

Utilização de Algoritmos Genéticos para Planeamento de Processos de Maquinação num Torno

João Pedro Muller ¹, Bruno Mota ², Carlos Ramos ² e Carlos Aita ¹

¹ Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina – Campus Xanxerê,
Rua Euclides Hack, 1603 - Bairro Veneza,
Xanxerê – SC
CEP 89820-000, Brazil

² Instituto Superior de Engenharia do Porto, Departamento de Engenharia Informática e Grupo
de Investigação em Engenharia e Computação Inteligente para a Inovação Avançada e Desen-
volvimento, Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431
4249-015 Porto
Portugal
joao.pm10@ifsc.edu.br; 1171198@isep.ipp.pt; csr@isep.ipp.pt;
carlos.aita@ifsc.edu.br

Resumo. O Planeamento de Processos Industriais determina como será produzido cada produto em ambiente fabril. O modo como cada produto individual é fabricado, implica uma série de aspetos que terão impacto no sistema de produção e na gestão do mesmo, particularmente no sucesso ou insucesso que tal produto terá no mercado. Critérios diferentes podem ser considerados, tais como o tempo de fabricação, o custo energético ou a qualidade do produto. Todo este enquadramento ganha uma importância acrescida dentro do conceito da Indústria 4.0. O presente trabalho visa considerar a otimização de processos de maquinação com recurso a uma abordagem de algoritmos genéticos. Os processos de maquinação serão caracterizados por algumas grandezas fundamentais, tais como a velocidade de rotação de um torno, a profundidade de corte e o avanço da ferramenta. O modelo proposto para a elaboração do algoritmo genético é, em primeiro lugar, o desenvolvimento em Python de um serviço API REST que receba e envie pedidos HTTP através do método POST de ficheiros do tipo JSON. Esta API serve como intermediador de comunicação entre solicitantes e o algoritmo genético. O algoritmo genético mapeia conceitos como os de operação, ferramenta e tarefa. A implementação efetuada e estudo dos seus resultados demonstra que os Algoritmos Genéticos são uma abordagem muito efetiva para lidar com um problema sujeito a explosão combinatória, dado ao elevado número de combinações possíveis de valores dos parâmetros de fabricação.

Palavras-chave: Maquinação, Planeamento de Processos, Algoritmo Genético

1 Introdução

A utilização de algoritmos computacionais para resolução de problemas relacionados com o planeamento e a otimização da produção, em especial no que se refere aos processos de maquinação, enquadra-se muito bem no novo cenário da Indústria 4.0, e tem apresentado bons resultados em diferentes aplicações.

O presente trabalho visa considerar a otimização de processos de maquinação com recurso a uma abordagem de algoritmos genéticos. Os processos de maquinação serão caracterizados por algumas grandezas fundamentais, tais como a velocidade de rotação de um torno, a profundidade de corte e o avanço da ferramenta, de acordo com o que é ilustrado na Fig. 1a.

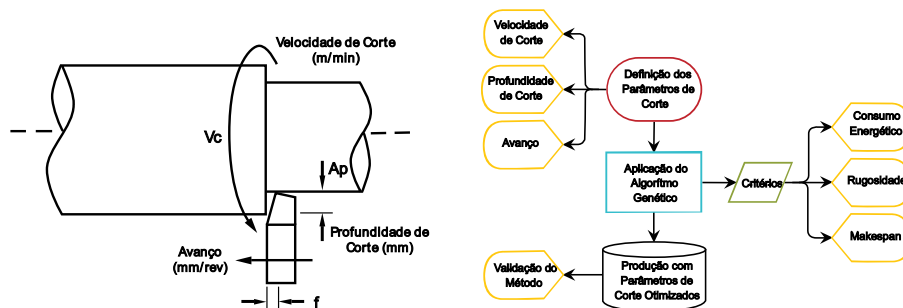


Fig. 1. a) Parâmetros de corte em processos de torneamento. b) Método de atuação do sistema desenvolvido.

