



**Universidade de São Paulo**  
**Escola de Engenharia de São Carlos**



---

# GC de Motores **RMC**

---

2021

---



**GRUPO**  
**SEMEIAR**

1. Dados iniciais 2
2. Idealização e descrição 3
  - 2.1. Objetivo
  - 2.2. Explicação do projeto
  - 2.3. Planejamento da realização
3. Características
  - 3.1. Tipos
  - 3.2. Tensão
  - 3.3. Corrente
  - 3.4. Velocidade X Torque = Redução
  - 3.5. Mecânica
  - 3.6. Controle do Motor
  - 3.7. Viabilidade da Bateria
4. Locomoção 8
  - 4.1. Cálculo da dinâmica
  - 4.2. Dimensões elétricas
  - 4.3. Utilizando a planilha
5. Arma
  - 5.1. Cálculo da dinâmica
  - 5.2. Dimensões elétricas
  - 5.3. Utilizando a planilha



# 1. DADOS INICIAIS

**Nome do Projeto**

**Gc motores**

**Núcleo**

**RMC**

**Ano de Início**

**2021**

**Duração**

**2 meses**

**Participantes**

**Felippe Ferreira (Batida) – Mk 018**

**Resultado**

**Ta foda**

(Caso o projeto tenha dado certo, coloque uma foto dele aqui)

## 2. IDEALIZAÇÃO E EXPLICAÇÃO

### 2.1 Objetivo

O principal desafio do dimensionamento dos motores é a união das áreas elétrica e mecânica. Primeiramente é possível levantar os requisitos mecânicos por meio de cálculos dinâmicos descritos posteriormente. Em seguida a elétrica entra escolhendo o motor mais eficiente que cumpre os requisitos e não superdimensiona o equipamento. Tudo isso alinhado com as escolhas de demais componentes que dependem diretamente do atuador.

### 2.2 Explicação do projeto

Sabendo os conceitos básicos dos motores e com a ajuda das planilhas é fácil comparar diversos motores simultaneamente, porém é necessário entender o que acontece por trás do processo para não ocorrer nenhum imprevisto.

### 2.3 Considerações

Essa GC não foca no funcionamento dos motores, mas sim na escolha deles em projetos específicos do núcleo de Robótica Móvel Controlada

## 3. Características

### 3.1 Tipos

Os principais tipos de motores são o brushless, o escovado, de passo e o servo, porém só iremos abordar aqui o escovado e o brushless.

- **Escovado DC:** este motor é um dos mais comuns, possui uma bucha interna que representa a maior parte das suas características: têm uma menor durabilidade, uma velocidade média, uma baixa eficiência e uma facilidade no controle.
- **Brushless:** por não possuir a escova que faz o controle interno dos eletroímãs, ele necessita de um sistema de controle (ESC) bem mais complexo, sendo também por este motivo trifásico. Como característica: bem mais eficiente e durável, preço bem mais elevado, tem um rpm altíssimo, mas precisa de uma redução bem “forte” para ter o torque alto, melhor que o escovado comparado às mesmas velocidades. Além disso, os brushless podem ser definidos em **inrunners** ou outrunners, dependendo da construção. Em suma, os inrunner rotacionam o eixo e os **outrunners** rotacionam a carcaça inteira.



