

**INSPER**

Fernando Assumpção  
Isabella Oliveira  
Lucca Saraiva  
Thomas Bekhor  
Vitor Riccetti

**Gate 2  
Projeto Mecatrônico**

São Paulo  
09 de dezembro, 2022

## **Descrição geral do Projeto Mecatrônico**

O projeto mecatrônico compreende o desenvolvimento de uma máquina pipetadora automática para um cenário de laboratório. O presente relatório detalha o desenvolvimento técnico das três grandes áreas que englobam o projeto: Mecânica, eletrônica e software. O processo de desenvolvimento do protótipo final envolveu elementos fornecidos à equipe como: o pórtico com eixos X e Y pré-montados, drivers para o acionamento de motores de passo desses eixos, uma pipeta eletrônica configurada para coleta e despejo de 1 ml por vez e placas NUCLEO, com microcontrolador programável. Partindo-se deste cenário e de um desenvolvimento de projeto conceitual, seguindo as etapas convencionais do processo de desenvolvimento de produto(PDP), foi possível iniciar o desenvolvimento do protótipo funcional . As informações contidas no presente relatório são complementadas pelos arquivos em anexo referenciados ao longo do mesmo.

<b>1. Projeto Mecânico</b>	<b>3</b>
1.1 Dimensionamento do fuso de esferas e mancais	3
1.1.1 Definição da classe de precisão do fuso	4
1.1.2 Determinação do passo do fuso	6
1.1.3 Cálculo de carga média de funcionamento e força axial resultante	6
1.1.4 Cálculo de vida útil (Carga dinâmica)	6
1.1.5 Cálculo do comprimento total do fuso	7
1.1.6 Cálculo do torque de acionamento e velocidade crítica	8
1.2 Definição dos mancais	8
1.3 Dimensionamento de guia linear e carro	9
1.3.1 Cálculo da força/momento estático equivalente ( $P_o / M_o$ ) e capacidade de carga estática ( $C_o$ )	10
1.3.2 Cálculo de forças dinâmicas equivalentes	12
1.3.3 Cálculo de vida útil e carga dinâmica	14
1.4 Definição final de componentes mecânicos especificados	16
<b>2. Peças fabricadas</b>	<b>16</b>
2.1. Base	16
2.2 Suporte do motor	17
2.3 Batente	17
2.4 Suporte da castanha	18
2.5Base suporte pipeta	18
2.6 Calço da guia	18
2.7 Suporte do fim de curso	19

2.8 Suporte da pipeta	20
<b>3. Projeto Eletro-eletrônico</b>	<b>20</b>
3.1 Introdução	20
3.2 Diagrama de Blocos	21
3.3 Elementos eletro-eletrônicos	23
3.3.1 Placa Núcleo	23
3.3.2 Debouncing	25
3.3.3 Step-Down	27
3.3.4 Acionamento da Pipeta	29
3.3.5 Botão de Emergência	30
3.3.6 LCD	31
3.3.7 Acionamento do Motor do Eixo X e Y	32
3.3.8 Acionamento do Motor do Eixo Z	33
<b>4. Projeto de Software</b>	<b>35</b>
<b>5. Interface Homem-Máquina</b>	<b>40</b>
<b>6. Norma Regulamentadora</b>	<b>42</b>
<b>7. Bibliografia</b>	<b>43</b>

# 1. Projeto Mecânico

Para o desenvolvimento do projeto mecânico que compõe o projeto mecatrônico foi necessário a especificação, através de cálculos de dimensionamento, de alguns componentes mecânicos a serem comprados e integrados ao projeto. Os componentes dimensionados foram: Fuso de esferas com mancais para fixação, guia linear e carro.

## 1.1 Dimensionamento do fuso de esferas e mancais

Os seguintes dados foram determinados para as condições de operação do dispositivo que inclui o fuso de esferas como conversor de movimento:

PARÂMETROS	VALORES
Torque do motor	5 a 7 kgf*cm
Rotação <u>máxima</u> (N)	300 rpm
Velocidade máxima	1500 mm/min
Curso útil	109 mm
Carga total ( <u>Fb</u> )	2 kg
Vida útil (Lh)	15000 horas

*Tabela 1. dados para especificação do fuso de esferas*

### 1.1.1 Definição da classe de precisão do fuso

Para a definição da classe de precisão do fuso, foi consultado o catálogo técnico da marca HIWIN, onde uma tabela de aplicações pode oferecer referências e recomendações

Classe de aplicação		EIXO	Classe de Precisão									
			0	1	2	3	4	5	6	7	8	10
Máquinas-Ferramentas CNC	Tornos	X	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
		Z				.	.	.				
	Máquinas fresadoras Máquinas madriladoras	X		.	.	.	.	.				
		Y		.	.	.	.	.				
		Z		.	.	.	.	.				
	Centros de usinagem	X		.	.	.	.	.				
		Y		.	.	.	.	.				
		Z			.	.	.					
	Perfuradora de gabarito	X	.	.								
		Y	.	.								
		Z	.	.								
	Máquinas de perfurar	X				.	.	.				
		Y				.	.	.				
		Z				.	.	.				
	Moedores	X	.	.	.							
		Y		.	.	.						
		Z			.	.	.	.				
	Máquina de corte por descarga elétrica ( EDM )	X	.	.	.							
		Y		.	.	.						
		Z			.	.	.	.				
	Corte a fio ( EDM )	X	.	.	.							
		Y		.	.	.						
		U	.	.	.	.	.					
		V	.	.	.	.	.					
	Máquina de Corte a Laser	X			.	.	.					
		Y			.	.	.					
		Z			.	.	.					
Geral	Perfuração Impressa	X				.	.	.				
		Y				.	.	.				
	Máquinas dedicadas			.	.	.	.	.	.			
	Máquinas para trabalhos com madeira									.	.	.
	Robô industrial ( Precisão )			.	.	.	.	.				
	Robótica ( Geral )								.	.	.	
	Máquinas de medição coordenada		.	.	.							
	Máquinas não-CNC						.	.	.			

Tabela 2. Classes de precisão de fuso por aplicação

Como a aplicação em questão se enquadra em robótica geral, foi selecionada a classe de precisão C7. O fuso é laminado pois a aplicação não exige a precisão que um fuso retificado fornece em troca do aumento de preço, além da maior vida útil, como referenciado na seção 4.3 do catálogo da HIWIN que se encontra no anexo.

### 1.1.2 Determinação do passo do fuso

O cálculo do passo é feito à seguir:

$$passo = \frac{V_{max}}{N_{max}}$$

$$passo = \frac{1500}{300} = 5 \text{ mm}$$

### 1.1.3 Cálculo de carga média de funcionamento e força axial resultante

A carga média de funcionamento é calculada por:

$$F_{bm} = F_b \times fp$$

$$F_{bm} = 2 \times 1,3 = 2,6 \text{ Kgf}$$

A força axial resultante é, levando-se em consideração pré-carga para auto-travamento, calculada por:

$$Fa = F_{bm} + \left( \frac{F_{bm}}{2,8} \right)$$

$$Fa = 2,6 + \left( \frac{2,6}{2,8} \right) = 3,53 \text{ Kgf}$$

### 1.1.4 Cálculo de vida útil (Carga dinâmica)

A vida útil, representada por L, em rotações, é calculada a fim de determinar a carga dinâmica envolvida na operação do equipamento através do fuso em que, Lh é a vida útil do componente em horas e n é a rotação máxima do motor.

$$L = Lh \times 60 \times n$$

$$L = 15000 \times 60 \times 300 = 270 \times 10^6 \text{ rot}$$

Com isso foi possível determinar a carga dinâmica (C) através da fórmula:

$$L = \left( \frac{C}{Fa} \right)^3 \times 10^6$$

$$C = \sqrt[3]{\frac{L \times Fa^3}{10^6}}$$

$$C = \sqrt[3]{\frac{270 \times 10^6 \times 3,53^3}{10^6}} = 22,81 \text{ Kgf}$$

Assim foi selecionado o modelo 16-5T3, do catálogo da HIWIN a seguir, a partir dos resultados obtidos de passo, força axial resultante e carga dinâmica.

Modelo	Tamanho		Diâ. Nominal	Passo	Diâ. Esfera	PCD	RD	Circuitos	Rigidez kgf/µm K	Carga Dinâmico 1x10 <sup>6</sup> revs C (kgf)	Carga Estática Co (kgf)	Castanha		Flange			Tubo de Recirculação			En- -caixe
	D	L										D	L	F	T	BCD-E	X	Y	Z	
8-2.5T3	8	2.5	1.500	8.2	6.652	3	8		170	267	18	28	35	5	27	4.5	0	0	0	
14-2.54T3	14	2.54	2.000	14.2	12.136	3	12		339	655	30	39	50	10.6	40	5	7	5	0	
14-4T3		4		14.2	12.136	3	12		339	655	26	33	48	6	36	5.5	0	0	0	
16-2T3	2		1.500	16.2	14.652	3	14		252	593	27	36	44	10	34	4.5	8	4.5	0	
16-2.5T4	16	2.5	16.6	16.2	14.652	4	19		358	862	27	44	44	10	34	4.5	8	4.5	12	
16-5T3		5		16.6	13.324	3	11		731	1331	30	46	54	12	41	5.5	9.5	5.5	12	
16-5T4		3.175		16.6	13.324	4	12		936	1775	30	52	54	12	41	5.5	9.5	5.5	12	
16-6T4		6		16.6	13.324	4	21		936	1775	32	58	54	12	42	5.5	9.5	5.5	12	
20-2T6	2	1.500	20.2	20.2	18.652	6	32		518	1551	32	52	52	10	40	5.5	9.5	5.5	12	
20-2T4		1.500		20.2	18.652	4	36		399	1112	32	40	52	10	40	5.5	9.5	5.5	12	
20-2.5T5		2.5		20.2	18.136	5	28		637	1635	36	51	59	12	47	5.5	9.5	5.5	12	
20-2.54T6		2.54		20.2	18.136	6	33		745	1962	36	55	59	12	47	5.5	9.5	5.5	12	

Tabela 3. seleção do fuso no catálogo HIWIN

### 1.1.5 Cálculo do comprimento total do fuso

Para o comprimento de rosca do fuso, leva-se em consideração o curso útil estipulado de 110 mm, o comprimento da castanha de 46 mm e uma folga de dois passos de rosca para cada extremidade total 176mm. O comprimento total é determinado pelo comprimento de rosca mais as usinagens de ponta necessárias para a fixação nos mancais, que são padronizadas e as utilizadas serão para mancalização fixo-livre.

### 1.1.6 Cálculo do torque de acionamento e velocidade crítica

O torque de acionamento foi calculado por meio da fórmula a seguir, sendo  $\eta$  a eficiência mecânica do fuso, com valor de 0,9:

$$T = \frac{Fa \times passo}{2 \times \pi \times \eta}$$

$$T = \frac{3,53 \times 5}{2 \times \pi \times 0,9} = 3,12 \text{ Kgf. mm}$$

O tipo de mancalização escolhido é o fixo-suportado, pois oferece uma maior estabilidade e menor susceptibilidade à vibrações se comparado ao fixo-livre. A figura 1, abaixo exibe os fatores utilizados para cálculo da velocidade crítica dependentes do tipo de mancalização:

#### Tipos de Montagem:

fixo - fixo	$M_f = 1$
fixo - suportado	$M_f = 0.689$
suportado - suportado	$M_f = 0.441$
fixo - livre	$M_f = 0.157$

Figura 1. fatores de montagem

Calcula-se, então, a velocidade crítica  $N_c$ , que determina a frequência de ressonância do fuso, tal valor de rotação deve ser alto o suficiente para que não seja atingido durante a operação. O cálculo desta velocidade é:

$$N_c = 2,71 \times 10^8 \times \frac{M_f \times d_r}{L_t^2}$$

$$N_c = 2,71 \times 10^8 \times \frac{0,689 \times 16}{179^2} = 93240,04 \text{ rpm}$$

## 1.2 Definição dos mancais

Para a escolha dos mancais foi consultado o catálogo da OBR, disponível no anexo. Como o tipo de mancalização escolhido é fixo-suportado, e o diâmetro nominal do fuso é de 16 mm, determinou-se os seguintes mancais:

Modelo	$\phi$ do Fuso d	$\phi$ para Montagem no mancal D			B	E	F	M	S	C
BK10	14	10	-0,005	~ -0,012	8	36	15	M10 x 1	16	5,5
BK12	16	12	-0,005	~ -0,012	10	36	15	M12 x 1	14	5,5

Modelo		$\phi$ do Fuso d	$\phi$ para Montagem no mancal D			E	B	F	G
BF10	FF10	14	8	-0,005	~ -0,012	10	7,6	7,9	0,9
BF12	FF12	14/16	10	-0,005	~ -0,012	11	9,6	9,15	1,15

Tabela 4. Mancais escolhidos no catálogo da OBR

Os mancais escolhidos são: BK12 e BF12.

