

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA  
DO RIO DE JANEIRO



Departamento de Engenharia Mecânica

# MÁQUINA DE TESTES DE FADIGA MECÂNICA POR FLEXÃO ROTATIVA

Rodrigo de Moura Nogueira

**PROJETO DE GRADUAÇÃO**

Orientador: **Marco Antonio Meggiolaro**

Coorientador: **Jaime Tupiassú Pinho de Castro**

Rio de Janeiro, Junho de 2014

## Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC-Rio



# PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UMA MÁQUINA DE TESTES DE FADIGA MECÂNICA POR FLEXÃO ROTATIVA

Rodrigo de Moura Nogueira

Relatório de Projeto Final de Graduação  
apresentado à banca de Engenharia Mecânica  
da Pontifícia Universidade Católica do Rio  
de Janeiro – PUC-RIO como requisito parcial  
para obtenção do grau de Engenheiro  
Mecânica.

**Orientador:** Marco Antonio Meggiolaro

**Coorientador:** Jaime Tupiassú Pinho de Castro

**Coordenador do Curso de Graduação em Engenharia Mecânica:** Marcelo Dreux

---



## Sumário

A maioria das falhas mecânicas súbitas que ocorrem na prática é causada por fadiga, uma falha caracterizada pela geração e/ou propagação de uma trinca, ocasionada primariamente pela aplicação repetida de carregamentos variáveis sobre a peça. Para se obterem resultados experimentais confiáveis no projeto que mensura a fadiga, é fundamental a utilização de máquinas de ensaios mecânicos. Como o custo dessas máquinas comerciais é muito elevado, é de interesse projetar e construir sistemas similares com orçamento reduzido, para uso em pesquisa acadêmica.

O objetivo deste trabalho foi projetar e construir uma máquina de flexão rotativa para ensaios de fadiga de alto ciclo (mais de um milhão de ciclos), incluindo concepção, projeto em ferramenta de CAD, construção e aquisição de dados. A máquina é capaz de exercer tensões de flexão até 728MPa em um corpo de prova de 7.62mm girando em até 20.000 rpm, testando o comportamento dos materiais submetidos a cargas prolongadas de flexão rotativa (1,2 milhões de ciclos por hora).

O propósito principal foi a possibilidade de fazer testes de fadiga S-N com um custo menor que o das máquinas existentes no mercado, em torno de \$24.000 e, além disso, incorporando aperfeiçoamentos técnicos importantes, como a possibilidade de um carregamento variável previamente programado. Esse objetivo foi alcançado, tendo a máquina tendo capacidade de provocar tensões de flexão suficientes para gerar danos por fadiga na maioria dos materiais (728MPa no corpo de prova de 7.62mm), em incrementos de força de 15g, permitindo carregamento que varia ao longo do teste, entre 0,00645 e 3,23 kg.m de momento fletor. Isto por um custo aproximadamente dez vezes menor que o da máquina comercial.

## Palavras-chave:

Fadiga, método S-N, máquina de ensaios mecânicos, alta rotação, carregamento variável.



# Índice

1.	Introdução .....	6
1.1	Teoria de operação: .....	7
1.2	Sistemas existentes no mercado.....	8
2.	Metodologia .....	9
2.1	Características do sistema.....	9
3.	Projeto da máquina.....	10
3.1	Estrutura principal .....	11
3.2	Acoplamentos de eixo .....	11
3.3	Rolamentos .....	12
3.3.1	Rolamentos do eixo principal:.....	13
3.4	Sistema de aplicação de carga .....	14
3.4.1	Planilha de cálculo .....	15
3.4.2	Motorreductor 256:1 .....	15
3.4.3	Atuador linear elétrico.....	16
3.4.4	Célula de Carga.....	17
4.	Eletrônica de controle .....	18
4.1	Motor principal e controlador.....	18
4.2	Microcontrolador principal: Arduino UNO .....	19
4.3	Eletrônica de controle para o atuador: .....	20
5.	Estimativas de custos .....	22
6.	Conclusões .....	22
7.	Ideias para melhorias futuras .....	23
7.1	Instalação de switch de fim de curso .....	23
7.2	Sistema de polias móveis.....	24
7.3	Substituição dos acopladores com set screws por <i>shaft collets</i> ER16 .....	24
7.4	Eletrônica dedicada.....	24
8.	Referências Bibliográficas .....	25
9.	Agradecimentos: .....	26
10.	Apêndice: .....	27



## Índice de figuras:

Figura 1 - Esquema de funcionamento da máquina de R.R. Moore de flexão rotativa.....	7
Figura 2 - Curvas S-N de dois materiais distintos, aço 1045 e alumínio 2014-T6.....	7
Figura 3 - Máquina de R.R. Moore para testes de fadiga por flexão rotativa .....	8
Figura 4 - Carregamento variável semelhante às cargas reais de um componente.....	9
Figura 5 - Projeto mecânico conforme construído no programa SolidWorks .....	10
Figura 6 - Componentes do corpo principal da máquina .....	11
Figura 7 - Acopladores de eixo para fixação do corpo de prova. À esquerda a peça comercial desbalanceada e na direita o que foi usinado por mim em aço inox SAE 304, utilizando set screws. ....	12
Figura 8 - Acoplador do eixo do motor no eixo principal, utilizando set screws M4 e M8 .....	12
Figura 9 - Características do rolamento do eixo principal .....	13
Figura 10 - Simulação por elementos finitos da flexão do CP, evidenciando a seção crítica. ....	14
Figura 11 - Motorreductor, composto do motor Integy 55T e redução planetária P60 256:1, acoplados por meio de cabos de aço, uma barra de tração e uma polia de forma a exercer o momento fletor no corpo de prova. Ao lado vemos o controlador do motor, o IFI Victor 885. ....	16
Figura 12 - Atuador linear Xscorpion 12V 2" 100lbs. Imagens do produto real e o modelo em CAD.....	16
Figura 13 - Sistema de tração montado no SolidWorks e célula de carga para 100kgf .....	17
Figura 14 - Amplificador de sinal para a célula de carga. Potenciômetros para calibragem em azul. ....	18
Figura 15 - Motor brushless DC Hyperion HS-4035 e seu controlador MGM COMPRO 250A .....	18
Figura 16 - Sinal de controle PWM sentido único, gerado pelo testador de servo da marca Turnigy. ....	19
Figura 17 - ARDUINO UNO, Plataforma de desenvolvimento de projetos eletrônicos open-source .....	20
Figura 18 - Sistema de aquisição de dados feito em diagrama de blocos no programa LabView .....	20
Figura 19 - Monster Motor Shield, controlador de velocidade de motor DC para Arduino.....	21
Figura 20 - Acoplador de eixo .....	24
Figura 21 - Arduino Shields de LCD, SD card, Ethernet e Wi-Fi.....	24

## Índice de Tabelas:

Tabela 1 - Propriedades da máquina R.R.Moore .....	8
Tabela 2 - Cálculo de tensão de flexão no CP.....	15
Tabela 3 - Planilha de cálculo de vida à fadiga pelo método S-N.....	15
Tabela 4 - Estimativa de custos dos componentes da máquina. Células em laranja indicam compras no exterior e em verde, compras nacionais. Taxas de envio e impostos não foram incluídos. ....	22
Tabela 5 - Comparação entre a máquina comercial Instron R.R.Moore e a Máquina SN da PUC-Rio .....	23



## 1. Introdução

Os componentes e produtos com função estrutural devem se manter íntegros durante toda a sua vida útil, isto é, devem suportar os carregamentos de teste e de trabalho, operando de maneira confiável, previsível e repetitiva. Para atingir estes objetivos, na prática da Engenharia é indispensável efetuar periodicamente Avaliações de Integridade Estrutural (AIE) e Previsões de Vida Residual (PVR).

A maioria das falhas mecânicas súbitas que ocorrem na prática é causada por fadiga, uma falha mecânica caracterizada pela geração e/ou propagação de uma trinca, ocasionada primariamente pela aplicação repetida de carregamentos variáveis sobre a peça. Esses carregamentos podem ser alternados, pulsantes ou mais complexos.

A geração e a propagação paulatina e irreversível de uma trinca são fenômenos progressivos e altamente localizados, que não provocam sintomas globais evidentes na estrutura, e que por isto podem gerar consequências catastróficas sem aviso prévio, falhas bruscas e inesperadas. Um dos métodos de previsão mais utilizados, há mais de 100 anos, é o método S-N, que correlaciona a história de tensões (nominalmente) elásticas atuantes no ponto crítico de uma peça qualquer (S), com o grande número de ciclos necessários (N) para lá iniciar uma trinca por fadiga. Uma curva é traçada a partir de diversos pontos de falha dos materiais sob tensões conhecidas, permitindo o cálculo dos seus coeficientes de Wöhler e, através de uma equação exponencial, determinar o número de ciclos suportados sob uma dada tensão alternada, assim como o dano acumulado na peça, seguindo a Regra de Miner.

Para se obterem resultados experimentais confiáveis no projeto que mensura a fadiga, é fundamental a utilização de máquinas de ensaios mecânicos. Como o custo de máquinas de ensaios comerciais é muito elevado, é de interesse projetar e construir sistemas similares com orçamento reduzido, para uso acadêmico e em pesquisa. Em particular, testes de flexão rotativa são essenciais para prever o comportamento dos materiais sob essas cargas repetidas durante longo tempo, realizando testes S-N em alta frequência, diminuindo o tempo necessário aos testes e viabilizando sua execução em larga escala.

