

- O trabalho mostra ser viável aplicar a estratégia adotada dentro do conceito de fábrica virtual.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a FAPESP – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, ao NUMA – Núcleo de Manufatura Avançada (PRONEX), e a SandVik do Brasil S.A.

7. REFERÊNCIAS

- Beard, T. “Servicio CNC de larga distancia”. MetalMecanica-International, Colômbia, v. 4, ed. 4, p. 22-24, Ago./Set. 1999.
- Bremer, C. F. “Um sistema para apoio à formação de empresas virtuais baseada em recursos de chão-de-fábrica”. Gestão&Produção, São Carlos, SP, Brasil, v. 6, n.2, p. 79-86, ago. 1999.
- Coppini, N, L., Baptista, E, A. “Alternativas de otimização dos parâmetros de corte para cenários de fabricação em usinagem”. In.: Encontro Nacional de Engenharia de Produção - ENEGEP’97, Niterói, RJ, Brasil, Anais... Out. 1998.
- Coppini, N, L., Coelho, R, T., Baptista, E, A. “Tool Optimization Expert System”. In.: Integrity – Reliability – Failure an International Conference, Porto, Portugal, Anais... July 1999.
- Diniz, A, E., Coppini, N. L., Vilella, R. C., Rodrigues, A, C. S. “Otimização das condições de usinagem em células”. Máquinas e Metais, Brasil, n.281, p. 48-54, Jun. 1989.
- DOMINGUES, M. A., NAZZONI, R. “Como a variação da velocidade de corte em tornos automáticos beneficia a produção”. Máquinas e Metais, Brasil, n.399, p. 186-192, Abril 1999.
- Elbestawi, M. A., Teltz, R. “Intelligent Machining Systems: Opportunities and Challenges”. In.: Integrity – Reliability – Failure an International Conference, Porto, Portugal, Anais... July 1999.
- Ferreira, J. C. E., Stradiotto, C. R. K., Butzke, A. U. “Parâmetros de usinagem e geração do programa NC em CAD/CAPP/CAM”. Máquinas e Metais, Brasil, n.396, p. 54-63, Jan. 1999.
- Hogarth, S. “Remote Possibilities: Machine Diagnostics at a distance”. Manufacturing Engineering, USA, v. 122, n.2, p. 70-78, Feb. 1999.
- Neves, M., Proença, A. “Evolução dos perfis de automação no Brasil”. Máquinas e Metais, Brasil, n.399, p. 83-91, Abril 1999.

A Figura 3 apresenta o fluxograma utilizado pelo *software* gerenciador e pelo sistema especialista na troca de informações através dos arquivos “PARAM.ATD” e “BACK.ATD”.

4. SIMULAÇÃO DE OTIMIZAÇÃO

O ensaio realizado para validação da estratégia de comunicação adotada foi realizado no NUMA em São Carlos. Apesar de os computadores utilizados estarem localizados dentro do mesmo prédio, utilizou-se uma configuração na qual os microcomputadores estavam conectados via Internet.

O envio e o recebimento dos arquivos, "PARAM.ATD" e "BACK.ATD", foram realizados com êxito em apenas alguns segundos, apesar deste depender da velocidade do sistema de rede utilizado. No torno, simulou-se a usinagem de peças, dando início aos ciclos de usinagem para que o *software* gerenciador realizasse a contagem do número de peças usinadas e atualizasse o arquivo "PARAM.ATD". Editou-se manualmente o valor da variável responsável pela medição da peça, com o objetivo de simular o final de vida da ferramenta.

Observa-se que o sistema de monitoramento adotado consistiu em um sensor de emissão acústica, juntamente com um apalpador montado na torre de ferramentas da máquina, já existente e em utilização nos Laboratórios do NUMA. Através deste sensor é possível avaliar o progresso do desgaste da ferramenta pela variação dimensional do diâmetro do corpo de prova.

