

Pesquisa operacional aplicada em cálculos e dimensionamentos de engrenagens cilíndricas de dentes retos utilizadas para transmissão de movimentos e potência mecânica: análises de funções com múltiplas variáveis para otimização de processos e redução de custos industriais

Operations research applied in calculations and sizing of cylindrical spur gears used to transmit motion and mechanical power : function analysis with multiple variables for process optimization and reduction of industrial costs

Darlan Rodrigues da Silva

Graduando do curso de Engenharia de Produção (UNIPAM).
E-mail: darlancont@hotmail.com

Fernando Dias da Silva

Professor orientador (UNIPAM).
E-mail: fernando.silva@unipam.edu.br

Marcelo do Nascimento Sousa

Professor co-orientador (UNIPAM).
E-mail: marcelons@unipam.edu.br

Resumo: Por meio dos estudos de métodos matemáticos, têm-se ferramentas disponíveis que podem sustentar o desenvolvimento, sendo a produção de bens e serviços embasada na sustentabilidade. Considera-se missão da engenharia de produção a melhora dos fatores custo/lucro das indústrias. Pensando no desenvolvimento do país via crescimento econômico, precisa-se fazer uso do conhecimento da ciência e engenharia, pleiteando também o progresso mundial. Neste trabalho, utilizou-se o método dedutivo com finalidade aplicada, abordando como exemplo o setor da indústria metalmecânica, na área de resistência dos materiais, neste caso para fabricação de engrenagens utilizadas em transmissão de movimento e potência mecânica. Tem-se, aqui, a oportunidade de prever a redução de custos, maximizando os lucros. Assim, defende-se o método de pesquisa operacional e sugere-se que seja utilizado por outros segmentos para melhoramento de processos.

Palavras-chave: Redução de custos. Otimização. Engrenagens cilíndricas.

Abstract: Through the studies of mathematical methods, we have tools available that can sustain development, and production of goods and services grounded in sustainability. It is considered mission of production engineering to improve the duty factor cost / profit of the

industries. Thinking about the development of the country and as a form of economic growth, and to achieve this goal it is necessary to use the knowledge of science and engineering, also claiming the world progress. In this work, we used the deductive method with an applied purpose addressing the sector as an example of the metalworking industry in the area of strength of materials, in this case for the manufacture of gears used in the transmission of mechanical motion and power. The opportunity to predict the cost savings maximizing profits can be seen. Thus, it is defended the method of operations research and it is suggested that it can be used by other threads to make improvements.

Keywords: Cost reduction. Process optimization.

1 INTRODUÇÃO

Os setores industriais visualizam uma produção de bens de maneira mais consciente para a questão ambiental. Fala-se em sustentabilidade ou em uso sustentável de matérias primas naturais, logo é preciso conduzir os custos e insumos, agregando valores aos produtos e maximizando os lucros. As reservas naturais são finitas, podendo se exaurir. É extremamente importante utilizar a ciência e a tecnologia a fim de se aplicarem conhecimentos da engenharia. É necessário estar apto a atingir metas de crescimento econômico e sustentável.

Em qualquer indústria precisam-se instalar equipamentos, tais como esteiras de fabricação contínua ou de processo, parte-se do princípio da produção, ou seja, da capacidade produtiva desta unidade, ora capacidade está ligada à vazão, que seja ela mássica ou líquida, de alguma forma os produtos serão modificados ou simplesmente transportados. A engenharia de produção é responsável por fazer estes cálculos de capacidades demandadas.

Mas esses equipamentos são, geralmente, acionados por motores elétricos e redutores que utilizam vários elementos de máquinas como eixos, rodas dentadas e ou correntes, dentre outros componentes; e estes são de valor aquisitivo bastante elevado, porque sua fabricação é especial, daí a razão de seu alto valor agregado. Logo, a necessidade de reduzir gastos utilizando cálculos de dimensionamentos.

2 OBJETIVOS

2.1 Geral

Desenvolver uma pesquisa operacional no intuito de analisar a problemática do cálculo de engrenagens cilíndricas de dentes retos e fazer o dimensionamento das mesmas com fins econômicos de materiais, evitando que as empresas trabalhem com máquinas superdimensionadas.

