

*Revista Eletrônica*

# ***AeroDesign***

*Magazine*



**Volume 18 - Número 1 – 2026**

ISSN - 2177-5907

# Estudo do Equilíbrio de Braços Robóticos em Posições Fixas

**David Wesley Reis de Oliveira**  
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo  
[david.reis@aluno.ifsp.edu.br](mailto:david.reis@aluno.ifsp.edu.br)

**Giovana Braga Menezes**  
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo  
[giovanna.menezes@aluno.ifsp.edu.br](mailto:giovanna.menezes@aluno.ifsp.edu.br)

## Resumo

O estudo do equilíbrio em braços robóticos constitui uma área essencial dentro da engenharia mecânica e da robótica aplicada, especialmente no contexto de sistemas industriais e automatizados. Este trabalho tem como objetivo analisar o comportamento estático de braços robóticos em posições fixas, considerando forças, momentos e condições de equilíbrio mecânico. A metodologia baseia-se na aplicação dos princípios da estática, modelagem matemática e revisão bibliográfica de estudos recentes na área de robótica. Resultados indicam que a correta análise das forças e torques atuantes é fundamental para garantir estabilidade, precisão e segurança operacional. Conclui-se que o equilíbrio estático é um fator determinante no desempenho de manipuladores robóticos.

## Palavras-chave

Robótica, estática, equilíbrio, braços robóticos, torque.

## Abstract

The study of balance in robotic arms is an essential field within mechanical engineering and applied robotics, especially in industrial and automated systems. This work aims to analyze the static behavior of robotic arms in fixed positions, considering forces, moments, and mechanical equilibrium conditions. The methodology is based on statics principles, mathematical modeling, and literature review. Results indicate that proper analysis of forces and torques is crucial to ensure stability, precision, and operational safety. It is concluded that static equilibrium is a key factor in robotic manipulator performance.

## Keywords

Robotics, statics, balance, robotic arms, torque.

## 1 – Introdução

O avanço da automação industrial tem impulsionado o desenvolvimento de sistemas robóticos cada vez mais sofisticados, com destaque para os braços robóticos utilizados em tarefas repetitivas e de alta precisão. Esses sistemas são amplamente empregados em setores como manufatura, montagem e inspeção industrial (BATISTA et al., 2024).

O equilíbrio de braços robóticos em posições fixas é um aspecto crítico para garantir a eficiência e a segurança dessas operações. A análise do equilíbrio envolve o estudo das forças e momentos atuantes nas estruturas mecânicas, sendo fundamentada nos princípios da estática (HIBBELER, 2010).

Além disso, a correta modelagem do comportamento do braço robótico permite prever deformações, esforços internos e possíveis falhas estruturais. Estudos mostram que técnicas avançadas, como modelagem por elementos finitos, são frequentemente utilizadas para otimizar a rigidez e reduzir a flexibilidade indesejada em braços robóticos (BOTTEGA; CHIESA; PERGHER, 2017).

Dessa forma, este trabalho tem como objetivo principal analisar o equilíbrio estático de braços robóticos em posições fixas, abordando conceitos fundamentais da mecânica, modelagem matemática e aplicações práticas.

### 1.1. Conceitos de Estática:

A estática é o ramo da mecânica que estuda corpos em equilíbrio, ou seja, aqueles que não apresentam aceleração. Para que um corpo esteja em equilíbrio, é necessário que:

A soma das forças seja igual a zero;

A soma dos momentos seja igual a zero.

Essas condições são expressas por:

$$\sum F = 0 \quad (1)$$

$$\sum M = 0 \quad (2)$$

No contexto de braços robóticos, essas equações são fundamentais para garantir que o manipulador permaneça em uma posição fixa sem movimento (BEER; JOHNSTON, 2012).

### 1.2. – Braços Robóticos

Braços robóticos são sistemas mecânicos compostos por elos e juntas, projetados para imitar o movimento do braço humano. Eles podem possuir diferentes graus de liberdade e são controlados por atuadores, sensores e algoritmos computacionais (AGUILAR et al., 2016).