Graças as características do CNC da máquina-ferramenta utilizada, uma condição do tipo “IF...THEN...” foi possível de ser programada dentro do programa “G” para definir o momento de troca da ferramenta, como sendo aquele para o qual o sensor identificou o limite superior estabelecido para a variação dimensional do diâmetro.

Na outra extremidade, vide Figura 1, o sistema especialista TOES recebeu as informações corretamente e também não apresentou problemas no envio do arquivo "BACK.ATD" alterado. Desta forma, esta simulação permitiu-nos verificar o bom funcionamento da estratégia desenvolvida.

Propositalmente, o cabo de rede que fazia a conexão entre os microcomputadores foi desconectado com a finalidade de simular a queda da linha telefônica e com ela, a interrupção da comunicação via Internet, como resultado o torno interrompeu a fabricação aguardando a resposta do *software* gerenciador. Isto demonstrou que a fragilidade do sistema de comunicação adotado, como uma linha telefônica ou mesmo um cabo de rede, pode comprometer o sistema produtivo a ser otimizado, entretanto, este problema está sendo resolvido através do desenvolvimento de uma rotina em que a máquina-ferramenta terá um tempo máximo para o recebimento de informações do *software* gerenciador. Após este tempo limite, que deverá ser configurado em função do ambiente de rede utilizado, o *software* gerenciador liberará a máquina-ferramenta para a usinagem e somente após o restabelecimento da comunicação via rede ou Internet, da-se-á seqüência ao processo de otimização que fora interrompido, sem entretanto, comprometer a produção de peças

5. CONCLUSÕES

O presente trabalho permite-nos concluir:

- A estratégia de comunicação desenvolvida permite obter a completa automação em otimização de processos de usinagem;
- A metodologia de otimização se mostrou adequada para sistemas automatizados;
- O processo produtivo não corre o risco de sofrer interrupções, em função da fragilidade do sistema de comunicação adotado.

O sistema especialista TOES interage com o CNC da máquina ferramenta através de dois arquivos previamente definidos, que são o arquivo “PARAM.ATD” e o arquivo “BACK.ATD”. O primeiro “PARAM.ATD” é gerado pelo *software* gerenciador e é lido pelo sistema especialista TOES. Já o TOES ao receber as informações existentes no arquivo “PARAM.ATD”, realiza os cálculos necessários e devolve os resultados gravados no arquivo “BACK.ATD”.

Ambos arquivos possuem o mesmo conteúdo, sendo que a diferença entre os nomes adotados foi determinada para evitar possíveis problemas em função de interrupções do sistema de comunicação utilizado. A estrutura do arquivo adotado, é mostrada na Figura 2.

R0	Ordem se serviço	Utilizada pelo CNC da máquina-ferramenta, no armazenamento do nome do programa CNC para a usinagem da peça.
R1	Fim de vida da ferramenta	Possui valor <i>default</i> = 0. No momento em que é decretado o final da vida da ferramenta, este valor é alterado para 1.
R2	Diferença	Armazena o valor obtido na medição da peça. A máquina utilizada possui sistema de medição através de um apalpador em conjunto com sistema de monitoramento por emissão acústica. Após a usinagem de cada peça, é realizada sua medição, através do toque do referido apalpador que encosta na peça, e cujo momento do toque é acusado pela emissão acústica. Neste momento, é armazenado o valor dimensional obtido.
R3	Reservado	Reservado para eventual uso de outros sistemas de monitoramento.
R4	Reservado	Reservado para eventual uso de outros sistemas de monitoramento.
R5	Velocidade de Corte (Vc)	Armazena o valor da velocidade de corte.
R6	Avanço de corte (fn)	Armazena o avanço de corte.
R7	Profundidade de corte (ap)	Armazena o valor da profundidade de corte.
R8	Número de peças usinadas	Armazena o número de peças usinadas. A cada início de ciclo de usinagem da peça, soma-se 1 ao valor inicial (<i>default</i> = 0)
R9	Limite de rotação	Armazena o valor da rotação adotada como limite para a operação.
R10	Medição da peça	Armazena a dimensão limite para o decreto do final da vida da ferramenta.
R11	Reservado	Reservado para eventual uso de outros sistemas de monitoramento.
R12	Controle de liberação	Possui valor <i>default</i> = 0, neste caso, o sistema especialista TOES, ou o <i>software</i> gerenciador, lê as informações do arquivo, mas não dá prosseguimento ao processo de otimização. No momento em que o final de vida da ferramenta é decretado, este valor é alterado para 1, liberando assim, o <i>software</i> gerenciador, ou o TOES, para prosseguir com a otimização.

