem reconhecidas pelo compilador no momento da conversão do programa MTC para linguagem de máquina. Um exemplo de programação em linguagem MTC é mostrado na figura 3.5.

Condições	Processo	Comentário
1 1T0 & SQ1 & SQ2 & SQ3 # \SQ4 & \SQ5 & SQ6	1T1	Próximo passo
1T1	YV1	Aciona cilindro 1
2 1T1 & SM1 & SQ3 & L100 & (\SP4 # SP5)	1T2	Próximo passo
1T2	YV2	Aciona cilindro 2

Figura 3.5 – Exemplo de programação em linguagem MTC

No exemplo acima existem dois grupos de condições lógicas distintas, indicadas com ① e ②, que executam duas outras operações no processo. Nota-se que o programa é estruturado nas seções: *Condições*, *Processo* e *Comentário*. Em *Condições* estão as variáveis de entrada do processo, que compõem os conjuntos de instruções lógicas. Em *Processo* estão os atuadores da máquina, ou as operações esperadas quando todas as condições relacionadas ao referido processo forem verdadeiras. A seção *Comentário* não é interpretada pelo CLP. Ela é utilizada para se inserir informações sobre o que está sendo realizado naquela linha de instrução lógica, com a execução do processo. Isto auxilia na leitura da programação e torna o programa autodocumentável. A seguir, uma breve descrição das variáveis:

- SQ1, SQ2, SQ3, SQ4, SQ5 e SQ6 são sensores de proximidade indutivos;
- SM1 é uma chave de seleção;
- SP4 e SP5 são pressostatos.
- L100 é um *flag* lógico (bandeira), ou uma memória de 1 bit;
- YV1 e YV2 são válvulas pneumáticas ou hidráulicas.
- ITxx é a sequência de passos para a execução do ciclo. Um programa MTC pode ter diversas sequências de passos. A sucessão de ações efetuadas pelo controlador MTC é definida pela evolução dos passos dentro da sequência. *IT1*, por exemplo, significa: sequência de passo 1, passo 1. *IT2*: sequência de passo 1, passo 2, e assim por diante.

Os operandos lógicos apresentados são:

& ⇒ operando para lógica *AND* (E);

⇒ operando para lógica *OR* (OU);

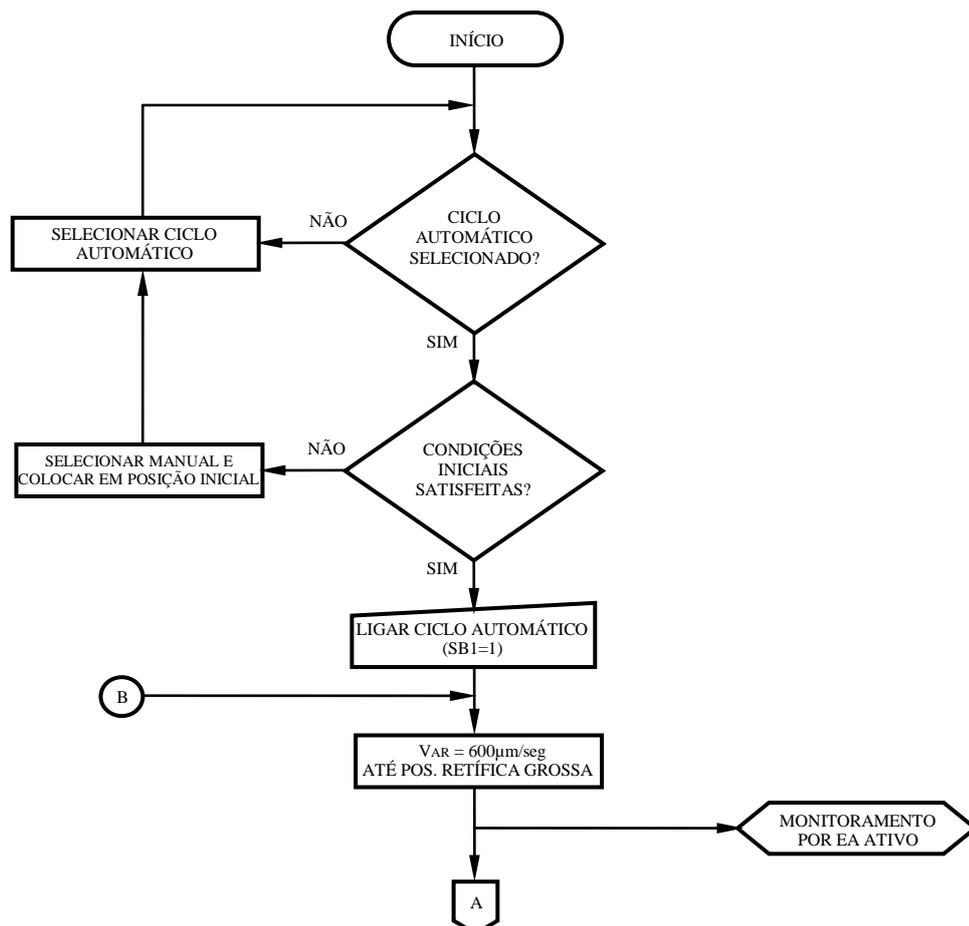
\ ⇒ operando para lógica *NOT* (NÃO, ou negação da variável)

O sistema MTC é um sistema dirigido por eventos. Isto significa que as condições lógicas em um programa MTC são analisadas somente depois de detectada a alteração de algum estado, como a alteração de um sensor de “OFF” para “ON”. Esta é uma diferença importante quando comparado com outros CLP’s, nos quais o programa de aplicação é varrido continuamente. A vantagem de não executar a varredura continuamente em um programa está no tempo de resposta. Quando um sensor indica uma mudança de estado no

MTC a ação é executada imediatamente, executando uma varredura no programa do MTC, enquanto que em um CLP de varredura contínua, a mudança de estado do sensor pode ocorrer no meio de um ciclo de varredura, e somente será processado quando for iniciado o próximo ciclo de varredura.

3.4 Ciclo de operação da máquina

Durante o processo de retificação, o sistema MTC executa diferentes ciclos com funções específicas, para comandar toda a automação da máquina. Como exemplo, pode-se mencionar: ciclo automático de retificação, ciclo automático de dressagem do rebolo, ciclo de rebolo gasto, entre outros. O sistema de monitoramento por emissão acústica está inserido no ciclo automático de retificação, operando ao mesmo tempo em que o rebolo efetua o desbaste sobre os anéis. A figura 3.6, a seguir, apresenta um fluxograma simplificado apenas do ciclo automático de retificação, indicando os momentos do ciclo em que o monitoramento por EA está ativo.



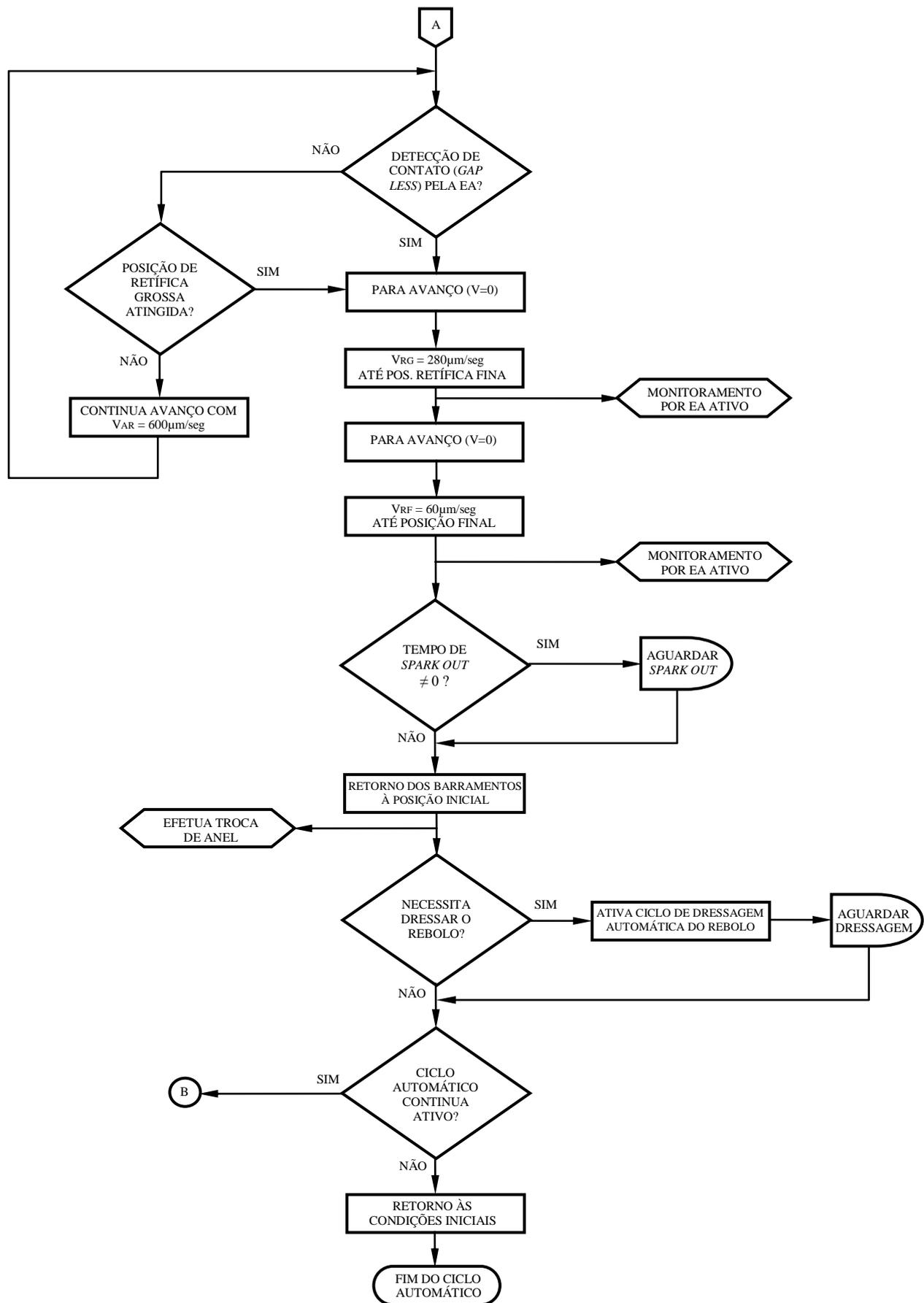


Figura 3.6 – Fluxograma de operação da máquina durante o ciclo automático de retificação

Para que o ciclo automático de retificação seja iniciado, o CLP da máquina verifica se algumas “condições iniciais” estão satisfeitas. Estas condições representam informações com as quais o CLP, a partir do programa de controle, habilita com segurança a partida de um ciclo automático de retificação. Algumas destas verificações são:

- Se os barramentos estão recuados (fora da posição de retífica);
- Se as pressões hidráulicas e pneumáticas estão corretas;
- Se os motores do fuso de retificação e do cabeçote de rotação dos anéis estão ligados;
- Se existem anéis no magazine, para serem retificados;
- Se as carenagens de proteção estão fechadas;
- Se a pressão de refrigeração de retífica está correta;
- Se a esteira de saída não está cheia de anéis (isto indica que alguma máquina do processo posterior não está operando);

Entre outras.