Estudos indicam que a precisão desses sistemas depende diretamente da calibração e da modelagem do comportamento mecânico, sendo possível alcançar alta exatidão com técnicas adequadas (LOPES et al., 2020). Além disso, modelos matemáticos permitem relacionar variáveis como torque, força e deslocamento, possibilitando o controle eficiente do movimento do braço robótico (SILVA; SOUZA, 2025).

### 1.3. Equilíbrio em Braços Robóticos

O equilíbrio de um braço robótico ocorre quando todas as forças e momentos que atuam sobre ele se anulam, garantindo que o sistema permaneça em repouso ou em movimento uniforme. Em posições fixas, esse equilíbrio é denominado **equilíbrio estático**, sendo caracterizado pela ausência de aceleração linear e angular.

No contexto de braços robóticos articulados, essa análise deve ser realizada individualmente em cada junta, uma vez que o sistema é composto por múltiplos elos interligados, formando uma cadeia cinemática. Dessa forma, o equilíbrio global depende diretamente do equilíbrio local em cada articulação.

Os principais fatores que influenciam esse equilíbrio são:

**Peso dos elos:** resultante da ação da gravidade, atua nos centros de massa de cada segmento.

**Distribuição de massa:** influencia diretamente a posição do centro de gravidade e, conseqüentemente, os momentos gerados.

**Torque nos atuadores:** responsável por compensar os momentos causados pelas forças externas e internas.

**Forças externas:** incluem cargas adicionais, como objetos manipulados ou interações com o ambiente

Além desses fatores, é importante considerar que a posição angular do braço robótico exerce forte influência sobre o equilíbrio, uma vez que altera o braço de alavanca das forças atuantes. Assim, uma mesma massa pode gerar diferentes valores de torque dependendo da configuração geométrica do sistema.

A análise do diagrama de corpo livre (DCL) permite visualizar essas interações de forma clara, evidenciando como as forças peso e os torques nas juntas se distribuem ao longo da estrutura. Em particular, observa-se que os atuadores localizados na base tendem a suportar maiores esforços, pois acumulam os efeitos de todos os elos subsequentes.

De acordo com Nava et al. (2016), a correta modelagem do equilíbrio em manipuladores robóticos é fundamental para o desenvolvimento de estratégias de controle eficientes, especialmente em

aplicações que exigem alta precisão e estabilidade. Pequenos erros na estimativa de forças ou torques podem resultar em desvios de posicionamento, vibrações ou até instabilidades no sistema.

Além disso, em aplicações industriais, o equilíbrio adequado contribui diretamente para:

Redução do consumo energético dos atuadores;

Aumento da vida útil dos componentes mecânicos;

Melhoria da precisão e repetibilidade dos movimentos.

Portanto, a análise do equilíbrio em braços robóticos não se limita a uma abordagem teórica, sendo um elemento essencial no projeto, dimensionamento e controle desses sistemas.

#### 1.4. Torque e Momento de Força

O torque é uma grandeza fundamental na análise de braços robóticos, sendo responsável pela rotação dos elos. Ele é definido como:

$$M = F \cdot d \quad (3)$$

Onde:

**M** = momento (torque)

**F** = força aplicada

**d** = distância do ponto de rotação

Essa relação é essencial para dimensionamento dos motores e atuadores utilizados no sistema robótico (HIBBELER, 2010; BEER; JOHNSTON, 2012).

Além disso, o controle adequado do torque é indispensável para garantir a estabilidade do sistema, principalmente em aplicações industriais de alta precisão (BOUBAKER, 2014).

## 2. Metodologia

A metodologia adotada neste trabalho baseia-se em uma abordagem teórica e analítica, utilizando conceitos fundamentais da estática e modelagem matemática para analisar o equilíbrio de braços robóticos em posições fixas.

Inicialmente, foi realizada uma **revisão bibliográfica** com base em livros clássicos de mecânica e artigos científicos recentes na área de robótica, permitindo fundamentar os conceitos de equilíbrio, torque e análise estrutural (HIBBELER, 2010; BEER; JOHNSTON, 2012).