Serão considerados vários critérios de otimização, tais como o consumo energético, o tempo de corte e a qualidade superficial medida através da rugosidade de peça fabricada. Nesse sentido o sistema desenvolvido atua de acordo com o que é ilustrado na Fig. 1b.

2 Estado da Arte

2.1 Planeamento de Processos de Maquinação

Diversas pesquisas são voltadas às diferentes formas de integrar a tecnologia digital nos meios de produção, embora vários sistemas deste tipo já tenham sido desenvolvidos, há muita variação em seus métodos e áreas para as quais se aplicam.

A criação de um programa em Comando Numérico (NC) utilizando o método CEPP (Conversion and Execution of Process Plans) para escalonar operações de torneamento em máquinas CNC visando o menor makespan por peça foi feita em [1]. O sistema CAPP (Computer Aided Process Planning) utilizou algoritmos genéticos para, de modo otimizado, sequenciar as operações, selecionar a máquina e as ferramentas em processos de manufatura [2]. Lee et al. [3] apresentam um sistema CAPP para furação em motores marítimos, o qual tem como objetivo gerir furações, definir a sequência de

corte e gerir operações. Negrete [4] utiliza o Método de Superfície de Resposta para otimizar os parâmetros de corte no torneamento de alumínio AISI 6061 T6 com o objetivo de minimizar o consumo energético e a rugosidade superficial, enquanto aumenta a taxa de remoção de material. Rojek [5] desenvolveu um sistema CAPP baseado em redes neurais para a seleção de máquinas, ferramentas e parâmetros de corte.

2.2 Algoritmos Genéticos

Os Algoritmos Genéticos foram propostos por John Holland [6] e encontram como fundamento as descobertas feitas por Charles Darwin e sua Teoria da Evolução das Espécies [6]. Os Algoritmos Genéticos são algoritmos de otimização global, baseados nos mecanismos de seleção natural e da genética. Eles empregam uma estratégia de busca paralela e estruturada, mas aleatória, que é voltada em direção ao reforço da busca de pontos de "alta aptidão". Apesar de aleatórios, eles não correspondem a pesquisas aleatórias não direcionadas, pois exploram informações históricas para encontrar novos pontos de busca onde são esperados melhores desempenhos. Isto é feito através de processos iterativos, onde cada iteração é chamada de geração [7]. Vários trabalhos foram desenvolvidos usando algoritmos genéticos aplicados a área da produção [2,8,9], contudo o trabalho aqui apresentado tem outras vertentes como a consideração de mais condições e critérios.

3 Modelo Proposto

3.1 Modelação do Processo de Maquinação

Torneamento. O torneamento é um processo de maquinação o qual se destina a obter superfícies de revolução através da utilização de ferramentas monocortantes [10]. Neste estudo foram consideradas somente duas operações de torneamento, o desbaste, com várias passagens da ferramenta, e o acabamento, com uma só passagem da ferramenta.

Parâmetros de Corte. A velocidade de corte (V_c), definida em m/min, é a velocidade tangencial com que a ferramenta se desloca sobre a peça [11]. A profundidade de corte (Ap), em mm, é a medida da penetração da ferramenta sobre a peça [10]. Por fim, o avanço (f), dado em mm/rev, é o deslocamento da ferramenta cortante em relação peça a cada rotação, ciclo ou período [12]. Ver Fig. 1.

Modelação dos Critérios. Para melhor descrição do equacionamento dos critérios, o sub escrito “ d ” será utilizado para referir-se às propriedades da operação de desbaste, e o sub escrito “ a ” às do acabamento.

