

RETROFITTING DE FRESADORA UNIVERSAL DESTINADA A FABRICAÇÃO DE ENGRENAGENS HELICOIDAIS DE LONGO COMPRIMENTO

Murilo Ugioni Silva¹

Clauber Roberto Melo Marques²

Resumo: A aquisição de máquinas renânia convencionais ou CNCs, com transmissão via trens de engrenagens, apresentam-se como a solução mais óbvia e objetiva na fabricação de engrenagens de dentes retos ou helicoidais. Contudo devido a inexistência de fabricantes de máquinas renânia em território nacional e ao seu elevado custo de aquisição internacional, indústrias, principalmente de pequeno porte, possuem dificuldades em fabricar engrenagens em seus parques fabris. Com a necessidade de fabricar engrenagens helicoidais de longo comprimento, por parte de uma indústria metalúrgica, foi solicitado a realização de retrofitting em uma fresadora universal, afim de modernizar e aprimorar o processo atualmente existente no país. A melhoria visa ampliar a produção de engrenagens mantendo-se o mesmo quadro de funcionários, a fim de aprimorar sua fabricação para se adequar aos concorrentes internacionais. Para isso o objetivo principal foi inserir servo motores de alta resolução ao processo, substituindo-se assim os trens de engrenagens presentes na fresadora universal. Ao finalizar o retrofitting, com os devidos testes realizados, notou-se melhorias importantes ao processo, como: redução no tempo de setup, 20 para 5 minutos, redução no tempo de fabricação da engrenagem de 90 minutos para 35 minutos, eliminou-se a presença de óleo no ambiente e a qualidade superficial dos dentes foi aprimorada. O retrofitting realizado apresentou-se como um processo de prática instalação, baixo custo e alta durabilidade, dessa forma almeja-se utilizar a estrutura mecânica de máquinas usadas para fins de fabricação de máquinas próprias, semi-automáticas, as quais representam a solução presente e futura na fabricação de engrenagens industriais.

Palavras-chave: retrofitting, engrenagens, servo motor, fresadora.

1 INTRODUÇÃO

Conforme o livro “Global Gear Manufacturing Market”, publicado pela editora TechNavio em novembro de 2021 que aborda a previsão no aumento do consumo mundial de engrenagens entre 2022 e 2026, demonstra que a fabricação de engrenagens deve crescer 73,66 bilhões de dólares, progredindo a uma CAGR (taxa de crescimento anual composta) de 5,73% durante o período de previsão. Esta pesquisa se baseou em 25 grandes indústrias do setor, como a WEG equipamentos, Siemens AG, SEW-Eurodrive, Sumitomo e Johnson Electric.

Com o crescimento do consumo mundial de engrenagens, os custos de produção e a qualidade final do produto se tornam decisivos na aquisição de uma fatia das vendas deste mercado. Para se alcançar tal objetivo, principalmente para a

¹ Graduando em Engenharia Mecatrônica. E-mail: murilo_us_@hotmail.com

² Professor Clauber Roberto Melo Marques do Centro Universitário UniSATC
E-mail: clauber_marques@satc.edu.br

indústria de pequeno porte, não somente envolve realizar investimentos em novas máquinas, mas também se deve verificar a possibilidade de novas melhorias ao processo já existente através de um investimento de baixo risco (custo).

Para a implantação desta melhoria, faz-se necessário o uso de equipamentos precisos e robustos que substituam os trens de engrenagens nas fresadoras universais e que, neste caso, representa exatamente a aplicação do uso síncrono de servo motores.

A mudança se tornou necessária após constatar que o processo de fabricação de engrenagens, com transmissão via trens, apresentava diversos pontos negativos. Para tais pontos se podem citar o alto ruído gerado pelo contato entre os dentes das engrenagens, manchas de óleo presentes ambiente de trabalho e o elevado tempo de setup da máquina (20 min.). Além disso, há também a necessidade de fabricação de alta quantidade de engrenagens (estoque para troca das grades) e a necessidade de um operador extra para a troca das grades no tempo de setup.

A necessidade de mudança e modernização no processo fabril demonstra-se necessário, para se controlar os resultados da produção de forma confiável e para que as metas e as demandas fossem alcançadas. Assim a IMESC (Indústria Metalúrgica Sul Catarinense LTDA), como uma fabricante de engrenagens helicoidais de longo comprimento, tendo ciência disso, investiu capital para realizar um retrofitting em uma de suas fresadoras universais do parque fabril.

Essa melhoria implica em mudanças como a remoção da necessidade do segundo operador para montagem dos trens de engrenagem, previsão de redução no tempo de usinagem devido aos menores esforços mecânicos sobre os motores e pela possibilidade de utilização de ferramentas com mais de uma entrada de corte. Promove também a facilidade no procedimento de setup da máquina prevendo sua redução para 5 minutos, redução do tempo de usinagem para no máximo 35 minutos e acabamento superficial de corte melhorado.

Tem-se por objetivo do projeto, promover um sistema de adaptação prática e de funcionamento simples, introduzir servo motores e remover componentes mecânicos rotativos que são agressivos ao operador. Garantir precisão suficiente para realizar a fabricação de engrenagens de longo comprimento e fomentar o mercado de máquinas usadas, com uma solução às pequenas empresas.

1. 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Antes de se efetuar qualquer processo de automação em um sistema que até então se constitui de forma mecânica, faz-se necessário uma breve pesquisa e fundamentação sobre o tema, baseando-se em artigos, livros ou publicações acadêmicas de âmbito nacional e internacional a fim de estruturar ideias e conceitos sobre os equipamentos e métodos necessários para fabricação de engrenagens.

2.1 GERAÇÃO DE ENGRENAGENS VIA *HOBGING*

O processo de usinagem via *hobbing* é exclusivo para a fabricação de engrenagens cilíndricas de dentes retos ou helicoidais. Frequentemente empregado na geração de engrenagens com dentes externos (MAZZO, 2013). Tal processo pode ser observado também na fabricação seriada de polias sincronizadas, as quais seus dentes são gerados via *hobbing*.

O fresamento pode ser demonstrado como um sistema coroa e sem-fim, onde a coroa representa a futura engrenagem helicoidal e o eixo sem-fim representa a ferramenta (KLOCKE, 2011). Esta ferramenta no Brasil chama-se fresa caracol e pode ser representada por um eixo sem-fim com interrupções em seus dentes, formando assim arestas de corte.

2.2 FERRAMENTA UTILIZADA NO PROCESSO DE HOBGING

A fresa caracol, “como trata-se de uma rosca sem-fim, é perfeitamente possível construí-lo com uma ou mais entradas, a fim de reduzir, significativamente, o tempo de produção” (KALPAKJIAN, 2000, p. 684). Dessa forma, o tempo de usinagem se divide proporcionalmente ao número de entradas da ferramenta, a figura 1 abaixo demonstra uma fresa caracol.

FIGURA 1: Fresa Caracol



Fonte: Klocke (2011)

2.3 TRENS DE ENGENHAGENS

Um trem de engrenagem se define como um conjunto de duas ou mais engrenagens posicionadas. Conforme Collins (2017), um trem de engrenagens é uma sequência de várias engrenagens acopladas de tal forma que a velocidade de saída, o torque ou o sentido de rotação desejada são obtidos utilizando-se condições de entrada específicas.

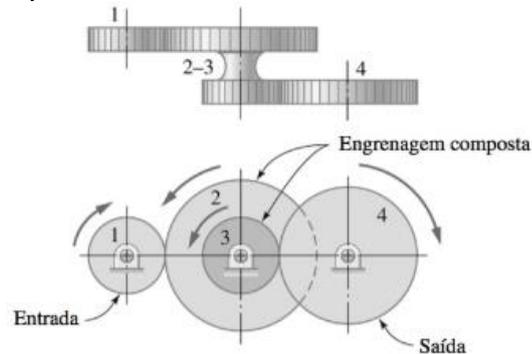
Os trens de engrenagens podem ser construídos de forma simples, limitados a pequenas razões de transmissão ou composta, o qual possibilita realizar transferências de razões maiores. Para este projeto, foi utilizado a transmissão composta.

