

DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA ESPECIALISTA PARA PROJETO DE ENGRENAGENS CILÍNDRICAS DE DENTES RETOS VOLTADO AO ENSINO NA ENGENHARIA

Resumo: *O estudo da engenharia é desafiador, para alunos e professores. Sempre em evolução, os métodos de ensino são consequência das possibilidades e limitações de sua época. Entre os avanços está a inserção da tecnologia como ferramenta de aprendizado, sendo um exemplo o uso de Sistemas Especialistas, programas com o objetivo de simular o conhecimento de um expert. Neste artigo, foi desenvolvido um Sistema Especialista para o projeto de engrenagens cilíndricas de dentes retos, no intuito de auxiliar estudantes do curso de Engenharia Mecânica. O programa, intitulado GeXP, foi desenvolvido por meio do software MATLAB, cuja aproximação dos comandos com a matemática convencional permitiu a fácil adequação dos cálculos de projeto para a programação computacional. A interface gráfica pôde ser desenvolvida com a ferramenta GUIDE (Graphical User Interface Development Environment). Após a concepção do programa, foram elaborados testes para analisar a validade dos resultados de problemas solucionados pelo GeXP, além de testes com usuários, seguidos do preenchimento de testes de satisfação sobre o ensino das disciplinas relacionadas ao tema e quanto à qualidade do programa e sua aplicação. Os resultados indicaram, primeiramente, a validação das respostas, estando em concordância com a resolução encontrada seguindo a teoria base para o projeto. À partir da prática com usuários, constatou-se pelos níveis de satisfação, sempre com 50% ou mais de aprovação em cada item do questionário, que o GeXP poderia ser usado no ensino e estudo do projeto de engrenagens cilíndricas de dentes retos, com possibilidade de auxiliar o desenvolvimento do aluno.*

Palavras-chave: *Sistema Especialista. Ensino de Engenharia. Guide. Educação na Engenharia.*

INTRODUÇÃO

A formação do profissional de engenharia mecânica é sabidamente complexa. Ao longo de décadas, os métodos de ensino foram aprimorados, sentindo o efeito do desenvolvimento cultural e tecnológico da sociedade.

O conceito básico do Sistema Especialista (*Expert System*, em inglês) surge de uma necessidade que o desenvolvimento nos trouxe: a presença indispensável de um especialista no espaço de produção ou educação. Com profissionais que conhecem a fundo determinados conceitos e métodos, a ausência de seu conhecimento pode interromper toda a produção de uma fábrica de automóveis ou impossibilitar qualquer tomada de decisões numa pesquisa ou projeto, por exemplo. Visando substituir ou mesmo desafogar tal figura, decidiu-se por criar métodos de transmissão do indispensável conhecimento humano por meio de computadores.

Com seu tremendo crescimento de desenvolvimento e popularidade desde sua introdução comercial na década de 80, Sistemas Especialistas passaram a ser usados em diversas áreas, dos negócios a diagnósticos médicos. Porém, desde a década de 50, já se dava sua implementação na educação pelo Computer Aided Instruction (CAI), seguido por outros igualmente clássicos exemplares, como Intelligent Tutoring Systems (ITS), Intelligent Pascal Tutoring System (IPTs) e BiMOS.

No campo da engenharia, um dos profissionais mais requisitados é o projetista. Portador de uma gama especializada de conhecimento, ele atua numa área crucial: o projeto. Tem sido estimado que 85% dos problemas no funcionamento e eficiência inadequados de novos produtos têm origem em uma etapa de projeto inapropriada (ULLMAN, 2010). Isso indica a importância de novas ferramentas tecnológicas para auxiliar na etapa de projeto, além deste ser um ponto vital para um engenheiro no mercado de trabalho.

Ao se trabalhar com o aluno de engenharia, a experiência sugere que acrescer seu desejo por conhecimento além do que está por ser visto em sala de aula é uma tarefa complexa (HOFSTEIN & LUNETTA, 2004). O uso de uma ferramenta tecnológica almeja acessar esse interesse, tornando a experiência de aprendizado de projetos mecânicos mais próxima e prática. Este tipo de atividade se apresenta como um caminho para permitir que o estudante aprenda com o entendimento da proposta e, simultaneamente, seja engajado pelo processo de construir conhecimento pela ciência (TOBIN, 1990). A implementação de um Sistema Especialista simplificado, com funcionalidade que permitisse o aluno interagir com as possibilidades de um projeto e reconhecer o conteúdo visto em sala num processo prático computacional, pode aprimorar o desempenho do aluno nesta área.

