



Curso de Tecnologia em Eletrônica Industrial

Desenvolvimento de Módulo Eletrônico para  
Controle de Impressora 3D

Douglas Braz Piovesan – 13103883

Renato dos Santos de Sousa Junior – 13103972

São Paulo, 25 de janeiro 2015

Douglas Braz Piovesan  
Renato dos Santos de Sousa Junior

Desenvolvimento de Módulos Eletrônicos para Controle de Impressoras 3D

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC), apresentado como exigência para conclusão do Curso de Tecnologia em Eletrônica Industrial da Faculdade de Tecnologia de São Paulo, sob orientação do Profº Roberto Katsuhiko Yamamoto.

São Paulo, 25 de janeiro de 2015

## Resumo

Este trabalho possui o objetivo de apresentar o desenvolvimento de um módulo eletrônico de controle de impressoras, do tipo extrusora de plástico ABS, de objetos em três dimensões. Módulos estes que possuam seu controle central realizado por microcontroladores da família PIC e que possuem sua programação realizada em linguagem C. Ainda, como características dos módulos, será permitida uma interface usuário-máquina, via comunicação USB, através do *HID Terminal*.

## Abstract

This work has the objective to present the electronic controller module development for a three dimensions objects printer, the kind of ABS plastic extruder. This module has a central control made by a microcontroller from a PIC family it has a built-in language C programming. Yet, as characteristics of modules, user-machine interface, USB communication will be allowed through the HID Terminal.

## Sumário

1.1.	Impressoras em três dimensões .....	8
1.2.	Tipos de impressora 3D .....	8
1.3.	Proposta de trabalho.....	9
1.4.	Objetivo .....	9
2.	Conceito .....	9
2.1.	Estrutura mecânica .....	9
2.2.	Hardware .....	10
2.2.1.	Fonte de alimentação .....	10
2.2.2.	Motor de passo .....	11
2.2.2.1.	Necessidades.....	11
2.2.2.2.	NEMA 17.....	11
2.2.3.	Extrusora.....	12
2.2.4.	Mesa Aquecida .....	13
2.2.5.	Driver L298 .....	14
2.2.6.	Controlador L297.....	16
2.2.7.	Microcontrolador PIC18F4550.....	20
2.2.7.1.	Módulo USB .....	21
2.2.8.	Microcontrolador PIC18F4520.....	22
2.2.9.	Optoacopladores .....	22
2.2.10.	TIP32 .....	22
2.2.11.	IRF540.....	23
2.3.	<i>Firmware</i> .....	23
3.	Etapas de desenvolvimento.....	23
3.1.	Estrutura mecânica .....	23
3.2.	<i>Hardware</i> .....	25
3.2.1.	<i>Driver</i> de controle do motor-de-passo.....	25
3.2.1.1.	L297 – Pré-requisitos .....	25
3.2.1.2.	Testes do L297 .....	26
3.2.1.3.	Circuito do L298.....	27
3.2.1.4.	Circuito do Driver do Motor de Passo .....	28
3.2.2.	Controle de temperatura.....	30
3.2.2.1.	<i>Hardware e Firmware</i> .....	30
3.2.2.2.	Fluxograma funcional.....	33
3.2.3.	Microcontrolador PIC 18F4550.....	39

3.2.3.1.	<i>Clock</i> .....	39
3.2.3.2.	USB.....	40
3.2.3.3.	Saídas de comando para os Drivers X, Y, Z e E.....	41
3.2.3.4.	Circuito eletrônico com o Microcontrolador .....	42
3.2.4.	PCI (Placas de Circuito Impresso).....	44
3.2.4.1.	PCI do L298.....	44
3.2.4.2.	Lay-out da PCI do L297.....	45
3.2.4.3.	Lay-out da PCI do Controle de Temperatura .....	47
3.2.4.4.	Lay-out da PCI do Microcontrolador .....	49
3.2.4.5.	Processo de fabricação .....	52
3.2.4.6.	PCI L297 e L298 Concluída.....	53
3.2.4.7.	PCI do Microcontrolador Concluída.....	54
3.2.5.	Lista de materiais eletrônicos .....	55
3.3.	Firmware do Microcontrolador PIC18F4550 .....	56
3.3.1.	Fluxograma.....	56
3.3.2.	Lógica de funcionamento .....	75
3.3.2.1.	Comunicação USB via HID .....	75
3.3.2.2.	Ações realizadas pelo PIC .....	77
3.4.	Testes de Funcionamento.....	77
3.4.1.	Movimentação dos eixos.....	77
3.4.1.1.	Comandos/Protocolos e ligações para testes.....	78
3.4.2.	Controle de temperatura.....	79
3.4.3.	Simulação de impressão .....	80
4.	Resultados e discussões.....	80
4.1.	Quanto ao controle via comunicação USB.....	80
4.2.	Quanto ao controle de temperatura.....	81
4.3.	Quanto a impressão .....	81
5.	Conclusão.....	82
5.1.	Objetivo técnico .....	82
5.2.	Empecilhos .....	84
5.3.	Desafios futuros.....	84
5.4.	Considerações finais.....	85

## Índice de Ilustrações

Figura 1 - Impressora 3D modelo Prusa Mendel V2.....	10
Figura 2 - Extrusora de polímero .....	13
Figura 3 - Mesa Aquecida .....	14
Figura 4 - Diagrama de Blocos do Driver L298 .....	15
Figura 5 - Diagrama de blocos funcional .....	17
Figura 6 - Aplicação do L297 com o L298.....	19
Figura 7 - Diagrama dos Terminais do PIC18F4550 .....	21
Figura 8 - Processo de Montagem da Estrutura Mecânica .....	24
Figura 9 - Modo normal de Operação do Drive (extraído do DataSheet).....	26
Figura 10 - Modo de Operação em Meio-Passo (Extraído do DataSheet) .....	27
Figura 11 - Driver do Motor-de-Passo (desenvolvido através do Proteus 8 da Labcenter Electronics).....	29
Figura 12 - Sistema para controle da temperatura na mesa e extrusora .....	32
Figura 15 - Fluxograma. Controle de Temperatura, página 3.....	35
Figura 16 - Fluxograma. Controle de Temperatura, página 4 .....	36
Figura 22 - Padrões para conectores USB .....	41
Figura 27 - Visualização 3D via Proteus 8: Face superior com componentes da PCI do L297 .....	46
Figura 34 - Terminais e Funções do PIC utilizados no projeto .....	49
Figura 36 - Visualização 3D via Proteus 8: Face inferior da PCI.....	50
Figura 37 - Visualização 3D via Proteus 8: Face superior com componentes na PCI..	51
Figura 38 - Layout Superior da PCI.....	51
Figura 39 - Layout Inferior da PCI.....	52
Figura 41 - Lado inferior do Modulo .....	53
Figura 42 - Modulo Driver concluído .....	54
Figura 43 - PCI do Microcontrolador - face dos componentes.....	54
Figura 44 - PCI do Microcontrolador - face de soldagem .....	55
Figura 45 - Configuração do microcontrolador .....	56
Figura 47 - Fluxograma, pagina 2.....	58
Figura 48 - Fluxograma, pagina 3.....	59
Figura 49 - Fluxograma, pagina 4.....	60
Figura 51 - Fluxograma, pagina 6.....	62
Figura 52 - Fluxograma, pagina 7.....	63
Figura 53 - Fluxograma, pagina 8.....	64
Figura 54 - Fluxograma, pagina 9.....	65
Figura 55 - Fluxograma, pagina 10.....	66
Figura 56 - Fluxograma, pagina 11.....	67
Figura 57 - Fluxograma, pagina 12.....	68
Figura 58 - Fluxograma, pagina 13.....	69
Figura 59 - Fluxograma, pagina 14.....	70
Figura 61 - Fluxograma, pagina 16.....	72
Figura 62 - Fluxograma, pagina 17.....	73
Figura 65 - Protocolo utilizado no HID Terminal.....	76
Figura 66 – Placa principal de controle e drivers .....	78
Figura 67 – Impressão em 3D de um objeto simples .....	82

Figura 68 – Módulos eletrônicos para controle de impressora 3D .....	83
Figura 69 – Impressora 3D concluída .....	84

## Índice de Tabelas

Tabela 1 - Pinagens e funções.....	15
Tabela 2 - Características Elétricas Máximas de Operação .....	16
Tabela 3 - Funções e Terminais do L297 .....	18
Tabela 4 - Funções do Terminais do L297 (continuação) .....	19
Tabela 5 - Especificações do PIC18F4550 .....	20
Tabela 6 - Especificações do PIC18F4520 .....	22
Tabela 7 - Funções dos PORTS de saída do PIC .....	41

## 1. Introdução

### 1.1. Impressoras em três dimensões

Diferentemente das impressoras comuns do mercado, que imprimem textos e imagens em papel (2D), impressoras 3D, possuem a capacidade de construir uma estrutura em três dimensões, ou seja, imprimir algo com comprimento, largura e altura/profundidade.