2.3.1 TREM DE ENGENHAGENS COMPOSTO

Diferentemente do trem simples, neste caso pelo menos um dos eixos tem mais que uma engrenagem conectada. Dessa forma haverá dois pares engrenados em paralelo realizando-se assim uma dupla relação de transmissão. Pode-se concluir que, conforme Marques, F.; Flores, P (2020), os trens de engrenagens compostos apresentam como principal vantagem o fato de permitirem obter maiores relações de transmissão quando comparados com uma simples engrenagem.

A Figura 2 apresenta um trem composto onde não há reversão de rotação, com quatro engrenagens.

FIGURA 2: Trem de engrenagens composto



Fonte: COLLINS, J.A (2017)

Conforme a figura 2, as engrenagens 2 e 3 estão fixadas no mesmo eixo, dessa forma, ambas possuem a mesma velocidade angular. Dessa tem-se uma razão global que define a transmissão final do sistema sendo ela descrita como Mv , que é adimensional, dada pela equação 1, conforme (NORTON, 2013, p. 698), abaixo.

$$Mv = \pm \frac{\text{produto do número de dentes nas engrenagens motoras}}{\text{produto do número de dentes nas engrenagens movidas}} \quad (1)$$

Dessa forma, as razões das engrenagens intermediárias não se cancelam e a razão total do trem é o produto das razões dos pares de engrenagens paralelas, que se interligam dente a dente.

2.4 FORMULÁRIO ENGRENAGEM HELICOIDAL

Conforme a norma DIN 3961 emitida na Alemanha em 1978, que rege as características das engrenagens cilíndricas de dentes retos e helicoidais, e de acordo com EUROAKTION (2016), segue abaixo um formulário específico para cálculo de engrenagens de dentes helicoidais.

$$DE = DP + 2 * M \quad (2)$$

$$Z = \frac{Dp}{Ma} \quad (3)$$

$$M = Ma * \cos(\alpha) \quad (4)$$

$$P = Dp * \pi * \cotan(\alpha) \quad (5)$$

Onde:

α = Ângulo de hélice (graus)

DE = Diâmetro externo (mm)

DP = Diâmetro primitivo (mm)

M = Módulo Normal ou Real (mm)

Ma = Módulo Aparente (mm)

P = Passo de hélice (mm)

Z = Número de dentes da engrenagem (un.)

Além da necessidade de se conhecer os cálculos da peça a ser fabricada, deve-se compreender a forma com que o eixo sem-fim se mantém em sincronia com a coroa, já que esse sistema foi dito semelhante ao fresamento via *hobbing*.

A equação 6 define esta relação, conforme (ESSEL, Processos de Fabricação Vol. 3, Cáp. 49, pag. 6).

$$n = \frac{Rf * N}{Z} \quad (6)$$

Onde se define “Rf” como a redução fixa do redutor, “N” o número de entradas de rosca do sem-fim, “Z” o número de dentes da coroa e “n” a relação entre a rotação do sem-fim em relação a coroa.

2.5 SERVO MOTOR AC

Esse equipamento é comumente aplicado em sistemas de controle que exigem extrema precisão, como por exemplo, os eixos de um robô ou máquinas CNC. O servo motor é, conforme Medeiros (2011), um circuito fechado, um servo mecanismo que utiliza realimentação de posição final, permitindo o controle preciso da posição angular medida, como também, a velocidade do eixo de saída pelo envio de um sinal na entrada.

Para que o servo motor possa localizar a sua posição com extrema exatidão, ele acaba por possuir um dispositivo digital chamado de encoder, o qual há variações em modelos e em funcionamento.

2.5.1 ENCODER

É um componente que está inserido no servo motor, o qual converte um movimento mecânico em sinal elétrico para facilitar o seu controle. O encoder conforme Alciatore, d. g.; Histan (2014) é um dispositivo utilizado para medir posição e/ou velocidade, composto por disco de vidro ou plástico que giram entre uma fonte de luz (LED).

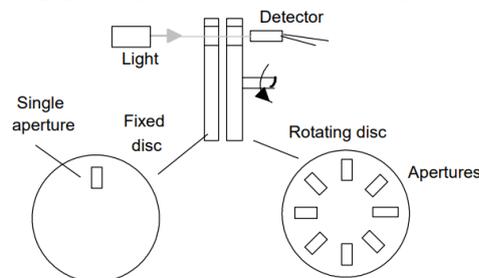
Comercialmente há dois tipos de encoders disponíveis para os servomotores, os quais vêm equipados de fábrica, para este projeto utilizou-se com encoder incremental.

2.5.1.1 ENCODER INCREMENTAL

Os encoders incrementais geram pulsos de sinal diferentes dos absolutos, conforme Capelli (2002), o encoder incremental gera pulsos seriais, quando seu eixo está parado não há sinal algum em sua saída, portanto, para que a máquina saiba onde seu eixo está é necessário que haja movimentação do encoder.

A figura 3 ilustra o sistema de leitura do encoder incremental.

FIGURA 3: Encoder Incremental



Fonte: BOLTON (2006)

Com a utilização do encoder incremental, analisando os sinais gerados por ele, não se conhece à posição inicial do eixo. Para esta função utiliza-se um sensor

externo, para transmitir ao controlador ponto de início, ou zero do sistema (ROSÁRIO, 2005; GROOVER, 2008). A utilização desses encoders é mais evidente em sistemas que necessitam apenas controlar a velocidade e/ou sentido de giro do eixo.

2.5.2 ESTRUTURA

A figura 4 demonstra a interface elétrica de um dos servo drives utilizados neste projeto, da fabricante Delta modelo ASD-B2-0721-B de potência 750w (1CV), vale evidenciar que é de extrema importância estar atento as entradas corretas para evitar danos permanentes ao equipamento.

FIGURA 4: Drive para servo AC modelo ASD-B2-0721-B



Fonte: Adaptado de PERAUTOMAÇÃO (2020)

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Com a máquina em pleno funcionamento na indústria, conforme a figura 5, se realizou primeiramente um levantamento dos procedimentos a serem executados para iniciar o processo de retrofitting da fresadora universal.

FIGURA 5: Fresadora Universal utilizada



Fonte: Autor (2022)

Primeiramente constatou-se que a máquina precisaria de três servo motores para controlar a rotação do eixo árvore, peça e fuso da mesa. Porém a fim de evitar altos custos iniciais, optou-se por utilizar dois, sendo um no eixo árvore e outro na peça, fazendo assim com que o fuso da mesa caminhe conforme a rotação da peça via grade de engrenagens a rotações extremamente baixas, eliminando-se assim o som gerado pelo contato dos dentes das engrenagens da entrada do redutor.

Em relação à mecânica da máquina, notou-se que haveria a necessidade de utilizar dois redutores, um para cada servo motor, já que a força de corte no processo de *hobbing*, visando remover todo material em um único passe, é consideravelmente alta. Devido ao fato que no processo de hobbing a peça normalmente possui uma rotação bem inferior à ferramenta, optou-se por destinar o redutor de maior redução à peça.