2.2 Específicos

Visualizar, por meio de cálculos, as principais variáveis de alta relevância, analisando as possibilidades de ganhos para a indústria e analisar custo/benefício, utilizando como exemplo simples a compra de um redutor por R\$ 100.000,00 ao invés

de instalar trens de engrenagens que baixem custos pela metade, obtendo a mesma eficiência.

3 JUSTIFICATIVA

De posse dos valores que são abordados em grande frequência pelos meios de comunicação, pode-se verificar que a maioria estão relacionados a nossa sobrevivência no planeta, tais como: uso de energia, produção de alimentos, cuidados com saúde, educação, política. Pode-se ver claramente que estas questões sempre estiveram indiretamente ligadas entre si, então, se uma parte é afetada, verifica-se que de alguma forma todas as outras o são também.

Tem-se o dever de buscar meios de promover a inovação científica, especialmente para o benefício da humanidade, sendo estes do tipo teórico e/ou de forma empírica, objetivando conceber a aplicação desses conhecimentos adquiridos no meio acadêmico, almejando a obtenção contínua de melhorias dos processos mundiais.

Este estudo se justifica pela necessidade de melhorar os processos no amplo sentido de minimizar custos através da otimização dos cálculos envolvendo materiais, portanto a abordagem é qualitativa e quantitativa. Considera-se quase inaceitável que algumas empresas ainda façam operações de modo a promover, de forma direta, os desperdícios, pode ser, talvez, por tradição no fazer, ou desconhecimento técnico, talvez seja necessária uma maior consultoria técnica especializada no sentido de orientar corretamente as etapas de projeto e fabricação.

Neste momento, existem gigantescas empresas mineradoras extraíndo o minério de ferro, depois as siderurgias formam a partir destes o ferro gusa e vejam que são milhares de toneladas deste produto retiradas da fonte natural, levando à degradação do meio ambiente. Logo, acredita-se que seria correto que seja feito uso de maneira mais responsável deste aço que foi extraído com tanto sacrifício dos subsolos.

Buscando alcançar maior ganho para a sociedade e para a indústria, será trilhado o caminho da inovação científica. Propõe-se, também, verificar todos os dados envolvidos de forma abrangente para que se possa agir localmente, mas sempre munidos de uma visão global dos processos envolvidos.

4 DESENVOLVIMENTO

4.1 Referencial teórico

Ao investigar questões de produção industrial de forma sustentável, levando em consideração a preservação do meio ambiente, garantindo a sobrevivência das gerações futuras, dispensando sempre uma atenção especial ao desenvolvimento constante, pleiteia-se usar tecnologias atuais com o objetivo de produzir mais, disponibilizando menos insumos, o que vem a ser esse fato um aumento da chamada produtividade que se revela positivamente na indústria, mas não o suficiente. Precisa-se alcançar o limite mínimo de usos e máximo de produção.

No caso dos metais, esse limite mínimo pode ser mensurado por meio de uma variável chamada tensão. De acordo com Melconian (2005, p. 69),

a tensão admissível é a ideal de trabalho para o material nas circunstâncias apresentadas. Geralmente, essa tensão deverá ser mantida na região de deformação elástica do material. Porém, há casos em que a tensão admissível poderá estar na região da deformação plástica do material, visando principalmente a redução do peso de construção como acontece no caso de aviões, foguetes, mísseis, etc.

Serão abordadas de forma bastante vasta as opções de cálculos, envolvendo limites e derivadas, propondo descobrir as melhores dimensões especificamente nas peças cilíndricas, como sugere Anton (2000).

Segundo Nolasco Sobrinho e Tenório (2004), a produção de aço está ligada diretamente à geração de resíduos siderúrgicos. Essa produção mundial de aço bruto, em 2002, superou o valor de 900 milhões de toneladas e a quantidade de 300 milhões de toneladas de resíduos gerados.