Em seguida, foi desenvolvido um **modelo simplificado de braço robótico**, considerando:

Um sistema planar (2D);

Dois elos rígidos;

Juntas rotacionais;

Atuação por torque nos motores;

Para a análise, foram aplicadas as equações de equilíbrio estático:

$$\sum F = 0 \text{ e } \sum M = 0$$

Além disso, considerou-se o efeito da gravidade sobre cada elo, sendo o peso representado por:

$$P = m \cdot g \quad (4)$$

A modelagem foi complementada com análise de momentos em cada junta, permitindo determinar os torques necessários para manter o braço em equilíbrio (NAVA et al., 2016).

### 2.1. – Modelagem Matemática

A modelagem matemática do braço robótico é fundamental para descrever o comportamento estático do sistema e determinar os torques necessários para manter o equilíbrio em diferentes posições. Neste estudo, considera-se um manipulador planar com dois elos rígidos, conectados por juntas rotacionais. Para representar o comportamento do braço robótico, considerou-se um sistema com dois elos de comprimentos  $L_1$   $L_2$ , com massas  $m_1$  e  $m_2$ .

### 2.2. Análise do Primeiro Elo

O torque na base do braço pode ser descrito por:

$$M_1 = \left( m_1 \cdot g \cdot \frac{L_1}{2} \right) + (m_2 \cdot g \cdot L_1) \quad (5)$$

Esse torque considera:

O peso do próprio elo;

O peso do segundo elo aplicado na extremidade.

### 2.3 Análise do Segundo Elo

Para o segundo elo:

$$M_2 = m_2 \cdot g \cdot \frac{L_2}{2} \quad (6)$$

Essas equações permitem calcular os torques necessários para manter o sistema em equilíbrio estático.

## 2.4. Considerações Sobre o Centro de Massa

O centro de massa de cada elo é considerado no ponto médio, hipótese amplamente adotada em análises iniciais de engenharia mecânica e robótica (HIBBELER, 2010). Essa consideração baseia-se no fato de que, para corpos homogêneos e com distribuição uniforme de massa, o centro de massa coincide com o centro geométrico do elemento.

No contexto de braços robóticos, essa simplificação permite representar cada elo como uma barra rígida com massa concentrada em seu ponto médio, facilitando significativamente a análise das forças e momentos atuantes. Dessa forma, o peso de cada elo pode ser modelado como uma força aplicada nesse ponto, reduzindo a complexidade do cálculo dos torques nas juntas.

Matematicamente, para um elo de comprimento  $L$ , o centro de massa localiza-se em:

$$x_{cm} = \frac{L}{2} \quad (7)$$

Essa abordagem permite calcular os momentos em relação às juntas utilizando diretamente a distância entre o eixo de rotação e o centro de massa, simplificando a aplicação das equações de equilíbrio estático.

Além disso, essa hipótese é particularmente útil em modelos iniciais e estudos conceituais, pois reduz o número de variáveis envolvidas sem comprometer significativamente a precisão dos resultados. Em muitos casos práticos, especialmente em braços robóticos industriais com geometria relativamente simples, essa aproximação produz resultados suficientemente próximos da realidade.

Entretanto, é importante destacar que essa simplificação apresenta limitações. Em sistemas mais complexos, nos quais há:

- Distribuição não uniforme de massa;
- Presença de atuadores e componentes internos;
- Geometrias irregulares;
- Estruturas com múltiplos materiais.

O centro de massa pode não coincidir com o ponto médio geométrico. Nessas situações, torna-se necessário determinar o centro de massa real por meio de métodos mais precisos, como integração contínua ou modelagem computacional.

Apesar dessas limitações, a adoção do centro de massa no ponto médio permanece como uma prática consolidada em análises preliminares, sendo fundamental para o desenvolvimento de modelos matemáticos acessíveis e eficientes.