Figura 2. Estrutura dos arquivos PARAM.ATD e BACK.ATD.

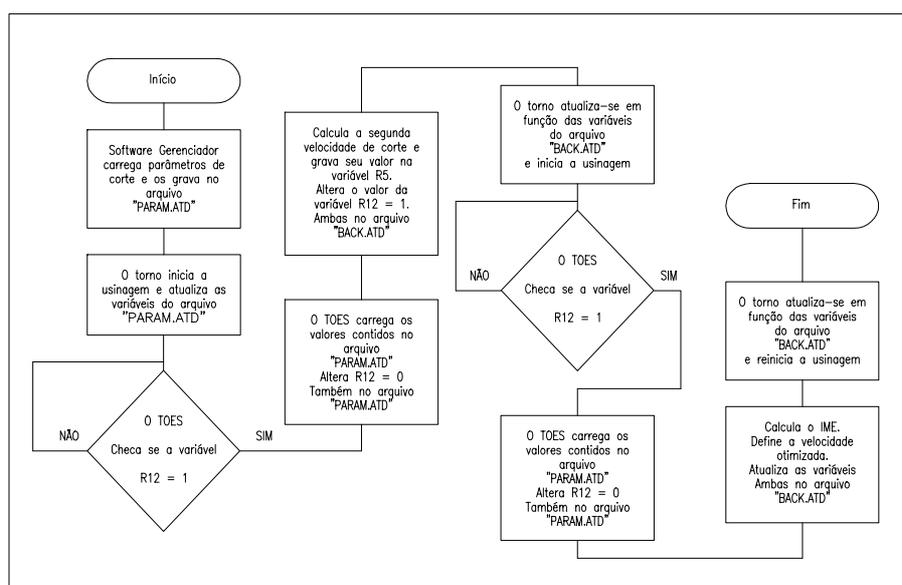


Figura 3. Fluxograma da estratégia de comunicação.

3. ESTRATÉGIA DE COMUNICAÇÃO ENTRE TOES E CNC

A comunicação entre o sistema especialista TOES e o CNC da máquina ferramenta pode ser realizada basicamente via uma rede do tipo LAN (*Local Area Network*) ou uma rede do tipo WAN (*Wide Area Network*).

A rede do tipo LAN permite a conexão e compartilhamento de dados entre microcomputadores em um mesmo ambiente, como uma fábrica ou um escritório. Neste caso, o sistema especialista TOES pode ser instalado em uma máquina localizada em qualquer ponto de conexão da rede, próxima ou não da máquina ou máquinas a serem otimizadas.

Para que a otimização de um processo de usinagem seja possível de ser realizada via Internet, deve-se utilizar uma rede do tipo WAN, neste caso, o microcomputador, no qual reside o sistema especialista TOES, pode estar localizado em qualquer parte onde se tenha acesso a Internet.

As características da máquina-ferramenta utilizada, um torno CNC INDEX pertencente ao NUMA – Núcleo de Manufatura Avançada, da Escola de Engenharia - USP de São Carlos, facilitou o desenvolvimento dos trabalhos devido ao fato de o mesmo possuir um microcomputador do tipo padrão IBM-PC, que é responsável pelo controle de seu CNC. Desta forma, uma placa de rede foi instalada neste microcomputador, permitindo assim, o compartilhamento de sua unidade de disco rígido em um ambiente de rede, LAN ou WAN.