### 1.3 Dimensionamento de guia linear e carro

Para a especificação da guia linear compatível com o projeto foi necessário avaliar as forças atuantes nela, e seus momentos. A única força atuante relevante está no eixo Z (com o sentido representado na figura 2), sendo esta o peso total dos componentes, atuando axialmente no fuso, surgindo assim uma reação para a pipeta não cair. A guia, dessa forma, não resiste às forças, mas sim aos momentos gerados, por ser mais rígida que o fuso. Portanto, sabendo os momentos é possível escolher o guia linear compatível com o projeto.

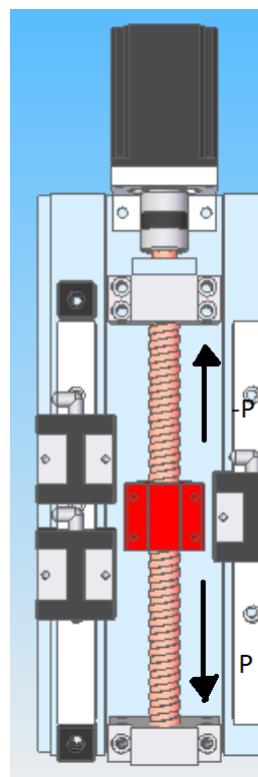


Figura 2. Representação das forças na guia

### 1.3.1 Cálculo da força/momento estático equivalente ( $P_o$ / $M_o$ ) e capacidade de carga estática ( $C_o$ )

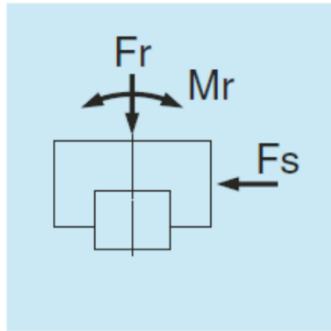


Figura 3. Representação de forças no conjunto carro-guia

Analizando as forças apresentadas na figura 3:

$$F_r = 0, \quad F_s = 0$$

Assim, a Força Estática Equivalente ( $P_o$ ) também é nula, pois equivale a soma de  $F_r$  e  $F_s$ .

$$P_o = 0$$

E também a Capacidade de Carga Estática ( $C_o$ ), que é calculada a partir de  $P_o$ .

$$C_o = 0$$

Sendo assim, o momento ( $M_r$ ) é nulo, pois a única força presente, a peso, não tende a girar no sentido da Figura W.

$$M_r = 0$$

Agora analisando a força Peso atuante ( $P$ ), foi estimado que a massa máxima total da soma de todos os componentes é 5kg, portanto,

$$P = g \cdot m = 9,81 \cdot 5 = 49,05 \text{ N}$$

Os momentos gerados na guia, por essa força peso são o  $M_p$  e o  $M_y$ , visto na Figura 4.

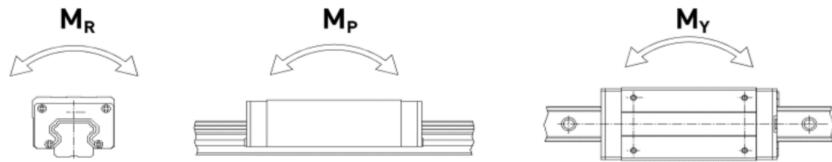


Figura 4. Representação dos momentos nas guias

Os momentos estáticos  $M_p$  e  $M_y$  dependem das distâncias entre o centro de massa e a guia. Dessa forma, querendo estimar o máximo que a guia aguenta, independente do centro de massa, as distâncias de braço de alavanca  $L_1$  e  $L_2$ , foram especificadas na Figura 5.

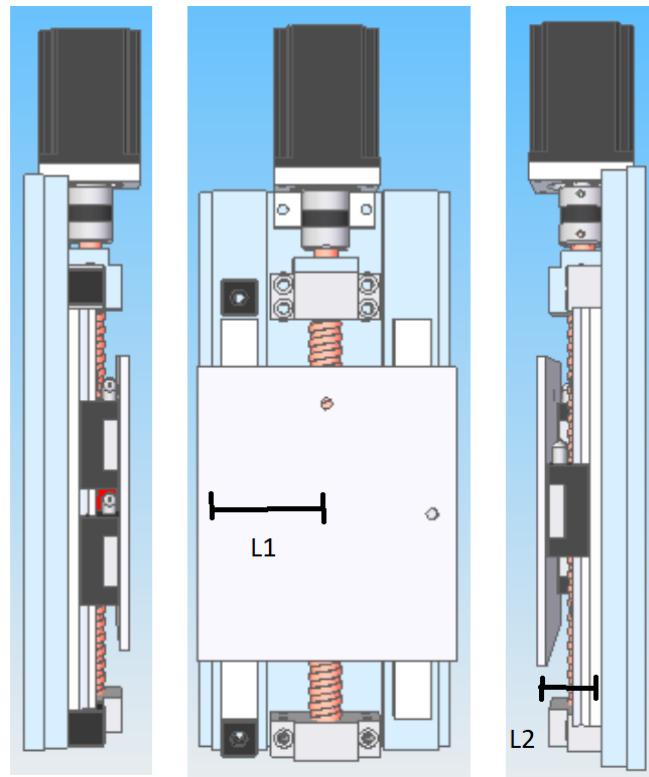


Figura 5: braços de alavanca para cálculo do momento

Assim, Usando o fator de segurança para carga normal:

$$F_{sm} = 3$$

Estimativa de um valor máximo da distância entre centro de massa e o bloco pela vista lateral:

$$L_2 = 150\text{mm}$$

Estimativa de um valor máximo da distância entre centro de massa e o bloco pela vista frontal:

$$L_1 = 100\text{mm}$$

Dessa forma os valores de MP e MY são dados por:

$$M_P = P \bullet L_2 \bullet F_{sm}$$

$$M_P = 49,05 \bullet 0,15 \bullet 3$$

$$M_P = 0,022 \text{ kNm}$$

$$M_Y = P \bullet L_1 \bullet F_{sm}$$

$$M_Y = 49,05 \bullet 0,1 \bullet 3$$

$$M_Y = 0,0147 \text{ kNm}$$

### 1.3.2 Cálculo de forças dinâmicas equivalentes

Agora é necessário visualizar as cargas dinâmicas equivalentes que seriam suportadas pela guia linear, sendo essas mostradas na Figura 6:

$$\begin{aligned} F_r &= F_r \\ F_{se} &= F_s \cdot \tan\alpha \\ F_{re} &= \varepsilon_r \cdot M_r \\ F_{pe} &= \varepsilon_p \cdot M_p \\ F_{ye} &= \varepsilon_y \cdot M_y \end{aligned}$$

Figura 6. Cálculos das cargas dinâmicas equivalentes

Assim, de acordo com o diagrama da figura 4, têm-se:

$$Fr = 0 \text{ N}$$

$$Fse = 0 \text{ N}$$

$$Fre = 0 \text{ N}$$

Para o cálculo dos coeficientes das demais forças presentes na figura Q utiliza-se os valores para a guia NH15 do catálogo da marca HIWIN, presente nos anexos. Tais valores são:

$$\varepsilon_p = 111 \frac{1}{m}$$

$$\varepsilon_y = 132 \frac{1}{m}$$

Assim,

$$F_{pe} = \varepsilon_p \bullet M_p = 111 \bullet 0,022 = 2,442 \text{ kN}$$

$$F_{ye} = \varepsilon_y \bullet M_y = 132 \bullet 0,0147 = 1,94 \text{ kN}$$

Como FPe possui o maior valor, o cálculo da força dinâmica equivalente, se dá pela seguinte expressão:

$$F_e = 0.5F_r + 0.5F_{se} + 0.5F_{re} + F_{pe} + 0.5F_{ye}$$

Logo:

$$F_{pe} = F_{pe} + 0.5F_{ye}$$

$$F_e = 2,442 + 0.5 \bullet 1,94 = 3,412 \text{ kN}.$$

Dessa forma já temos da tabela das diferentes guias lineares, as seguintes definições:

- $C_o = 0 \text{ kN}$  – Carga estática
- $M_P = 0,022 \text{ kNm}$  – Momento em P
- $M_y = 0,0147 \text{ kNm}$  – Momento em Y
- $C = F_e = 3,412 \text{ kN}$  – Carga dinâmica

Assim, será escolhido a guia linear HGH 15CA, com as seguintes especificações, na figura 7, que estão dentro do limite estimado.

### 3-1 HGH-CA/HGH-HA Type

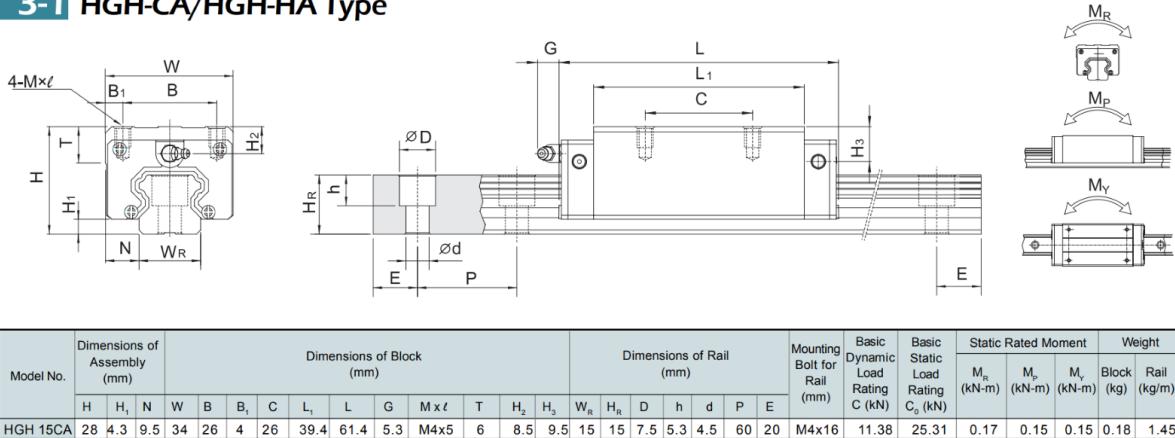


Figura 7. Desenho técnico e especificações da guia e carros HIWIN selecionados

### 1.3.3 Cálculo de vida útil e carga dinâmica

Agora por fim, será verificado se essa guia escolhida está compatível com a carga dinâmica que ela terá que suportar em relação à sua vida útil.