É importante refletir no ponto resistência. De acordo com Araujo (2010, p. 502),

muitos materiais, quando inicialmente deformados, apresentam fluxo plástico uniforme, mas depois, em alguns pontos, as características da deformação mudam subitamente de tal forma que essa deformação se concentra em estreitas lâminas do material, caracterizando um fluxo consideravelmente heterogêneo.

A reutilização dos materiais recicláveis tem como principais objetivos minimizar os impactos ambientais e racionalizar a utilização das cadeias energéticas, assim dizem Delforge e Ferreira (2007).

Quando se quer transmitir esforços tangenciais importantes, evitando qualquer deslizamento, utilizando-se rodas dentadas ou engrenagens. Chama-se trem de engrenagens um conjunto de várias rodas dentadas engrenando juntas. A menor roda dentada chama-se pinhão. Se os dentes são paralelos ao eixo, diz-se que estes são retos (BOREL; GEORGE CALANE, 2008).

Biembengut e Hein (2003, p. 48) descrevem: “agora, vamos procurar saber qual a forma ‘ótima’ para uma caixa, isto é, a que utiliza um mínimo de material para um máximo aproveitamento”. O que será feito neste trem é exatamente dimensionar o número ideal de dentes a fim de reduzir custos com redutores e obter as velocidades necessárias.

Confirma-se, com a descrição, que a modelagem e a pesquisa operacional se aplicam em várias situações e, no caso das engrenagens, será também verificável.

4.2 Metodologia

O método utilizado neste trabalho foi dedutivo com finalidade aplicada, pois se trata de estudos envolvendo cálculos matemáticos, o que mostra um objetivo a ser alcançado. As ferramentas de trabalho são as bases da ciência e da engenharia,

podendo esses conhecimentos ser, posteriormente, utilizados na resolução de problemas reais da sociedade.

Foi feito o esforço para tratar desses dados o mais realístico e palpável possível. Para isso, foram feitos levantamentos de valores de mercado no que se referem a preços do aço e a valores de processamento do mesmo, contemplando, nesta pesquisa, as empresas fabricantes dos materiais e as empresas de usinagem que agregam valor ao serviço ou produto em questão.

Fizeram-se necessárias, também, pesquisas bibliográficas em livros, manuais, periódicos, artigos científicos e normas técnicas específicas deste tema. Foi dado enfoque maior às empresas que contêm processos de produção da região de Patos de Minas - MG.

Usaram-se os dados coletados aplicando fórmulas específicas para propor uma significativa minimização dos custos de fabricação e maximização dos lucros. Para isso, fez-se uso da física e de conhecimentos práticos baseados na experiência e de dados empíricos para fins de confrontação deste estudo.

Foi feito um levantamento e cálculo em uma fresadora do SENAI desta cidade, observando suas várias engrenagens e obtendo as conclusões devidas dos cálculos.

4.3 Resultados e discussão

Inicialmente, foi proposto trabalhar os cálculos com diversas variáveis, reduzindo os custos de fabricação e também de aquisição das engrenagens e posterior montagem dos equipamentos, visando maximizar os lucros.

Figura 1 – Engrenamento: pinhão e coroa.