No meio de todo o âmbito de projetos, uma vertente teve de ser escolhida para a aplicação da ferramenta. Para tanto, dentre as imensas possibilidades de projetos em engenharia mecânica, foi selecionado o projeto de engrenagens cilíndricas de dentes retos retas. Responsáveis pela transmissão de velocidade angular e torque, as engrenagens tem sua forma mais simples, clássica e comum como cilíndricas retas. Seu estudo na universidade se dá normalmente junto à disciplina de Elementos de Máquinas, e é claramente importante seu domínio pelo futuro profissional da engenharia devido as vastas possibilidades de aplicação.

Na sala de aula, o estudo acerca do projeto de engrenagens exige conhecimentos prévios de disciplinas envolvendo Mecânica dos Sólidos, além da base prévia de Elementos de Máquinas. O processo, bem dividido em várias etapas, envolve muito do conhecimento, diversos cálculos de equações de complexidades distintas, conversões de unidades, considerações importantes que afetam variáveis, além de, normalmente, devido tantas etapas, levar um tempo considerável para o aluno finalizar um caso por completo. Ou seja, a praticidade do aprendizado em sala de aula, ou fora dela, demanda muito do aluno.

Não pretendendo cortar, mas sim facilitar etapas, a proposta do uso de um Sistema Especialista simples, ainda que básica em comparação ao que tem-se no mercado, passa a ser considerada. Inicialmente, tal Sistema deve armazenar a gama de conhecimentos que formam o pilar para a realização de um caso específico de projeto de engrenagens cilíndricas de dentes retos, ou seja, as equações correspondentes, as variáveis e considerações que afetam seu resultado. Após a entrada de dados, o Sistema toma o lugar do especialista, realizando a tarefa destinada antes apenas a este: relacionar os valores de entrada e entregar as respostas correspondentes dentro da problemática proposta. Com isto sendo possível, em pouquíssimo tempo e de maneira quase automática, muitas das dificuldades antes citadas seriam superadas.

1 SELEÇÃO DA FERRAMENTA PARA DESENVOLVIMENTO

Dado o objetivo do trabalho, uma ferramenta para o desenvolvimento do Sistema Especialista teve de ser selecionada. A primeira característica almejada foi a possibilidade de criação e edição de uma interface para o programa. A partir disso, seria necessária uma linguagem de programação apropriada para trabalhar com as equações e cálculos previstos para a resolução de projetos de engrenagens.

Dentro dessas condições, o software MATLAB foi selecionado. O MATLAB é um software interativo de alta performance voltado para aplicações computacionais matemáticas, sendo abreviação de MATrix LABoratory, o que denota uma de suas características: O trabalho de equacionamentos matriciais. Uma de suas vantagens surge da linguagem de programação usada, que ao contrário de linguagens clássicas como C, Fortran e Python, o usuário não precisa atentar-se à declarações de variáveis, alocação de memória, utilização de ponteiros, entre outras tarefas ligadas à rotina. O MATLAB tem à disposição do usuário uma série de funções matemáticas já implementadas, o que garante ao software que sua programação seja bem mais próxima da lógica de escrita matemática já conhecida por seus usuários. Isso permite não só a facilidade de programação, como também a possibilidade de outros usuários modificarem o programa em busca de melhorias, após a disponibilidade do código base do mesmo.

Ainda foi considerada a construção da interface gráfica do programa, visando a melhor experiência possível para o usuário. Mesmo sem instrução prévia, seria ideal que qualquer um pudesse utilizar o programa, com sua mecânica sendo a mais básica possível, dentro das limitações. O MATLAB possui uma ferramenta chamada GUIDE (Graphical User Interface Development Environment) para construção manual de uma interface gráfica, a qual permite a interação do usuário com o programa por meio de elementos gráficos. Toda a programação do GUIDE se dá por meio do paradigma da Programação Orientada a Eventos. Ao contrário do habitual, seu fluxo é guiado por indicações externas realizadas pelo o usuário sobre a interface, chamadas eventos.