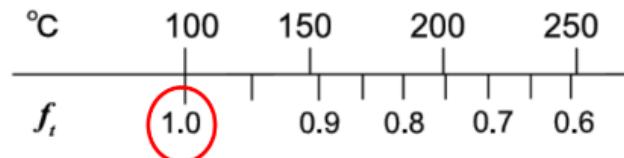
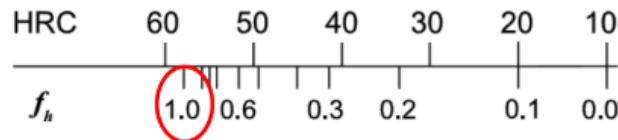
Considerando uma vida útil em horas (Lh) de 15 000 h, e uma velocidade de 1,8 m/min, a vida útil em km (L) é de:

$$L = \frac{Lh \cdot 1,8 \cdot 60}{1000} = 1620 \text{ km}$$

E a carga dinâmica final, em toda vida útil, que deve ser maior que a carga dinâmica anteriormente, é calculada pela fórmula:

$$C = \sqrt[3]{\left( \frac{L \cdot fw \cdot Fe}{fh \cdot ft} \right)} \cdot \frac{1}{50}$$

Os parâmetros necessários, são extraídos da figura 8:



Condição de carga	Velocidade de serviço	$f_w$
Sem impactos & vibração	$V \leq 15 \text{ m/min}$	1 ~ 1.2
Pequenos impactos	$15 \text{ m/min} < V \leq 60 \text{ m/min}$	1.2 ~ 1.5
Carga normal	$60 \text{ m/min} < V \leq 120 \text{ m/min}$	1.5 ~ 2.0
Com impactos & vibração	$V > 120 \text{ m/min}$	2.0 ~ 3.5

Figura 8. Fatores de cálculo da carga dinâmica

Assim tem-se como valor dos fatores:

$$f_h = 1$$

$$f_t = 1$$

$$f_w = 1,2$$

Portanto a carga dinâmica é dada por:

$$C = \sqrt[3]{\left( \frac{1620 \bullet 1000 \bullet 1,2 \bullet 3,412}{1 \bullet 1} \right)} \bullet \frac{1}{50}$$

$$C = 3,75kN$$

Portanto, como esse valor é menor que a suportada **guia linear HGH 15CA**, ela é compatível para o projeto.

## 1.4 Definição final de componentes mecânicos especificados

Para o processo de dimensionamento e especificação dos componentes a serem comprados, utilizou-se catálogos de referência que seguem as normas e padronizações para os respectivos componentes. Ao fim do processo de orçamento optou-se por adquirir todos os componentes de um único fornecedor e portanto deve-se consultar seu catálogo específico e buscar os componentes equivalentes, que sigam as padronizações determinadas. O fornecedor escolhido foi a Kalatec e os componentes equivalentes adquiridos. Foi adquirido o fuso de esferas modelo **R 1605 C7 laminado**. A guia linear modelo **KR 15**. A castanha modelo **SFNUR 1605**. O carro modelo **KRH15VL**. Todos os componentes adquiridos podem ser vistos em maiores detalhes no catálogo da Kalatec localizado no anexo.

## 2. Peças fabricadas

As demais peças relacionadas ao projeto mecânico foram projetadas e usinadas localmente ou impressas em 3D, utilizando filamento polimérico. Todas as peças foram usinadas em alumínio 5052 devido a seu peso reduzido e resistência mecânica suficiente para a aplicação do projeto. Todos os arquivos CAD, assim como os desenhos técnicos das peças usinadas podem ser encontrados nos anexos: “CAD das peças”, “Desenhos técnicos” e “Montagem 3D”.

### 2.1. Base

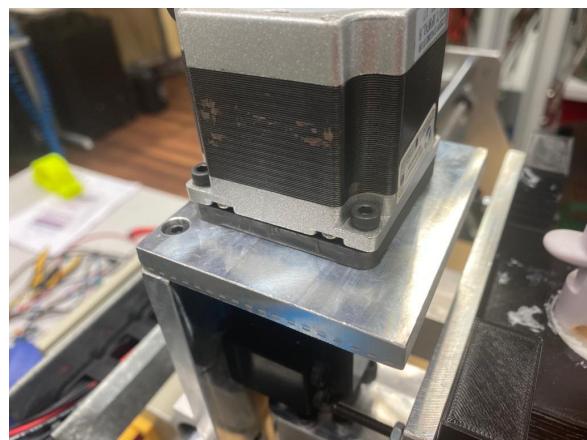
A base é a peça na qual outras partes do projeto como, mancais, batente, guia, suporte do motor de passo e o suporte do fim de curso, estão montadas diretamente. Esta peça foi fixada no eixo Y e está disponível na figura 9.



Figura 9. Base

## 2.2 Suporte do motor

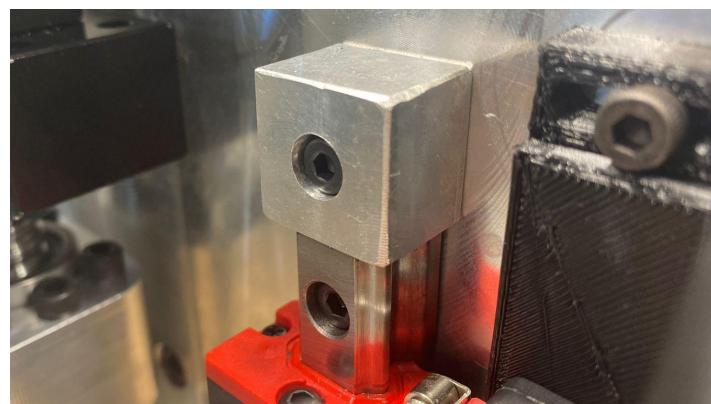
O suporte do motor tem como função servir de ponto de apoio para o motor e foi projetado para estar em uma altura na qual é possível acoplar o eixo Z ao motor. Esta peça está conectada à base, ao motor de passo e ao eixo Z e está disponível na figura 10.



*Figura 10. Suporte do motor*

## 2.3 Batente

Os batentes estão fixados junto ao trilho da guia e a base e tem como função limitar o movimento da mesa, impedindo que o dispositivo se desloque além do curso determinado pela guia, agindo como uma barreira mecânica. A figura 11, ilustra o batente na montagem final.



*Figura 11. Batente*

## 2.4 Suporte da castanha

O suporte da castanha tem como objetivo ser um ponto de apoio para a castanha e está conectada à base do suporte da pipeta, à castanha e ao eixo Z. O suporte da castanha está disponível na figura 12.

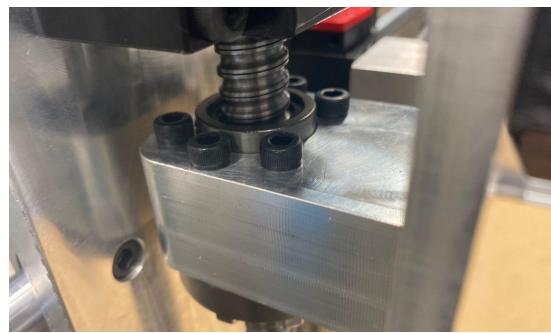


Figura 12. Suporte da castanha

## 2.5 Base suporte pipeta

A base do suporte da pipeta é a peça na qual outras partes do projeto como, o calço da guia, o suporte da pipeta, e suporte da castanha estão fixadas diretamente. Esta peça está disponível abaixo.



Figura 13. Base suporte da pipeta

## 2.6 Calço da guia

O calço da guia é responsável por realizar o acoplamento da base do suporte da pipeta com o carro da guia. A figura abaixo ilustra a peça final.

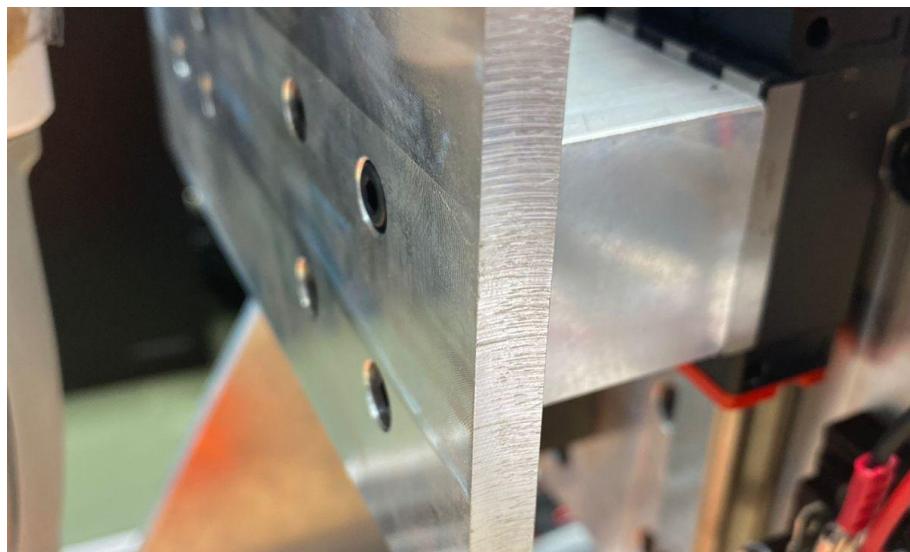


Figura 14. Calço da guia

## 2.7 Suporte do fim de curso

O suporte do fim de curso tem como objetivo ser um apoio para o fim de curso da base. Tanto essa peça quanto o suporte da pipeta foram impressas no FabLab devido à praticidade do processo. O material utilizado foi o filamento ABS e a versão final está disponível na figura 15 abaixo.

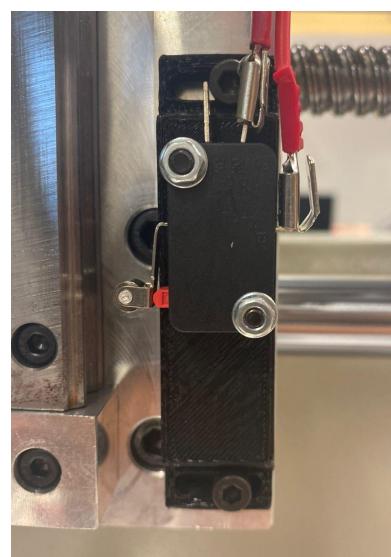


Figura 15. Suporte fim de curso

## 2.8 Suporte da pipeta

Assim como o suporte do fim de curso, o da pipeta também foi impresso com filamento de ABS, como pode ser observado na figura 16. A função dessa peça é fixar a pipeta. Com uma espuma expansiva de poliuretano, criou-se um molde no formato do contorno da pipeta. As figuras que ilustram o processo de fixação da pipeta estão no apêndice.



Figura 16. Suporte da pipeta

## 3. Projeto Eletro-eletrônico

### 3.1 Introdução

O Projeto funcional Eletro-eletrônico consiste em alguns setores, sendo eles:

- **Placa Núcleo:** O Microcontrolador usado é o de 32-bit STMicroelectronics STM32F103RB, e será alimentado com 7V. Ele enviará todos sinais além de alimentar componentes a partir do output de 5V.
- **Debouncing:** O termo bounce se refere a trepidações que podem ocorrer na abertura ou fechamento de chaves mecânicas em circuitos elétricos, gerando múltiplas transições na chave antes de estabilizar em um valor. Dessa forma, transforma-se o efeito eletrônico de uma chave real, em uma chave ideal. Isso é feito através de uma combinação de um circuito RC ao botão da IHM ou de uma chave fim-de-curso, sendo que quando a chave é

acionada/apertada ou desacionada/liberada, o capacitor carrega ou descarrega a partir de uma constante de tempo. Assim, o sinal que será captado pelo microcontrolador virá do circuito RC e não diretamente da chave mecânica. A alimentação do circuito é feita pela placa núcleo com 5V.

