



**CEFET-MG**

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS  
UNIDADE ARAXÁ**

**RAFAEL OLIVEIRA GUIMARÃES**

**ESTUDO DE MODELO E IMPLEMENTAÇÃO DE UM PROTÓ DIDÁTICO  
DE UMA *STRAIN WAVE GEAR* PARA APLICAÇÃO EM BRAÇOS  
ROBÓTICOS**

ARAXÁ/MG

2024

**RAFAEL OLIVEIRA GUIMARÃES**

**ESTUDO DE UM MODELO E IMPLEMENTAÇÃO DE UM PROTÓTIPO DIDÁTICO DE  
UMA *STRAIN WAVE GEAR* PARA APLICAÇÃO EM BRAÇOS ROBÓTICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - Unidade Araxá, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Automação Industrial.

Orientador: Prof. Dr. Horácio Albertini Neto

Coorientador: Prof. Dr. Leandro Resende  
Mattioli

EM BRANCO (APAGAR ESSE TEXTO E INCLUIR A ATA DE APROVAÇÃO)

ARAXÁ/MG

2024

## **DEDICATÓRIA**

Este trabalho é dedicado, com profunda gratidão, a todos aqueles que me acompanharam nesta longa jornada de aprendizado e desenvolvimento pessoal e profissional.

Aos meus queridos familiares, que foram meu alicerce em cada etapa desta caminhada. Suas palavras de incentivo, carinho e apoio incondicional me deram força para seguir em frente, mesmo nos momentos mais desafiadores. A confiança que depositaram em mim foi a luz que guiou meus passos, e por isso, sou eternamente grato.

Aos meus amigos, que estiveram ao meu lado, compartilhando sorrisos, preocupações e vitórias. Vocês foram minha rede de apoio, sempre prontos para oferecer uma palavra de conforto ou um momento de descontração. Cada conversa, cada conselho e cada risada tornaram este percurso mais leve e me deram a energia necessária para continuar.

Aos meus professores, mestres que me guiaram com sabedoria, paciência e dedicação. Vocês não apenas transmitiram conhecimento, mas também me ensinaram o valor da persistência, do rigor acadêmico e da busca incessante pelo aprendizado. Suas orientações foram fundamentais para meu crescimento como estudante e como profissional, e levo comigo cada ensinamento com grande apreço.

A todos, que de alguma forma fizeram parte desta jornada, meu mais sincero agradecimento. Este trabalho é tanto meu quanto de vocês, pois sem o apoio e a confiança de cada um, esta conquista não seria possível.

"O correr da vida embrulha tudo. A vida é assim: esquenta, esfria,  
aperta e daí afrouxa, sossega e depois desinquieta. O que ela quer da  
gente é coragem."

— Guimarães Rosa

## RESUMO

Este Trabalho de Conclusão de Curso estuda a Strain Wave Gear (SWG), uma solução de transmissão de movimento, amplamente aplicada em sistemas de alta precisão, como braços robóticos. O estudo aborda os fundamentos teóricos da SWG, incluindo sua estrutura geométrica, princípios de funcionamento, e as principais vantagens em relação a tecnologias tradicionais, como engrenagens planetárias e cicloidais, focando em sua alta relação de transmissão, precisão elevada e operação sem folga. Além da análise teórica, o trabalho incluiu o desenvolvimento de um modelo didático através de modelagem tridimensional utilizando software CAD, seguido pela prototipagem em impressão 3D com material PLA. A fabricação do protótipo permitiu a validação experimental dos conceitos estudados, comprovando a eficácia da SWG em contextos práticos, com destaque para a ausência de folga e o controle preciso do movimento. O estudo também explora o impacto dos materiais utilizados no desempenho e na durabilidade do sistema, propondo melhorias para futuras aplicações industriais. Os resultados obtidos com o protótipo didático validaram o conceito da SWG para aplicações educacionais, demonstrando sua eficácia em simular com precisão os princípios de funcionamento desta tecnologia em um ambiente de aprendizado. O protótipo mostrou-se adequado para finalidades acadêmicas, permitindo aos estudantes observar na prática os conceitos de transmissão de movimento sem folga e controle preciso. Dessa forma, o trabalho contribui significativamente para o avanço do ensino de sistemas mecânicos de alta precisão, fornecendo uma base prática e acessível para o aprendizado, além de fomentar o desenvolvimento de futuros projetos didáticos e inovações tecnológicas.

**Palavras-chave:** Automação, Engrenagem Harmônica, Protótipo Didático, *Strain Wave Gear*, Transmissão de Movimento.

## ABSTRACT

This final graduation project studies the Strain Wave Gear (SWG), a motion transmission solution widely applied in high-precision systems such as robotic arms. The study covers the theoretical foundations of the SWG, including its geometric structure, operating principles, and key advantages over traditional technologies, such as planetary and cycloidal gears, focusing on its high transmission ratio, precision, and backlash-free operation. In addition to the theoretical analysis, the project included the development of a didactic model through three-dimensional modeling using CAD software, followed by prototyping with 3D printing using PLA material. The manufacturing of the prototype enabled experimental validation of the studied concepts, demonstrating the effectiveness of the SWG in practical contexts, with emphasis on its backlash-free operation and precise motion control. The study also explores the impact of the materials used on the system's performance and durability, proposing improvements for future industrial applications. The results obtained with the didactic prototype validated the concept of SWG for educational purposes, demonstrating its effectiveness in accurately simulating the operational principles of this technology in a learning environment. The prototype proved to be suitable for academic purposes, allowing students to practically observe the concepts of backlash-free motion transmission and precise control. Thus, the project significantly contributes to the advancement of high-precision mechanical system education, providing a practical and accessible foundation for learning, as well as promoting the development of future didactic projects and technological innovations.

**Keywords:** Automation, Didactic Prototype, Harmonic Drive, Motion Transmission, *Strain Wave Gear*.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Uma aplicação de engrenagens do século 18 para alimentar máquinas têxteis .....	17
Figura 2 - Exemplo de um conjunto de engrenagens helicoidais .....	18
Figura 3 - Rodas de fricção em contato sem deslizamento .....	21
Figura 4 - Braço robótico Stretch da Boston Dynamics .....	22
Figura 5 - Principais Componentes da SWG .....	24
Figura 6 - Deformação elástica do <i>flexspline</i> .....	24
Figura 7 - Impressora 3D .....	28
Figura 8 - Principais componentes do SWG .....	29
Figura 9 - Vista Explodida do Protótipo Desenvolvido .....	45
Figura 10 - Processo de Impressão 3D .....	46
Figura 11 - Protótipo do Modelo Didático .....	47

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 - Dados Técnicos do Modelo Desenvolvido.....	44
---	----

## **LISTA DE QUADROS**

Quadro 1 - Comparações SWG, Engrenagens Planetárias e Engrenagens Cicloidal .....	34
Quadro 2 - Comparação de Materiais Usados na <i>Strain Wave Gear</i> (SWG).....	40

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NBR	Norma técnica Brasileira
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
SWG	<i>Strain Wave Gear</i>
PLA	<i>Polylactic Acid</i> (Ácido Polilático)
FEM	<i>Finite Element Method</i> (Método dos Elementos Finitos)
ISO	<i>International Organization for Standardization</i> (Organização Internacional de Padronização)
DIN	<i>Deutsches Institut für Normung</i> (Instituto Alemão de Normalização)
AGMA	<i>American Gear Manufacturers Association</i> (Associação Americana de Fabricantes de Engrenagens)
HRC	<i>Hardness Rockwell C</i> (Escala de Dureza Rockwell C)

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\omega$	Velocidade angular (rad/s ou rpm)
$z_{FS}$	Número de dentes do Flexspline
$z_{CS}$	Número de dentes do Circular Spline
$i$	Razão de transmissão
$T$	Torque (Nm)
$r_{FS}$	Raio primitivo do Flexspline (mm)
$p_{m\acute{a}x}$	Pressão máxima de contato (Pa)
$\sigma_{fat}$	Tensão de fadiga admissível (Pa)
$\sigma_{op}$	Tensão operacional (Pa)
$d$	Diâmetro primitivo (mm)
$d_a$	Diâmetro de topo (mm)
$d_f$	Diâmetro de raiz (mm)
$s_n$	Espessura do dente (mm)
$d_b$	Raio de base (mm)
$b$	Largura da face da engrenagem (mm)

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	17
2.1	Contexto histórico.....	17
2.2	Conceitos básicos.....	19
2.2.1	Sistemas de engrenagens para engenharia.....	19
2.2.2	Relação de Transmissão.....	20
2.2.3	Braço Robótico.....	21
2.3	<i>Strain Wave Gear</i> .....	22
2.3.1	Princípios de funcionamento da <i>Strain Wave Gear</i> .....	23
2.3.2	Geometria.....	26
2.3.3	Limitações e Desafios.....	27
2.4	Manufatura Aditiva.....	27
3	METODOLOGIA.....	29
3.1	Pesquisa Bibliográfica.....	30
3.1.1	Seleção de Fontes Relevantes.....	30
3.1.2	Revisão Sistemática da Literatura.....	30
3.2	Análise Teórica.....	31
3.2.1	Desenvolvimento de Modelos Matemáticos.....	31
3.2.2	Análise Comparativa.....	32
3.3	Síntese e Discussão dos Resultados.....	33
3.3.1	Comparação com Tecnologias Existentes.....	33
3.3.2	Identificação de Limitações e Oportunidades.....	33
3.3.3	Implicações para Aplicações Futuras.....	33
3.4	Comparativo de Prototipagem com Outras Tecnologias de Transmissão.....	34
3.5	Impactos Tecnológicos e Futuro das Aplicações de SWG.....	36

3.5.1	Avanços na Fabricação e Materiais .....	36
3.6	Análise Comparativa de Tecnologias de Transmissão .....	37
3.6.1	Vantagens sobre Outras Tecnologias de Engrenagem .....	37
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	38
4.1	Desempenho Teórico do <i>Strain Wave Gear</i> (SWG) .....	38
4.1.1	Cálculo da Razão de Engrenagem .....	38
4.1.2	Distribuição de Tensão e Análise de Fadiga .....	39
4.1.3	Impacto dos Materiais Utilizados .....	39
4.2	Memorial de Cálculo para Engrenamento da <i>Circular Spline</i> e da <i>Flexspline</i> para prototipagem .....	41
4.2.1	Cálculo do Diâmetro Primitivo (d) .....	41
4.2.2	Cálculo do Diâmetro Externo (da) .....	42
4.2.3	Cálculo do Diâmetro Interno (df) .....	43
4.2.4	Cálculo do Diâmetro da Base (db) .....	43
4.2.5	Considerações Adicionais .....	44
4.3	Prototipagem .....	45
5	CONCLUSÕES .....	49
5.1	Perspectivas Futuras .....	50
	REFERÊNCIAS .....	52

# 1 INTRODUÇÃO

A robótica emergiu como um campo transformador, desempenhando um papel significativo em diversas indústrias, como a automação industrial, a medicina, a exploração espacial e a eletrônica de consumo (ROSARIO, 2012). A crescente demanda por sistemas robóticos mais precisos, eficientes e confiáveis reflete a necessidade de atender às exigências de tarefas cada vez mais complexas e críticas. Dentro desse cenário, a busca por soluções inovadoras de transmissão de movimento tornou-se um fator crucial para o aprimoramento das capacidades dos braços robóticos, que são componentes essenciais em uma ampla gama de aplicações.