A técnica por trás desta capacidade chama-se Produção por Adição (AM – “Additive Manufacturing”), a qual o princípio da montagem de objetos se faz por adição de camadas de material.

AM é um termo técnico estabelecido pela ASTM (American Society for Testing and Materials).

### 1.2. Tipos de impressora 3D

Os tipos mais conhecidos são os seguintes:

- Impressora a deposição de pó, a qual funciona da seguinte maneira. Um rolo deposita uma fina camada (micrômetros) de giz e então o cabeçote da impressora, enquanto faz o movimento que dará origem ao desenho da camada, injeta um líquido aglutinante. Este processo se repete até atingir o modelo esperado.
- Impressoras a laser, constituídas por uma fonte de laser, um conjunto de espelhos e um recipiente onde é depositado um líquido fotossensível. Fazem o seguinte processo: Ao movimentar os espelhos, em função do desenho da camada a ser formado, o líquido reage e enrijece pela incidência de luz e assim o processo irá se repetir com a adição de mais líquido.
- Impressoras por extrusão de polímero (PLM): compostas por uma mesa aquecida (móvel ou não) e por um cabeçote móvel onde se fixa o extrusor. Sendo assim, ao movimentar o cabeçote em função do desenho que se quer obter para a camada, pode-se construir o objeto camada a camada através da deposição de filetes de plástico aquecido. Este modelo em questão será o alvo do desenvolvimento do Módulo Eletrônico deste trabalho.

### 1.3. Proposta de trabalho

Este Trabalho de Conclusão de Curso baseia-se no desenvolvimento de um módulo eletrônico de baixo custo para o controle de uma Impressora 3D para modelagem de trabalhos acadêmicos visando substituir os módulos de Arduino amplamente utilizados.

Atualmente existem muitos modelos e marcas de Impressoras 3D no mercado, entretanto todos possuem um custo muito elevado, pois além de peças caras, possuem elementos eletrônicos de alto custo e de caráter generalista, no geral o Hardware Arduino, que pretende-se substituir por uma eletrônica voltada exclusivamente para esta finalidade.

Porém neste trabalho o objetivo é reduzir o preço final deste equipamento, através da parte eletrônica, para que se torne acessível à estudantes universitários

Sendo assim, com maior acessibilidade a esta tecnologia inovadora (Impressoras 3D), espera-se que haja uma facilitação para a construção de modelos/protótipos de trabalhos acadêmicos e também o aprimoramento desta tecnologia.

### 1.4. Objetivo

O objetivo técnico deste trabalho é permitir o controle de uma Impressora 3D e com que a mesma esteja habilitada a executar sua função através do módulo desenvolvido.

## 2. Conceito

### 2.1. Estrutura mecânica

A estrutura mecânica é baseada no projeto da Impressora 3D RepRap Prusa Mendel V2, sendo este do tipo “OPEN”, ou seja, aberto ao público para fabricação de cópias ou modificação.

Um modelo desta estrutura pode ser visto na Figura 1.

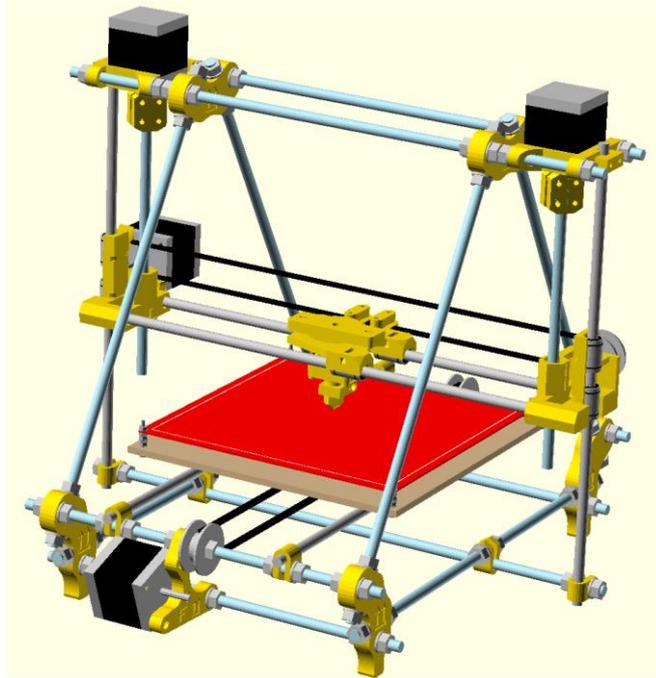


Figura 1 - Impressora 3D modelo Prusa Mendel V2

[http://reprap.org/mediawiki/images/6/64/Assembled\\_JLK.png](http://reprap.org/mediawiki/images/6/64/Assembled_JLK.png)

O interesse pela construção desta estrutura está em sua simplicidade e custo, pois é composta por peças de fácil acesso e baratas.

A montagem da mesma é dada por um manual de construção que pode ser baixado no link:

[http://reprap.org/wiki/Prusa\\_Mendel\\_%28iteration\\_2%29#Stepper\\_Motors](http://reprap.org/wiki/Prusa_Mendel_%28iteration_2%29#Stepper_Motors)

## 2.2. Hardware

### 2.2.1. Fonte de alimentação

Este projeto utiliza uma fonte de alimentação modelo ATX com tensão de entrada 127/220V, e saídas de tensões reguladas de 3.3V, 5V e 12V com uma potência total de saída de 230W.

## 2.2.2. Motor de passo

### 2.2.2.1. Necessidades

Para este projeto específico da impressora 3D tem-se as seguintes características as quais se faz necessário o motor de passo NEMA 17:

- Uma mesa que se desloca na direção Y em função da atuação de um motor que traciona uma correia afixada a estrutura da mesa;
- Um carro (suporte da extrusora de plástico ABS), que se desloca sobre o eixo X, movimentado por um motor que traciona uma correia presa ao carro;
- Uma ponte\* que se desloca na direção Z, atuada por um par de motores que rotaciona sincronizadamente dois fusos roscados presos por porcas à ponte;
- Uma extrusora, sobre o carro, por onde o polímero é empurrado por um conjunto redutor tracionado pelo motor de passo.

### 2.2.2.2. NEMA 17

O motor de passo NEMA 17 provê um controle preciso de movimentos. O motor de duas fases movimenta seu eixo em precisos  $1,8^\circ$  que permitem 200 passos por revolução. Por ser um motor sem escova, possui baixa manutenção. O controle dos passos é simples e não necessita de dispositivos complexos para atuá-los.

Características segundo DataSheet do fabricante (Anexo):

- Ângulo do passo –  $1,8^\circ$ ;
- Passos por volta – 200;
- Precisão do ângulo -  $\pm 3\%$ ;
- Peso – 250g;
- Tensão de operação – 5V;
- Corrente de operação – 1,2A;
- Resistência por fase –  $1,7\Omega$ ;
- Torque de travamento – 0,4Nm;
- Rotação máxima – 200rpm. (Empírico)

### 2.2.3. Extrusora

A extrusora é um dispositivo essencial a este modelo de impressora 3D, pois através dela o material utilizado para formar o objeto em construção poderá atingir as condições físicas necessárias para ser modelado.