Também é possível encontrar com essas máquinas o chamado limite de fadiga, ou *endurance limit*, tensão abaixo da qual teoricamente não existe dano acumulado na peça. Esse conceito é muito utilizado para o dimensionamento de peças que sofrerão um número muito grande e desconhecido de ciclos de carregamento variável, sendo necessária assim a chamada “vida infinita à fadiga”, com tensões sempre abaixo do limite.

## 1.1 Teoria de operação:

Baseada no princípio de um eixo giratório, essa teoria utiliza um corpo de prova (CP) que funciona como uma viga simples sofrendo carregamento simétrico em dois pontos. Quando girado metade da revolução, as tensões nas fibras originalmente abaixo da linha neutra do CP são revertidas de tração para compressão e vice-versa. Ao completar a revolução, as tensões são novamente revertidas para que, durante uma revolução, o corpo de prova passe por um ciclo completo de esforço fletor (tração e compressão).

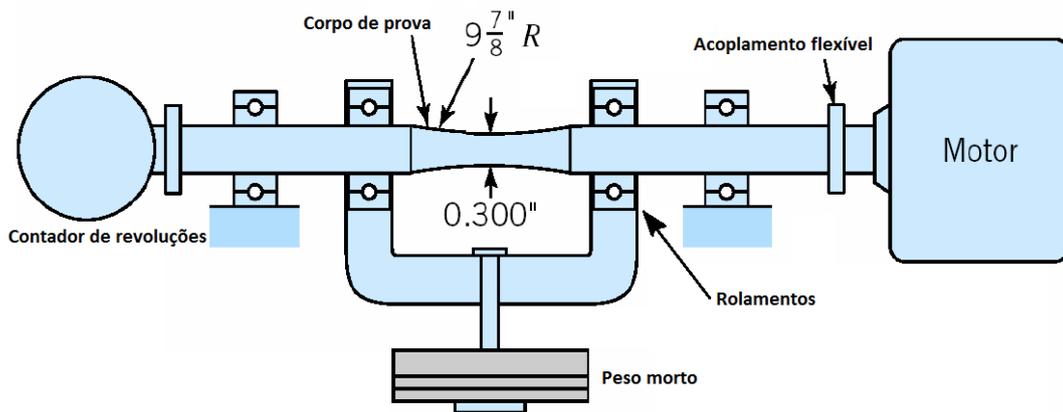


Figura 1 - Esquema de funcionamento da máquina de R.R. Moore de flexão rotativa

Após grande número de revoluções, informado por um contador, a amostra sofre ruptura em função da fadiga, sendo possível traçar uma curva de limite de fadiga em tensão de flexão rotativa em função do número de ciclos, denominada curva S-N. Os aços possuem um limite de tensão fletora abaixo do qual o número de ciclos antes da ruptura é indefinido, é muito grande, como ocorre abaixo de 300 MPa para o aço 1045. Para os alumínio não vemos tal comportamento linear, temos a curva característica abaixo:

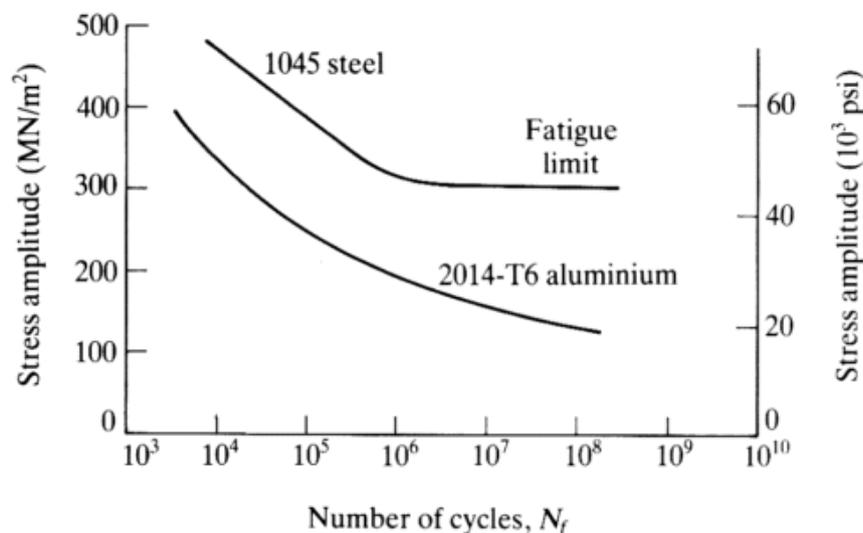


Figura 2 - Curvas S-N de dois materiais distintos, aço 1045 e alumínio 2014-T6

## 1.2 Sistemas existentes no mercado

A máquina padrão de testes de fadiga para obtenção de curvas S-N de materiais é a R.R. Moore, modelo que segue as normas DIN 50113 e ISO 1143. Uma das empresas mais renomadas na área de ensaios mecânicos é a americana INSTRON®, que oferece a máquina da figura 3, abaixo. Especificações de teste do modelo RRM-A2:



▲ R. R. Moore rotating beam fatigue testing system

Figura 3 - Máquina de R.R. Moore para testes de fadiga por flexão rotativa

Características	Instron R.R. Moore
<i>Capacidade de momento fletor (kg-m)</i>	0.25-2.3
<i>Incrementos de capacidade (kg-m)</i>	0.00254
<i>Velocidade de rotação (rpm)</i>	500- 10.000
<i>Força mínima efetiva (kgf)</i>	5
<i>Peso da máquina (Kg)</i>	41
<i>Dimensões totais (mm)</i>	990 × 330 × 510
<i>Alimentação de energia</i>	100 – 120 V
<i>Custo aproximado (USD)</i>	\$24.250,00

Tabela 1 - Propriedades da máquina R.R.Moore

## 2. Metodologia

O desenvolvimento deste trabalho foi dividido nas seguintes etapas:

1. Revisão bibliográfica da teoria de testes S-N de fadiga e das principais máquinas de teste S-N existentes, de modo a determinar as características que poderiam ser melhoradas ou simplificadas em relação aos equipamentos atuais.
2. Projeto dos componentes e peças mecânicas do sistema.
3. Especificação da eletrônica de potência e de controle da máquina.
4. Usinagem e fabricação do protótipo.
5. Calibração e testes
6. Planejamento de melhorias futuras.

### 2.1 Características do sistema

O primeiro ponto que se decidiu mudar foi o sistema de carregamento do corpo de prova, passando de pesos em uma haste vertical em balanço, como na máquina R.R.Moore da Instron®, para um sistema que exerce o esforço de flexão através de um atuador linear elétrico. A grande vantagem deste tipo de carregamento é a possibilidade de variação do mesmo ao longo do tempo, ao invés de esforços constantes ou variados discretamente em intervalos largos, como no sistema de pesos. Realizando um controle de tensão aplicada no atuador elétrico é possível exercer carregamentos muito mais próximos às cargas reais de serviço, esforços aos quais são submetidos eixos e outras peças de máquinas, aviões, trens, etc.

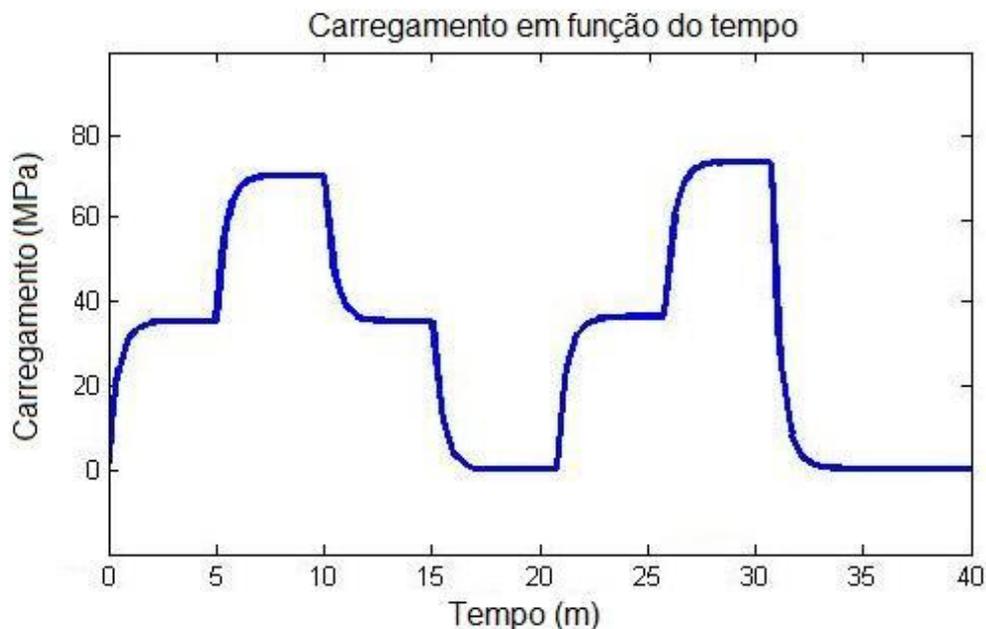
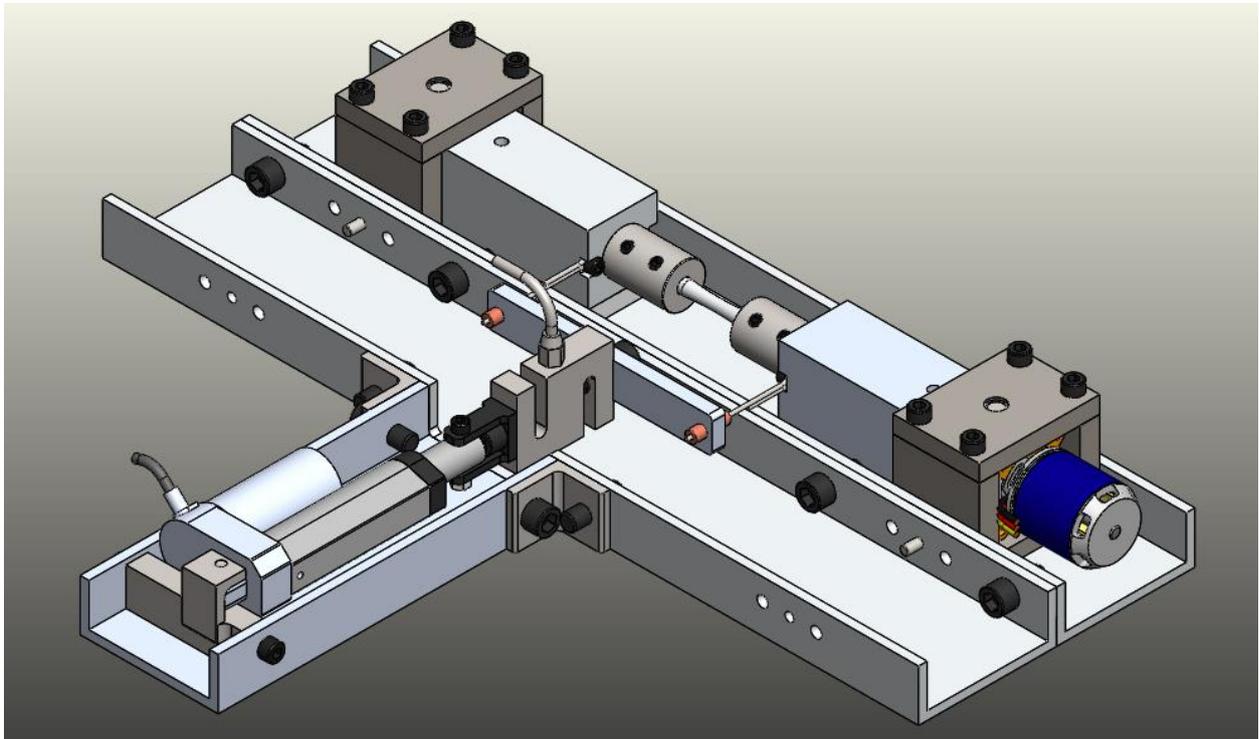