Quando todas as condições iniciais estão satisfeitas, o CLP habilita o ciclo automático de retificação. O ciclo é iniciado quando uma chave seletora “manual / automático” estiver na posição “automático”, e o operador der o comando de partida, através do botão SB1 (ver no fluxograma, SB1 = 1).

Iniciado o ciclo, o CLP envia ao sistema numérico de controle dos barramentos os comandos de habilitação dos motores de passo, posição desejada e velocidade. A partir deste momento, o monitoramento por emissão acústica é ativado, para detectar o fim da retífica “no ar” (*gap less*), isto é, o tempo em que o barramento de retificação está em deslocamento sem tocar no anel. O tempo de retífica no ar representa um tempo não produtivo dentro do ciclo de retificação. Por isso, o sistema de monitoramento deve ser tão eficiente de forma a proporcionar o máximo deslocamento do barramento até atingir a peça, sem, contudo, iniciar a retífica. Quando o rebole tocar a peça após o *gap less*, o sistema numérico para o avanço e envia novos comandos de posição e velocidade, desta vez para executar a retífica de desbaste, ou retífica grossa do anel. Se o monitoramento por EA não receber o sinal de que o rebole tocou no anel, o sistema numérico para o avanço na “posição de retífica grossa” (ver no fluxograma da figura 3.6) e envia os comandos para iniciar a retífica de desbaste. Esta posição funciona, então, como uma segurança contra colisão do rebole com a máquina, evitando o choque mecânico com alta velocidade de deslocamento dos barramentos.

A ação do sistema de monitoramento durante a retífica de desbaste é informar ao sistema numérico de controle dos barramentos o nível de força de retífica empregada durante a usinagem das peças, através dos sinais de EA emitidos pelo contato do rebolo com o anel. O sistema numérico, por sua vez, exerce influência sobre o valor de velocidade de mergulho dos barramentos estipulado pelo CLP, de modo a variar a velocidade de acordo com o nível do sinal de EA recebido. Isto significa que, se a velocidade de retífica de desbaste estiver *setada* para 280µm/segundo, por exemplo, o sistema numérico acionará os motores com esta velocidade até certo limite de esforço estipulado pelo sistema de monitoramento. A partir de então, o movimento realizar-se-á em porcentagens da velocidade de 280µm/segundo, de maneira que quanto maior o nível de EA registrado, menor a velocidade de mergulho.

O funcionamento do ciclo de retificação e do monitoramento por EA durante a retífica de acabamento, ou retífica fina dos anéis, é similar ao da retífica de desbaste, mencionado acima. Como a velocidade de mergulho diminui durante a retífica fina, o sistema de monitoramento possui outro parâmetro para adaptação da potência de retificação (força de retífica) de acordo com os níveis de EA gerados nesta fase do processo.

Ao atingir a posição final de retífica indicada pelo CLP, cessa o avanço dos barramentos. O sistema aguarda o tempo de centelhamento¹ (*spark out*) e depois retorna para a posição inicial. Neste intervalo, a máquina efetua a troca do anel retificado por um que está em espera no magazine de entrada. Finaliza o ciclo automático de retificação.

¹ Centelhamento em sentido denotativo significa “faiscamento”, que é o fenômeno que ocorre enquanto um abrasivo está em contato com uma peça metálica, na usinagem. No processo de retificação, o “tempo de centelhamento” ou *spark out* significa o período em que cessam os avanços do rebolo, porém com remoção de material da peça devido à deformação elástica surgida no sistema máquina-peça-rebolo. Em outras palavras, o tempo de centelhamento reduz o atraso do avanço real em relação ao avanço teórico do rebolo, eliminando gradualmente as deformações e o atraso do sistema, causado pela deformação elástica, até atingir as dimensões desejadas.

3.5 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. As figuras 3.7 e 3.8 apresentam parte do esquema elétrico da placa de controle, indicando estes componentes.

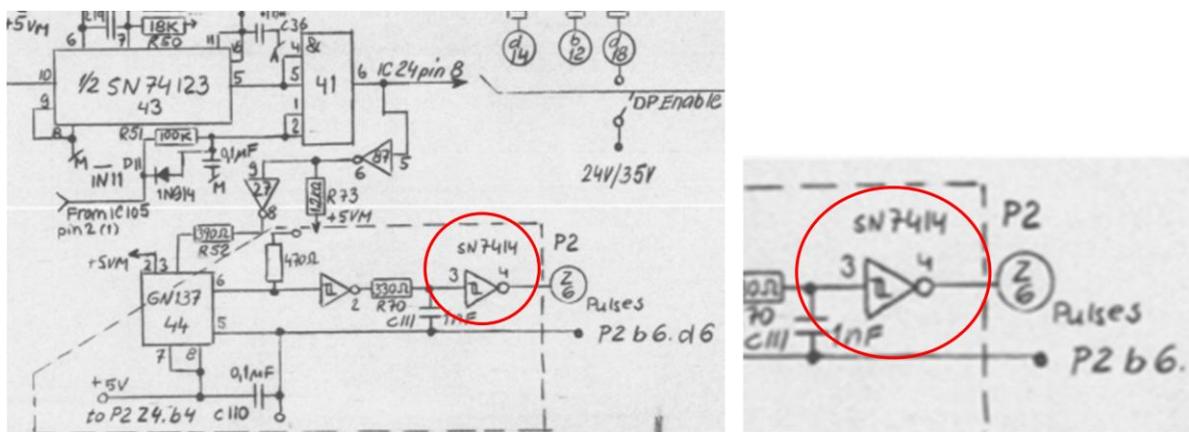


Figura 3.7 – Parte do esquema elétrico da placa de controle dos motores de passo. Em detalhe o CI de saída dos pulsos, 7414

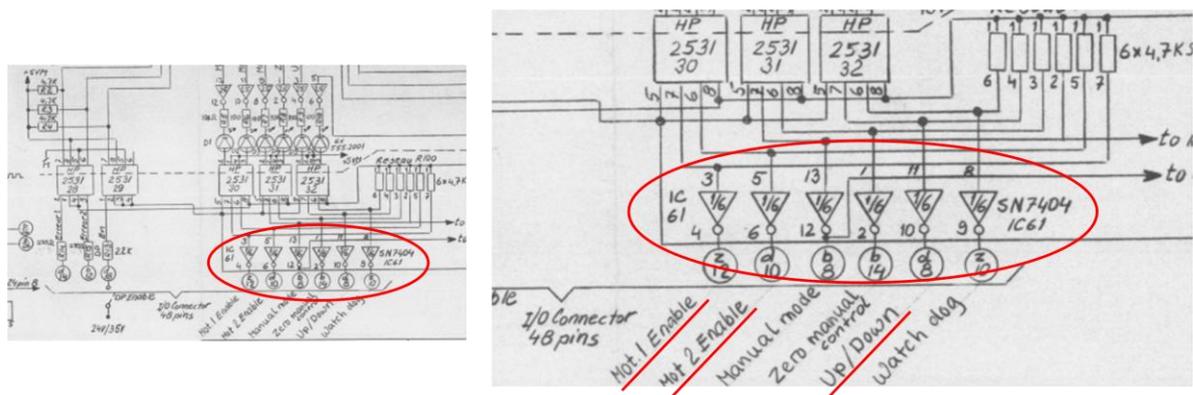


Figura 3.8 – Parte do esquema elétrico da placa de controle dos motores de passo. Em detalhe o CI 7404, por onde são fornecidos os sinais de habilitação (Mot 1 enable e Mot 2 enable) e de sentido (Up / Down)

A placa eletrônica empregada para reforçar os sinais dos CI's pertence ao conjunto de placas eletrônicas próprias do sistema MTC. Não havia, porém, nenhuma aplicação para ela na fábrica. Estas placas foram guardadas depois que algumas máquinas que as utilizavam foram reformadas. A placa eletrônica intermediária utiliza o circuito integrado ULN 2803A, que é formado por transistores ligados na configuração *Darlington*, cuja função é amplificar a capacidade de fornecimento de corrente elétrica na saída do CI. A figura 3.9, a seguir, apresenta a placa eletrônica intermediária que foi utilizada.



Figura 3.9 – Placa eletrônica utilizada para amplificar os sinais de corrente elétrica de saída do sistema numérico MTC

Conforme a figura, a placa eletrônica de amplificação dos sinais de corrente elétrica possui um conector de 48 pinos aos quais estão ligados os terminais de entrada, saída e alimentação dos circuitos integrados. Este tipo de conector facilita a conexão dos sinais entre a placa de amplificação e a placa de controle do sistema numérico MTC. O código do conector é 09 06 048 2905, produzido pela empresa Harting.

A tabela 1 mostra as características de corrente de saída do CI ULN 2803A e dos circuitos integrados 7404 e 7414, utilizados pela placa de controle do sistema numérico MTC para controle dos barramentos da máquina retificadora.

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* (AZEVEDO; SOUSA, 2012).

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 3.10 apresenta um diagrama simplificado desta integração.