Dentre as várias inovações tecnológicas no campo da robótica, a *Strain Wave Gear* (SWG), também conhecida como engrenagem harmônica, destaca-se como uma solução revolucionária. Desenvolvida na década de 1950 por Clarence W. Musser, a SWG tem se estabelecido como uma das tecnologias mais eficientes para transmissão de movimento em sistemas que requerem alta precisão (MUSSER, 1959). Diferente das engrenagens tradicionais, que frequentemente sofrem com folga mecânica e complexidade de design, a SWG utiliza a deformação elástica controlada de seus componentes para transmitir movimento de forma extremamente precisa e eficiente, mesmo em espaços compactos. Essa característica faz da SWG uma solução ideal para aplicações que exigem alta exatidão, como na automação industrial e na cirurgia assistida por robôs (CHENG; CHEN, 2022).

O foco do estudo reside na necessidade crescente de elevar a precisão e a eficiência dos braços robóticos em diversas aplicações, desde a produção industrial até a medicina de alta precisão. Os sistemas de transmissão tradicionais, como engrenagens helicoidais e planetárias, embora amplamente utilizados, frequentemente enfrentam desafios significativos relacionados à precisão e à folga mecânica. Essas limitações podem comprometer a capacidade dos braços robóticos de realizar tarefas críticas com a exatidão necessária. Neste contexto, a SWG surge como uma alternativa, oferecendo uma relação de transmissão elevada e um funcionamento praticamente sem folga, o que se traduz em movimentos suaves, precisos e altamente confiáveis (RAVIOLA et al., 2021).

Além das aplicações práticas, a relevância da SWG também se estende ao campo acadêmico e educacional. A introdução dessa tecnologia no ensino de engenharia e automação industrial representa uma oportunidade valiosa para os alunos compreenderem e experimentarem uma solução mecânica avançada e consolidada. A utilização de modelos didáticos de SWG em ambientes educacionais pode enriquecer a formação dos futuros engenheiros, preparando-os para enfrentar os desafios da automação moderna e incentivando a inovação no desenvolvimento de novos sistemas robóticos.

Este trabalho propõe um estudo teórico detalhado sobre a *Strain Wave Gear* e suas aplicações em braços robóticos. A pesquisa se concentrará na análise dos princípios de funcionamento da SWG, sua estrutura geométrica, e suas vantagens em relação aos sistemas de transmissão tradicionais. Além disso, o estudo explorará as diversas aplicações da SWG em braços robóticos, destacando como essa tecnologia pode melhorar a precisão, a eficiência e a confiabilidade desses sistemas em diferentes cenários de aplicação.

Por fim, a relevância deste trabalho está em sua contribuição para o avanço do campo da robótica e da automação industrial, ao consolidar o conhecimento existente e propor novas perspectivas de aplicação. Espera-se que este estudo não só amplie a compreensão sobre a SWG, mas também incentive a adoção dessa tecnologia em novos projetos de engenharia e no desenvolvimento de sistemas robóticos cada vez mais avançados. A disseminação do conhecimento adquirido por meio deste trabalho tem o potencial de influenciar futuras gerações de engenheiros e pesquisadores, promovendo inovações tecnológicas que podem impactar desde a indústria manufatureira até áreas tão diversas quanto a medicina e a exploração espacial.

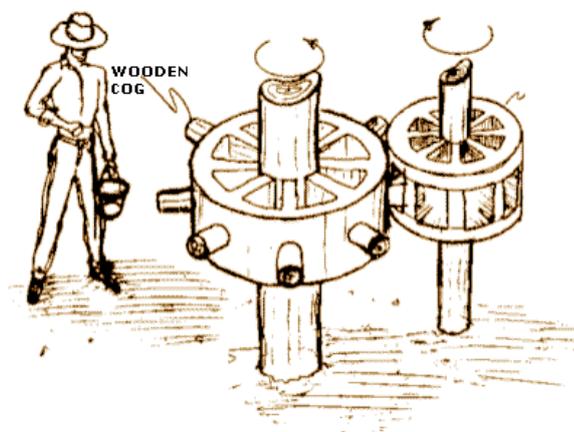
## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Foram abordados os principais conceitos relacionados à Strain Wave Gear (SWG), com foco em suas características técnicas, funcionamento e vantagens em comparação a outras tecnologias de transmissão de movimento, como engrenagens planetárias e cicloidais. Primeiramente, foi discutido o contexto histórico da evolução das tecnologias de transmissão de movimento, seguido de uma análise detalhada dos princípios que fundamentam o funcionamento da SWG. Além disso, foram exploradas as geometrias envolvidas, as limitações dessa tecnologia e sua aplicação em sistemas de alta precisão, como robótica e automação. Também foi abordado o papel da manufatura aditiva, especialmente a impressão 3D, na criação de protótipos de SWG, evidenciando o impacto dos materiais utilizados no desempenho e na durabilidade do sistema.

### 2.1 Contexto histórico

A evolução das tecnologias de transmissão de movimento ao longo da história desempenhou um papel fundamental no desenvolvimento da engenharia mecânica e, em particular, na robótica e na automação industrial. Desde tempos antigos, as engrenagens mecânicas desempenharam um papel crucial na transmissão de movimento em máquinas e mecanismos, e seu uso data de séculos Figura 1.

Figura 1 - Uma aplicação de engrenagens do século 18 para alimentar máquinas têxteis



Fonte: (EFUNDA, s.d.)

No entanto, à medida que a Revolução Industrial ganhou força, houve uma busca por transmissões mais eficientes e precisas. Isso levou ao desenvolvimento de engrenagens helicoidais, Figura 2, que permitiam uma transmissão de movimento mais suave e silenciosa em comparação com as engrenagens retas. As engrenagens helicoidais encontraram uma ampla gama de aplicações em indústrias diversas, incluindo automotiva e manufatura (SINGHAL; SINGHAL, 2022).

Figura 2 - Exemplo de um conjunto de engrenagens helicoidais



Fonte: (POOJA, s.d.)

À medida que a demanda por precisão e eficiência continuou a crescer, surgiram as engrenagens planetárias, também conhecidas como engrenagens epicicloidalas (EFUNDA, s.d.). Essas transmissões complexas permitiram altas relações de redução em um espaço compacto, tornando-as ideais para uso em caixas de câmbio e redutores de velocidade.

No entanto, o marco na aplicação em robótica veio na década de 1950 com o desenvolvimento das SWGs, também chamadas de engrenagens harmônicas, por C.W. Musser (MUSSER, 1959). As SWGs apresentaram uma série de vantagens significativas, incluindo alta relação de redução, tamanho compacto, precisão e a capacidade de fornecer movimento reversível. Essas características as tornaram altamente desejáveis em aplicações onde a precisão, o espaço e a eficiência eram essenciais, como na robótica e na instrumentação de alta precisão (CHENG; CHEN, 2022).

Assim, a evolução das tecnologias de transmissão de movimento, culminando nas SWGs, desempenhou um papel crucial na conformação da engenharia mecânica moderna e na capacidade de projetar sistemas mecânicos avançados, como braços robóticos altamente precisos.

## **2.2 Conceitos básicos**

Para compreender plenamente o impacto e as aplicações da Strain Wave Gear (SWG) no campo da robótica e automação, é essencial explorar os conceitos básicos que fundamentam seu funcionamento e a diferenciam de outras tecnologias de transmissão de movimento. Esses conceitos incluem uma análise dos sistemas de engrenagens tradicionais, a relação de transmissão e as especificidades dos braços robóticos, todos elementos que se conectam diretamente ao desenvolvimento histórico anteriormente discutido.

Os sistemas de engrenagens, que têm sido uma constante na evolução da engenharia mecânica, servem como a base para entender a importância da SWG. A complexidade crescente desses sistemas ao longo do tempo reflete a busca incessante por soluções mais eficientes e precisas, culminando no surgimento de tecnologias como a SWG, que não só incorporam, mas também superam os desafios enfrentados por suas predecessoras.

A seguir, serão abordados os princípios básicos dos sistemas de engrenagens, a importância da relação de transmissão, e como esses elementos se interligam na operação dos braços robóticos. Essas discussões estabelecerão o alicerce teórico necessário para a compreensão aprofundada do funcionamento e das vantagens da SWG, preparando o terreno para a análise detalhada que se seguirá.

### **2.2.1 Sistemas de engrenagens para engenharia**

Sistemas de engrenagens são componentes mecânicos essenciais usados para transmitir movimento e potência entre eixos. Eles consistem em engrenagens que possuem dentes que se encaixam, permitindo a mudança de velocidade de rotação, inversão de direção e ajuste da relação de transmissão (COY; TOWNSEND; ZARETSKY, 1985). Existem diversos tipos de engrenagens, como engrenagens retas, helicoidais, planetárias e de dentes internos, cada uma

adequada para aplicações específicas. A eficiência das engrenagens, que afeta a quantidade de energia perdida devido ao atrito é uma consideração crítica em seu projeto.

Engrenagens são amplamente utilizadas em diversas indústrias, incluindo automobilística, manufatura, robótica entre outras. Elas são fundamentais na otimização da transmissão de movimento e potência em sistemas mecânicos, desempenhando um papel crucial na engenharia moderna. O projeto de sistemas de engrenagens requer cálculos e considerações de engenharia para garantir que as engrenagens atendam às necessidades específicas de cada aplicação, proporcionando a relação de transmissão desejada de maneira eficiente e confiável (COY; TOWNSEND; ZARETSKY, 1985).

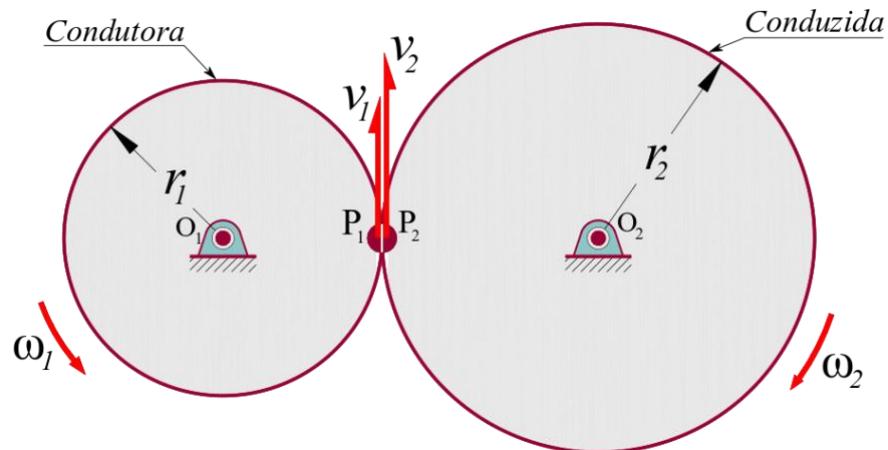
### 2.2.2 Relação de Transmissão

*Gear ratio*, ou relação de transmissão, é um conceito fundamental na engenharia mecânica que descreve a relação entre as velocidades angulares ( $\omega$ ) (rotações por minuto ou radianos por segundo) de duas engrenagens interconectadas em um sistema de transmissão, Figura 3. Esse valor indica quantas vezes a primeira engrenagem gira em relação à segunda. Uma relação de transmissão maior indica que a primeira engrenagem gira mais rapidamente do que a segunda, resultando em uma redução da velocidade de saída, Equação 1 (MARIA JOSÉ, 2022). Por outro lado, uma relação menor aumenta a velocidade de saída. A relação de transmissão é crucial para determinar como um sistema mecânico converte energia de entrada em movimento, alterando tanto a velocidade quanto o torque, e desempenha um papel central no projeto de máquinas, veículos, e diversos dispositivos mecânicos.

$$\varphi = \frac{\omega_s}{\omega_e} \quad \text{Equação 1}$$

A relação de transmissão é calculada pela divisão do número de dentes da engrenagem de saída pelo número de dentes da engrenagem de entrada. Essa relação é um dos principais elementos de controle no dimensionamento de sistemas mecânicos, permitindo que os engenheiros ajustem o desempenho de acordo com as necessidades específicas de uma aplicação. Compreender a relação de transmissão é essencial para otimizar a eficiência e a funcionalidade de máquinas e veículos, permitindo que eles atinjam as velocidades e os torques desejados para cumprir sua finalidade com sucesso.