Figura 4 - Carregamento variável semelhante às cargas reais de um componente

### 3. Projeto da máquina



*Figura 5 - Projeto mecânico conforme construído no programa SolidWorks*

Após uma revisão bibliográfica da teoria por trás de testes SN de fadiga e das principais máquinas de teste SN existentes, foi realizado um projeto dos componentes mecânicos e eletrônicos do sistema. Utilizando o software de CAD SolidWorks, foi possível modelar todos os componentes necessários e projetar as peças a serem usinadas, assim como verificar a disposição dos componentes mecânicos, interferência entre partes móveis e gerar desenhos de fabricação. Foi utilizado também para realizar simulações de esforços em componentes críticos, como o corpo de prova e a barra de tração.

O subsistema mecânico foi estudado a partir de seu projeto em SolidWorks, principalmente para o estudo dos seus eixos de inércia e balanceamento. Como os testes envolvem cargas cíclicas, é fundamental garantir que a máquina não sofrerá com vibrações severas de sua estrutura. O projeto foi adaptado em função dos resultados. O software também informou o centro de massa, peso total e momento de inércia das partes giratórias.

### 3.1 Estrutura principal

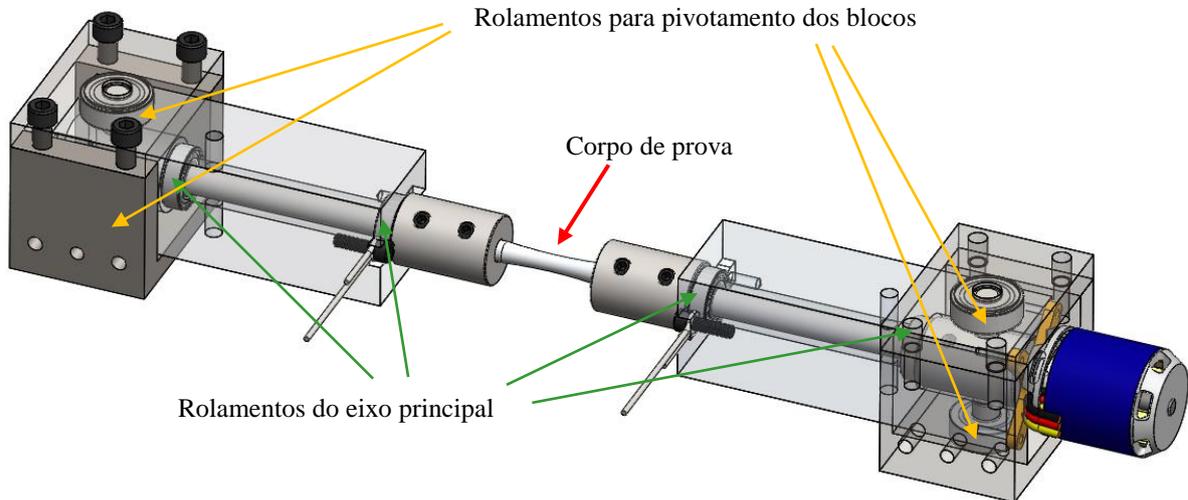


Figura 6 - Componentes do corpo principal da máquina

A estrutura da máquina consiste essencialmente de 2 blocos rolamentados verticalmente que suportam eixos horizontais, e nestes se prende o corpo de prova, que será fletido pelo giro desses blocos em dois pivôs, utilizando uma força de até 50Kgf aplicada em dois pontos. A cada meia volta completa, o esforço na seção central (crítica) se inverte, passando de tração para compressão e vice-versa, gerando um ciclo completo de fadiga. Ao mesmo tempo esse conjunto de eixos está unido a um motor brushless, utilizado em helicópteros RC, capaz de girar até 28.220rpm e produzir 4200W contínuos de potência. A máquina é completamente modular e desmontável. Há um perfil U de 4" de alumínio 6063-T6 que suporta os blocos rolamentados e o eixo principal, com o motor brushless acoplado, e outros perfis de mesma seção transversal para o sistema de tração e eletrônica de controle.

Durante a tração dos blocos e flexão do CP, o giro dos blocos em relação aos seus pivôs verticais gera um pequeno aumento da distância entre os acopladores de eixo, gerando uma tração indesejada no CP. Para resolver esse problema foi especificado um eixo com diâmetro 12.66mm, ligeiramente menor que 1/2" (12.70mm), de forma a que possua um ajuste deslizante nos rolamentos dos blocos. Sendo o esforço para fazer esse deslizamento muito baixo e o acoplador do motor sendo montado com ligeira folga axial, garantimos esse pequeno grau de liberdade que aumenta a confiabilidade do teste.

### 3.2 Acoplamentos de eixo

Inicialmente o acoplamento do motor no eixo principal e a fixação do corpo de prova era feita com colares acopladores, utilizando parafusos de apenas um lado para fechamento, como na figura 5 abaixo. Esse método se provou inviável já que gerava vibrações muito acima do nível aceitável, pois seu centro de massa estava a 0.55mm do centro do furo. Em função disso foi projetado e usinado um acoplador simétrico, fazendo a fixação do CP por parafusos allen com cabeça interna, os chamados *set screws*. Uma solução simples e barata, que atendeu muito bem as suas funções.

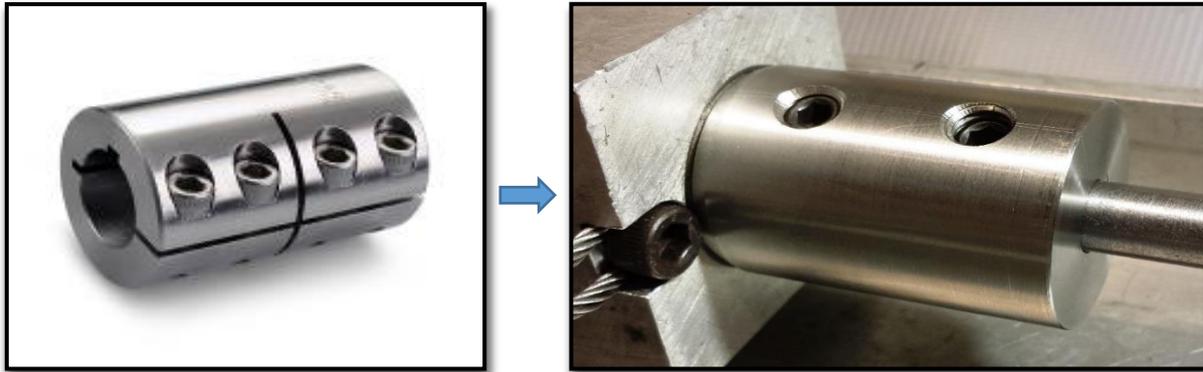


Figura 7 - Acopladores de eixo para fixação do corpo de prova. À esquerda a peça comercial desbalanceada e na direita o que foi usinado por mim em aço inox SAE 304, utilizando set screws.

