



## PMC-581 Projeto Mecânico II

# Otimização do Trem de Engrenagem através da Engenharia Robusta pelo Método de Taguchi

*aprovado  
10,0 (dez)  
Edson Gomes  
20 dez 2000*

**Aluno:** Ernesto Masamitsu Kabashima    N° USP: 2192343

**Curso:** Engenharia Mecânica – Projeto & Fabricação

**Orientador:** Prof. Edson Gomes

**Coordenador:** Prof. Edson Gomes

**Data:** 12/12/2000



## **DEDICATÓRIA**

Eu dedico este Projeto ao meu  
amigo Jacob Hounsgaard que foi o meu  
companheiro na primeira etapa do projeto.

  
20 dez 2000

**DEDALUS - Acervo - EPMN**



31600005960



## Sumário

|   |    |
|---|----|
| 1. Introdução.....  | 4  |
| 2. O Problema.....  | 5  |
| 3. Engenharia Robusta pelo Método de Taguchi.....         | 7  |
| 3.1. Histórico.....                                       | 7  |
| 3.2. Definição de Engenharia Robusta.....                 | 7  |
| 3.3. O sistema de engenharia.....                         | 10 |
| 4. Etapas do Projeto Robusto.....                         | 19 |
| 4.1. Identificação do projeto.....                        | 19 |
| 4.2. Definição da função básica e do resultado.....       | 19 |
| 4.3. Definição do que medir e como medir.....             | 19 |
| 4.4. Definição da função ideal.....                       | 20 |
| 4.5. Definição dos fatores e níveis.....                  | 20 |
| 4.6. Formulação do experimento.....                       | 20 |
| 4.7. Coleta dos dados.....                                | 21 |
| 4.8. Análise dos dados e escolha da combinação ótima..... | 21 |
| 4.9. Confirmação dos resultados.....                      | 22 |
| 5. Exemplo Ilustrativo: Nissan, 1992.....                 | 23 |
| 6. Otimização da engrenagem pré-tensionada.....           | 31 |
| 6.1. Definição da função básica e do resultado.....       | 31 |
| 6.2. Definição do que medir e como medir.....             | 32 |
| 6.3. Definição dos fatores e níveis.....                  | 33 |
| 6.4. Formulação do experimento.....                       | 34 |
| 6.5. Coleta dos dados.....                                | 35 |
| 6.6. Análise dos dados e escolha da combinação ótima..... | 36 |
| 6.7. Confirmação dos resultados.....                      | 38 |
| 7. Conclusão.....   | 40 |
| 8. Referências Bibliográficas.....                        | 41 |



## **1. INTRODUÇÃO**

Este projeto irá realizar a otimização do trem de engrenagem, mais especificamente a engrenagem da bomba injetora, a fim de eliminar os altos índices de ruído. Para tal otimização, será utilizado a Engenharia Robusta pelo método de Taguchi.

A primeira etapa do projeto, 1º semestre, foi utilizado para o aprendizado do método, apresentado a seguir, e para dar início ao projeto de otimização envolvendo engenheiros das empresas de motor e de transmissão coordenado por engenheiros da General Motors do Brasil e o consultor da Qualiplus/ASI Brasil.

Na segunda etapa, 2º semestre, foi dada a continuidade definindo as características do projeto, realizando os testes necessários, análises dos resultados e o teste confirmatório para se avaliar a eficiência do método.



## 2. O PROBLEMA

Durante o desenvolvimento do motor e transmissão de um veículo, foi constatado problemas de ruídos gerados pelo trem de engrenagem. O trem de engrenagem é um conjunto de engrenagens conectadas entre si para distribuir torque do motor a vários outros sistemas como a bomba injetora, a bomba d'água, a bomba hidráulica, a árvore de manivela e a árvore de comando de válvulas.

Abaixo está a figura ilustrativa do trem de engrenagem.

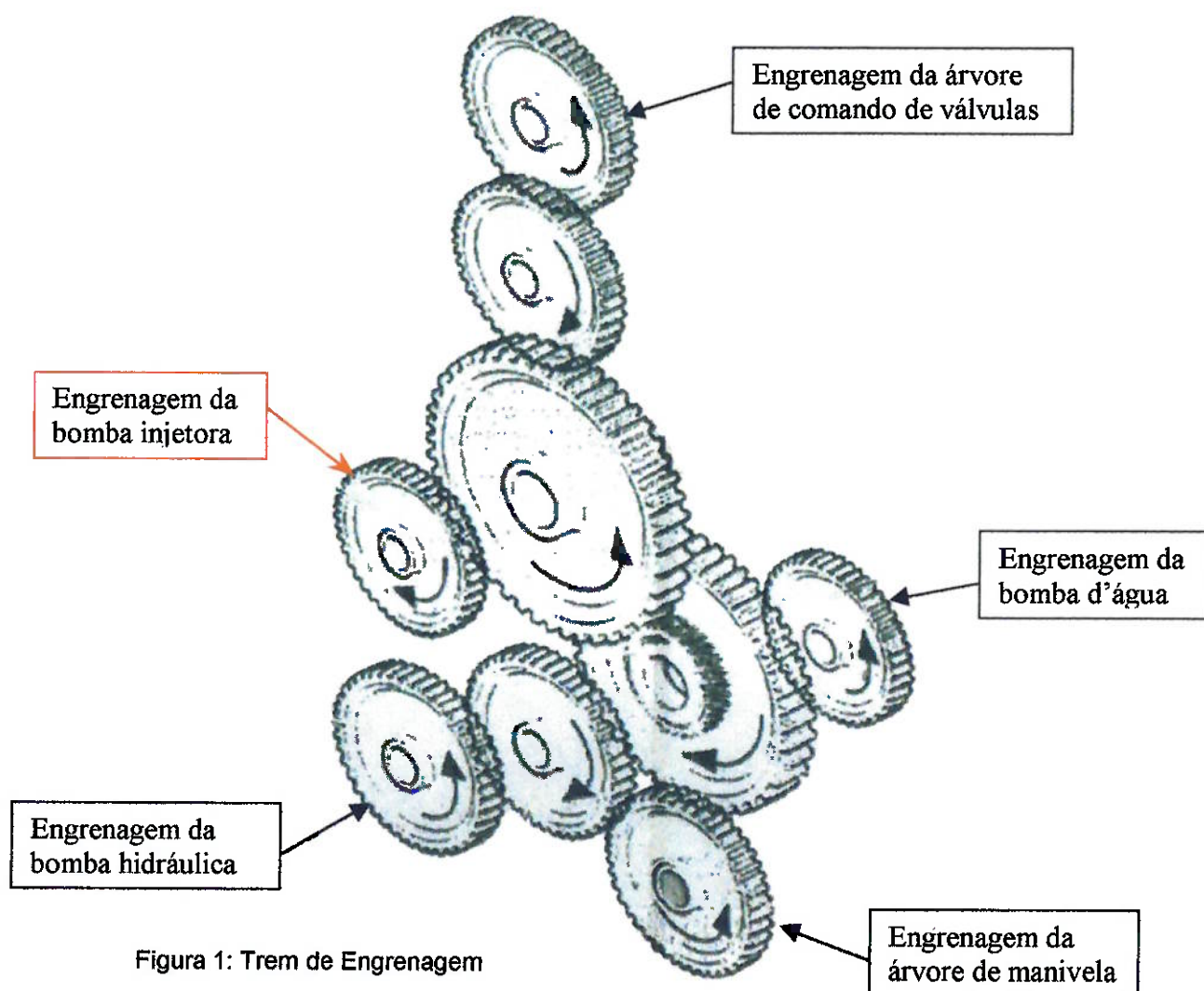


Figura 1: Trem de Engrenagem



Para resolver o maior problema de ruído, gerado pela engrenagem da bomba injetora, será necessário a utilização de um método de otimização.

O problema do ruído da engrenagem da bomba injetora é gerado pelo impacto entre os dentes das engrenagem quando ocorre pulso na bomba injetora. O pulso é originado pela injeção de combustível na câmara de combustão. No instante da injeção de combustível, a pressão interna da bomba é diminuído até que se estabeleça a pressão inicial, gerando o pulso. Na engrenagem este pulso tira os dentes do contato quando a pressão diminui na bomba e quando a pressão volta ao valor inicial ocorre um impacto entre os dentes produzindo o ruído.



### **3. ENGENHARIA ROBUSTA PELO MÉTODO DE TAGUCHI**

#### **3.1. Histórico**

O método de Taguchi foi desenvolvido nos anos 50 pelo Dr. Genichi Taguchi, na época um engenheiro da empresa NTT, no Japão. Ao longo da década de 60, a metodologia experimentou um expressivo crescimento no Japão, e no início dos anos 80 foi introduzido nos EUA, tendo como pioneiras na sua aplicação gigantes como AT&T, Xerox e Ford. Em 1983, o Dr. Taguchi assumiu a presidência do American Supplier Institute (ASI). Mas foi no começo da década de 90 que houve uma enorme disseminação das idéias mais aprimoradas da Engenharia Robusta.

#### **3.2. Definição de Engenharia Robusta**

Engenharia Robusta é composta por um conjunto de conceitos, estratégias e métodos desenvolvidos pelo Dr. Taguchi que visa reduzir a variabilidade funcional de um produto ou processo, e que utiliza o conhecimento existente de engenharia para realizar os seguintes benefícios: melhor qualidade, menor custo e por último menor tempo de desenvolvimento. Esses benefícios são frutos de uma boa qualidade no projeto. Mas, o que é qualidade do ponto de vista de engenharia? Como projetar com qualidade? Como avaliar a qualidade?

Segundo Taguchi, “qualidade é a mínima perda que um produto causa à sociedade após ter sido expedido, excluindo-se as perdas causadas por





suas funções intrínsecas.” A mentalidade tradicional de como avaliar a qualidade é representada pela Função Perda Degrau, como mostra a figura abaixo.