Figura 3 - Rodas de fricção em contato sem deslizamento



Fonte: (MARIA JOSÉ, 2022)

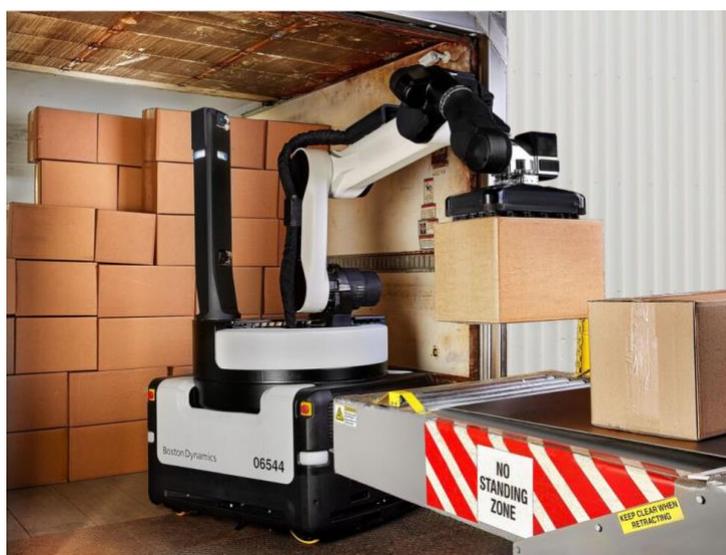
### 2.2.3 Braço Robótico

Braços robóticos são dispositivos mecânicos projetados para imitar a funcionalidade de um braço humano, equipados com articulações e atuadores que permitem a manipulação de objetos e tarefas em ambientes diversos. Esses sistemas robóticos são amplamente utilizados em automação industrial, medicina, pesquisa, logística e outras áreas, desempenhando um papel essencial na execução de tarefas repetitivas e perigosas (SINGH; SELLAPPAN; KUMARADHAS, 2013). Um braço robótico típico é composto por elos articulados que se assemelham a juntas humanas, como ombro, cotovelo e punho, Figura 4, e é controlado por meio de software que determina os movimentos e as ações a serem executadas.

O principal objetivo de um braço robótico é realizar tarefas que vão desde a manipulação de peças em uma linha de montagem industrial até a cirurgia assistida por robô. A precisão e a repetibilidade são características-chave, permitindo que os braços robóticos executem tarefas complexas com consistência e alta acurácia (SINGH; SELLAPPAN; KUMARADHAS, 2013). Além disso, a capacidade de programação e a flexibilidade dos braços robóticos tornam-nos versáteis em ambientes de produção, onde podem ser facilmente reconfigurados para diferentes aplicações.

A eficácia dos braços robóticos na execução de tarefas precisas e complexas está intrinsecamente ligada ao desempenho de seus componentes mecânicos, com as engrenagens desempenhando um papel crucial nesse contexto. As engrenagens são elementos fundamentais na transmissão de movimento dentro dos elos articulados do braço robótico, permitindo a coordenação fluida dos movimentos em suas diversas juntas.

Figura 4 - Braço robótico Stretch da Boston Dynamics



Fonte: (TECHNICA, 2023)

A evolução tecnológica tem levado a melhorias significativas nos braços robóticos, como a integração de sensores avançados, inteligência artificial e visão computacional (SINGH; SELLAPPAN; KUMARADHAS, 2013). Essas inovações ampliam o escopo de aplicações, permitindo que os braços robóticos se adaptem a tarefas complexas e interações seguras com seres humanos. A contínua pesquisa e desenvolvimento nesse campo prometem expandir ainda mais os horizontes da automação e da robótica, tornando os braços robóticos uma parte integral da indústria moderna e do nosso cotidiano.

### 2.3 *Strain Wave Gear*

A SWG, também conhecida como engrenagem harmônica ou engrenagem flexível, é uma tecnologia de transmissão de movimento de alta precisão que desafia os paradigmas convencionais de engrenagens mecânicas. Essa inovação revolucionária, criada por Clarence W. Musser na década de 1950 (MUSSER, 1959), destaca-se pela sua capacidade de combinar

muita precisão com um tamanho compacto e eficiência notável. A SWG tem aplicações abrangentes em uma variedade de setores, desde robótica e automação industrial até dispositivos médicos e telescópios espaciais, desempenhando um papel crucial na otimização de sistemas mecânicos e na melhoria do desempenho de máquinas e equipamentos.

O conceito fundamental por trás da *Strain Wave Gear* reside na deformação elástica de um elemento flexível, geralmente chamado de "diafragma," que permite a transmissão de movimento entre uma engrenagem de entrada e uma engrenagem de saída. A deformação controlada desse diafragma permite que as engrenagens executem uma série de movimentos harmônicos, proporcionando uma relação de transmissão excepcionalmente alta em um espaço reduzido (CHENG; CHEN, 2022). A engrenagem harmônica é caracterizada por sua operação livre de folgas, baixo atrito e alta precisão, tornando-a ideal para aplicações que requerem posicionamento preciso e movimentos suaves.

### 2.3.1 Princípios de funcionamento da *Strain Wave Gear*

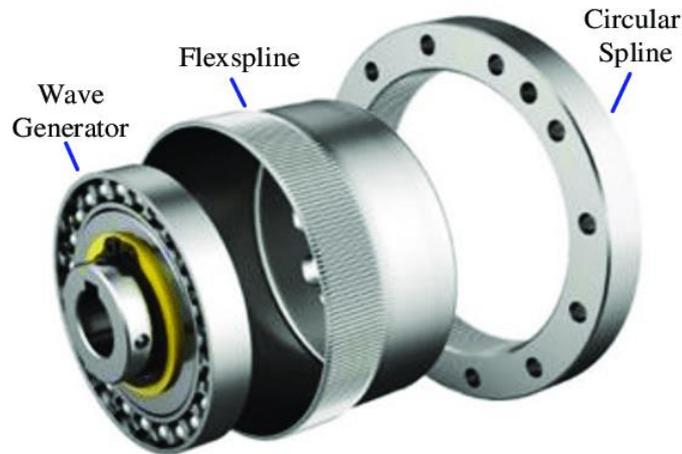
Abaixo serão descritos os componentes e princípios de funcionamento de uma *Strain wave gear*, realçando os pontos mais relevantes para esse estudo.

#### Componentes Principais

A SWG é composta por três componentes principais (Figura 5):

- **Wave Generator (Gerador de Onda):** Este é o componente de entrada, geralmente em forma de uma engrenagem especial com uma série de dentes ondulados.
- **Flexspline:** O *flexspline* é o elemento central e é conectado ao componente de saída, que geralmente possui dentes internos.
- **Circular Spline (Anel Externo):** Este é o componente de ancoragem que possui dentes externos e mantém o conjunto de engrenagens no lugar.

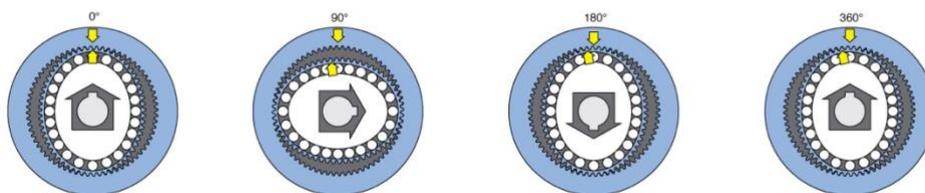
Figura 5 - Principais Componentes da SWG



Fonte: (TANG et al., 2021)

### Deformação Elástica

O princípio fundamental da SWG é a deformação elástica do *flexspline*, que é uma fina chapa de metal com sulcos radiais. Quando o *wave generator* gira, ele aplica uma força no diafragma flexível. A deformação elástica do diafragma permite que ele se adapte ao movimento do *wave generator* (SAHOO, 2022). Isso faz com que o *flexspline* se deforme de maneira elíptica, como mostra a Figura 6, resultando em uma rotação não uniforme.

Figura 6 - Deformação elástica do *flexspline*

Fonte: (DRIVE, 2023)

Para cada rotação de 180 graus no sentido horário do Gerador de Ondas, os dentes da *Flexspline* são avançados no sentido anti-horário por um dente em relação à Circular Spline. Cada rotação completa no sentido horário do Gerador de Ondas resulta na *Flexspline* movendo-se no sentido anti-horário por dois dentes a partir de sua posição original em relação à Circular Spline.

### **Transferência de Movimento**

Os sulcos radiais no *flexspline* se encaixam nos dentes internos do *flexspline*. À medida que o *flexspline* se deforma devido à rotação do *wave generator*, os dentes do *flexspline* são movidos em um movimento de "andar de caranguejo", levando ao deslocamento rotativo do *flexspline*. Esse movimento do *flexspline* é transmitido para o componente de saída, realizando a transmissão de movimento desejada (YU; GONG, 2018).

### **Relação de Transmissão**

A relação de transmissão da SWG é determinada pelo número de dentes do *wave generator* em relação ao número de dentes do *flexspline*. Uma relação de transmissão típica pode ser de 1:100 ou superior, permitindo uma alta redução de velocidade em um espaço compacto (YU; GONG, 2018; TIMOFEYEV et al., 2018).

### **Operação sem Folga**

Um dos benefícios notáveis da SWG é sua operação virtualmente sem folga. Isso significa que a SWG pode realizar movimentos precisos e reversíveis, sem a folga que é comum em muitos outros tipos de transmissão.

Devido aos dentes da engrenagem estarem sempre completamente engajados em uma região ao longo do eixo principal, os redutores de engrenagem por onda de deformação Harmonic Drive têm Zero Backlash (folga zero) (MAITI et al., 2013).

### **Perfil de Engrenagem**

Apesar do perfil evolvente ser amplamente utilizado em engrenagens cilíndricas, sua aplicação não é comum em drives do tipo SWG. Como exemplo, mesmo em sua patente de 1959, Musser propôs a utilização do perfil evolvente com diferentes ângulos de pressão para a spline flexível e a engrenagem anelar. Isso ocorre devido à cinemática do engajamento dos dentes em drives SWG, que difere daquela encontrada em drives de engrenagens tradicionais. Em um drive SWG, um dente da spline flexível move-se para dentro de um espaço entre os dentes da engrenagem anelar e, posteriormente, move-se para fora dele.

O perfil de dente evolvente utiliza a curva evolvente para a geometria da superfície lateral em ambos os lados dos dentes. A curva evolvente pode ser visualizada como o desenrolar de um fio de uma circunferência com raio  $r_b$ , denominada círculo de base (MAITI et al., 2013).

## Movimento Harmônico

A SWG produz um movimento harmônico, que é um movimento suave, contínuo e sem interrupções, semelhante ao movimento de uma onda. Essa característica torna a SWG adequada para aplicações que requerem movimentos precisos e sem vibrações.