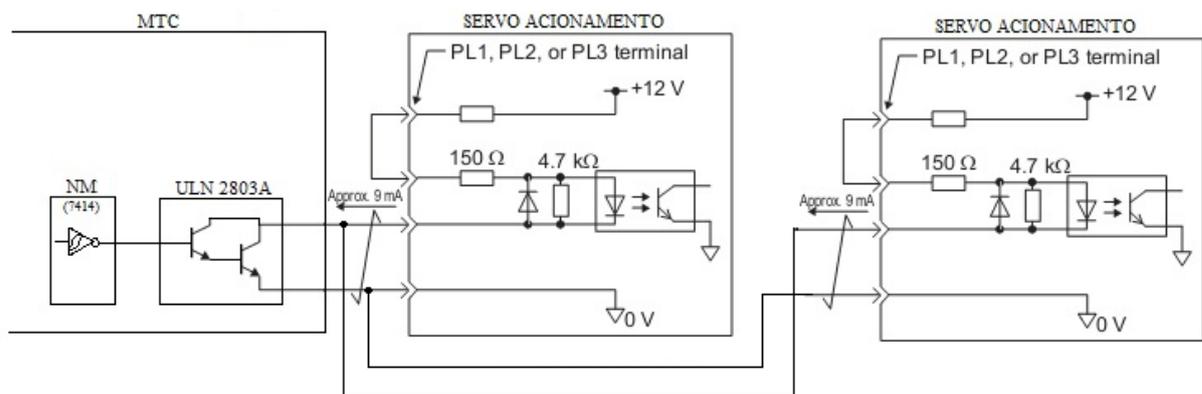


Figura 3.10 – Diagrama simplificado da integração eletrônica entre os dois servoacionamentos e o sistema MTC de controle da máquina retificadora (adaptado do manual dos servoacionamentos Yaskawa)

3.5.1 Modificações no programa MTC da máquina

A integração dos servomotores ao controlador MTC da máquina retificadora também exigiu algumas modificações no programa de controle, relativas aos comandos de habilitação, pulsos de sentido de rotação dos motores. A figura 3.11 apresenta uma transcrição de parte do programa referente ao ciclo automático de retificação, em linguagem MTC, antes da instalação dos servomotores.

```

1T5          MS1          MOTOR 1 ENABLE
              MS2          MOTOR 2 ENABLE
              DP1=R102     TO GAP ELIMINATION POSITION
              DQ1=R103     POSITION FOR GAUGING DIVICE IN
              \L101        STEPPING MOTORS NOT IN START POS.
              L112        - " - - " - BETW. 0 - R101
              DV1=R127     AIR GRINDING FEED RATE

1T5
(L145#SA30) &
LQ1          L106          GAUGING UNIT ON

1T5&\AELIM1  DV1=0
              R106=DC1     AELIM1 = HIGH SPEED CONTROL
              R206=R101-R106
              1T6          MARPOSS KNOCK-OFF 1 NOT REACHED

1T5&\L145&
LV1&LP1&
\SM17:1      DV1=0
              R106=R109
              1T7          UNDERSIZE

1T5&L145&
LP1&LV1&SQ78 DV1=0
              R106=R109
              1T8          MARPOSS KNOCK-OFF 1 REACHED

.B
/Ciclo automático de retífica
/<1T5 - 1T8
.P

```

Figura 3.11 – Transcrição de parte do programa da máquina retificadora, em linguagem MTC

Esta parte do programa descreve a operação do ciclo automático de retificação na sequência de passo 1T5. Os comandos MS1, MS2, DP1, DQ1, DV1 são provenientes do sistema numérico de controle dos barramentos, até então movimentados pelos motores de passo. Eles significam, respectivamente: *habilitação do motor 1* (barramento de retífica), *habilitação do motor 2* (barramento de dressagem), *posição desejada*, *posição intermediária*, e *comando de velocidade*. As variáveis R102, R103 e R127 são registradores utilizados para armazenar os valores das posições e de velocidade de movimentação dos barramentos. Os registradores também podem conter informações de temporização e contagem, e podem ser acessados através de um teclado numérico de operação da máquina. As variáveis LP1 e LV1 são *flags*, isto é, memórias de um bit, associadas aos comandos DP1 e DV1. LP1 se torna “verdadeiro” quando o motor atinge a posição indicada pelo comando DP1. LV1 é verdadeiro quando o motor para após atingir a posição, ou quando um comando de parada imediata for enviado pelo CLP (comando de velocidade DV1=0).

Na primeira parte do programa MTC descrito, nota-se que o passo 1T5 executa simultaneamente a habilitação dos motores (MS1 e MS2) e os comandos de posição e velocidade (DP1 e DV1). Durante os testes em laboratório, foi observado que os servomotores perdiam posicionamento cada vez que o sentido de rotação era invertido, e a perda era maior quanto maior fosse a velocidade de rotação exigida. Embora não houvesse nenhuma informação do fabricante com menção a um tempo mínimo entre a habilitação e os sinais de pulsos e direção dos motores, o programa da máquina foi modificado de maneira que o sinal de habilitação dos motores fosse enviado para o servo acionamento antes dos outros sinais. Para que este “atraso de tempo” interferisse minimamente no tempo total de ciclo da máquina (porque o objetivo é reduzir o tempo), foi utilizado, como solução, o tempo de processamento do software para transição dos passos, dentro da sequência de passos do ciclo de retificação. O trecho de programação descrito abaixo (figura 3.12) foi criado para medir o valor do atraso causado entre os sinais MS1 e MS2 (habilitação) e os sinais DP1 e DV1 (posição e velocidade). Todos os testes foram realizados no laboratório de desenvolvimentos e manutenção de unidades de máquinas da empresa fabricante de rolamentos.

```

/      Programa para teste do sistema numérico (9T)

9T0&
\SM6&\SM7&
SA70&SM5&
\SM4&\SM2      9T1
                  E170          Teste do sistema numérico habilit

9T1      MS1
          MS2
          9T2

9T2      DC1=R106      Posição inicial
          DP1=R106-R170 Posição desejada (inicial-R170)
          DV1=R101     Velocidade de avanço

9T2&
LP1&LV1      9T3

9T3      MS1
          MS2
          9T4

9T4      DP1=R106      Posição desejada (retorna à inicial)
          DV1=R101     Velocidade de avanço

9T4&
LP1&LV1      9T0

(9T0#9T1#
9T2#9T3#
9T4) &SM2      DV1=0          Parada imediata do motor de passo
                  9T0

.B
/>Teste do sistema numérico
/<9T0 - 9T4
.P

```

Figura 3.12 – Programa de teste do sistema numérico MTC

Nota-se que o programa envia os comandos de habilitação MS1 e MS2 no passo 9T1, mas o sentido de rotação e a velocidade (DP e DV) só ocorrem após a mudança para o passo 9T2. O mesmo acontece no retorno dos servomotores à posição inicial, nos passos 9T3 e 9T4. O registrador R106 foi utilizado como referência para o contador de posição inicial DC1. A velocidade foi ajustada para $1000\mu/\text{segundo}$ em R101. A posição desejada foi obtida através do registrador R170, ajustado em apenas uma unidade ($R170=1$). Estes parâmetros foram assim definidos de modo formar dois sinais variáveis no tempo, com frequências que pudessem ser visualizadas no scopemeter. O equipamento utilizado para a medição foi o scopemeter digital modelo PM97 da marca PHILIPS. A figura 3.13 ilustra o momento de transição dos sinais, registrados pelo scopemeter.

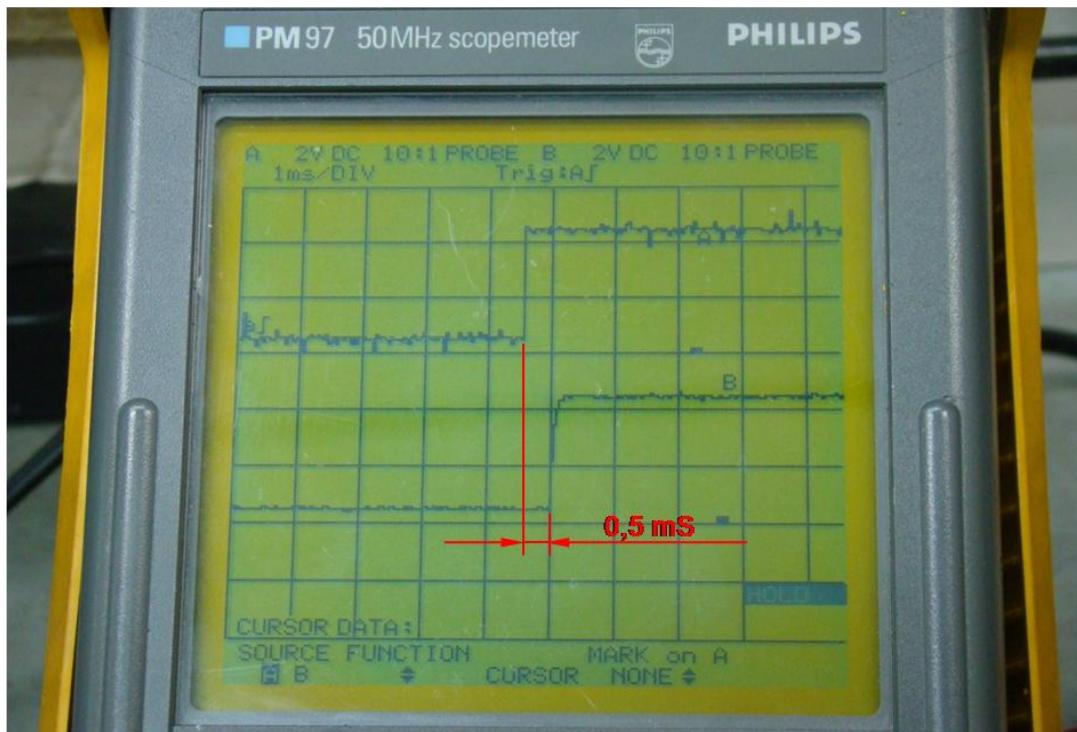


Figura 3.13 – Atraso entre sinal de habilitação e direção de rotação dos motores de passo, registrados pelo scopemeter

A base de tempo do scopemeter foi selecionada em 1ms/divisão e a amplitude do sinal, de nível TTL, mostrada na escala de 2VDC. Na forma de onda na parte superior do *display* do aparelho, está o sinal de habilitação MS1. O sinal da forma de onda inferior é o de sentido de rotação dos motores. Pela figura, observa-se que a diferença entre as bordas de

subida dos sinais é de aproximadamente metade da divisão do scopemeter, ou seja, 0,5ms (mili segundos).

Durante os ensaios, também foram feitos testes utilizando temporizadores de software do próprio sistema, mas que se tornaram inviáveis devido à base de tempo mínima do MTC ser de 10ms. A solução descrita acima constituiu, portanto, a melhor maneira para resolver o problema da perda de posicionamento dos servomotores. Assim, o trecho do programa da máquina, apresentado anteriormente, ficou conforme ilustrado na figura 3.14, depois de modificado.

```

1T5          MS1          MOTOR 1 ENABLE
              MS2          MOTOR 2 ENABLE
              1T40

1T40         DP1=R102      TO GAP ELIMINATION POSITION
              DQ1=R103      POSITION FOR GAUGING DIVICE IN
              \L101         STEPPING MOTORS NOT IN START POS.
              L112          - " - - " - BETW. 0 - R101
              DV1=R127      AIR GRIND FEED RATE

1T40&
(L145#SA30) &
LQ1          L106          GAUGING UNIT ON

1T40&\AELIM1  DV1=0
              R106=DC1      AELIM1 = HIGH SPEED CONTROL
              R206=R101-R106
              1T6           MARPOSS KNOCK-OFF 1 NOT REACHED

1T40&\L145&
LV1&LP1&
\SM17:1      DV1=0
              R106=R109
              1T7           UNDERSIZE

```

```

1T40&L145&
LP1&LV1&SQ78      DV1=0
                    R106=R109
                    1T8          MARPOSS KNOCK-OFF 1 REACHED
.B
/Ciclo automático de retifica
/<1T5 - 1T40
.P

```

Figura 3.14 – Transcrição de parte do programa da máquina retificadora, após modificação

Como o programa já estava com os passos ordenados dentro da sequência (1T5, 1T6, 1T7,...), depois da habilitação dos sinais MS1 e MS2, a sequência foi desviada para o passo 1T40, retornando posteriormente para execução normal do ciclo de retificação.