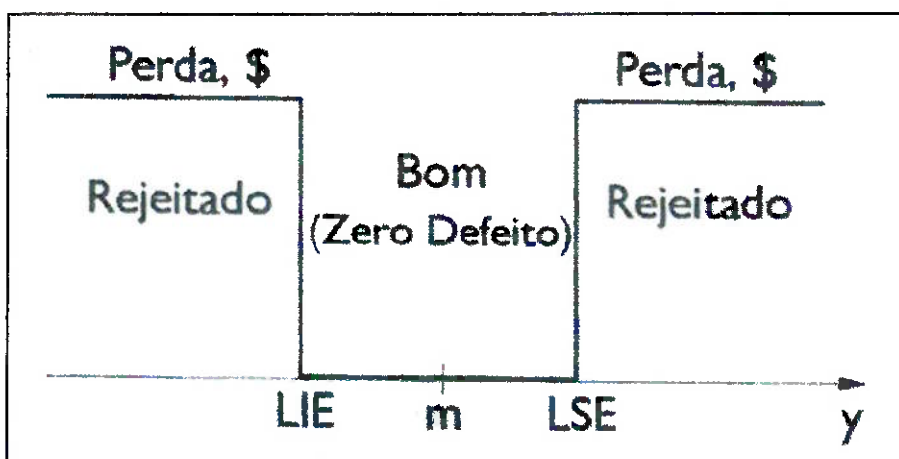


Figura 2: Função Perda Degrau.

Há um valor ideal ( $m$ ) para cada parâmetro de engenharia. Porém, a obtenção desse valor ideal é difícil e portanto inviável, devido à variabilidade na manufatura, e portanto cria-se limites de tolerância especificados ( $LIE$  e  $LSE$ ), demonstrados na figura acima. Como pode ser interpretado pela figura, o que está compreendido entre os limites é considerado como zero defeito, ou seja, é aprovado, e o que se situa fora dos limites, é rejeitado e portanto representa uma perda.

O método de Taguchi utiliza uma função um pouco diferente, conhecida como a Função Perda Quadrática, exposta logo abaixo. Taguchi acredita que conquistar o zero defeito não é suficiente, porque qualquer desvio em relação ao valor ideal implica uma perda, mesmo que esteja situado dentro da tolerância. Uma breve análise do gráfico elucida que



quanto maior for o desvio, tão maior será a perda. O objetivo do Projeto Robusto é minimizar a variabilidade em torno do valor ideal.

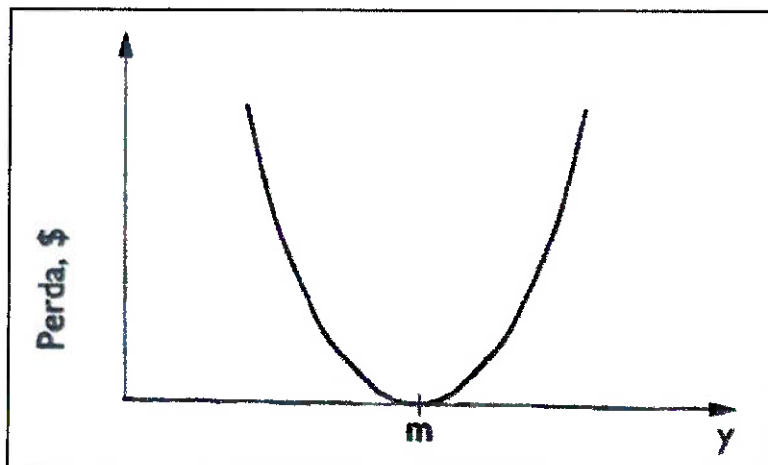


Figura 3: Função Perda Quadrática.

Para entender-se exatamente o que é Engenharia Robusta, deve-se compreender primeiro o que é precisamente robustez. Nenhuma definição é mais adequada do que a do próprio Dr. Taguchi, que diz: "Robustez é o estado no qual o desempenho da tecnologia, produto ou processo é minimamente sensível a fatores que causam variabilidade na fabricação ou no uso, ao menor custo unitário de manufatura."

Ao se idealizar um novo produto/processo, a abordagem tradicional da engenharia é a de projetar, construir alguns protótipos, testá-los, identificar os problemas e consequentemente suas causas, e em seguida reprojetar, reconstruir, retestar, e assim por diante. Esta abordagem representa na maioria dos projetos um longo (e caro) ciclo, que consome inúmeras horas e recursos. Levanta-se portanto a questão: será que esta abordagem é eficaz?



### 3.3. O sistema de Engenharia

Tipicamente, o engenheiro preocupa-se em medir e eliminar os diferentes sintomas de mau-funcionamento, como defeitos e falhas. Entretanto, o método de Taguchi, ao invés de se concentrar no que pode dar errado, irá focar o que se deseja que o produto/processo realize. Surge então um ponto de elevada importância para o sucesso da metodologia proposta, a definição da **função** do sistema.

A capacidade do engenheiro de melhorar de maneira eficaz o desempenho do sistema está diretamente relacionada à capacidade de medir a **função** do produto/processo. Uma vez identificada uma função mensurável, torna-se possível enxergar o comportamento ideal da mesma. A função é a relação entre a entrada do sistema, também chamado de fator de sinal ( $M$ ) e a saída do sistema, também denominada característica de desempenho ( $y$ ). A figura abaixo ilustra a relação ideal entre  $M$  e  $y$ , que é o resultado que a Engenharia Robusta busca atingir.

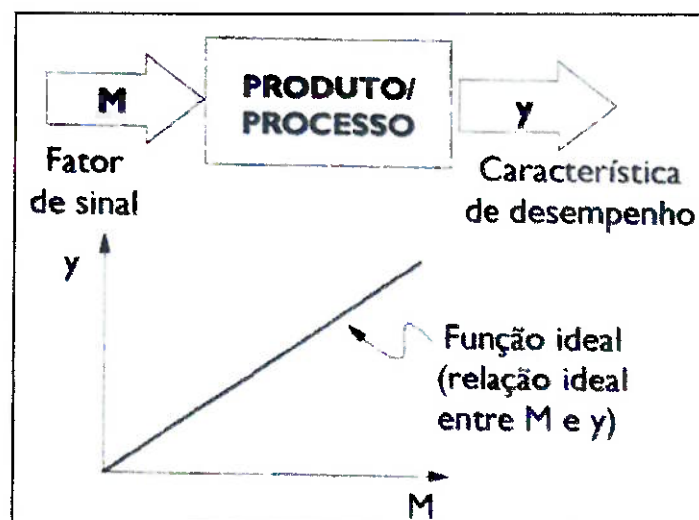


Figura 4: Função ideal do sistema.



Um exemplo de um sistema simples, para efeito de compreensão, pode ser a de um sistema de freio. A função básica do sistema é a de desacelerar o veículo. O fator de sinal ( $M$ ) seria a força no pedal e a resposta ( $y$ ) seria o torque resultante para a frenagem.

Porém, a realidade não costuma ser ideal da maneira descrita acima. Na prática, observa-se desvios em relação ao ideal, como pode ser visto abaixo..

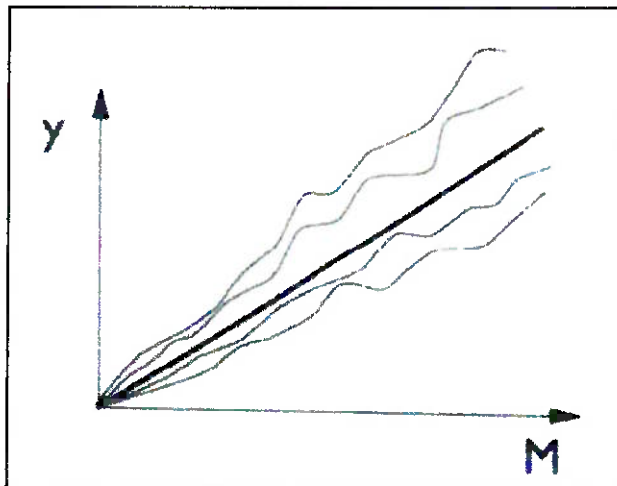


Figura 5: Gráfico da variabilidade funcional.

Ou seja, isto significa que existe uma variabilidade funcional do produto/processo, que é causada por diversos fatores, e que por sua vez causa os diversos sintomas de mau-funcionamento. Portanto, atingir uma estabilidade funcional, que se entende por robustez, é imprescindível para assegurar o bom desempenho do sistema. Mas o que fundamentalmente faz com que o comportamento do sistema se afaste do ideal?

Todo sistema de engenharia lida com energia, em suas diferentes



formas. A execução da função básica por qualquer sistema de engenharia envolve uma transformação de energia.



Figura 6: Esquema de transformação de energia.

Porém, todo sistema físico que visa realizar essa transformação de energia sofre perdas. Tais perdas usualmente não são uniformes mas variam sob a influência de inúmeros fatores associados às condições ambientais, condições de uso e de deterioração, fatores os quais são denominados **fatores de ruído**. Logo, a variabilidade funcional é essencialmente uma variabilidade na transformação de energia. Mas, se os fatores de ruído são a causa de tudo, como deve-se proceder em relação a eles?

Algumas das atitudes que podem ser tomadas seriam a de ignorar o ruído, a de eliminar ou controlar o ruído e a de compensar o efeito do ruído. No caso de ignorar, é até aceitável se o fator de ruído não for importante, mas geralmente esta atitude resulta em um "incêndio" a apagar numa etapa mais avançada do processo, ou rio abaixo, fazendo-se uma analogia ao curso de um rio, onde a nascente seria a concepção do produto e a foz seria a finalização do mesmo. No caso de eliminar ou controlar o ruído, pode-se



apertar as tolerâncias, usar um material mais resistente, ou aumentar a inspeção e o controle no processo. Por último, tem-se o caso estudado neste trabalho, que é o de compensar o efeito do ruído.