Outra característica importante desta máquina é a possibilidade de uso de variáveis de programação dentro dos programas de usinagem desenvolvidos em linguagem “G”. Assim, é possível reservar uma variável dentro do programa “G”, sendo que o valor desta variável é definido em um arquivo externo, que possui formato texto (ASCII).

Este arquivo pode ser lido, alterado e gravado enquanto o torno realiza operações de usinagem, considerando que somente a cada início de ciclo de usinagem o CNC do torno carrega as informações nele contidas. Este arquivo também é importante para a contagem do número de peças devido ao fato de que uma rotina foi desenvolvida, em linguagem de programação disponível pelo comando numérico, para adicionar o valor 1 (um) a cada início de ciclo de trabalho, em uma variável predefinida que será apresentada mais adiante.

Um outro computador foi utilizado como servidor, também está localizado no NUMA, e faz a conexão entre o sistema especialista TOES e o CNC da máquina-ferramenta. Este servidor foi empregado para possibilitar maior segurança ao sistema. Neste foi instalado um *software* gerenciador, desenvolvido no LabView® – *software* que apresenta recursos para o desenvolvimento de aplicações de aquisição de dados.

Este gerenciador é responsável pela aquisição/recebimento de informações existentes no CNC da máquina ferramenta e no sistema especialista TOES, finalmente, tem-se o computador em que esta instalado o sistema especialista TOES. Um esquema deste sistema é mostrado em detalhes na Figura 1.

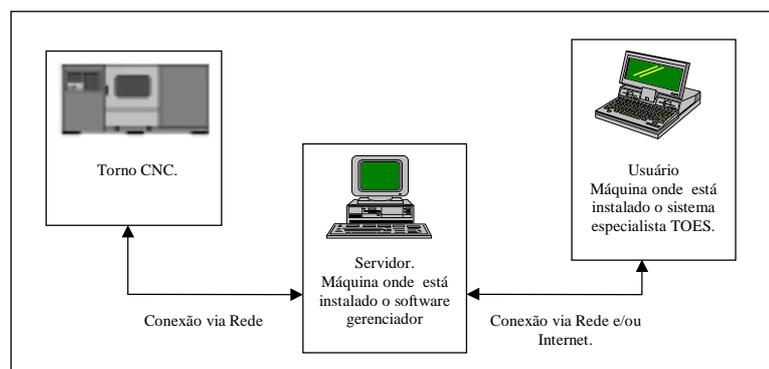


Figura 1. Esquema do sistema utilizado para otimização.

$$k = Zt_1 * (Vc_1)^x * tc_1 \quad (3)$$

$$x = \frac{\log\left(\frac{T_1}{T_2}\right)}{\log\left(\frac{Vc_2}{Vc_1}\right)} \quad (4)$$

Onde tc é tempo de corte, Zt é o número de peças, Vc é a velocidade de corte e T é a vida da ferramenta em minutos. O índice $_1$ representa uma situação diferente do índice $_2$.

E) Calcular : a velocidade de corte de mínimo custo, $V_{c_{mc}}$, velocidade de corte de mínimo custo limite, $V_{c_{mcLim}}$, e a velocidade de corte de máxima produção, $V_{c_{m_{xp}}}$. A $V_{c_{mc}}$, juntamente com a $V_{c_{m_{xp}}}$, compõem os extremos do IME. Já a $V_{c_{mcLim}}$, sempre pertencerá ao IME. Para o cálculo destas velocidades, com conseqüente determinação do IME, devem-se utilizar as equações 5, 6 e 7 descritas logo abaixo :

$$V_{c_{mc}} = \left(\frac{k * (Sh + Sm)}{60 * (x - 1) * [K_{ft} + (Sh + Sm) * T_{ft}]} \right)^{\frac{1}{x}} \quad (5)$$

$$V_{c_{mcLim}} = \left(\frac{k * (Sh + Sm)}{60 * (x - 1) * K_{ft}} \right)^{\frac{1}{x}} \quad (6)$$

$$V_{c_{m_{xp}}} = \left(\frac{k}{(x - 1) * T_{ft}} \right)^{\frac{1}{x}} \quad (7)$$

Onde Sh é o salário homem, Sm é o salário máquina, K_{ft} é o custo do ferramental e T_{ft} é o tempo de troca da ferramenta.