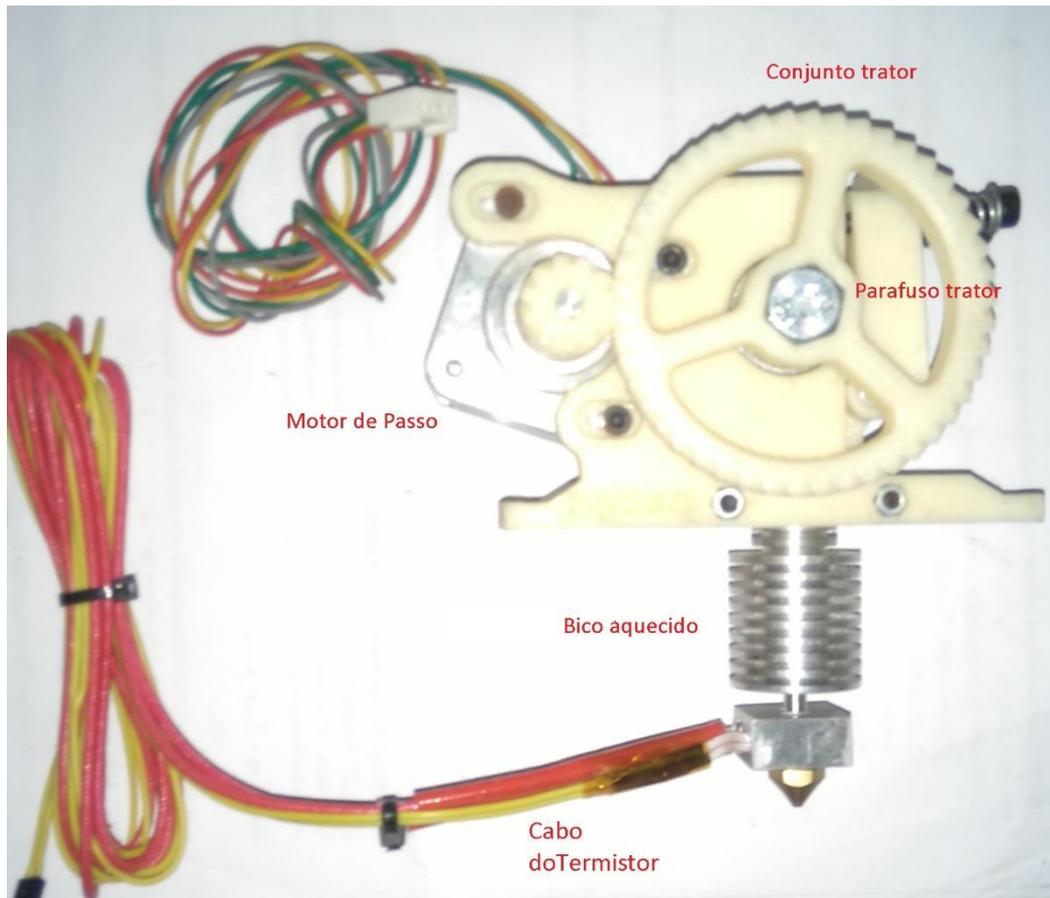
A extrusora é composta por:

- Um motor de passo responsável por gerar o movimento de extrusão do conjunto;
- Um parafuso trator responsável por tracionar o filamento de polímero através do bico aquecido;
- Um conjunto de engrenagens responsáveis por reduzir as rotações do motor e transmitir torque para o parafuso trator;
- Um bico aquecido, alimentado com 12Vcc, responsável por fundir e dar maleabilidade ao plástico utilizado na fabricação do objeto em impressão;
- E uma estrutura de apoio deslizante, que se desloca na direção Y da impressora.

O microcontrolador utilizado neste projeto possuirá rotinas em sua programação que irão controlar a temperatura do bico aquecido, e habilitar ou não a extrusão através dele pelo acionamento do motor.

Segundo pesquisas, a temperatura ideal para a extrusão do plástico ABS pode variar entre 190°C e 250 °C. Pois temperaturas abaixo ou acima podem influenciar na resistência mecânica da peça impressa ou nos detalhes de seu perfil, que poderão perder a nitidez.

A Figura 2 mostra uma imagem da extrusora montada para este projeto.



*Figura 2 - Extrusora de polímero*

#### 2.2.4. Mesa Aquecida

A mesa aquecida é o dispositivo responsável por manter a temperatura ideal do material extrudado após a etapa de extrusão, pois ao contrário poderia não haver aderência do polímero que sai do bico aquecido nas camadas anteriores da impressão.

A mesa aquecida é formada por resistências aquecedoras alimentadas com 12Vcc, e uma estrutura metálica envernizada para facilitar a condução de temperatura. Além de um termistor responsável pela medição da temperatura da mesa.

O microcontrolador utilizado neste projeto possui rotinas responsáveis por controlar a temperatura ideal e assim habilitar ou não o processo de impressão.

Segundo pesquisas, a temperatura ideal para operação da mesa é em torno de 80 °C. Assim elimina-se os problemas com aderência das camadas, permitindo melhor qualidade na impressão.

A Figura 3 mostra uma imagem na mesa aquecida utilizada neste projeto.

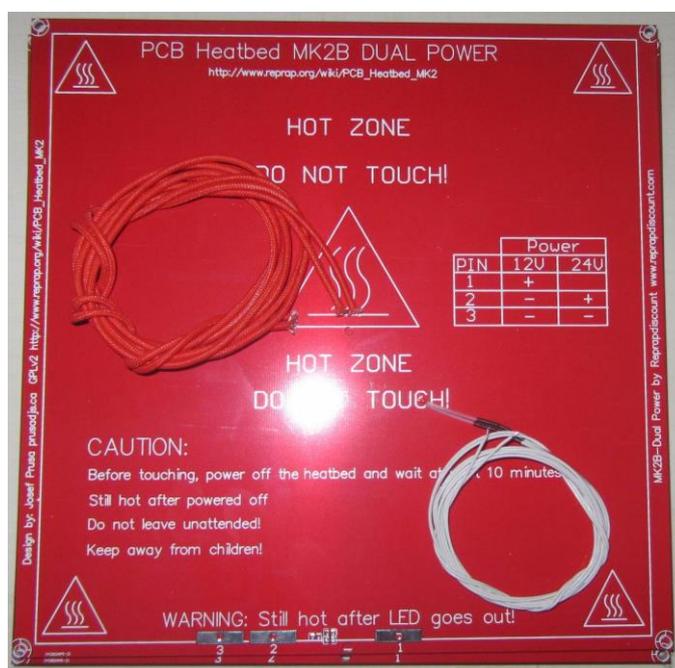


Figura 3 - Mesa Aquecida

#### 2.2.5. Driver L298

O L298 é um circuito integrado disponível nos encapsulamentos Multiwatt 15 (15 terminais) e PowerSO20. É um driver de dupla ponte H para tensão e corrente elevadas projetado para aceitar os padrões dos níveis lógicos da tecnologia TTL, bem como cargas como relés, solenoides, motores DC e de passo.

Este *driver* possui duas entradas para habilitar ou desabilitar as cargas, independentes dos sinais de entrada.

A escolha deste dispositivo se deve as suas características elétricas robustas, pois o mesmo deverá suportar neste projeto motores de passo com correntes nominais de até 1,5A.

A Figura 4 mostra o diagrama de blocos do L298 com as respectivas pinagens.

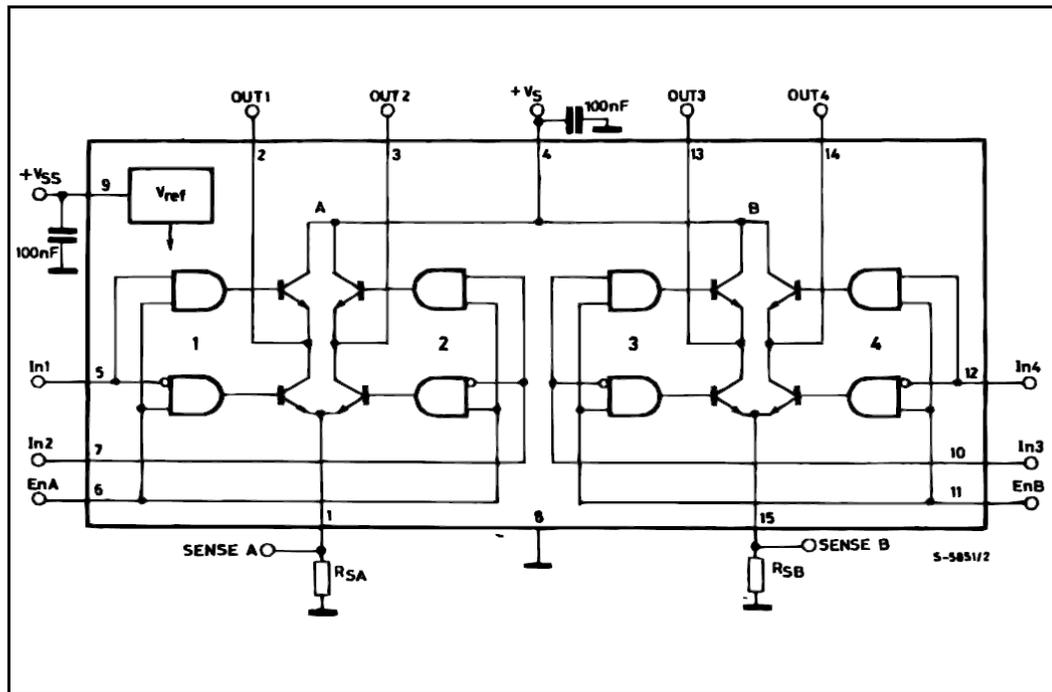


Figura 4 - Diagrama de Blocos do Driver L298

As funções de cada pino são explicadas nas Tabelas 1 e 2. Na prática os pinos 1 e 15 são apenas aterrados, sem a necessidade dos resistores de sensibilidade. Note que as entradas (pinos 2, 3, 10, 12) possuem padrões de nível lógico compatíveis com o TTL (Transistor-Transistor Logic).