O número de passagens (np), para a operação de desbaste, é função dos diâmetros inicial de desbaste (D_d) e final do acabamento (D_a), dados em mm, e da profundidade de corte do acabamento (Ap_a), e pode ser determinado pela Eq. 1.

$$np = \frac{D_d - (D_a + 2 \cdot Ap_a)}{2 \cdot Ap_d} \quad (1)$$

Caso o valor de np não seja inteiro, este deve ser arredondado para cima, tornando-se np_a . Um valor de np não inteiro significa que a passagem final de desbaste terá uma profundidade de corte e um diâmetro diferente dos demais. A profundidade de corte final (Ap_{df}) e o diâmetro final (D_f) podem ser expressos pelas Eq. 2 e 3 respectivamente.

$$Ap_{df} = Ap_a \cdot [1 - (np_a - np)] \quad (2)$$

$$D_f = D_a - 2 \cdot Ap_{df} \quad (3)$$

Consumo Energético. O valor do consumo energético está relacionado com a potência fornecida pelo motor para realização de cada operação de corte. A potência de corte é obtida por meio da razão entre a potência de corte da operação (P_c) e a eficiência do motor (η_m). A potência do motor (Pm_0), em W, para cada operação, pode então ser estimada pela Eq. 4 [10].

$$Pm_0 \cong \frac{P_c}{\eta_m} \cong \frac{Ks \cdot Ap \cdot f \cdot Vc \cdot 0,016667}{\eta_m} = \frac{460,77 \cdot f^{-0,48} \cdot Ap \cdot f \cdot Vc \cdot 0,016667}{\eta_m} \quad (4)$$

Onde Ks identifica a pressão específica de corte, dada em N/mm^2 , que, através dos dados da norma AWF-158, citada por Ferraresi [10], e por meio de uma função definida por uma linha de tendência, para o Alumínio, é aproximada por $460,77 \cdot f^{-0,48}$.

Por fim, a potência média fornecida pelo motor (Pm) será dada pela média das potências de desbaste e acabamento, assim, reorganizando a Eq. 4 e considerando os diversos passes realizados pela operação de desbaste, define-se uma aproximação para a tal através da Eq. 5.

$$Pm \cong \frac{7,68}{\eta_m \cdot (np_a + 1)} \cdot \{[(np_a - 1) \cdot Ap_a + Ap_{df}] \cdot Vc_d \cdot f_d^{0,52} + f_a^{0,52} \cdot Vc_a \cdot Ap_a\} \quad (5)$$

Tempo Efetivo de Corte. O tempo efetivo de corte em uma operação de maquinação é definido como o tempo decorrido do momento em que a ferramenta toca a peça, iniciando a remoção de material, até a perda do contato, sinalizando o término da operação. No torneamento, o tempo efetivo de corte (T_c) para cada operação pode ser estimado pela Eq. 6, sendo esta dependente do diâmetro da peça (D) e do percurso de avanço (lf) que a operação realiza, ambos medidos em mm [12].

$$T_c = \frac{lf \cdot \pi \cdot D}{1000 \cdot f \cdot Vc} \quad (6)$$

Como o diâmetro da peça é alterado à medida de Ap em todas as passagens da ferramenta, em operações multipassagem, como é o caso do desbaste, este valor deve ser atualizado a cada passagem da ferramenta. Assim, a cada passagem i da ferramenta, o diâmetro será atualizado em $D_{i-1} - 2 \cdot Ap_d$.

Analogamente à potência de corte, o tempo efetivo total de corte (T_{ct}), utilizado como uma simplificação do makespan, é a soma do tempo efetivo de corte do desbaste e do acabamento. Desta forma, considerando $np_a - 1$ os passes de desbaste e $D_0 = D_f$, o tempo efetivo total de corte (T_{ct}) pode ser estimado pela Eq. 7.

$$T_{C_t} \cong \left(\frac{Df + \sum_{i=1}^{np_a-1} (D_{i-1} - 2 \cdot Ap_d)}{f_d \cdot V_{C_d}} + \frac{D_a}{f_a \cdot V_{C_a}} \right) \cdot \frac{l_f \cdot \pi}{1000} \quad (7)$$