### 3.1. Representação Completa do Sistema

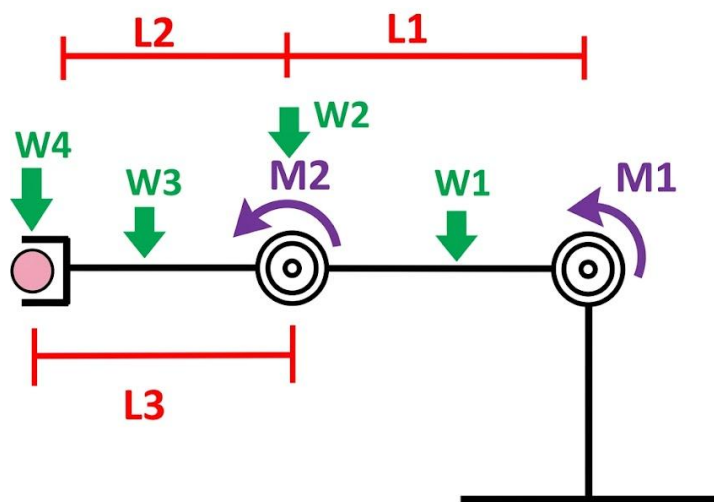


Figura 1 - Diagrama de corpo livre de um manipulador robótico articulado de dois elos.

O diagrama apresentado representa o diagrama de corpo livre (DCL) de um braço robótico composto por dois elos rígidos, conectados por juntas rotacionais, submetidos à ação de forças gravitacionais e torques aplicados nas articulações.

No modelo considerado, destacam-se os seguintes elementos estruturais:

- Dois elos horizontais ( $L_1$  e  $L_2$ );
- Uma base fixa com suporte vertical;
- Uma junta intermediária;
- Forças distribuídas ao longo da estrutura;
- Torque aplicado na base ( $M_1$ );
- Torque aplicado na junta intermediária ( $M_2$ ).

Essa representação permite analisar de forma isolada os efeitos das forças e momentos atuantes, sendo fundamental para a compreensão do comportamento estático do sistema.

#### 3.1.1 Identificação das Formas e Momentos

A partir do diagrama, identificam-se os seguintes elementos:

##### Forças Atuantes (Peso)

- W1:** peso do elo próximo à base;
- W2:** peso concentrado na junta intermediária;

**W3**: peso do elo intermediário;

**W4**: peso na extremidade livre.

Essas forças representam o efeito da gravidade e podem ser expressas por:

$$W = m \cdot g \quad (8)$$

onde  $m$  é a massa e  $g$  a aceleração da gravidade.

Além das forças, o sistema está sujeito a momentos (torques) aplicados nas articulações:

$M_1$ : torque na base, responsável por sustentar todo o sistema;

$M_2$ : torque na junta intermediária, atuando sobre os elos subsequentes.

As distâncias associadas ( $d$ ) representam os braços de alavanca das forças em relação ao ponto de rotação, sendo parâmetros fundamentais para o cálculo dos momentos.

**Momentos** (Torques)

**M1**: torque aplicado na base do braço robótico;

**M2**: torque na junta intermediária.

Esses torques são responsáveis por manter o sistema em equilíbrio, impedindo a rotação causada pelas forças peso.

**Distâncias** (Braços de Alavanca)

**L1**: comprimento do elo principal;

**L2**: comprimento total até a extremidade;

**L3**: distância parcial até o centro de massa;

Essas distâncias são fundamentais para o cálculo dos momentos.

**Equilíbrio Estático**

Para que o sistema esteja em equilíbrio, devem ser satisfeitas as condições:

$$\sum F = 0 \quad (9)$$

$$\sum M = 0 \quad (10)$$

Considerando momentos em relação à base, o torque  $M_1$  pode ser descrito como:

$$M_1 = W_1 \cdot d_1 + W_2 \cdot d_2 + W_3 \cdot d_3 + W_4 \cdot d_4 \quad (11)$$

Onde:  $d_1, d_2, d_3, d_4$  são as distâncias de cada força até a base.

### 3.1.2. Interpretação Física

A análise do diagrama permite concluir que:

O **torque na base M1** é o maior, pois sustenta todo o sistema;

O **torque M2** atua apenas sobre parte da estrutura;

O aumento da distância entre a força e o eixo de rotação resulta em maior momento aplicado.