- **Step-Down:** Como a fonte tem uma tensão de 24V e diversos componentes necessitam uma tensão menor de alimentação, serão usados dois Regulador de Tensão LM2596 Conversor DC-DC Step Down, sendo um deles transformando para 7V e outro para 9.5V.
- **Acionamento da Pipeta:** Os fios da pipeta funcionam como um contato seco, que quando conectados, a faz funcionar. Dessa forma um Módulo de Relé, alimentado pelo 5V da placa núcleo, irá conectar esse contato, quando acionado pelo software. A pipeta usa uma bateria externa, portanto não necessita de alimentação.
- **Botão de Emergência:** A partir das 2 chaves independentes em estado NF (normalmente fechado), que compõem o Botão de Emergência, um deles irá cortar a alimentação para os motores, e o outro enviar um sinal à placa controladora, já com debouncing, indicando o estado de emergência.
- **LCD:** Para o display do IHM (Interface Homem- Máquina), um LCD de 20x04, usando a comunicação seria I2C. O LCD é alimentado pela placa núcleo com 5V.
- **Acionamento do motor no eixo X e Y:** Através de um driver TB6560 para cada eixo, que é alimentado pela própria fonte de 24V, serão acionados os motores de passo. O driver possui entradas de Pulso, Açãoamento e Direção de giro, portanto basta que o software esteja programado corretamente para o funcionamento.
- **Acionamento do motor no Eixo Z:** O acionamento é composto por três partes. O Módulo de Relé, alimentado pelo 5V da placa núcleo, para sinal de Enable do motor; uma lógica combinacional configurando o Pulso e Direção do motor de passo, também alimentada pela placa núcleo com 5V, formada por dois Flip-Flop JK 74LS112, um circuito integrado de portas lógicas XOR 74HC86 e outro de portas inversoras NOT 74HC04; e por fim o circuito de potência, formado por um Mosfet IRLZ34N, um Resistor de 270 Ohms, outro

de 10k Ohms, fazendo a função de pulldown, e um optoacoplador 4N25 para cada bobina do motor.

### 3.2 Diagrama de Blocos

O diagrama de blocos dos elementos eletro-eletrônicos está representado na Figura 17 a seguir:

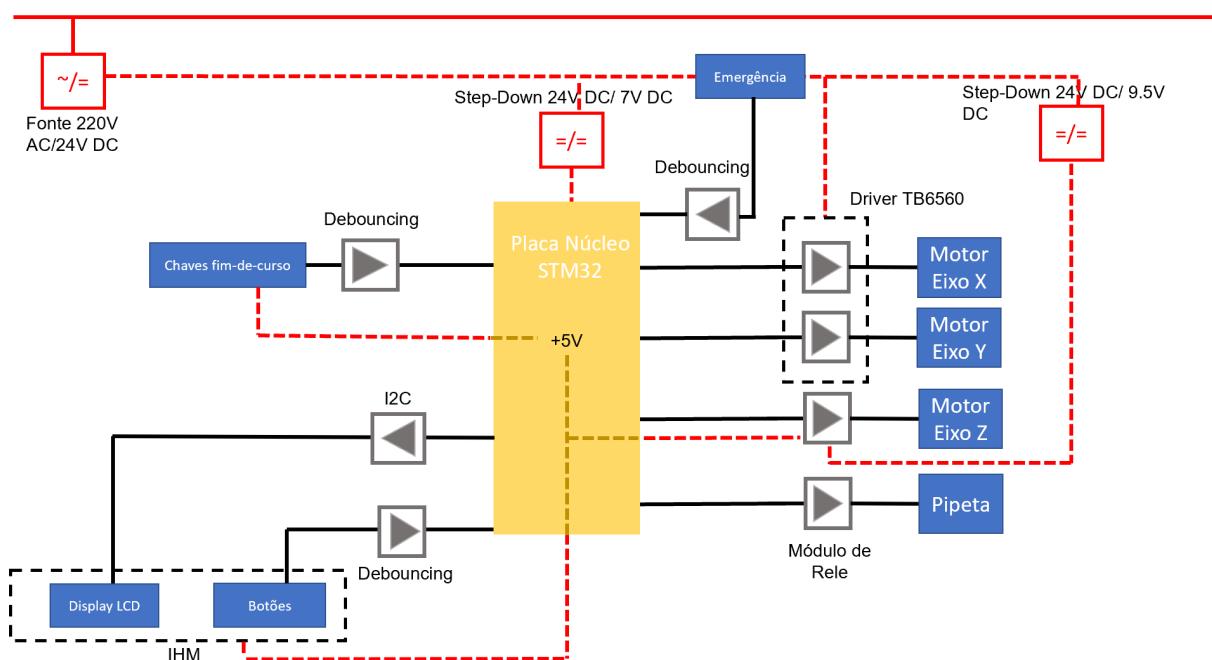


Figura 17: diagrama de blocos dos elementos eletro-eletrônicos

Uma visualização melhorada do acionamento do eixo Z é visto na Figura 18:

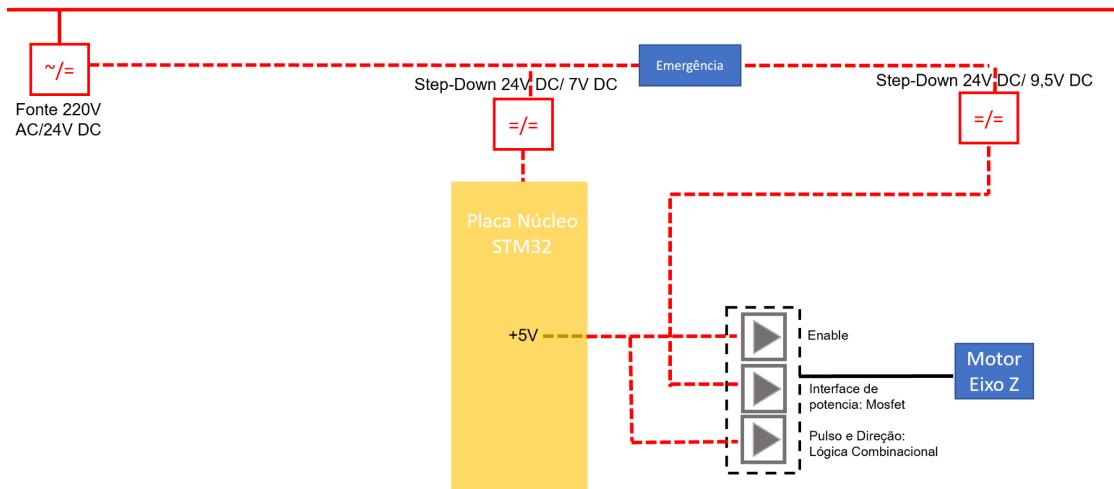


Figura 18: diagrama de blocos do eixo Z

### 3.3 Elementos eletro-eletrônicos

Em aspectos mais técnicos e práticos da montagem do projeto eletro-eletrônico, vamos observar os cálculos induzidos para o circuito, além do seu esquema e montagem no software Proteus.

#### 3.3.1 Placa Núcleo

As diversas ligações do sistema com a placa núcleo, requer uma organização, para que sinais não sejam trocados e que funcione da maneira correta. O DataSheet da placa, além do Manual de Referência, se encontra no anexo “DataSheet dos Componentes”. Todas as entradas e saídas que envolvem a STM32 estão na Tabela 5, a seguir:

Função	Pino I/O
--------	----------

Botão X+	PB4
Botão X-	PB3
Botão Y+	PB10
Botão Y-	PA8
Botão Z+	PA9
Botão Z-	PC7
Chave Fim de Curso X+	PC9
Chave Fim de Curso Y+	PB7
Chave Fim de Curso Z	PA 12
Botão "Confirmar"	PA 11
Botão "Cycle start"	PB 6
Botão "Emergência"	PA 10
Acionamento da Pipeta	PC4
Enable do Motor Eixo Z	PB13
Enable do Motor Eixo X	PC5
Enable do Motor Eixo Y	PB12
LCD - SCL	PB8
LCD - SDA	PB9
Clock/Step	PB15
Direção/Clockwise no eixo X	PC6
Direção/Clockwise no eixo Y	PB11
Direção/Clockwise no eixo z	PB14

Tabela 5: referência de entradas e saídas

A referência da localização de cada pino está na Figura 19, a seguir:

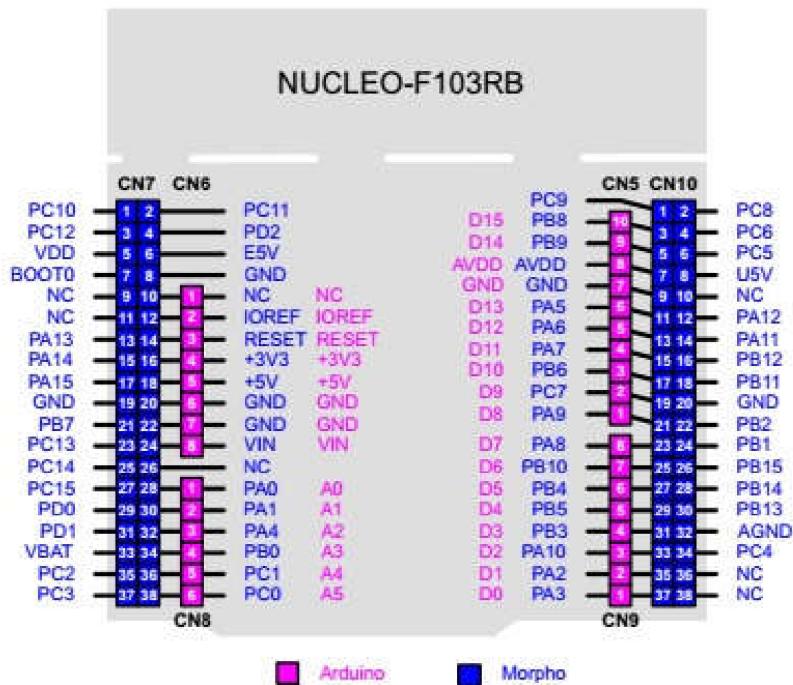


Figura 19: localização dos pinos na STM32

Além disso, foi produzida uma placa PCB onde a placa núcleo encaixa, com objetivo de prevenir mal contato entre os pinos. Sua visualização está na Figura 20 abaixo, e uma foto se encontra no anexo “Fotos PCB”.

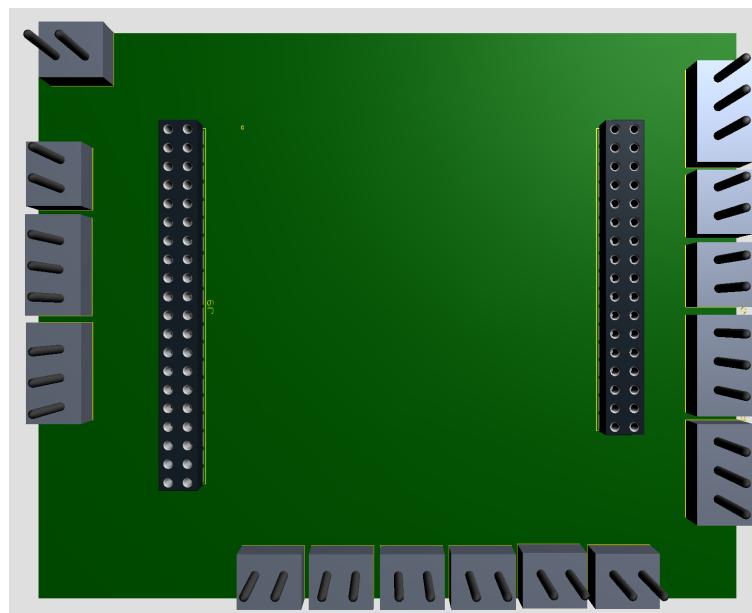


Figura 20: placa PCB para STM32

### 3.3.2 Debouncing

Para o circuito de **Debouncing**, foi usado como base o circuito do Botão de Usuário da placa Microcontroladora, visto na Figura 21.