A estratégia de Taguchi é justamente o de minimizar o efeito do ruído, tornando o produto robusto (insensível) contra o efeito dos fatores de ruído. Esta abordagem é a que apresenta maior eficácia de custo – inclusive, ao ser aplicada com êxito, o custo de qualquer outro método de engenharia de qualidade cuja aplicação subsequente venha a ser necessária será diminuído substancialmente.

Mas o que afeta a função do sistema? Na verdade, inúmeros fatores afetam a saída simultaneamente, portanto o desafio está em averiguar quais são os de maior importância e também se há alguma dependência entre os diversos fatores. Porém, é razoável afirmar que em quase todos os casos há muitos fatores, o que torna inviável a análise de todos. Aí que entra um dos segredos do baixo custo e geralmente do baixo tempo de execução do método de Taguchi. O que se faz é dividir os fatores em dois grupos distintos: alguns fatores são facilmente controláveis ou baratos de se controlar, outros beiram o impossível de se controlar ou envolvem um altíssimo custo. O primeiro grupo vira portanto os fatores de controle do sistema enquanto que os do segundo grupo tornam-se os fatores de ruído. No exemplo do sistema de freio, pode-se citar como fatores a velocidade do veículo, as dimensões e o material das pastilhas, a temperatura do motor, a viscosidade do fluido, o diâmetro da mangueira do fluido e até o acabamento



superficial do rotor. Na figura abaixo está representado como ficaria o sistema.

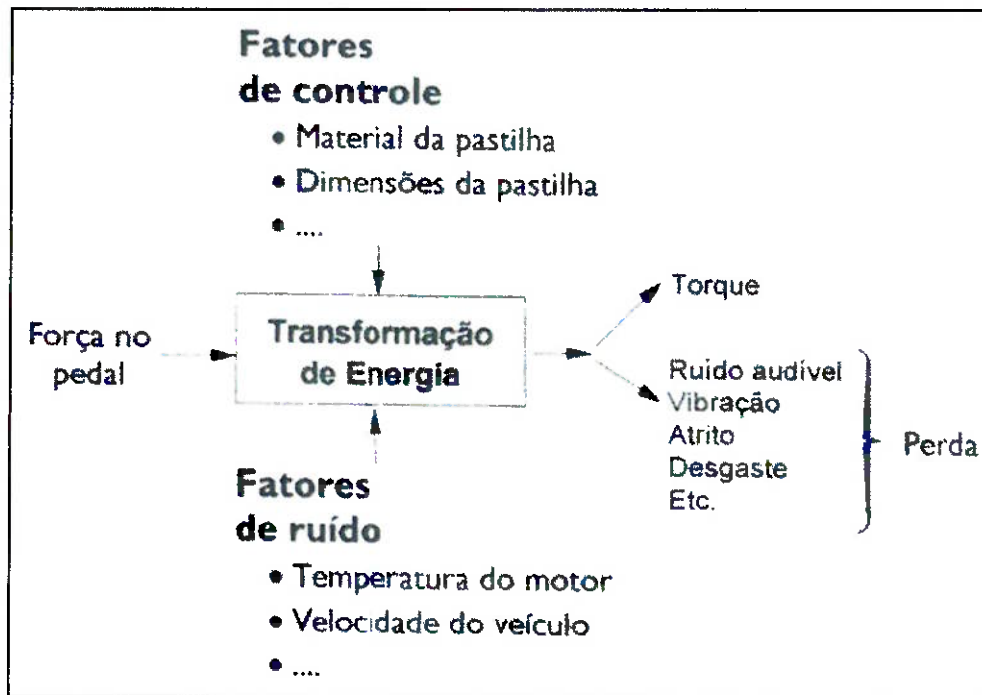


Fig. 7: Sistema de freio – transformação de energia.

Neste caso, os dois fatores que seriam inviáveis de se controlar são a temperatura do motor e a velocidade do veículo, que assumiram então o papel dos fatores de ruído, e os restantes passam então a ser os fatores de controle. Então, para se incorporar a robustez ao projeto, a tarefa é encontrar a melhor combinação dos fatores de controle que torne a função do produto/processo estável na presença dos fatores de ruído. Desta forma, é possível atingir o objetivo de alto desempenho unido ao baixo custo. Nas palavras do próprio Dr. Taguchi, "você tem que mudar parâmetros de projeto para tornar o produto menos sensível a variações. Não queira controlar as





causas de variação diretamente. Este é o último recurso. Custa muito caro.”

Introduz-se agora o conceito de como é feita a medição de robustez. Na engenharia robusta, usa-se uma relação de extrema utilidade: sinal / ruído, S/N (signal to noise ratio), para medir a robustez. Essa relação S/N representa um número diretamente proporcional ao “grau de idealidade” atingido por um sistema qualquer. Na prática, usa-se fórmulas matemáticas para calcular a relação S/N a partir de dados obtidos em experimentos. De uma forma simples:

$$S/N = \frac{\text{Energia Útil}}{\text{Energia Perdida}} \longrightarrow \frac{(\text{energia transformada na função requerida})}{(\text{energia transformada em outras coisas})}$$

Na realidade a relação S/N é medida em uma escala logarítmica em decibéis (dB). A definição desta medida é:

$$dB = -10 \log \left[ \frac{\text{Potência do sinal}}{\text{Potência do ruído}} \right]$$

O sistema então ficaria conforme a figura abaixo:

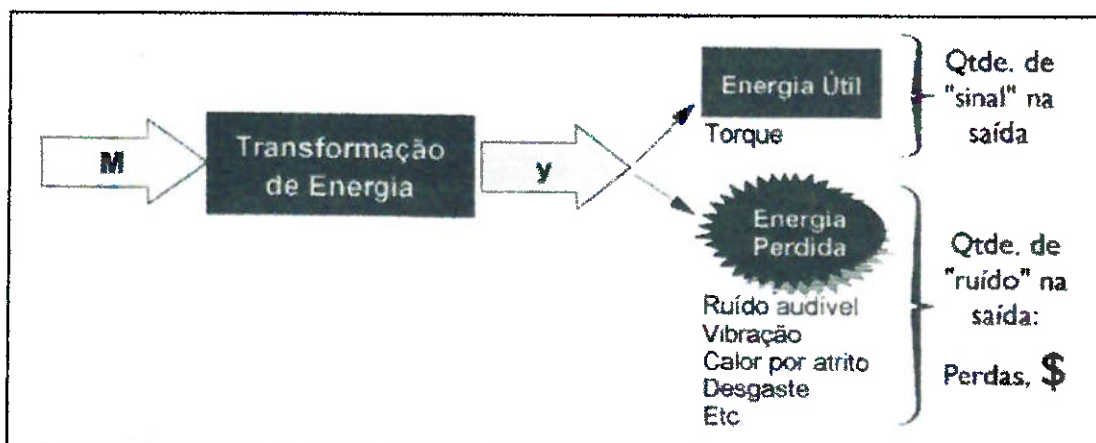


Figura 8: Sistema, para no caso do freio.





Para compreender graficamente o significado da relação S/N, foi inserida a próxima figura, que compara uma baixa S/N com uma alta S/N, em ambos os casos representando uma situação real.

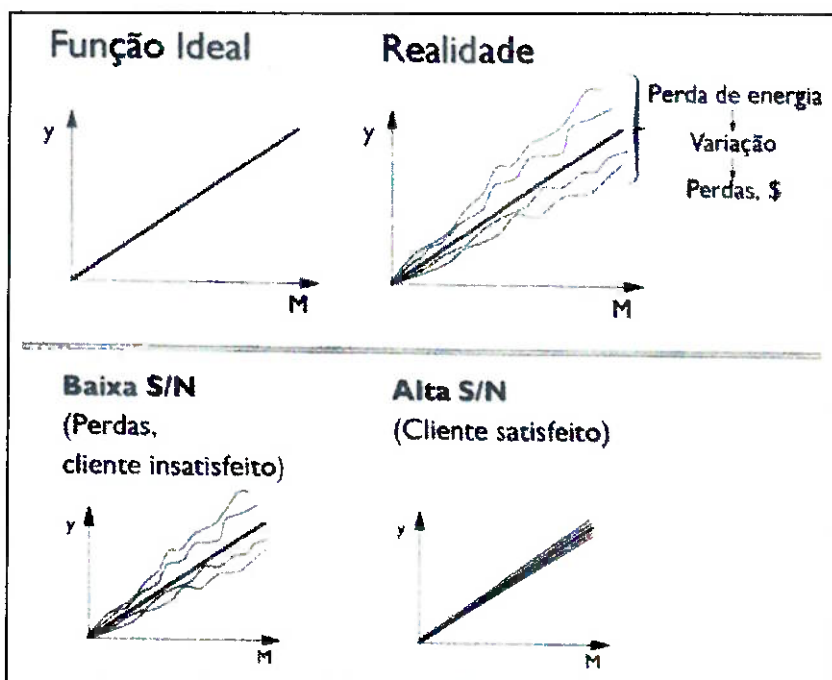


Figura 9: Relação entre S/N e variabilidade funcional.

O principal benefício de se atingir a robustez é que quanto mais é reduzida a variabilidade funcional, menos energia sobrar para ser perdida em sintomas indesejáveis. Em outras palavras, ao assegurar um desempenho próximo do ideal (alta relação S/N) no projeto do produto/processo, diminui-se enormemente a ocorrência de “incêndios” a serem apagados rio abaixo.

Outros benefícios atingíveis pela redução da variabilidade funcional dignos de menção são o aumento da durabilidade e da confiabilidade, como



pode ser deduzido pelo gráfico abaixo.