3.1 MONTAGEM DO SERVO MOTOR NA MÁQUINA

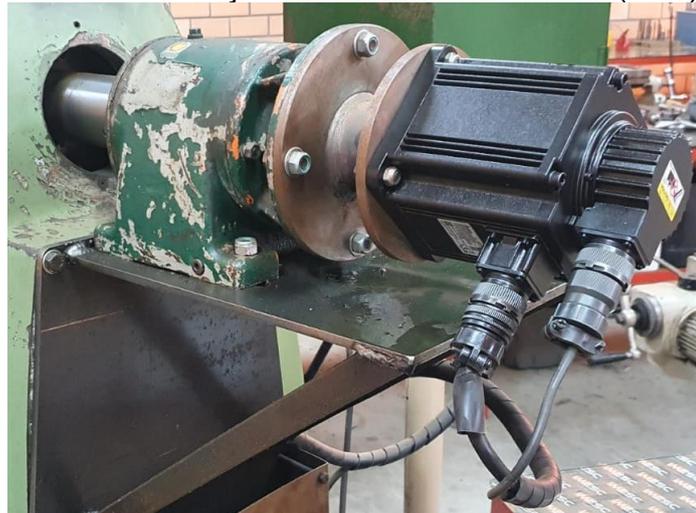
Como o princípio da geração de engrenagens consiste em uma perfeita sincronia tripla entre a rotação da ferramenta em relação à peça e o avanço do fuso da mesa, os motores elétricos padrões da máquina foram todos retirados. Fez-se

necessário o uso de dois redutores, um redutor simples com relação de 5,1571428571:1 e um redutor de mesa com relação de 40:1.

Para a implementação dos redutores houve a necessidade de se construir uma estrutura conhecida como “mão francesa”, elaborada em chapas metálicas de espessura “3/8” parafusada na coluna do eixo arvore da máquina fornecendo assim apoio e sustentação para o redutor simples, o qual foi parafusado a estrutura. A saída do redutor simples foi acoplada ao eixo arvore via bucha com chaveta interna e prisioneiro para garantir o posicionamento, e, na entrada do redutor simples, foi utilizado um acoplamento flexível para haver a união com o servo motor mestre (2000w) o qual foi parafusado ao redutor via flange.

A figura 6 representa o resultado do procedimento descrito anteriormente.

FIGURA 6: Fixação do servo motor mestre (3CV)



Fonte: Autor (2022)

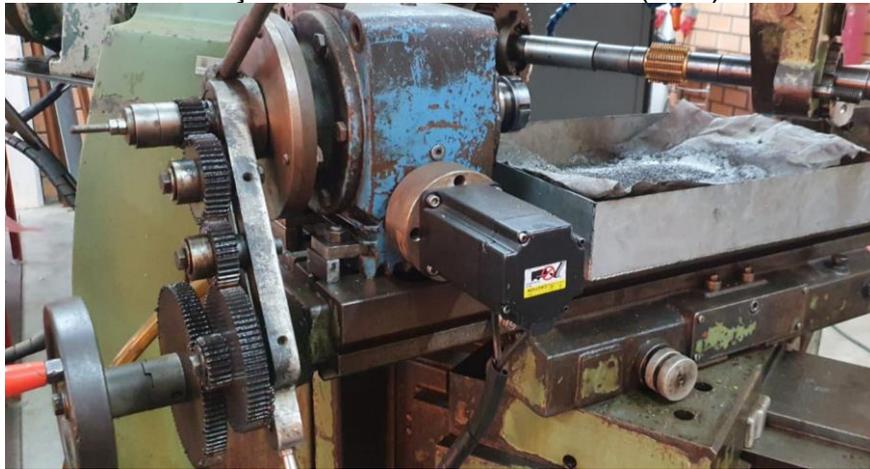
Em seguida, o redutor de mesa utilizado foi um modelo com uma entrada e duas saídas, já que para a aplicação desejada é necessário que haja uma saída destinada à porta pinça (fixação da peça) e uma a outra para realizar o movimento da peça em sincronia com a mesa via grade de engrenagem. Para isso fabricou-se um flange com rolamentos internos e uma bucha, acoplando o eixo do servo motor escravo (750w) a bucha via chaveta interna e a estrutura do servo foi fixada ao flange via parafusos.

Foi inserida a saída do redutor de mesa uma engrenagem, previamente calculada, e em seguida a manivela, presa ao fuso da mesa, foi removida e deu lugar

a grade de engrenagem, composta por engrenagens específicas para se realizar a redução de rotação necessária, e, na ponta do eixo do fuso da mesa, foi inserida uma engrenagem de dente reto, previamente calculado, para se conectar o início (saída do redutor de mesa) com o fim (fuso da mesa) em perfeita sincronia.

Além disso, utilizou-se também um contraponto fixado via porca “T” as ranhuras da mesa, já que a engrenagem a ser fabricada possuía um longo comprimento. O resultado de todo o procedimento citado anteriormente pode ser observado conforme a figura 7.

FIGURA 7: Fixação do servo motor escravo (1CV)



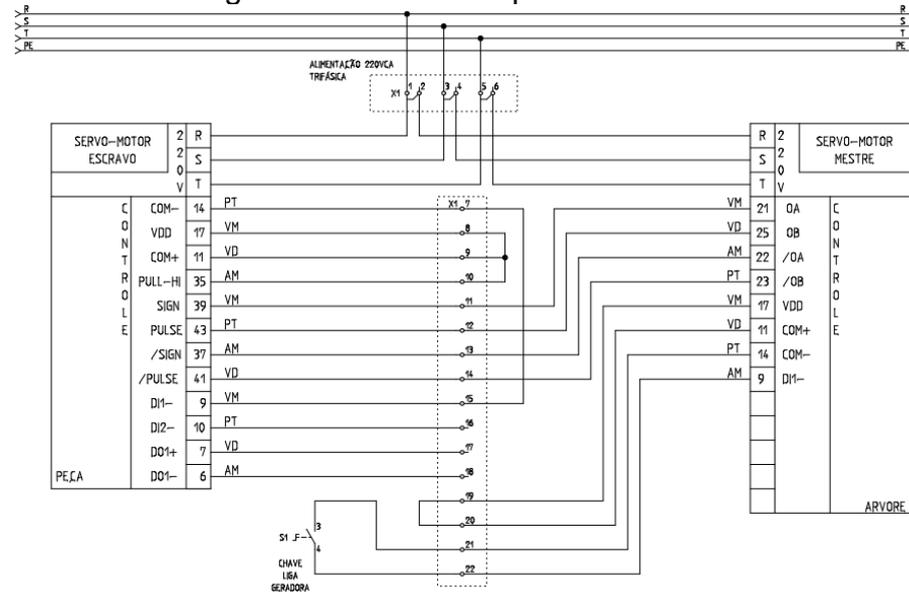
Fonte: Autor (2022)

3.2 PAINEL E DIAGRAMA ELÉTRICO

Via software Eplan Electric P8, elaborou-se previamente o diagrama elétrico do projeto, ilustrando as ligações dos equipamentos a fim de facilitar e tornar a montagem do painel mais compacta e, além disso, facilitar o acesso a manutenções ou melhorias futuras.

Segue, conforme a figura 8 o diagrama elétrico funcional do projeto, afim de iniciar testes iniciais e posteriormente ser padronizado conforme as normas NR10 e NR12.

FIGURA 8: Diagrama Elétrico via Eplan Eletric P8



Fonte: Autor (2022)

Além da chave “Liga Geradora” foi instalada também a chave “Liga Refrigeração” apenas adicionando um contator ao trilho principal próximo aos bornes e realizando-se as ligações necessárias. A construção da parte interna do painel elétrico, conforme o diagrama elétrico apresentado pode ser observado na figura 9.

FIGURA 9: Montagem painel elétrico da máquina



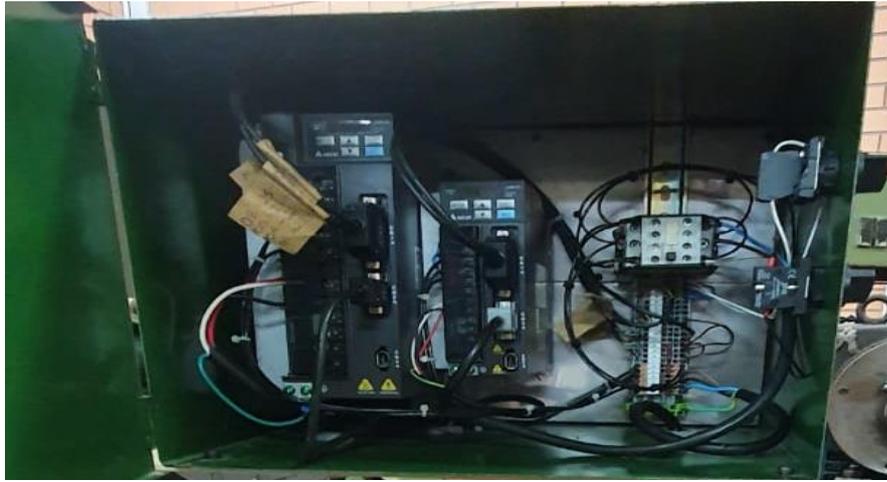
Fonte: Autor (2022)

Após a montagem, elaborou-se o painel elétrico para inserir a montagem realizada através das seis furações realizadas na chapa utilizando-se parafusos M8,

arruelas e porcas. Construiu-se um pedestal em aço para suportar a estrutura do painel elétrico, a fim de facilitar a passagem do operador entre as máquinas, já que o espaço de trabalho era reduzido.