MW.15	PowerSO	Name	Function
1;15	2;19	Sense A; Sense B	Between this pin and ground is connected the sense resistor to control the current of the load.
2;3	4;5	Out 1; Out 2	Outputs of the Bridge A; the current that flows through the load connected between these two pins is monitored at pin 1.
4	6	V <sub>s</sub>	Supply Voltage for the Power Output Stages. A non-inductive 100nF capacitor must be connected between this pin and ground.
5;7	7;9	Input 1; Input 2	TTL Compatible Inputs of the Bridge A.
6;11	8;14	Enable A; Enable B	TTL Compatible Enable Input: the L state disables the bridge A (enable A) and/or the bridge B (enable B).
8	1,10,11,20	GND	Ground.
9	12	VSS	Supply Voltage for the Logic Blocks. A100nF capacitor must be connected between this pin and ground.
10; 12	13;15	Input 3; Input 4	TTL Compatible Inputs of the Bridge B.
13; 14	16;17	Out 3; Out 4	Outputs of the Bridge B. The current that flows through the load connected between these two pins is monitored at pin 15.
-	3;18	N.C.	Not Connected

Tabela 1 - Pinagens e funções

Os níveis máximos de operação são os seguintes:

Symbol	Parameter	Value	Unit
$V_S$	Power Supply	50	V
$V_{SS}$	Logic Supply Voltage	7	V
$V_i, V_{en}$	Input and Enable Voltage	-0.3 to 7	V
$I_O$	Peak Output Current (each Channel) – Non Repetitive ( $t = 100\mu s$ ) – Repetitive (80% on -20% off; $t_{on} = 10ms$ ) – DC Operation	3 2.5 2	A A A
$V_{sens}$	Sensing Voltage	-1 to 2.3	V
$P_{tot}$	Total Power Dissipation ( $T_{case} = 75^\circ C$ )	25	W
$T_{op}$	Junction Operating Temperature	-25 to 130	$^\circ C$
$T_{stg}, T_j$	Storage and Junction Temperature	-40 to 150	$^\circ C$

Tabela 2 - Características Elétricas Máximas de Operação

Demais informações sobre o L298 podem ser obtidas em seu *datasheet*.

#### 2.2.6. Controlador L297

O L297 é um controlador integrado para motor de passo que gera quatro fases de sinais para o *driver* (no caso o L298). Para motores bipolares utiliza-se duas fases e para motores unipolares utiliza-se as quatro fases. Normalmente, para aplicações microcontroladas.

Este dispositivo permite eliminar linhas de programação no *firmware* do microcontrolador, pois toda a lógica que seria necessária para gerar os sinais de saída que controlam as fases do motor estão embutidos no circuito integrado.

O controlador do *driver* permite que os motores possam operar em meio-passo, passo completo, rotação em sentido horário e anti-horário.

O diagrama de blocos da Figura 5 indica as pinagens e as unidades lógicas que traduzem os sinais de entrada nos de saída (alternação de fases) responsáveis pelos movimentos dos motores de passos que atuam os eixos da impressora.

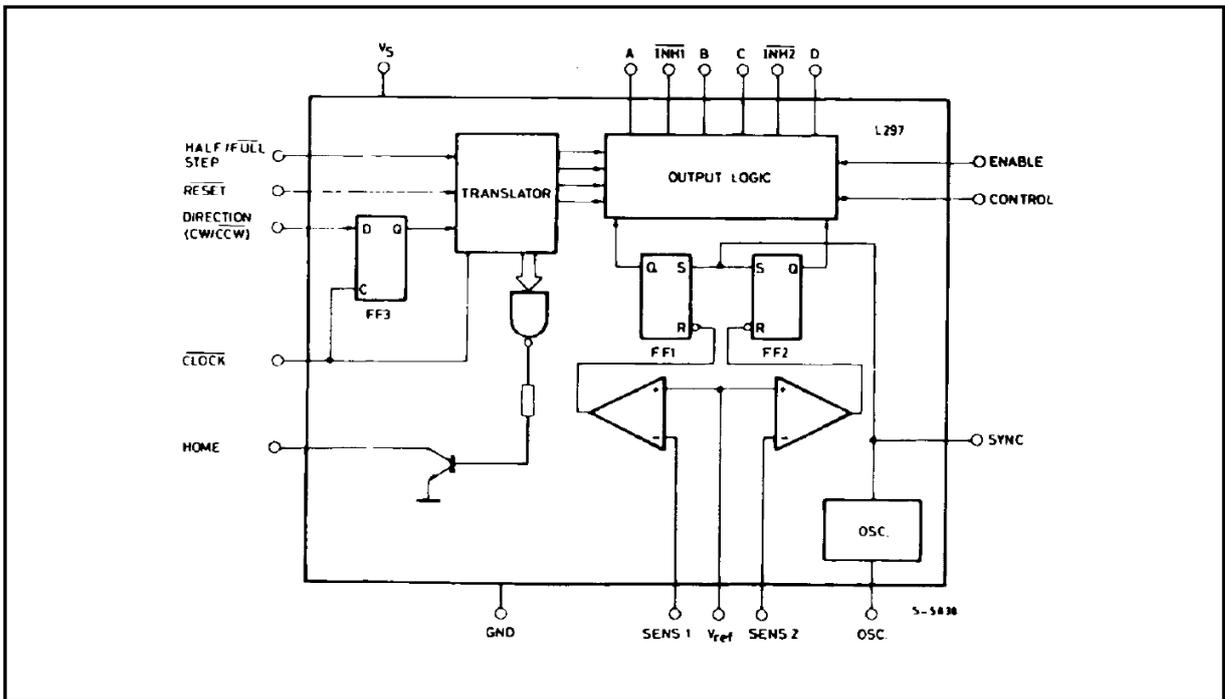


Figura 5 - Diagrama de blocos funcional

Nas Tabelas 3 e 4 estão as informações sobre a funcionalidade de cada pino indicado no diagrama de blocos.

N°	NAME	FUNCTION
1	SYNC	Output of the on-chip chopper oscillator. The SYNC connections of all L297s to be synchronized are connected together and the oscillator components are omitted on all but one. If an external clock source is used it is injected at this terminal.
2	GND	Ground connection.
3	HOME	Open collector output that indicates when the L297 is in its initial state (ABCD = 0101). The transistor is open when this signal is active.
4	A	Motor phase A drive signal for power stage.
5	$\overline{\text{INH1}}$	Active low inhibit control for driver stage of A and B phases. When a bipolar bridge is used this signal can be used to ensure fast decay of load current when a winding is de-energized. Also used by chopper to regulate load current if CONTROL input is low.
6	B	Motor phase B drive signal for power stage.
7	C	Motor phase C drive signal for power stage.
8	$\overline{\text{INH2}}$	Active low inhibit control for drive stages of C and D phases. Same functions as INH1.
9	D	Motor phase D drive signal for power stage.
10	ENABLE	Chip enable input. When low (inactive) INH1, INH2, A, B, C and D are brought low.
11	CONTROL	Control input that defines action of chopper. When low chopper acts on INH1 and INH2; when high chopper acts on phase lines ABCD.
12	$V_s$	5V supply input.
13	SENS <sub>2</sub>	Input for load current sense voltage from power stages of phases C and D.
14	SENS <sub>1</sub>	Input for load current sense voltage from power stages of phases A and B.
15	$V_{ref}$	Reference voltage for chopper circuit. A voltage applied to this pin determines the peak load current.
16	OSC	An RC network (R to $V_{CC}$ , C to ground) connected to this terminal determines the chopper rate. This terminal is connected to ground on all but one device in synchronized multi - L297 configurations. $f \approx 1/0.69 RC$
17	CW/ $\overline{\text{CCW}}$	Clockwise/counterclockwise direction control input. Physical direction of motor rotation also depends on connection of windings. Synchronized internally therefore direction can be changed at any time.
18	$\overline{\text{CLOCK}}$	Step clock. An active low pulse on this input advances the motor one increment. The step occurs on the rising edge of this signal.

Tabela 3 - Funções e Terminais do L297

Nº	NAME	FUNCTION
19	HALF/FULL	Half/full step select input. When high selects half step operation, when low selects full step operation. One-phase-on full step mode is obtained by selecting FULL when the L297's translator is at an even-numbered state. Two-phase-on full step mode is set by selecting FULL when the translator is at an odd numbered position. (The home position is designate state 1).
20	RESET	Reset input. An active low pulse on this input restores the translator to the home position (state 1, ABCD = 0101).

Tabela 4 - Funções do Terminais do L297 (continuação)

Para trabalhar corretamente, este dispositivo necessita de um *clock* de entrada, e de sinais de entrada em cada terminal que permite realizar as funções indicadas nas Tabelas 3 e 4.