F) Após definição do IME, pode-se adotar a velocidade de corte otimizada para o sistema máquina-ferramenta-peça, isto pode ser realizado respeitando-se o sistema produtivo envolvido. Esta tarefa é realizada pelo TOES e não será abordada aqui por não possuir envolvimento direto com a estratégia de comunicação desenvolvida, tema principal deste trabalho.

Como pode ser observado na metodologia apresentada acima, será necessário anotar os resultados obtidos na usinagem dos lotes de peças quando varia-se a velocidade de corte. Esta tarefa pode ser realizada pelo próprio operador da máquina. Deste modo, o TOES trabalha no modo interativo.

Todos os cálculos necessários são realizados pelo TOES, entretanto, no modo interativo cabe ao operador ou responsável pela otimização do processo a alteração da velocidade de corte na máquina CNC, e também a introdução dos resultados obtidos no TOES. Porém, estas tarefas são realizadas sem interferência humana no modo de otimização automático. Portanto, a rotina de comunicação entre os microcomputadores deve apresentar confiabilidade, evitando-se assim, possíveis acidentes e prejuízos ao sistema produtivo.

O uso da Internet para realização de diagnósticos a distância, em problemas ocorridos em máquinas-ferramenta, vem ocorrendo em empresas Norte Americanas, (Hogarth, 1999) e (Beard, 1999). Nestes casos, utilizou-se de recursos de vídeo conferência para que o responsável pelo suporte técnico orientasse os clientes na outra extremidade, onde, a máquina-ferramenta apresenta problemas. Com este recurso obteve-se economia em relação aos dispêndios ocasionados por viagens, que são realizadas apenas nos casos em que o problema da máquina-ferramenta não apresentou solução adequada com o uso da nova ferramenta.

O presente trabalho objetiva apresentar a estratégia de comunicação desenvolvida que possibilita a otimização da velocidade de corte pelo TOES dentro do conceito de fábrica virtual. Para isto, apresentar-se-á a metodologia adotada para otimização do processo de usinagem, em seguida a estratégia de comunicação desenvolvida e os resultados obtidos em uma simulação de otimização em que a mesma foi testada. Finalmente, apresentam-se as conclusões que demonstram a possibilidade de seu uso na otimização do processo de usinagem em modo completamente automático.

2. METODOLOGIA PARA OTIMIZAÇÃO

A otimização do processo de usinagem no sistema especialista TOES baseia-se na metodologia proposta por Diniz *et al.* (1989). Esta metodologia consiste na determinação, em ambiente fabril, das constantes x e k da equação de Taylor, e conseqüentemente do IME, conforme descrito abaixo.