### 2.3.2 Geometria

A geometria da SWG é um elemento crítico que define o funcionamento e as características desta inovadora tecnologia de transmissão de movimento. A SWG é composta por três componentes principais: o *wave generator* (gerador de onda), o *flexspline* e o circular spline (anel externo). A geometria desses componentes é fundamental para a transmissão eficiente e precisa de movimento.

O *wave generator* é um dos elementos centrais da geometria da SWG. Ele possui dentes ondulados que são projetados de forma a se encaixarem perfeitamente com os sulcos radiais do *flexspline*. Essa geometria permite que o *wave generator* aplique uma força controlada no diafragma flexível, induzindo a deformação elástica que impulsiona o movimento do sistema (MAITI et al., 2013). A precisão na fabricação dos dentes ondulados e na distância entre eles é crítica para a operação suave e sem folga da SWG.

O *flexspline*, por sua vez, é a peça central da SWG e apresenta uma geometria específica. Ele possui dentes internos que se ajustam aos dentes ondulados do *wave generator*. A geometria do *flexspline* é projetada para acomodar a deformação elíptica controlada resultante da ação do *wave generator*. A interação entre essas geometrias é o que permite que o movimento seja transmitido de maneira harmônica e precisa. A relação entre o número de dentes do *flexspline* e do *wave generator* determina a relação de transmissão da SWG, um aspecto fundamental que influencia a eficiência e a utilidade da tecnologia em várias aplicações.

Por fim, o *circular spline*, ou anel externo, fornece uma base de ancoragem para o conjunto de engrenagens. Sua geometria inclui dentes externos que interagem com os dentes do *flexspline*, permitindo que a SWG seja firmemente montada e mantida em posição durante a operação. A precisão na geometria do *circular spline* é essencial para garantir que o sistema funcione de forma estável e eficiente.

### 2.3.3 Limitações e Desafios

Apesar das vantagens, o SWG também enfrenta algumas limitações. Conforme discutido por Timofeyev et al. (2018), o SWG é menos eficaz em alcançar razões de engrenagem menores do que 50:1, o que limita sua aplicação em sistemas que requerem tais características. Além disso, a sensibilidade a erros de fabricação e a necessidade de uma lubrificação adequada são desafios significativos. Erros na fabricação do *flexspline* ou do gerador de onda podem levar a variações na performance, e uma lubrificação inadequada pode resultar em desgaste prematuro dos componentes, comprometendo a vida útil do SWG (TIMOFEYEV et al., 2018).

Essas limitações sugerem que, enquanto o SWG é altamente eficaz em certos contextos, ele pode não ser a melhor escolha para todas as aplicações de transmissão. Por exemplo, em sistemas que exigem uma razão de engrenagem baixa, como em redutores de velocidade para motores elétricos industriais, engrenagens planetárias podem ser mais apropriadas devido à sua capacidade de fornecer múltiplas razões de engrenagem em um design relativamente simples e econômico. Além disso, em aplicações onde a fabricação de componentes de alta precisão não é viável ou onde a manutenção de lubrificação constante é difícil, como em ambientes severos ou sistemas expostos a contaminação, engrenagens mais robustas e menos sensíveis a erros de fabricação, como as engrenagens helicoidais ou cônicas, podem ser preferíveis.

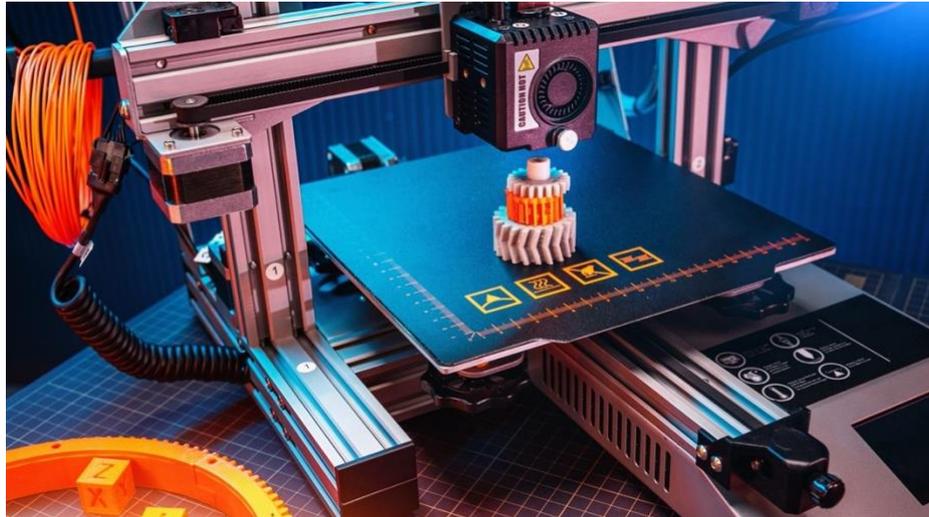
Projetistas e engenheiros devem, portanto, considerar cuidadosamente os requisitos específicos de sua aplicação ao selecionar o tipo de engrenagem mais apropriado. O SWG, apesar de suas excelentes características em termos de precisão e compactação, pode não ser a solução ideal em cenários no qual sua alta sensibilidade a erros de fabricação e requisitos de lubrificação não podem ser atendidos de maneira confiável.

## 2.4 Manufatura Aditiva

A Manufatura Aditiva, também conhecida como impressão 3D, Figura 7, representa uma classe de processos de produção que tem ganhado crescente aplicação em diversas áreas e cadeias produtivas. Sua flexibilidade para a produção em baixos lotes, juntamente com a versatilidade de materiais e geometrias, posiciona essa tecnologia como um potencial revolucionário nos processos produtivos, capaz de alterar as estratégias de produção atualmente

empregadas (RODRIGUES et al., 2017). No entanto, é importante notar que sob o rótulo genérico de Manufatura Aditiva, existem diversas tecnologias, materiais e áreas de aplicação, cada uma com requisitos específicos.

Figura 7 - Impressora 3D



Fonte: (COSTA, s.d.)

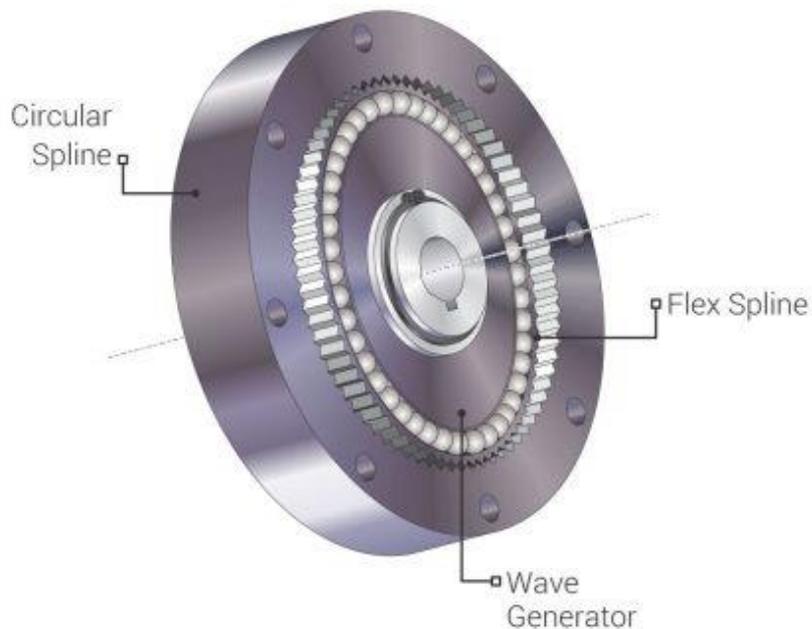
Os principais processos de fabricação tradicionais têm seus princípios fundamentados na moldagem do material, seja envolvendo ou não sua fusão, como na fundição de metais, moldagem por injeção de plástico, metalurgia do pó, entre outros. Outras abordagens incluem a remoção ou subtração de material, atingindo a forma desejada por meio de técnicas como torneamento, fresamento, furação, retífica, eletroerosão, usinagem química, eletroquímica, e conformação, que envolve a deformação plástica do material inicial através de forjamento, estampagem de chapas, extrusão, laminação, entre outros. Processos adicionais incluem a união de componentes através de soldagem, brasagem, colagem, e a divisão de componentes por meio de serragem e cortes (VOLPATO, 2021).

No final da década de 1980, surgiu um novo princípio de fabricação inovador baseado na adição de material, agora conhecido como Manufatura Aditiva ou impressão 3D (SILVA et al., 2020). Essa abordagem revolucionária permite a construção camada por camada de objetos tridimensionais, abrindo novas possibilidades e desafiando os paradigmas tradicionais da fabricação industrial.

### 3 METODOLOGIA

A metodologia deste trabalho, centrada em uma revisão bibliográfica em uma análise teórica aprofundada do *Strain Wave Gear* (SWG), foi estruturada em etapas bem definidas. Cada uma dessas etapas foi meticulosamente planejada para garantir uma pesquisa completa e rigorosa, que aborde não apenas os fundamentos teóricos do SWG, mas também suas diversas aplicações práticas em sistemas robóticos. O foco está em integrar uma compreensão teórica detalhada com as implicações práticas, de modo a fornecer uma visão holística e crítica sobre a tecnologia SWG.

Figura 8 - Principais componentes do SWG



Fonte: (TOULAS, s.d.)

Ao longo do desenvolvimento deste trabalho, foram seguidos procedimentos metodológicos que envolvem a seleção criteriosa de fontes relevantes, o desenvolvimento de modelos teóricos baseados em evidências da literatura, e a realização de análises comparativas. Esses procedimentos são essenciais para garantir que as conclusões sejam fundamentadas em uma base sólida de conhecimento, refletindo tanto a profundidade quanto a amplitude da pesquisa conduzida.

### 3.1 Pesquisa Bibliográfica

Foram revisados os principais estudos e publicações sobre a Strain Wave Gear (SWG), com o objetivo de consolidar o conhecimento existente sobre essa tecnologia de transmissão de movimento. Inicialmente, foram selecionadas fontes relevantes em bases de dados acadêmicas, priorizando artigos científicos, livros e teses que abordassem os fundamentos teóricos, o desenvolvimento e as aplicações da SWG. A partir dessa seleção, foi realizada uma revisão sistemática da literatura, que permitiu identificar as principais contribuições e debates em torno do tema, além de coletar dados cruciais sobre a eficiência, precisão e limitações dessa tecnologia. A pesquisa bibliográfica serviu como base para o desenvolvimento teórico deste trabalho, fornecendo informações essenciais para a comparação da SWG com outras tecnologias de transmissão e para a análise de suas aplicações em ambientes industriais e acadêmicos.

#### 3.1.1 Seleção de Fontes Relevantes

O primeiro passo na metodologia é a realização de uma pesquisa bibliográfica abrangente. Essa busca será realizada em bases de dados acadêmicas de prestígio, como Scopus, IEEE Xplore, ScienceDirect, e Google Scholar, entre outras. As palavras-chave utilizadas incluirão termos como "*Strain Wave Gear*", "Harmonic Drive", "robotic actuators", "gear transmission", e "*flexspline*".

A seleção das fontes bibliográficas será feita com base na relevância dos trabalhos para a compreensão dos aspectos fundamentais e aplicados do SWG. Serão priorizados artigos científicos, livros, teses, dissertações, patentes, e outros materiais acadêmicos que forneçam uma base sólida para a análise teórica e a discussão das aplicações do SWG.

