



VI CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA
VI NATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING
18 a 21 de agosto de 2010 – Campina Grande – Paraíba - Brasil
August 18 – 21, 2010 – Campina Grande – Paraíba – Brazil

GERADORA DE ENGRENAGENS DIDÁTICA

Leandro Tognon, leandro.tognon@ibest.com.br
Leandro Costa de Oliveira, leandro@inf.ufsm.br
Leonardo Nabaes Romano, romano@smail.ufsm.br
Alexandre Dias da Silva, adiass@smail.ufsm.br

Departamento de Engenharia Mecânica, Centro de Tecnologia, UFSM, Av. Roraima, 1000, Cidade Universitária, Bairro Camobi, Santa Maria, RS, 97105-900

Resumo: *Este trabalho trata do projeto de uma máquina-ferramenta destinada à geração de dentes em engrenagens cilíndricas. O desenvolvimento do projeto contempla as quatro etapas clássicas da Metodologia de Projeto de Produto. Na primeira fase, Projeto Informacional, determinaram-se as especificações de projeto da máquina. Na segunda fase, Projeto Conceitual, determinou-se uma concepção adequada aos requisitos estabelecidos. Durante a terceira fase, Projeto Preliminar, determinou-se o leiaute final da máquina, realizou-se a modelagem geométrica, dimensionamento e seleção dos materiais dos componentes, subconjuntos e conjuntos, obtendo-se a lista de materiais e, por fim, o Projeto Detalhado (situação atual do projeto), são fabricados os componentes para montagem, testes e ajustes do protótipo, confirmam-se as especificações técnicas da máquina, revisa-se o projeto para documentação e registram-se as lições aprendidas, concluindo assim o projeto da máquina. Este equipamento, uma máquina-ferramenta especial, foi concebido para dentar engrenagens cilíndricas de dentes retos e helicoidais pelo processo de geração, utilizando como ferramenta de corte uma fresa matriz, sendo controlado através de Controle Numérico Computadorizado - CNC (Computer Numerical Control). O CNC sincroniza o movimento da ferramenta e o movimento da peça a ser usinada, além do movimento de avanço da ferramenta para o caso de engrenagens helicoidais, substituindo o sistema de caixa de engrenagens que é utilizado para este fim nas máquinas dentadoras convencionais. Esta máquina-ferramenta foi projetada em dimensões reduzidas para permitir uma melhor portabilidade e, com isso, atender ao objetivo de ser utilizada para fins didáticos, usinando materiais macios como nylon, madeira, ceras especiais, plásticos para engenharia, etc.*

Palavras-chave: *dentadora, geração de engrenagens, fabricação de engrenagens*

1. INTRODUÇÃO

Segundo Norton (2004) as engrenagens têm uma história longa, desde o tempo pré-bíblico supõe-se que eram usadas em carroças que trafegavam pelo deserto de Gobi. Segundo o mesmo autor, Leonardo Da Vinci já as utilizava em seus desenhos. As primeiras engrenagens eram feitas provavelmente de madeira ou outros materiais fáceis de trabalhar, e seus dentes sendo simplesmente feitos de pedaços de madeira inseridos em um disco ou roda. A partir da revolução industrial é que as máquinas demandaram engrenagens mais precisas e resistentes, desenvolvendo-se assim técnicas de manufatura que permitiam moldar ou cortar dentes em um disco de metal.

A partir do desenvolvimento dessas máquinas-ferramenta, foram surgindo vários tipos de máquina para diferentes trabalhos, entre elas uma máquina específica para dentar engrenagens, a Dentadora.

Segundo Rossi (1970), Dentadoras são máquinas-ferramentas que produzem vãos em torno de uma peça cilíndrica, com o objetivo de criar outros tantos ressaltos (dentes), utilizando o processo de geração e uma ferramenta de corte específica chamada fresa matriz, também conhecida como fresa caracol.

Em 1947, John Parsons, da Parsons Corporation, começou a utilizar a ideia de máquinas-ferramenta com três eixos controlados, para a produção de componentes para indústria aeronáutica. Dois anos depois sua empresa firmou um contrato com a Força Aérea Americana para construir o que seria a primeira máquina com Controle Numérico. Anos mais tarde o instituto de Tecnologia de Massachusetts assumiu o projeto, e em 1952 eles demonstraram que movimentos em três eixos simultâneos eram possíveis e após alguns ajustes no projeto o Controle Numérico tornou-se disponível para a indústria em 1955 (Seames, 2001).

As primeiras máquinas com Controle Numérico eram controladas por cartões ou fitas perfuradas, mas devido ao tempo e trabalho para modificar uma fita os computadores começaram a serem usados em conjunto com o Controle Numérico, surgindo assim o Controle Numérico Computadorizado ou CNC (Seames, 2001).