2 DESENVOLVIMENTO DO GEXP (GEAR EXPERIENCE)

Para a programação do GeXP (Gear Experience, nome atribuído para identificação) foi necessário a priori estabelecer condições para contornar todas as considerações que o aluno deve realizar durante a resolução de um exercício de projeto de engrenagens cilíndricas de dentes retos. Primeiramente, usando os dados e tabelas fornecidos pela AGMA (American Gear Manufacturers Assosiation), referência mundial para a padronização de engrenagens. Em seguida, foi necessária transportar a lógica matemática para o programação. O GeXP apresenta a resolução de um problema típico encontrado pelo aluno durante o aprendizado, sendo disponibilizados os dados de entrada e com a aplicação da teoria é alcançado o resultado final de projeto, os coeficientes de segurança previstos. Sendo assim, a lógica matemática consiste exatamente em receber as entradas, as quais já especificadas pelo programa, sendo apenas os valores cedidos pelo aluno. Os valores das saídas serão os resultados das variáveis, também já especificadas. Tanto entradas como saídas foram escolhidas para facilitar a noção de “causa e efeito” de suas escolhas pelo aluno.

Ainda demais circunstâncias, como o uso de tabelas, é realizado pelo GeXP, excetuando casos em que é importante o aluno desenvolver competência, como, por exemplo, a seleção do fator geométrico de flexão e seleção de propriedades do material. Neste caso, as tabelas contendo tais informações constam numa aba própria do programa.

Também visando facilitar o aprendizado do aluno, os valores constam no SI (Sistema Internacional), o que proporciona melhor interpretação quantitativa e qualitativa pelo usuário, normalmente habituado com este sistema. Boa parte da teoria para projeto de engrenagens, no entanto, foi desenvolvida em universidades americanas, fazendo com que as equações no US (Sistema Americano) sejam mais precisas e confiáveis. Em momentos pontuais da programação, ocorrem transformações de unidades, exatamente tentando adaptar os valores para o uso nas equação no US.

$$Wt1 = Wt / 4.448$$

$$F1 = F / 25.4$$

$$Sbpsf = ((Wt1 * pd) / (F1 * Jp)) * ((Ka * Km) / Kv) * ((Ks * Kb) * Ki)$$

$$Sbgsf = ((Wt1 * pd) / (F1 * Jg)) * ((Ka * Km) / Kv) * ((Ks * Kb) * Ki)$$

$$Sbp = (Sbpsf * 6894.8) / 1000$$

$$Sbg = (Sbgsf * 6894.8) / 1000$$

No caso acima, a força tancial (Wt1) e a largura de face (F1) foram transformados para adequar-se ao uso na equação americana. Por fim, o resultado é da tensão de flexão (Sb) é novamente transformado para o SI.

Outras condições, como a seleção do diâmetro dentre o da engrenagem (dg) ou pinhão (dp) a ser usado no cálculo da tensão de superfície (Ssup), são realizadas pelo GeXP. A ideia é ao fim possibilitar ao aluno identificar num resultado prático os valores dos cálculos por ele desenvolvidos a partir da teoria. O alto número de valores como respostas exibidas ao aluno se dá exatamente para que este identifique seus erros, as melhores alterações no projeto e as considerações a serem tomadas durante a resolução de um exercício.

```
if dp <= dg
```

$$Ssup = ((Cp * (((Wt * 1000) / (((F / 1000) * I) * (dp / 1000))) * ((Ca * Cm) / Cv) * (Cs * Cf)) ^ 0.5))) / 1000000$$

```
end
```

```
if dg < dp
```

$$Ssup = ((Cp * (((Wt * 1000) / (((F / 1000) * I) * (dg / 1000))) * ((Ca * Cm) / Cv) * (Cs * Cf)) ^ 0.5))) / 1000000$$

```
end
```

Na programação da interface foi pensada a divisão e a sequência das abas do GeXP, conforme visto nas Figuras 1 e 2, além de quais variáveis seriam apresentadas como entrada e saída para o usuário. Baseado no referencial teórico utilizado e na melhor didática para o aluno, as divisões de abas foram feitas seguindo a sequência de aprendizado do aluno. Além disso, um dado de uma aba pode ser aproveitado na seguinte, permitindo ampla visão do problema pelo aluno.