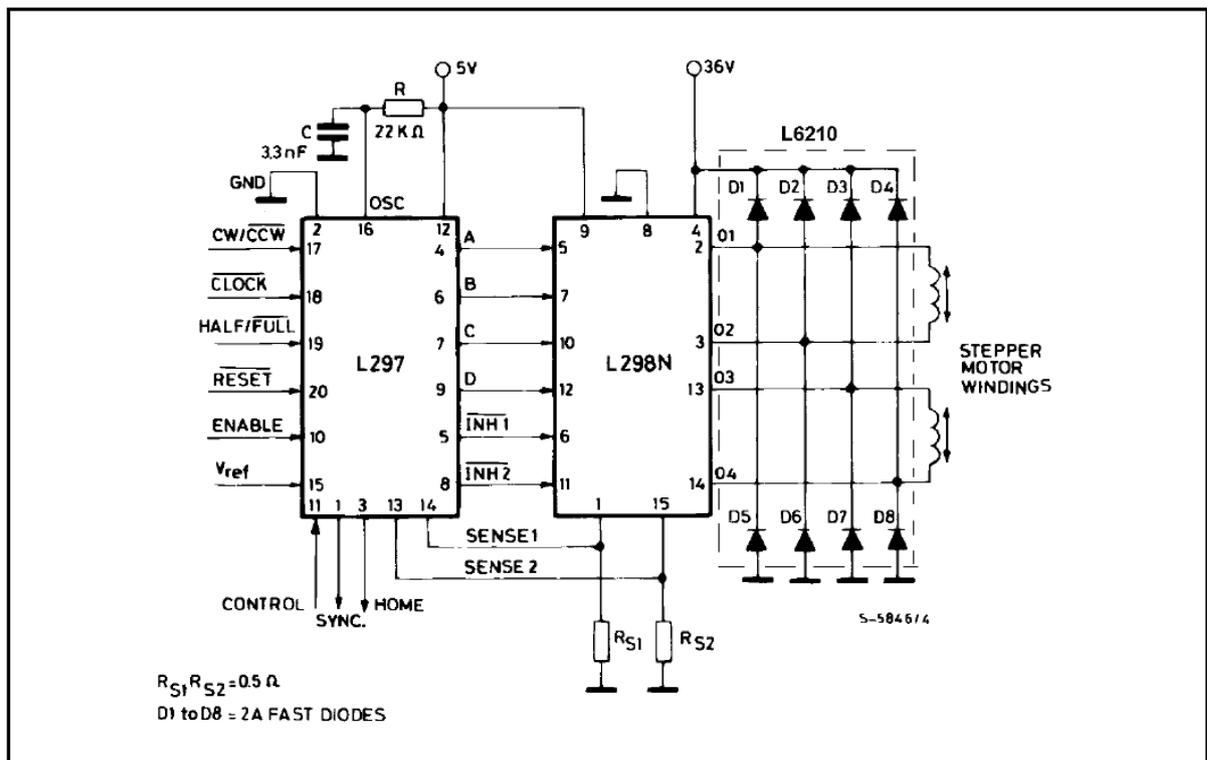


Figura 6 - Aplicação do L297 com o L298

O esquema de ligação utilizado neste projeto para interconectar o Driver L298 com o Controlador L297 está mostrado na Figura 7.

## 2.2.7. Microcontrolador PIC18F4550

A família de microcontroladores PIC18FXX50 e PIC18FXX55, cujas características são mostradas na Tabela 5, permite alta performance computacional com um baixo custo. Possui uma memória Flash reforçada e além destas características possui todo o seu projeto reforçado o que faz desta família uma escolha lógica quando se necessita de alta performance nas aplicações.

Device	Program Memory		Data Memory		I/O	10-Bit A/D (ch)	CCP/ECCP (PWM)	SPP	MSSP		EUSART	Comparators	Timers 8/16-Bit
	Flash (bytes)	# Single-Word Instructions	SRAM (bytes)	EEPROM (bytes)					SPI	Master I <sup>2</sup> C™			
PIC18F2455	24K	12288	2048	256	24	10	2/0	No	Y	Y	1	2	1/3
PIC18F2550	32K	16384	2048	256	24	10	2/0	No	Y	Y	1	2	1/3
PIC18F4455	24K	12288	2048	256	35	13	1/1	Yes	Y	Y	1	2	1/3
PIC18F4550	32K	16384	2048	256	35	13	1/1	Yes	Y	Y	1	2	1/3

*Tabela 5 - Especificações do PIC18F4550*

Para este projeto, além das vantagens citadas acima, a escolha do PIC 18F4550 se fez em função do módulo USB (*Universal Serial Bus*) disponível, pois com este pode-se obter uma fácil comunicação HID (*Human Interface Device*)

A Figura 7 mostra o leiaute do microcontrolador PIC18F4550 com as suas pinagens.

Note que existem periféricos específicos para o módulo USB (pinos 23 e 24).

## 40-Pin PDIP

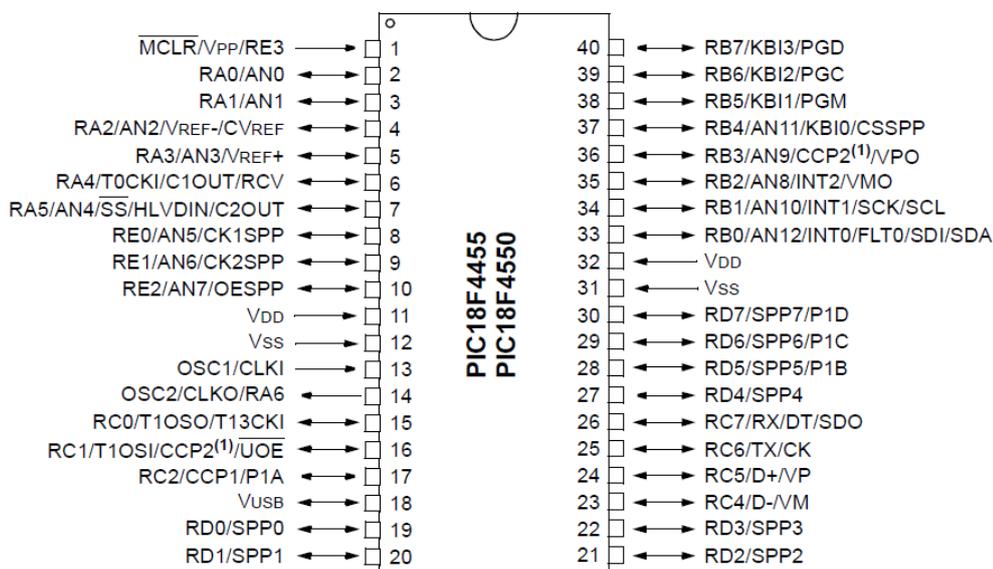


Figura 7 - Diagrama dos Terminais do PIC18F4550

### 2.2.7.1. Módulo USB

A comunicação entre o computador (possuidor das informações pertinentes às coordenadas de cada aresta e camada do objeto a ser impresso) e a impressora 3D (decodificará a informação, sobre o objeto, salvas no computador em movimentos mecânicos de seus eixos e extrusora) será feita via USB com o HID.

Com isso, pretende-se inserir coordenadas e comandos no HID e transferí-las via USB para a eletrônica da impressora, onde um *firmware* será capaz de traduzir estes dados e transformá-los em código de máquina para que a impressora execute suas funções.

As características do módulo USB são as seguintes:

- Compatível com USB V2.0;
- Velocidades baixa (1,5Mb/s) e alta (12Mb/s);
- Suporte de controle, interrupção, transferência de dados em massa ou isócrona;
- Suporta até 32 *endpoints* (16 bidirecional);
- 1Kbyte de acesso duplo de RAM para o USB;

- Transceptor com regulador de tensão para USB integrado ao Chip;
- Transmissor de porta paralela para transmissão via USB.

#### 2.2.8. Microcontrolador PIC18F4520

A família de microcontroladores PIC18FXX20, cujas características são mostradas na tabela 6.

Device	Program Memory		Data Memory		I/O	10-bit A/D (ch)	CCP/ ECCP (PWM)	MSSP		EUSART	Comp.	Timers 8/16-bit
	Flash (bytes)	# Single-Word Instructions	SRAM (bytes)	EEPROM (bytes)				SPI	Master I <sup>2</sup> C			
PIC18F2420	16K	8192	768	256	25	10	2/0	Y	Y	1	2	1/3
PIC18F2520	32K	16384	1536	256	25	10	2/0	Y	Y	1	2	1/3
PIC18F4420	16K	8192	768	256	36	13	1/1	Y	Y	1	2	1/3
PIC18F4520	32K	16384	1536	256	36	13	1/1	Y	Y	1	2	1/3

*Tabela 6 - Especificações do PIC18F4520*

Neste projeto é utilizado o módulo analógico, CCP e ECCP disponíveis no PIC18F4520.

#### 2.2.9. Optoacopladores

Neste projeto foram utilizados quatro TLP627-4 com a finalidade de isolar eletricamente o circuito do microcontrolador PIC18F4550 do circuito controlador L297. Sua escolha foi determinada por possuir altas velocidades de chaveamento.