Em 1970, os sistemas CNC, controlados por mini ou microcomputadores, foram desenvolvidos para habilitar as máquinas-ferramenta a serem adaptadas rapidamente a diferentes tipos de trabalho apenas alterando o seu programa de controle, ou software. Conseqüentemente, máquinas-ferramenta CNC eram mais fáceis de operar e mais versáteis do

que as que utilizavam somente Controle Numérico, sendo mais baratas para manter e geralmente mais precisas. Sistemas CNC podem ser usados com uma grande variedade de máquinas-ferramenta tais como fresadoras e tornos

As máquinas NC e CNC têm a vantagem da repetibilidade na fabricação de peças e podem produzir peças com geometrias muito mais complexas.

O objetivo deste trabalho é apresentar os resultados do projeto de uma Dentadora para fabricação de engrenagens cilíndricas de dentes retos ou helicoidais, utilizando Comando Numérico Computadorizado para movimento e sincronismo entre os eixos de trabalho da máquina, sendo em tamanho reduzido para utilização didática.

2. GERAÇÃO DE ENGRENAGENS

A Dentadoras são máquinas-ferramenta especiais que produzem somente engrenagens, as quais, segundo Norton (2004), são usadas para transmitir torque e velocidade angular em uma ampla variedade de aplicações, existindo vários tipos, dentre elas, as engrenagens cilíndricas de dentes retos, de dentes helicoidais, cônicas, rodas helicoidais para parafuso sem-fim, etc. Gavryushin *et al.* (1967) classifica o processo de fabricação de engrenagens em dois principais métodos: formação ou geração.

Formação: é o processo que usa uma ferramenta de corte que possui a forma dos vãos que serão criados na peça cilíndrica e durante o tempo em que a ferramenta talha o dente, a peça permanece fixa no caso de engrenagens de dentes retos, ou movimenta-se no sentido da hélice dos dentes no caso de engrenagens de dentes helicoidais, conforme a Fig. (1).

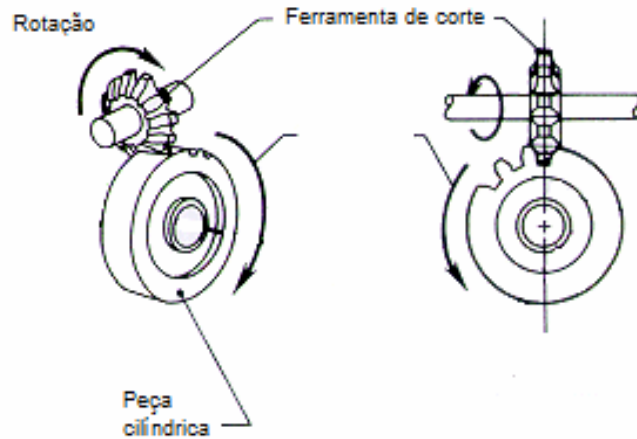


Figura 1. Engrenagem pelo Método de Formação – Modificado de BYU (2009).

Geração: é o processo que se caracteriza por haver movimento relativo entre a peça a usinar e a ferramenta. Neste processo a forma do perfil da ferramenta não é igual ao perfil do dente a talhar, podendo-se então usinar engrenagens de diversos números de dentes utilizando a mesma ferramenta, desde que seu módulo seja igual ao da engrenagem a produzir. A Fig. (2) demonstra o processo de geração.

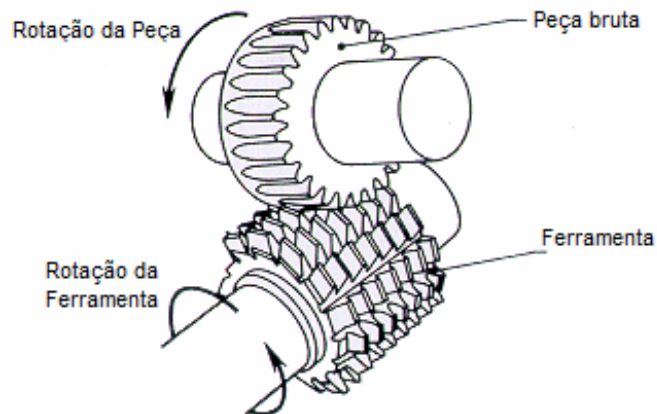


Figura 2. Engrenagem pelo Método de Geração – Modificado de BYU (2009).

As geradoras de engrenagens, também chamadas de dentadoras, são máquinas-ferramenta especiais que produzem somente engrenagens pelo processo de geração.

3. PROJETO DA GERADORA DE ENGRELAGENS

Conforme suas especificidades, o projeto foi executado segundo os preceitos metodológicos descritos em Pahl *et al.* (2005) e Back *et al.* (2008), contemplando as fases de Projeto Informacional, Projeto Conceitual, Projeto Preliminar e Projeto Detalhado.