#### 3.1.2 Revisão Sistemática da Literatura

Após a seleção das fontes, foi conduzida uma revisão sistemática da literatura. Essa etapa envolve a leitura detalhada dos estudos selecionados, com o objetivo de extrair e sintetizar informações cruciais sobre o SWG, incluindo seu design, funcionamento e aplicações. A revisão sistemática permitirá identificar os principais tópicos e coletar os dados importantes.

A revisão ajudará a identificar os principais tópicos e debates na literatura sobre SWG, abordando tanto os aspectos teóricos quanto práticos. Durante a leitura, serão extraídos dados

e informações que sejam relevantes para a compreensão dos mecanismos operacionais do SWG, bem como para a avaliação de sua eficiência, durabilidade, e aplicabilidade em diferentes contextos.

## 3.2 Análise Teórica

A análise teórica constitui a segunda etapa da metodologia, onde as informações coletadas durante a revisão bibliográfica serão organizadas e analisadas para desenvolver uma compreensão aprofundada do SWG.

### 3.2.1 Desenvolvimento de Modelos Matemáticos

Os modelos matemáticos desenvolvidos nesta etapa são fundamentais para a compreensão detalhada do funcionamento do SWG. A análise matemática incluirá:

**Razão de Engrenagem e Redução de Velocidade:** O SWG é conhecido por sua capacidade de alcançar uma alta razão de redução de velocidade em um único estágio, o que é essencial para aplicações em robótica que exigem controle preciso. Serão desenvolvidas equações que descrevem como a diferença no número de dentes entre o *flexspline* e o circular spline leva à redução de velocidade. A formulação matemática dessas relações será baseada em modelos teóricos encontrados na literatura (YU; GONG, 2018).

**Distribuição de Tensão e Comportamento do *Flexspline*:** O *flexspline* é um dos componentes mais críticos do SWG, sendo sujeito a deformações significativas durante a operação. A análise teórica incluirá o desenvolvimento de modelos matemáticos para prever as tensões induzidas no *flexspline* e a sua deformação sob a influência do gerador de onda. Este modelo considerará a elasticidade do material e a geometria do componente, fornecendo uma visão detalhada sobre os pontos de concentração de tensão que podem levar a falhas por fadiga.

**Eficiência Energética e Torque:** A eficiência do SWG depende de como a energia é transmitida através dos componentes do sistema, incluindo o *flexspline*, o gerador de onda, e o circular spline. Modelos matemáticos serão utilizados para calcular a eficiência energética do SWG, considerando a transferência de torque e as perdas associadas. Este aspecto é crucial para determinar a adequação do SWG em aplicações que exigem alta precisão e baixo consumo de energia.

**Impacto dos Materiais Utilizados:** A escolha dos materiais para os componentes do SWG, especialmente para o *flexspline*, impacta diretamente o desempenho e a durabilidade do sistema. Serão discutidos os modelos que relacionam as propriedades dos materiais, como rigidez e resistência à fadiga, com o comportamento operacional do SWG. Estudos de caso encontrados na literatura que utilizaram materiais como ligas metálicas e compósitos serão revisados e analisados para entender melhor suas implicações práticas.

### 3.2.2 Análise Comparativa

A análise comparativa será uma parte central da metodologia, focando na comparação do desempenho do SWG com outras tecnologias de engrenagens, como engrenagens planetárias e cicloidais. Esta análise será detalhada nos aspectos:

**Eficiência de Transmissão:** O SWG é conhecido por sua alta eficiência em transmitir energia com mínimas perdas, o que é particularmente importante em sistemas robóticos. Serão comparadas as eficiências de diferentes sistemas de engrenagem, com foco em como o SWG se destaca ou não em relação a outras tecnologias. A análise se baseará em estudos empíricos e teóricos encontrados na literatura, que medem a eficiência de transmissão sob diferentes condições operacionais.

**Precisão e Controle de Movimento:** A precisão do SWG em eliminar folgas (backlash) e fornecer um controle de movimento preciso é uma das principais vantagens que ele oferece sobre outras tecnologias de engrenagem. Serão comparados os níveis de precisão atingidos pelo SWG com aqueles obtidos por engrenagens planetárias e cicloidais, discutindo os fatores que contribuem para a superioridade ou limitações de cada sistema. Esta comparação será fundamentada em estudos que abordam a precisão em aplicações críticas, como na robótica e na automação industrial.

**Durabilidade e Manutenção:** Outro aspecto importante da análise comparativa será a durabilidade dos diferentes sistemas de engrenagem. O SWG, com sua capacidade de operar sem folga e com menor desgaste, será comparado com outros sistemas em termos de vida útil, necessidades de manutenção e resistência a falhas. Esta parte da análise se baseará em dados coletados da literatura que abordam a durabilidade em condições reais de operação,

considerando também as implicações de falhas e a frequência de manutenção necessária para garantir um desempenho contínuo.

**Complexidade e Custo de Fabricação:** Serão discutidos os aspectos econômicos e de complexidade na fabricação do SWG em comparação com outras tecnologias de engrenagem. Esta análise incluirá uma avaliação dos custos associados à produção dos componentes do SWG, como o *flexspline*, e como esses custos se comparam com os de sistemas mais tradicionais. Estudos sobre processos de fabricação, como o power skiving para a produção de splines circulares, serão revisados para entender melhor as implicações econômicas e os desafios técnicos envolvidos.

### **3.3 Síntese e Discussão dos Resultados**

A etapa final da metodologia envolve a síntese dos resultados obtidos durante a revisão bibliográfica e a análise teórica, seguida por uma discussão aprofundada sobre as implicações desses resultados.

#### **3.3.1 Comparação com Tecnologias Existentes**

A discussão começará com uma comparação detalhada entre os resultados teóricos obtidos para o SWG e os dados disponíveis sobre outras tecnologias de engrenagem. Essa comparação abordará como o SWG se posiciona em termos de eficiência, precisão, durabilidade e custo, destacando as situações em que ele oferece vantagens claras e aquelas em que outras tecnologias podem ser mais adequadas.

#### **3.3.2 Identificação de Limitações e Oportunidades**

Com base na análise comparativa e nos resultados teóricos, serão identificadas as principais limitações do SWG, como a dificuldade em alcançar baixos níveis de razão de engrenagem e a sensibilidade a falhas devido a erros de fabricação. Além disso, serão discutidas as oportunidades para inovação, como o desenvolvimento de novos materiais ou melhorias nos processos de fabricação que possam superar essas limitações.

#### **3.3.3 Implicações para Aplicações Futuras**

Finalmente, os resultados serão discutidos em termos de suas implicações para o futuro das aplicações de SWG. Serão sugeridas direções para pesquisas futuras, com foco em expandir

as aplicações do SWG em áreas emergentes como a robótica médica e a automação de precisão, além de discutir como as melhorias tecnológicas poderiam permitir novos usos e aumentar a adoção dessa tecnologia em indústrias variadas.

### 3.4 Comparativo de Prototipagem com Outras Tecnologias de Transmissão

Com base em protótipos em impressão 3D, podemos realizar uma análise comparativa entre o *Strain Wave Gear* (SWG) projetado e outras tecnologias de transmissão de engrenagem, como engrenagens planetárias e cicloidais. Esta comparação leva em consideração parâmetros chave como eficiência, precisão, durabilidade, complexidade de fabricação, e adequação para prototipagem em materiais como PLA.

#### Parâmetros Comparados

Os parâmetros mais relevantes para a comparação incluem:

1. Razão de Engrenagem (i)
2. Eficiência de Transmissão
3. Precisão (Folga)
4. Durabilidade e Resistência ao Desgaste
5. Complexidade de Fabricação
6. Adequação para Prototipagem em Impressão 3D
7. Tabela Comparativa

Quadro 1 - Comparações SWG, Engrenagens Planetárias e Engrenagens Cicloidal

Parâmetro	SWG (Prototipado em PLA)	Engrenagem Planetária	Engrenagem Cicloidal
Razão de Engrenagem (i)	12.5:1	3:1 a 10:1 (por estágio)	6:1 a 119:1 (em único estágio)
Eficiência de Transmissão	Alta (85%-90% estimado)	Alta (90%-95%)	Média-Alta (80%-90%)
Precisão (Folga ou Backlash)	Muito Baixa (quase nula)	Moderada (0.5-1.5°)	Muito Baixa (próxima de zero)

<b>Durabilidade e Resistência ao Desgaste</b>	Moderada (Limitações devido ao PLA)	Alta (dependendo do material e projeto)	Alta (vida útil longa com bons materiais)
<b>Complexidade de Fabricação</b>	Alta (complexidade na fabricação do flexspline e circular spline)	Média (componentes padrões)	Alta (design e fabricação complexos)
<b>Adequação para Prototipagem em Impressão 3D</b>	Alta (especialmente para PLA)	Média-Alta (simples de prototipar)	Média (prototipagem possível, mas com desafios de precisão)

Fonte: Adaptado de TIMOFEYEV et al. (2018), YU; GONG (2018), CHENG; CHEN (2022).

**Razão de Engrenagem:** O SWG projetado com uma razão de 12.5:1 oferece uma redução significativa em um único estágio, comparável às engrenagens cicloidais em termos de alta razão de redução. As engrenagens planetárias, conforme descrito por Cheng e Chen (2022), geralmente requerem múltiplos estágios para alcançar razões semelhantes, o que pode aumentar a complexidade do sistema.

**Eficiência de Transmissão:** O SWG demonstra uma eficiência de transmissão competitiva, especialmente considerando a prototipagem em PLA, que pode introduzir algumas perdas devido às propriedades do material. De acordo com Timofeyev et al. (2018), as engrenagens planetárias ainda oferecem uma eficiência ligeiramente superior devido à simplicidade de seu contato e transmissão de força. A eficiência das engrenagens cicloidais também é alta, mas pode variar mais dependendo do design e do material.

**Precisão (Folga ou Backlash):** O SWG se destaca em termos de precisão, apresentando praticamente zero folga (backlash). Essa característica é confirmada por Yu e Gong (2018) como sendo um grande diferencial em aplicações que exigem alta precisão de movimento, como em sistemas robóticos. As engrenagens planetárias, por outro lado, tendem a apresentar alguma folga, o que pode ser uma desvantagem em aplicações de precisão.

**Durabilidade e Resistência ao Desgaste:** A durabilidade do SWG prototipado em PLA é moderada, com a principal limitação sendo o material utilizado. Hofmann et al. (2016) destacam

que o PLA, embora adequado para protótipos e testes iniciais, possui uma resistência ao desgaste inferior quando comparado a materiais como aço ou ligas metálicas utilizadas em aplicações industriais. As engrenagens planetárias e cicloidais, feitas de materiais mais duráveis, oferecem uma vida útil mais longa.

**Complexidade de Fabricação:** A fabricação do SWG, especialmente o flexspline e a circular spline, apresenta uma complexidade significativa, o que pode ser um desafio, particularmente na transição de protótipos em PLA para produção em larga escala. De acordo com Timofeyev et al. (2018), as engrenagens planetárias são relativamente simples de fabricar, com componentes padrão, enquanto as engrenagens cicloidais compartilham a complexidade de fabricação do SWG devido ao seu design específico.

**Adequação para Prototipagem em Impressão 3D:** O SWG prototipado em PLA é altamente adequado para impressão 3D, permitindo a rápida fabricação e teste de modelos funcionais. Embora as engrenagens planetárias também sejam fáceis de prototipar, a complexidade do design das engrenagens cicloidais pode introduzir desafios adicionais na impressão 3D, especialmente no que diz respeito à precisão. Conforme sugerido por Hofmann et al. (2016), a adequação do SWG para prototipagem depende muito da precisão do processo de impressão e das propriedades do material utilizado.