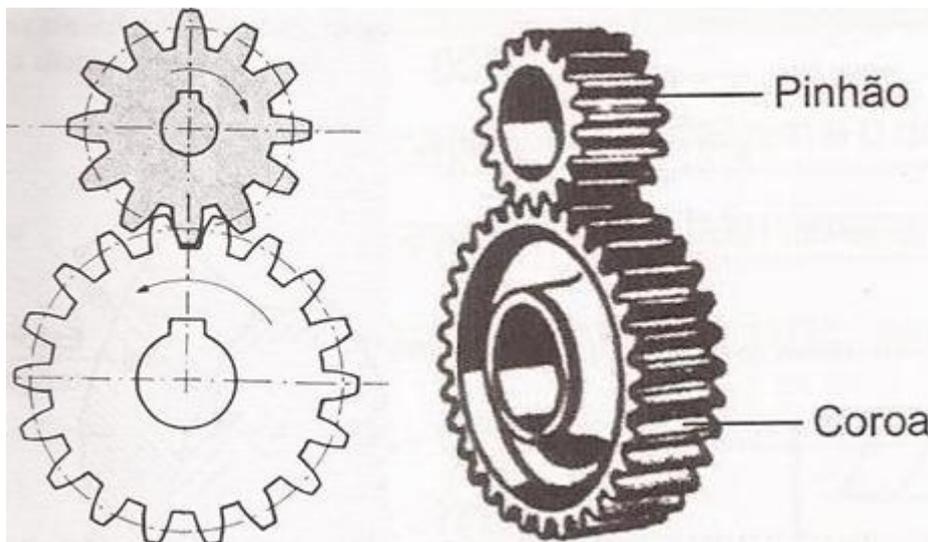
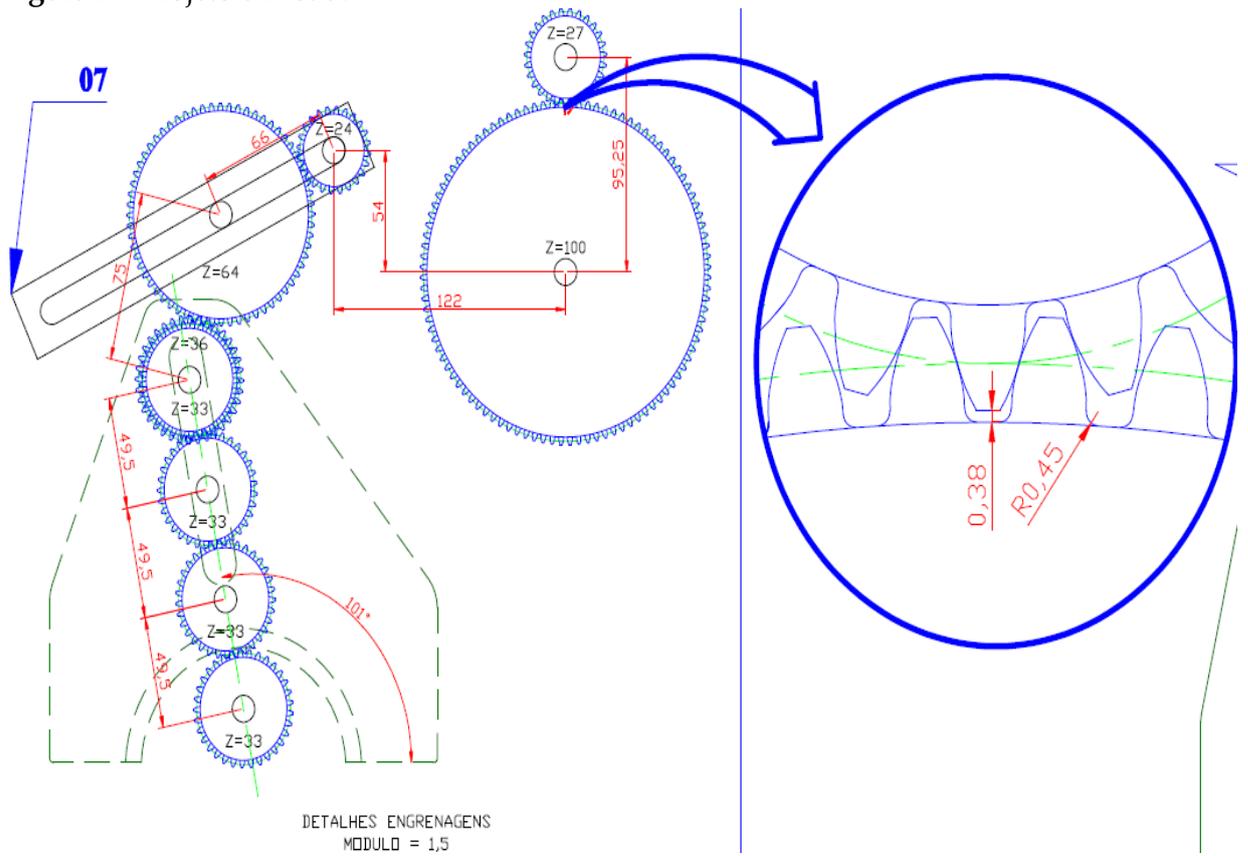