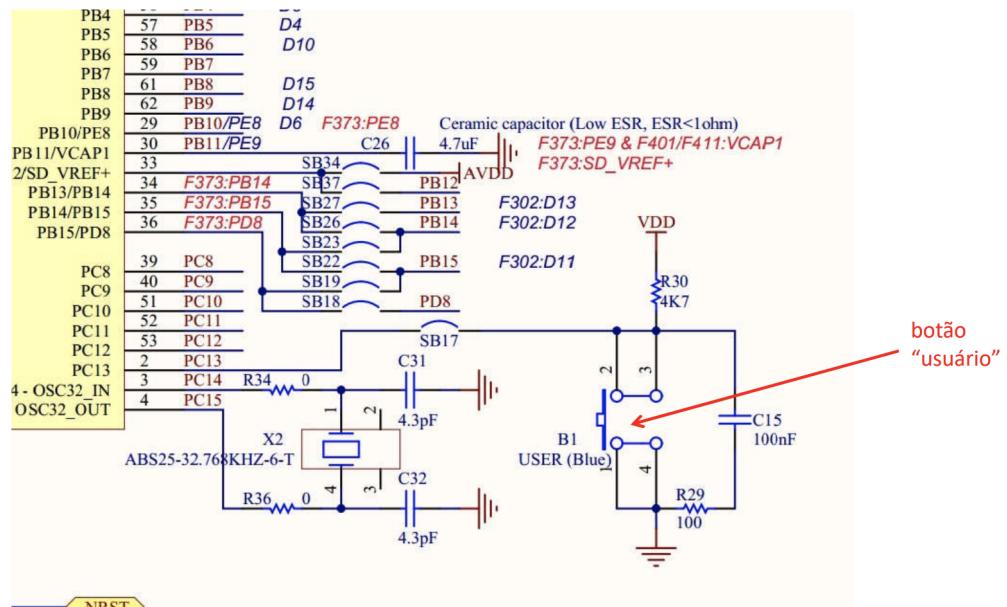


Figura 21: circuito de debouncing do Botão de Usuário

Dessa forma foi esquematizado o circuito para os botões da IHM, visto na Figura 22:

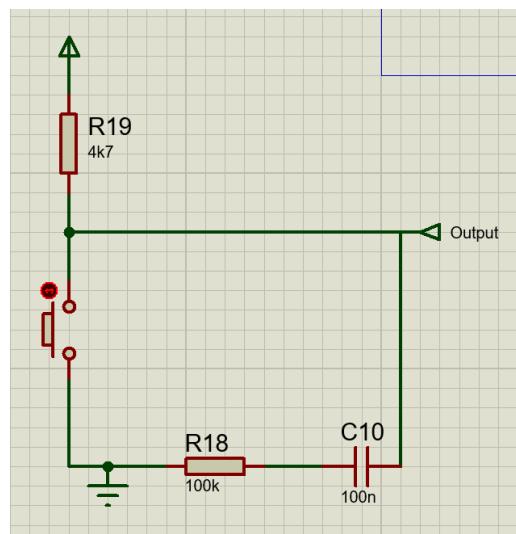


Figura 22: circuito de debouncing do projeto

Para o circuito RC, foi usado um resistor de 100 Ohms em conjunto de um capacitor de 100nF, para que dessa forma, a constante de tempo seja igual a 100 ms. Ou seja, esse é o tempo de descarregamento do capacitor com o resistor.

Já o resistor de 4,7k Ohms, funciona como Pull-Up, sendo que quando a chave mecânica está aberta o sinal recebido pela placa é um sinal “alto”. Porém, quando a chave é fechada, ela funciona como Pull-Down, colocando o sinal como baixo no GND.

Sendo o VCC de alimentação igual a 5V, a corrente consumida quando os botões são fechados é de...

Todos os botões e chaves-fim-de curso, cujos desenhos técnicos se encontram no anexo “Desenho Técnico”, necessitam o debouncing do seu sinal. Portanto foram formatadas duas placas PCB, uma com 9 entradas para debouncings e outra com 6, com a seguinte formato, na Figura 23:

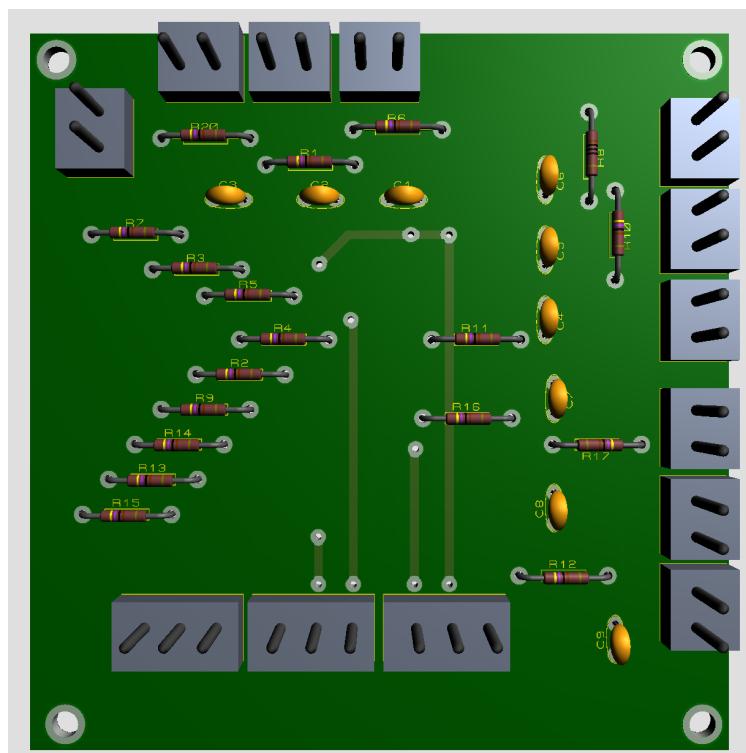


Figura 23: placa de debouncing PCI para 9 chaves mecânicas

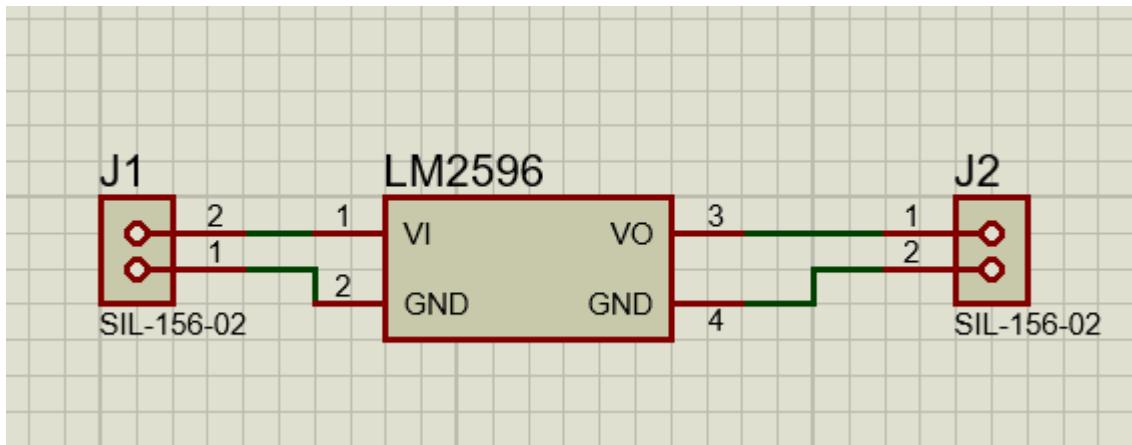
Uma captura de imagem da placa de Debouncing se encontra no anexo “Fotos PCB”.

### 3.3.3 Step-Down

Para o circuito do **Step-Down**, foi usado o LM2596, cujo Datasheet se encontra no anexo “DataSheet dos Componentes”. Foi esquematizada uma placa PCB que serve como suporte do Step-Down, que não vem com uma estrutura boa para ser encaixada no projeto. Esse esquema está na Figura 25, onde as entradas 1 e 2 são o input proveniente do 24V, e a saída 3 e 4, os outputs com a tensão regulada de 9.5V e de 7V.

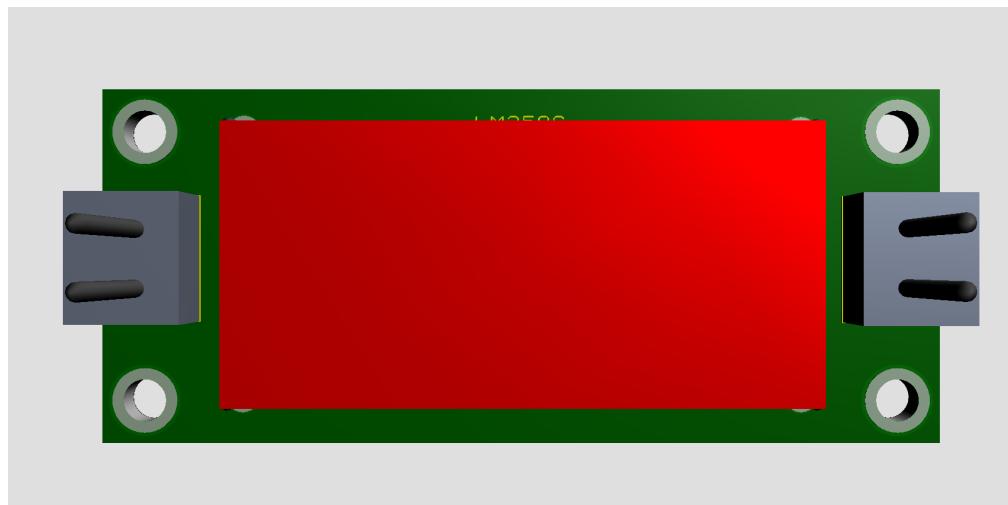


Figura 24: LM2596



*Figura 25: circuito do Step-Down*

A placa PCB se encontra na Figura 26, a seguir, cuja foto e encontra no anexo “Fotos PCB”:



*Figura 26: PCB do Step-Down*

### 3.3.4 Açãoamento da Pipeta

Para o circuito do **Açãoamento da Pipeta**, foi usado um Módulo de Relé, que possui com o seguinte circuito esquemático interno, na Figura 27. O módulo que possui dos relés, será usado um deles para o açãoamento da pipeta e outro para o Enable do Driver do Motor do Eixo Z:

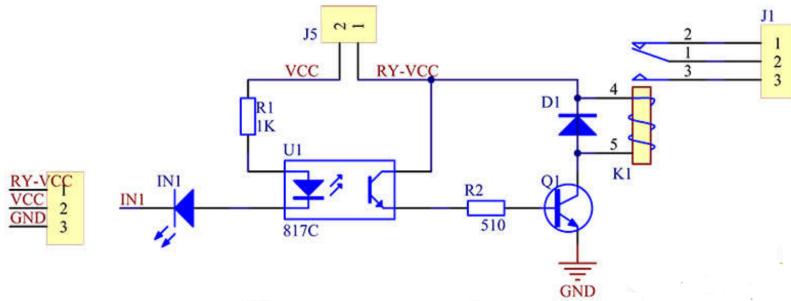


Figura 27: circuito do modulo do Relé

O acionamento da pipeta funciona da forma que, quando as suas duas entradas se conectam, ela realiza o trabalho de absorção ou dispensa. O esquemático dos pinos de entrada e saída do módulo de Relé, estão demonstrados na Figura 28, a seguir. Dessa forma a entrada “NO” estará conectada em um dos fios da pipeta e o outro fio da pipeta, no “COM”. Portanto, quando a placa microcontroladora enviar um sinal de nível alto para o Módulo, o optoacoplador irá acionar o transistor e assim, fechar a chave mecânica, fazendo a pipeta realizar seu trabalho.

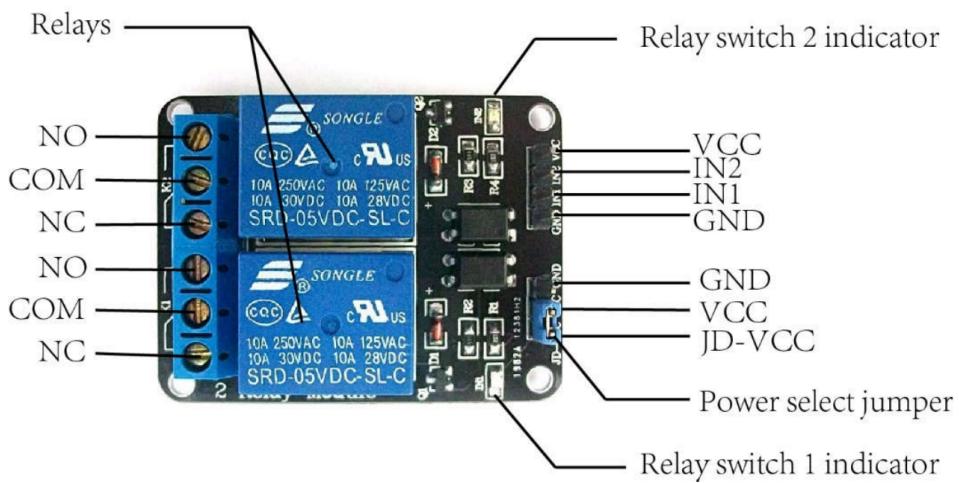


Figura 28: Entradas e saídas do módulo do Relé.