Dessa forma finalizou-se então o painel elétrico, conforme pode ser observado com a figura 10.

FIGURA 10: Painel Elétrico



Fonte: Autor (2022)

3.3 DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS DA ENGRENAGEM HELICOIDAL DESEJADA

Para compreender de que forma deve ser parametrizado o servo motor, deve-se ter total conhecimento sobre o processo que está sendo realizado atualmente de forma mecânica, para isso primeiramente, deve-se coletar 3 informações básicas da peça em mãos (solicitada pelo cliente), esses dados servem de entrada para a resolução das demais equações seguintes.

As informações necessárias são: diâmetro externo (DE), número de dentes (Z), e o módulo escolhido. Para se quantificar o diâmetro externo é necessário o uso do paquímetro como instrumento de medição. Em relação ao número de dentes, eles são obtidos apenas realizando-se a sua contagem.

Segue abaixo a figura 11, que representa a medição do diâmetro externo de uma engrenagem cilíndrica qualquer.

FIGURA 11: Medição do diâmetro externo



Fonte: Freepik (2022)

Após obter os três dados coletados ($DE = 23,80\text{mm}$, $Z=20$ e módulo métrico $M=1\text{mm}$), deve-se realizar a resolução das equações para que a engrenagem helicoidal em questão seja totalmente identificada, vide as equações 2, 3, 4 e 5, afim de calcular futuramente a relação de sincronia entre a peça e a ferramenta.

$$DE = DP + 2 * M \rightarrow DP = 23,80 - (2 * 1) = 21,80\text{mm} \quad (2)$$

$$Z = \frac{Dp}{Ma} \rightarrow Ma = \frac{21,80}{20} = 1,09\text{mm} \quad (3)$$

$$M = Ma * \cos(\alpha) \rightarrow \cos(\alpha) = \frac{1}{1,09} = 0,9998718075\text{rad} = 23,4466 \text{ graus} \quad (4)$$

$$P = Dp * \pi * \cotan(\alpha) = 21,80 * \pi * \cotan(23,4466) = 157,91\text{mm} \quad (5)$$

3.4 DEFINIÇÃO DA FERRAMENTA NECESSÁRIA

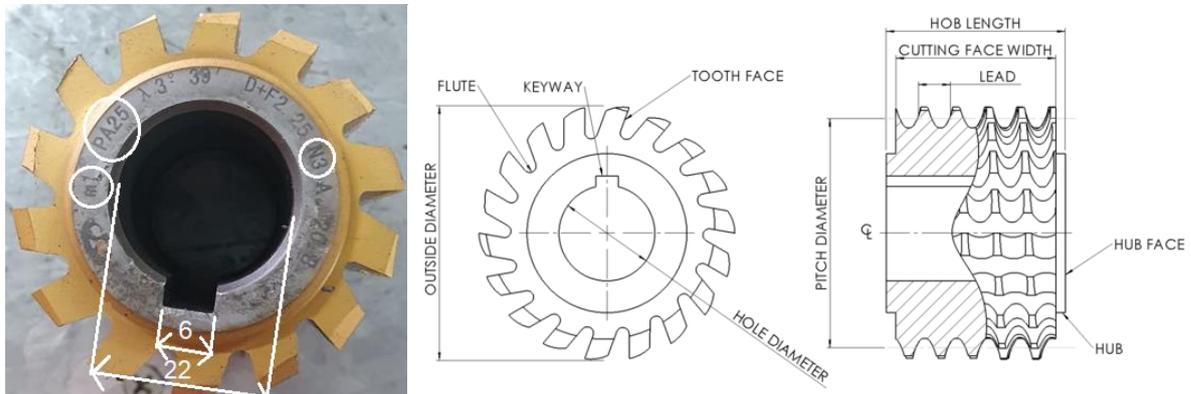
As ferramentas utilizadas para o processo de *hobbing* são as fresas caracol, para melhor compreensão, conforme os tópicos, segue os principais parâmetros para compra da ferramenta utilizada.

- M1 (Módulo 1);
- PA25 (ângulo de 25 graus de pressão);

- N3 (número de entradas de corte é 3);
- TiN (recebe revestimento de nitreto de titânio);
- Dimensões: \varnothing externo=56mm, \varnothing interno= 22mm e rasgo chaveta=6mm.

A figura 12 demonstra a ferramenta utilizada e outras medidas importantes, as quais podem ser confirmadas antes de se efetuar um pedido de fabricação da fresa.

FIGURA 12: Fresa Caracol M1 PA25 N3



Fonte: Autor + Wikipedia (2022)

3.5 CÁLCULO DA RELAÇÃO DE TRANSMISSÃO

Para o cálculo da relação de transmissão entre a ferramenta e a peça, teve-se que elaborar uma equação específica para fresadoras universais. Sabendo-se que todas as fresadoras seguem um mesmo padrão estrutural, a equação elaborada abrange qualquer máquina que esteja configurada conforme os passos anteriores.

Assim, alguns tópicos foram listados para que fosse elaborada a equação, sendo eles:

- Diferentemente da engrenagem de dentes retos, a helicoidal necessita de um deslocamento angular fixo a cada volta da peça, para que os dentes inclinem ao longo da usinagem;
- A rotação do servo motor escravo se baseia na equação 6, pois está acoplado a um redutor de 1:40 e a ferramenta utilizada possui 3 entradas, dessa forma o servo deve triplicar sua rotação para acompanhar o corte da ferramenta e consequentemente acelerar a usinagem;

Levando-se essas observações em conta, elaborou-se conforme a equação 7, uma equação que define a relação de transmissão entre a ferramenta e a peça.

$$\text{Relação (Peça: Ferramenta)} = \frac{R_f * N}{Z} \left(\frac{A_f}{P} + 1 \right) \quad (7)$$

Observando-se as variáveis, o “Af” é obtido através da relação de transmissão entre a peça (redutor) e o passo do fuso da mesa (manivela).

Sabendo-se que o fuso da máquina possui um passo fixo e que a cada revolução percorre linearmente 5mm, deve-se então realizar uma redução deste valor para que a usinagem possa ser realizada. Essa redução se torna necessária, pois via testes práticos, definiu-se que para usinagem do material aço SAE 8640 o valor de “Af” deve estar entre 0,30 e 0,50mm/rotação. Caso utilize um valor menor que 0,30 a usinagem será lenta e não atenderá aos requisitos de produção industrial, e se caso utilizar um valor maior que 0,50 a ferramenta, fabricada em aço rápido, não irá suportar a força de corte e vibração da peça por muito tempo, reduzindo assim drasticamente o tempo de vida útil da ferramenta.