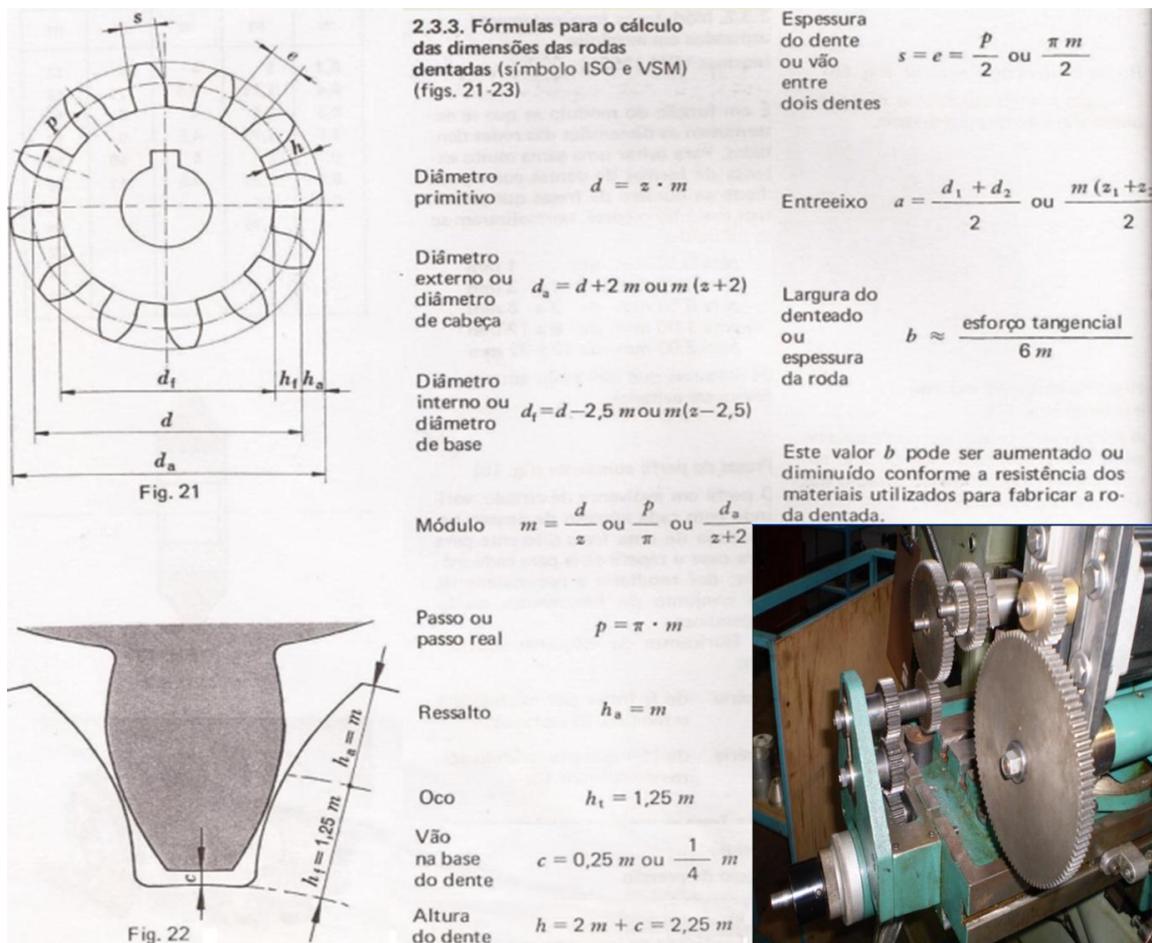