### 3.3.5 Botão de Emergência

Para o **Botão de Emergência**, mostrado na Figura 29, irá cortar a alimentação dos motores assim, e também avisar a placa núcleo, que ele foi acionado. Como ambas portas estão fechadas normalmente (NF), ao apertar o botão, as chaves vão se abrir e assim abrir o circuito, cancelando a passagem de corrente para os drivers dos motores, e no caso do aviso a placa núcleo, um sinal de nível baixo será enviado, já que o botão é um pull-down por causa do circuito de Debouncing.

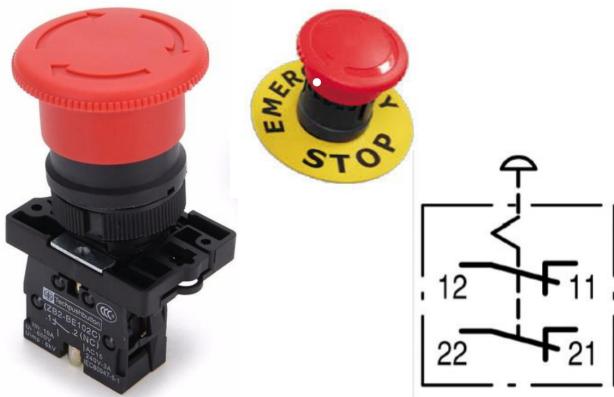


Figura 29: Botão de emergência e sinalização do funcionamento

Dessa forma, apertar o botão realiza as seguintes ações:

- Desabilitar qualquer rotina que executa o movimento da máquina.
- Avisar o usuário do status de Emergência via LCD.
- Reset de todas variáveis, seja de referenciamento ou de quantidade de pipetagens.
- Ao desabilitar o botão de emergência, a máquina volta ao menu inicial.

### 3.3.6 LCD

O **LCD (Liquid Crystal Display)** 20x04,, será usado para mostrar o passo a passo do uso da máquina, assim como avisos da IHM. Seu datasheet se encontra no anexo “DataSheet dos Componentes”. Abaixo, na Figura 30, é mostrada uma imagem do LCD.

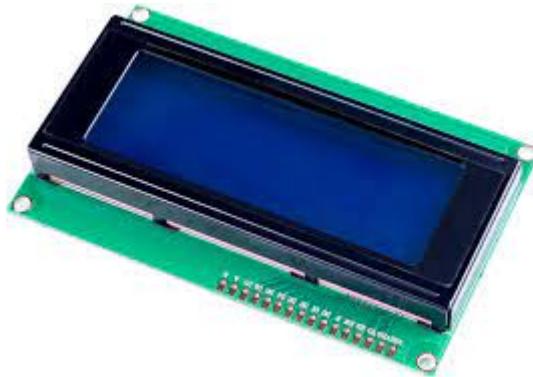


Figura 30: Display LCD.

Todos os comandos vêm de sinais da placa núcleo, através da comunicação serial I2C, cujo DataSheet se encontra no anexo “DataSheet dos Componentes” e sua foto se encontra na Figura 31, abaixo:



Figura 31: Módulo I2C

Sua alimentação é da placa núcleo é de 5V e suas duas entradas SDA e SCL conectam ao microcontrolador.

### 3.3.7 Acionamento do Motor do Eixo X e Y

Para o **Driver do Motor do Eixo X e Y**, foi usado o driver comercial TB6560, cuja imagem está na Figura 32, a seguir. Seu DataSheet se encontra no Anexo “DataSheet de Componentes”.

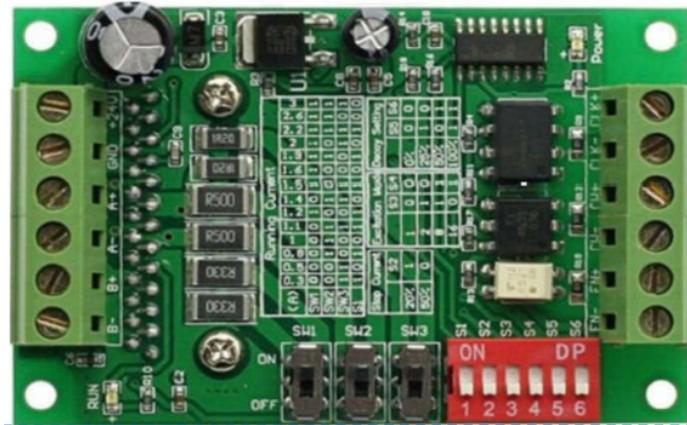


Figura 32: Driver do Motor X e Y

As configurações de corrente são:

- **SW1:** ON
- **SW2:** OFF
- **SW3:** OFF
- **S1:** ON
- **S2:** ON
- **S3:** OFF
- **S4:** OFF
- **S5:** OFF
- **S6:** OFF

Portanto, o máximo de corrente que o driver permite é 1.2 A, com um stop current de 20%. Assim, ao testar, sob uma alimentação de 24V, cada eixo consome 0.3A de corrente.

### 3.3.8 Acionamento do Motor do Eixo Z

Para o **Acionamento do Motor do Eixo Z**, o Enable é ativado pelo módulo de Relé, já explicado anteriormente, que corta a chegada de alimentação de 9,5V do motor.

Já a lógica combinacional, é composta por dois Flip-Flop JK, duas portas XOR e duas portas NOT XOR, ou seja, XNOR, cujos DataSheet se encontram no anexo “DataSheet dos Componentes”. Acontece que a partir dessa lógica, com uma entrada de Pulso (STEP) e outra de Direção(DIR) O esquemático da lógica é visto no esquemático abaixo, da Figura 33:

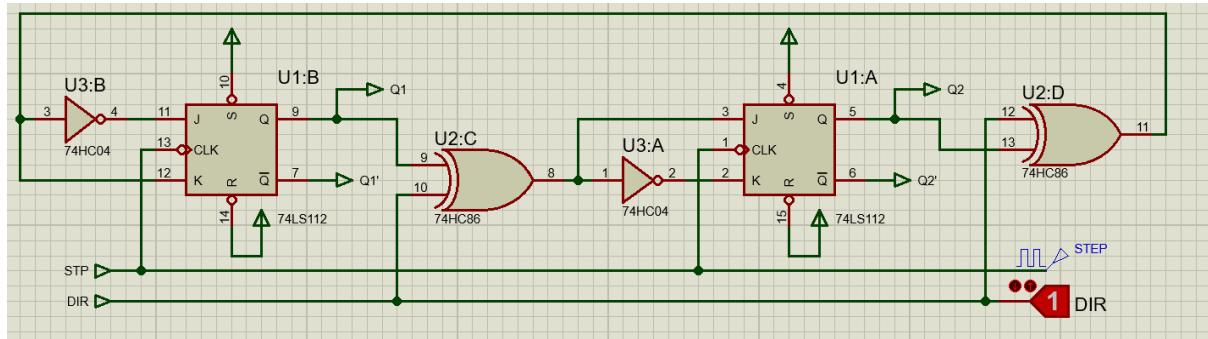


Figura 33: Lógica combinacional do Eixo Z

Assim, foi fabricada a PCB, visto na Figura 34, abaixo. A foto da PCB se encontra no anexo “Fotos PCB”.

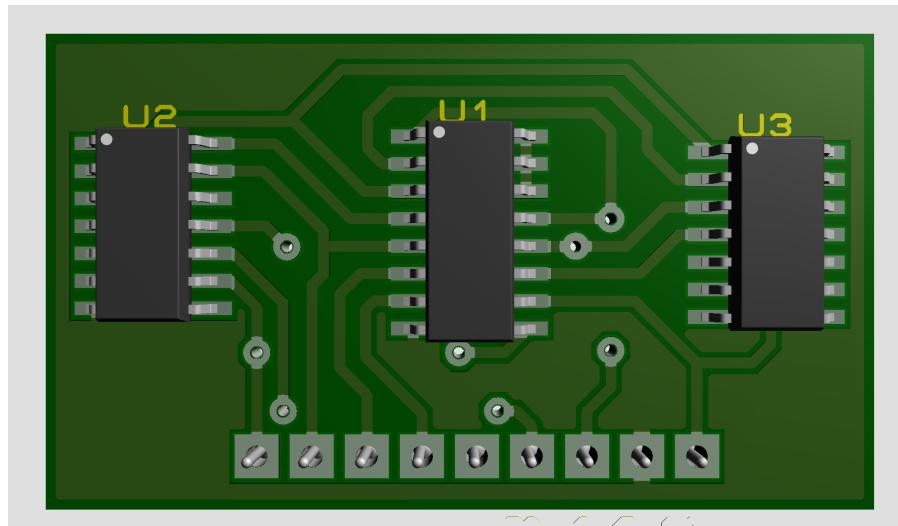


Figura 34: PCB da Lógica combinacional do Eixo Z

Além disso, para a parte de potência, foi utilizado um circuito composto por quatro optoacopladores e quatro Mosfet. O optoacoplador foi utilizado com o objetivo de isolar qualquer conexão da lógica com a alimentação do motor. Ademais, o mosfet foi empregado para chavear a tensão de 5V para 9.5V, que é o necessário para que o motor forneça a corrente necessária, para que haja torque no motor.

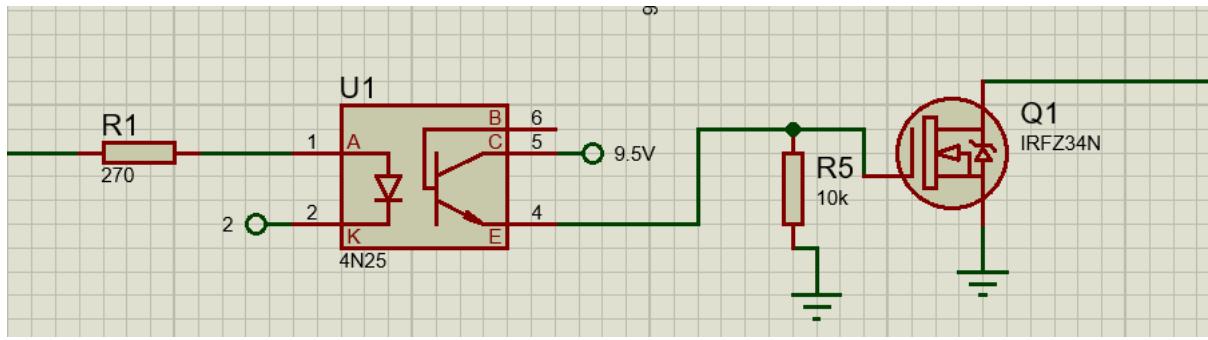


Figura 35. Circuito com optoacoplador

O resistor R5 da imagem é usado como pull-down quando a bobina do motor não estiver acionada no momento, por isso usado um resistor de 10k Ohms, posso consome bastante tensão. Para dimensionar a resistência R1, antecessor ao optoacoplador, foi aplicada a lei de Ohm:

sendo

- if, corrente forward, necessária para acionar o optoacoplador, igual 0,011A.
- U1: A tensão que chega da placa núcleo, igual a 4.5V. Como a tensão não é exatamente a nominal, 5V, ela foi colocada como um valor um pouco menor para os cálculos.
- Ud: A tensão que o diodo consome, igual a 1,3V.