3.1. Fase de Projeto Informacional

Nesta fase foram estabelecidas as especificações de projeto determinantes para a solução do problema. Para tal, foram identificadas primeiramente as necessidades dos usuários, sendo estas desdobradas e definidas como requisitos dos clientes e, a partir destes, foram definidos os requisitos de projeto (métricas) considerando aspectos funcionais, de segurança, ergonômicos, entre outros. Uma vez conhecidos os requisitos de projeto atribuiu-se valores metas aos mesmos, obtendo-se as especificações de projeto que a concepção da máquina a ser desenvolvida deve atender. Para exemplificar, apresentam-se alguns requisitos dos clientes considerados no projeto:

- Produção de engrenagens de dentes retos e helicoidais;
- Usinagem de materiais macios, como madeira e materiais plásticos.
- Produção de vãos igualmente espaçados em torno de uma peça cilíndrica;
- Máquina com dimensões reduzidas em relação às máquinas convencionais;
- Sincronização entre a ferramenta e a peça; e,
- Automatização do processo de corte de engrenagens;

Da análise destes requisitos depreendeu-se que a produção de vãos igualmente espaçados em torno de uma peça cilíndrica gerando uma engrenagem através de um processo automatizado é o requisito básico do projeto, ou seja, determinante para o sucesso da solução projetual. Os requisitos dos clientes foram convertidos nos seguintes requisitos de projeto (principais):

- Largura da máquina (mm);
- Profundidade da máquina (mm);
- Altura da máquina (mm);
- Peso da máquina (kg);
- Diâmetro da engrenagem a ser usinada (mm);
- Espessura da engrenagem a ser usinada (mm);
- Avanço axial da ferramenta (mm/volta);
- Velocidade de corte fixa (m/min);
- Dureza do material (HR); e,
- Altura do dente (mm).

3.2. Fase de Projeto Conceitual

Nesta fase foi gerada a concepção da máquina de acordo com as especificações de projeto estabelecidas na fase anterior. Primeiramente foram identificados os problemas essenciais que norteiam o projeto de modo a permitir a definição precisa da função global e das respectivas subfunções. Assim, para o projeto da Dentadora têm-se os seguintes problemas essenciais: produzir vãos igualmente espaçados em torno de uma peça cilíndrica; sincronizar o movimento rotacional entre a peça a ser usinada e a ferramenta de corte; automatizar o movimento da peça, ferramenta e avanço de corte; produzir engrenagens de dentes retos e helicoidais; e, ser de tamanho reduzido em relação às máquinas-ferramenta industriais. A função global definida para a Dentadora é de produzir vãos igualmente espaçados em torno de uma peça cilíndrica previamente usinada, de forma automatizada. As subfunções definidas para a Dentadora incluem: fixar a peça cilíndrica (deve-se ter um sistema para fixar a peça e após a operação retirá-la sem muita complexidade); fixar a ferramenta (deve-se ter um sistema para fixar a ferramenta fresa-matriz, com possibilidade de troca simplificada da mesma); ajustar posição angular da ferramenta (deve-se ter um sistema para posicionar angularmente a ferramenta segundo a orientação e o tipo de dente da engrenagem a ser usinada, e o passo de hélice da ferramenta); aproximar a peça da ferramenta (deve-se ter um sistema para aproximação relativa entre a peça a ser usinada e a ferramenta de corte); acionar/desacionar a rotação da peça e da ferramenta (deve-se ter um sistema de acionamento/desacionamento do movimento rotativo da peça e da ferramenta de forma automatizada); acionar avanço da ferramenta (deve-se ter um sistema que produza o movimento de avanço da ferramenta para produzir os vãos na peça cilíndrica); gerar dentes na peça cilíndrica (deve-se ter um sistema que sincronize o movimento de avanço da ferramenta e o movimento rotacional da peça, produzindo assim os dentes da engrenagem). A Fig. (3) ilustra o diagrama das funções descritas acima.