Qualidade Superficial (Rugosidade). Como forma de avaliação da qualidade superficial, foi utilizada a medida da rugosidade média (Ra), a qual se refere a média das medidas dos picos e reentrâncias de um perfil da superfície, avaliado dentro de um comprimento de amostragem (ℓ) em relação à linha média (m). Diniz, Marcondes e Coppini [12] propõem uma aproximação da rugosidade média (Ra), dada em mm , em função do raio de ponta de ferramenta (r), em mm , para o processo torneamento, e é dado pela Eq. 8.

$$Ra \cong \frac{f^2}{31,2 \cdot r} \quad (8)$$

3.2 Modelação do Problema com Algoritmos Genéticos

O modelo proposto para a elaboração do algoritmo genético é, em primeiro lugar, o desenvolvimento em Python de um serviço API REST que receba e envie pedidos HTTP através do método POST de ficheiros do tipo JSON. Esta API serve como intermediador de comunicação entre solicitantes e o algoritmo genético.

O domínio do problema do algoritmo genético é constituído principalmente pelos conceitos de operação, ferramenta, tarefa, configuração e plano escalonado de corte. Uma operação representa uma atividade de corte a ser realizada sobre uma peça, por exemplo “Desbaste”. Uma ferramenta é um componente a utilizar numa operação. Uma tarefa realiza o procedimento de corte numa peça. Cada tarefa possui uma ordem de execução, a operação a realizar, a ferramenta a utilizar, o diâmetro da peça em dado passo e o percurso de avanço. O sistema de escalonamento de corte possibilita a configuração de componentes, nomeadamente as condições de paragem, os pesos nos critérios e os parâmetros de otimização. O plano escalonado de corte representa o melhor plano escalonado encontrado pelo algoritmo genético. Este apresenta a lista de tarefas ordenada pela sua ordem de execução e para cada tarefa é apresentada a respetiva operação, ferramenta e parâmetros de usinagem, encontrados pelo algoritmo genético, que melhor concretizam os pesos definidos sobre os critérios consumo energético, rugosidade e makespan.

O escalonador apresenta diversas estatísticas que permitem validar a metodologia tomada. É apresentado o consumo energético, rugosidade e makespan do melhor indivíduo encontrado pelo algoritmo genético, bem como para cada tarefa é apresentado o seu consumo energético e makespan individual. Além disso, é apresentada a média dos parâmetros de usinagem das primeira e última populações do genético. Adicionalmente, é feita a diferença dos parâmetros de usinagem entre o melhor indivíduo da última geração e o melhor indivíduo da primeira geração. Por último, é apresentado o plano escalonado de corte do melhor indivíduo da última geração.

4 Implementação

O escalonamento começa pelo recebimento de um pedido POST HTTP com os dados de entrada em formato de ficheiro JSON. De seguida, existe o tratamento destes dados, os quais são recolhidos do ficheiro JSON para objetos do tipo DTO (Objetos de Transferência de Dados). Após este pré-processamento o algoritmo genético é executado, o qual foi desenvolvido de raiz, sem a utilização de bibliotecas Python. Este, inicialmente, respeitando as restrições impostas, cria uma população inicial que é totalmente aleatória. Uma população é um conjunto de indivíduos, cada um destes representando uma lista ordenada de tarefas, com valores de parâmetros de usinagem e ordens de execução diferentes, como representado na Tabela 1.

Tabela 1. Exemplo de um indivíduo.

Parâmetro/Tarefa	T1	T2	T2	T4
Velocidade de Corte	402.25	700.1	545.23	1000
Profundidade de Corte	1.2	0.65	0.32	2.1
Avanço	0.12	0.23	0.78	0.58

A criação de um indivíduo baseia-se primeiro em definir para cada tarefa os três parâmetros de fabricação: velocidade de corte, profundidade de corte e avanço. A atribuição dos valores aos parâmetros é aleatória, dentro dos limites definidos da operação. De seguida, é definida a ordem das tarefas, por ordem crescente, de forma a que respeite a ordem definida nas tarefas dos dados de entrada. Se duas ou mais tarefas tiverem o mesmo número de ordem, isto significa que estas tarefas, entre si, não possuem ordem, pelo que a geração de uma sequência aleatória é assegurada para estas tarefas. Após o algoritmo genético obter uma população este vai utilizá-la para rodar n gerações ou pôr um certo tempo de execução, em segundos.