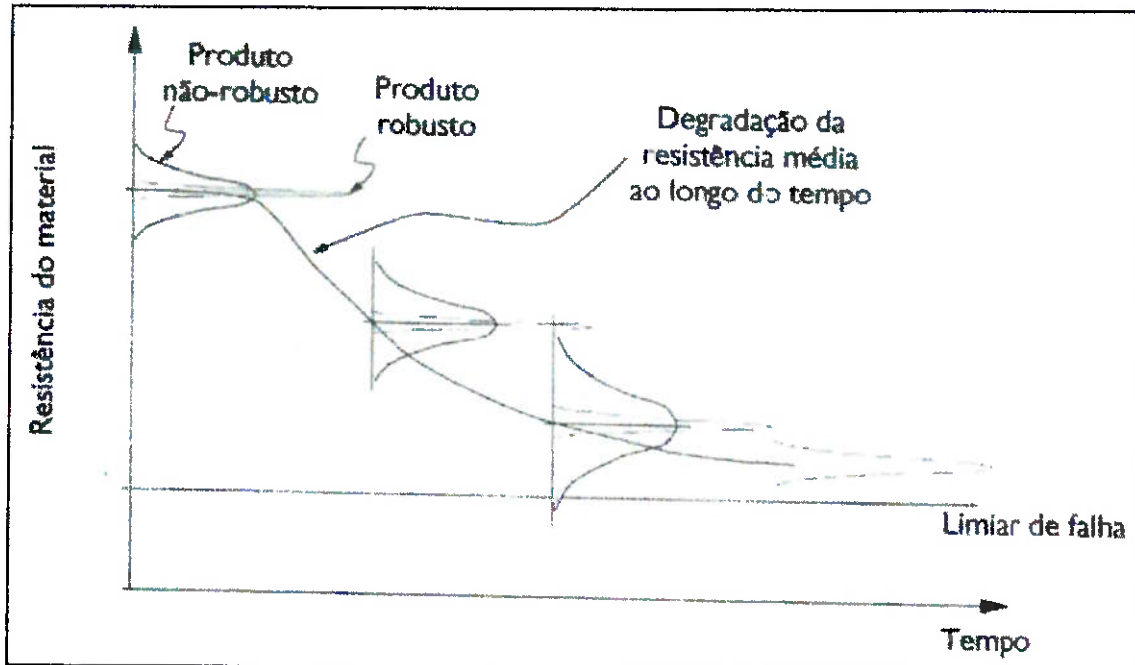


Figura 10: Gráfico que mostra o aumento de durabilidade e confiabilidade através do método.

Com o propósito de facilitar o entendimento geral de como funciona o modelo genérico aplicável a qualquer sistema de engenharia, apresenta-se a seguir um resumo do que foi apresentado até agora neste trabalho.

- *Fator de sinal* – entrada do sistema;
- *Resposta* – saída do sistema (resultado);
- *Função ideal* – relação perfeita entre o fator de sinal e a resposta;
- *Fatores de ruído* – fatores não controláveis ou que possuem alto impacto no custo;
- *Fatores de controle* – fatores controláveis e que tem mínimo impacto no custo.

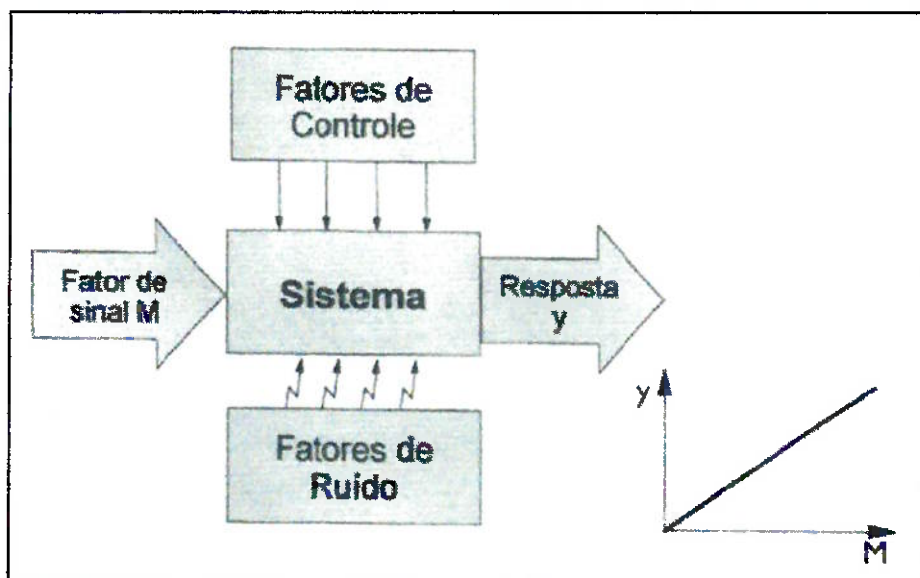


Figura 11: Modelo de um sistema de engenharia.

Para aumentar a robustez de um sistema, é necessário identificar a melhor combinação dos fatores de controle, de modo que os fatores de ruído não impeçam que o fator de sinal se transforme na resposta desejada.



## **4. ETAPAS DO PROJETO ROBUSTO**

### **4.1. Identificação do projeto**

Para esta etapa inicial, deve-se definir os objetivos do projeto. Em seguida é necessário identificar o sistema e/ou subsistema. Neste instante é importante definir as funções dentro da equipe (líder, secretário e membros), o esquema de reuniões e as regras de operação da equipe. Para finalizar esta etapa, deve-se coletar os dados do produto e/ou processo atual (média, variabilidade, índices de capacidade), para poder realizar comparações futuramente.

### **4.2. Definição da função básica e o resultado**

Para maior clareza e objetividade, é preciso expressar em uma frase a função básica do sistema e o resultado desejado pelo cliente. Esta etapa é de grande importância para dar o direcionamento inicial do projeto.

### **4.3. Definição do que medir e como medir**

Primeiramente deve-se definir a característica do sistema. Como na característica dinâmica representa melhor a realidade, sempre que possível, usar esta característica. Neste caso, define-se o fator de sinal  $M$  e a resposta  $Y$  e como deve-se medi-los/controlá-los.



Para as demais característica é necessário definir a resposta  $Y$ , seguindo as diretrizes para escolha de características. É conveniente escolher grandezas contínuas, que envolvam energia, diretamente relacionadas com a função do produto e/ou processo.

#### **4.4. Definição da função ideal**

Esta etapa é somente destinada para sistemas de característica dinâmica. Normalmente a função ideal é uma função de primeiro grau.

#### **4.5. Definição de fatores e níveis**

Após listar todos os fatores relevantes (brainstorm), separa-se fatores de controle dos fatores de ruído. Dentre os fatores separados, seleciona-se os fatores de controle e ruído, definindo os níveis necessários. Para o sistema de característica dinâmica, define-se os níveis do fator de sinal.

#### **4.6. Formulação do experimento**

Para formular o experimento é necessário selecionar o arranjo ortogonal (AO) correto ou adaptá-lo e atribuir fatores de controle às colunas do AO.

Em seguida define a estratégia de ruído para controlar ou forçar o ruído no experimento. Para isto, pode-se utilizar um AO dos fatores de ruído, combinar fatores de ruído (N1: favorável; N2: desfavorável para  $y$ ), realizar



experimento com fatores de ruído (caso não se conheça os efeitos) e utilizar o mais forte, ou utilizar a repetição (última opção).

Para finalizar a etapa, esboça-se o layout final do experimento.

#### **4.7. Coleta de dados**

Nesta etapa, deve-se gerar planilhas para as rodadas do experimento. Para que esta coleta não tenha surpresas indesejáveis, é necessário definir as responsabilidades e datas, não esquecendo de orientar as pessoas envolvidas na realização das rodadas, anotando no “diário de bordo” ocorrências especiais.

#### **4.8. Análise dos dados e escolha da combinação ótima**

Com os dados obtidos no item anterior, calcula-se a média, a relação sinal/ruído e  $\beta$ , para característica dinâmica, para cada rodada.

Depois disso, deve-se construir e interpretar as tabelas de resposta para definir a combinação ótima.

Ainda nesta etapa, faz-se previsões para a combinação ótima (S/N e média), que no caso da característica dinâmica ou nominal-melhor, realiza-se a otimização em duas etapas.

Finalmente define-se o experimento confirmatório que serve também para esclarecer dúvidas do experimento anterior e investigar novas regiões para a otimização.



#### **4.9. Confirmação dos resultados**

Esta etapa é de extrema importância para analisar e julgar o projeto de otimização realizado.

Com o experimento confirmatório da etapa anterior, analisar os resultados. Caso a melhoria não for constatada, retornar à etapa 5 ou considerar o Projeto de Tolerâncias.

Compara-se os ganhos obtidos da situação anterior com a otimizada.

Implementa-se a melhoria caso os resultados viabilizem a otimização e documenta-se o caso para poder ser consultado posteriormente.



## 5. EXEMPLO ILUSTRATIVO : Nissan, 1992

Em 1992 a Nissan resolveu substituir o processo de tratamento térmico para acelerar o tempo do tratamento em engrenagens de aço. Porém, para isso, foi necessário aumentar o teor de carbono do aço, o que aumentou a dureza deteriorando a qualidade dimensional e o acabamento superficial. Desta forma, para manter a qualidade, tornou necessário adequar o processo de usinagem.

Assim o objetivo era otimizar o processo de usinagem para poder utilizar o aço mais duro e ao mesmo tempo garantir as dimensões especificadas sem aumentar o custo.

Definido a função ideal, foi também determinado o fator de sinal (M), dimensões do programa CNC, e a resposta (Y), cotas medidas na peça. Eles estão apresentados na figura abaixo.