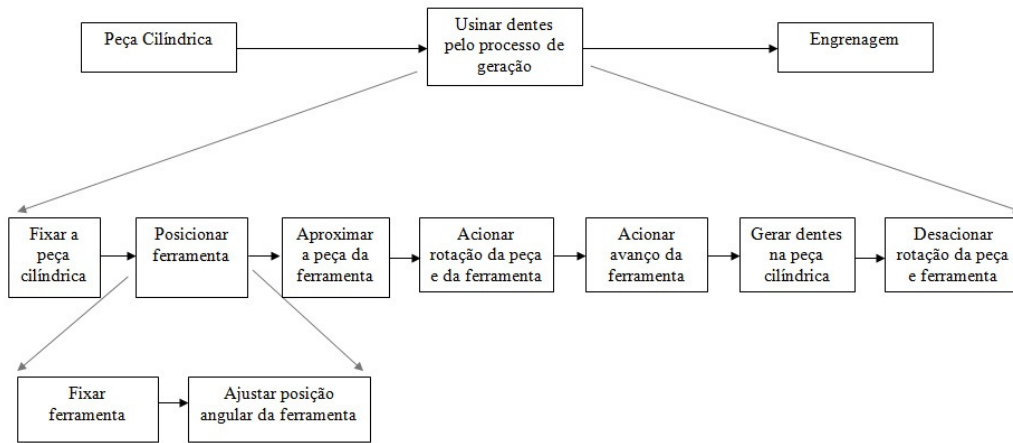


Figura 3. Árvore de funções. (Tognon, 2009)

Conhecidas as subfunções da Dentadora partiu-se para a busca de princípios de solução a integrar a concepção da máquina. A Fig. (4) ilustra os princípios de solução escolhidos para a concepção, respectivamente para as funções fixar peça cilíndrica, fixar ferramenta, posicionar ferramenta angularmente, aproximar peça da ferramenta, avançar ferramenta.

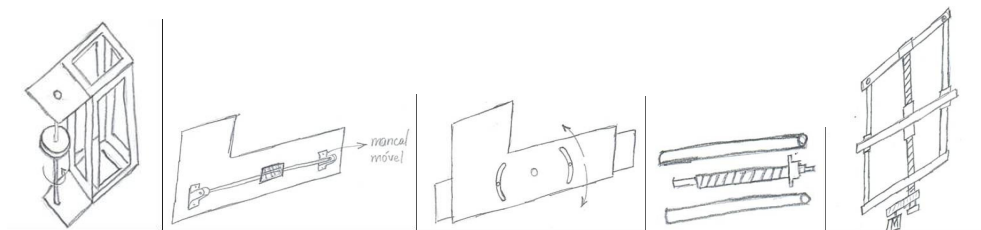


Figura 4. Esboços dos princípios de solução escolhidos para a concepção da Dentadora. (Tognon, 2009)

Para garantir o sincronismo entre as funções de acionar a rotação da peça cilíndrica e da ferramenta, bem como acionar o avanço da ferramenta, foi decidido pela utilização de Comando Numérico Computadorizado, neste caso o software *Mach 3* e motores de passo. A Fig. (5) ilustra o ambiente do software escolhido.

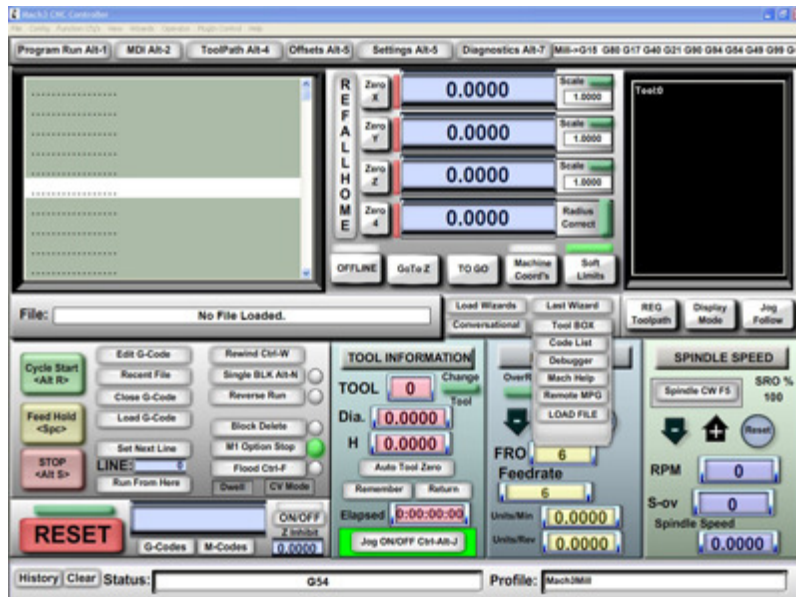


Figura 5. Tela do Software *Mach 3*. (Tognon, 2009)

3.3. Fase de Projeto Preliminar

Esta é a fase do projeto onde a partir da solução básica constrói-se uma estrutura de produto, de uma maneira mais clara e completa seguindo critérios técnicos e econômicos, definindo-se os materiais a serem utilizados e os processos de manufatura que serão empregados, elaborando os desenhos técnicos de peças e conjuntos e assim definindo as dimensões principais e demais dimensões presentes na máquina. Para a estrutura da máquina foi escolhido o perfil “L”, sendo considerada a união parafusada. Para movimentação dos eixos, que nesta máquina são três, considerou-se o uso de motores de passo.