Esse comportamento está diretamente relacionado ao conceito de momento de força, no qual o efeito rotacional é proporcional ao braço de alavanca (HIBBELER, 2010).

Adicionalmente, verifica-se que a distribuição de massa ao longo dos elos exerce influência significativa sobre os esforços exigidos, tornando o posicionamento do centro de gravidade um fator crítico na análise do equilíbrio.

### 3.2. Relação com o Projeto Real

A análise do diagrama de corpo livre constitui uma etapa essencial no projeto de braços robóticos, pois permite estimar com precisão os esforços mecânicos envolvidos.

Entre as principais aplicações dessa análise, destacam-se:

Dimensionamento adequado de motores e atuadores;

Seleção de componentes estruturais compatíveis com os esforços;

Garantia de estabilidade e segurança operacional;

Redução de falhas mecânicas e desgaste prematuro;

Além disso, a correta distribuição de massa ao longo da estrutura contribui para a otimização do desempenho do sistema, reduzindo o consumo energético e aumentando a eficiência dos atuadores. Dessa forma, o estudo do equilíbrio estático não apenas fornece suporte teórico, mas também desempenha um papel fundamental na aplicação prática de sistemas robóticos industriais.

### 3. Resultados e Discussões

A partir da modelagem proposta, observa-se que o torque necessário para manter o equilíbrio aumenta proporcionalmente com:

O comprimento dos elos;

A massa dos componentes;

A distância em relação ao eixo de rotação.

Esse comportamento pode ser explicado com base nos princípios da estática, uma vez que o momento de uma força é diretamente proporcional ao braço de alavanca. Assim, quanto maior a distância entre o ponto de aplicação da força e o eixo de rotação, maior será o torque necessário para manter o sistema em equilíbrio (BEER; JOHNSTON, 2012).

Além disso, a análise do diagrama de corpo livre evidencia que a distribuição das cargas ao longo do braço robótico influencia diretamente os esforços internos nas juntas, tornando essencial a correta modelagem das massas e suas posições.

Verificou-se também que:

O primeiro elo sofre maior esforço, pois suporta todo o sistema, incluindo o peso dos elos subsequentes e cargas aplicadas;

O segundo elo possui menor exigência de torque, pois está sujeito apenas às forças localizadas após a junta intermediária;

Pequenas variações na massa impactam significativamente o equilíbrio, principalmente quando localizadas em regiões mais afastadas da base

Esses resultados corroboram estudos na área de robótica, que destacam a importância da distribuição de massa e da localização do centro de gravidade no desempenho e na estabilidade de manipuladores robóticos (AGUILAR et al., 2016).

Outro ponto relevante identificado na análise é que a ausência de equilíbrio adequado pode comprometer significativamente o funcionamento do sistema, podendo gerar:

Vibrações indesejadas, que afetam a estabilidade estrutural;

Desgaste mecânico prematuro nas juntas e atuadores;

Perda de precisão nos movimentos, especialmente em aplicações de alta exatidão.

Além disso, em ambientes industriais, essas falhas podem resultar em redução da vida útil do equipamento e aumento dos custos de manutenção. Dessa forma, o controle adequado do torque em cada junta torna-se um fator essencial para garantir não apenas o equilíbrio estático, mas também a eficiência e a confiabilidade operacional do sistema robótico (BOUBAKER, 2014).

Por fim, destaca-se que a análise apresentada, embora simplificada, fornece uma base sólida para o entendimento do comportamento mecânico de braços robóticos, podendo ser expandida para modelos mais complexos que considerem efeitos dinâmicos, atrito e controle em tempo real.

#### **4. Aplicações Práticas**

O estudo do equilíbrio em braços robóticos possui diversas aplicações no setor industrial e tecnológico, sendo um fator determinante para garantir precisão, estabilidade e eficiência operacional. A

correta análise das forças e torques permite o dimensionamento adequado dos sistemas, evitando falhas mecânicas e melhorando o desempenho dos equipamentos. Tais como:

#### **4.1. Indústria Automobilística**

Na indústria automobilística, os braços robóticos são amplamente utilizados em processos de soldagem, pintura e montagem de componentes. Nesses sistemas, o equilíbrio estático é essencial para garantir a precisão dos movimentos e a repetibilidade das operações.