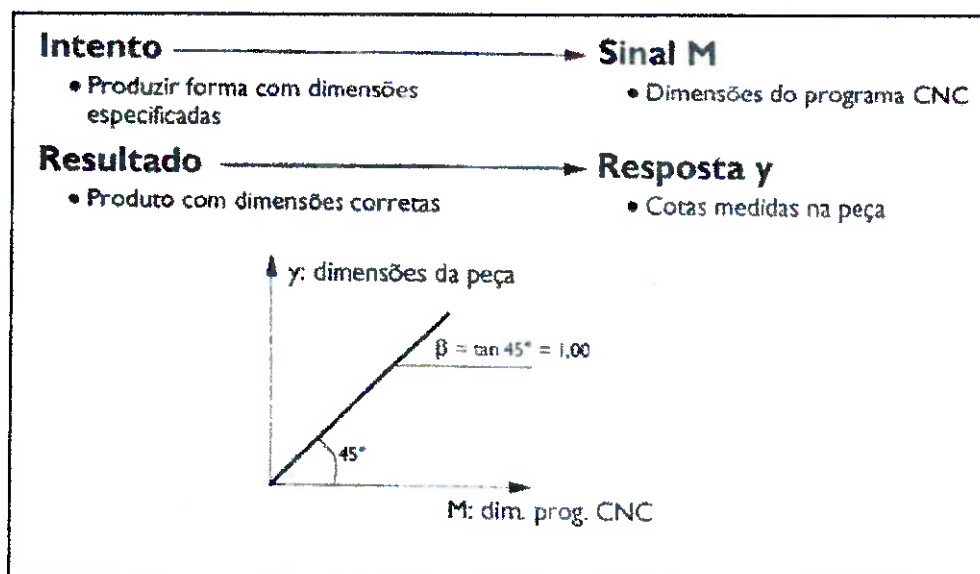


Figura 12: Função ideal, fator de sinal e resposta.





Neste caso da Nissan em específico, a função ideal de primeira ordem tem o coeficiente angular igual a 1 ( $45^\circ$ ), pois as dimensões da peça que se deseja obter ao final do processo é o mesmo que as dimensões iniciais do programa CNC.

Além disso, não foi utilizada uma engrenagem real para realizar as medições. Na verdade, foi utilizado uma peça de ensaio, para facilitar a medição, e com vários níveis de sinal, cobrindo uma larga faixa de operação do processo, pois o objetivo não é otimizar a capacidade de produzir determinado tipo de engrenagem, e sim de otimizar a tecnologia de usinagem.

A seguir está o desenho da peça de ensaio utilizada.

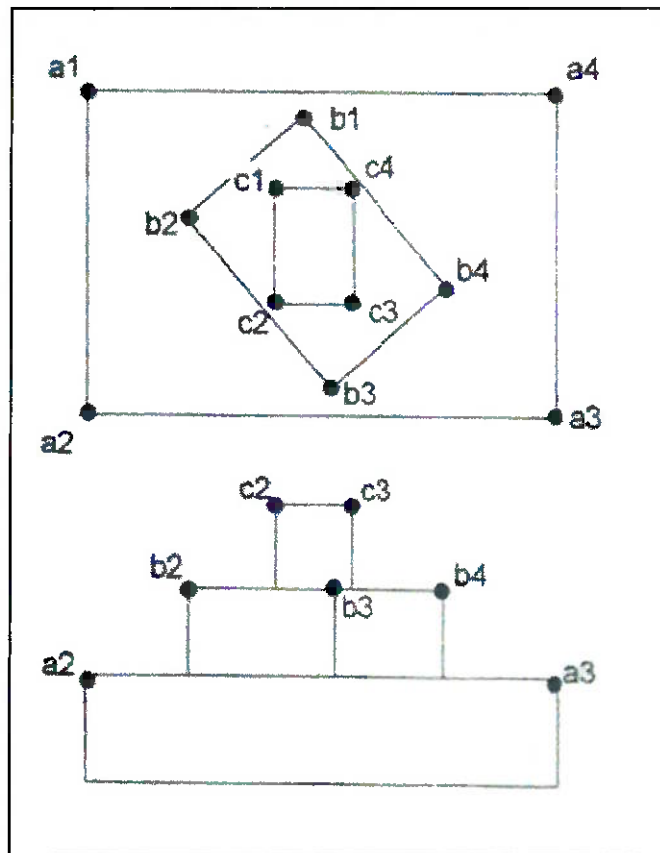


Figura 13: Desenho da peça de ensaio.

Nesta etapa realizou-se um “brainstorm” para listar os fatores que influenciam o sistema de usinagem. Da lista, separou-se em fatores de controle e ruído que estão presentes no processo. Com os dados obtidos até o momento é possível esquematizar o sistema de engenharia. O sistema é de grande importância, pois se trata da essência do projeto.

A figura seguinte mostra o esquema do sistema de engenharia obtido para este caso.

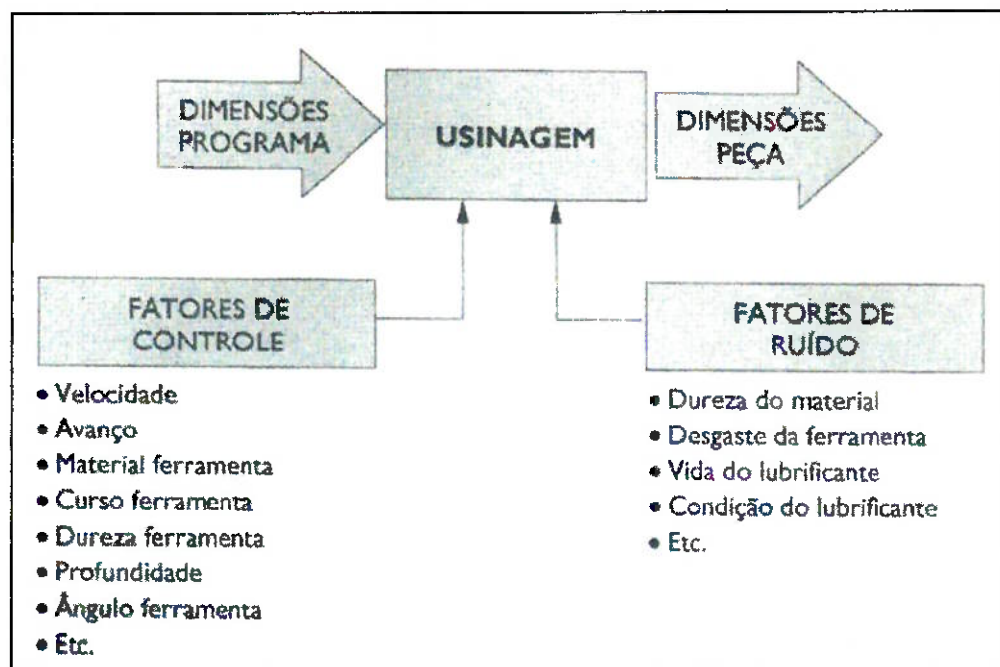


Figura 14: Sistema de engenharia para este caso (Nissan, 1992).

Dos fatores listados e separados em fatores de controle e ruído, selecionou-se somente aqueles que exercem grande influência para ser considerado nos experimentos. Em seguida, foi preciso definir os níveis para servirem de parâmetro na obtenção da combinação ótima do sistema.

A seguir estão tabelados os fatores de controle e ruído definidos no sistema e os níveis de cada fator. A tabela define os níveis qualitativamente.



| Fator de Ruído        | Nível 1    | Nível 2   |
|-----------------------|------------|-----------|
| N. Dureza do material | Menos duro | Mais duro |

| Fatores de Controle               | Nível 1   | Nível 2  | Nível 3   |
|-----------------------------------|-----------|----------|-----------|
| A. Direção do curso da ferramenta | P/ cima   | P/ baixo | ---       |
| B. Velocidade (m/min)             | Lenta     | Normal   | Rápida    |
| C. Avanço (m/min)                 | Lento     | Normal   | Rápido    |
| D. Material da ferramenta         | Mais mole | Normal   | Mais duro |
| E. Rigidez da ferramenta          | Baixa     | Normal   | Alta      |
| F. Ângulo 1 da ferramenta         | Menor     | Normal   | Maior     |
| G. Ângulo 2 da ferramenta         | Menor     | Normal   | Maior     |
| H. Profundidade (mm)              | Menor     | Normal   | Maior     |

Figura 15: Fatores de controle e ruído.

Como o sistema tem característica dinâmica, definiu-se níveis para o fator de sinal, apresentados na figura a seguir.

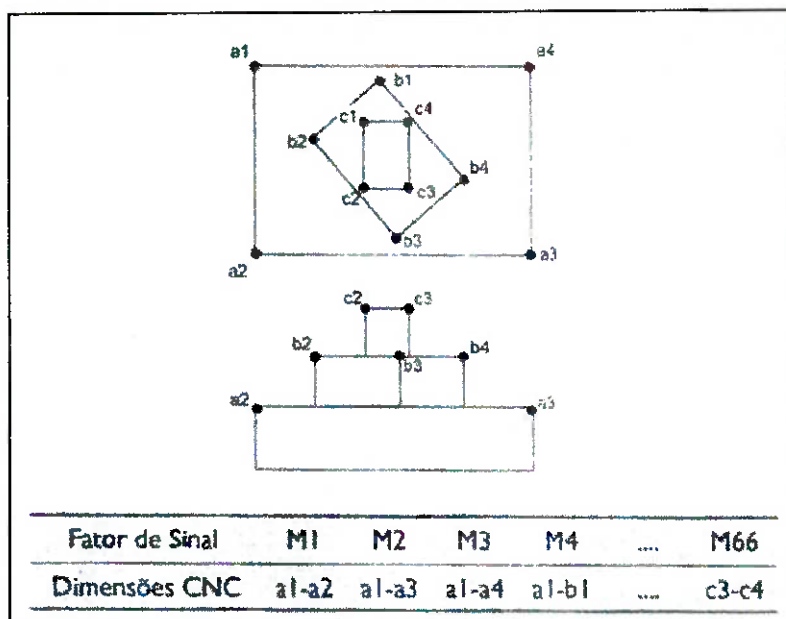


Figura 16: Níveis do fator de sinal.