3.5.2 Adaptação mecânica

Para que os servomotores pudessem ser acoplados às unidades mecânicas de avanço dos barramentos foi preciso desenvolver uma nova flange para sua fixação. Esta flange atua como elemento de suporte para conexão entre o motor e a unidade de avanço, isto é, o servo motor é fixado na flange e a flange é fixada na unidade mecânica de avanço. O sistema original, que utilizava motores de passo, também possuía uma flange para a mesma finalidade, mas que não pôde ser aproveitada devido às dimensões geométricas para fixação dos servomotores serem diferentes dos motores de passo. Os demais elementos utilizados na conexão foram dimensionados considerando as dimensões do eixo do servomotor e do eixo da unidade. A figura 3.15 apresenta em vista explodida: o servomotor (10), a flange de fixação (5), o acoplamento (8 e 9), adaptador para ponta de eixo (4), tampão para flange (6), eixo sem fim da unidade de avanço (7) e os parafusos (1, 2 e 3). O projeto de modelagem de todo conjunto foi realizado com o software ProEngineer[®].

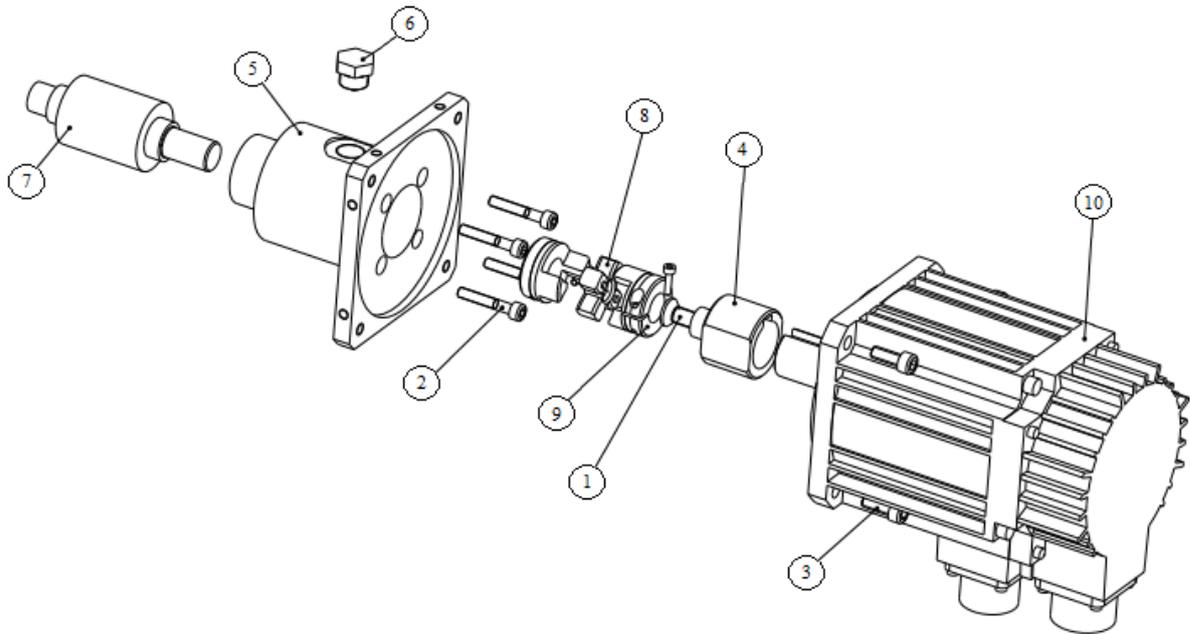


Figura 3.15 – Vista explodida do servomotor e componentes utilizados para sua fixação na unidade mecânica de avanço.

3.6 Sistema de monitoramento por emissão acústica (EA)

Os sistemas de monitoramento de processo têm 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 rebole 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.

O sinal enviado pela unidade de controle ao MTC é o EA_{RMS} . Os estágios necessários para se obter o sinal EA_{RMS} a partir do sinal bruto de emissão acústica, captado pelo sensor, são realizados pela unidade de controle. 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 *display* 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 3.16 mostra a curva característica de um ciclo de retificação assistido pelo sistema de monitoramento, evidenciando os limites de comutação.

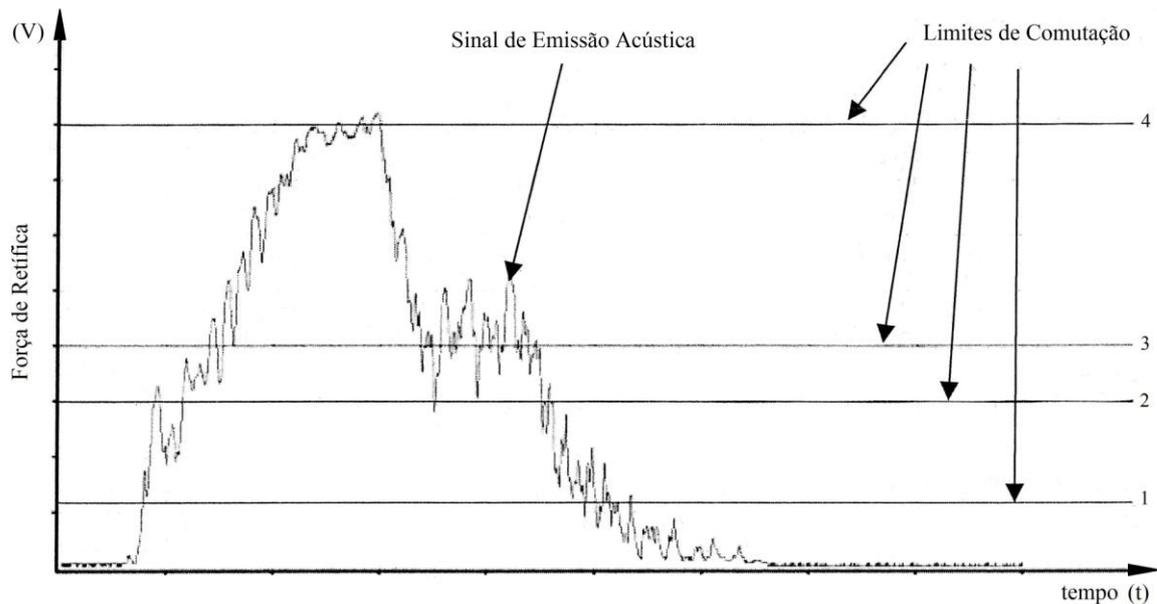


Figura 3.16 – Curva característica de um ciclo em um processo de retificação cilíndrica, assistido pelo sistema de monitoramento (adaptado do manual M5000)

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. No caso do monitoramento do ciclo automático de retificação descrito na seção 3.4, os limites 2 e 3 são configurados com os limites de esforço (através dos sinais de EA) para troca de velocidade de mergulho dos barramentos, para retífica de desbaste e retífica de acabamento. Não existe, porém, uma “receita” ou definição exata para se fixar cada limite de comutação na unidade de controle do sistema de monitoramento. No presente, elas foram estabelecidas levando-se em consideração: as características do rebolo abrasivo, as características do sobremetal dos anéis que serão retificados, as taxas de avanço para remoção do material, o tipo de fluido utilizado na retificação. Em outras palavras, tudo deve convergir para que as dimensões geométricas finais dos anéis sejam obtidas dentro dos padrões de

qualidade requeridos. Além disso, o auxílio dos operadores de máquina mais experientes da linha de produção é fundamental na configuração dos limites de comutação.

O sistema de 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 (MALKIN, 1989). 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. Quando esta correção não é feita, o nível de EA gerado durante o processo de retificação pode não atingir o valor mínimo necessário para a troca e controle da velocidade de mergulho. Isto prejudica a qualidade dos anéis retificados.

Na substituição de um rebolo usado por um novo, a correção do valor em dB era negativa. Neste caso, com o aumento da área de contato entre o rebolo e o anel durante a retificação, o nível de EA gerado também era maior; o operador obrigatoriamente tinha de ajustar o ganho da unidade de controle, sob pena de aumento do tempo de ciclo e, conseqüentemente, perda de produção.

3.7 Ajuste automático do sistema de monitoramento

A fim de eliminar a dependência do ajuste do sistema de monitoramento pela ação do operador de máquina, 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 3.16, 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. A figura 3.17 apresenta o *display* do equipamento de monitoramento em operação. O ciclo de retífica está em curso.

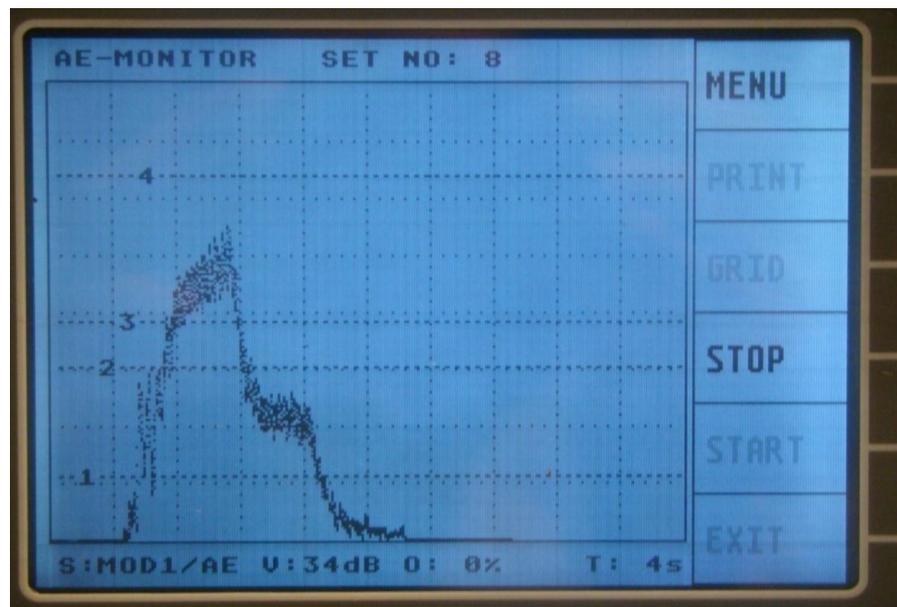


Figura 3.17 – Equipamento de monitoramento do ciclo de retífica em operação

As figuras 3.18 e 3.19, a seguir, apresentam o *display* do equipamento de monitoramento do ciclo de retificação em outros dois momentos. Em cada um deles, o nível de emissão acústica gerado durante o processo de retificação proporcionou, automaticamente, uma seleção de ganho diferente no amplificador do sensor de EA. Estão em destaque nas figuras o número da tela de *settings* e o ganho em decibéis (dB) correspondente.