Um problema semelhante acontecia no acoplamento do motor com o eixo principal, feito por um colar fechado por parafusos com centro de massa fora do centro de rotação. Teoricamente se os dois colares externos estivessem girados de  $180^\circ$  em relação aos internos que suportavam o corpo de prova, os desbalanceamentos se cancelariam por estarem em direções opostas, e o conjunto estaria balanceado. O que se descobriu na prática foi que os dois externos tinham sua vibração contida pela caixa de aço de suporte dos pinos, enquanto os dois internos estavam livres para vibrar devido à baixa rigidez de flexão do eixo como um todo. Isso então gerava grandes amplitudes de vibração até em rotações baixas, não sendo possível acelerar para mais de 4.000 rpm. Assim, decidiu-se por trocar todos os acopladores de eixo por peças simétricas, e o motor passou a transmitir seu torque através da peça abaixo.



Figura 8 - Acoplador do eixo do motor no eixo principal, utilizando set screws M4 e M8

### 3.3 Rolamentos

Os rolamentos são vitais para o funcionamento correto desta máquina. O suporte dos blocos principais em eixos verticais foi inicialmente pensado utilizando rolamentos autocompensadores de esferas, de modo permitir melhor alinhamento dos eixos, removendo assim momentos fletores e esforços cisalhantes parasitas. Entretanto, esses rolamentos foram substituídos por rolamentos de esfera comuns, tornando o mais rígido possível o conjunto dos blocos, que pode ser alinhado utilizando pequenas folgas nos furos dos parafusos, movimentando o conjunto até o alinhamento ótimo.

### 3.3.1 Rolamentos do eixo principal:

Estes são os que apoiam o eixo principal, suportando a carga radial que gera flexão no corpo de prova e as altas rotações utilizadas. Foram utilizados rolamentos de qualidade ABEC-1, com capacidade de rotação até 15.600 rpm sob 272,2 kg de carga radial.

Double Shielded							
 Double Shielded	Bearing No.	For Shaft Dia.	OD	Dynamic Load Cap., lbs.	Max. rpm	Wd.	Each
		R8	1/2"	1 1/8"	1,148	15,600	5/16"

Figura 9 - Características do rolamento do eixo principal

Apesar de a rotação da máquina ser maior que a especificada para o rolamento, a carga utilizada também é bem menor. Sendo conservadores, podemos assumir que toda a força de tração feita pelo atuador incide sobre os rolamentos próximos ao CP, e que cada um vê metade da força total. Dessa forma a carga em cada rolamento seria de 50kgf, enquanto a carga dinâmica de referência é de 272kgf. A partir da relação entre essas cargas é possível determinar um novo limite de rotação, utilizando as equações abaixo:

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P}\right)^3 * \left[\left(\frac{33,3}{n}\right)^{1/3} * \frac{C}{P}\right]$$

Onde:

- $C$  = carga radial dinâmica de referência = 272 kgf
- $P$  = carga radial dinâmica aplicada = 50 kgf
- $n$  = velocidade, rpm = 20.000
- $L_{10}$  = Número de ciclos suportados pelo rolamento x  $10^6$

$$L_{10} = 1,66 \text{ bilhões de ciclos}$$

Logo a vida útil desses rolamentos seria suficiente para fazer 166 testes de 10 milhões de ciclos com 90% de confiabilidade, um número muito usado em ensaios S-N. Lembrando que seriam 166 ensaios utilizando a carga e rotação máxima da máquina durante todo o processo, ou seja, testando aços com mais de 1400MPa de limite de escoamento a 20.000rpm do início ao fim. Após esse número bastaria desmontar o conjunto principal e substituir os rolamentos, que custam em torno de R\$16 cada. Para testes normais em alumínio e aços de mais baixa resistência, a vida dos rolamentos é exponencialmente maior, conforme a fórmula acima.

### 3.4 Sistema de aplicação de carga

O carregamento necessário ao teste foi simulado por elementos finitos no *SolidWorks Simulation*, como esforço de flexão pura. As tensões encontradas na região de fixação foram duas ordens de grandeza abaixo das tensões máximas na seção crítica, o que confirma a viabilidade e a teoria do teste.

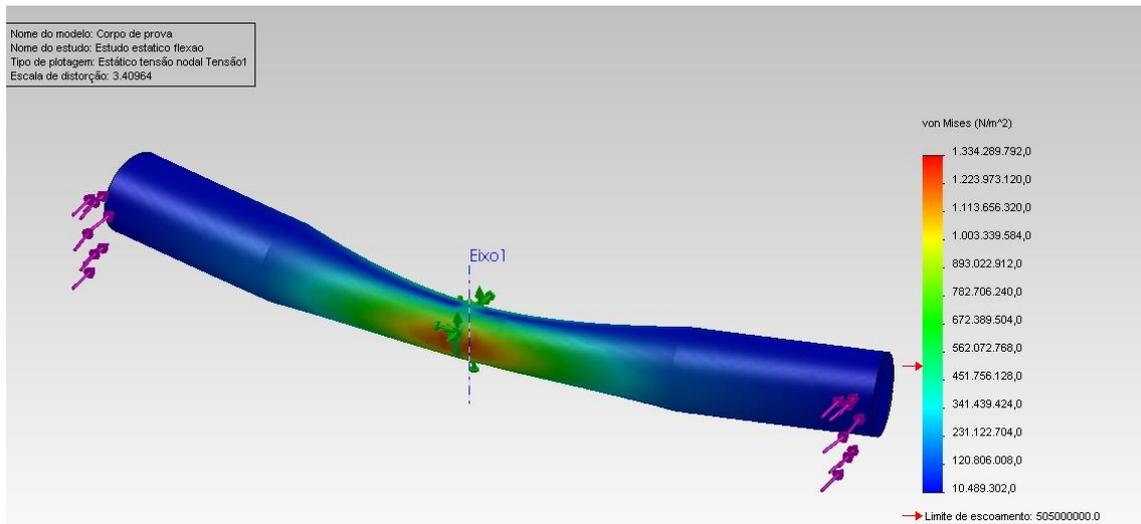


Figura 10 - Simulação por elementos finitos da flexão do CP, evidenciando a seção crítica.

### 3.4.1 Planilha de cálculo

Foi desenvolvida uma planilha de cálculo de forma a, partindo da força de tração aplicada e dimensões características da máquina e do CP, obtermos as tensões de flexão e a vida à fadiga do CP feito de diferentes materiais.

PLANILHA DE CÁLCULO DE FADIGA SN PARA MÁQUINA DE TESTES		N(SL)	1.00E+06
		N(SL)	5.00E+08
		SI	Input
Distância do centro ao tracionador do CP	L1 (mm)	0.076	76.0
Distância do tracionador até o pivô	L2 (mm)	0.129	129.0
Distância do centro ao pivô	L (mm)	0.205	205.0
Força de tração atuada	T (kgf)	49.05	5.00
Momento fletor gerado no CP	M (N.m)	3.16	-
Raio do CP	y (mm)	0.00381	3.8
Momento de inércia do CP	Ixx	1.65E-10	165.5
Tensão máxima de flexão no CP (MPa)	$\sigma$ (MPa)	7.28E+07	72.8

Tabela 2 - Cálculo de tensão de flexão no CP

A partir dessa tensão e dos dados dos materiais, tais como limite de escoamento e ruptura, fatores de acabamento, tamanho, carregamento, temperatura e distribuição estatística, limites de fadiga para  $10^3$  e  $10^6$  ciclos e outros parâmetros, foi possível calcular a vida à fadiga de cada material submetido ao carregamento selecionado.

Input		Al 6063-T6	Al 7075-T6	AISI 1020	SAE 304	4130 (365HB)	4340 (44HRC)	H11 (660HB)
76.0	SE	145	470	285	276	1360	1372	2034
129.0	SR	186	580	491	621	1429	1469	2586
205.0	SF ( $10^3$ )	141.4	440.8	373.2	472.0	957.4	984.2	1732.6
12.00	SL ( $10^6$ )	93.0	290.0	245.5	310.5	700.0	700.0	700.0
-	b	16.5	16.5	16.5	16.5	22.1	20.3	7.6
3.3	C	2.99E+38	4.21E+46	2.69E+45	1.30E+47	5.69E+68	4.69E+63	4.84E+27
269.0	Regime	Plástico	Elástico	Elástico	Elástico	Elástico	Elástico	Elástico
	N (vida)	2.45E-02	3.45E+06	2.21E+05	1.07E+07	1.45E+15	2.62E+14	1.46E+09

Tabela 3 - Planilha de cálculo de vida à fadiga pelo método S-N

### 3.4.2 Motorreductor 256:1

Um requisito básico do projeto foi utilizar um atuador em vez de pesos para poder aplicar carregamentos variáveis aos corpos de prova, aproximando o teste das cargas reais de serviço dos componentes. Assim sendo, inicialmente escolheu-se um motorreductor que faria a tração através de polia, cabos de aço e uma barra para distribuição da força, na qual seria colado um extensômetro ou *strain gauge* que mediria o esforço aplicado. Esse sistema utilizava um motor DC Integy Matrix Pro Lathe 55T acoplado a uma caixa de redução planetária BaneBots P60 de 4 estágios, com relação de 256:1.