Com todos os dados definidos, para este caso, foi utilizado o arranjo ortogonal mostrado a seguir. Serão realizados experimentos com 18 combinações de fatores, de onde serão obtidos respostas para serem analisadas, transformando-as em relação S/N.





| Exp. nº | A | B | C | D | E | F | G | H | M1               | M1               | M2               | M2               | .... | M66 | M66 | S/N            |
|---------|---|---|---|---|---|---|---|---|------------------|------------------|------------------|------------------|------|-----|-----|----------------|
|         |   |   |   |   |   |   |   |   | N1               | N2               | N1               | N2               | .... | N1  | N2  |                |
| 1       | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | Y <sub>111</sub> | Y <sub>112</sub> | Y <sub>121</sub> | Y <sub>122</sub> | .... |     |     | η <sub>1</sub> |
| 2       | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | Y <sub>211</sub> | Y <sub>212</sub> | Y <sub>221</sub> | Y <sub>222</sub> | .... |     |     | η <sub>2</sub> |
| 3       | 1 | 1 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | ....             | ....             | ....             | ....             | .... |     |     | ....           |
| 4       | 1 | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 | 3 | 3 |                  |                  |                  |                  |      |     |     |                |
| 5       | 1 | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 | 1 | 1 |                  |                  |                  |                  |      |     |     |                |
| 6       | 1 | 2 | 3 | 3 | 1 | 1 | 2 | 2 |                  |                  |                  |                  |      |     |     |                |
| 7       | 1 | 3 | 1 | 2 | 1 | 3 | 2 | 3 |                  |                  |                  |                  |      |     |     |                |
| 8       | 1 | 3 | 2 | 3 | 2 | 1 | 3 | 1 |                  |                  |                  |                  |      |     |     |                |
| 9       | 1 | 3 | 3 | 1 | 3 | 2 | 1 | 2 |                  |                  |                  |                  |      |     |     |                |
| 10      | 2 | 1 | 1 | 3 | 3 | 2 | 2 | 1 |                  |                  |                  |                  |      |     |     |                |
| 11      | 2 | 1 | 2 | 1 | 1 | 3 | 3 | 2 |                  |                  |                  |                  |      |     |     |                |
| 12      | 2 | 1 | 3 | 2 | 2 | 1 | 1 | 3 |                  |                  |                  |                  |      |     |     |                |
| 13      | 2 | 2 | 1 | 2 | 3 | 1 | 3 | 2 |                  |                  |                  |                  |      |     |     |                |
| 14      | 2 | 2 | 2 | 3 | 1 | 2 | 1 | 3 |                  |                  |                  |                  |      |     |     |                |
| 15      | 2 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 2 | 1 |                  |                  |                  |                  |      |     |     |                |
| 16      | 2 | 3 | 1 | 3 | 2 | 3 | 1 | 2 |                  |                  |                  |                  |      |     |     |                |
| 17      | 2 | 3 | 2 | 1 | 3 | 1 | 2 | 3 |                  |                  |                  |                  |      |     |     |                |
| 18      | 2 | 3 | 3 | 2 | 1 | 2 | 3 | 1 |                  |                  |                  |                  |      |     |     |                |

**DADOS DO EXPERIMENTO:**  
Em cada rodada (i.e., uma das 18 combinações dos fatores de controle A até H):  
66 cotas (M1 a M66) medidas em cada uma das duas peças de teste, sendo uma peça usinada com aço menos duro (condição N1) e outra com aço mais duro (condição N2)

Relação S/N (p/ cada rodada): calculada a partir dos 132 valores obtidos na rodada.

Figura 17: Layout do experimento (Arranjo Ortogonal).

Após a obtenção dos valores da relação Sinal/Ruído, estes foram colocados no gráfico abaixo para se obter a combinação ótima dos fatores de controle. Neste gráfico já está indicado a melhor combinação dos níveis dos fatores de controle que fornecem a maior relação S/N. É nesta situação também que a variabilidade é mínima.

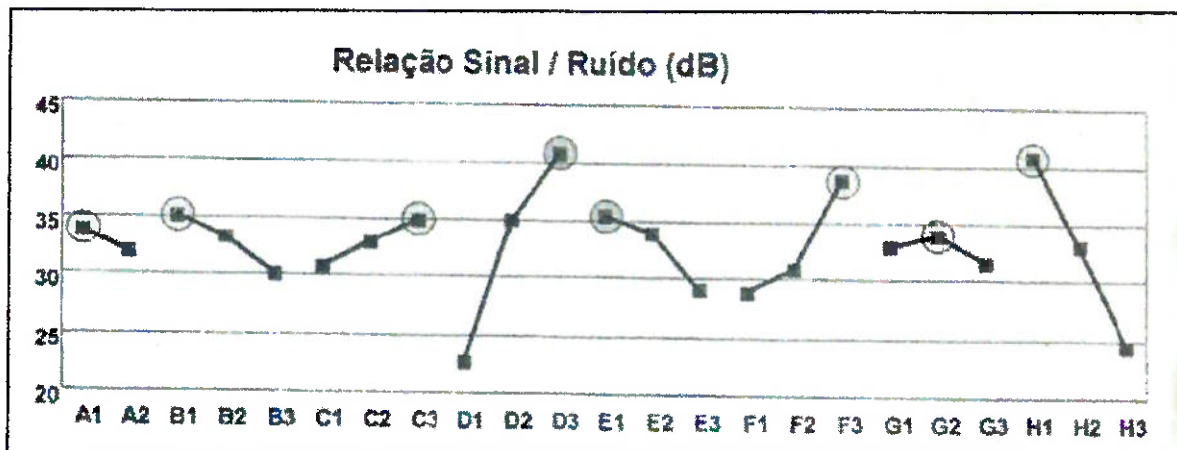


Figura 18: Efeitos dos fatores de controle e identificação na combinação ótima.

Combinação ótima:

A1 B1 C3 D3 E1 F3 G2 H1

Enquanto a configuração inicial do processo era:

A1 B2 C2 D2 E2 F2 G2 H2

Para finalizar, realizou-se o experimento confirmatório que na configuração ótima, os resultados demonstraram um ganho de 19,4 dB na relação S/N, sobre a condição inicial do processo, sendo que para cada 6 dB de ganho, o desvio padrão cai pela metade.

Concluindo, a empresa conseguiu ajustar seu processo para usar o aço mais duro, e ao mesmo tempo reduziu a variabilidade para 1/10 da condição inicial, sem aumentar o custo e com melhor rugosidade.



## 6. OTIMIZAÇÃO DA ENGRENAGEM PRÉ-TENSIONADA

Inicialmente foram feitas três reuniões do método TRIZ, que define as características iniciais do produto, a concepção da peça. Foi decidido que a engrenagem deveria ser pré-tensionada. O desenho da engrenagem está mostrado abaixo:

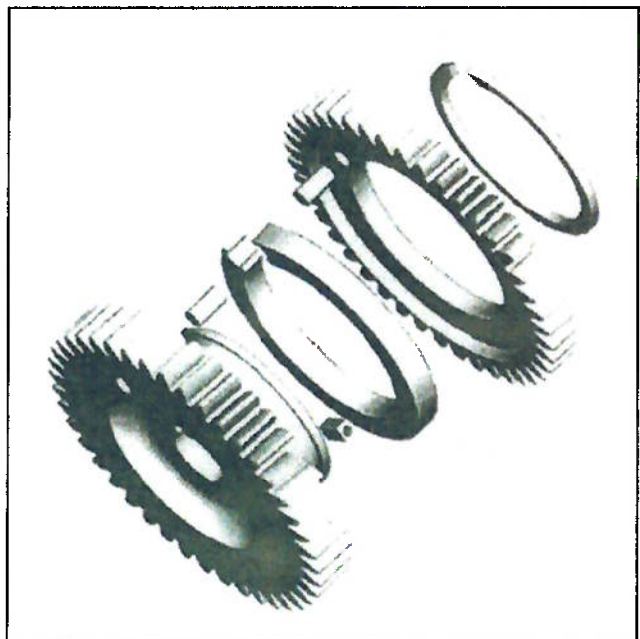
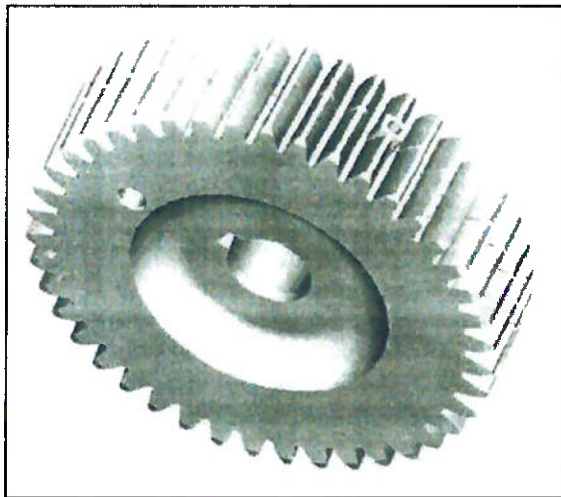


Figura 19 e 20: Engrenagem pré-tensionada.

Após a definição, iniciou-se a aplicação do método de Taguchi (Robust Engineering). Através de duas reuniões realizadas foram definidas as características do projeto.

### 6.1. Definição da função básica e do resultado

Nesta etapa inicial do projeto, foram definidos o Fator de Sinal e a Resposta. A função básica é a Resposta em função do Fator de Sinal, uma





função do primeiro grau, que na sua inclinação ideal o coeficiente angular 1.

O Fator de Sinal e a Resposta definidas estão apresentadas abaixo:

**Fator de Sinal:** - Rotação

**Resposta:** -  $Y_1$  : Torque resultante na bomba (função da engrenagem pré-tensionada)

Durante as reuniões, houve duas outras propostas de respostas, Pressão de contato e Pressão sonora, que foram descartados, apesar de serem considerados importantes, devido a inviabilidade da medição.