Figura 3.18 – Equipamento de monitoramento do ciclo de retífica em operação. Foto do dia 06/02/2013

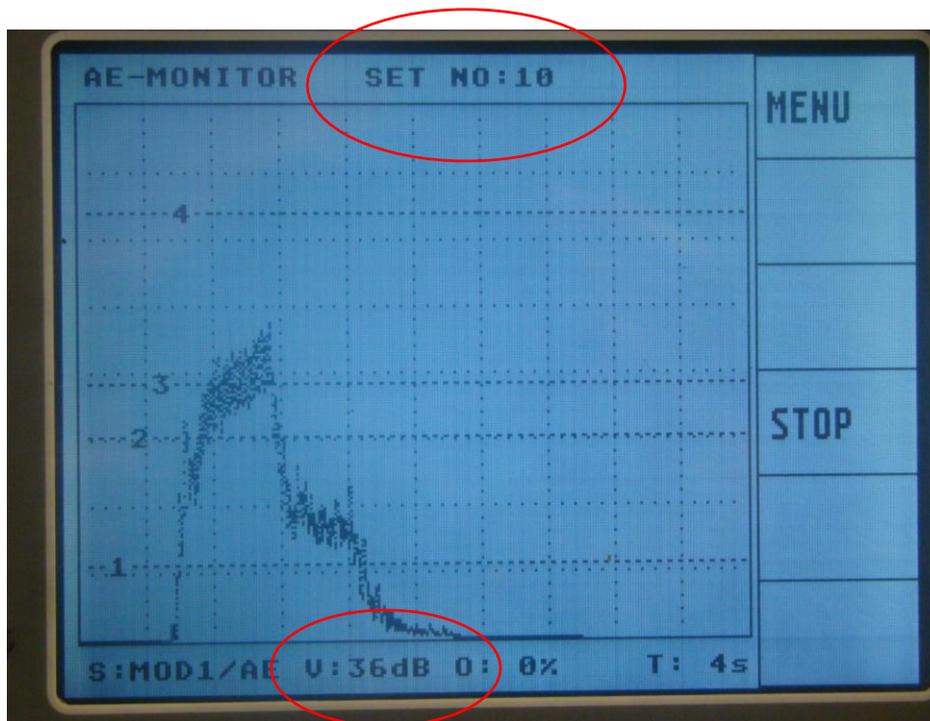


Figura 3.19 – Equipamento de monitoramento do ciclo de retífica em operação. Foto do dia 08/02/2013

3.8 Cronograma das atividades

O cronograma apresentado na figura 3.20 relata as atividades de implantação das melhorias propostas por este projeto de pesquisa na máquina retificadora. As atividades foram subdivididas nas seções: Elétrica, Mecânica, Programação, Desenvolvimentos Laboratoriais e Implementação na Máquina. Uma breve descrição das atividades realizadas em cada uma destas seções é apresentada a seguir:

Elétrica

- *Projeto elétrico.* As etapas desde o desenvolvimento do esquema elétrico até a definição dos componentes utilizados na montagem do painel elétrico, com suas especificações técnicas.
- *Compra de materiais elétricos.* Solicitação de orçamentos, fechamento dos pedidos de compras e espera no recebimento dos materiais.
- *Montagem do painel elétrico.* Os servoacionamentos e demais componentes elétricos foram abrigados em um novo painel elétrico, que foi interligado ao painel elétrico principal da máquina. Esta etapa consta de: definição de *layout* do novo painel e montagem elétrica.

Mecânica

- *Projeto de adaptação mecânica.* Modelamento e projeto de flange e acoplamentos para adaptação dos servomotores à unidade mecânica de avanço dos barramentos. Também se verificaram nesta etapa o espaço físico necessário para passagem dos cabos elétricos e modificações na carenagem de proteção da máquina.
- *Especificação de materiais mecânicos.* Descrição técnica dos materiais mecânicos a serem utilizados.
- *Compra de materiais mecânicos.* Solicitação de orçamentos, fechamento dos pedidos de compras e espera no recebimento dos materiais.
- *Pré montagem de adaptação mecânica.* Montagem do conjunto: servomotor, flange, acoplamentos e unidade mecânica de avanço dos barramentos. Esta etapa é realizada antes da parada da máquina (parada de produção) para implantação das modificações.

Programação

- *Estudo do programa da máquina.* Conhecimento das funções realizadas pelo CLP, antes de efetuar as modificações.
- *Elaboração de programas de teste.* Os programas de teste foram criados para avaliação do desempenho da integração do servossistema ao controlador MTC da máquina, em laboratório.
- *Alteração do programa da máquina.* Modificação do programa original da máquina retificadora, incluindo as alterações necessárias para o funcionamento do novo sistema, segundo o que fora observado nos testes laboratoriais.

Desenvolvimentos laboratoriais – testes

- *Testes de integração do servossistema ao MTC.* Configuração dos parâmetros dos servoacionamentos e conexões com o MTC. Teste realizado inicialmente para o controle de um servomotor, com seu respectivo servoacionamento.
- *Teste para amplificação dos sinais de saída do MTC para os servoacionamentos.* Desenvolvimento necessário para definir o método a ser utilizado para controle de dois servoacionamentos, uma vez que a capacidade de saída de corrente elétrica do sistema MTC original não era suficiente para isso.
- *Estudos e testes para eliminar o problema de perda de posicionamento.* Procedimento realizado conforme descrito na seção 3.5.1.

Implementação na máquina

- *Parada de máquina.* Tempo de parada de produção para realizar as modificações.
- *Atualização de documentação e treinamento.* Atualização da documentação da máquina (com esquema elétrico do novo painel, etc.) e disseminação sobre o novo sistema para os técnicos de manutenção e operadores da linha de produção.

O cronograma apresentado a seguir (figura 3.20) foi criado no software MS Project 2007[®], da empresa Microsoft.

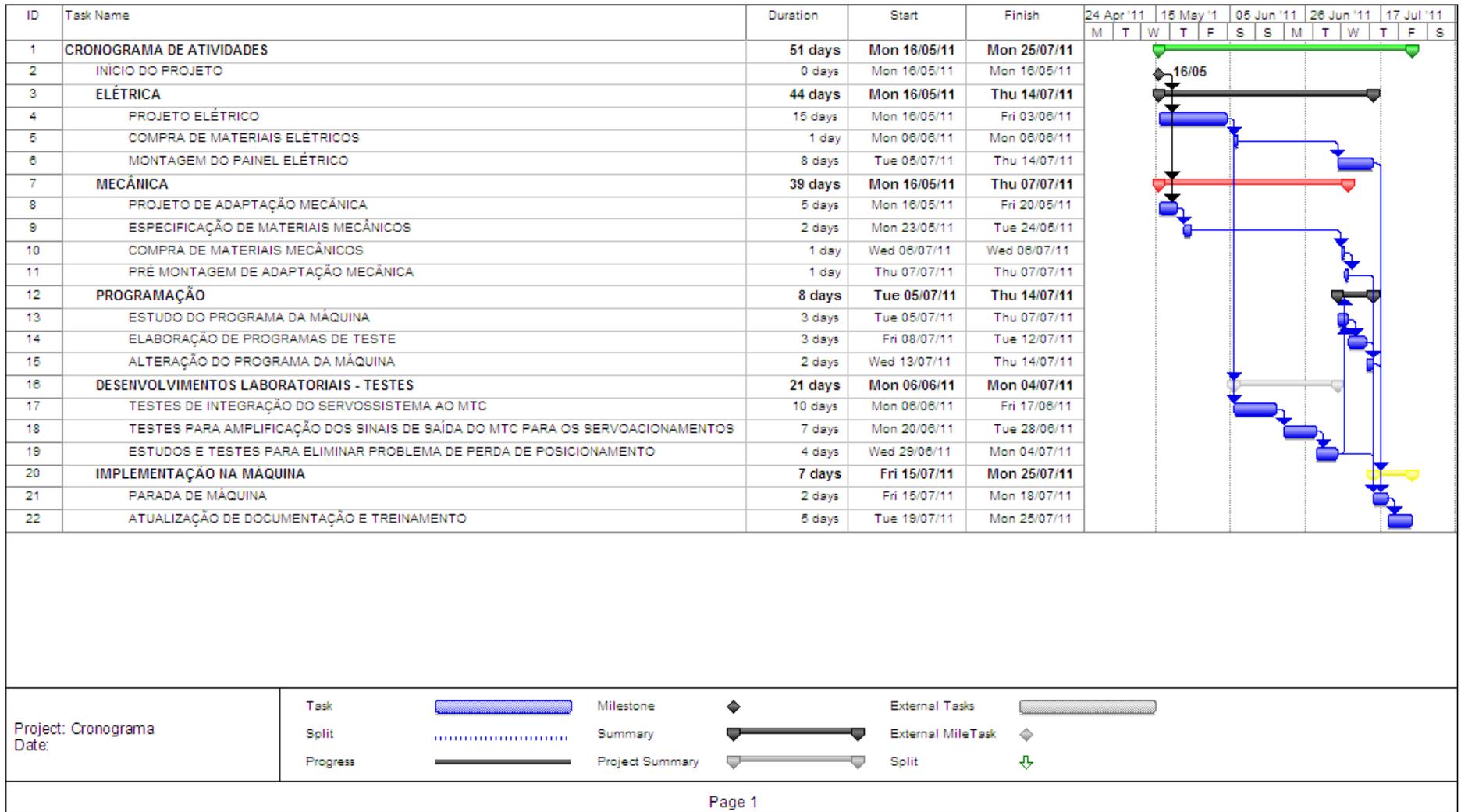


Figura 3.20 – Cronograma das atividades para implementação das melhorias na máquina retificadora

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Situação antes da implantação das melhorias propostas

Para exemplificar o impacto negativo dos problemas relacionados à movimentação dos barramentos da máquina retificadora e também do ajuste incorreto do ganho da unidade de controle do sistema de monitoramento do ciclo, sobre a produtividade da máquina, a figura 4.1, a seguir, apresenta o histórico de algumas ordens de trabalho registradas pelo software APIPRO[®], utilizado pela empresa para gerenciamento dos trabalhos de manutenção das máquinas do processo produtivo. Todas estas ordens referem-se à máquina retificadora de anéis em discussão.