A Fig. (6) apresenta a macro-árvore genealógica da Dentadora didática CNC, sendo: G1 – conjunto peça; G2 – conjunto ferramenta; e, G3 – conjunto estrutural.

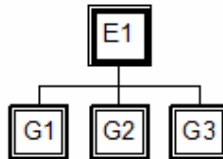


Figura 6. Macro-árvore genealógica da Dentadora. (Tognon, 2009)

A partir da construção da macro-árvore genealógica da máquina foram definidas as árvores genealógicas de cada conjunto, o que permitiu a estruturação dos mesmos, apresentados nas seções seguintes.

3.3.1. Conjunto Peça (G1)

Este é o conjunto responsável pela fixação da peça cilíndrica bruta, Fig. (7), assim como movimento rotacional da mesma. Este movimento, associado ao movimento da ferramenta, permitirá a determinação do número de dentes da engrenagem a ser usinada. Estes movimentos, também serão diferenciados em função do tipo de engrenagem cilíndrica, se de dentes retos ou helicoidais, de hélice à direita ou à esquerda.

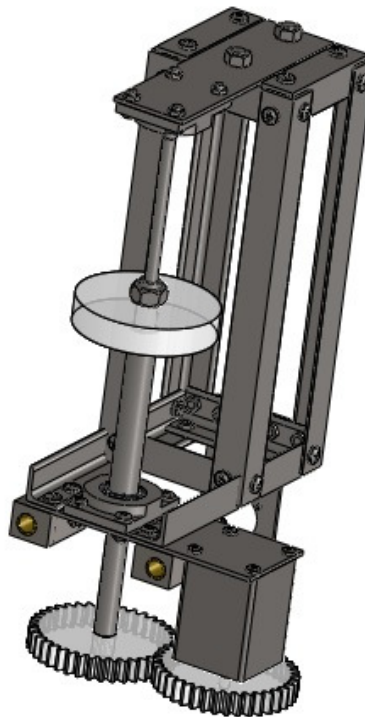


Figura 7. Conjunto perfilado para fixação da Peça. (Tognon, 2009)

3.3.2. Conjunto Ferramenta (G2)

Conjunto responsável pelos movimentos envolvidos no corte da peça, controlando avanço da ferramenta, velocidade de corte, inclinação da ferramenta, conforme mostra a Fig. (8). O acionamento da ferramenta é realizado por

motores de passo, tendo uma redução de engrenagens para adequação da faixa de rotação de trabalho na região de maior torque do motor.

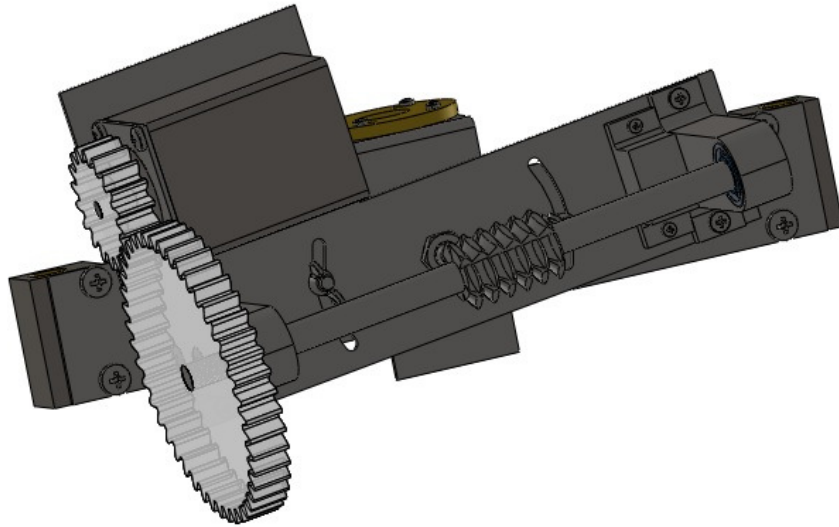


Figura 8. Conjunto ferramenta G2. (Tognon, 2009)

3.3.3. Conjunto Estrutural (G3)

Conjunto responsável pela estrutura geral da máquina, que garantirá rigidez à mesma, apresentada na Fig (9). Esta estrutura foi projetada de modo a suportar todos os demais conjuntos.



Figura 9. Conjunto Estrutural G3. (Tognon, 2009)

3.3.4. Modelo Digital

Nas Figuras 10, 11 e 12 são apresentadas vistas da máquina (modelo digital), com seus conjuntos, subconjuntos e itens montados de modo a se ter uma visão completa da máquina totalmente montada.