## 6.2. Definição do que medir e como medir

Como dito no item anterior, havia duas propostas de respostas que impossibilitavam a medição, por isso foi adotado o torque resultante na bomba. Desta forma, foram colocados torquímetros para medir o torque resultante na bomba. Além disto, foram colocados Strain Gages para medir a aceleração e deslocamentos a fim de obter a vibração do motor.

No teste confirmatório, foi medido o nível de ruído do motor em bancada dentro de uma câmara semi-anecóica para que não houvesse nenhum som externo ou que refletisse nas paredes e voltasse ao aparelho de medição.

Com essas medições foi possível avaliar a eficiência do método de otimização.



### 6.3. Definição dos Fatores e níveis

Também através das reuniões foram definidos os Fatores de Ruído e os Fatores de Controle, bem como seus respectivos níveis. Eles estão apresentados abaixo:

**Fatores de Controle:** - Constante elástica da mola (K)

- Pré-tensão (P)

- Histerese da borracha (H)

- Folga radial entre engrenagens (F)

OBS: Como a folga entre as engrenagens foi definido posteriormente que não era um fator significativo neste caso, este fator foi eliminado. Porém, como os protótipos a serem construídos já haviam sido definidos, optou-se somente em manter os níveis deste fator iguais e sem valores para não influenciar os testes.

| Fatores de Controle |   |                          |                 |           |                         |
|---------------------|---|--------------------------|-----------------|-----------|-------------------------|
|                     |   | Constante da mola (N/mm) | Pré-tensão (Nm) | Histerese | Folga entre engrenagens |
|                     |   | K                        | T               | M         | F                       |
| Níveis              | 1 | 212                      | 55              | Sem       | --                      |
|                     | 2 | 326                      | 30              | 1 mola    | --                      |
|                     | 3 | 437                      | 20              | 2 molas   | --                      |

Tabela 1: Fatores de Controle.



**Fatores de Ruído:** - Temperatura do motor em marcha lenta (T)

|                   | N1                   | N2                     |
|-------------------|----------------------|------------------------|
| Condição do Motor | Motor frio<br>(40°C) | Motor quente<br>(80°C) |

Tabela 2: Fatores de Ruído.

#### 6.4. Formulação do experimento

Como cada fator de controle tem três níveis, o arranjo ortogonal ideal para esta situação é o  $L_9$  ( $3^4$ ). Com este arranjo é possível avaliar as influência de cada fator de controle e também determinar a tendência dos valores de cada fator. Ao determinar uma tendência, é possível extrapolar os valores testados para maximizar a eficiência do método. O arranjo  $L_9$  está apresentado abaixo:

| L9 | 1 | 2 | 3 | 4 |
|----|---|---|---|---|
| 1  | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 2  | 1 | 2 | 2 | 2 |
| 3  | 1 | 3 | 3 | 3 |
| 4  | 2 | 1 | 2 | 3 |
| 5  | 2 | 2 | 3 | 1 |
| 6  | 2 | 3 | 1 | 2 |
| 7  | 3 | 1 | 3 | 2 |
| 8  | 3 | 2 | 1 | 3 |
| 9  | 3 | 3 | 2 | 1 |

Tabela 3: Arranjo Ortogonal  $L_9$ .



Contudo, a grande vantagem do arranjo é a quantidade reduzida de experimentos que é necessário realizar, economizando tempo e diminuindo o custo. Por exemplo, neste caso é necessário realizar 9 experimentos, para cada condição do Fator de Ruído (para cada temperatura), enquanto pelo método tradicional seriam necessários 81 experimentos.

Desta forma, neste projeto, os protótipos a serem construídos têm as seguintes características:

| Protótipo no. | Fatores de Controle      |                 |           |                         |
|---------------|--------------------------|-----------------|-----------|-------------------------|
|               | Constante da mola (N/mm) | Pré-tensão (Nm) | Histerese | Folga entre engrenagens |
|               | K                        | T               | M         | L                       |
| 1             | 212                      | 55              | Sem       | --                      |
| 2             | 212                      | 30              | 1 mola    | --                      |
| 3             | 212                      | 20              | 2 molas   | --                      |
| 4             | 326                      | 55              | 1 mola    | --                      |
| 5             | 326                      | 30              | 2 molas   | --                      |
| 6             | 326                      | 20              | Sem       | --                      |
| 7             | 437                      | 55              | 2 molas   | --                      |
| 8             | 437                      | 30              | Sem       | --                      |
| 9             | 437                      | 20              | 1 mola    | --                      |

Tabela 4: Especificação dos Protótipos.

### 6.5. Coleta dos dados

Após a bateria de experimentos realizados, foram obtidos os valores médios do torque resultante. Estes valores estão apresentados na página seguinte.



| Protótipo no                  | Fatores de Controle      |                 |           |                         | N1<br>Óleo 40°C<br>Y1 (Nm)<br>Torque resultante | N2<br>Óleo 80°C<br>Y1 (Nm)<br>Torque resultante |
|-------------------------------|--------------------------|-----------------|-----------|-------------------------|---|---|
|                               | Constante da mola (N/mm) | Pré-tensão (Nm) | Histerese | Folga entre engrenagens |   |   |
|                               | K                        | T               | M         | L                       |   |   |
| 1                             | 212                      | 55              | Sem       | --                      | 0,47  | 0,78  |
| 2                             | 212                      | 30              | 1 mola    | --                      | 0,42  | 0,54  |
| 3                             | 212                      | 20              | 2 molas   | --                      | 0,59  | 0,66  |
| 4                             | 326                      | 55              | 1 mola    | --                      | 0,60  | 0,65  |
| 5                             | 326                      | 30              | 2 molas   | --                      | 0,59  | 0,59  |
| 6                             | 326                      | 20              | Sem       | --                      | 0,57  | 0,81  |
| 7                             | 437                      | 55              | 2 molas   | --                      | 0,58  | 0,59  |
| 8                             | 437                      | 30              | Sem       | --                      | 0,62  | 0,73  |
| 9                             | 437                      | 20              | 1 mola    | --                      | 0,59  | 0,75  |
| Sem Engrenagem pré-tensionada |                          |                 |           |                         | 0,776   | 0,924   |

Tabela 5: Resultados dos testes.

## 6.6. Análise dos dados e escolha da combinação ótima

Nesta etapa, os valores obtidos nos testes são analisados para poder chegar numa configuração ótima da peça. A tabela a seguir mostra os cálculos dos S/N e das médias, e nas tabelas seguintes os S/N's e as médias de cada nível de cada fator.



**Escola Politécnica da Universidade de São Paulo**  
**Departamento de Engenharia Mecânica**  
**PMC 581 – Projeto Mecânico II**

|                               | Constante da mola (N/mm) | Pré-tensão (Nm) | Histerese | Folga entre engrenagens | N1<br>Óleo 40°C | N2<br>Óleo 80°C |      |       |
|-------------------------------|--------------------------|-----------------|-----------|-------------------------|-----------------|-----------------|------|-------|
| Protótipo no.                 | K                        | T               | M         | L                       | Y1 Torque (Nm)  | Y1 Torque (Nm)  | S/N  | Média |
| 1                             | 1                        | 1               | 1         | 1                       | 0,47            | 0,78            | 3,82 | 0,62  |
| 2                             | 1                        | 2               | 2         | 2                       | 0,42            | 0,54            | 6,31 | 0,48  |
| 3                             | 1                        | 3               | 3         | 3                       | 0,59            | 0,66            | 4,06 | 0,63  |
| 4                             | 2                        | 1               | 2         | 3                       | 0,60            | 0,65            | 4,08 | 0,62  |
| 5                             | 2                        | 2               | 3         | 1                       | 0,59            | 0,59            | 4,60 | 0,59  |
| 6                             | 2                        | 3               | 1         | 2                       | 0,57            | 0,81            | 3,06 | 0,69  |
| 7                             | 3                        | 1               | 3         | 2                       | 0,58            | 0,59            | 4,67 | 0,58  |
| 8                             | 3                        | 2               | 1         | 3                       | 0,62            | 0,73            | 3,42 | 0,67  |
| 9                             | 3                        | 3               | 2         | 1                       | 0,59            | 0,75            | 3,37 | 0,67  |
| Sem Engrenagem pré-tensionada |                          |                 |           |                         | 0,776           | 0,924           | 1,38 | 0,85  |

Tabela 6: Cálculos dos S/N's e das médias de torques de cada experimento.

| S/N   | K    | T    | M    | Média | K    | T    | M    |
|-------|------|------|------|-------|------|------|------|
| 1     | 4,73 | 4,19 | 3,44 | 1     | 0,58 | 0,61 | 0,66 |
| 2     | 3,92 | 4,78 | 4,59 | 2     | 0,64 | 0,58 | 0,59 |
| 3     | 3,82 | 3,50 | 4,44 | 3     | 0,64 | 0,66 | 0,60 |
| Delta | 0,91 | 1,28 | 1,15 | Delta | 0,07 | 0,08 | 0,07 |

Tabelas 7 e 8: S/N's e médias de torques de cada nível de cada fator.

Tendo estes valores é possível a construção dos gráficos de S/N e média de torque para poder obter as melhores taxas para cada fator, e assim compor a configuração ótima.