Além do componente descrito acima utilizamos dois optoacopladores PC817, com o objetivo de isolar o circuito do PIC18F4520 com a parte de potência deste projeto.

#### 2.2.10. TIP32

A utilização deste transistor se fez em função da necessidade de uma interface de potência com alta capacidade de chaveamento para comportar um PWM de 1,5 kHz. O transistor recebe o sinal do optoacoplador e com isso chaveia o gate do MOSFET.

### 2.2.11. IRF540

Este transistor foi escolhido por sua alta capacidade de condução de corrente elétrica, sua finalidade neste projeto é de acionar o aquecimento da mesa e do bico aquecido.

### 2.3. Firmware

Desenvolvido através do Software MikroC Pro for PIC da empresa MikroElektronika, o *firmware* será escrito em linguagem de programação C, dada a facilidade que esta permite ser escrita. O próprio *software* desenvolvedor permite, ainda, que algumas funções disponibilizadas por este (como as de configuração da porta USB) sejam utilizadas no programa.

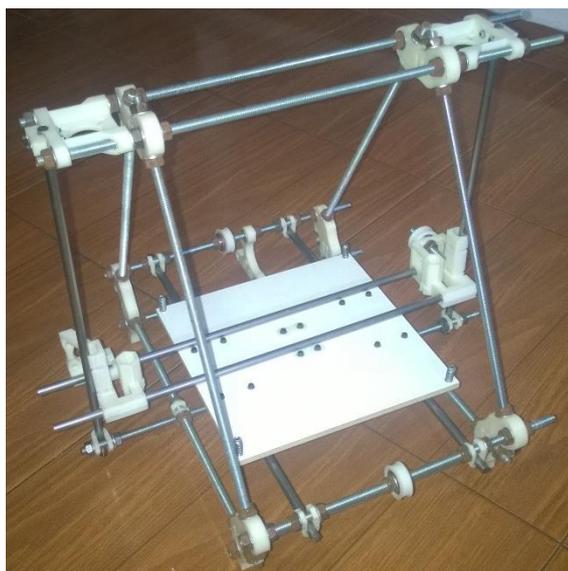
O *firmware* possui as seguintes características:

- Permite comunicação via USB entre o microcontrolador e um computador (envio e recebimento de instruções para execução das tarefas);
- Converte variáveis de diversos formatos para que haja uma comunicação efetiva;
- Utiliza interrupções e os *timers* (0, 1, 2, 3) para gerar o *clock* utilizado para execução das tarefas pelo CI L297;
- Permite controle do motor de passo, gerando sinais lógicos para o CI L297;
- Faz o monitoramento analógico e o controle digital da temperatura da mesa aquecida e extrusora.
- Faz contagem precisa da quantidade de passos dados pelos motores, evitando assim erros e colisões.

## 3. Etapas de desenvolvimento

### 3.1. Estrutura mecânica

Inicialmente, a montagem da estrutura mecânica (Figura 8), e tal como foi citado anteriormente, baseia-se no modelo RepRap Prusa Mendel V2. Desta forma, o processo de montagem ocorre conforme seu Manual de Construção.



*Figura 8 - Processo de Montagem da Estrutura Mecânica*

Após a conclusão dessa última, iniciar-se-á o teste manual de movimentação dos eixos X, Y e Z, para se certificar que não há erros de montagem, tais como, desalinhamento e desnivelamento dos eixos, bem como desse certificar que não haja peças faltantes ou em posições erradas.

Após tal etapa, se dá início ao dimensionamento, seleção, compra e teste de funcionamento dos motores de passo, que no total são cinco. A atuação dos motores ocorrerá através de um módulo de teste que será desenvolvido para este projeto, sendo que, se este último demonstrar boa funcionalidade, o mesmo será implementado a impressora para que se possa fazer o controle da atuação dos motores de passo.

Com a montagem dos motores na estrutura, será efetuada uma série de ensaios, com estes e o módulo de controle, para obter-se parâmetros para o desenvolvimento do módulo eletrônico em si.

Desta forma, obtido sucesso em todas as etapas acima citadas, a projeção, testes e construção do Módulo Eletrônico irá se iniciar. Lembrando que a finalidade deste será a substituição do Arduíno presente em projetos de impressoras "OPEN".

## 3.2. Hardware

### 3.2.1. Driver de controle do motor-de-passo

O *Driver* para controle do motor-de-passo NEMA17 é constituído pelo circuito integrado L298 (dupla ponte H) e pelo L297 (controlador lógico para o L298).

A concepção desta solução para controle do motor se fez em função da necessidade de um dispositivo capaz de fornecer uma corrente de 1,5A e tensão regulada de 2V, além da de uma forma simples de se controlar as fases do motor de passo sem uma programação complexa para isto.

#### 3.2.1.1. L297 – Pré-requisitos

O ponto de partida foi o desenvolvimento do circuito para atendimento dos pré-requisitos do fabricante do L297 (STMicroelectronics) para o funcionamento completo do dispositivo. Contudo, para atender as necessidades deste projeto, apenas os seguintes pontos são considerados.

Alimentação, pino 12, VCC = 5V;

- Comum, pino 2, GND = 0V;
- Home (ponte de partida do controle de fases do motor, ABCD = 0101) = nível alto = 5V;
- Enable, pino 10, nível alto = 5V, habilita o funcionamento do CI;
- Reset, pino 20, nível alto = 5V habilita; nível baixo = 0V reseta o CI;
- CLOCK, pino 18, a transição em borda de descida habilita a mudança de fases da saída do controlador. A frequência determina a velocidade da alternância das fases na saída.
- $\overline{CW/CCW}$ , pino 17, rotação da saída em sentido horário = nível alto; anti-horário = nível baixo;
- $\overline{Half/Full}$ , pino 19, meio-passo = nível baixo; passo completo = nível alto;

### 3.2.1.2. Testes do L297

De forma simples foram realizados os testes de funcionamento do circuito integrado L297. Mantendo-se um *clock* constante com frequência de 0,5Hz, e definindo como entrada de nível lógico baixo no pino 19 (Half/Full) e nível alto no pino 17 (Cw/CCw) e com o auxílio de um multímetro, realizaram-se as medições em cada pino de saída, podendo-se visualizar o estado das saídas (ABCD) conforme diagrama da Figura 10. Desta forma, confirmando o funcionamento do C.I.

Note que neste estado a saída dos pinos INH1 e INH2 mantiveram-se altos, com isso o efeito na saída garante o passo completo ao motor.

O diagrama da Figura 9 demonstra o modo normal de operação do *drive* baseado nos parâmetros de entradas descritos acima.

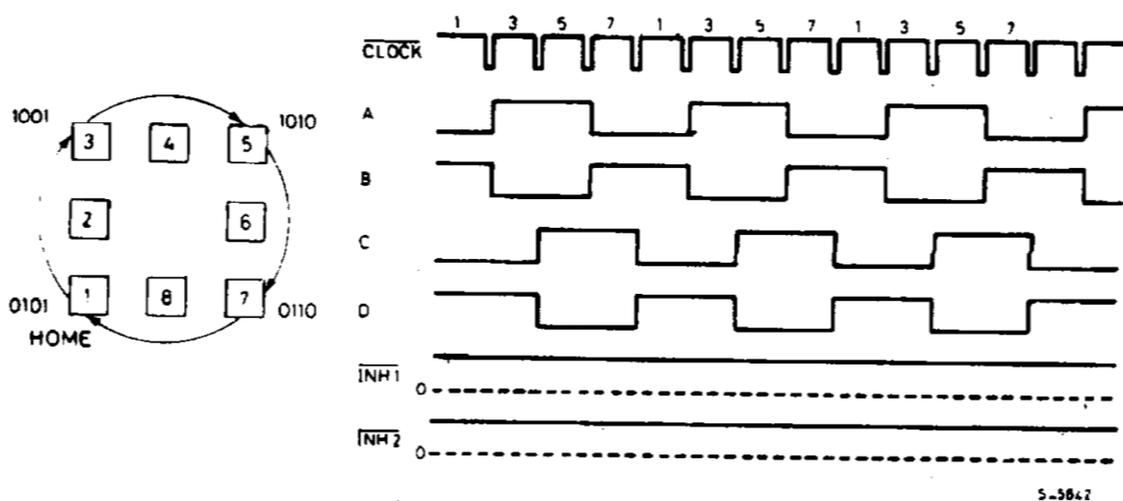


Figura 9 - Modo normal de Operação do Drive (extraído do DataSheet)

Continuando os testes, pode-se ainda, através do L297 obter o modo de saída de meio-passo. E tal como já foi dito anteriormente, esta é mais uma possibilidade de que traz vantagens a aplicação deste tipo de *driver*, pois, apenas alternando nível lógico do pino 19 para alto, já se obtém a saída mencionada. O diagrama da Figura 10 explica bem como os pinos ABCD e INH1/INH2 se comportam dadas esta nova condição de entrada.