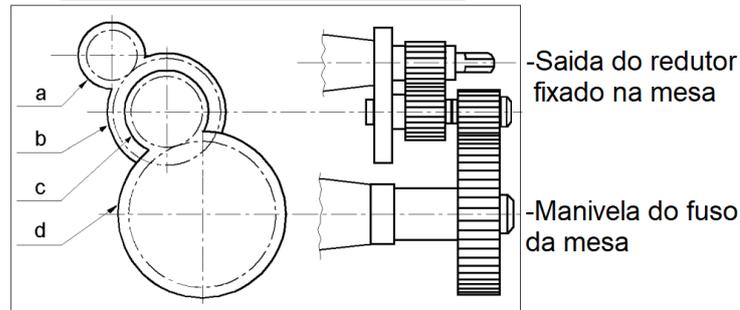
Para este caso em específico, a fim de usinar uma engrenagem fabricada em aço SAE 8640, utilizou-se um valor de “Af” de 0,50mm/rotação. A forma física de representar este valor para máquina foi inserindo uma grade composta por um trem de engrenagens, partindo-se do eixo de saída do redutor, fixado a mesa, até o fuso da mesa (antiga manivela).

Para se conhecer as corretas engrenagens para esta redução, foi realizado o cálculo da razão global de transmissão, baseado na equação (1) apresentada anteriormente, multiplicando seu resultado pelo passe do fuso da máquina. Abaixo segue a resolução da equação e a montagem do trem de engrenagens está ilustrada conforme a figura 13 em seguida.

$$Mv = \pm \frac{Z1 * Z3}{Z2 * Z4} = \frac{26 * 24}{65 * 96} = 0,10 * 5 = 0,50\text{mm/revolução} \quad (1)$$

FIGURA 13: Montagem da grade de engrenagem

Z	a	b	c	d
20	26	65	24	96



Fonte: Adaptado de ESSEL (2010)

O termo “R” refere-se à redução fixa do redutor, que neste caso recebera o valor 40, já que o redutor utilizado é de proporção 1:40. O termo “P” corresponde ao passo de hélice calculado anteriormente, “Z” é o número de dentes da engrenagem a ser fabricada e “N” o número de entradas de corte da ferramenta utilizada.

Com as devidas variáveis esclarecidas, calculou-se então o valor da relação de transmissão entre a peça e a ferramenta, conforme a equação (7) abaixo:

$$Relação (P:F) = \frac{40 * 3}{20} \left(\frac{0,5}{157,91} + 1 \right) = 6,0189981635 \text{ (Adimensional)} \quad (7)$$

Sendo assim, o resultado acima significa o número de rotações da ferramenta em relação a uma rotação da peça. Com isso, pode-se então realizar a edição dos parâmetros dos drives, realizando-se cálculos para transferir este valor obtido em uma unidade de medida aceita pelo servo motor (quantidade de pulsos).

3.6 CÁLCULO DO ERRO MÁXIMO DE HÉLICE

Este cálculo está diretamente vinculado a resolução do servo motor utilizado e ao comprimento de hélice necessário a ser usinado. Para o cálculo do erro total de hélice por peça, multiplica-se o erro máximo possível pelo número de rotações as quais a ferramenta (servo mestre) irá realizar até a conclusão da peça.

Segue abaixo, conforme a equação 8, a resolução da fórmula, a qual é definida conforme os dados anteriores escolhidos para a execução do processo.

$$\begin{aligned}
 \text{Erro máximo} &= E_{\text{max}} * n_{\text{Rot}} = \left(\frac{1}{nP}\right) * \left(\frac{\text{Relação (P:F)} * L}{Af}\right) & (8) \\
 &= \left(\frac{1}{160000}\right) * \left(\frac{6,0189981635 * 295}{0,50}\right) = 0,022 \left(\frac{\text{mm}}{\text{peça}}\right)
 \end{aligned}$$

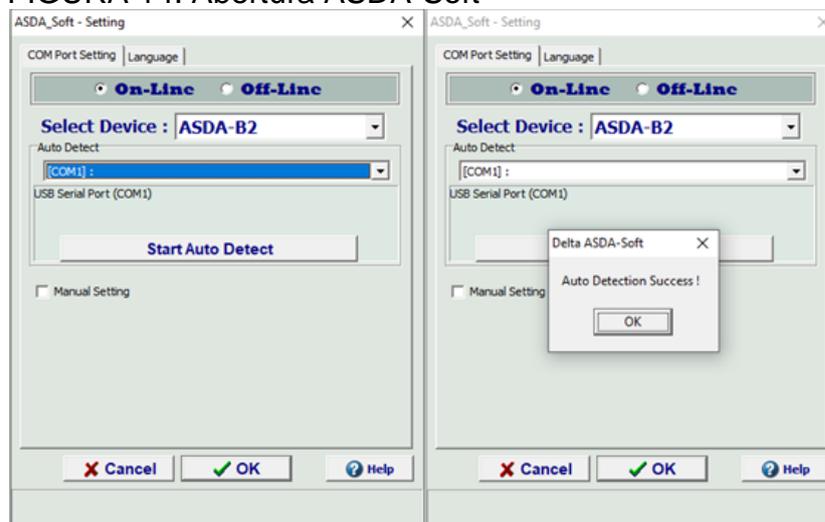
Observa-se que o erro máximo por peça será de 22 milésimos, sendo assim, este foi o erro máximo ao longo de 295mm de comprimento de engrenagem.

3.7 PROGRAMAÇÃO DOS PARÂMETROS VIA SOFTWARE

Primeiramente realiza-se a conexão entre o notebook e o drive via cabo MD9, onde uma extremidade conecta-se no notebook e a outra na porta de comunicação em série do drive do servo motor de 750w, denominado nesta aplicação como escravo, já que sua posição estará sendo atualizada pela posição do mestre (servo motor de 2000w).

No notebook, realiza-se a instalação do software ASDA-Soft, versão utilizada (V5.5.0.0) gratuitamente via download center do site da Delta. Em seguida, ao executar o programa uma tela descrita “ASDA_Soft – Setting” irá aparecer, conforme a figura 14, clica-se então na opção “On-Line”, “Start Auto Detect”, ao clicar neste botão deverá aparecer uma mensagem confirmando a detecção, que neste caso foi o modelo ASDA-B2, e em seguida “OK”.

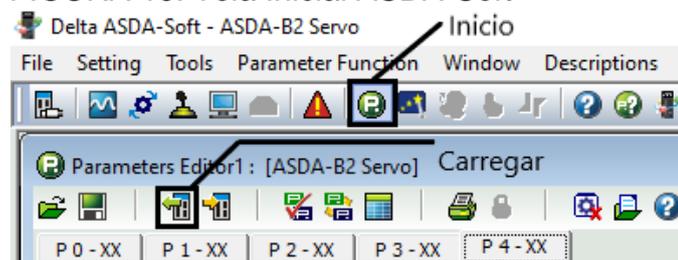
FIGURA 14: Abertura ASDA-Soft



Fonte: Autor (2022)

Com isso, conforme a figura 15, clica-se no ícone representado pela letra “P” para se obter acesso a tela inicial de trabalho do software e em seguida pressione o botão “Carregar” para efetuar a leitura dos parâmetros atuais programados no servo motor conectado (750w).

FIGURA 15: Tela Inicial ASDA-Soft



Fonte: Autor (2022)

Para a aplicação desejada a qual necessita relacionar a posição do servo motor mestre (2000w) com o servo motor escravo (750w), conforme manual da Delta disponível no software, conforme a figura 16, o parâmetro P1-44 serve como numerador da relação de transmissão quando dois servo motores estão conectados, por consequência, o mestre será considerado o denominador da relação através do parâmetro P1-45.

FIGURA 16: Manual ASDA-Soft

P1 - 44 ▲	GR1	Electronic Gear Ratio (1st Numerator) (N1)	Address: 0158H, 0159H
------------------	------------	---	------------------------------

Default: 16

Applicable Control Mode: PT

Unit: pulse

Range: 1 ~ (2²⁶-1)

Data Size: 32-bit

Display Format: Decimal

Settings:

This parameter is used to set the numerator of the electronic gear ratio. The denominator of the electronic gear ratio is set by P1-45. P2-60 ~ P2-62 are used to set the additional numerators.