$$U1 - Ud - R1 \times if = 0$$

$$R1 = \frac{4,5 - 1,3}{0,011}$$

$$R1 = 273\Omega, \text{ com valor comercial de } 270\Omega.$$

Desse modo, a placa PCB foi feita e mostrada na Figura 36 abaixo:

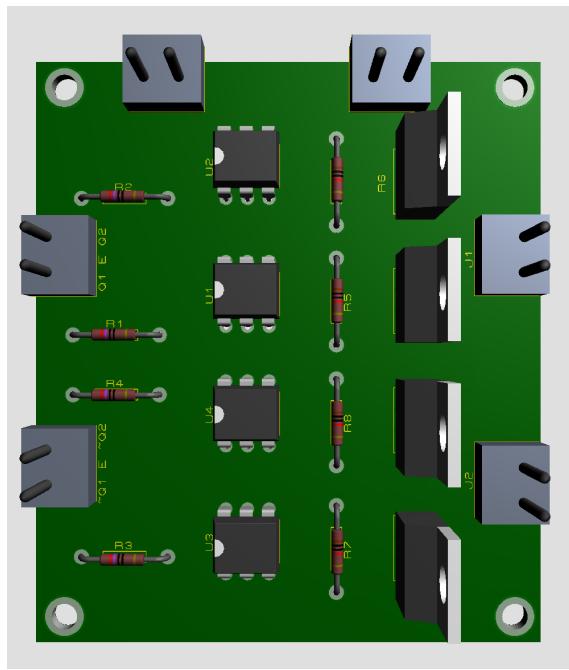


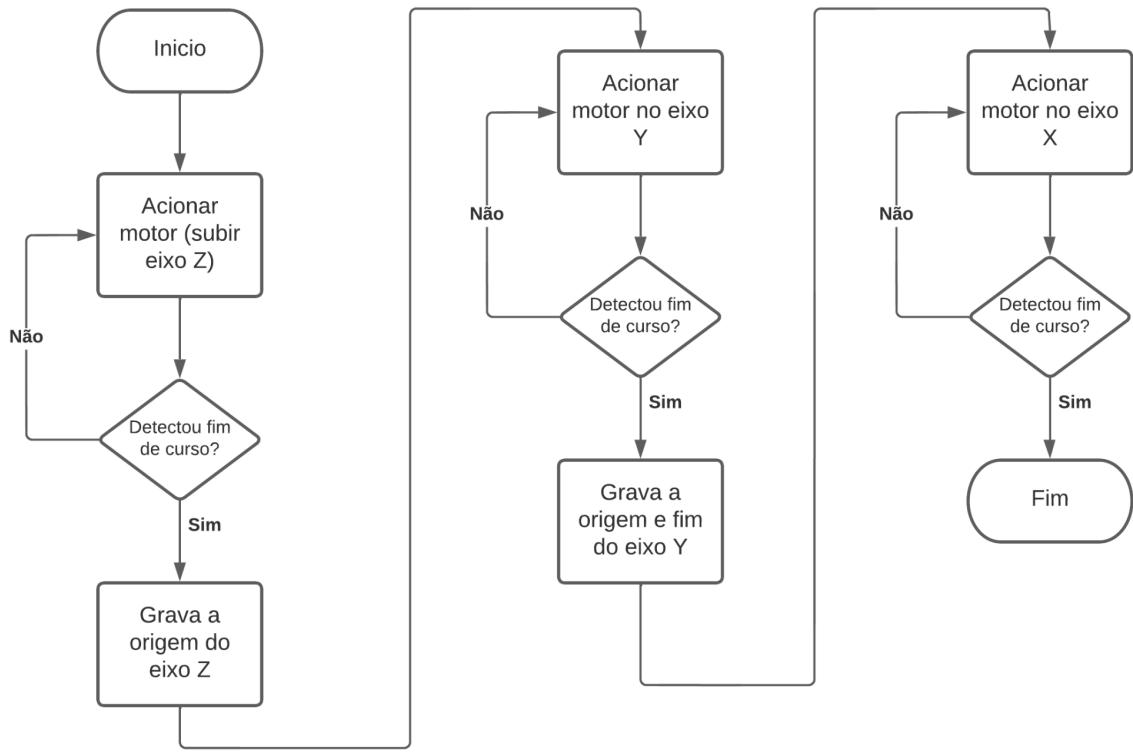
Figura 36: Circuito de potência do Eixo Z

Portanto, o acionamento do Motor no Eixo Z, é composto pela junção desses três elementos.

## 4. Projeto de Software

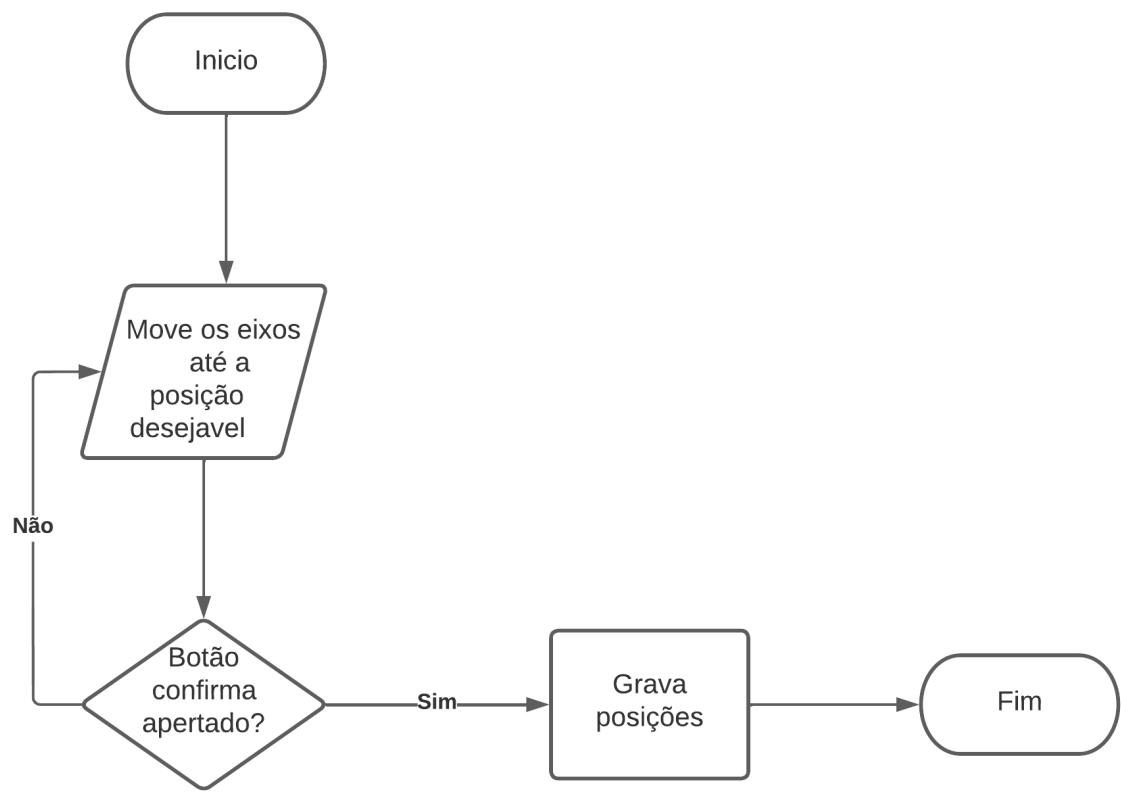
Antes de fazer a programação do projeto foram feitos fluxogramas de cada operação que a máquina deveria possuir. Esses fluxogramas mostrariam o passo a passo da operação do início ao fim.

O primeiro fluxograma feito foi o de referenciamento da máquina.



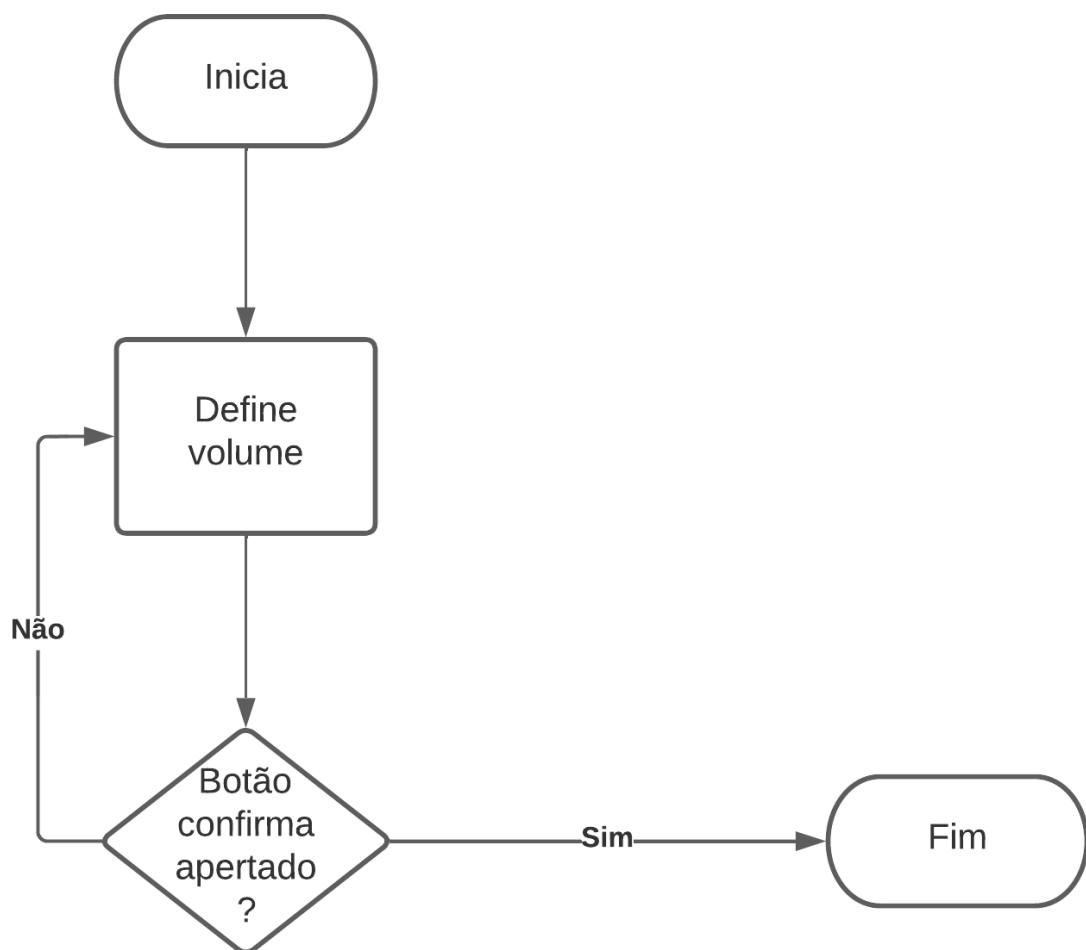
*Fluxograma 1: Referenciamento*

O segundo fluxograma feito foi do jog para a fonte. Esse operação permite o operador da máquina mover a pipeta livremente pelo curso útil permitido e apertando o botão confirmar, grava a posição do fonte/reservatório de líquido.