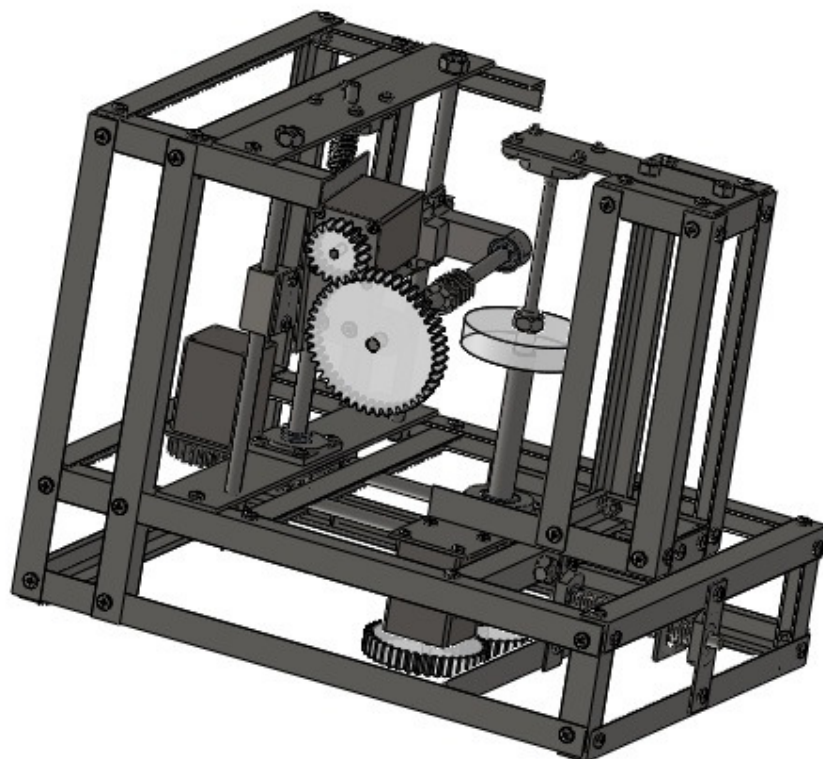


Figura 10. Modelo digital da Dentadora – anterior. (Tognon, 2009)

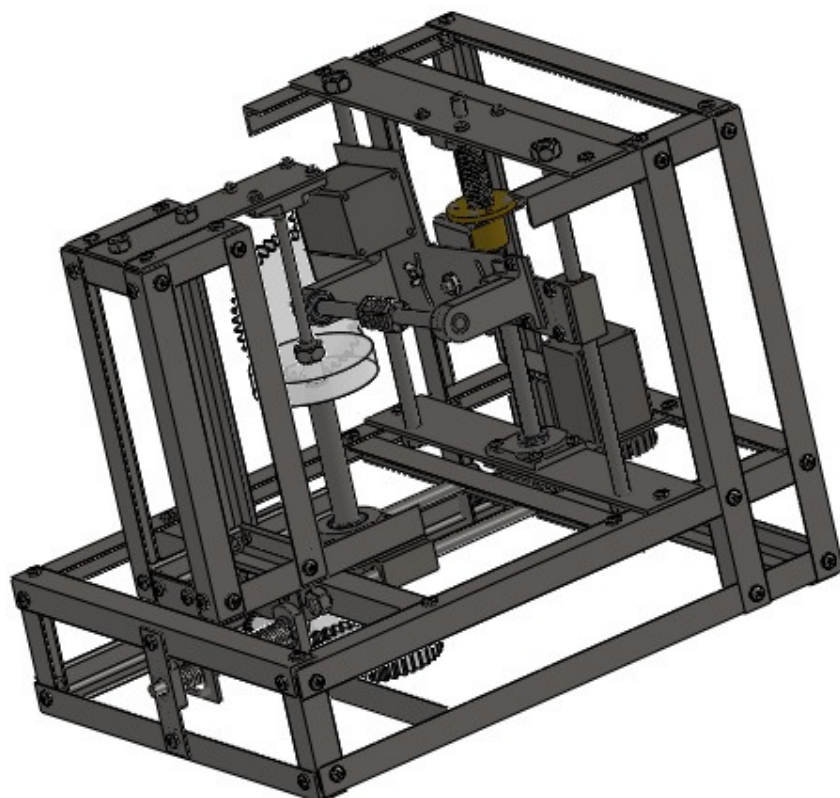


Figura 11. Modelo digital da Dentadora – posterior. (Tognon, 2009)