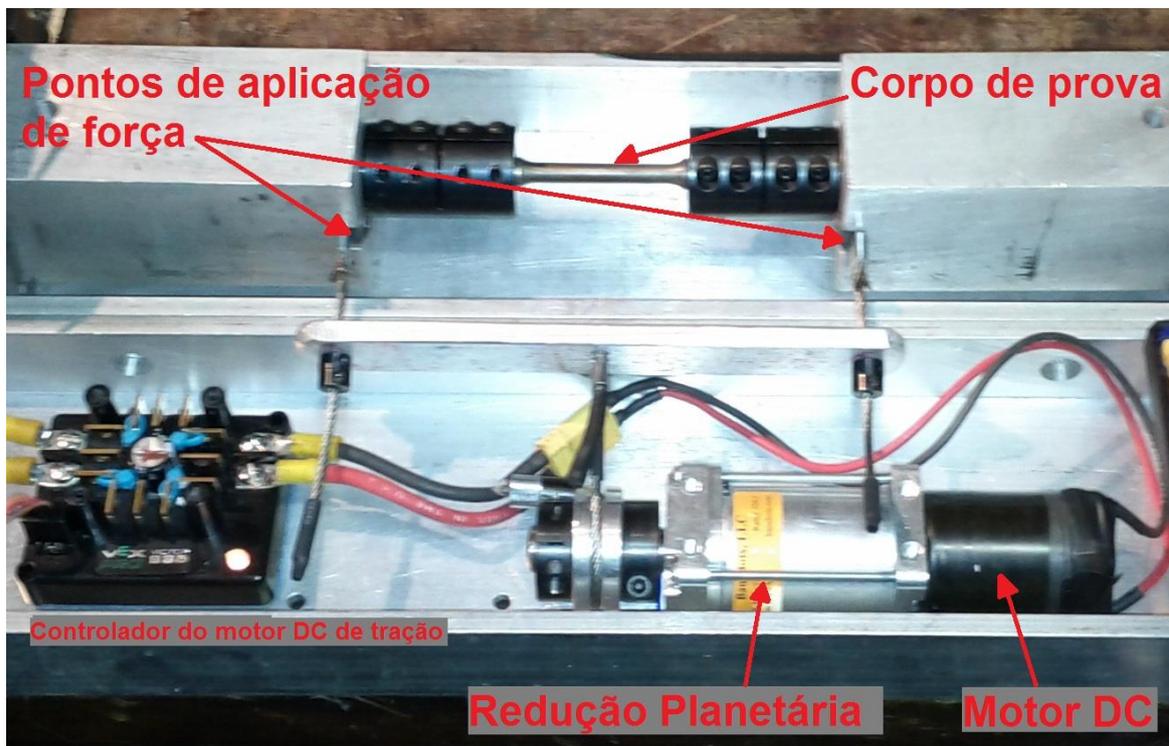


Figura 11 - Motorreductor, composto do motor Integy 55T e redução planetária P60 256:1, acoplados por meio de cabos de aço, uma barra de tração e uma polia de forma a exercer o momento fletor no corpo de prova. Ao lado vemos o controlador do motor, o IFI Victor 885.

Ao montar a máquina na prática, foi realizado o teste de exercer a força máxima com o eixo principal estacionário, e conseguimos deformar plasticamente (fletir mais de  $60^\circ$ ) um corpo de prova de 9,53mm de aço inox 304, mais resistente que os que serão testados normalmente, cuja seção menor será sempre de 7,62mm. Como a deformação elástica é suficiente para testes de fadiga S-N, nossa especificação de motor provou-se suficiente em termos de torque.

Entretanto, a caixa de redução de quatro estágios possui folgas mecânicas que dificultam o controle da aplicação de força, já que apenas o giro gerado pela folga é capaz de remover metade da força de tração, pois as tensões são altas e as deformações, pequenas. Por esse motivo decidiu-se utilizar um sistema mais preciso.

### 3.4.3 Atuador linear elétrico

O sistema foi repensado para utilizar um atuador linear acoplado a uma célula de carga comercial. Através de cálculos feitos na planilha Tabela 3, concluiu-se que uma força de tração de 50 kgf seria suficiente para alcançar o limite de fadiga de corpos de prova feitos dos materiais com maior resistência à fadiga conhecidos ( $S_L(10^6) = 700\text{MPa}$ ), alcançando 728MPa de tensão

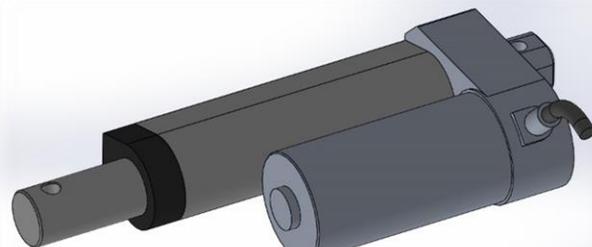


Figura 12 - Atuador linear Xscorpion 12V 2" 100lbs. Imagens do produto real e o modelo em CAD.

máxima de flexão. A partir desses dados foi possível especificar a célula de carga e o atuador necessários.

Características do atuador:

- Alimentação 12V DC, de fácil obtenção por fonte chaveada ou baterias
- Switches de fim de curso para impedir extensão ou retração além do limite
- Capacidade de 45,3 kgf de carga dinâmica, expansível para 52kgf utilizando 13,8V
- Capacidade de carga estática de 204 kgf
- Velocidade sob carga máxima de 10mm/s.
- Baixo consumo de energia sob carga dinâmica máxima: 3,8A em 12V
- Classe de proteção IP54 total contra pó e resistência a fluidos
- Construção toda em alumínio para baixo peso e proteção contra corrosão

#### 3.4.4 Célula de Carga

O sistema possui uma barra de tração, que divide a força feita pelo atuador entre os dois cabos de aço que tracionam os blocos rolamentados. Entre a barra de tração e o atuador linear é fixada uma célula de carga, através de parafusos M12 e uma peça feita para permitir o pivotamento entre esta e o atuador, que também é preso por um pino na parte de trás, permitindo um alinhamento automático de todo o conjunto de tração. Isto balanceia as forças atuantes nos dois cabos de aço, garantindo uma distribuição constante de momento fletor entre os dois pontos de aplicação de carga.

Foi escolhido um fator de segurança de 3 vezes para que a célula de carga não seja danificada. Como a força máxima de tração é de 50kgf, a célula especificada foi de 100kgf, mas permitindo uma sobrecarga de 50% sem danos ao *strain gauge*, podendo assim chegar a 150kgf sem sofrer deformações permanentes.

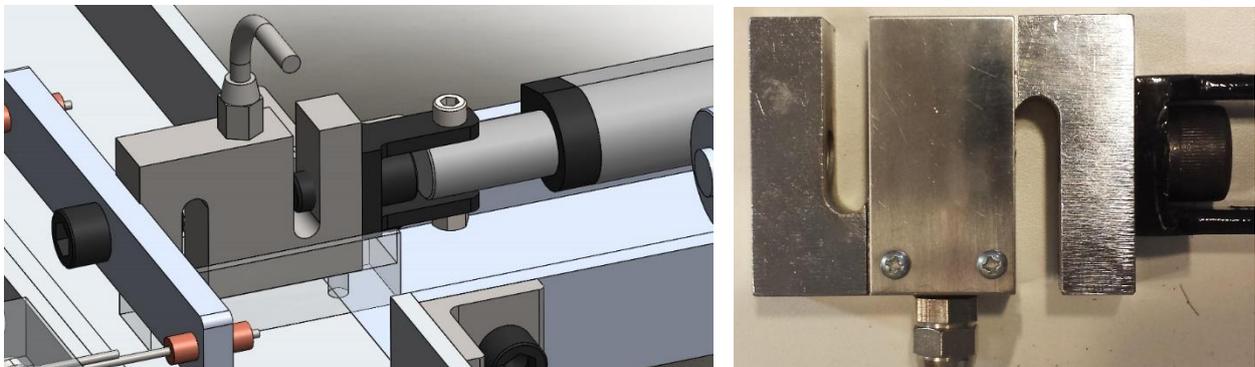


Figura 13 - Sistema de tração montado no SolidWorks e célula de carga para 100kgf

Para efetuar a leitura da célula foi adquirido um amplificador de sinal específico para tal, do mesmo fabricante, já incluindo toda a eletrônica necessária, potenciômetros ajustáveis para regulagem da carga mínima e máxima do teste, blindagem de sinal e saída analógica entre 0 e 5V, adequada para a leitura através da plataforma *Arduino*.

Foi feita uma calibração da célula de carga para operar entre 0 e 62.5kgf, de modo a se ter 25% a mais de leitura além do máximo teórico necessário. Assim, a saída gera 0V quando a carga é de 0kg, 4V quando é de 50kg e 5V se for de 62.5kg. O fator de conversão de tensão elétrica na saída do amplificador de sinal para a força lida pela célula de carga é de 12,5 kg/V.

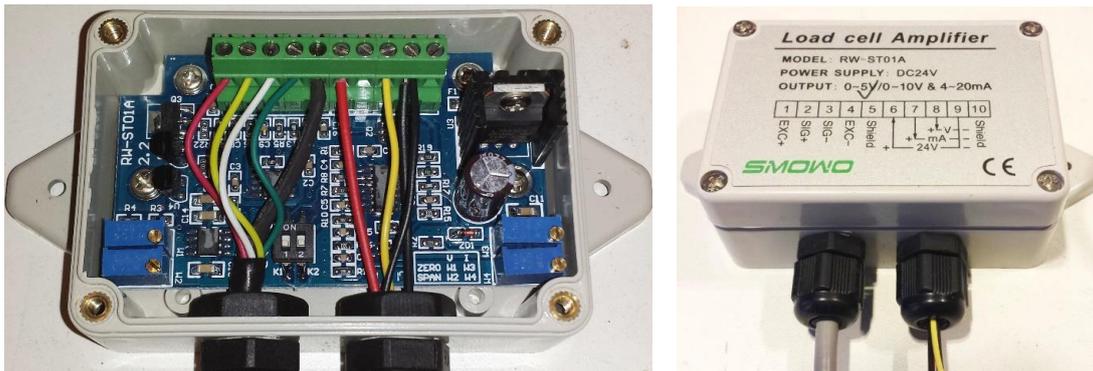


Figura 14 - Amplificador de sinal para a célula de carga. Potenciômetros para calibragem em azul.