Figura 1 – Aba 1: Esforços



Dados:

- Potência: 300 HP
- Velocidade Angular: 2200 rpm
- Número de Dentes: Pinhão 35, Engrenagem 55
- Ângulo de Pressão: 25 °
- Passo Diametral: 5

Resultados:

- Razão de Engrenamento: 0.6363
- Torque no Pinhão: 971.52 N.m
- Diâmetros de Referência: dp = 177.8 mm, dg = 279.4 mm
- Carga Tangencial: 10.928 kN

Botão: **Calcular**

Fonte: O autor

Figura 2 – Aba 4: Material e Coeficientes de Segurança



Dados:

- Vida em Serviço: 2 x 10⁸ ciclos
- Temperatura de operação: 190 °C
- Dureza do Material: HB Pinhão 302, HB Engrenagem 111
- Confiabilidade: 99.99 %

Resultados:

- Fator de Vida - KI: 0.9648
- Fator de Temperatura - Kt: 1.3451
- Fator de Confiabilidade - Kr: 1.5
- Resistência à Fadiga de Flexão - Sfb: Pinhão 155.91 MPa, Engrenagem 79.112 MPa
- Fator de Vida - CI: 0.9334
- Fator de Dureza - Ch: 0.9974
- Resistência à Fadiga de Superfície - Sfc: 435.642 MPa
- Coef. de Segurança de Flexão: Nb pinhão = 0.8597, Nb engren = 0.4640
- Coef. de Segurança de Superfície: Nc pinhão/engren = 0.3670

Botão: **Calcular**

Fonte: O autor

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A primeira condição para teste do GeXP é obviamente a coerência de seus resultados. Para validar as respostas, os valores foram comparados para diferentes casos, com a resolução baseada na teoria abordada. As respostas corresponderam em todos os cenários, havendo uma pequena diferença decorrente da maior precisão conferida pelo MATLAB em comparação com a resolução “manual”.

Sendo as respostas do programa confiáveis para uso, partiu-se para o teste acerca da aceitação por parte de alunos. O GeXP teve sua versão final disponibilizada para teste com estudantes de engenharia mecânica que já cursaram as disciplinas referentes a projetos, podendo portanto opinar sobre a influência que tal ferramenta proporcionaria na facilidade de aprendizado.

Todos usaram o GeXP para a resolução de um mesmo exercício proposto baseado em exercícios e avaliações típicos das disciplinas. Antes disso, foi respondido por cada aluno um questionário sobre a percepção do grau de dificuldade da disciplina referente a projeto de engrenagens e a aceitação de ferramentas tecnológicas para o aprendizado. Posterior ao teste, para mensurar a satisfação com o desempenho do GeXP em si, foi respondido um novo questionário, especificamente sobre a experiência com as mecânicas do programa e seu desempenho.

Ao todo, realizaram o teste e o preenchimento dos questionários oito alunos. Os resultados das principais questões levantadas constam a seguir.

Tabela 1 – Resultados das principais questões dos questionários

	Muito Baixo	Baixo	Neutro	Elevado	Muito Elevado
Percepção dos alunos entrevistados acerca do nível de dificuldade da disciplina de Elementos de Máquinas II	0 %	0 %	0 %	75 %	25 %
Grau de satisfação com a facilidade de resolver o problema proposto à partir do programa	0 %	0 %	0 %	37 %	63 %
Grau de satisfação com aparência da interface	0 %	0 %	25 %	62 %	13 %
Grau de satisfação com a facilidade de interpretação dos elementos da interface	0 %	0 %	37 %	63 %	0 %
Grau de satisfação com quantidade de incógnitas respondidas ao longo do projeto	0 %	0 %	37 %	38 %	25 %

Fonte: o autor

Com o GeXP sendo majoritariamente aprovado pelos usuários, os quais também indicaram ter a disciplina um alto nível de dificuldade, pode-se constatar que existe uma carência no uso deste tipo de ferramenta, papel que poderia ser bem desempenhado pelo programa. Ainda assim, melhorias podem ser realizadas no programa em versões posteriores, sempre buscando ir de encontro com as preocupações dos estudantes. Pode ser considerado, por exemplo, o uso de mensagens na interface trocadas com o usuário para melhor apresentar o programa e indicar as melhores possibilidades de resolução dos exercícios.

4 CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo geral o desenvolvimento de um software que funcione como um Sistema Especialista simplificado, auxiliando no ensino do projeto de engrenagens cilíndricas retas. Para tanto, o software, batizado de GeXP (Gear Experience), teve de responder a objetivos específicos traçados no trabalho. Com sua programação realizada no

MATLAB, a interface gráfica foi desenvolvida pela ferramenta GUIDE do mesmo software, buscando ser simples e intuitiva. Por fim, foram realizados testes para a obtenção de valores de projeto no software, além de testes com usuários, os quais avaliaram respondendo questionários.