## 3. Características

### 3.2 Tensão

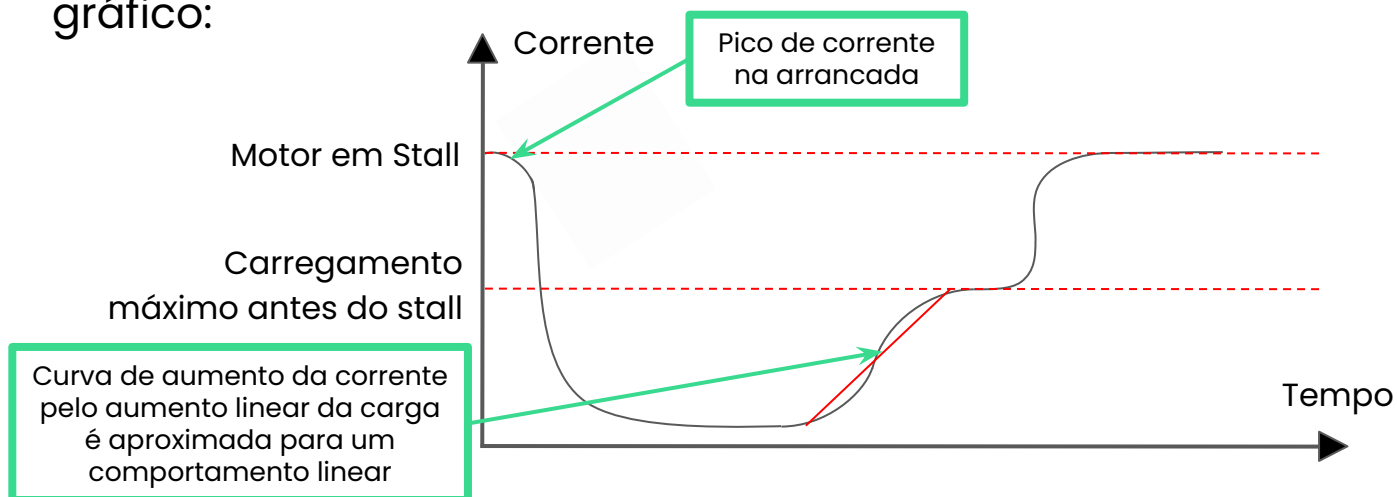
Os motores são construídos para atuar geralmente em uma escala de tensão, preservando sua eficiência e durabilidade. Se for alimentado com tensão extra, ele pode funcionar com mais potência, mas sua vida útil irá cair significativamente.

### 3.3 Corrente

A corrente está diretamente relacionada com o torque empregado no motor, sendo as principais:

- Corrente sem carga: corrente mínima requerida para o motor se mover e acelerar
- Corrente máxima contínua: corrente com a carga máxima antes do eixo não conseguir mais rodar
- Corrente de stall: pico de corrente com o torque máximo do motor e o eixo travado

Da corrente sem carga até a corrente máxima contínua, é possível considerar um comportamento linear. Já da corrente máxima contínua para a de stall, acontece um salto, como mostrado no gráfico:







## 3. Características

### 3.4 Velocidade x Torque = Redução

Um conceito importante nos motores é o uso da redução, ela diminui a velocidade e de forma inversamente proporcional aumenta o torque, logo, motores brushless que possuem um torque menor mas uma rotação altíssima, chegam a ter bem mais torque comparado aos escovados.

Porém, essas reduções começam a ficar muito complexas a velocidades muito altas, sendo necessário a integração da mecânica para analisar a viabilidade para o emprego delas.

### 3.5 Mecânica

Para a mecânica, alguns pontos devem ser observados atentamente:

- Se o diâmetro do eixo do motor é compatível com a entrada da redução, e qual tipo de acoplamento será feito
- Se o tamanho do conjunto (motor + redução) está de acordo com o espaço disponível
- Se o peso do motor + redução + bateria + circuito de controle/potência estão dentro da margem
- Qual o torque requerido para a locomoção (contas detalhadas nos próximos capítulos)
- Se o torque do atuador está dentro do limite do torque de entrada da redução
- Como todo o conjunto será fixado na carenagem (há diferenças significativas se o motor for inrunner ou outrunner)

## 3. Características

### 3.6 Controle do motor

Para controle de motores escovados é utilizado a ponte H (mais barata, esquenta menos e é possível ser construída sem muitos problemas). Já para o controle dos brushless, utilizamos as ESC's (são caras, complexas e por isso não compensa construir uma do zero)

Ambas recebem um sinal PWM, porém a ponte h por conta própria não interpreta o canal de rádio e precisa de um circuito de controle separado. A ESC, além de ser a potência do circuito, ela também possui o controle junto, facilitando o todo.