Please note:

1. In PT mode, the setting value of P1-44 can be changed only when the servo drive is enabled (Servo On).

Related Section:

Section 6.2.5

Fonte: Autor (2022)

Sabendo-se que os parâmetros a serem ajustados são o P1-44 e o P1-45, calcula-se então a relação necessária entre ambos os parâmetros, partindo-se de algumas informações importantes como o servo motor mestre estar acoplado a um redutor de relação fixa para evitar torques elevados entre o seu eixo, que representa a ferramenta de corte, e a peça, o fato de ambos os servo motores possuírem estrutura

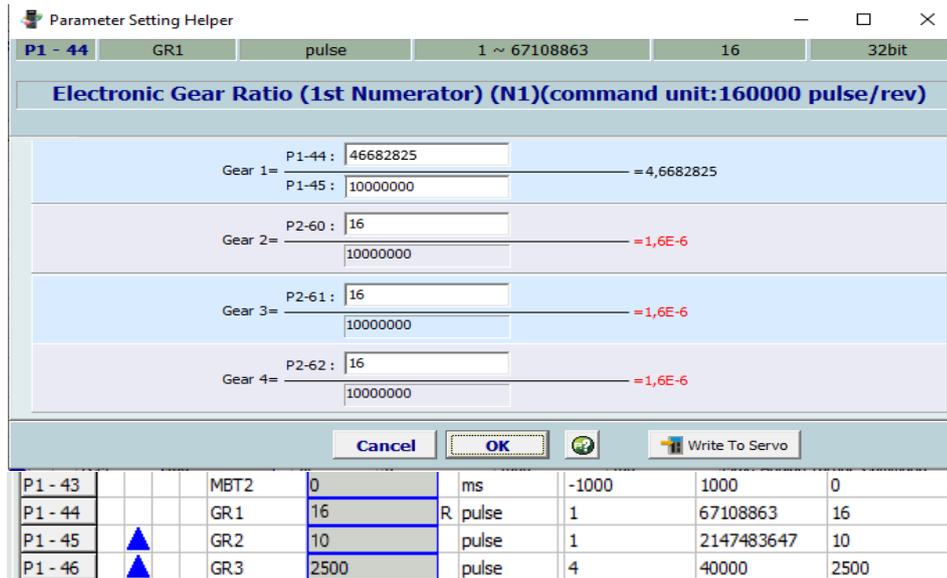
com 4 polos (que os permitem uma resolução de saída máxima de 40.000 pulsos/rotação), 160.000 pulsos/rotação de resolução de entrada, e que o software permite o uso limite de 8 dígitos para o numerador.

Com isso, optou-se por definir o parâmetro P1-46 do servo motor mestre como 40.000 (afim de conseguir a maior resolução possível na saída do motor) e o parâmetro P1-45 do servo motor escravo como 10.000.000, afim de facilitar os cálculos. Com os levantamentos realizados conseguiu-se elaborar uma fórmula para o cálculo da relação necessária ao parâmetro P1-44 do servo motor escravo conforme a equação 9.

$$\begin{aligned} \text{Relação (servo)} &= \frac{\text{pulsos de entrada do escravo} * \text{Relação}(F:P)}{(\text{pulsos de saída} * \text{Redução do redutor}) \text{ "mestre"}} & (9) \\ &= \frac{160.000 * 6,0189981635}{40.000 * 5,1571428571} = 4,6684750299 \\ &\rightarrow 46684750 \text{ (8 dígitos)} \end{aligned}$$

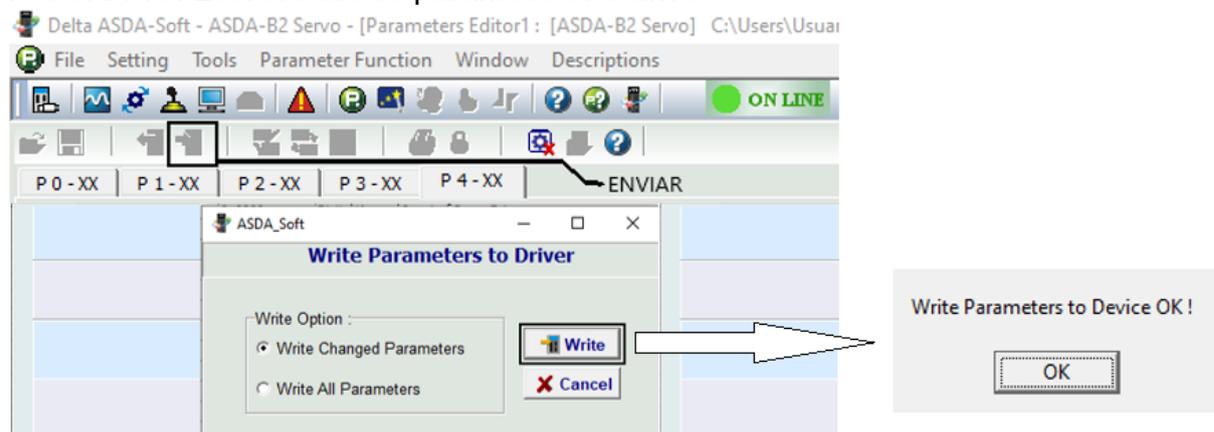
Com o cálculo realizado e após obter a leitura dos parâmetros atuais do servo motor escravo, clicou-se na aba “P1 – XX” abaixo do ícone “Carregar” para que os parâmetros desejados (P1-44 e P1-45) fossem acessados.

O parâmetro atual, por default do fabricante, é de 16 para o parâmetro P1-44, com isso clica-se duas vezes no valor contido na caixa em azul e altera-se para o valor calculado (46682825) e para o P1-45 colocou-se 10000000 e “OK”, conforme a figura 17.

FIGURA 17: Parâmetros P1-44 e P1-45


Fonte: Autor (2022)

Em seguida clicou-se no ícone “Enviar”, onde apareceu uma tela e pressionou-se o botão “Write”, e em seguida concluiu-se o processo, conforme a figura 18.

FIGURA 18: Escrevendo os parâmetros no drive


Fonte: Autor (2022)

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Ao finalizar o processo de retrofiting da máquina, houveram alguns imprevistos os quais impediram a correta inicialização do teste de usinagem.

4.1 IMPREVISTOS E SOLUÇÕES

O processo de adaptação mecânica do servo motor ao eixo arvore da máquina (base com mão francesa para fixação do redutor), conforme a figura 10, gerou um leve desnível entre o alinhamento do eixo arvore da máquina e o eixo de saída do redutor. Este desnível gera, neste caso de alta precisão de transmissão de rotação, um erro de transmissão da velocidade angular entre ambos. A fim de resolver tal “problema” fixou-se a saída do redutor e a ponta do eixo arvore um acoplamento flexível ServoClass series da marca ZERO-MAX, conforme a figura 20. Reduzindo-se então este erro ao ponto de não ser perceptível ao processo.

FIGURA 20: Acoplamento flexível

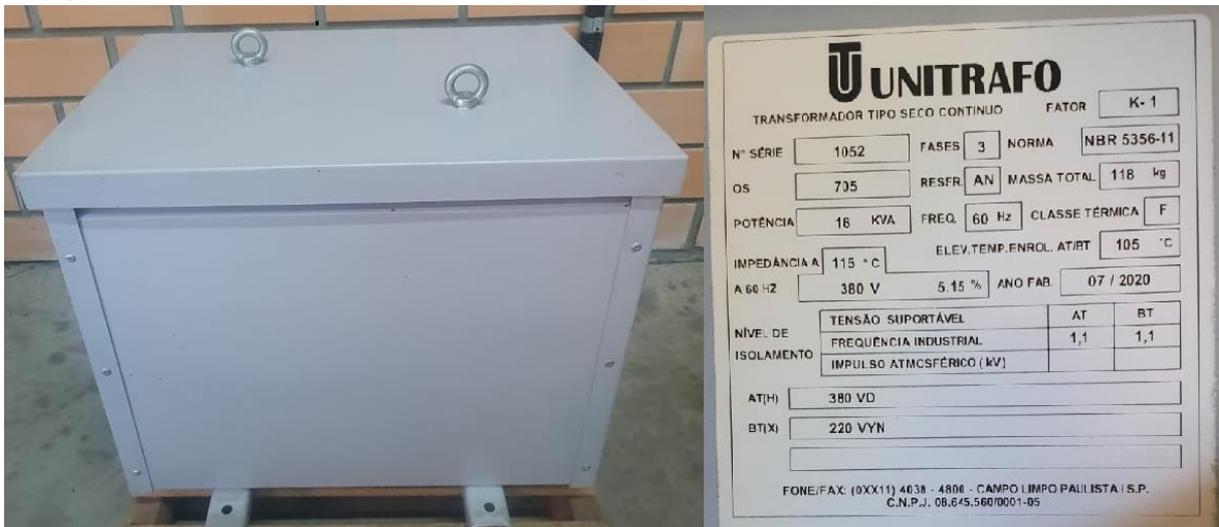


Fonte: Zero-Max (2020)