## 3.5 Impactos Tecnológicos e Futuro das Aplicações de SWG

### 3.5.1 Avanços na Fabricação e Materiais

Os avanços recentes em materiais e processos de fabricação têm desempenhado um papel crucial na melhoria da eficiência e durabilidade do SWG. A utilização de materiais como ligas metálicas avançadas e compósitos de fibra de carbono tem permitido o desenvolvimento de *flexsplines* mais leves e resistentes. Por exemplo, o uso de ligas metálicas vítreas (bulk metallic glass) para o *flexspline*, conforme investigado por Hofmann et al. (2016), resulta em uma resistência superior à fadiga e uma maior capacidade de carga.

Além disso, processos de fabricação como o power skiving, utilizado na produção de splines circulares, oferecem uma solução eficaz para a produção em massa de SWG com alta precisão. Este processo permite a fabricação de engrenagens internas com perfis não involutos, que são essenciais para o funcionamento eficiente do SWG (YU; GONG, 2018). A precisão

obtida através desses processos de fabricação é crítica para garantir que o SWG atinja os níveis de desempenho esperados em aplicações robóticas avançadas.

### **3.6 Análise Comparativa de Tecnologias de Transmissão**

#### **3.6.1 Vantagens sobre Outras Tecnologias de Engrenagem**

O *Strain Wave Gear* se destaca em comparação com outras tecnologias de engrenagens, como engrenagens planetárias e cicloidais. De acordo com Timofeyev et al. (2018), o SWG oferece vantagens significativas, incluindo alta eficiência, ausência de folga (*backlash*), alta relação de engrenagem em um único estágio, e uma compactação superior. Estas características tornam o SWG especialmente adequado para aplicações onde a precisão e o controle são críticos, como em braços robóticos e atuadores de precisão (TIMOFEYEV et al., 2018).

A ausência de folga é particularmente importante em sistemas onde a precisão é vital. As engrenagens planetárias e cicloidais, embora eficientes, muitas vezes apresentam problemas de folga e vibração, que podem afetar a precisão e a estabilidade do sistema. O design do SWG, que utiliza uma deformação controlada do *flexspline* para manter o contato constante entre os dentes, elimina esses problemas, garantindo um movimento suave e preciso, essencial para aplicações de alta precisão (YU; GONG, 2018).

Por exemplo, na robótica, o SWG tem substituído engrenagens planetárias em braços robóticos de alta precisão, resultando em melhorias significativas no controle de movimento e na redução do peso do sistema. Esse avanço é crucial em robótica médica, onde a precisão e a compactação do design são fundamentais. Além disso, em sistemas de automação de precisão, o SWG tem substituído engrenagens cicloidais, proporcionando uma maior eficiência e eliminando a folga, o que é essencial para o desempenho estável e confiável dos atuadores de precisão (YU; GONG, 2018). Esses exemplos demonstram como o SWG supera as limitações de outras tecnologias de engrenagem, consolidando-se como uma solução superior em diversas aplicações de alta demanda.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, serão apresentados e analisados os principais resultados obtidos ao longo deste trabalho, que incluem tanto a investigação teórica quanto a prototipagem prática do *Strain Wave Gear* (SWG). O objetivo é discutir a eficácia do SWG em comparação com outras tecnologias de transmissão, destacando as vantagens e limitações identificadas. A análise é baseada em cálculos precisos realizados com o auxílio do Autodesk Inventor e na experimentação através de protótipos impressos em 3D com material PLA.

Os resultados aqui discutidos visam fornecer uma compreensão aprofundada do desempenho do SWG, abordando aspectos como eficiência de transmissão, precisão, durabilidade e complexidade de fabricação. Além disso, serão abordadas as implicações desses resultados para o desenvolvimento futuro de SWGs, considerando tanto a aplicação em ambientes industriais quanto as possibilidades de inovação em áreas emergentes.

### 4.1 Desempenho Teórico do *Strain Wave Gear* (SWG)

#### 4.1.1 Cálculo da Razão de Engrenagem

A razão de engrenagem do *Strain Wave Gear* (SWG) é um dos principais fatores que determinam sua aplicabilidade em sistemas robóticos. Segundo Yu e Gong (2018), o SWG pode atingir altas razões de redução que variam de 30:1 a 320:1, tornando-o uma escolha ideal para aplicações que requerem alta precisão e controle fino. O cálculo da razão de engrenagem é baseado na diferença do número de dentes entre o *flexspline* e o *circular spline*. O *flexspline*, sendo um componente deformável, é essencial para essa função, pois sua elasticidade permite a variação necessária na forma para que ocorra a redução da velocidade angular. A equação principal que rege essa relação é a Equação 2.

$$i = \frac{\omega_{WG}}{\omega_{FS}} = \frac{Z_{FS}}{Z_{CS} - Z_{FS}} \quad \text{Equação 2}$$

onde  $\omega_{wg}$  é a velocidade angular do gerador de onda,  $\omega_{FS}$  é a velocidade angular do *flexspline*,  $Z_{FS}$  é o número de dentes do *flexspline*, e  $Z_{CS}$  é o número de dentes do *circular spline* (YU; GONG, 2018). Este modelo matemático sublinha a capacidade do SWG de fornecer uma

redução de velocidade significativa enquanto mantém um design compacto e sem folga, características essenciais para a robótica de precisão.

#### **4.1.2 Distribuição de Tensão e Análise de Fadiga**

A análise da distribuição de tensão no *flexspline* é crucial para entender a durabilidade e o comportamento em serviço do SWG. A pesquisa conduzida por Sahoo e Maiti (2016) utilizou a modelagem de elementos finitos (FEM) para prever as tensões geradas no *flexspline* durante a operação. A inserção do gerador de onda, que deforma o *flexspline*, impõe tensões consideráveis, especialmente nas regiões de contato direto com o gerador de onda. Essas tensões podem levar a falhas por fadiga, o que é particularmente relevante para aplicações que exigem ciclos repetitivos de carga e descarga, como em robótica (SAHOO; MAITI, 2016).

A análise experimental complementa a modelagem teórica, demonstrando que o torque inicial necessário para girar o gerador de onda dentro do *flexspline* sem a montagem do circular spline é um fator determinante na eficiência do sistema. Esse torque inicial, também conhecido como perda de torque em vazio, é uma consideração importante para o projeto de sistemas de controle de movimento baseados em SWG, uma vez que influencia diretamente a resposta dinâmica e a precisão do posicionamento do sistema (SAHOO; MAITI, 2016).

#### **4.1.3 Impacto dos Materiais Utilizados**

O desempenho e a durabilidade da *Strain Wave Gear* (SWG) são significativamente influenciados pelos materiais utilizados na fabricação de seus componentes, especialmente o *flexspline*. De acordo com Hofmann et al. (2016), o uso de materiais avançados, como ligas metálicas vítreas (*bulk metallic glass*) e compósitos de fibra de carbono, tem mostrado melhorar a resistência à fadiga e a durabilidade do *flexspline*. Esses materiais oferecem uma combinação de leveza e alta resistência, essencial para manter a eficiência do SWG em aplicações que exigem alta precisão e repetibilidade.

Além disso, o processo de endurecimento superficial e tratamentos térmicos aplicados a ligas como o aço 40CrNiMoA (AISI 4340) são cruciais para alcançar a vida útil desejada do SWG. Esses materiais não apenas suportam as tensões dinâmicas impostas pelo funcionamento da SWG, mas também reduzem o desgaste nas interfaces de contato, prolongando a vida útil do sistema (HOFMANN et al., 2016). Os materiais escolhidos para o *circular spline* e o gerador

de onda também desempenham um papel crucial. Materiais que combinam rigidez com baixa densidade, como o alumínio com revestimentos endurecidos, permitem um desempenho otimizado, mantendo a deformação necessária do *flexspline* sem comprometer a precisão ou a durabilidade do sistema (YU; GONG, 2018).

Recentemente, materiais de prototipagem, como os utilizados em impressão 3D, têm ganhado destaque no desenvolvimento de protótipos de SWG. Materiais como o nylon reforçado com fibra de carbono e resinas fotossensíveis têm sido explorados devido à sua capacidade de combinar resistência mecânica com flexibilidade de design. Esses materiais permitem a fabricação rápida e precisa de componentes da SWG para testes iniciais, proporcionando uma maneira econômica e eficiente de validar conceitos de design antes da produção em larga escala. No entanto, embora esses materiais sejam adequados para protótipos e testes funcionais, eles ainda enfrentam desafios em termos de durabilidade e resistência ao desgaste quando comparados a materiais tradicionais, como ligas metálicas endurecidas. Assim, enquanto a impressão 3D oferece uma ferramenta valiosa para o desenvolvimento inicial, os materiais de prototipagem ainda precisam ser melhorados para se tornarem viáveis em aplicações finais de alta carga e longa duração (HOFMANN et al., 2016).

Quadro 2 - Comparação de Materiais Usados na *Strain Wave Gear* (SWG)

Material	Resistência à Fadiga	Peso Específico (g/cm <sup>3</sup> )	Peso Específico (g/cm <sup>3</sup> )	Adequação para Prototipagem
Ligas Metálicas Vítreas	Alta (Ciclo > 10 <sup>8</sup> )	6,0 - 6,5	R\$ 1500 - R\$ 3000	Baixa
Compósitos de Fibra de Carbono	Alta (Ciclo > 10 <sup>7</sup> )	1,6 - 2,0	R\$ 500 - R\$ 1500	Moderada
PLA (Polylactic Acid)	Baixa (Ciclo < 10 <sup>5</sup> )	1,24	R\$ 100 - R\$ 150	Alta

Fonte: Adaptado de HOFMANN et al. (2016), YU; GONG (2018), SAHOO; MAITI (2016).

A escolha dos materiais para os componentes da SWG é um fator determinante para o sucesso da aplicação em diferentes ambientes operacionais. As ligas metálicas vítreas e os compósitos de fibra de carbono oferecem alta resistência à fadiga e durabilidade, o que é essencial para manter o desempenho em sistemas de alta precisão e repetibilidade. No entanto, o custo elevado e a complexidade na fabricação limitam sua utilização em larga escala. Por

outro lado, materiais como o PLA, utilizados na prototipagem por impressão 3D, permitem uma rápida validação de conceitos, embora apresentem limitações em termos de resistência e durabilidade. Dessa forma, a escolha do material deve ser cuidadosamente considerada com base na fase de desenvolvimento e nos requisitos específicos da aplicação.

## 4.2 Memorial de Cálculo para Engrenamento da *Circular Spline* e da *Flexspline* para prototipagem

Neste memorial de cálculo, serão detalhados os cálculos para determinar os principais parâmetros de duas engrenagens: o Flexspline e o Circular Spline. As engrenagens seguem o perfil de acoplamento, onde o addendum (altura acima do círculo primitivo) é 0,8 e o dedendum (altura abaixo do círculo primitivo) é 1. Este perfil é distinto do perfil tradicional de engrenagens de transmissão, onde o addendum geralmente é 1 e o dedendum é 1,25.

### 4.2.1 Cálculo do Diâmetro Primitivo (d)

O diâmetro primitivo, Equação 3, é um dos parâmetros mais importantes de uma engrenagem, pois é a base para os demais cálculos.

$$d = z \times m \quad \text{Equação 3}$$

No qual:

$z$  é o número de dentes.

$m$  é o módulo da engrenagem, que relaciona o tamanho dos dentes com o diâmetro primitivo.