### 3.7 Viabilidade da bateria

Há uma GC sobre baterias([linkar](#)), mas resumindo os pontos:

- Tensão (número de células)
- Carga (unidade e mAh)
- Taxa de descarga (calculado pela constante de descarga)

Esse tópicos são aqueles que o motor e todos os outros componentes somados requisitam, porém não se pode esquecer das dimensões da bateria e do seu peso.

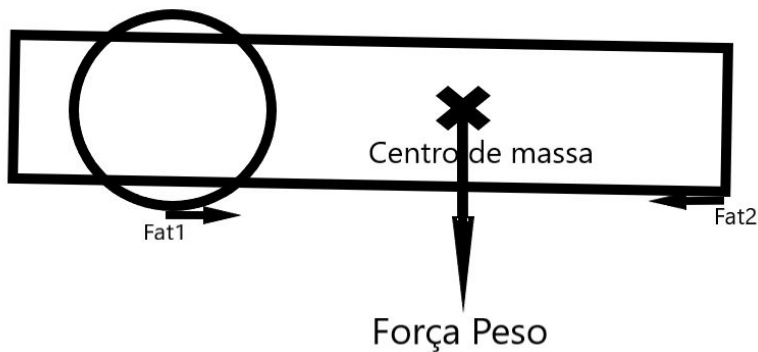


# 4. Locomoção



## 4.1 Cálculo da dinâmica

### Torque de partida mínimo:



Variáveis:

$a \Rightarrow$  aceleração

$m \Rightarrow$  massa do robô

$F_r \Rightarrow$  força resultante

$Fat_1 \Rightarrow$  força de atrito na roda

$Fat_2 \Rightarrow$  força de atrito no apoio frontal

$P \Rightarrow$  força peso

$P_{roda} \Rightarrow$  componente da força peso na roda

$P_{apoio} \Rightarrow$  componente da força peso no apoio frontal

$d_{cm-apoio} \Rightarrow$  distância do centro de massa para o apoio frontal

$d_{cm-roda} \Rightarrow$  distância do centro de massa para a roda

$\mu_1 \Rightarrow$  coeficiente de atrito entre a roda e a arena

$\mu_2 \Rightarrow$  coeficiente de atrito entre o apoio frontal e a arena

$\alpha \Rightarrow$  aceleração angular

$R \Rightarrow$  raio da roda

$I \Rightarrow$  momento de inércia da roda

$T \Rightarrow$  torque de partida

2ª Lei de Newton:

$$F_r = m * a$$

$$Fat_1 - Fat_2 = m * a$$

Cálculo da componente da força peso na roda e no apoio frontal:

$$P_{roda} = P * \left( \frac{d_{cm-apoio}}{d_{cm-roda} - d_{cm-apoio}} \right)$$

$$P_{apoio} = P * \left( \frac{d_{cm-roda}}{d_{cm-roda} - d_{cm-apoio}} \right)$$

Força de atrito:

$$Fat_1 = \mu_1 * P_{roda}$$

$$Fat_2 = \mu_2 * P_{apoio}$$

Aceleração:

$$a = \frac{Fat_1 - Fat_2}{m}$$

Aceleração angular:

$$\alpha = \frac{a}{R}$$

Torque:

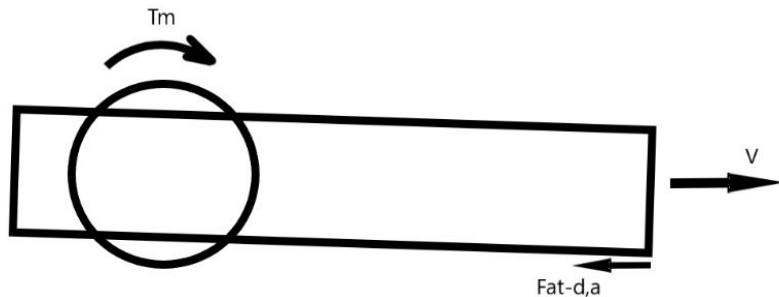
$$T = I * \alpha$$

# 4. Locomoção



## 4.1 Cálculo da dinâmica

### Tempo de arranque:



Saber um pouco sobre trabalho virtual e equação de Lagrange

Energia no sistema:

$$E_c = \frac{m \cdot v^2}{2} + I \cdot \omega^2 = \frac{(m \cdot R^2 + 2 \cdot I) \cdot \omega^2}{2}$$

Trabalho no Sistema:

$$\begin{aligned} \delta L &= (T - Fat_{d,r} \cdot R) \cdot \delta \theta + (Fat_{d,r} - Fat_{d,a}) \cdot \delta x \\ \delta L &= (T - Fat_{d,r} \cdot R) \cdot \delta \theta + (Fat_{d,r} - Fat_{d,a}) \cdot R \cdot \delta \theta \\ \delta L &= (T - Fat_{d,a} \cdot R) \cdot \delta \theta \end{aligned}$$

Equação de Lagrange:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial E_c}{\partial \omega} \right) - \left( \frac{\partial L}{\partial \theta} \right) = 0$$

$$(m \cdot R^2 + 2 \cdot I) \cdot \alpha = T - Fat_{d,a} \cdot R$$

$$T_{res} = Fat_{d,a} \cdot R$$

$$I_{eq} = m \cdot R^2 + 2 \cdot I$$

Usando:

$$\int_0^{t(\omega)} dt = I \int_0^\omega \frac{d\omega}{\tau(\omega)},$$

$$\tau(\omega) = -\frac{T_{stall}}{\omega_{max}} \omega + T_{stall}.$$

Temos:

$$\int_0^{t(\omega)} dt = I_{eq} \cdot \int_0^\omega \frac{1}{T - T_{res}} \cdot d\omega$$

Assim, chegamos a:

(A resolução da integral fica a cargo do leitor)

$$\Delta t = \frac{I_{eq} \cdot \omega_{max}}{T_{stall}} \cdot \ln \left( \frac{\left(1 - \frac{T_{res}}{T_{stall}}\right) \cdot \omega_{max}}{-\omega + \left(1 - \frac{T_{res}}{T_{stall}}\right) \cdot \omega_{max}} \right)$$

$g \Rightarrow$  Aceleração da gravidade

$d_{cm-apoio} \Rightarrow$  Distância do centro de massa ao apoio frontal

$d_{cm-roda} \Rightarrow$  Distância do centro de massa à roda

$E_c \Rightarrow$  Energia cinética

$m \Rightarrow$  Massa do robô

$v \Rightarrow$  Velocidade do robô

$I \Rightarrow$  Momento de inércia da roda

$\omega \Rightarrow$  Velocidade angular da roda

$R \Rightarrow$  Raio da roda

$L \Rightarrow$  Trabalho

$T_m \Rightarrow$  Torque do motor

$Fat_{d,r} \Rightarrow$  Força de atrito dinâmico na roda

$Fat_{d,a} \Rightarrow$  Força de atrito dinâmico no apoio frontal

$\mu_{d,a} \Rightarrow$  Coeficiente de atrito dinâmico no apoio frontal

$\alpha \Rightarrow$  Aceleração angular da roda

$T_{res} \Rightarrow$  Torque de resistência

$I_{eq} \Rightarrow$  Momento de inércia equivalente

$T_{stall} \Rightarrow$  Torque de partida do motor

$\omega_{max} \Rightarrow$  Velocidade angular do motor sem carga

$\Delta t \Rightarrow$  Tempo de aceleração do robô

$x \Rightarrow$  sem significado

$x_{max} \Rightarrow$  sem significado

$$\Delta t = \frac{I_{eq} \cdot \omega_{max}}{T_{stall}} \cdot \ln \left( \frac{x_{max}}{x_{max} - x} \right)$$