Job exec. dat	Work ord	WO name	Responsáve
22/03/2011	245244	INSPEÇÃO NA UNIDADE DE DRESSAGEM.	PL01
22/03/2011	245232	INSPEÇÃO NO CABEÇOTE DE TRABALHO.	PL01
21/03/2011	260946	BARRAMENTO DE RETIFICA.	MECÂNICOS
18/03/2011	260785	vibracao alta no braco de dressagem	MECÂNICOS
16/03/2011	260592	RETRABALHO	TRE03
14/03/2011	260394	TROCAR FILTRO DE 70 BAR	MECÂNICOS
11/03/2011	259903	fuso danificado	pl01
10/03/2011	260142	lampada vermelha do pirulito nao acende	PLANEJADOR
10/03/2011	221020	TROCAR MOTOR FUSO RETIFICA POR RESERVA	PL01
09/03/2011	260004	lampada queimada.	ELETRÔNICO
09/03/2011	259087	ALTERAÇÃO DO PROGRAMA DA MÁQUINA.	PL01
05/03/2011	259812	PRODUCAO BAIXA DEVIDO AJUSTE DO AE	EPS02
05/03/2011	259798	valvula da placa de pressao falhando	MECÂNICOS
04/03/2011	259783	SUBSTITUIR CORREIAS DO FUSO DE RETIFICA	MECÂNICOS
23/02/2011	258911	VARIACAO DE MEDIDA .	MECÂNICOS
22/02/2011	258893	FILTRO 70 BAR	MECÂNICOS
21/02/2011	258766	Maquina com variacao de medida	MECÂNICOS
18/02/2011	258590	Parametros fora (AE)	ELETRÔNICO
14/02/2011	258290	REPARO NA CALHA DE ENTRADA	MA 04
11/02/2011	256817	RETRABALHO	TRE02

Figura 4.1 – Histórico de trabalhos referentes à máquina retificadora de anéis de rolamentos

O histórico de ordens está ordenado de acordo com a data de finalização ou conclusão dos trabalhos. Nota-se, pela figura que apenas no intervalo compreendido entre os dias 18/02/2011 e 21/03/2011 foram registradas cinco ocorrências de produção com problemas relacionados à movimentação dos barramentos (movidos por motores de passo) ou com ajustes de ganho do sistema de monitoramento do ciclo de retificação. Em destaque no histórico, está apresentado o problema: “PRODUÇÃO BAIXA DEVIDO AJUSTE DO AE”. Neste caso, o operador de produção acionou o técnico de manutenção para ajustar o ganho na unidade de controle do sistema de monitoramento por EA (ou AE, do inglês *Acoustic Emission*). Este problema ocorreu no dia 05/03/2011. Outra ocorrência semelhante a esta já havia sido apontada no dia 18/02/2011 (“PARÂMETROS DO AE FORA”).

Com relação aos motores de passo, o sistema estava trabalhando no limite de sua capacidade, o que ocasionava diversas paradas de máquina por erro de posicionamento dos motores. Isto pode ser verificado no exemplo da figura 4.2.

Job exec. dat	Work ord	WO name	Responsável	Prior	Errcode1
21/12/2009	231308	SQ 68 ATUADO DIRETO	ELETRÔNICO	1	ELETRÔNICO
15/12/2009	230483	RETIFICAR REBAIXO DA TAMPA	TRE02	1	
12/12/2009	230816	ERRO DE MOTOR 2.	ELETRÔNICO	1	ELETRÔNICO
11/12/2009	230785	MAQUINA NAO DA BALANCEAMENTO	MECÂNICOS	1	MECÂNICO
06/12/2009	230462	ERRO MOTOR 2		1	ELETRÔNICO
23/11/2009	225495	INSPEÇÃO MENSAL NA FLANGE PORTA-REBOLO	PL01	1	MECÂNICO
22/11/2009	229389	CORREIA DO CABECOTE.	MECÂNICOS	1	MECÂNICO
20/11/2009	215606	INSPEÇÃO NA MESA DE RETÍFICA.	PL01	4	MECÂNICO
16/11/2009	228911	Trocar filtro de 70 bar	MECÂNICOS	1	MECÂNICO
16/11/2009	227524	TENSÃO BAIXA NA FONTE 35V	PL01	2	ELETRÔNICO
16/11/2009	214032	INSPEÇÃO NOS SENSORES.	PL01	4	ELETRÔNICO
16/11/2009	214029	INSPEÇÃO NA VÁLVULAS E PRESSOSTATOS.	PL01	4	ELETRÔNICO
13/11/2009	225634	ELABORAR PROCEDIMENTO DE ERRO DE MOTOR 2	PL01	1	ELETRÔNICO
10/11/2009	228043	RETRABALHO (71417227)	RE01	1	RETRABALHO
04/11/2009	227762	RETRABALHO PLANO MOVIMENTO	RE01	1	RETRABALHO
04/11/2009	226009	Sensor pistão de troca ruim	PL03	1	U.R ELETRÔNICO
29/10/2009	227716	baixa refr na dressagem	MECÂNICOS	1	MECÂNICO
27/10/2009	215577	INSPEÇÃO NO PAINEL ELÉTRICO.	PL06	4	ELETRÔNICO

Figura 4.2 – Histórico de ordens de trabalhos finalizadas na máquina retificadora

A ocorrência indicada por “ERRO DE MOTOR 2” significa uma parada de máquina devido a algum problema relacionado a um dos dois motores de passo de movimentação dos barramentos (os motores são identificados como “motor 1” e “motor 2”). Há registro no histórico em que a máquina permaneceu em manutenção por um período de 7 horas devido ao “erro de motor 2”, em uma única ocorrência. A produção do canal esteve parada por todo este tempo. O problema acontecia com tanta frequência que levou à criação de um procedimento para auxiliar na manutenção, o que pode ser visto em destaque na Figura 4.2: “ELABORAR PROCEDIMENTO DE ERRO DE MOTOR 2”. Este procedimento, que foi finalizado no dia 13/11/2009, não impediu, porém, a reincidência do problema, pois conforme dados do mesmo histórico, o erro de posição voltou a ocorrer nos dias 06/12 e 12/12/2009.

Segundo a literatura (OGATA, 2003), 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 na máquina retificadora de anéis, 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 controlador MTC se o erro de posição fosse maior que 180° no eixo de rotação dos motores de passo, ou seja, 100 pulsos dos motores de passo. Como cada pulso do motor de passo representa um avanço linear de $1\mu\text{m}$ (mícron) no barramento, isto significa que variações de posicionamento até $100\mu\text{m}$ poderiam ser imperceptíveis pela malha de monitoramento com os sensores. Logo, esta tecnologia não era capaz de detectar se o comando de entrada foi plenamente satisfeito.

4.2 Resultados após implantação das melhorias

Com a substituição dos motores de passo por servomotores foi possível aumentar a velocidade de retorno dos barramentos após a retificação, que estava limitada a $600\mu\text{m}/\text{segundo}$, para $1200\mu\text{m}/\text{segundo}$. Esta medida reduziu o tempo de ciclo não produtivo da máquina (quando os barramentos estão regressando à posição inicial de retífica), causando impacto direto no aumento da produtividade.

A integração dos servomotores em substituição dos motores de passo reduziu significativamente o número de ocorrências de paradas de máquina por problemas relativos à movimentação dos barramentos de retífica e dressagem da máquina retificadora de anéis de rolamentos. O gráfico da figura 4.3 apresenta um comparativo dos problemas de produção ocorridos desde o ano de 2009 até o mês de dezembro de 2012, relatando as seguintes ocorrências: *variação de medida*, *erro de posição do motor* e *baixa produtividade*, relacionada a ajustes no sistema de monitoramento. A implantação da melhoria ocorreu no mês Jul/2011.

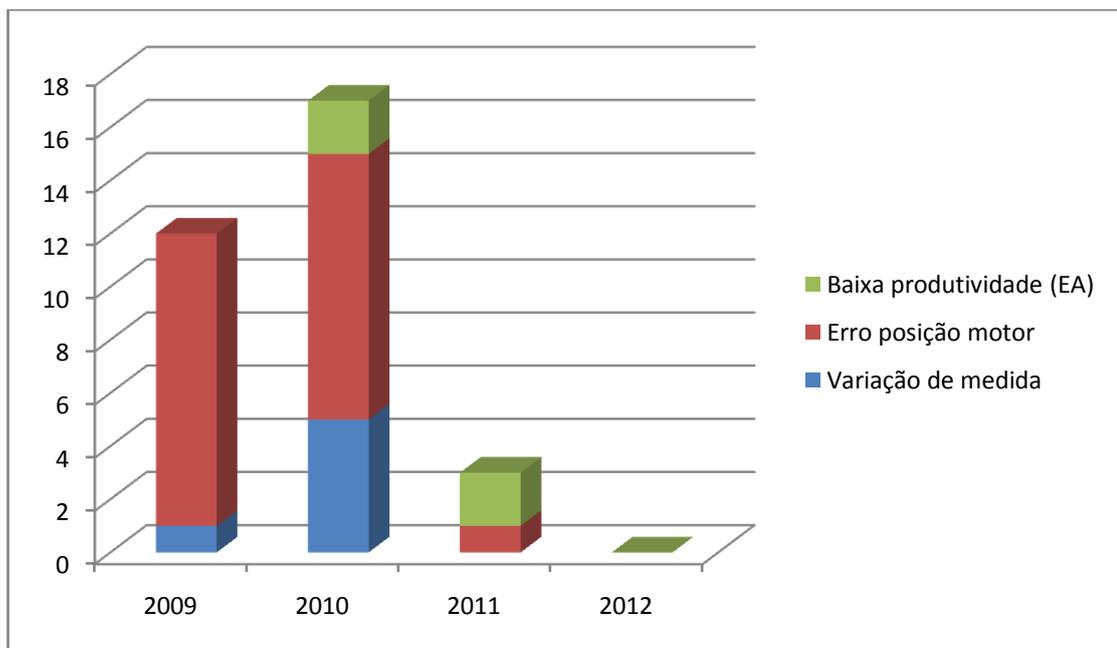


Figura 4.3 – Problemas apontados pela produção na máquina retificadora de anéis. Comparativo entre os anos 2009 e 2012

Os dados do gráfico foram extraídos do software APIPRO, utilizado pela empresa. Nota-se que o problema “erro de motor”, bastante evidente nos anos 2009 e 2010, foi reduzido para uma ocorrência em 2011 e nenhuma em 2012. Isto significa que a máquina retificadora de anéis não sofreu nenhuma interrupção do ciclo automático de retificação por estes problemas, depois que os servomotores foram instalados.

No ano de 2010 foram registradas cinco paradas de máquina com o problema “variação de medida”. Segundo o histórico, todas elas ocorreram antes da instalação dos servomotores. Não houve reincidência deste problema depois que as melhorias foram implantadas.