Após energizar o painel, notou-se que o drive estava recebendo influencias externas, pois seu o número de pulsos apresentados na tela LCD aumentava, ou seja, o eixo do servo motor realizou um deslocamento angular sem a ação humana. Esta situação foi a que mais consumiu tempo para solucionar, e, após diversas verificações como: o aterramento provido pelo plug fêmea de alimentação, as hastes de cobre aterradas na indústria e todas as conexões elétricas realizadas ao painel, constatou-se que havia uma quantidade significativa de ruído que estava sendo fornecido pela distribuidora de energia elétrica.

Este ruído somente foi minimizado ao adquirir e instalar um transformador isolador da marca UNITRAFO compatível com a demanda de corrente necessária para ligar todos os motores. Este equipamento, conforme a figura 21, se tornou essencial ao processo, não somente para esta máquina, mas também para possíveis futuras máquinas a receberem um processo de retrofiting, pois este transformador isolador tem a característica de reduzir o ruído da energia de entrada.

FIGURA 21: Transformador isolador WEG 16KVA



Fonte: Autor (2022)

Ao realizar a implementação do transformador isolador, aproveitou-se para inserir um quadro composto por 4 disjuntores, conforme a figura 22, sendo um destinado a cada fresadora universal da célula de produção, afim de que, no futuro, o fornecimento de energia estivesse de acordo com o necessitado.

FIGURA 22: Quadro de disjuntores

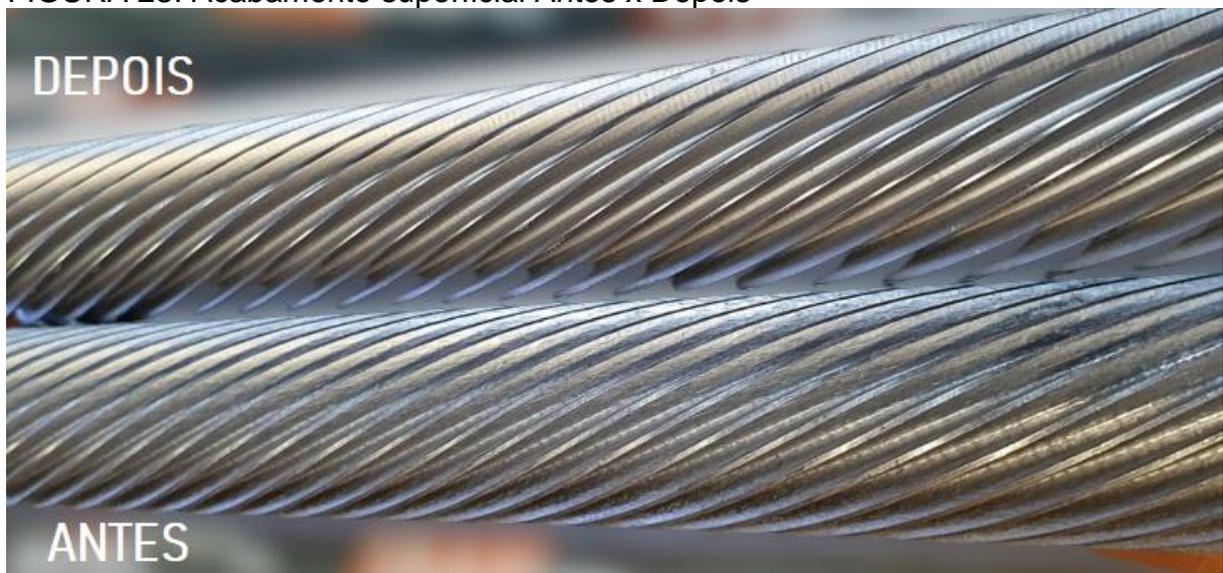


Fonte: Autor (2022)

4.2 TESTES E COMPARAÇÕES

Após as melhorias apresentadas, realizou-se o primeiro teste de fabricação de engrenagem, neste caso com o sentido de hélice anti-horário. Este teste inicial comprovou os esforços depositados neste projeto pois, para surpresa de todos, a primeira engrenagem demonstrou um acabamento superficial sem as imperfeições apresentadas pelo método convencional, conforme a figura 23.

FIGURA 23: Acabamento superficial Antes x Depois



Fonte: Autor (2022)

Esta melhoria superficial se deve principalmente a combinação entre o uso de servo motores alinhados a uma fixação rígida e firme dos componentes estruturais da máquina convencional escolhida.

A confirmação de que o processo de retrofiting funcionou corretamente foi obtida ao fabricar o par de engrenagem, ou seja, uma com sentido horário e outra anti-horário de hélice, conforme a figura 24 apresenta-se o par inserido a um mancal em ambas as extremidades. Dessa forma tem-se um teste de confirmação de que os ângulos de hélice e a profundidade de corte estão corretos no momento em que aplica um movimento rotacional a uma das engrenagens e que o par gira sem que haja travamento.

FIGURA 24: Teste de alinhamento dos dentes das engrenagens



Fonte: Autor (2022)

Para a melhor visualização do engrenamento entre os dentes das engrenagens geradas na máquina que recebeu o retrofit, encaixou-se o par de engrenagens apresentados na figura 24, apoiando-se uma das extremidades as furações do mancal, com tolerância de $\pm 0,01\text{mm}$. Utilizou-se uma fita hellerman no meio do comprimento do par afim de simular o outro mancal inexistente na figura, para demonstração do correto encaixe entre os dentes com o mínimo de folga possível, conforme a figura 25.

FIGURA 25: Encaixe do par de engrenagens



Fonte: Autor (2022)

4.3 MELHORIAS APRESENTADAS PELO RETROFFITING

Com isso, iniciou-se a fabricação seriada utilizando-se apenas a máquina que recebeu o retrofit para geração dos dentes. Pode-se observar, conforme a tabela 01, as diferentes características no processo antes e após o retrofit ser realizado.

TABELA 01: Características do processo antes e após o retrofit

RETROFFITING	ANTES	DEPOIS
RESÍDUOS GERADOS	Óleo e graxa	Isento
CONSUMO DE ENERGIA	875kw/h (mês)	625kw/h (mês)
TEMPO DE USINAGEM/PEÇA	75-90 minutos	30-35 minutos
TEMPO DE SETUP	20 minutos (necessária pré-montagem da grade)	5 minutos (apenas cálculo de uma fórmula)
ERRO DE USINAGEM DA HÉLICE	Depende do estado dos dentes das engrenagens	0,022mm a cada 295mm de comprimento
QUANTIDADE DE GRADES DE ENGENHAGEM	2 (Eixo árvore ao redutor e do redutor ao fuso da mesa)	1 (Redutor ao fuso da mesa)
CONTROLE DE ROTAÇÃO (EIXO SPIN)	8 faixas pré-estabelecidas alinhadas ao trem de engrenagem	Infinitas possibilidades
CONTROLE DE AVANÇO DA MESA (EIXO X)	Dependente do cálculo da grade de engrenagem a ser montada	Infinitas possibilidades

Fonte: Autor (2022)

Observando-se o fator “CONTROLE DE ROTAÇÃO” da tabela 01 e conforme a referência de Marques, F.; Flores, P (2020) descrito no tópico “2.3.1 TREM DE ENGENHAGENS COMPOSTO”, notou-se que o trem de engrenagens composto se tornou obsoleto comparado ao servo motor aplicado. O trem composto apresenta diversas dificuldades em sua construção, desde a posição dos canais na grade até a adaptação e fixação do mesmo a máquina, além do estoque necessário de engrenagens para montagem das grades. Dessa forma, o servo motor é uma ótima solução e evolução para este processo de transmissão que é muito utilizado em baixas rotações em diversas indústrias.