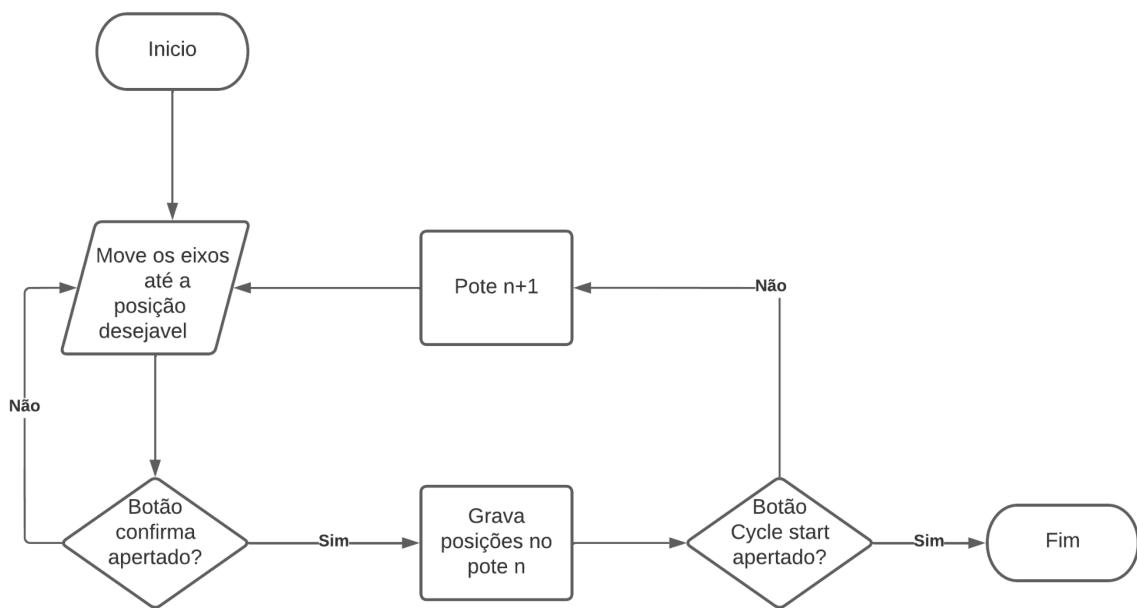
*Fluxograma 2: Jog fonte*

O terceiro fluxograma é o que permite ao operador definir o volume que será pipetado no pote de depósito.



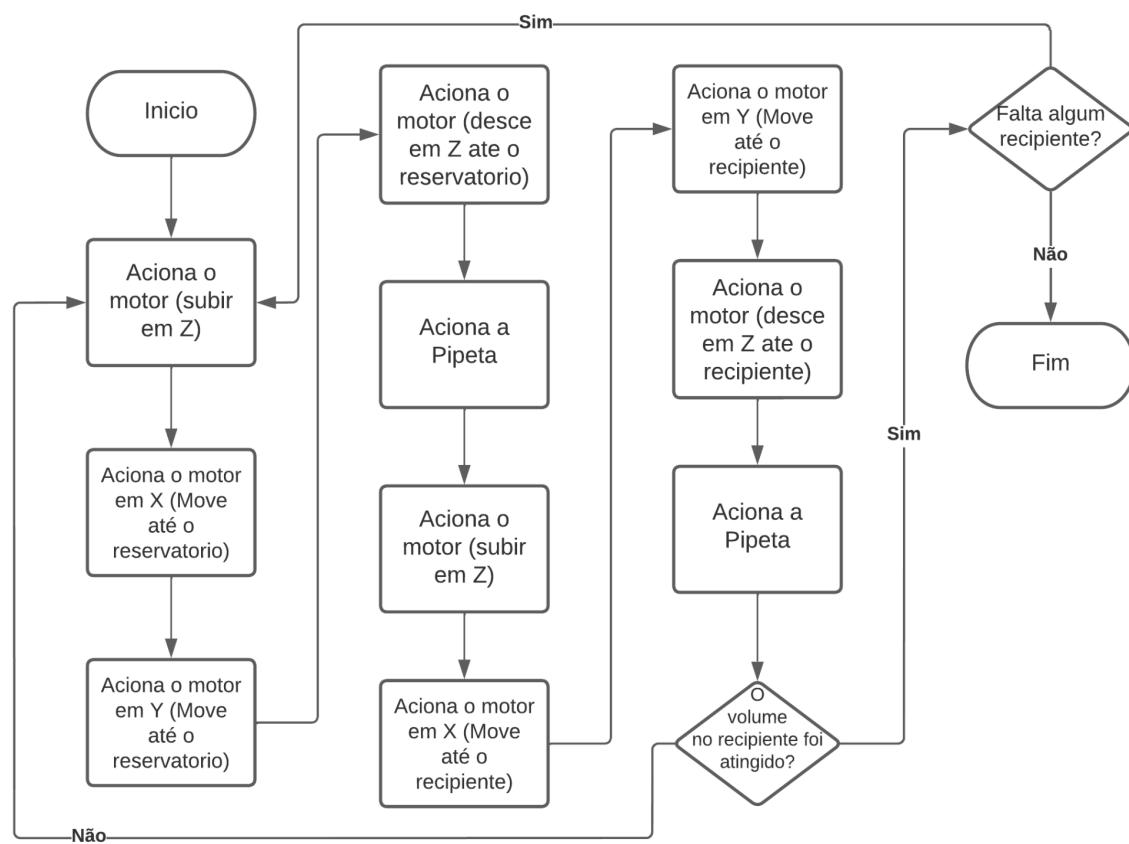
Fluxograma 3: Definir volume

O quarto fluxograma é o que permite ao operador definir a posição de 1 ou mais potes de depósitos pelo curso útil permitido da máquina.



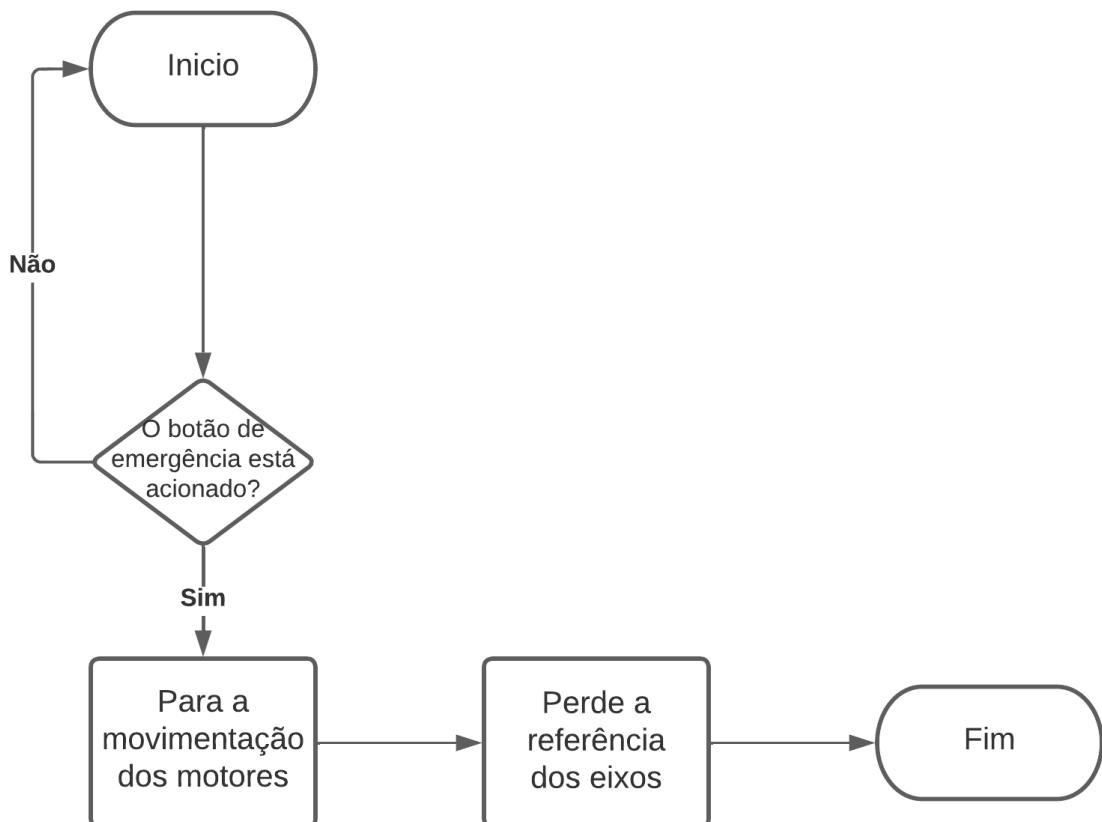
#### *Fluxograma 4: Jog depósito*

O quinto fluxograma é o do ciclo automático. Feito todas as operações descritas anteriormente é possível iniciar o ciclo de pipetagem automático.



*Fluxograma 5: Ciclo automático*

Também foi feito um sexto fluxograma que mostra como será o funcionamento da máquina caso o botão de emergência seja acionado.



*Fluxograma 6. Emergência*

## 5. Interface Homem-Máquina

O IHM desenvolvido tem 9 botões, a seguir tem o layout da disposição do botões, que foram escolhidos a partir do benchmarking feito no início do projeto:



Figura 37. IHM

- z+ → responsável por mover o eixo z para cima e incrementa o volume que será pipetado
- z- → responsável por mover o eixo z para baixo e decrementa o volume que será pipetado
- x+ → responsável por mover o eixo x
- x- → responsável por mover o eixo x
- y+ → responsável por mover o eixo y
- y- → responsável por mover o eixo y
- Botão confirma → responsável para passar para próxima etapa botão utilizado para confirmar
- Botão vermelho → responsável por iniciar o ciclo automático
- Botão de emergência → responsável por cortar a alimentação dos motores

## 6. Norma Regulamentadora

A NR-12, a Norma Regulamentadora 12, estabelece requisitos técnicos e legais obrigatórios sobre os aspectos mínimos de segurança e saúde do trabalho. O não cumprimento pode acarretar a aplicação das penalidades previstas na legislação pertinente. Portanto respeitando a lei, a máquina projetada respeita os seguintes aspectos, seja na parte mecânica, eletrônica ou descrição da máquina para o operador:

- **Princípios gerais:** norma regulamentadora que define referências técnicas, princípios fundamentais e medidas de proteção para garantir a saúde e a integridade física dos trabalhadores. Estabelece requisitos mínimos para a prevenção de acidentes e doenças do trabalho nas fases de projeto e de utilização de máquinas e equipamentos de todos os tipos.
- **Parte elétrica:** as instalações elétricas devem estar em condições que permitam o uso da máquina sem risco de lesão. Artigos 12.16; 12.18; 12.20; 12.20.1. Prevenção adotadas como: controle de sobretensão e sobrecorrente, cuidados com o quadro de energia e isolamento de qualquer fio energizado.
- **Arranjo físico:** artigo 12.11 . Máquinas estacionárias devem possuir medidas preventivas para que elas não se desloquem intempestivamente por forças externas ou internas previsíveis.
- **Sistemas de segurança:** a máquina deve dispor de componentes que reduzam os riscos de acidentes. Artigo 12.38. Proteções fixas, móveis e dispositivos de segurança interligados.
- **Ergonomia:** A máquina deve ser projetada de forma ergonómica, respeitando as variações e padrões físicas e cognitivas do trabalhador, bem como seus esforços. Artigos 12.94; 12.95. De maneira geral, deve ser de uso fácil, seguro e minimamente confortável.
- **Manuais:** A máquina deve acompanhar um manual de instruções fornecido pelo fabricante que tenha informações relativas à segurança durante todas as fases de utilização. Artigo 12.125.
- **Sinalização:** A máquina deve possuir sinalizações para advertir trabalhadores e terceiros sobre os riscos a que estão sujeitos. Artigos 12.116; 12.117. As sinalizações devem ficar em localização visível e devem ser de fácil compreensão.

- **Acionamento e parada:** artigos 12.24; 12.32; 12.33. Comandos simples, intuitivos, de fácil e seguro acesso, eficiente e que produza alguma sinalização pós acionamento.
- **Parada de Emergência:** artigos 12.24; 12.32; 12.33. Comandos simples, intuitivos, de fácil e seguro acesso, eficiente e que produza alguma sinalização pós acionamento.

## 7. Bibliografia

Norma NR-12:

<https://www.gov.br/trabalho-e-previdencia/pt-br/composicao/orgaos-especificos/secretaria-de-trabalho/inspecao/seguranca-e-saude-no-trabalho/ctpp-nrs/norma-regulamentadora-no-12-nr-12>, acesso 12/12/2022.