Figura 2 – Projeto em Cad.



Fonte: elaborado pelos autores

Figura 3 – Desenho esquemático para ilustração das variáveis do projeto.



Fonte: adaptado pelos autores

Dados utilizados no cálculo da largura do dente conforme figura 3:

d_a – Diâmetro Externo (mm).

b – Largura do Dente (mm).

P – Peso (kg).

M – Variável tabelada.

m – Módulo (mm)

C – Custo de fabricação (R\$)

D – Densidade do aço 7850 kg/m³.

Pr – Preço; sendo o valor de custo do material + a mão de obra de usinagem: 4+30=34 R\$/kg no processo de fresamento.

Quando se aplica certa potência em CV será solicitado o esforço tangencial, logo essa solicitação se incide na base do dente, onde sua maior força se procede. Para

vencer o esforço, se torna necessário dimensionar a engrenagem de modo que sua resistência seja superior ao esforço incidente. Usou-se a expressão:

$$b = \frac{\text{Esforço Tangencial}}{6.m}$$

Ou a expressão prática: $b = M * 10$, conforme Casillas (2003, p. 171)

Resolução:

$$b = M * 10$$

$$b = 1,45 * 10$$

$$b = 14,5 \text{ mm}$$

Logo, essa é a espessura da chapa ou largura do dente.

Para calcular o custo de fabricação da engrenagem, considerou-se a fórmula a seguir:

$$C = \pi \cdot \frac{da}{2}^2 \cdot \frac{b}{1000} \cdot 7850 \cdot Pr$$

Foi calculando o volume da engrenagem em metros cúbicos e multiplicando por sua densidade para encontrar seus valores em kg.

Mas considerando que a circunferência está inscrita em um quadrado de (da x da), que seria o diâmetro externo, a fórmula fica simplificada assim:

$$C = \frac{da^2}{1000^2} \cdot \frac{b}{1000} \cdot 7850 \cdot Pr$$

$$C = \frac{156^2}{1000^2} \cdot \frac{14,47}{1000} \cdot 7850 \cdot 34$$

$$C = R\$ 93,98/Peça$$

Quando se varia a potência instalada (CV), se afeta a força tangencial; dessa forma, varia-se a largura do dente conforme cálculos já mencionados na figura 3. Fez-se uma série de cálculos para averiguar seu comportamento matemático no sentido de se expressar a modelagem.

4.4 Resultados dos cálculos

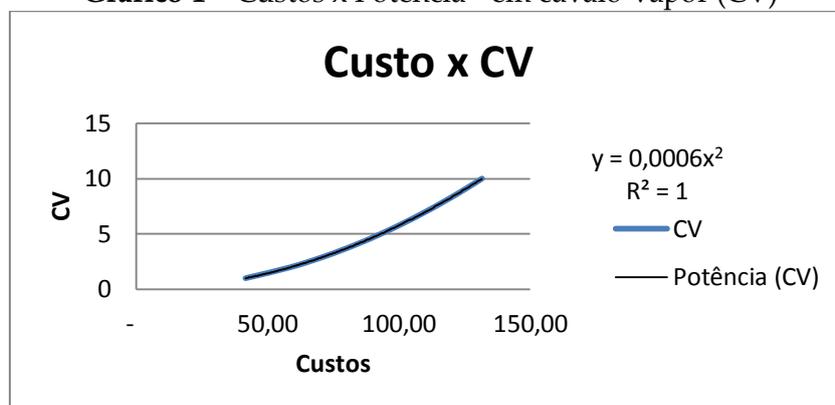
Exposição de resultados obtidos nos cálculos, considerando a potência instalada no sistema, demonstrados na tabela 1.

Tabela 1 – Valores de custos e CV.

Custo	CV
41,62	1
58,86	2
72,09	3
83,25	4
93,07	5
101,96	6
110,13	7
117,73	8
124,87	9
131,63	10

Fonte: elaborada pelos autores

Gráfico 1 – Custos x Potência - em cavalo-vapor (CV)