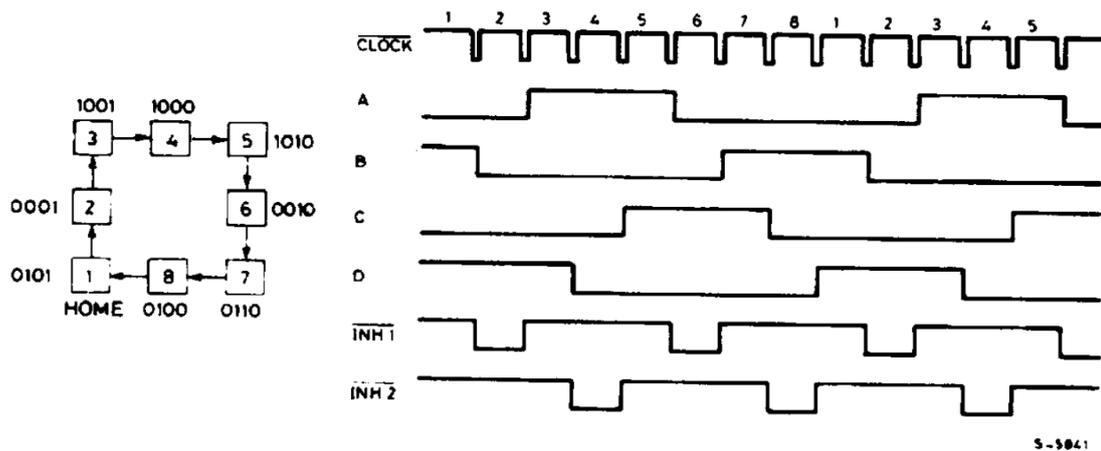


Figura 10 - Modo de Operação em Meio-Passo (Extraído do DataSheet)

Note que para obter o meio-passo, os pinos INH1 e INH2 também alternam seus estados lógicos.

O CLOCK utilizado define a velocidade com que ocorrerá a comutação dos estados das saídas, por transcurso, no final do sistema isso define a velocidade de rotação do motor de passo controlado.

### 3.2.1.3. Circuito do L298

Anteriormente obteve-se o controle do motor, agora através da interface de potência, o *driver* L298, o motor será atuado conforme os sinais de saída do CI L297.

O diagrama de blocos foi disponibilizado anteriormente (figura 2), contudo agora será dada maior importância a ele.

Os pinos ABCD, INH1 e INH2 do L297 têm destinos respectivos nos pinos In1, In2, In3, In4, EnA e EnB do L298.

Analisando a fundo o circuito eletrônico que permite o funcionamento do L298, nota-se que tudo se baseia no controle de pontes-H compostas por transistores NPN e portas lógicas "AND".

Funcionalmente, é observável nos pinos de saídas OUT1 a OUT4 sinais amplificados dos de entrada provenientes das saídas do L297. Atestou-se estes

através de medições com multímetros, da mesma forma que fora realizado com o C.I. controlador do *driver*.

#### 3.2.1.4. Circuito do Driver do Motor de Passo

Por fim, é possível construir os *Drivers* responsáveis pelos controles dos motores de passo utilizados para movimentar os eixos da impressora.

Conforme o leiaute da Figura 12, torna-se possível a junção dos sinais de baixíssima potência de entrada, vindos do PIC, passando pelo processamento lógico e controle do CI L297, chegando à interface de potência, o CI L298, e por fim ao respectivo motor de passo.

Este circuito atua com dois valores de tensões diferentes, 5V (padrão TTL), e 2V (valor solicitado pelo fabricante do motor de passo). A Barreira responsável pela separação destes níveis distintos de tensão é o CI L298 (mais intrinsecamente, os transistores em seu interior).

Notoriamente, fala-se em amplificação de sinal de entrada pelo CI L298, contudo o valor de tensão de saída é menor do que o de entrada, porém, apenas a potência do sinal é amplificada.

Enquanto que o L297 fornece um sinal de saída com tensão conforme os padrões TTL em uma corrente típica de 10mA (Valores do DataSheet), o CI L298 pode fornecer a tensão no range de 2,5V a 46V com uma corrente máxima de saída de 3A.

De forma grosseira, conclui-se que o L297 controla e o L298 atua.

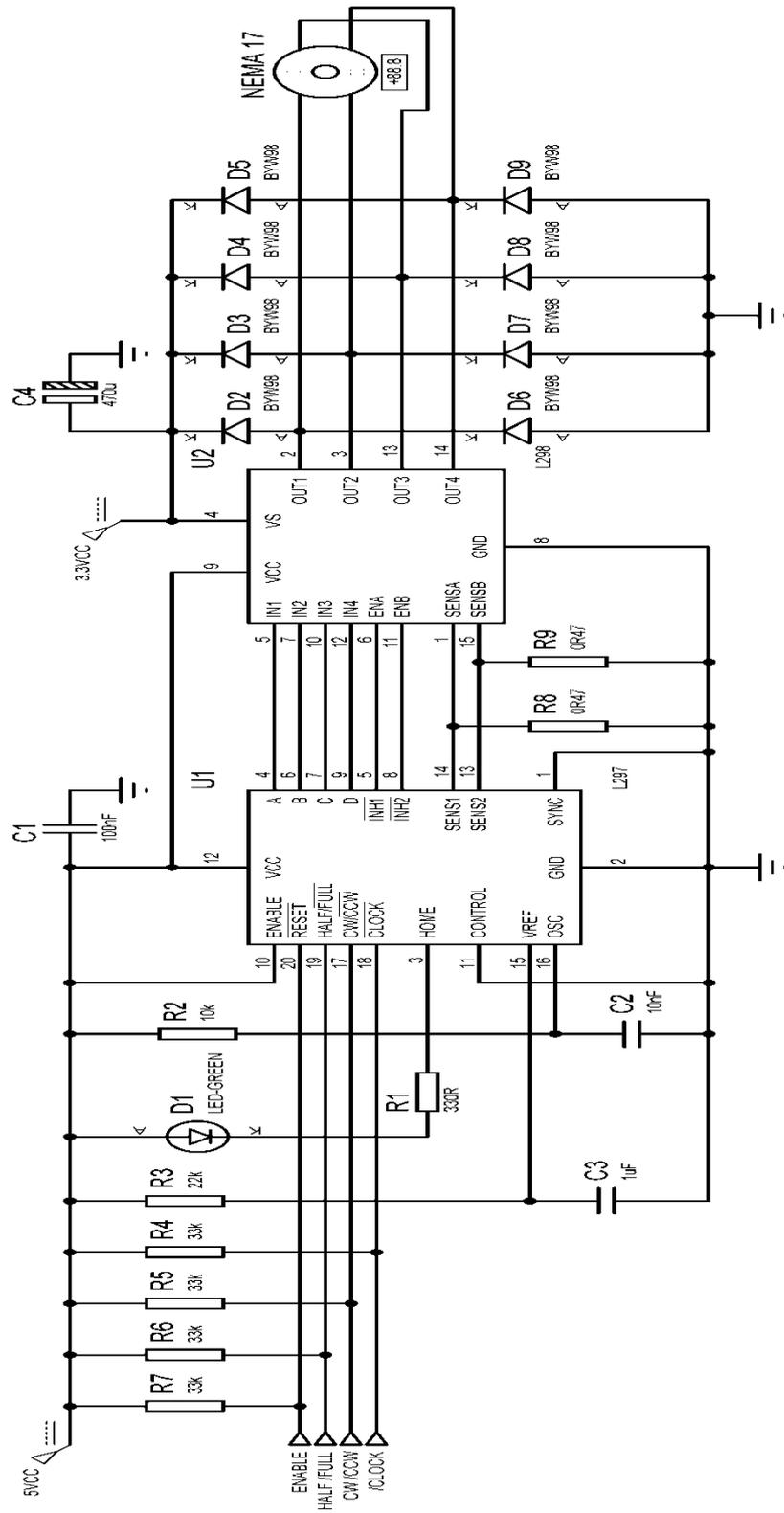


Figura 11 - Driver do Motor-de-Passo (desenvolvido através do Proteus 8 da Labcenter Eletronics)

### 3.2.2. Controle de temperatura

No processo da impressão em três dimensões através da extrusão de plástico um parâmetro de extrema importância é a temperatura.

A tração gerada por um motor de passo empurra um fio de 1,75mm de diâmetro contra a fatura da extrusora que tem o seu cabeçote aquecido a 190°C. Desta forma, o material polimérico ganha maleabilidade e pode ser moldado.

Contudo, se, ao ser extrudado, o plástico encostar em uma superfície fria, instantaneamente ele sofrerá pequenas trincas e irá contrair pelo choque térmico e irá impossibilitar com que haja uma impressão precisa.