O problema de baixa produtividade relacionado à parametrização incorreta de ganho na unidade de controle do sistema de monitoramento também foi totalmente eliminado, depois da implantação do ajuste automático de ganho através do CLP da máquina. Esta melhoria também foi claramente observada após a preparação da máquina, ou seja, na mudança de rebolo e ferramentais para produzir outro tipo de rolamento na linha de produção. O método de ajuste automático também se mostrou eficaz na otimização do sistema de monitoramento do ciclo de retificação mesmo quando o rebolo e os anéis eram diferentes.

Pela análise do gráfico, portanto, conclui-se que a integração dos servomotores à máquina e a implementação do ajuste automático do sistema de monitoramento por EA proporcionaram significativa redução dos problemas relacionados à movimentação dos barramentos de retificação e dressagem da máquina retificadora, além de eliminar as perdas de volume de produção causadas, principalmente, por erros de parametrização (de ganho) na unidade de controle do sistema de monitoramento.

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 produção da máquina obteve um acréscimo de 16,1%, representando um volume de 1228 peças/hora. A retificadora deixou de ser a máquina gargalo da produção.

O custo total para implantação do projeto de pesquisa foi de R\$ 36.344,96 (cotações de materiais e serviços realizados nos meses de maio e junho/2011). Neste valor estão inclusos: compra de todos os materiais eletroeletrônicos e mecânicos utilizados, desenvolvimento de programas CLP para teste em laboratório e posterior programação do CLP da máquina, desenvolvimento do método de integração e controle dos acionamentos dos

motores ao controlador lógico MTC da máquina, testes experimentais de funcionamento do sistema em laboratório, montagem de painel elétrico adicional e interligação com a máquina retificadora. Também foi realizada uma estimativa de custo considerando a substituição de todo o sistema de controle da máquina retificadora, também com cotações de materiais e serviços no mesmo período. Segundo este estudo, seriam necessários R\$70.585,09 para se alcançar os mesmos resultados de aumento de produtividade e redução de problemas na movimentação dos barramentos de retífica e dressagem da máquina retificadora de anéis de rolamentos.

5. CONCLUSÕES

O trabalho apresentado solucionou, 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 MTC da máquina retificadora por um novo CLP que possuísse as funções necessárias para o controle de um servossistema similar ao que foi utilizado. O custo da implantação desta melhoria correspondeu a aproximadamente 45,82% do que seria gasto se todo o sistema de controle da máquina fosse substituído.

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, que reduziu as ocorrências de baixa produtividade, devido a ajustes inadequados na unidade de controle de EA, além de disponibilizar o tempo do operador para outras atividades na linha de produção.

REFERÊNCIAS

AGUIAR, Paulo Roberto. **Monitoramento da Queima Superficial em Processo de Usinagem por Retificação usando a Potência Elétrica do Motor de Acionamento e Emissão Acústica.** Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 1997.

AZEVEDO, Marcelo Miguel de; SOUSA, João Sinohara da Silva. **Otimização de Ciclo Para Aumento de Produtividade em Máquina de Retífica Interna de Rolamentos.** 7ª Conferência CONNEPI (Congresso Norte-Nordeste de Pesquisa e Inovação). ISBN 978-8562830-10-5 Anais. Palmas, TO, 2012.

BEGA, Egídio Alberto (organizador); DELMEÉ, Gerard Jean; COHN, Pedro Estéfano; BULGARELLI, Roberval; KOCH, Ricardo; FINKEL, Vitor Schmidt. **Instrumentação Industrial.** 2ª Edição Rio de Janeiro IBP - Editora Interciência: IBP, 2006.

CASTRUCCI, Plínio; MORAES, Cícero C. de. **Engenharia de Automação Industrial.** 2ª Ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2007.

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

DORNFELD, David A. **Process Monitoring and Control for Precision Manufacturing.** University of the California at Berkeley, 1999.

DOTTO, Fábio Romano Lofrano. **Sistema de Detecção Automática de Danos Térmicos no Processo de Retificação com Monitoramento via Internet.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial). UNESP Bauru, 2004.

FELIPE JÚNIOR, Juarez. **Contribuição para Implementação de Funções de Retificação Inteligente (RI) Utilizando Técnicas de Monitoramento por Emissão Acústica.** Tese de doutorado. USP São Carlos, 1996.

FELIPPE, Douglas Marquезin. **Comparação Entre os Processos de Tratamentos Térmicos Convencional e por Indução de Rolamentos do Aço DIN 100 Cr6.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais). Universidade Presbiteriana Mackenzie, 2010.

FREGNI, Edson; SARAIVA, Antonio Mauro. **Engenharia do Projeto Lógico Digital: Conceitos e Prática.** Editora Edgard Blücher LTDA. São Paulo, 1995.

GAITHER, Norman; FRAZIER, Greg. **Administração da Produção e Operações.** 8ª Ed. Thomson Pioneira, 2002. 598p.

GROOVER, Mikell P. **Automação Industrial e Sistemas de Manufatura.** 3ª Ed. Editora Person, 2011. 592p.

HELLMEISTER, Carmen Francisca Lourenço Pinto. **Monitoramento da Dressagem na Retificação Através do Sinal Puro de Emissão Acústica**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) UNESP Bauru, 2004.

HWANG, T. W.; WHITENTON, E. P.; HSU, N. N.; BLESSING, G. V.; EVANS, C. J. **Acoustic Emission Monitoring of High Speed Grinding of Silicon Nitride**. Ultrasonics. Volume 38, Issues 1-8, Pages 614-619, March 2000.

INASAKI, Ichiro. **Application of Acoustic Emission Sensor for Monitoring Machining Processes**. Ultrasonics. Volume 36/1 – 5 ed., pp 273 – 281, 1998.

JEMIELNIAK, Krzysztof. **Some Aspects of Acoustic Emission Signal Pre-Processing**. Journal of Materials Processing Technology, Volume 109, Issue 3, Pages 242–247, 15 February 2001.

KHENAIFFES, Maurício. **Investigação de Novas Ferramentas Estatísticas e Utilização de Microcontrolador no Monitoramento da Queima na Retificação Plana Tangencial**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) UNESP Bauru, 2006.

LEE, D. E.; HWANG, I.; VALENTE, C. M.; OLIVEIRA, J. F.; DORNFELD, David. A. **Precision Manufacturing Process Monitoring With Acoustic Emission**. International Journal of Machine Tools & Manufacture, Volume 46, no. 2, Pages 176-188, 2006.

LEWIS, Robert W. **Programming Industrial Control Systems Using IEC 1131-3** – Control Engineering Series. IEE (The Institution of Electrical Engineers), London, UK, 1998.

MALKIN, S. **Grinding Technology: theory and applications of machining abrasives**. England – Ellis Horwood Limited, 1989, 275p.

MALVINO, Albert Paul. **Eletrônica**. 4ª Ed. Volume 2. Editora Makron Books, São Paulo 1995.

MAROUELI, Carlos Alberto. **Gargalos de produção**. Disponível em: <http://www.administradores.com.br/informe-se/artigos/gargalos-de-produção/21678/> Março de 2008 (acesso: 08/07/2012).

NUSSBAUM, Guillaume Ch. **Rebolos e Abrasivos: tecnologia básica**. Editora Ícone, São Paulo, 1988.

OLIVEIRA, J.F.G.; COELHO, R.T.; TUNDISI, E.J.; GOMES, J.J.F.; BELLINI, P.H.C. **A New System to Get Information about the Grinding Wheel Performance**. Abrasives. Estados Unidos, Vol.01, n.03, pp.24-30, 2000.

OGATA, Katsuhiko. **Engenharia de Controle Moderno**. 4ª Ed. São Paulo . Ed: Person Prentice Hall. 2003.

RADATZ, Jane (contributor), **The IEEE Standard Dictionary of Electrical and Electronics Terms**. Volume 100, Issue 1996 of IEEE (std.). Institute of Electrical and Electronics Engineers.

RIBEIRO, Marco Antonio. **Automação Industrial**. 4ª Ed. Tek Treinamento & Consultoria LTDA. Salvador, 2001.

SCHÜHLI, Luciano Alcindo. **Monitoramento de Operações de Retificação usando Fusão de Sensores**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção Mecânica). USP São Carlos, 2007.

SILVA, Rodrigo Henriques Lopes da. **Monitoramento do Desgaste de Ferramentas no Fresamento de Topo Através dos Sinais de Potência e Emissão Acústica e Redes Neurais**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Uberlândia – MG, 2010.

SOARES, D. D.; OLIVEIRA, João Fernando Gomes de. **Diagnósticos de processos de retificação pela análise de sinais**. Revista Máquinas e Metais ano 38 nº 436, pp 140-157. Maio de 2002.

SOUZA, André Gustavo Oliveira. **Monitoramento da Dressagem no processo de Retificação**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). UNESP Bauru, 2009.

VALENTE, Carlos Magno de Oliveira. **Implementação de Sistema para Eliminação Automática de Rebarbas Resultantes de Processos de Usinagem**. Tese de doutorado. USP São Carlos, 2003.

VARELLA, Drauzio. **Lesões por esforços repetitivos – L.E.R / D.O.R.T**. Disponível em: <http://drauziovarella.com.br/doencas-e-sintomas/lesoes-por-esforcos-repetitivos-l-e-r-d-o-r-t/> (acesso: 23/05/2012, 20h33).

VIANNA, Willian da Silva. **Controlador Lógico Programável**. Disponível em: <http://www.ebah.com.br/content/ABAAAjy4AA/curso-basico-clp> (acesso: 21/09/2012, 19h20).

WEBSTER, J.; MARINESCU, I.; BENNET, R. **Acoustic Emission for Process Control and Monitoring of Surface Integrity during Grinding**. Annals of the CIRP vol 43/1: 299 – 304, 1994.

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. Novembro de 2011.

WERNECK, Marcelo Martins. **Transdutores e Interfaces**. Editora LTC – Livros Técnicos e Científicos. Rio de Janeiro, 1996.

WOHLCHLAEGER, Ralf. **IEC 61131-3 Basics and PLC Open**. Panasonic Electric Works Europe AG. Disponível em: http://www.panasonic-electric-works.com/peweu/en/downloads/dd_x634_en_iec61131_basics.pdf. Janeiro de 2006. (acesso: 16/02/2013, 22h12).

XUE, Li; NAGHDY, Fazel; COOK, Chris. **Monitoring of Wheel Dressing Operations for Precision Grinding**. FIEEE International Conference of Industrial Technology, 11 – 14 December 2002, 2, 1296-1299. Copyright IEEE 2002.

APÊNDICE

APÊNDICE A – Transcrição do programa utilizado no teste do sistema numérico, convertido de linguagem MTC para linguagem de diagrama de contatos (*Ladder*)

A linguagem de programação MTC foi desenvolvida para controlar máquinas-ferramentas utilizadas exclusivamente na fabricação de rolamentos. Por esta razão, ela não é conhecida da maioria dos programadores de CLP's, ainda que muito bem familiarizados com diversos outros tipos de controladores.