Uma geração começa com o cruzamento da população da geração anterior. O cruzamento realizado é feito entre dois indivíduos escolhidos aleatoriamente. O cruzamento realizado é do tipo uniforme, ou seja, o operador de cruzamento seleciona aleatoriamente dois pontos de corte, dividindo os cromossomas de cada progenitor em 3 partes. O cruzamento é aplicado para cada parâmetro de usinagem, como representado na Fig. 2. Como ambos os progenitores são válidos, isto é, as ordens das tarefas estão a ser cumpridas, significa que não é necessário reparar o filho, dado que este também irá ser válido.

Progenitor 1				
Perímetro/Isola	T1	T2	T3	T4
Velocidade de Corte	402.25	700.1	545.23	1000
Profundidade de Corte	1.2	0.95	0.32	2.1
Avanço	0.12	0.25	0.78	0.88

Progenitor 2				
Perímetro/Isola	T1	T2	T3	T4
Velocidade de Corte	385.95	801.78	190.08	2000.02
Profundidade de Corte	1.5	0.85	0.85	3.2
Avanço	0.04	0.09	0.83	0.81

Filho				
Perímetro/Isola	T1	T2	T3	T4
Velocidade de Corte	402.25	700.10	545.23	2000.02
Profundidade de Corte	1.5	0.85	0.32	3.2
Avanço	0.12	0.09	0.83	0.81

Fig. 2. Exemplo do operador de cruzamento.

Seguidamente, a partir da população obtida do cruzamento é feita a mutação da população. Neste procedimento, o algoritmo pega em cada indivíduo e conforme a percentagem de mutação definida nos dados de entrada, este decide se vai ser ou não aplicada a mutação numa tarefa de um dado indivíduo. No entanto, caso se aplique a mutação, esta baseia-se em definir um novo valor para um dos parâmetros de fabricação da tarefa. O valor selecionado é aleatório.

Por último, numa geração, realiza-se a fase de seleção, que permite construir a população que irá passar para a geração seguinte. Esta fase começa com a união da nova e antiga população, ou seja, a população cruzada e mutada com a população inicial da geração. Adicionalmente, filtra-se os indivíduos que se encontrem repetidos na população resultante. De seguida, cada indivíduo, que representa um possível plano, é avaliado através das equações, Eq. 5, Eq. 7 e Eq. 8.

Assim, determinam-se a potência total fornecida pelo motor (Eq. 5), tempo efetivo total de fabricação (Eq. 7) e a rugosidade superficial (Eq. 8) de cada indivíduo. De seguida, é feita a normalização dos valores obtidos, dado que, são de ordens de grandeza diferentes. Posteriormente, de acordo com os pesos definidos, peso da energia (pe), peso do tempo (pt) e peso da rugosidade (pr), a aptidão de cada indivíduo é calculada através da equação Eq. 9.

$$\text{Maximizar} \quad \text{Aptidão} \cong \frac{1}{PmNorm} \cdot pe + \frac{1}{Tc_tNorm} \cdot pt + \frac{1}{RaNorm} \cdot pr \quad (9)$$

É de salientar que os valores da potência total normalizada fornecida pelo motor ($PmNorm$), tempo efetivo total normalizado de corte (Tc_tNorm) e rugosidade normalizada ($RaNorm$) são invertidos, porque quanto menor for um destes componentes melhor é a solução.