**Para o Flexspline:**

$$z_{FS} = 50$$

$$m = 1.000 \text{ mm}$$

$$d_{FS} = 50 \times 1.000 = 50.000 \text{ mm}$$

**Para o Circular Spline:**

$$z_{CS} = 54$$

$$m = 1.000 \text{ mm}$$

$$d_{CS} = 54 \times 1.000 = 54.000 \text{ mm}$$

Esses valores representam o diâmetro no qual os dentes da engrenagem se engajam perfeitamente.

#### 4.2.2 Cálculo do Diâmetro Externo ( $d_a$ )

O diâmetro externo, Equação 4, é a distância máxima entre os extremos dos dentes da engrenagem. Este diâmetro é fundamental para garantir que a engrenagem se encaixe corretamente no espaço destinado a ela.

$$d_a = d + 2 \times ha \quad \text{Equação 4}$$

No qual:

$ha$  é o addendum, que neste caso é 0,8.

**Para o Flexspline:**

$$ha = 0,8 \text{ mm}$$

$$d_{a_{FS}} = 50.000 + 2 \times 0,8 = 51.600 \text{ mm}$$

**Para o Circular Spline:**

$$ha = 0,8 \text{ mm}$$

$$d_{a_{CS}} = 54.000 + 2 \times 0,8 = 55.600 \text{ mm}$$

O diâmetro externo garante que a engrenagem atenda aos requisitos dimensionais, evitando interferências mecânicas e garantindo o funcionamento adequado.

### 4.2.3 Cálculo do Diâmetro Interno ( $df$ )

O diâmetro interno, Equação 5, também chamado de diâmetro de raiz, é a menor distância medida ao longo do círculo de raiz dos dentes. Este parâmetro é crucial para a resistência mecânica dos dentes da engrenagem.

$$df = d - 2 \times hf \quad \text{Equação 5}$$

No qual:

$hf$  é o dedendum, que neste caso é 1.

**Para o Flexspline:**

$$\begin{aligned} hf &= 1 \text{ mm} \\ df_{FS} &= 50.000 - 2 \times 1 = 48.000 \text{ mm} \end{aligned}$$

**Para o Circular Spline:**

$$\begin{aligned} hf &= 1 \text{ mm} \\ df_{CS} &= 54.000 - 2 \times 1 = 52.000 \text{ mm} \end{aligned}$$

O diâmetro interno garante que os dentes da engrenagem tenham a resistência necessária para suportar as cargas aplicadas, sem risco de falha por fadiga ou desgaste excessivo.

### 4.2.4 Cálculo do Diâmetro da Base ( $db$ )

O diâmetro da base, Equação 6, é utilizado para definir a curva evolvente, que é a forma do perfil dos dentes da engrenagem. A evolução da curva é fundamental para garantir que os dentes se engajem suavemente, sem perda de movimento ou falha mecânica.

$$db = d \times \cos(\alpha) \quad \text{Equação 6}$$

No qual:

$\alpha$  é o ângulo de pressão, que neste caso é  $30^\circ$ .

**Para o Flexspline:**

$$\alpha = 30^\circ$$

$$db_{FS} = 50.000 \times \cos(30^\circ) \approx 43.301 \text{ mm}$$

**Para o Circular Spline:**

$$\alpha = 30^\circ$$

$$db_{CS} = 54.000 \times \cos(30^\circ) \approx 46.765 \text{ mm}$$

O diâmetro da base define a geometria do dente e é fundamental para a eficiência da transmissão de movimento.

Tabela 1 - Dados Técnicos do Modelo Desenvolvido

Parâmetro	Flexspline	Circular Spline
Número de dentes (z)	50	54
Módulo (m)	1.000 mm	1.000 mm
Addendum (ha)	0.800 mm	0.800 mm
Dedendum (hf)	1.000 mm	1.000 mm
Ângulo de Pressão ( $\alpha$ )	$30^\circ$	$30^\circ$
Largura da Face (b)	20.00 mm	20.00 mm

Fonte: Autor

#### 4.2.5 Considerações Adicionais

**Addendum (ha):** 0,8 mm – representa a altura do dente acima do círculo primitivo. Esse valor foi ajustado para atender ao perfil de acoplamento específico.

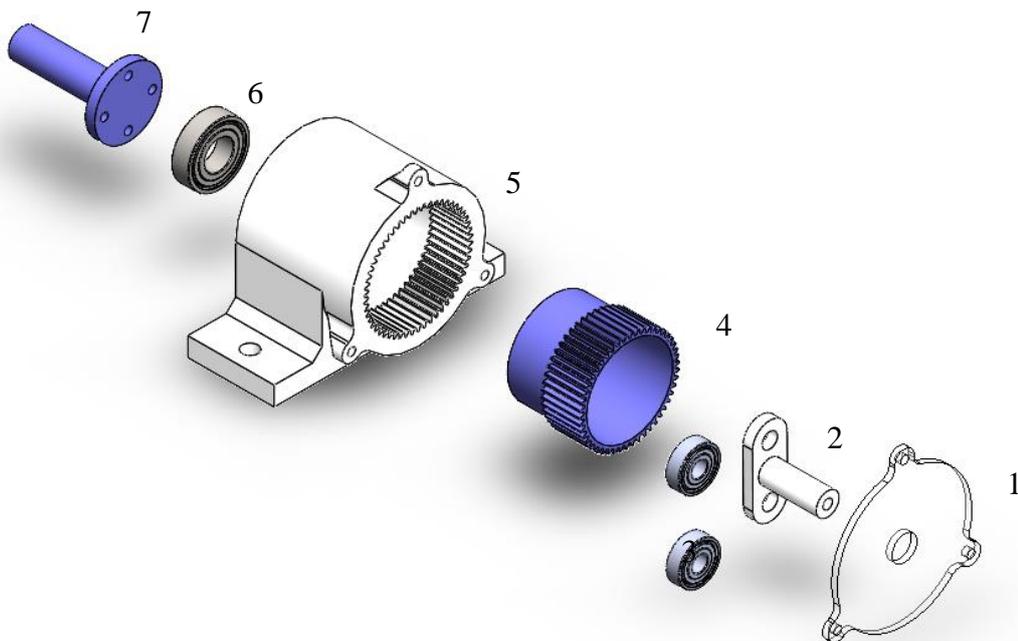
**Dedendum (hf):** 1 mm – representa a altura do dente abaixo do círculo primitivo. Este valor é utilizado para garantir a resistência mecânica adequada dos dentes.

Este memorial de cálculo detalha cada uma das etapas necessárias para determinar os principais parâmetros de uma engrenagem com perfil de acoplamento. Os valores obtidos para os diâmetros primitivo, externo, interno e da base, bem como os valores de addendum e dedendum, são essenciais para garantir que a engrenagem atenda às especificações de design e funcione de maneira eficiente e confiável.

### 4.3 Prototipagem

Na seção de prototipagem, foi abordado o desenvolvimento de componentes utilizando impressão 3D com material PLA (*Polylactic Acid*). A impressão 3D foi utilizada para a rápida produção de protótipos funcionais, oferecendo uma alternativa econômica e eficaz para testar o design e a funcionalidade dos sistemas. O material PLA foi escolhido por suas propriedades de facilidade de uso e boa qualidade superficial, o que facilitou o processo de prototipagem em sistemas de transmissão. O desenho das peças foi previamente desenvolvido no software Autodesk Inventor, garantindo a precisão necessária para a fabricação dos componentes. Em seguida, foi detalhada a lista de todas as partes e peças necessárias para a montagem do protótipo, assegurando a eficiência do sistema projetado.

Figura 9 - Vista Explodida do Protótipo Desenvolvido



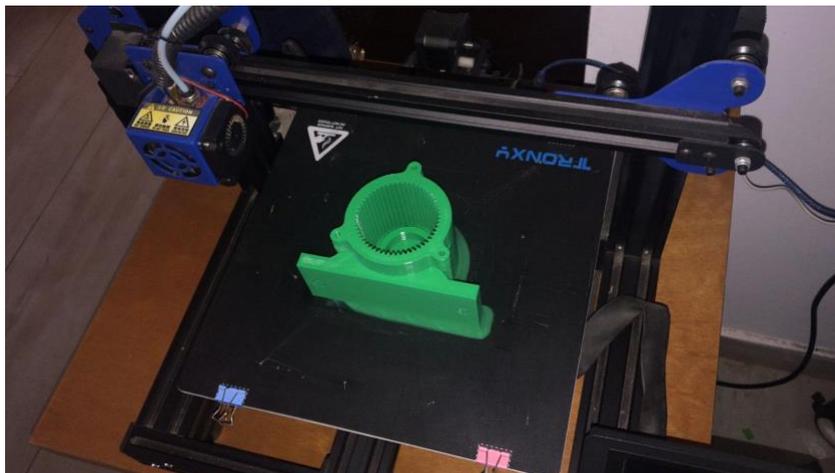
### Lista de Partes e Peças do Protótipo

1. Tampa Frontal (Acrílico)
2. Eixo de Entrada (PLA)
3. Rolamento 608ZZ (2 unidades)
4. *Flexspline* (PLA)
5. *Circular Spline* com base (PLA)
6. Rolamento 6002-2Z (1 unidade)
7. Eixo de Saída (PLA)

Essa lista representa os principais componentes utilizados no protótipo de transmissão impresso em 3D.

O protótipo desenvolvido utiliza a tecnologia de impressão 3D com material PLA para a fabricação dos componentes, garantindo um processo de prototipagem rápido e econômico, Figura 10. O uso de PLA foi estratégico, considerando sua facilidade de impressão e a capacidade de gerar superfícies lisas e precisas, necessárias para o funcionamento correto das engrenagens e do sistema mecânico.

Figura 10 - Processo de Impressão 3D



Fonte: Autor

O projeto foi modelado previamente no software Autodesk Inventor, permitindo a criação de um conjunto completo com todas as partes integradas. Cada componente foi detalhado

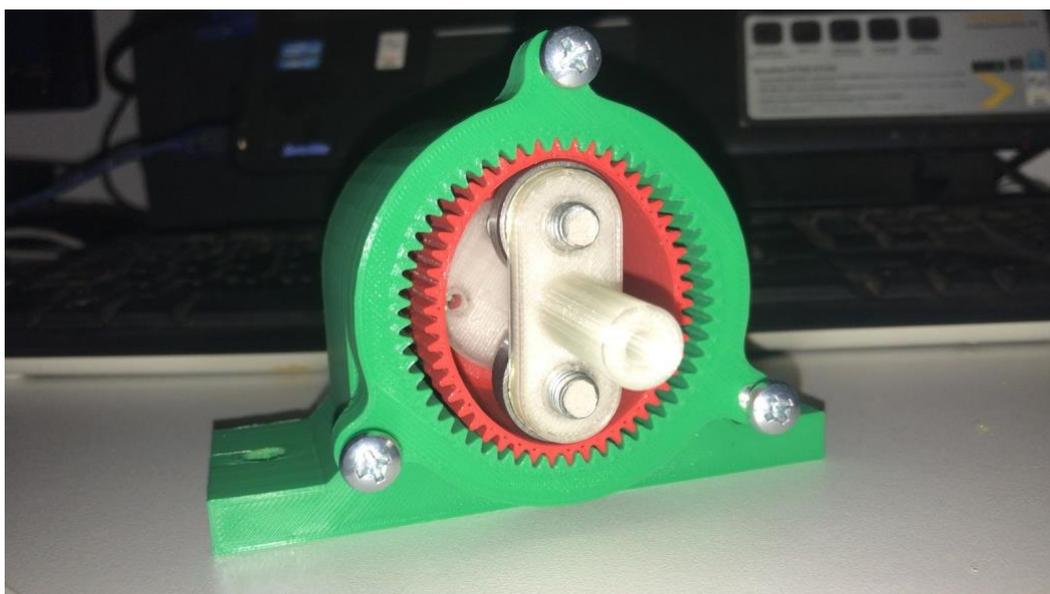
cuidadosamente para garantir que o sistema funcione sem interferências, e a simulação dos encaixes e movimentos foi realizada para evitar falhas no momento da montagem física.