Os resultados apresentados mostraram que o GeXP é capaz de realizar o projeto para o tipo de problemas proposto, seguindo os passos da teoria e com resultados semelhantes aos de uma resolução convencional realizada por um aluno em sala de aula. Os testes com usuários tiveram resultados satisfatórios, com bons índices de avaliação. Questões centrais como facilidade de interpretação da interface e resolução de problemas foram destaque, com aprovação muito elevada, estando mais da metade dos usuários satisfeitos ou muito satisfeitos, como apontam os percentuais colhidos.

O GeXP mostrou-se adequado para uso por parte do aluno quando realizando um projeto de engrenagens cilíndricas de dentes retos em problemas convencionais da disciplina que aborda o tema. Com um ambiente instrutivo ao usuário, seria possível seu uso para visualizar o problema, organizar ideias, prever resultados de alterações de valores de entrada, conferir cálculos e maturar o conhecimento na área.

REFERÊNCIAS

BARKER, Philip. Expert systems in engineering education. **Engineering Applications Of Artificial Intelligence**, Laxenburg, v. 1, p.47-58, Março 1988

GEREN, Necdet; BAYSAL, M. Murat. EXPERT SYSTEM DEVELOPMENT FOR SPUR GEAR DESIGN. **Umtık 2000, 9 Th International Machine Design And Production Conference**, Ankara, Janeiro 2009.

HOFSTEIN, A.; LUNETTA, V. N. The Laboratory in Science Education: Foundations for the Twenty-First Century. **Science Education**, v. 88, n. 1, p. 28–54, 2004.

JAYAKIRAN REDDY, E.; PANDU RANGADU, V. Development of knowledge based parametric CAD modeling system for spur gear: An approach. **Alexandria Engineering Journal**, v. 57, n. 4, p. 3139–3149, 2018.

KATZ, R. Integrating analysis and design in mechanical engineering education. **Procedia CIRP**, v. 36, p. 23–28, 2015.

KEVICZKY, L.; BARS, RUTH; HETTHÉSSY; JENO, B.; Csilla Introduction to ATLAB. In: **Advanced Textbooks in Control and Signal Processing**. 4. ed. Birmingham: Academic Press, 2019. p. 1–27.

KHANNA, Satvika; KAUSHIK, Akhil; BARNELA, Manoj. EXPERT SYSTEMS ADVANCES IN EDUCATION. **Neci 2010 - National Conference On Computational Instrumentation**, Chandigarh, p.109-112, 20 mar. 2010.

NORTON, Robert L.. **Projeto de Máquinas: Uma abordagem integrada**. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013

TOBIN, K. Research on Science Laboratory Activities: In Pursuit of Better Questions and Answers to Improve Learning. **School Science and Mathematics**, v. 90, n. 5, p. 403–418, 2010.

ULLMAN, G. DAVID. **The Mechanical Design Process**. 4th. ed. Nova York: McGraw-Hill series, 2010

DEVELOPMENT OF EXPERT SYSTEM FOR DESIGNING OF SPUR GEARS BACK TO EDUCATION IN ENGINEERING

Abstract: *The study of engineering is challenging, for both students and professors. Always evolving, the methods of teaching are consequence of possibilities and limitations of their time. Between advances is technology's insertion as a learning tool. As example, we have the Expert Systems, softwares with the purpose to simulate the knowledge of an expert. In this paper was developed an Expert System for designing of spur gears to help mechanical engineering students. The software, named of GeXP, was developed by using the software MATLAB, whose commands are very similar with the conventional math, ensuring easy adaptation of design calculation to programming. The interface was created by using GUIDE (Graphical User Interface Development Environment), a MATLAB's tool. After software's conception, tests were elaborated to measure the quality of results of problems solved by GeXP. Besides, satisfaction tests were made with users about the software and the teaching of gears design on classroom. The results points first to the right answers of software comparing with theory and analytic methods. By the users test, good levels of satisfaction were observed, always with 50% or more of approving in each quiz item. So the GeXP could be used on the teaching and study of spur gears design, with possibility to help the students evolution.*

Key-words: *Expert System, Education in Engineering, GUIDE.*