Para facilitar o entendimento da programação MTC apresentada neste trabalho, nesta seção, será feita uma transcrição do programa MTC utilizado no teste do sistema numérico, apresentado na seção 3.5.1, convertido em linguagem de contatos, ou *Ladder* (escada, em inglês), globalmente conhecida devido sua padronização pela norma internacional IEC 61131-3.

O programa em linguagem de contatos apresentado a seguir foi desenvolvido com o software STEP 7[®], produzido pela empresa Siemens.

Importante ressaltar que o programa em linguagem de contatos aqui desenvolvido não representa com total fidelidade o programa em linguagem MTC, pois estes dois CLP's, Siemens e MTC, diferem essencialmente na maneira de processamento do programa, conforme mostrado na seção 3.3. Esta analogia com a linguagem de contatos tem apenas o intuito de favorecer uma melhor compreensão dos trechos de programa MTC apresentados ao longo do trabalho.

```

/      Programa para teste do sistema numérico (9T)

9T0&
\SM6&\SM7&
SA70&SM5&
\SM4&\SM2      9T1
                  E170          Teste do sistema numérico habilit

9T1              MS1
                  MS2
                  9T2

9T2              DC1=R106          Posição inicial
                  DP1=R106-R170    Posição desejada (inicial-R170)
                  DV1=R101          Velocidade de avanço

9T2&
LP1&LV1          9T3

9T3              MS1
                  MS2
                  9T4

9T4              DP1=R106          Posição desejada (retorna à inicial)
                  DV1=R101          Velocidade de avanço

9T4&
LP1&LV1          9T0

(9T0#9T1#
9T2#9T3#
9T4) &SM2        DV1=0          Parada imediata do motor de passo
                  9T0

.B
/>Teste do sistema numérico
/<9T0 - 9T4
.P

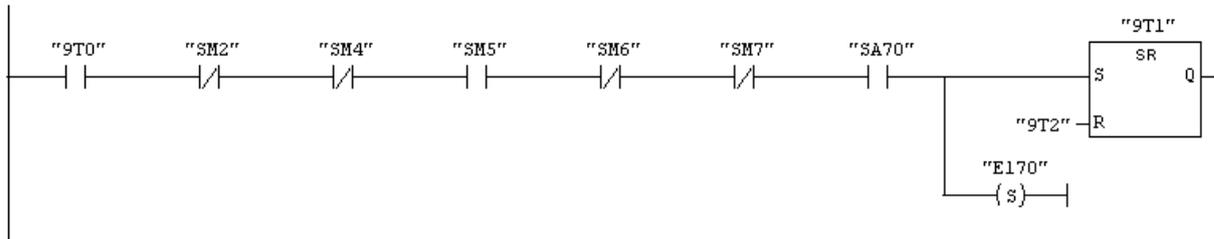
```

FC1 : Programa de teste do sistema numérico (9T)

Programa escrito em linguagem de contatos, baseado no programa MTC apresentado na seção 3.5.1.

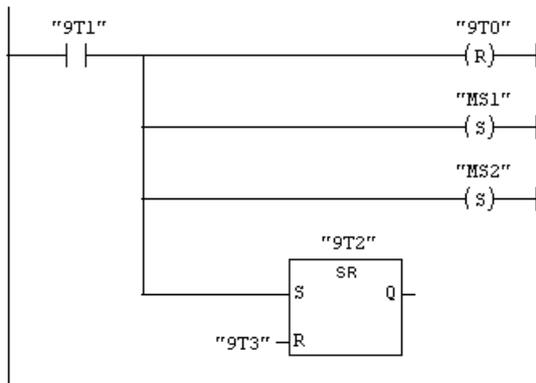
Network 1: Início do ciclo

A sequência de passo 9T será aqui representada por memórias que serão setadas e resetadas ao longo do programa, para dar uma "idéia" de processamento sequencial. O ciclo se inicia com 9T0 sendo verdadeiro. As variáveis SM2, SM4, SM5, SM6 e SM7 são chaves (contatos) de uma jiga de teste utilizada para a realização dos testes no laboratório. A variável SA70 é uma chave eletrônica, ativada através do teclado do CLP. "E170" é uma memória indicadora de eventos. Neste caso, está indicando que o ciclo de teste está em andamento.



Network 2: Sequência de passo 9, passo 1 (9T1)

Quando a sequência de passo 9T1 se torna verdadeira, a sequência anterior, isto é, 9T0, deve ser desabilitada. "MS1" e "MS2" são os sinais de habilitação dos motores de passo.



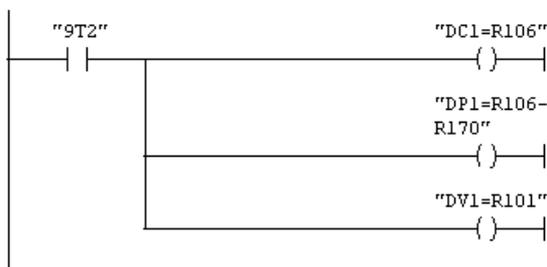
Network 3: Sequência de passo 9, passo 2 (9T2)

As memórias de saída indicadas como: "DC1=R106", "DP1=R106-R170" e "DV1=R101" representam o grupo de parâmetros próprios da interface numérica para acionamento dos motores de passo. O significado de cada uma delas é:

DC1=R106 ==> Carrega o contador inicial (DC1) com o valor de posição estabelecido pelo registrador R106. É uma posição de partida para o motor.

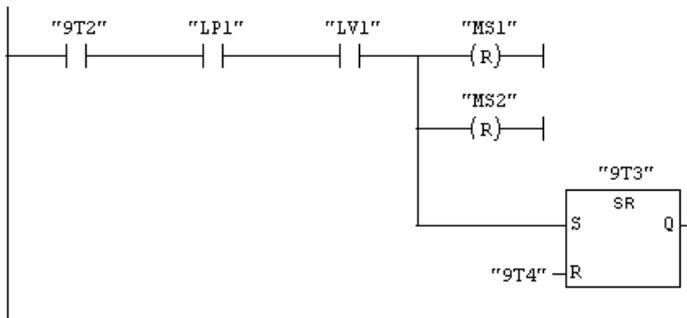
DP1=R106-R170 ==> Estabelece como posição desejada (DP1) a posição inicial (DC1, que é igual ao R106) menos a distância a ser percorrida, carregada no registrador R170.

DV1=R101 ==> Executa os comandos de posicionamento a cima com a velocidade DV1, estabelecida de valor do registrador R101.

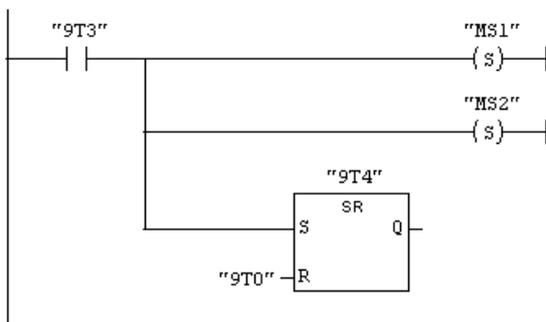


Network 4: Sequência de passo 9, passo 2 (9T2) - Continuação

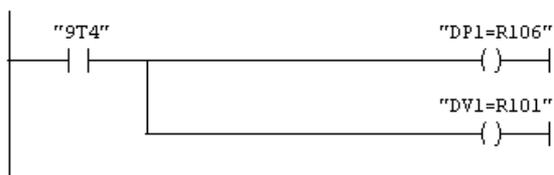
A transição de passo para a sequência 9T3 acontecerá quando as memórias associadas aos comandos de posição (LP1) e de velocidade (LV1) forem satisfeitas, isto é, quando a posição desejada for atingida e a velocidade do motor de passo for igual a zero. As habilitações "MS1" e "MS2" são desligadas. Isto não é explícito no programa MTC.

**Network 5:** Sequência de passo 9, passo 3 (9T3)

Habilitação dos motores (MS1, MS2) e transição para o passo 9T4.

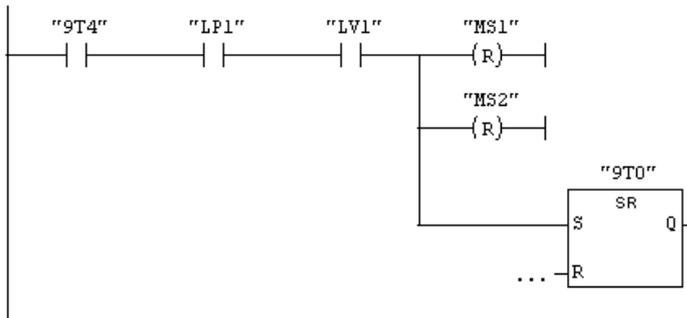
**Network 6:** Sequência de passo 9, passo 4 (9T4)

Movimento de retorno do motor à posição inicial.

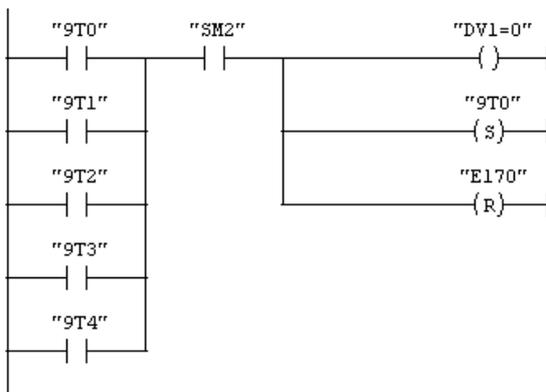


Network 7: Sequência de passo 9, passo 4 (9T4) - Continuação

Com o retorno do motor de passo à posição inicial (de partida), as memórias associadas aos comandos de posição e de velocidade, "LP1" e "LV1", tornam-se verdadeiras, resettando os sinais de habilitação "MS1" e "MS2". O programa efetua um salto para o primeiro passo da sequência, ou seja, 9T0. Se as condições das chaves estiverem verdadeiras, um novo ciclo será iniciado.

**Network 8:** Sequência de passo para parada imediata do motor de passo (9Tx)

A parada imediata do motor de passo é obtida através do comando de velocidade "DV1=0". Ao atuar a chave SM2 na jiga de teste, o motor de passo para imediatamente, independente da sequência de passo que estiver ativa (setada) no programa. A sequência de passo é direcionada para 9T0 e o evento "ciclo em andamento" (E170) é desabilitado.

**Network 9:** Resete dos sinais de habilitação dos motores de passo

Os sinais de habilitação dos motores de passo, "MS1" e "MS2", são resettados toda vez que um comando de velocidade "DV1=0" é recebido do CLP. Isto não é explícito pelo programa MTC.