As principais considerações do projeto incluíram a análise da capacidade do material PLA de suportar as forças atuantes no sistema, especialmente no *Flexspline*, que se deforma durante a operação. Embora o PLA ofereça uma boa rigidez para protótipos, ele possui limitações quando submetido a altas tensões, o que deve ser considerado em aplicações de maior demanda.

A escolha dos rolamentos visou garantir uma rotação suave e minimizar o desgaste entre as partes móveis, aumentando a vida útil do protótipo durante os testes. A utilização de suportes para o anel externo e a tampa frontal assegura que o sistema mantenha uma estrutura firme e alinhada.

A prototipagem utilizando impressão 3D em PLA, Figura 11, demonstrou ser uma abordagem eficaz para a validação inicial do design e do funcionamento do sistema *Strain Wave Gear*. Além disso, a prototipagem oferece uma grande vantagem didática, especialmente com o uso de uma tampa de acrílico, que permite a visualização direta do movimento do *Flexspline* e sua interação com o *Circular Spline*. Isso facilita o entendimento do funcionamento do sistema, tornando-o uma ferramenta valiosa em ambientes de ensino e treinamento, onde é possível observar os princípios mecânicos em tempo real.

Figura 11 - Protótipo do Modelo Didático



Fonte: Autor

No entanto, para futuras iterações, pode ser necessário utilizar materiais com maior resistência ao desgaste e à fadiga, como compósitos de fibra de carbono ou metais leves, caso o objetivo seja a aplicação em cenários reais que exijam uma durabilidade maior. O uso do Autodesk Inventor no design das peças facilitou a precisão e integração entre os componentes, assegurando uma montagem sem problemas e reduzindo o tempo de fabricação e ajuste dos componentes.

## 5 CONCLUSÕES

Este trabalho teve como principal objetivo desenvolver e avaliar um modelo didático de uma *Strain Wave Gear* (SWG), uma tecnologia de transmissão mecânica amplamente reconhecida por sua precisão e eficiência em aplicações que exigem controle rigoroso de movimento. A partir de uma extensa revisão bibliográfica e da prototipagem prática utilizando impressão 3D com PLA, foram obtidos importantes lições que, embora limitadas ao contexto acadêmico, oferecem uma visão clara dos princípios fundamentais dessa tecnologia.

A criação do modelo SWG em PLA proporcionou uma oportunidade única para que os estudantes de engenharia pudessem visualizar e compreender os conceitos teóricos relacionados à transmissão mecânica de alta precisão. Esse processo prático permitiu a introdução de conceitos complexos, como a deformação elástica controlada do *flexspline* e a interação entre os componentes principais da SWG, de uma forma acessível e tangível. Além disso, o modelo demonstrou a ausência de folga (*backlash*) entre o par de engrenagens, uma característica essencial que destaca a eficácia do SWG em manter a precisão de movimento, mesmo em condições em que outros sistemas de transmissão poderiam falhar.

Apesar das limitações inerentes ao material utilizado na prototipagem, como a durabilidade reduzida e a resistência ao desgaste inferior ao de materiais tradicionalmente usados em aplicações industriais, o uso do PLA foi estratégico para o objetivo didático do estudo. O modelo criado não só serviu como um recurso pedagógico valioso, mas também permitiu uma exploração prática e econômica dos conceitos de design e funcionamento de um SWG. Essa abordagem possibilitou um aprendizado mais profundo, onde os alunos puderam experimentar em primeira mão os desafios e as considerações envolvidas na concepção de sistemas mecânicos de alta precisão.

Dessa forma, este trabalho reforça a importância de modelos didáticos na educação em engenharia, especialmente em disciplinas que envolvem sistemas de transmissão complexos. Embora o modelo SWG prototipado não seja aplicável em contextos industriais reais, ele cumpre de maneira exemplar seu propósito educacional, proporcionando uma base sólida para que os alunos compreendam e internalizem os princípios da *Strain Wave Gear*. Futuras investigações poderiam explorar a transição desse conhecimento para aplicações práticas, utilizando materiais mais avançados e técnicas de fabricação que permitam a implementação do SWG em ambientes industriais exigentes.

Em conclusão, o estudo contribui significativamente para a formação de futuros engenheiros, fornecendo uma experiência prática e enriquecedora que complementa o

aprendizado teórico. A ausência de folga (*backlash*) observada no modelo didático reforça a relevância da SWG como uma solução eficaz em sistemas que demandam alta precisão, ao mesmo tempo em que destaca as limitações e desafios que devem ser considerados ao se planejar a transição de protótipos educacionais para produtos finais de engenharia.

## 5.1 Perspectivas Futuras

O *Strain Wave Gear* (SWG) continua a ser uma área de intensa pesquisa e desenvolvimento, especialmente à medida que as demandas por sistemas de transmissão de alta precisão e eficiência energética aumentam em setores como a robótica, a automação industrial e a medicina. As futuras direções de pesquisa incluem a otimização do design do SWG para abordar desafios como a minimização da perda de torque inicial e a melhoria da rigidez à torção. Estes são aspectos cruciais não apenas para a eficiência energética, mas também para a precisão e a longevidade dos sistemas robóticos onde o SWG é implementado (TIMOFEYEV et al., 2018).

O trabalho realizado neste TCC contribui diretamente para essas perspectivas, ao explorar a viabilidade do uso de prototipagem rápida com materiais como o PLA para o desenvolvimento inicial de SWGs. A análise detalhada dos cálculos de engrenamento e a comparação com outras tecnologias de transmissão fornecem uma base sólida para futuras melhorias no design do SWG, especialmente em termos de materiais e métodos de fabricação.

**Possibilidades de Expansão a Partir do Trabalho Realizado:** Otimização de Materiais para Prototipagem: A utilização de materiais alternativos na impressão 3D, como compósitos ou polímeros de alta resistência, pode ser explorada para aumentar a durabilidade dos protótipos de SWG, aproximando-os das propriedades dos materiais utilizados em aplicações industriais.

**Miniaturização do SWG:** Com base nos conhecimentos adquiridos durante este trabalho, futuras pesquisas podem focar na miniaturização do SWG para aplicações em robótica médica e dispositivos portáteis. A prototipagem em PLA pode ser um primeiro passo para testar designs inovadores em escala reduzida antes de investir em materiais mais caros e processos de fabricação mais complexos.

**Integração de Tecnologias Avançadas de Simulação:** A combinação do KISSsoft com outras ferramentas de simulação, como o método dos elementos finitos (FEM), pode ser utilizada para prever o comportamento do SWG sob diferentes condições de carga e vibração, permitindo ajustes finos no design que melhorem a performance do sistema.

**Estudo de Novas Geometrias para *Flexspline* e *Circular Spline*:** A exploração de novas geometrias de dentes e perfis pode levar a uma distribuição mais uniforme das tensões e, conseqüentemente, a uma vida útil mais longa dos componentes do SWG. Isso pode ser especialmente útil para reduzir o desgaste e a fadiga em aplicações de alta demanda.

**Desenvolvimento de Prototipagem Iterativa:** O ciclo de *design-test-feedback*, com a rápida iteração de protótipos impressos em 3D, pode ser utilizado para refinar continuamente os parâmetros de design do SWG. Isso é crucial para reduzir o tempo de desenvolvimento e garantir que o produto final atenda às exigências de precisão e durabilidade.

Essas iniciativas não apenas contribuirão para o avanço da tecnologia do SWG, mas também ajudarão a expandir suas aplicações em áreas emergentes, garantindo que o SWG permaneça uma escolha viável e preferida em sistemas de transmissão de alta precisão. O trabalho realizado neste TCC fornece as bases para essas futuras pesquisas e desenvolvimentos, demonstrando a importância da combinação de análises teóricas detalhadas com a experimentação prática, facilitada pela prototipagem rápida.

Dessa forma, a continuidade dos estudos nessa área promete oferecer soluções inovadoras e mais eficientes, capazes de atender às crescentes demandas do mercado tecnológico global.

## REFERÊNCIAS

- CHENG, Yun-Hao; CHEN, Yi-Cheng. Design, analysis, and optimization of a *strain wave gear* with a novel tooth profile. *Mechanism and Machine Theory*, v. 175, p. 104953, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2022.104953>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0094114X22002099>.
- HOFMANN, D. C. et al. Castable bulk metallic glass *strain wave gears*: Towards decreasing the cost of high-performance robotics. *Scientific Reports*, v. 6, p. 37773, 2016.
- MAITI, R. et al. Design and development of strain wave generating cam for a new concept 'harmonic drive'. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, v. 227, n. 8, p. 1870-1884, 2013.
- MUSSER, C. W. *Strain Wave Gear*. U.S. Patent No. 2,906,143, 1959.
- RAVIOLA, A. et al. Harmonic drive gear failures in industrial robots applications: An overview. In: *1st PHM Society European Conference*, 2021, p. 11-11.
- ROSARIO, J. M. *Automação industrial*. São Paulo: Editora Baraúna, 2012.
- SAHOO, V.; MAITI, R. State of stress in *strain wave gear flexspline* cup on insertion of drive cam - experiment and analysis. *Proceedings of the World Congress on Engineering*, 2016.
- SAHOO, V. Comparison of conventional and split-cam *strain wave gear* through initial load and stress distribution. *Australian Journal of Mechanical Engineering*, p. 1-17, 2022.
- SINGH, B.; SELLAPPAN, N.; KUMARADHAS, P. Evolution of industrial robots and their applications. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, v. 3, n. 5, p. 763-768, 2013.
- TIMOFEYEV, G. A. et al. Theory and practice of harmonic drive mechanisms. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, v. 468, p. 012010, 2018.
- YU, Z.; GONG, J. Introducing kinematic fundamentals of *strain wave gear* for robotic arm joint. *American Gear Manufacturing Association Fall Technical Meeting*, 2018.
- YU, Z. Finite element analysis of metal and nonmetal *strain wave gear*. 2023.
- DONG, H.; ZHU, Z.; ZHOU, W.; CHEN, Z. Dynamic Simulation of Harmonic Gear Drives Considering Tooth Profiles Parameters Optimization. *Journal of Computers*, v. 7, n. 6, p. 1429-1436, 2012.
- FOŁĘGA, P.; WOJNAR, G.; BURDZIK, R.; KONIECZNY, Ł. Dynamic model of a harmonic drive in a toothed gear transmission system. *Journal of Vibroengineering*, v. 16, n. 6, p. 3096-3106, 2014.



**CÓPIA DO TRABALHO Nº 150/2024 - DELMAX (11.57.05)**

**(Nº do Protocolo: NÃO PROTOCOLADO)**

**(Assinado digitalmente em 18/09/2024 13:49 )**

**HORACIO ALBERTINI NETO**

**PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**

**DELMAX (11.57.05)**

**Matrícula: ###313#7**

Visualize o documento original em <https://sig.cefetmg.br/documentos/> informando seu número: **150**, ano: **2024**, tipo: **CÓPIA DO TRABALHO**, data de emissão: **18/09/2024** e o código de verificação: **f085f431f6**