Durante o processo de soldagem, por exemplo, o manipulador deve manter sua posição de forma estável enquanto aplica força sobre a peça. Qualquer desequilíbrio pode resultar em desalinhamento, falhas na solda ou desgaste prematuro dos componentes mecânicos.

Além disso, a correta distribuição de massa e o controle dos torques nas juntas permitem reduzir vibrações, aumentando a qualidade do produto final e a vida útil do equipamento.

#### **4.2. Linhas de Produção Automatizadas**

Em linhas de produção automatizadas, os braços robóticos são responsáveis pela manipulação de peças, transporte de materiais e execução de tarefas repetitivas em alta velocidade.

Nesses sistemas, o equilíbrio é fundamental para garantir:

Estabilidade durante movimentos rápidos;

Precisão no posicionamento de componentes;

Segurança operacional.

A ausência de equilíbrio pode gerar oscilações, comprometendo a eficiência da linha de produção e aumentando o risco de falhas. Portanto, a análise estática contribui diretamente para a otimização do desempenho e da produtividade industrial.

#### **4.3. Robótica Médica**

Na robótica médica, o equilíbrio de braços robóticos assume um papel ainda mais crítico, especialmente em aplicações como cirurgias assistidas por robôs.

Nesses casos, os manipuladores devem operar com extrema precisão e estabilidade, uma vez que pequenas variações de posição podem comprometer a segurança do paciente. O controle rigoroso dos torques e forças permite movimentos suaves e precisos, reduzindo tremores e aumentando a confiabilidade do procedimento.

Além disso, o estudo do equilíbrio contribui para o desenvolvimento de sistemas mais seguros, capazes de manter posições estáveis mesmo em situações de carga variável.

#### 4.4. Impressão 3D e CNC

Na impressão 3D e em máquinas de controle numérico computadorizado (CNC), os braços robóticos e sistemas de movimentação são utilizados para posicionar ferramentas ou extrusores com alta precisão.

O equilíbrio estático é fundamental para garantir:

Precisão dimensional das peças fabricadas;

Estabilidade durante a movimentação;

Qualidade superficial dos produtos.

Em sistemas CNC, por exemplo, a falta de equilíbrio pode causar vibrações que resultam em erros de usinagem. Já na impressão 3D, pode comprometer a deposição correta do material, afetando a integridade da peça.

Assim, o estudo do equilíbrio permite otimizar o controle de movimento e melhorar a qualidade dos processos de fabricação.

De forma geral, essas aplicações demonstram a relevância do estudo do equilíbrio estático para diferentes áreas da engenharia, evidenciando sua importância no desenvolvimento de sistemas robóticos eficientes, seguros e de alto desempenho (LOPES et al., 2020).

#### 5. Análise de Sensibilidade dos Parâmetros do Sistema

A análise de sensibilidade é uma ferramenta fundamental na engenharia, utilizada para avaliar como variações nos parâmetros de entrada influenciam o comportamento de um sistema. No caso de braços robóticos em equilíbrio estático, essa análise permite identificar quais variáveis exercem maior impacto sobre os torques exigidos nas juntas (HIBBELER, 2010).

A partir dessas variáveis, pode-se inferir que o torque apresenta comportamento proporcional em relação à massa e ao comprimento, conforme:

$$M \propto m \text{ e } M \propto L \quad (12)$$

Esse comportamento está diretamente relacionado ao conceito de momento de força, amplamente discutido na literatura de estática (BEER; JOHNSTON, 2012).

Entretanto, quando se consideram os efeitos angulares, o comportamento do sistema torna-se não linear, especialmente devido à presença de funções trigonométricas no equacionamento:

$$M \propto \cos \theta \quad (13)$$

De acordo com Siciliano et al. (2010), sistemas robóticos apresentam forte dependência da configuração geométrica, o que torna a análise angular essencial para o correto dimensionamento dos atuadores.