## 4. Eletrônica de controle

### 4.1 Motor principal e controlador.

O motor Hyperion HS-4035-560kv é capaz de girar o conjunto em velocidade angular estável entre 60 e 20.000 rpm, sendo necessários 36V DC e 30A de corrente elétrica, equivalente a mais de 1kW de potência de alimentação, para operar nos requisitos máximos do sistema. O controle de velocidade do motor é feito através de um BESC (*Brushless Electronic Speed Control*), que transforma a corrente contínua de uma fonte em 3 tensões senoidais defasadas de 120°, que alimentam o motor brushless de ímã permanente. De acordo com a folha de dados desse motor, ele é capaz de operar a 28.224 rpm, utilizando 100A de corrente elétrica a 50V DC, consumindo 4.2kW de potência, logo ele está operando em menos de um quarto de sua potência máxima.

O Arduino é utilizado para gerar o sinal de controle para o BESC, um PWM de período 20ms e largura de pulso variável de 1 a 2ms. Quando o pulso é de 1ms, o motor está parado. Aumentando-se essa largura ou *duty-cycle*, o motor parte e começa a acelerar até a velocidade máxima de 20.000 rpm, quando o pulso chega a 2ms. Essa regulagem é feita pelo computador através da interface com LabView, utilizando o bloco de envio de sinal para servos, mas pode ser feita manualmente através de um testador de servo utilizado em modelismo.

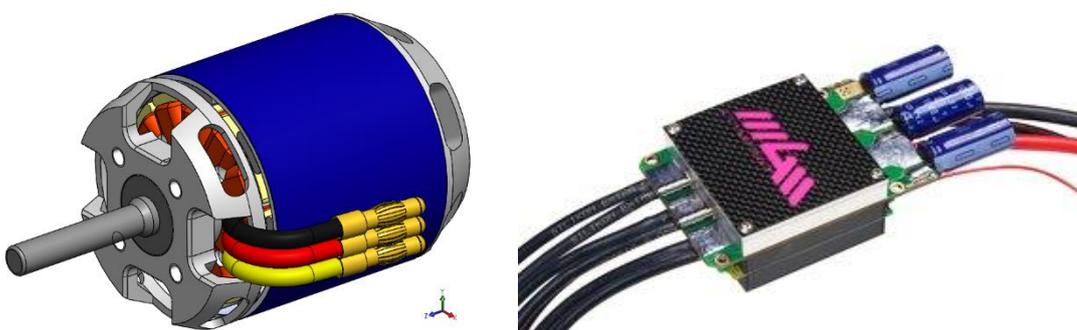
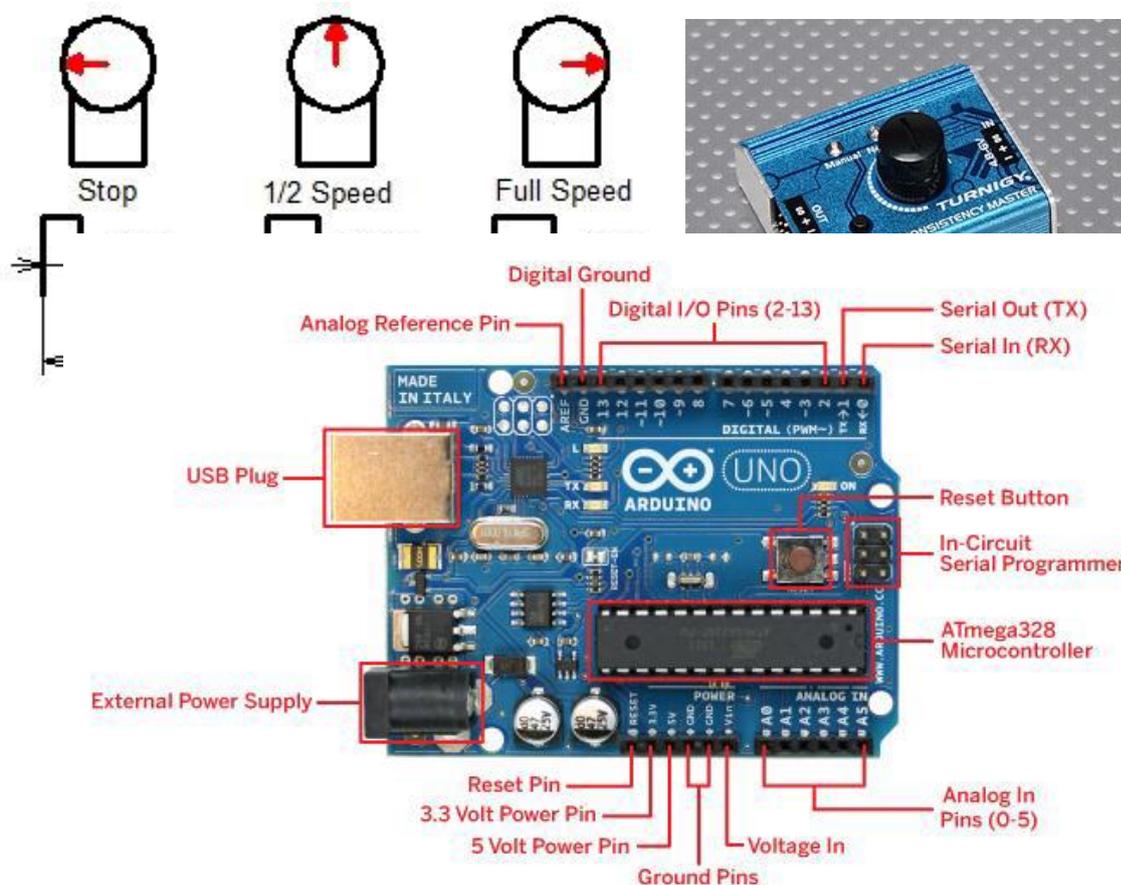


Figura 15 - Motor brushless DC Hyperion HS-4035 e seu controlador MGM COMPRO 250A

## 4.2 Microcontrolador principal: Arduino UNO

A plataforma Arduino, que custa em torno de R\$75,00, baseada nos microcontroladores AVR da ATmel, oferece uma larga gama de funções prontas e facilidade de programação em sua linguagem, muito próxima a C++, muito utilizada no desenvolvimento de protótipos, pesquisa acadêmica e ensino.



Com processador de 16MHz, 14 pinos de entrada/saída digitais, 6 pinos de entrada analógica e uma conexão USB através de um conversor para porta serial, o Arduino UNO foi utilizado para esse projeto, permitindo a interação entre as eletrônicas de potência de controle do atuador e do motor principal, leitura da célula de carga e possibilitando um controle de momento fletor aplicado. De modo a facilitar o processo de aquisição de dados, foi utilizada a LabView interface of Arduino, uma biblioteca capaz de conectar o Arduino ao programa LabView, rodando em um computador com Windows 7.

Figura 17 - ARDUINO UNO, Plataforma de desenvolvimento de projetos eletrônicos open-source

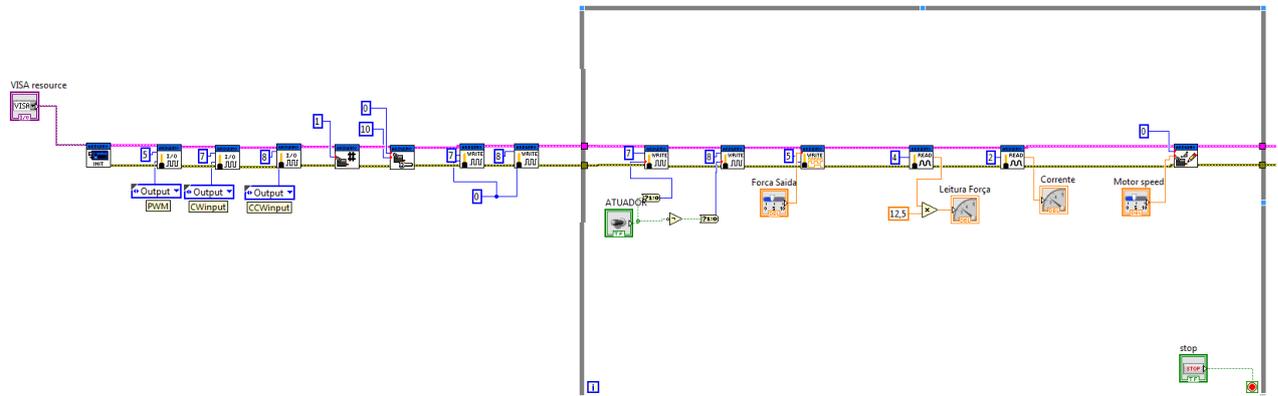


Figura 18 - Sistema de aquisição de dados feito em diagrama de blocos no programa LabView

### 4.3 Eletrônica de controle para o atuador:

Para que possamos ter controle sobre a tensão de flexão no o corpo de prova, é necessário um controle da tensão aplicada no motor do atuador, de forma a variar sua velocidade e gerar um movimento proporcional e suave. Para realizar essa variação de tensão foi utilizado o controlador de motor DC *Monster Motor Shield* acoplado a um Arduino UNO, plataforma de desenvolvimento de software embarcado.