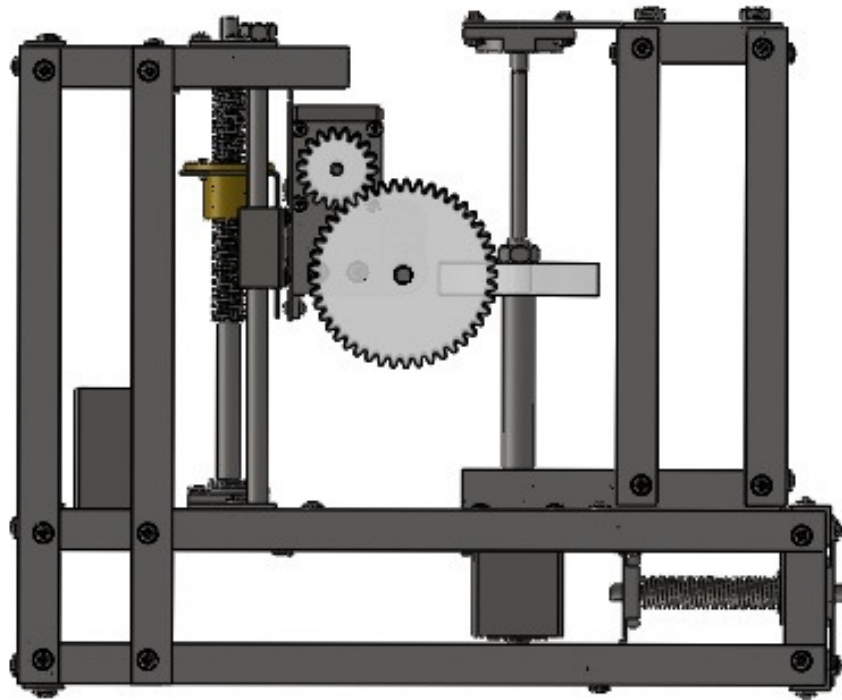


Figura 12. Modelo digital da Dentadora – frontal. (Tognon, 2009)

3.4. Memorial de Cálculo

Para a realização deste projeto, alguns aspectos foram considerados e dimensionados de modo a atender os requisitos propostos.

3.4.1. Combinações possíveis de fabricação de engrenagens para esta dentadora

A dentadora proposta, por ter pequena dimensão e ser de aplicação didática, é indicada para módulos de 1 a 3 mm, o que permite a fabricação de engrenagens de até 98 dentes, para módulo 1 mm, 48 dentes para módulo 2 mm e 31 dentes para módulo de 3 mm, além de valores intermediários.

3.4.2. Força de corte

No processo de corte da peça bruta existe a força de corte envolvida na usinagem. Para o cálculo da mesma foi considerada a maior engrenagem a ser produzida nesta máquina, ou seja, a engrenagem de 31 dentes, com módulo de 3 mm. Considerando que, para a pior situação, a ferramenta retire material a uma espessura igual ao avanço máximo axial da ferramenta (requisito técnico estabelecido), que é 1mm por volta da peça, então a força de corte será de 202 N. Nesta determinação foi considerado a usinagem de madeira.

3.4.3. Cálculo das engrenagens de transmissão da ferramenta, peça e fuso do avanço da ferramenta

Para o conjunto ferramenta, a transmissão é determinada a partir da força de corte encontrada e do torque necessário no eixo da ferramenta, igual a 3,03 N.m. Visando trabalhar no maior torque do motor, que é de aproximadamente 1,45 N.m, com velocidade de 1 rps, obteve-se uma relação de engrenamento de 0,48. Logo, em função da fixação dos eixos e sua distância, com módulo 2,5 mm, as engrenagens calculadas são de 45 dentes no eixo da ferramenta e 18 dentes no motor de passo.

Para o conjunto peça não há necessidade de alterar o torque, visto que o motor trabalhará a uma velocidade inferior a 1rps, que é onde ele possui o maior torque possível. Logo, em função da distância entre eixos e usando módulo de 2,5 mm, as engrenagens são de 38 dentes para o motor de passo e 39 dentes para o eixo da peça.

Para o conjunto fuso do avanço da ferramenta também não há necessidade de alterar o torque, visto que o motor trabalhará a uma velocidade determinada pelo projeto e que será inferior a 1rps, que é onde ele possui o maior torque possível. Logo são empregadas duas engrenagens de 27 dentes de módulo 2,5 mm.

3.4.4. Cálculo das forças no eixo que suporta a peça bruta

O eixo no qual a peça bruta é fixada para posterior usinagem está sujeito a forças de flexão devido à ação da força de corte imposta pela ferramenta à peça. Assim pode-se considerar o eixo como uma viga bi-apoiada com uma força fletora de intensidade igual à força de corte multiplicada pelo raio da peça bruta.

Para a pior situação, onde a peça bruta terá 50mm de raio, obteve-se para o diâmetro do eixo igual a 14 mm o valor calculado de tensão igual a $\sigma = 37,5$ MPa. Como a tensão máxima admissível do aço SAE 1045 é de $\sigma = 565$ MPa e o valor calculado foi menor que o valor admissível, então conclui-se que o eixo não romperá devido à ação da força de corte na peça.

3.4.5. Cálculo das forças de tração dos parafusos que suportam os motores de passo

Os parafusos que fixam os motores de passo do conjunto peça e o motor responsável pelo avanço da ferramenta estão sujeitos a forças de tração exercidas pelo peso do próprio motor.

Sendo a massa do motor de 1Kg, e como são quatro parafusos M5 que sustentam o motor, então a tensão em cada parafuso será de $\sigma = 172,5$ MPa. Segundo informações obtidas em Norton (2004), a resistência mínima à tração para parafusos M5 é de $\sigma = 420$ MPa, então para a situação dos parafusos a tensão encontrada é inferior a tensão admissível, concluindo assim que os parafusos suportarão o esforço imposto pelo motor de passo.

4. CONCLUSÃO

Considerando o objetivo de apresentar os resultados do projeto de uma Dentadora para fabricação de engrenagens cilíndricas de dentes retos ou helicoidais, utilizando Comando Numérico Computadorizado para movimento e sincronismo entre os eixos de trabalho da máquina, sendo em tamanho reduzido para utilização didática, conclui-se que o mesmo foi plenamente atingido. O projeto seguirá o seu curso com a fase de Projeto Detalhado (situação atual), onde serão fabricados os componentes para montagem, testes e ajustes do protótipo.

5. REFERÊNCIAS

- ARTSOFT USA, 2009, “Software Mach 3”, Disponível em: <<http://www.machsupport.com/>>. Acesso em 25 nov. 2009.
- Back, N., Ogliari, A., Dias, A., Silva, J. C., 2008, “Projeto Integrado de Produtos: Planejamento, Concepção e Modelagem”, Ed. Manole, Barueri, SP.
- BYU - Brigham Young University, 2009, “Gear Hobbing”. Disponível em: <<http://class.et.byu.edu/mfg130/processes/descriptions/mechanicalreduction/gearhobbing.htm>>. Acesso em 25 nov. 2009
- BYU - Brigham Young University, 2009, “Gear Milling”. Disponível em: <<http://class.et.byu.edu/mfg130/processes/descriptions/mechanicalreduction/gearmilling.htm>>. Acesso em 25 nov. 2009
- Gavryushin, A., Lisitsyn, N., Trifonov, O., 1967, “Metal-cutting Machine Tools”, Translated by Nicholas Weinstein. MIR Publishers, Moscow.
- Norton, R. L., 2004, “Projeto de Máquinas, Uma abordagem integrada”, 2ª ed. Trad. João Batista de Aguiar *et al.* Ed. Bookman, Porto Alegre, RS.
- Rossi, M., 1970, “Máquinas-Operatrizes Modernas”, Trad. Ferdinando Bacocoli *et al.*, Livro Ibero-Americano, Rio de Janeiro, RJ.
- Seames, W. S., 2001, “Computer Numerical Control: Concepts and Programming”, 4ª Ed., Editora Cengage Learning.
- Tognon, L., 2009, “Dentadora Didática Parcialmente Automatizada”, Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS.

6. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

DIDACTIC GEAR-HOBGING MACHINE

Leandro Tognon, leandro.tognon@ibest.com.br
Leandro Costa de Oliveira, leandro@inf.ufsm.br
Leonardo Nabaes Romano, romano@smail.ufsm.br
Alexandre Dias da Silva, adiass@smail.ufsm.br

Departamento de Engenharia Mecânica, Centro de Tecnologia, UFSM, Av. Roraima, 1000, Cidade Universitária, Bairro Camobi, Santa Maria, RS, 97105-900

This paper addresses the design of a machine tool for the generation of teeth on spur gears. The development project includes the four classic steps of the Methodology for Product Design. In the first phase, Project Informational, they were determined the design specifications of the machine. In the second phase, Conceptual Design, it was determined the appropriate conception for the established requirements. During the third phase, Preliminary Design, it was determined the final layout of the machine, the geometric modeling, sizing and selection of materials of components, subassemblies and assemblies, obtaining a list of materials and, finally, the Project Detailed (current status of the project), the components for assembly are manufactured, the prototype is tested and adjusted, the technical specifications of the machine are confirmed, the project is reviewed for documentation and record the lessons learned, thus completing the project machine. This equipment, a machine tool especially designed for tooth spur gears and helical spur by the generation process, using a hob as cutting tool, controlled by Computer Numerical Control - CNC. The CNC synchronizes the cutter movement and the movement of the part to be machined, besides of the forward movement of the cutter in case of helical gears, replacing the gearbox system that is used for this purpose in conventional gear-hobbing machines. This machine tool is designed with reduced dimensions to add some portability and also in order to be used for teaching purposes, machining soft materials such as nylon, wood, wax special engineering plastics, etc.

Keywords: gear-hobbing machine, gear generation, gear manufacturing