Fonte: elaborado pelos autores

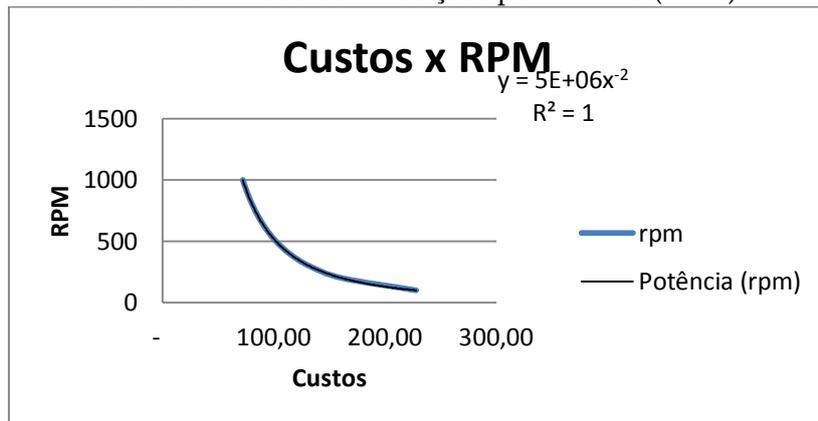
Outra bateria de resultados sobre a velocidade deste sistema foi obtida como mostra a tabela 2.

Tabela 2 – Valores de custos e RPM.

Custo	rpm
227,98	100
161,21	200
131,63	300
113,99	400
101,96	500
93,07	600
86,17	700
80,60	800
75,99	900
72,09	1000

Fonte: elaborada pelos autores

Gráfico 2 – Custos x Rotações por minuto (RPM)



Fonte: elaborado pelos autores

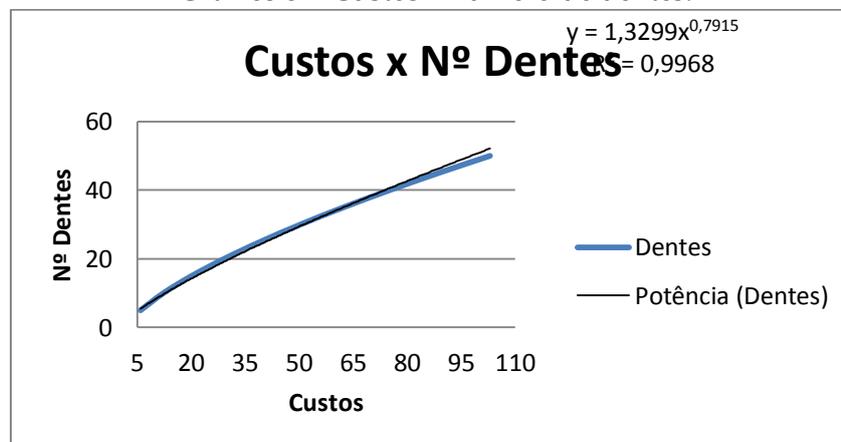
É fato importantíssimo a salientar que quando se aumenta o número de dentes aumentam-se os custos, de acordo com a tabela 3.

Tabela 3 – Valores de custos e número de dentes.

Custo	Dentes
5,90	5
12,26	10
20,09	15
29,14	20
39,26	25
50,34	30
62,31	35
75,10	40
88,67	45
102,97	50

Fonte: elaborada pelos autores

Gráfico 3 – Custos x número de dentes.