Observando-se o fator “ERRO DE USINAGEM DA HÉLICE” da tabela 01 e conforme a referência de Capelli (2002) descrito no tópico “2.5.1.1 ENCODER

INCREMENTAL”, notou-se que quando há interrupção de energia durante o processo de usinagem, o processo deve ser interrompido e a engrenagem descartada. Isso deve-se ao fato de que quando o eixo do servo motor se estabiliza parado, não vai haver sinal entre o servo e o drive, portanto o drive se localizará somente quando o servo se mover novamente. Com este erro gerado na partida do eixo do servo motor, a sincronia de alta precisão do processo se perde e a usinagem é descartada.

Para tal problema apresentado, faz-se o uso de servo motores de encoder absoluto, pois estes, não necessitam de referência após o corte de energia, já que sua localização angular é armazenada via código binário e não via pulso transmitido como o encoder incremental utilizado no projeto.

4.4 GERADORA CNC NOVA vs FRESADORA UNIVERSAL COM RETROFFITING

Antes do início do projeto, realizou-se cotações com empresas chinesas, já que não há fabricantes no Brasil, para possível compra da máquina pronta para uso. Com os orçamentos em mãos, obteve-se um valor médio (incluindo imposto de importação) de R\$490.000,00 para aquisição de uma geradora CNC que fosse compatível com o comprimento da engrenagem e com servo motores. Segue abaixo, conforme a tabela 2, os equipamentos e custos totais do retrofitting realizado.

TABELA 02: Equipamentos e custos do retrofitting

EQUIPAMENTOS COMERCIAIS E SERVIÇOS	CUSTO DE AQUISIÇÃO
Servo motor+Drive 1CV (750w)	R\$5.200,00
Servo motor+Drive 3CV (2000w)	R\$8.500,00
Painel Elétrico (Totem + elétrica)	R\$1.790,00
Fabricação mecânica (mão francesa, flanges, acoplamentos, soldagem e ajustes)	R\$5.720,00
Fabricação trem de engrenagens (mesa ao fuso)	R\$970,00
Fresadora Universal usada (sem motores e painel elétrico)	R\$25.000,00
Serviço (automação)	R\$5.000,00
Serviço de retifica em todos os eixos e guias da máquina	R\$18.500,00
Redutor de engrenagem + Contra-ponto	R\$9.200,00
TOTAL	R\$79.880,00

Fonte: Autor (2022)

Conforme a tabela 02, o custo total dos equipamentos utilizados para realização do retrofiting apresentado foi inferior a R\$80.000,00 tendo em vista que este valor não contempla os esforços de engenharia e tempo dedicado ao projeto. Dessa forma o valor final do processo será superior ao apresentado na tabela 02, garantindo-se assim constantes melhorias aos futuros retrofitings a serem realizados.

5 CONCLUSÃO

Com a finalização do processo, houve uma redução de 75% no tempo de setup (preparação da máquina) e o tempo de usinagem reduziu mais de 50%. Acabamentos superficiais foram aprimorados a padrões internacionais, conforme amostra alemã, e a confiabilidade do processo garante que os dentes sejam gerados conforme o desenho técnico do cliente.

O resultado final possibilitou a utilização de ferramentas com mais de uma entrada sem que houvesse alteração na taxa de redução do redutor, ou seja, sem que houvesse a troca do redutor da mesa. A interferência sonora, proveniente da grade de engrenagens de alta rotação da entrada do redutor, foi removida isentando-se assim, para este processo, a necessidade de uso de protetor auricular.

O sistema demonstrou ser replicável, uma vez que o processo segue um método de instalação, e de funcionamento simples, diminuindo-se assim a taxa de rejeição de profissionais de baixa instrução. A isenção do uso de graxa no processo possibilita que este perfil de máquina possa operar em áreas da fábrica a qual necessita manter-se limpa de forma a agradar os clientes e colaboradores.

Devido às dificuldades de se fabricar um novo produto, o qual exige máquinas específicas, este retrofiting apresentou-se como uma evolução para as fresadoras universais e uma solução na fabricação de engrenagens e polias sincronizadas.

Hoje a empresa, a qual o serviço foi realizado, possui quatro fresadoras universais com o retrofiting realizado, sendo que este processo foi realizado de forma igualitária, ou seja, a peça de uma máquina pode substituir a de outra máquina. Dessa forma, o estoque necessário para possíveis manutenções se torna mais prático e de menor custo.

REFERÊNCIAS

ALCIATORE, D. G.; HISTAND, M. B. Introdução à Mecatrônica e aos Sistemas de Medições. [s.l: s.n.]. v. 4 Ed. 2014

CAPELLI, Alexandre. Mecatrônica Industrial: Uma obra indispensável para o profissional de sucesso, Editora Saber, São Paulo, 2002.

COLLINS, Jack A. Projeto Mecânico de Elementos de Máquinas: Uma Perspectiva de Prevenção de Falhas. Tradução de Pedro Manuel Calas Lopel Pacheco... [et. Al]. Rio de Janeiro: LTC - 2015.

ESSEL. Fresando engrenagens cilíndricas com dentes helicoidais. Disponível em: <<https://essel.com.br/cursos/material/01/ProcessosFabricacao/49proc3.pdf>>. Acesso em: 2 nov. 2022.

EUROAKTION, Fórmulas para cálculos de engrenagens, 2016. Disponível em: <http://euroaktion.com.br/F%C3%B3rmulas%20para%20C%C3%A1lculos%20de%20Engrenagens.pdf>
Acesso em: 5 jun. 2022.

GROOVER, Mikell P.. Automation, production systems, and computer integrated manufacturing. 3.ed. Pearson Education. 2008.

KALPAKJIAN, S. Manufacturing engineering and technology. 6th Edition, Prentice Hall, New Jersey, 2000.

KLOCKE, F. Manufacturing processes 1: cutting. RWTH Edition, Springer, New Yorke, 2011.

MARQUES, F.; FLORES, P. Órgãos de Máquinas II Análise e Síntese de Trens de Engrenagens, 2020. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Paulo-Flores-4/publication/338659141_Orgaos_de_Maquinas_II_-

[_Analise_e_Sintese_de_Trens_de_Engrenagens/links/5e332249458515072d70f2b6/Orgaos-de-Maquinas-II-Analise-e-Sintese-de-Trens-de-Engrenagens.pdf>.](#)

Acesso em: 8 jun. 2022.

MAZZO, N. Engrenagens cilíndricas da concepção a fabricação, 2^o ed, Edgard Blucher, São Paulo, 2013.

MEDEIROS, Renan L. P. Desenvolvimento e aplicação de motores de corrente contínuas virtuais aplicadas nas aulas laboratoriais de controle de sistemas, Universidade Federal do Pará, Faculdade de Engenharia Elétrica, Belém. 2011

Norma Din 3961 | Cylindrical Gear Teeth | PDF, 1978. Disponível em: <<https://pt.scribd.com/document/400268277/NORMA-DIN-3961-pdf>>.

Acesso em: 9 jun. 2022.

NORTON, R. L. Projeto de Máquinas: Uma Abordagem Integrada. 4. ed. Pagina 697 Porto Alegre: Bookman, 2013.

ROSÁRIO, João Maurício. Princípios de mecatrônica. São Paulo: Prentice-Hall, 2005. 356p.