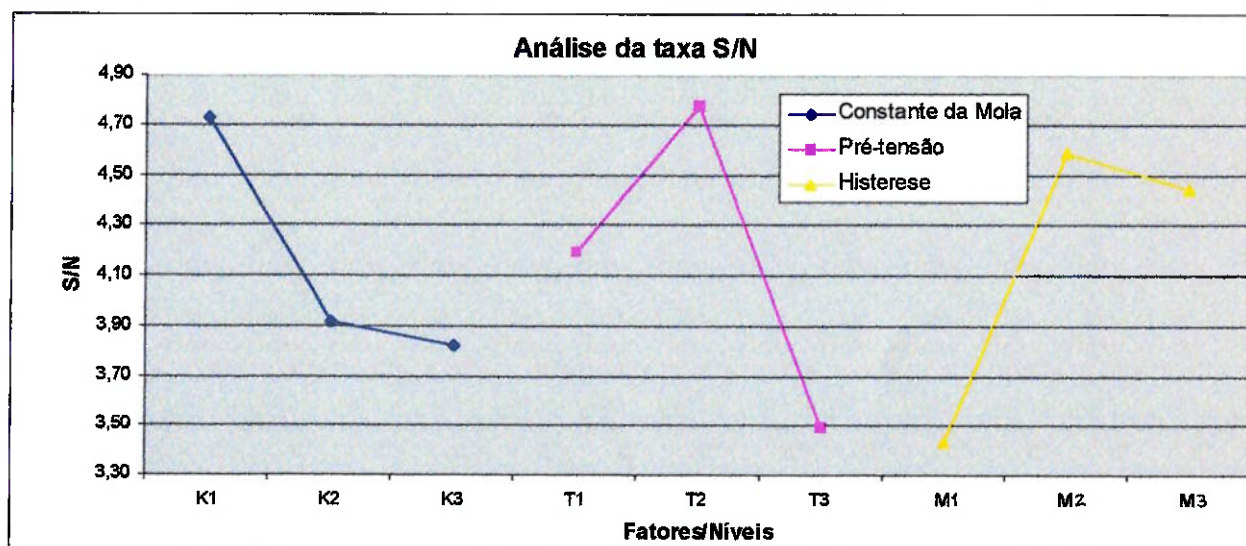


Figura 21: Gráfico da Taxa de S/N para cada fator.



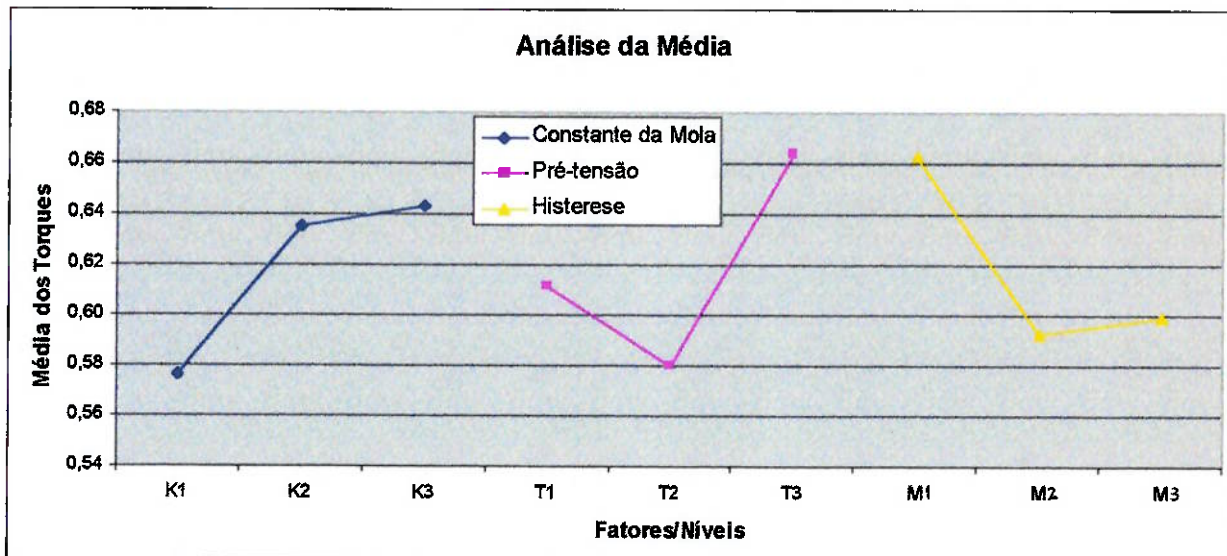


Figura 22: Gráfico das médias de torques de cada fator.

Para se obter a configuração ótima, basta pegar a melhor taxa de cada fator do gráfico de S/N ou o pior nível de cada fator da média dos torques. Assim tem-se a configuração ótima:

**Combinação ótima: K1 P2 H2 (#2)**

### 6.7. Confirmação dos Resultados

Para se ter certeza de que houve eficiência na otimização e para confirmar que esta é a combinação ótima, foi realizada o teste confirmatório. Porém este teste não teve exatamente a mesma condição dos outros testes, assim, optou-se em verificar de fato se o nível de ruído havia diminuído sensivelmente, comparando com a situação atual. Com isto foi obtido o gráfico da página seguinte:

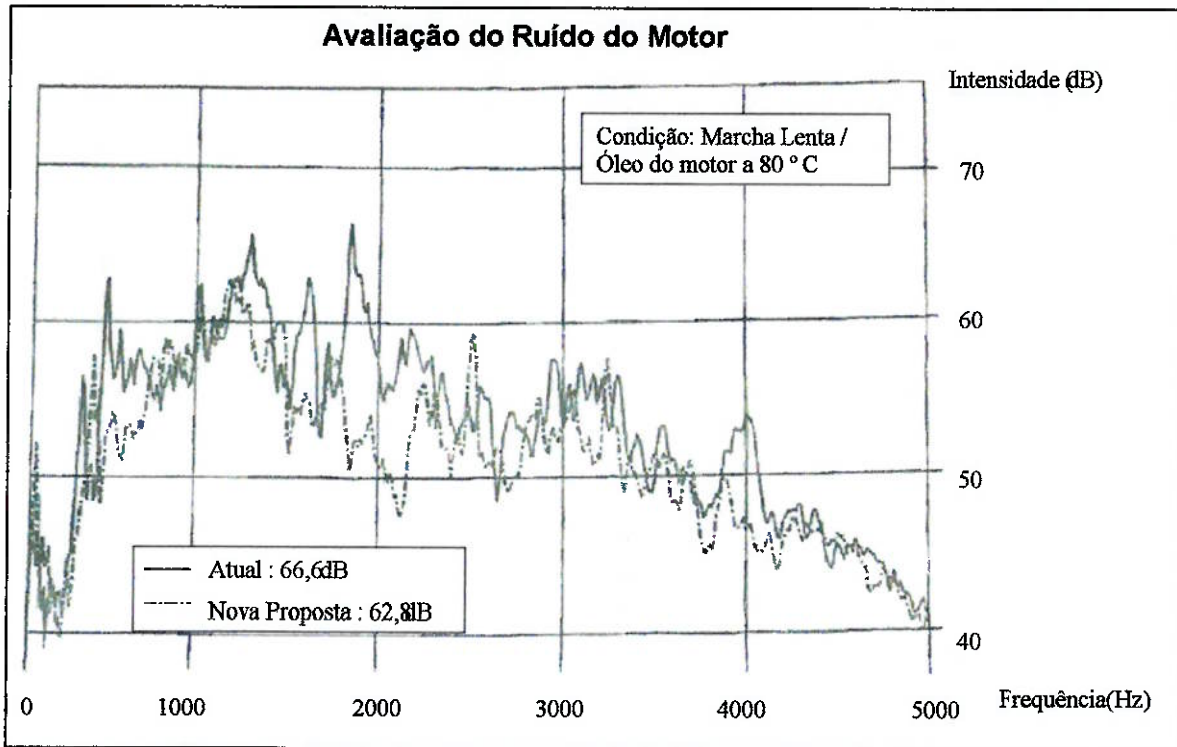


Figura 23: Gráfico de avaliação de ruído do motor (em câmara semi-anecóica).

A partir do gráfico, é possível notar que a nova proposta teve em média uma intensidade inferior ao que está sendo fabricado atualmente e um desempenho superior de aproximadamente 6% na faixa de frequência audível.





## 7. CONCLUSÃO

Após o a finalização do projeto de otimização do trem de engrenagem de engrenagem utilizando o Robust Engineering (método de Taguchi), pôde-se chegar a conclusão de que o método é eficiente, melhorando cerca de 6% o nível de ruído gerado pelo conjunto de motor/transmissão.

Apesar da melhora, consideramos que a eficiência foi abaixo do que se espera deste método, pois na maioria dos casos, a melhora é mais expressiva.

A principal causa desta baixa eficiência é a falta de conhecimento e experiência no assunto, pois mundialmente este assunto ainda não é muito bem dominado. Assim, este método, o Taguchi, que requer um conhecimento mais aprofundado para gerar alta eficiência é prejudicado, obtendo uma baixa eficiência.

Outro motivo está ligado ao equipamento. Não ao equipamento utilizado, mas ao equipamento que não existe na GMB que poderia medir fatores que pudessem ser mais relevantes que os medidos no projeto.

E por fim, o escasso tempo que, pela falta de conhecimento, seria necessário para ganhar experiência e posteriormente definir fatores e realizar medições de aspectos mais importantes.

Concluindo, apesar de cada vez mais se criar métodos de otimização mais eficientes como o Robust Engineering, ainda não se pôde eliminar o conhecimento e experiência no assunto do problema a ser resolvido.



## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Apostila do curso: Engenharia Robusta usando Métodos de Taguchi: Aumentando a qualidade de produtos e processos, com redução de custo. Instrutor: Eduardo C. Moura – Qualiplus/ASI Brasil.
- Apostila: Engenharia Robusta: uma coletânea de artigos introdutórios, Qualiplus/ASI Brasil.
- MASON, Robert L., GUNST, Richard F., HESS, James L., Statistical Design and Analysis of experiments with applications to engineering and science, Ed. John Wiley&Sons, 1989.
- ROSS, Phillip J., Taguchi Techniques for Quality Engineering: Loss function, orthogonal experiments, parameter, and tolerance design. McGraw-Hill book company, 1988.