- A) Determinar os parâmetros de corte de acordo com os procedimentos em uso por parte do responsável pela elaboração do processo de usinagem, como a adoção de valores sugeridos por catálogos de fabricantes de ferramentas, com base na experiência do operador, ou até mesmo, recuperando-se valores armazenados em banco de dados oriundos de experimentos anteriores. Observa-se que os valores da profundidade de corte, ap , e do avanço de corte, fn , adotados, devem possuir os valores máximos possíveis em relação às restrições inerentes ao sistema máquina-ferramenta-peça.
- B) Iniciar a usinagem do primeiro lote de peças até que o final de vida da aresta da ferramenta seja decretado por um critério previamente estabelecido. Anotar o número total de peças, Z_{t1} , usinadas para a primeira aresta da ferramenta.
- C) Alterar o valor da velocidade de corte em $\pm 20\%$ em relação a velocidade de corte utilizada para a usinagem do primeiro lote de peças. Em seguida, iniciar a usinagem do segundo lote de peças até que seja decretado o final de vida da aresta da ferramenta, pelo mesmo critério anterior. Neste momento deve-se anotar o número de peças usinadas, Z_{t2} , para a segunda aresta da ferramenta.
- D) Após a realização da usinagem obtêm-se os valores da vida da ferramenta expressos em número de peças, em que para V_{c1} , obteve-se Z_{t1} , e para V_{c2} , obteve-se Z_{t2} . Assim é possível a determinação das constantes x e k através das equações 2 e 3. É importante observar que a vida da ferramenta também pode ser expressa em comprimento de corte, em metros, ou em tempo, em minutos. Nos casos em que a vida da ferramenta for expressa em comprimento de corte, pode-se também utilizar as equações 2 e 3. Entretanto, em situações em que a vida da ferramenta for expressa em tempo, deve-se utilizar a equação 4 para o cálculo da constante x , juntamente com a equação 3 para o cálculo da constante k .

$$x = \frac{\log\left(\frac{Z_{t1}}{Z_{t2}}\right)}{\log\left(\frac{V_{c2}}{V_{c1}}\right)} + 1 \quad (2)$$

processistas e/ou engenheiros de processo, buscando-se assim, reduzir principalmente os tempos de corte com conseqüente redução do tempo de fabricação da peça. Destaca-se que o emprego de novas ferramentas de corte normalmente respeita as condições sugeridas pelo catálogo do fabricante. São pouco frequentes os relatos sobre a otimização dos parâmetros de corte para a ferramenta de corte em uso.

Tratando-se de parâmetros de corte, pode-se otimizar a profundidade de corte, ap , o avanço, fn , e a velocidade de corte, vc . A profundidade de corte é adotada em função de restrições físicas inerentes à peça, ferramenta e/ou máquina-ferramenta tais como: a camada de sobremetal a ser retirada, o fio de corte da ferramenta, a potência da máquina-ferramenta e outros limitantes referentes aos dispositivos de fixação da peça. Assim sendo, procura-se empregar a maior profundidade de corte possível entre estas restrições.

O avanço é definido basicamente em função do acabamento superficial desejado, desta forma, sua utilização está limitada à faixas de avanço que atendam a este requisito.

Já a velocidade de corte apresenta grande flexibilidade com relação à sua otimização, apesar de seu efeito negativo em relação à vida da ferramenta. Entretanto, otimizando-se a velocidade de corte com base no intervalo de máxima eficiência, IME, podem-se obter melhores resultados com relação aos custos e tempos produtivos (Coppini & Baptista, 1998).

Logo, pode-se otimizar o processo de usinagem do sistema máquina-ferramenta-peça em uso, através de seus parâmetros de corte. Para que a otimização apresente resultados coerentes com o sistema envolvido, as constantes x e k da equação de vida de Taylor devem ser determinadas em ambiente fabril (equação 1).

$$T * v^x = K \quad (1)$$

Onde T é a vida de ferramenta, v é a velocidade de corte.

Entretanto, a constante necessidade de obtenção de dados relativos ao processo de usinagem, aliada à necessidade de resolução de cálculos complexos para a obtenção destas constantes, tem afastado o emprego desta técnica por parte de processistas. Este problema pode ser resolvido através do emprego de sistemas especialistas de usinagem.

Um sistema especialista, o TOES – *Tool Optimization Expert System*, foi especialmente desenvolvido para a otimização da velocidade de corte em ambiente fabril, respeitando-se o cenário produtivo em que é executado o processo alvo da otimização (Coppini *et al*, 1999).

Este sistema pode ser utilizado de modo interativo ou de modo automático. O modo interativo é aquele em que o operador, ou pessoa responsável pela otimização do processo, alimenta o sistema com os resultados oriundos da usinagem e aguarda o resultado calculado pelo TOES.