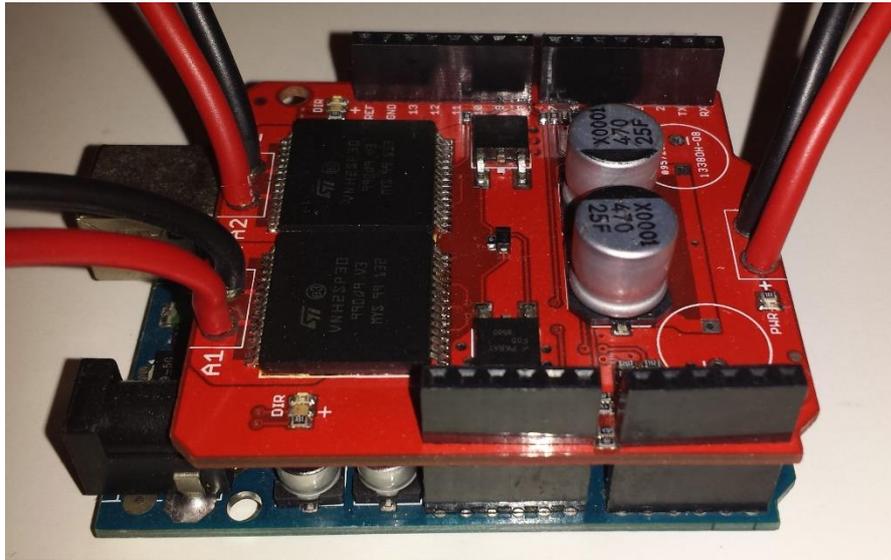


Figura 19 - Monster Motor Shield, controlador de velocidade de motor DC para Arduino

Esse controlador foi escolhido, entre outros motivos, pelo seu baixo custo, ser *open source* e de fácil utilização através da plataforma Arduino. Suas características são:

- Tensão máxima: 16V
- Corrente máxima: 30 A
- Corrente contínua: 14 A
- Sensor de corrente disponíveis para pino analógico do Arduino  
Máxima frequência PWM: 20 kHz
- Desativação térmica
- Desligamento por subtensão e sobretensão.
- Custo: R\$58,00

Foi desenvolvido um programa em LabView capaz de fazer a leitura da força aplicada, recebendo o sinal do amplificador da célula de carga conectada à entrada analógica do Arduino, assim como de enviar um sinal para o controlador de modo a alimentar o motor com a tensão elétrica desejada, seja manualmente ou através de um sistema de controle automático, descrito mais à frente. Esse programa também pode enviar outro sinal que controla a velocidade de rotação do motor brushless principal.

#### 4.4 Sensor para contagem do número de ciclos

De modo a obter o número de ciclos decorridos desde o início do teste, foi implementado um encoder no eixo principal. Seu funcionamento é baseado na captação da transição de campo magnético dos ímãs do motor *Hyperion Bruhsless Outrunner*.

O sensor de efeito Hall SS411P foi utilizado para detectar a transição positiva (zero para máximo) de campo magnético de polo Norte. Como o motor possui 12 polos elétricos e 10 pólos magnéticos, possui 10 ímãs em seu rotor. O sensor foi posicionado muito próximo ao rotor, em



uma estrutura fixada no mesmo parafuso de fixação do motor, de modo a sempre estarem solidários. Dessa forma, o sensor registra 5 transições por volta, já que metade dos ímãs tem o pólo Sul virado para fora do motor (não detectado) e a outra metade tem o Norte virado para fora (detectado). Esse tipo de detecção foi selecionado por diminuir ao máximo o número de incrementos por volta, facilitando a contagem em altas rotações.

## 5. Estimativas de custos

O projeto tinha como objetivo fazer ensaios de fadiga pelo método S-N com um custo reduzido em comparação às máquinas existentes no mercado. Desse modo, foi elaborada uma tabela relacionando os materiais e componentes necessários aos seus respectivos custos.

Componente	Preço USD	Preço R\$
<i>Motor Brushless Scorpion HK 4035-530kv</i>	\$210,00	R\$ 468,30
<i>Atuador linear</i>	\$75,00	R\$ 167,25
<i>BESC HV sensor</i>	\$400,00	R\$ 892,00
<i>Monster Motor Shield</i>	\$25,56	R\$ 57,00
<i>Arduino UNO(x2)</i>	\$67,26	R\$ 150,00
<i>Célula de carga + amplificador de sinal</i>	\$80,00	R\$ 178,40
<i>Componentes mecânicos (eixos, rolamentos)</i>	\$85,00	R\$ 189,55
<i>Alumínio e aço (perfis e barras)</i>	\$134,53	R\$ 300,00
<i>Usinagem</i>	\$1.345,29	R\$ 3.000,00
<b>Total</b> (conversão USD – BRL: 2,23)	\$2.422,65	R\$ 5.402,50

Tabela 4 - Estimativa de custos dos componentes da máquina. Células em laranja indicam compras no exterior e em verde, compras nacionais. Taxas de envio e impostos não foram incluídos.

## 6. Conclusões

O projeto atendeu aos seus requisitos, tendo capacidade de gerar tensões de flexão suficientes para gerar danos por fadiga na maioria dos materiais (728MPa no corpo de prova de 7.62mm), em incrementos de força de 15g. Com velocidade máxima de 20.000rpm, a máquina exerce um milhão de ciclos de fadiga em quarenta minutos, mesmo na carga máxima de 50kgf, sendo capaz de provocar a ruptura dos corpos de prova em curto tempo, viabilizando os testes S-N. Devido à flexibilidade de materiais de teste, a máquina pode simular desgastes a longo prazo em



eixos e outros componentes de diversos equipamentos, submetidos a variados carregamentos, com ampla aplicação em análise de fadiga mecânica para prevenção de iniciação de trincas.

Os sensores escolhidos mostraram-se eficientes, tanto na medição de rotação quanto na carga aplicada, assim como os *Arduinos* para aquisição de dados, tendo a capacidade necessária de processamento de dados, mesmo durante a conexão com o LabView.

Possui indiscutível vantagem de preço (\$2.422,00) em relação à máquina padrão do mercado, a R.R.Moore da INSTRON®, cujo custo é em torno de 10 vezes maior.

Futuramente serão desenvolvidos os sistemas:

- Controle de esforço de flexão com realimentação a partir da leitura da célula de carga
- Interface simplificada para programação de um esforço variado aplicado automaticamente no corpo de prova
- Gráfico atualizado no tempo do esforço aplicado em função do número de ciclos decorridos
- Interface para exportar dados diretamente para o programa Excel ou similar.

Características	Máquina SN PUC-Rio	Instron® R.R. Moore
Capacidade de momento fletor (Kg.m)	0,00645 - 3,23	0,25 - 2,3
Incrementos de capacidade (Kg.m)	0,00097	0,00254
Velocidade de rotação (rpm)	60 - 20.000	500 - 10.000
Força mínima efetiva (Kgf )	0,015 (15g)	5
Peso da máquina (Kg)	16	41
Dimensões totais (mm)	600 × 450 × 100	990 × 330 × 510
Alimentação de energia	127V 60Hz	120 V, 50/60Hz
Custo total aproximado (USD)	2.422,00	24.250,00

Tabela 5 - Comparação entre a máquina comercial Instron R.R.Moore e a Máquina SN da PUC-Rio

## 7. Ideias para melhorias futuras

### 7.1 Instalação de switch de fim de curso

Utilização de um switch no batente dos blocos rolamentados que suportam o eixo giratório, de forma a parar a contagem logo após a quebra do corpo de prova. Isso melhorará a precisão dos cálculos ao remover os ciclos contados durante a desaceleração do motor após a quebra do corpo de prova.

## 7.2 Sistema de polias móveis

Concepção de um sistema envolvendo uma polia móvel presa no atuador e polias fixas na barra de tração para utilizar melhor o curso do atuador e diminuir a carga sobre ele.

## 7.3 Substituição dos acopladores com set screws por *shaft collets* ER16

A utilização de *shaft collets* permitirá uma melhor fixação e centralização do corpo de prova, garantindo sempre o balanceamento e aumentando a tolerância de usinagem necessária à área de fixação do CP de H6 para H9, alcançável apenas com torneamento, sem retífica.



Figura 20 - Acoplador de eixo

## 7.4 Eletrônica dedicada

É de interesse confeccionar uma eletrônica dedicada à máquina, de modo a remover a dependência da conexão com um computador próximo a ela. Essa eletrônica pode ser composta de um Arduino que some as funções de conta-giros e leitura de carga, exibindo os valores em um display, além de fazer o controle da força aplicada. Caso a capacidade de processamento do Arduino UNO não seja suficiente para tal, podem ser utilizadas plataformas de maior capacidade, como o Arduino Mega, ou ainda um *Raspberry Pi*, computador completo do tamanho de um cartão de crédito rodando o sistema operacional Linux, com processador ARM de 700MHz, memória RAM de 512MB, cartão SD até 32GB e saída HDMI 1080p para um monitor de vídeo.