$$x = \frac{\omega}{\omega_{max}}$$

$$x_{max} = 1 - \frac{T_{res}}{T_{stall}}$$

$$T_{res} = \frac{\mu_{d,a} \cdot m \cdot g \cdot R \cdot d_{cm-roda}}{d_{cm-roda} + d_{cm-apoio}}$$

$$I_{eq} = m \cdot R^2 + 2 \cdot I$$



## 4. Locomoção

### 4.1 Cálculo da dinâmica

#### Velocidade escalar e angular:

A velocidade do robô pode ser estimada simplesmente assistindo a alguns rounds da categoria. Cronometrando o tempo mais ou menos que o robô percorre a pista e sabendo (pelo edital) as dimensões da arena é fácil calcular a velocidade escalar.

Agora para a velocidade angular também chega a ser trivial, com a dimensão da roda e a velocidade escalar é possível chegar no RPM de saída da redução.

#### Concluindo seção:

Com os cálculos do torque mínimo requerido, tempo de arrancada e velocidade angular, tem-se todos os dados necessário para escolher os motores da visão dinâmica. Faltando somente comparar quais motores são mais eficientes em relação a preço, tamanho, peso e bateria necessária.

### 4.2 Dimensões elétricas

Um dos primeiros pontos da visão elétrica é saber em qual **estado** aquele motor estará na maior parte do tempo.

No caso da locomoção do combate, o motor no máximo será estressado até o torque máximo contínuo, ocasionalmente podendo entrar em stall, requerendo que o circuito aguente picos de corrente, mas não sendo requisito uma magnitude de corrente de stall constante.

Porém, no caso dos sumos, os motores atuam geralmente em stall, fazendo necessário uma preparação do circuito e da bateria bem mais robusta.

Sabendo do **estado**, é mais fácil utilizar a planilha de comparação de motores, pois é possível fazer a divisão entre torque e corrente contínuas e de stall.

Último ponto é utilizar referências, pesquise em fóruns, sites das outras equipes, instagram, facebook... enfim, tenha alguma referência para uma boa base se aquele motor está próximo de algo que alguém já construiu e sabe que funciona, na próxima seção será abordado o uso da planilha e é de extrema importância essa comparação prévia, não jogue fora informações que estão na net, mas cuidado com a data de postagem, muitos motores já estão defasados.

## 4. Locomoção

### 4.3 Utilização da Planilha

A parte mais complicada no uso da planilha está no passo anterior a ela: adquirir as informações dos motores, já que a maior parte dos atuadores não tem datasheet e as informações que são encontradas na internet não são muito precisas, tanto em relação a valores quanto ao que ela se refere, mas há soluções para isso. Os tópicos da planilha serão descritos agora com a explicação e algum macete sobre:

- Resistência motor (ohm): informação que geralmente não aparece e não afeta tanto a escolha do motor, em um sistema simplificado tal dado pode ser ignorado
- Tensão (V): fácil de ser obtida, geralmente fornecida em número de células (S)
- kv (rpm/V): a constante de velocidade do atuador, relaciona tensão com rpm em uma equação simples de primeiro grau, também é fornecida na maior parte dos casos
- kt (N.m/A): a constante de torque relaciona o torque com a corrente consumida, ela não é fornecida mas pode ser calculado facilmente (admitindo eficiência máxima)
- Corrente sem carregamento (A): não é utilizada nos nossos casos e geralmente não é fornecida
- Máxima corrente contínua (A): corrente que geralmente é fornecida, não confundir com a de stall. Para verificar se o valor está minimamente correto, divida a potência máxima de pico pela tensão para achar a corrente de stall, esta deve ser bem maior que a contínua máxima
- Corrente de stall (A): como citado anteriormente, geralmente é calculada pela potência máxima de pico
- Potência Máxima Contínua (W): se não fornecida, utilizar a corrente máxima contínua para calculá-la
- Potência Máxima de Pico (W): similar à contínua máxima, utilizar a corrente de stall para calcular caso necessário, mas geralmente ela que é fornecida
- Eficiência: sinceramente só é fornecida em motores especializados e com datasheets detalhados, pode ser ignorado ou também pode ser calculado pela resistência do motor
- ESC recomendada (A): muitas vezes há uma indicação de ESC, mas os parâmetros dela são facilmente encontrados no próprio motor (corrente de stall e máxima contínua)
- Rotação máxima (rpm): calculado pelo Kv e também pode ser fornecida. Só se atentar-se que esta rotação leva um tempo de arrancada para ser atingida, e conforme o atuador for carregado, esta rotação máxima diminui ligeiramente
- Torque contínuo (N.m): difícil de ser fornecido e é calculado pela potência máxima contínua e pela rotação máxima
- Torque de stall (N.m): também não é fornecido e pode ser calculado de forma similar.

## 4. Locomoção

### 4.3 Utilização da planilha

Com os dados necessários preenchidos, é só ajustar a redução para o RPM máximo ser igual ao desejado e então é possível começar as comparações. Lembre-se de não deixar os parâmetros da mecânica de lado, nem a bateria necessária, nem o controlador, a escolha do motor define muitos pontos do projeto.

	Links
	Especificação\Motor\Redução
	Preço*
Mecânica	Peso (g)*
	Diâmetro (mm)*
	Comprimento (mm)*
	Diâmetro do eixo (mm)*
	Comprimento do eixo (mm)*
Elétrica	Resistência motor (ohm)
	Tensão (V)
	Kv (rpm/V)
	Kt (N.m/A)
	No Load current (A)
	Max Continuous Current (A)
	Stall current (A)
	Potência Máxima Contínua (W)
	Potência Máxima de pico (W)
	Eficiência
Prática	ESC recomendada (A)
	Rotação Máxima (rpm)
	Torque contínuo (N.m)
	Torque de pico (N.m)

#### Revisando:

- Saiba o estado que o motor será utilizado para não perder tempo com dados desnecessários (Stall vs máximo contínuo)
- Lembre-se que a maior parte desses dados não será fornecida, porém pode ser estimada por meio de cálculos
- Ajuste o RPM desejado pela redução de cada motor para os valores de torque serem comparáveis
- O torque no caso da locomoção deve estar acima do calculado como mínimo na página "Requisitos Mínimos Motores Locomoção"
- Leve em consideração preço, dimensões, bateria requisitada e controlador
- E por último, lembre-se que esses parâmetros são ideais, na prática há perdas e falsas informações fornecidas pelos distribuidores (pesquise em fóruns a confiabilidade antes)



## 5. Arma

### 5.1 Cálculo da dinâmica

Aqui os principais pontos do atuador da arma são o tempo de arranque e a energia potencial armazenada no movimento de rotação do sistema, que está diretamente ligado ao RPM máximo desenvolvido. Logo, ao fazer um sistema de redução, aumentando o torque (diminuindo o tempo de arranque), a velocidade máxima cai proporcionalmente, consequentemente a energia cinética armazenada também. Sabendo disso, foi necessário achar um método de comparar os motores nos dois parâmetros citados:

- **Torque:** menor tempo de arranque para determinada porcentagem da velocidade máxima, pois o comportamento da aceleração (velocidade x tempo) é similar a de um capacitor sendo carregado, isto é, somente no infinito o motor terá a velocidade máxima.