Visando o aproveitamento dos avanços tecnológicos obtidos na área de tecnologia da informação, principalmente no que diz respeito à Internet, desenvolveu-se uma estratégia que possibilita a interação entre o TOES e o CNC. Esta foi definida de modo que o TOES e o CNC podem estar situados em localidades diferentes, numa mesma fábrica, ou até mesmo, separados por milhares de quilômetros. Deste modo, é possível realizar a otimização de um processo de usinagem através da Internet dentro do conceito de fábrica virtual, de maneira completamente automática.

O modo automático é aquele em que a otimização é realizada sem qualquer intervenção humana, pois, os dados sobre o processo produtivo são previamente cadastrados, assim como no modo interativo, mas neste caso, o sistema especialista recebe as informações complementares necessárias à otimização do processo de usinagem diretamente do CNC da máquina-ferramenta.

OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE USINAGEM APLICADO DENTRO DO CONCEITO DE FÁBRICA VIRTUAL

Elesandro Antonio Baptista ⁽¹⁾

Reginaldo Teixeira Coelho ⁽²⁾

Nivaldo Lemos Coppini ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Faculdade de Engenharia Mecânica e de Produção - FEMP

⁽¹⁾ Universidade Metodista de Piracicaba – UNIMEP - E-mail: m9803057@unimep.br

⁽²⁾ NUMA - Núcleo de manufatura avançada - Escola de Engenharia de São Carlos

⁽²⁾ Universidade de São Paulo - USP - E-mail: rtcoelho@sc.usp.br

RESUMO

A otimização dos processos produtivos tem recebido especial atenção por parte das indústrias nos dias de hoje, visto o aumento da concorrência propiciado, principalmente, pela globalização. Com o objetivo de proporcionar ganho de competitividade em processos de usinagem, desenvolveu-se o TOES – *Tool Optimization Expert System*. Um sistema especialista que possibilita a otimização da velocidade de corte em ambiente fabril, respeitando-se o cenário produtivo e o sistema máquina-ferramenta-peça envolvidos na otimização. Para possibilitar o emprego do TOES em fábricas virtuais, desenvolveu-se uma estratégia para comunicação entre TOES e CNC (Comando Numérico Computadorizado). O presente trabalho objetiva apresentar as estratégias utilizadas para o interfaceamento entre sistema especialista e CNC, que possibilitaram a otimização dos parâmetros de corte de maneira automática, inclusive via rede ou Internet, dentro do conceito de fábrica virtual. Os resultados de testes preliminares permitem concluir que a estratégia utilizada foi adequada, apesar da fragilidade do sistema de comunicação utilizado.

Palavras-chave: Otimização, Sistemas Especialistas, Fábrica Virtual

1. INTRODUÇÃO

Os recentes avanços tecnológicos propiciaram considerável ganho de competitividade para as indústrias manufatureiras, principalmente para as indústrias dos países desenvolvidos que possuem acesso, normalmente mais rápido e em primeira mão, às novas tecnologias. Somando-se a este fato o advento da globalização, tem-se atualmente no Brasil um mercado altamente agressivo, e em muitos casos predatório, com relação à competitividade imposta por produtos importados.

Este novo cenário desencadeou uma corrida, principalmente por parte das indústrias nacionais, em direção à atualização tecnológica. Buscando-se, assim, diminuir o atraso tecnológico existente em relação às indústrias dos países desenvolvidos, e garantir sua sobrevivência (Neves & Proença, 1999).

Em indústrias manufatureiras que possuem, entre seus processos produtivos, processos de usinagem, sempre buscou-se a otimização do processo de fabricação. O emprego de novos dispositivos de fixação, de sujeição, de novas ferramentas de corte, ou até mesmo, o emprego de máquinas mais evoluídas tecnologicamente, são recursos normalmente empregados por