Além disso, a análise de sensibilidade permite identificar condições críticas de operação, nas quais pequenas variações nos parâmetros podem provocar grandes mudanças no comportamento do sistema. Esse tipo de análise é amplamente utilizado em projetos de engenharia para aumentar a robustez e confiabilidade dos sistemas mecânicos (NAVA et al., 2016).

Do ponto de vista de projeto, essa análise contribui para:

Otimização da distribuição de massa ao longo dos elos;

Redução de esforços nos atuadores;

Melhoria da eficiência estrutural;

Aumento da segurança operacional.

Outro aspecto relevante é a influência do centro de massa dos elos. Quando o centro de massa está localizado mais distante da junta de rotação, o torque necessário aumenta significativamente, reforçando a importância de um projeto geométrico bem planejado.

Portanto, a análise de sensibilidade não apenas auxilia na compreensão do comportamento do sistema, mas também orienta decisões de engenharia, contribuindo para o desenvolvimento de braços robóticos mais eficientes e robustos.

## 6. Considerações Sobre Eficiência Energética e Desempenho

A eficiência energética é um fator crucial no projeto e operação de sistemas robóticos, especialmente em aplicações industriais onde o consumo de energia impacta diretamente os custos operacionais e a sustentabilidade do sistema.

Em braços robóticos, o torque exigido pelos atuadores está diretamente relacionado ao consumo de energia. Mesmo em condições de equilíbrio estático, os motores precisam fornecer torque contínuo para sustentar o sistema, o que resulta em consumo energético constante.

A potência mecânica associada ao sistema pode ser expressa por:

$$P = M \cdot \omega \quad (14)$$

onde:

**P** é a potência;

**M** é o torque;

**$\omega$**  é a velocidade angular.

Embora em regime estático a velocidade angular seja nula, na prática, os sistemas robóticos apresentam microajustes e correções contínuas, o que implica consumo energético residual (SICILIANO et al., 2010).

Além disso, em sistemas reais, devem ser considerados fatores adicionais como:

- Perdas por atrito nas juntas;
- Ineficiência dos motores elétricos;
- Dissipação térmica;
- Resistência estrutural dos materiais.

Esses fatores contribuem para aumentar a demanda energética total do sistema, tornando essencial a adoção de estratégias para otimização do desempenho.

Dentre as principais estratégias utilizadas na engenharia robótica, destacam-se:

- Uso de contrapesos:** reduz o torque necessário nos atuadores;
- Compensação gravitacional:** utilização de molas ou mecanismos auxiliares;
- Redução de massa:** emprego de materiais leves e resistentes;
- Projeto otimizado:** minimização de braços de alavanca excessivos;

Outra abordagem importante é o uso de algoritmos de controle que otimizam a trajetória do braço robótico, evitando posições que exijam esforços elevados.

Do ponto de vista térmico, a redução do torque também contribui para:

- Menor aquecimento dos motores;
- Maior vida útil dos componentes;
- Redução da necessidade de manutenção.

Além disso, sistemas energeticamente eficientes apresentam melhor desempenho global, incluindo:

- Maior precisão de posicionamento;
- Menor tempo de resposta;
- Maior confiabilidade operacional.

Em aplicações industriais modernas, a eficiência energética tornou-se um critério essencial de projeto, estando diretamente associada à produtividade e sustentabilidade.

Portanto, a integração entre análise estática e otimização energética é fundamental para o desenvolvimento de braços robóticos de alto desempenho, capazes de operar com eficiência, segurança e confiabilidade.

## 7. Conclusões

O presente trabalho teve como objetivo analisar o equilíbrio estático de braços robóticos em posições fixas, com base nos princípios fundamentais da estática aplicada à engenharia mecânica. A partir da modelagem proposta, foi possível compreender a influência das forças gravitacionais, dos momentos aplicados e da geometria do sistema no comportamento estrutural do manipulador.

Os resultados obtidos demonstraram que o torque necessário para manter o equilíbrio está diretamente relacionado à massa dos elos, ao comprimento das estruturas e à distância em relação ao eixo de rotação. Além disso, verificou-se que o primeiro elo do sistema é o mais solicitado mecanicamente, uma vez que suporta todo o conjunto, enquanto os elos subsequentes apresentam menor exigência de torque.

Outro aspecto relevante identificado foi a influência significativa da posição angular no comportamento do sistema. A dependência de funções trigonométricas no equacionamento evidencia o caráter não linear do problema, indicando que determinadas configurações geométricas podem aumentar consideravelmente os esforços exigidos pelos atuadores.

A análise de sensibilidade permitiu destacar a importância da distribuição de massa e do posicionamento do centro de gravidade, fatores essenciais para a otimização do desempenho estrutural e energético do sistema.

Pequenas variações nesses parâmetros podem gerar impactos relevantes no torque necessário, reforçando a necessidade de um projeto criterioso.

Além disso, a avaliação da eficiência energética evidenciou que a redução dos esforços mecânicos contribui diretamente para a diminuição do consumo de energia, aumento da vida útil dos componentes e melhoria da confiabilidade operacional.

Estratégias como uso de contrapesos, redução de massa e otimização geométrica mostram-se fundamentais para o desenvolvimento de sistemas mais eficientes.

Do ponto de vista prático, este estudo fornece subsídios importantes para o dimensionamento de atuadores, seleção de materiais e desenvolvimento de braços robóticos aplicados à indústria, robótica médica e sistemas automatizados. A integração entre análise estática e desempenho energético representa um diferencial significativo no projeto de manipuladores modernos.

Por fim, destaca-se que o presente trabalho pode ser expandido para análises dinâmicas, considerando efeitos como aceleração, inércia e controle de movimento, abrindo caminho para estudos mais avançados na área de robótica e automação.

## 8 - Referências Bibliográficas

**HIBBELER, R. C.** Estática: mecânica para engenharia. 12. ed. São Paulo: Pearson, 2010. Disponível em: <https://livrariapublica.com.br/livros/estatica-mecanica-para-engenharia-r-c-hibbeler/>

Acesso em: 22 mar. 2026.

**BEER, F. P.; JOHNSTON JR., E. R.; MAZUREK, D. F.** Mecânica vetorial para engenheiros: estática. 9. ed. Rio de Janeiro: McGraw-Hill, 2012. Disponível em:

<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/223043/2020.2.FQM7537.MecanicadosMateriai.s.05655.pdf> Acesso em: 22 mar. 2026.

**BATISTA, K. L. et al.** Automação industrial com braços robóticos. UNIC, 2024. Disponível em:

<https://periodicos.unifev.edu.br/index.php/unic/article/view/1866> Acesso em: 22 mar. 2026.

**BOTTEGA, V.; CHIESA, D.; PERGHER, R.** Otimização topológica aplicada a braços robóticos. SBMAC, 2017. Disponível em:

<https://proceedings.sbmac.org.br/sbmac/article/view/1702> Acesso em: 22 mar. 2026.

**LOPES, D. C. et al.** Sistema de autocalibração adaptativa de braços robóticos. CBA, 2020. Disponível em: [https://www.sba.org.br/open\\_journal\\_systems/index.php/cba/article/view/1581](https://www.sba.org.br/open_journal_systems/index.php/cba/article/view/1581) Acesso em: 22 mar. 2026.

**SILVA, S. A.; SOUZA, J. B.** Aplicação de regressão no controle de braços robóticos. Revista Sociedade Científica, 2025. Disponível em:

<https://journal.scientificsociety.net/index.php/sobre/article/view/902>

Acesso em: 22 mar. 2026.

**AGUILAR, J. et al.** A review on locomotion robophysics. 2016. Disponível em:

<https://arxiv.org/abs/1602.04712> Acesso em: 22 mar. 2026.

**NAVA, G. et al.** Stability analysis for humanoid robots. 2016. Disponível em:

<https://arxiv.org/abs/1603.04178> Acesso em: 22 mar. 2026.

**BOUBAKER, O.** The inverted pendulum. 2014. Disponível em:

<https://arxiv.org/abs/1405.3094> Acesso em: 22 mar. 2026.