Para o cálculo, considere a equação

$$\tau(\omega) = I \frac{d\omega}{dt},$$

onde  $\tau$  é uma função de  $\omega$  e  $I$  é o momento de inércia da arma. Desse modo, temos

$$\int_0^{t(\omega)} dt = I \int_0^{\omega} \frac{d\omega}{\tau(\omega)},$$

sendo  $t(\omega)$  o tempo para acelerar a arma até a velocidade  $\omega$ . Considerando o torque como uma função linear da velocidade angular, temos

$$\tau(\omega) = -\frac{\tau_{stall}}{\omega_{max}}\omega + \tau_{stall}.$$

Substituindo:

$$\begin{aligned} t(\omega) &= I \int_0^{\omega} \frac{d\omega}{-\frac{\tau_{stall}}{\omega_{max}}\omega + \tau_{stall}} = -\frac{I}{\tau_{stall}} \int_0^{\omega} \frac{\omega_{max}}{\omega - \omega_{max}} d\omega = -\frac{I\omega_{max}}{\tau_{stall}} \ln(\omega - \omega_{max}) \Big|_0^{\omega} = -\frac{I\omega_{max}}{\tau_{stall}} \ln\left(\frac{\omega - \omega_{max}}{-\omega_{max}}\right) \\ &= \frac{I\omega_{max}}{\tau_{stall}} \ln\left(\frac{\omega_{max}}{\omega_{max} - \omega}\right) \end{aligned}$$

Considerando a porcentagem da velocidade angular máxima  $k$ ,  $\omega = k\omega_{max}$ ,  $k \in [0, 1]$ , temos:

$$t(\omega) = \frac{I\omega_{max}}{\tau_{stall}} \ln\left(\frac{1}{1-k}\right)$$

- **RPM:** altura que um robô da mesma categoria pode ser arremessado (considerando contato ideal, deslocamento na sua totalidade vertical e a transferência de toda energia de rotação sem perdas ao adversário de peso máximo da categoria)

# 5. Arma



## 5.2 Dimensões elétricas

São as mesmas que as dos motores da locomoção, porém cuidado com a mudança de tensão, pois para isso é necessário a utilização de outra bateria com mais células. Sobre o dimensionamento de bateria, depende muito se este motor tiver uma bateria dedicada, ou se o piloto irá ficar ligando ou desligando o motor durante a luta, sobre o estilo de pilotagem... enfim, é muito complicado definir o estado deste atuador, já que ele muda toda hora.

## 5.3 Utilizando a planilha

A parte inicial para a locomoção e a arma são iguais, porém há uma página extra na arma que faz as comparações dos motores com os parâmetros convertidos (tempo de arranque e altura de arremesso) já calculados para cada caso. Bastando somente preencher o momento de inércia e a porcentagem da velocidade máxima que quer ser comparada em cada montagem.

Motores	Motor Referência	Motor Ref. + Redução (A:B)	Motor 1	Motor 1 + Redução (A:B)
Torque de Stall	-0,02728370453	0	#DIV/0!	#DIV/0!
RPM máx	0	0	0	0
Rotação rad/s	0	0	0	0
Aceleração	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
Tempo de arrancada	0	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
Momento de Inércia (g.mm^2)				
Porcentagem de velocidade máx				
Energia Cinética Rotação	0	0	0	0
Altura	0	0	0	0
Velocidade com %	0	0	0	0
Motor/Redução Aprovado	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Observações				



## 6. Conclusão

### 6.1 Organização

Deixe bem claro qual o motor escolhido e não esqueça de passar esses dados para a GC do projeto, pois depois de alguns meses, toda a discussão será esquecida.

Utilize sempre as planilhas como uma ferramenta para facilitar a vida, mas sempre entenda o que está acontecendo por debaixo dos panos, aproveite o fruto do nosso trabalho

### 6.2 Agradecimentos

Gostaria de agradecer a alguns membros que tornaram a análise dos motores possível:

Fábio

Villa

Endy

Kentin

Mago

Nak