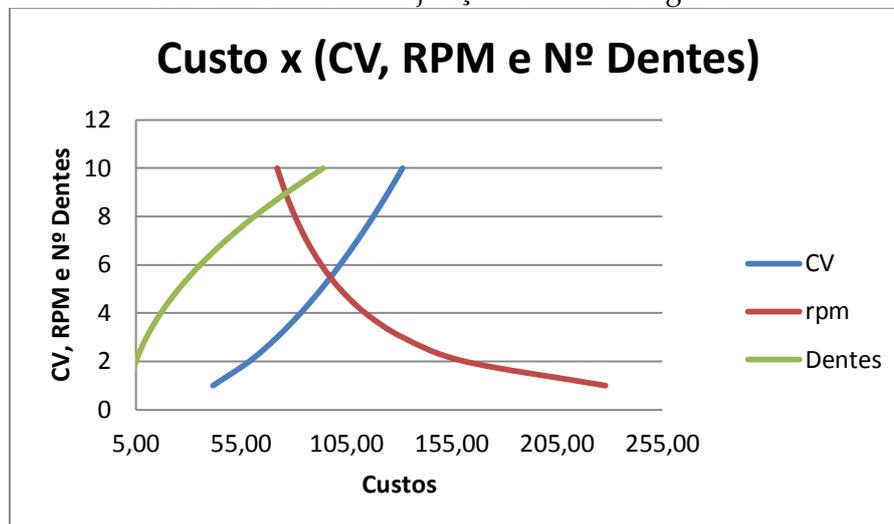


Fonte: elaborado pelos autores

4.5 Otimização

Observando o gráfico abaixo que se trata de uma junção dos gráficos anteriores.

Gráfico 4 – Custos x junção dos demais gráficos.



Fonte: elaborado pelos autores

Este gráfico mostra que o custo ideal de acordo com a eficiência está entre R\$ 75,10 e R\$ 101,96. Veja a tabela 4 que disponibiliza a faixa de eficiência como forma de sugestão.

Tabela 4 – Faixa de eficiência encontrada pela técnica de pesquisa operacional (método gráfico).

CV	RPM	DENTES
6	600	30
8	800	40

Fonte: elaborada pelos autores

5 CONCLUSÃO

De acordo com os estudos feitos, análises de dados matemáticos e levantamento de dados empíricos em campo bastante satisfatórios, encontram-se respaldos que podem afirmar ter atingido o objetivo que seria descobrir melhores possibilidades de aplicação científica, trazendo ganhos expressivos para a sociedade.

Também foram feitas várias simulações utilizando o software Excel para tratar dos resultados obtidos e demonstrar baixa de custos.

Este custo é relevante, pois se tem agora a oportunidade de executar a fabricação de engrenagens com menores gastos e eficiência compatível, apenas trabalhando as variáveis principais do processo que são: CV, RPM, Nº de DENTES.

REFERÊNCIAS

ANTON, Howard. *Cálculo: um novo horizonte*. 6. ed. São Paulo: Bookman, 2000. 578 p.

ARAÚJO, Arisson Carvalho *et al.* Análise da formação de bandas de cisalhamento por meio de corpos-de-prova de tração especiais. *Revista Escola de Minas [online]*, Ouro Preto, v. 63, n. 3, p.501-507, set. 2010. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0370-44672010000300012&script=sci_abstract&tlng=pt>. Acesso em: 01 mar. 2011.

BIEMBENGUT, Maria Salett; HEIN, Nelson. *Modelagem matemática no ensino*. 3. ed. São Paulo: Contexto, 2003. 127 p.

BOREL, George Calane *et al.* *Matemática prática para mecânicos*. São Paulo: Hemus, 2008. 267 p.

CASILLAS, A.L. *Máquinas: formulário técnico*. 19. ed. São Paulo: Mestre Jou, 2003. 636 p.

DELFORGE, Daniel Yvan Martin *et al.* Sinterização de uma mistura de cavaco de aço inoxidável com pó do mesmo material: uma nova tecnologia para a reciclagem de metais?. *Revista Escola de Minas [online]*, Ouro Preto, v. 60, n. 1, p.95-100, 2007. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0370-44672007000100015&script=sci_abstract&tlng=pt>. Acesso em: 01 mar. 2011.

MELCONIAN, Sarkis. *Mecânica técnica e resistência dos materiais*. 16. ed. São Paulo: Érica Ltda, 2005. 360 p.

MELCONIAN, Sarkis. *Elementos de máquinas*. 9. ed. São Paulo: Érica Ltda, 2008. 376 p.

NBR 6684 (Brasil). *Engrenagens cilíndricas: dentes retos e helicoidais*. Rio de Janeiro, 1981. 21 p.

NOLASCO SOBRINHO, Pedro José; TENÓRIO, Jorge Alberto Soares. Reciclagem da poeira e lama geradas na fabricação de aço inoxidável. *Revista Escola de Minas [online]*, Ouro Preto, n. , p.121-127, abr. 2004. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0370-44672004000200009&script=sci_abstract&tlng=pt>. Acesso em: 28 fev. 2011.