Depois, é feita a seleção dos n melhores indivíduos, não repetidos, entre a antiga (a população inicial da geração) e nova população (população cruzada e mutada). Os restantes indivíduos são obtidos a partir de torneios não elitistas entre pares de indivíduos escolhidos aleatoriamente, onde o indivíduo que possui a maior aptidão é aquele tem maior probabilidade de ser escolhido.

Terminando a fase de seleção, inicia-se a próxima geração com a população obtida desta seleção e repete-se novamente todos os procedimentos referidos anteriormente. Por fim, após uma condição de paragem ter sido cumprida, da última população do

genético é extraído o melhor indivíduo, isto é, o plano de tarefas com maior aptidão, gerado pelo algoritmo genético.

Assim, generalizando, através da Eq. 9, que representa a função objetivo, o algoritmo genético tenta minimizar ao máximo a potência total fornecida pelo motor, tempo efetivo total de fabricação e rugosidade superficial, de acordo com os pesos definidos.

O pós-processamento ocorre após a execução do genético, na qual são realizadas as estatísticas do plano obtido.

5 Conclusões

O projeto desenvolvido permite, com grande êxito, determinar os melhores parâmetros de corte para o problema de processos de maquinação. Além disso, possibilita priorizar critérios como potência média fornecida pelo motor, tempo efetivo total de fabricação e rugosidade superficial.

O serviço utiliza algoritmos genéticos, método associado às áreas de Inteligência Artificial, Investigação Operacional e Computação baseada na Vida, para alcançar o melhor resultado possível dentro do problema de maquinação. O algoritmo genético foi testado internamente através de estatísticas fornecidas pelo próprio serviço, as quais apresentaram resultados que permitem concluir que o algoritmo apresenta uma boa evolução a nível genético.

Referências

1. Figueiredo, L., Ramos, C.: CEPP Conversation and Execution of Process Plans, In: International Symposium on Assembly and Task Planning, pp. 325-331, IEEE, Porto, Portugal (1999).
2. Rocha, J., Ramos, C., Vale, Z.: Process Planning Using a Genetic Algorithm Approach, In: International Symposium on Assembly and Task Planning, pp. 338-343, IEEE, Porto, Portugal (1999).
3. Lee, Ch.-S., Lee, J.-H., Kim, D.-S., Heo, E.-Y., Kim, D.-W. (2013): A hole-machining process planning system for marine engines. *Journal of manufacturing systems*, vol.32(1), pp.114-123
4. Negrete, C. C. (2015): Optimization of cutting parameters using Response Surface Method for minimizing energy consumption and maximizing cutting quality in turning of AISI 6061 T6 aluminum, *Journal of Cleaner Production*, vol 91, pp. 109-117.
5. Rojek, I. (2017): Technological process planning by the use of neural networks, *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing*, vol.31(1), pp.1-15.
6. Holland J.H. (1975): *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, University of Michigan Press, Ann Arbor, Michigan; re-issued by MIT Press (1992).
7. A. L. Brun (2020): "Algoritmos Genéticos," Apostila EPAC - Encontro Parana. Comput., pp. 7–10, 2005, Accessed: Jun. 18, 2020. [Online]. Available: <https://sites.icmc.usp.br/andre/research/genetic/>.
8. Sucharski GB, Aguiar LA, Polak PI (2011), et al, Atas do 6º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação
9. D'Addona DM, Teti R (2013) Genetic algorithm-based optimization of cutting parameters in turning processes. In: *Procedia CIRP*. Elsevier B.V., pp 323–328

10. Ferraresi, D.: Fundamentos da Usinagem dos Metais (1969). Edgard Blucher LTDA, São Carlos.
11. Machado, A. R. et al. (2009): Teoria da Usinagem dos Materiais. 1st edn. DEEME - UFU, São Paulo.
12. Diniz, A. E., Marcondes, F. C., Coppini, N. L. (2010): Tecnologia da Usinagem dos Materiais. 7th edn. Artliber, São Paulo.