Existem plataformas complementares ao Arduino chamadas de *Arduino Shields* com painéis LCD ou numéricos, mini *protoboards* e vários outros tipos, podendo assim termos uma leitura em tempo real dos valores de velocidade angular, força ou momento fletor aplicado, número de ciclos completos e outras grandezas de interesse. Uma interface com botões pode ser utilizada para aumentar ou diminuir a velocidade e o esforço, ou então utiliza-se a conexão USB para a programação de um esforço variável como o da figura 4. Os dados podem ser armazenados em um cartão SD ou mandados para um computador via Ethernet ou Wi-Fi, utilizando os respectivos

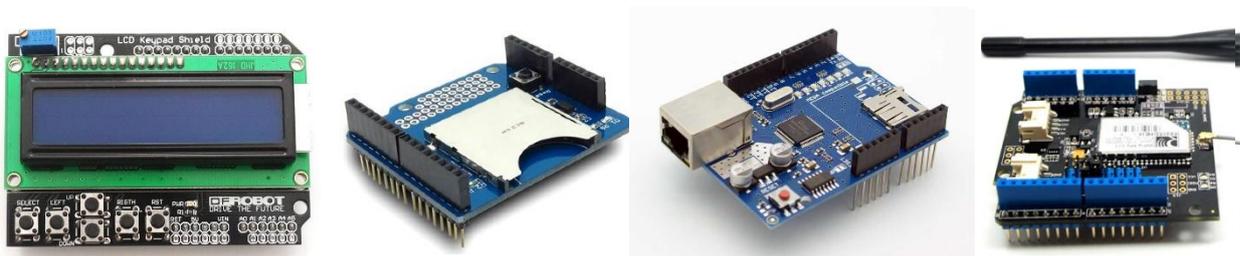


Figura 21 - Arduino Shields de LCD, SD card, Ethernet e Wi-Fi



## 8. Referências Bibliográficas

- 1 - MEGGIOLARO, Marco Antonio e CASTRO, Jaime T. P. **Fadiga - Técnicas e Práticas de Dimensionamento Estrutural sob Cargas Reais de Serviço: Volume I – Iniciação de Trincas**, set. 2009.
- 2 - MEGGIOLARO, Marco Antonio e CASTRO, Jaime T. P. **Fadiga - Técnicas e Práticas de Dimensionamento Estrutural sob Cargas Reais de Serviço: Volume II - Propagação de Trincas, Efeitos Térmicos e Estocásticos**, v.2, p. 1-280, set. 2009.
- 3 - MEGGIOLARO, Marco Antonio, **RioBotz Combat Robot Tutorial**, v2.0, agosto de 2009.
- 4 - *SEDRA / SMITH*, Adel Sedra / Kenneth Smith. *Microeletrônica – 5ª Edição 2007*. Editora: Prentice Hall - Br.
- 5 – Durán, Jorge A. R., **Notas de Aula de Projeto em Fadiga**.  
<http://www.professores.uff.br/duran/disciplinas/Notas%20de%20aula%20de%20projeto%20em%20Fadiga.pdf>
- 6 – **Arduino Language Reference**.  
<http://arduino.cc/en/Reference/HomePage>
- 7 - NI LabVIEW Interface for Arduino Toolkit  
<http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/pt/nid/209835>
- 8 - **INSTRON®** website:  
<http://www.instron.com.br/wa/product/RR-Moore-Rotating-Beam-Fatigue-Testing-System.aspx>
- 9 – **NTN website** – rotação permissível  
<http://www.ntn.com.br/pdfServicos/indiceA1/indiceA1.pdf>
- 10 – **NSK website** – cálculos de dimensionamento  
<http://www.nsk-ltd.com.br/upload/file/Cat%C3%A1logo%20Geral%20NSK.pdf>



## 9. Agradecimentos:

Gostaria de expressar reconhecimento aos que participaram do esforço requerido para a realização desse trabalho, seja através do provimento de recursos financeiros necessários, seja pelo inestimável aconselhamento técnico ou pela ajuda na confecção de peças essenciais e software.

Primeiramente aos meus pais, Isabel e Ricardo, pelo suporte, incentivo constante, união e espaço disponível para usinagem em casa. Também aos meus amigos, que sempre estiverem presentes nos momentos mais importantes e difíceis, e ajudando de longe e com a “mão na massa”, metafórica e literalmente.

O Laboratório de Fadiga da PUC-Rio forneceu os materiais e mão-de-obra necessários para a usinagem das peças que não puderam ser fabricadas na PUC-Rio.

O Laboratório de Robótica foi utilizado para o projeto, montagem e elaboração da estrutura da máquina, assim como para alguns testes.

Foram nossos colaboradores:

CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico

Prof. Marco Antonio Meggiolaro

Prof. Jaime Tupiassú Pinho de Castro

Prof. Mauro Schwanke da Silva

Técnico Edson do ITUC

Maria Isabel Pinto de Moura

Ricardo Paraiso Nogueira

Luísa Filgueiras

Eduardo Ristow

Guilherme Rodrigues

Felipe Salles

Paulo Henrique Biriba Braga

Gabriel Cordeiro

Matheus Ludolf



## 10. Apêndice:

- Código na linguagem do *Arduino* utilizado para a contagem dos giros do motor principal, desenvolvido especialmente para o projeto, utilizando o sensor SS411P, que mostra os dados em um display de LCD em tempo real.

```
#include <LiquidCrystal.h>

LiquidCrystal lcd(8, 9, 4, 5, 6, 7);
volatile byte npole_count;
unsigned int rpm;
unsigned long timeold;
unsigned long cycles;

void setup()
{
  Serial.begin(9600);
  attachInterrupt(0, rpm_fun, RISING);
  lcd.begin(16, 2);
  //lcd.setCursor(0,0);
  //lcd.print("RPM:");
  lcd.setCursor(0,0);
  lcd.print("Cycles:");

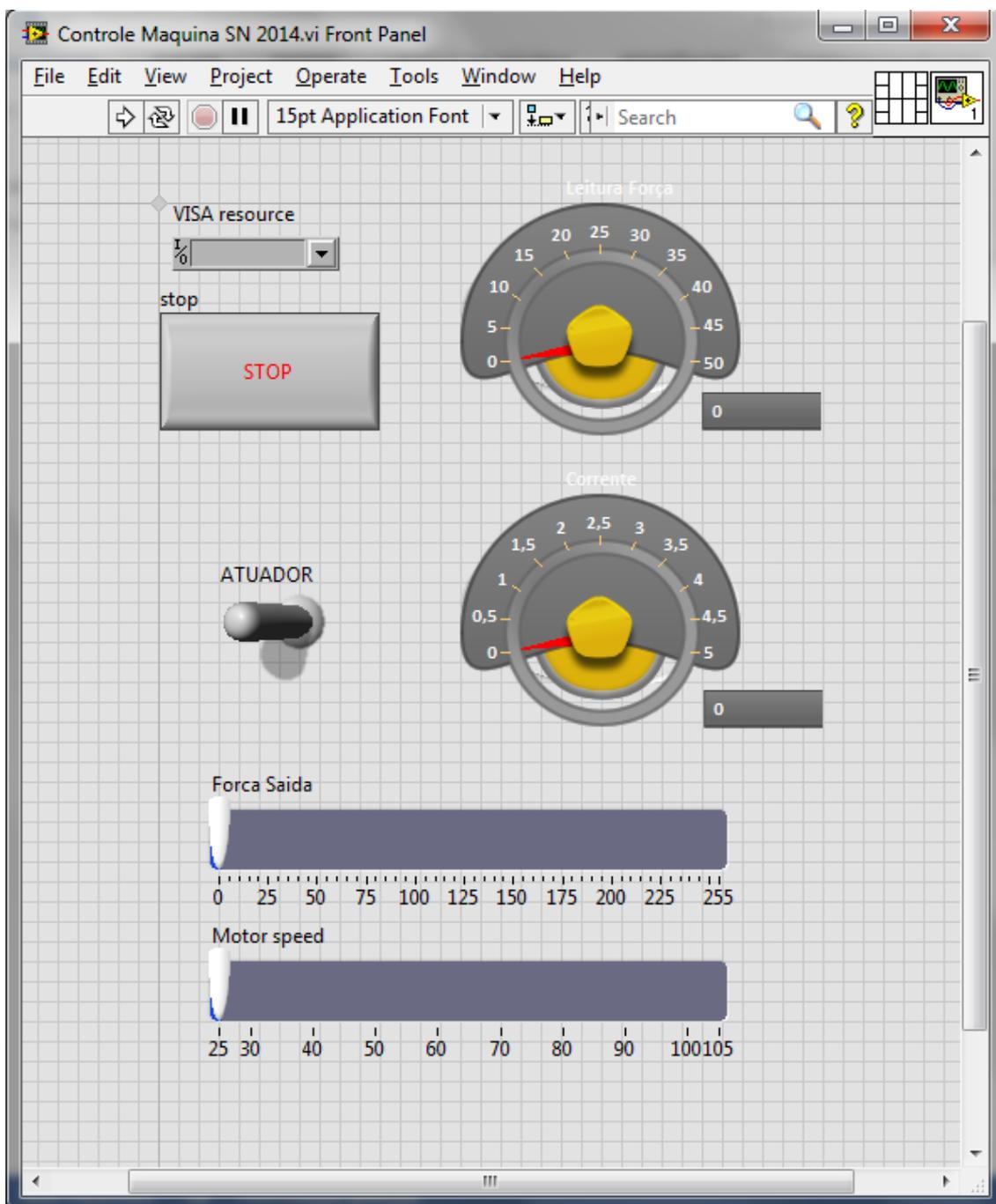
  npole_count = 0;
  rpm = 0;
  timeold = 0;
  cycles = 0;
}

void loop()
{
  if (npole_count >= 5)
  {
    cycles++;
    rpm = 12*1000/(millis() - timeold)*npole_count;
    timeold = millis();
    npole_count = 0;
    //Serial.println(rpm,DEC);
    //Serial.println(cycles,DEC);
  }
  // lcd.setCursor(5,0);
  //lcd.print(rpm);
```

```

    lcd.setCursor(8,0);
    lcd.print(cycles);
}
void rpm_fun()
{ npole_count++;
  //Each rotation, this interrupt function is run twice
}
    
```

- Interface de controle através do programa LabView



- Diagrama de blocos do controle:

