

Análise computacional da cinemática e de esforços em engrenagens helicoidais e planetárias

Palavras-Chave: Transmissão Planetária, Potência, Geração de energia

Autores(as):

Pedro Augusto França Feldhaus, FEM – Unicamp (bolsista)

Prof^(a). Dr^(a). Kátia Lucchesi Cavalca Dedini, FEM – Unicamp (orientadora)

INTRODUÇÃO:

Engrenagens são componentes amplamente utilizados em sistemas mecânicos, sendo seu dimensionamento correto essencial antes da aplicação prática em máquinas. No entanto, após implementadas no projeto, as condições reais de operação interferem diretamente nas reações geradas por esses componentes, afetando também os eixos e mancais do sistema.

Como os esforços atuantes nos mancais são determinantes para sua vida útil — e, portanto, para o estudo de suas falhas — torna-se evidente a necessidade de realizar uma análise precisa desses esforços, devidamente parametrizados e validados. Para isso, é fundamental empregar métodos otimizados no cálculo da vida útil dos mancais.

Nesse contexto, uma ferramenta computacional de livre acesso, capaz de simular diferentes configurações de transmissões planetárias ao longo do tempo, é imprescindível. Essa ferramenta deve permitir a análise do comportamento dinâmico do sistema, com torque, força e velocidade sendo avaliados em função do tempo, servindo como base para diagnóstico de falhas e monitoramento online dos componentes.

Em equipamentos utilizados na geração de energia, é comum a presença de engrenagens helicoidais, dentes retos e sistemas planetários, eventualmente associados a um conversor hidráulico de torque. Como o torque e a velocidade de entrada do sistema estão em constante variação, as reações geradas por cada engrenagem também variam ao longo do tempo. Portanto, uma análise computacional do fluxo de potência e da distribuição de velocidades ao longo do equipamento, integrada a um modelo geral do sistema, permite estimar a necessidade de manutenção e antecipar possíveis falhas nos mancais.

A Figura 1 apresenta um exemplo de conversor de torque utilizado em sistemas de geração de energia, no qual transmissões do tipo TEP (Trem Epicicloidal Planetário) são integradas ao conjunto para adaptar torque e rotação às exigências da carga. Esse tipo de configuração é comum em aplicações que requerem variação contínua de velocidade, garantindo maior eficiência e suavidade na transmissão de potência.

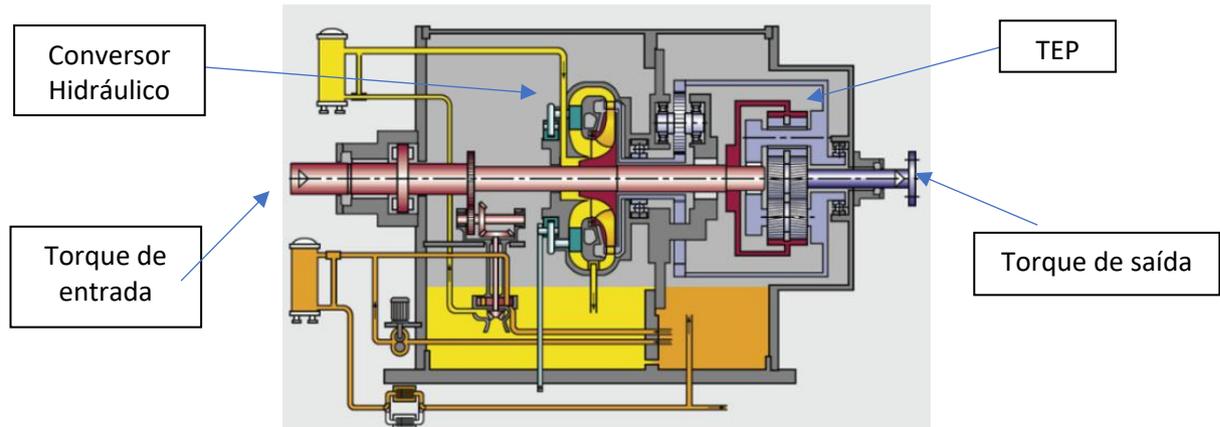


Figura 1: Ilustração de um conversor de torque

METODOLOGIA:

A metodologia adotada neste trabalho consistiu na implementação de modelos computacionais em MATLAB para simular a cinemática e os esforços em engrenagens helicoidais e sistemas planetários. O estudo teve início com uma revisão bibliográfica sobre transmissões mecânicas, com base em autores como Norton [1] e Amaral [7], para fundamentar a modelagem.

Primeiramente, foi desenvolvida a modelagem cinemática entre pares de engrenagens, utilizando a relação entre os raios primitivos e as velocidades angulares. Essa relação foi usada para calcular a razão de transmissão (TR), que indica como a rotação de uma engrenagem (com velocidade angular $\dot{\theta}_1$) afeta a outra (com $\dot{\theta}_2$), considerando os respectivos raios primitivos Rp_1 e Rp_2

Com a razão de transmissão, foi possível calcular o torque transmitido no sistema. O torque de saída (T_s) foi obtido a partir do torque de entrada (T_e) multiplicado pela razão de transmissão. Em seguida, foi calculada a força tangencial (Wt) aplicada sobre os dentes das engrenagens, que é dada pela razão entre o torque aplicado e o raio da engrenagem.

A partir dessas equações básicas, o modelo foi estendido para um sistema planetário (TEP), composto por três elementos principais: engrenagem anel, engrenagem sol e braço (que conecta os planetas). Foram utilizadas equações de equilíbrio de torques e conservação de energia para determinar os torques atuantes em cada componente, levando em conta suas velocidades de rotação (ω).

$$Rp_1 \times \dot{\theta}_1 = Rp_2 \times \dot{\theta}_2 \quad (1)$$

$$Wt_1 = \frac{T_1}{Rp_1} \quad (2)$$

$$T_s = T_e \cdot TR \quad (3)$$

Essas expressões permitiram calcular tanto os torques transmitidos quanto as forças radiais, axiais e helicoidais envolvidas nas engrenagens. Em seguida, a abordagem foi expandida para sistemas do tipo Trem Epicicloidal Planetário (TEP), utilizando um modelo matricial para resolver as equações de equilíbrio e conservação de energia, considerando múltiplos graus de liberdade rotacional. As equações são resolvidas com base na condição:

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \omega_a & \omega_b & \omega_s \\ X_a & X_a & X_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_a \\ T_b \\ T_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ Y \end{bmatrix} \quad (4)$$

Esse modelo foi aplicado, inicialmente, a um TEP simples e, posteriormente, estendido para a simulação de dois estágios acoplados de transmissão planetária (2 TEPs). Nessa configuração, foram analisadas as interações entre os componentes dos dois estágios, como a influência da rotação do anel do primeiro estágio na entrada do segundo. A entrada do sistema foi simulada com variações de velocidade, considerando um valor base de 3000 RPM, e diferentes valores de slip ratio, permitindo observar o impacto sobre as velocidades e torques de saída.

Essa estrutura de simulação computacional foi projetada para permitir ajustes nos parâmetros do sistema, de modo a servir como uma ferramenta para diagnóstico de falhas e análise de desempenho em transmissões com engrenagens helicoidais e planetárias.

RESULTADOS E DISCUSSÃO:

A partir da implementação do modelo computacional em MATLAB, foi possível simular o comportamento cinemático e os torques atuantes em transmissões planetárias do tipo TEP, tanto em configurações simples quanto em sistemas com dois estágios acoplados.

No caso do TEP simples, a análise mostrou como a variação nas velocidades angulares influencia diretamente a distribuição de torque entre o sol, o anel e o braço. Em determinadas condições, o braço tende a não transmitir esforço, concentrando os torques nos outros componentes — uma informação relevante para o dimensionamento de mancais e eixos.

Na simulação com dois estágios TEP, observou-se que o comportamento do segundo estágio é fortemente influenciado pelas condições do primeiro, principalmente pelo slip ratio, que representa a diferença relativa entre as velocidades dos componentes. Esse parâmetro afeta tanto as velocidades quanto os torques transmitidos ao longo do sistema.

A Figura 2 apresenta a variação das velocidades dos componentes da transmissão conforme o slip ratio. É possível observar que pequenas alterações no slip provocam mudanças significativas na rotação do braço e das engrenagens, o que pode levar a inversões na direção de rotação ou redistribuições abruptas de velocidade entre os estágios.

Já a Figura 3 mostra a variação dos torques nos principais componentes do sistema em função do slip ratio. Nota-se que o torque transmitido pode ser amplificado ou reduzido conforme a interação entre os elementos do primeiro e segundo estágios, reforçando a importância de modelar essas interações de forma conjunta. Esses resultados são compatíveis com o funcionamento de sistemas reais de geração de energia que utilizam conversores de torque acoplados a transmissões planetárias (como ilustrado na Figura 1). A ferramenta desenvolvida permite visualizar e prever o comportamento do sistema sob diferentes condições de operação, contribuindo para o diagnóstico de falhas e estratégias de manutenção preditiva.

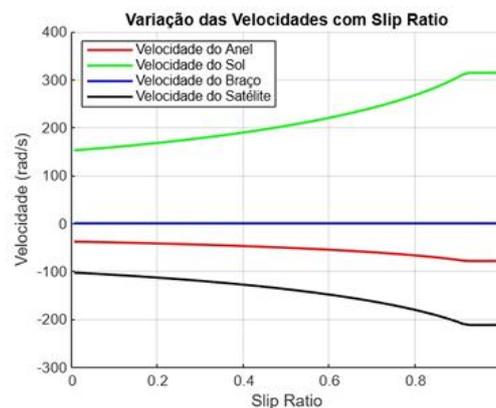


Figura 2: Ilustração da variação da velocidade com base no slip ratio



Figura 3: Ilustração da variação do torque com base no slip ratio

CONCLUSÕES:

O desenvolvimento do modelo computacional em MATLAB permitiu simular com eficiência o comportamento cinemático e os torques atuantes em sistemas de transmissão planetária do tipo TEP, tanto em configurações simples quanto em sistemas com dois estágios acoplados.

A análise demonstrou que a variação nas velocidades de entrada e no slip ratio influencia diretamente a distribuição de torque entre os componentes, o que afeta significativamente o desempenho e a confiabilidade do sistema. As simulações evidenciaram ainda que os efeitos de um estágio impactam diretamente o comportamento do seguinte, reforçando a importância de uma modelagem integrada para sistemas multietapas.

Além disso, os resultados obtidos validam o uso de ferramentas computacionais como apoio ao dimensionamento e à análise de falhas em sistemas rotativos. A aplicação desse tipo de simulação pode contribuir

para o desenvolvimento de estratégias de manutenção preditiva, especialmente em equipamentos de geração de energia que operam com conversores de torque e exigem controle preciso de torque e velocidade.

BIBLIOGRAFIA

- [1] NORTON, R. L. *Machine Design: An Integrated Approach*. Boston: Prentice Hall, 2020.
- [2] MOTT, R. L.; VAVREK, E. M.; WANG, J. *Machine Elements in Mechanical Design*. New York: Pearson, 2018.
- [3] DOUGHTY, S. *Mechanics of Machines*. Morrisville, N.C.: Lulu.com, 2001.
- [4] KHK Gears. *Idler Gear — Gear Nomenclature — KHK Gears*. Disponível em: https://khkgears.net/new/gear_knowledge/gear-nomenclature/idler-gear.html. Acesso em: 21 abr. 2024.
- [5] ZHANG, C.; YANG, J.; CHANG, Z. *Machinery Dynamics*. [s.l.]: Academic Press, 2021.
- [6] *Mechanics and Calculations of the Textile Machinery*. New Delhi: Woodhead Publishing India Pvt Ltd, 2012.
- [7] AMARAL, Danilo. *Metodologia, Sistematização e Seleção de Projetos de Transmissões Epicicloidais com um e dois TEPs ligados*. Tese de Doutorado – UNICAMP – FEM – DPM, 2000.