Ainda, caso haja superaquecimento no cabeçote aquecido ou na mesa, o plástico poderá amolecer além do necessário e até mesmo queimar.

Conclui-se que um controle e monitoração de temperatura em ambos os dispositivos deve ser preciso, tal como relata-se abaixo.

#### 3.2.2.1. *Hardware e Firmware*

O sistema abaixo simulado em *software* Proteus 8 exemplifica como se comporta o real. Pois, a mesa e o cabeçote aquecido são apenas resistências de valor ôhmico baixo e que aproveitam toda a energia para transformá-la em calor por efeito Joule.

Os termistores, indicador por resistências variáveis, possuem o valor típico de 100KΩ em temperatura ambiente e caem exponencialmente em função da elevação da temperatura nos pontos em que estão monitorando, o que indica serem do tipo NTC.

A leitura da aferição de temperatura dos termistores é feita através de canais analógicos utilizados no PIC18F4520 que recebem os sinais de tensão do divisor. Na programação do microcontrolador utiliza-se o conversor A/D para tradução dos sinais analógicos do termistor em sinais digitais possíveis de serem avaliados e utilizados pelo controlador.

O controle feito é proporcional, parte-se da temperatura ambiente, e através de módulos PWM existentes no microcontrolador, a tensão que alimenta o bico aquecido e a mesa aumenta gradualmente, ao atingir os patamares pré-estabelecidos na programação (anexa) o valor do *duty cycle* do PWM passa a cair,

fazendo o sistema voltar a resfriar, contudo a uma faixa, onde a temperatura deve ser mantida. Desta forma ao superaquecer, o termistor indica ao microcontrolador, por sua vez controla o PWM e resfria o sistema, ao resfriar além do permitido, o aquecimento é reacionado.

Logo tem-se um controle preciso, eficaz e independente da temperatura na mesa e na extrusora.

Enquanto estes dispositivos estiverem na temperatura ideal, a impressão estará habilitada por um sinal enviado do microcontrolador PIC18F4520 de controle da temperatura ao PIC18F4550 de controle da impressora.

O display LCD apenas adverte o estado em que a impressora e as temperaturas estão.

Na figura 12 tem-se o esquema do circuito eletrônico utilizado para controle da temperatura e habilitação da impressora para executar o serviço.

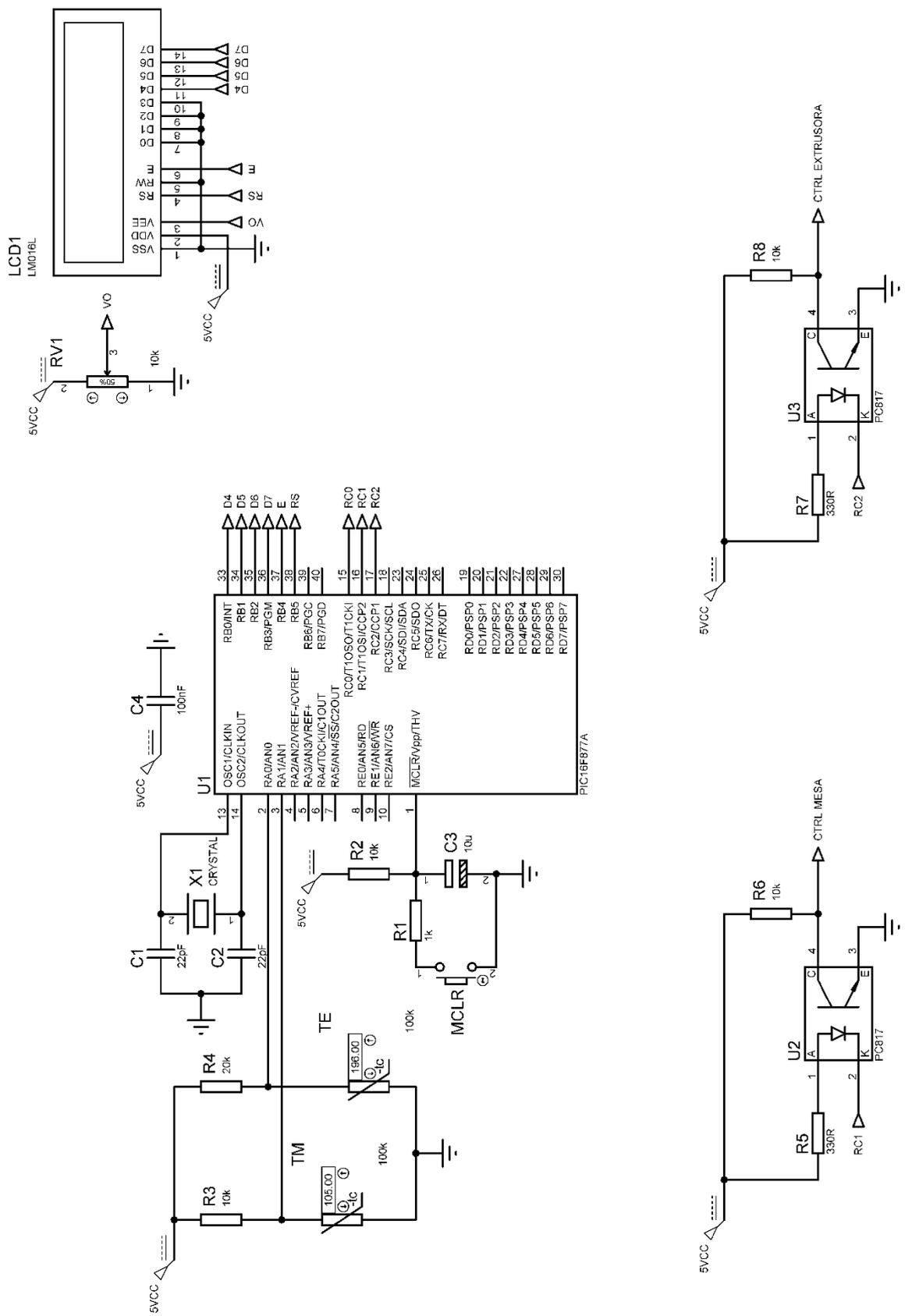


Figura 12 - Sistema para controle da temperatura na mesa e extrusora

### 3.2.2.2. Fluxograma funcional

Nas figuras 13 a 18 é possível compreender a lógica de funcionamento do controle de temperatura utilizado neste projeto.

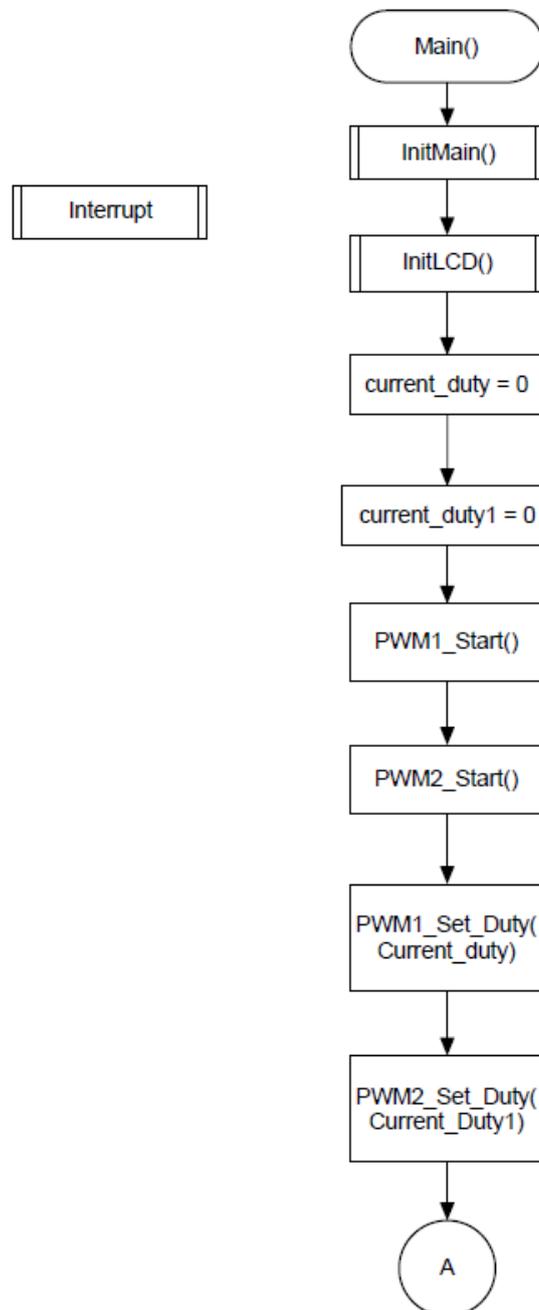


Figura 13 – Fluxograma. Controle de Temperatura, página 1

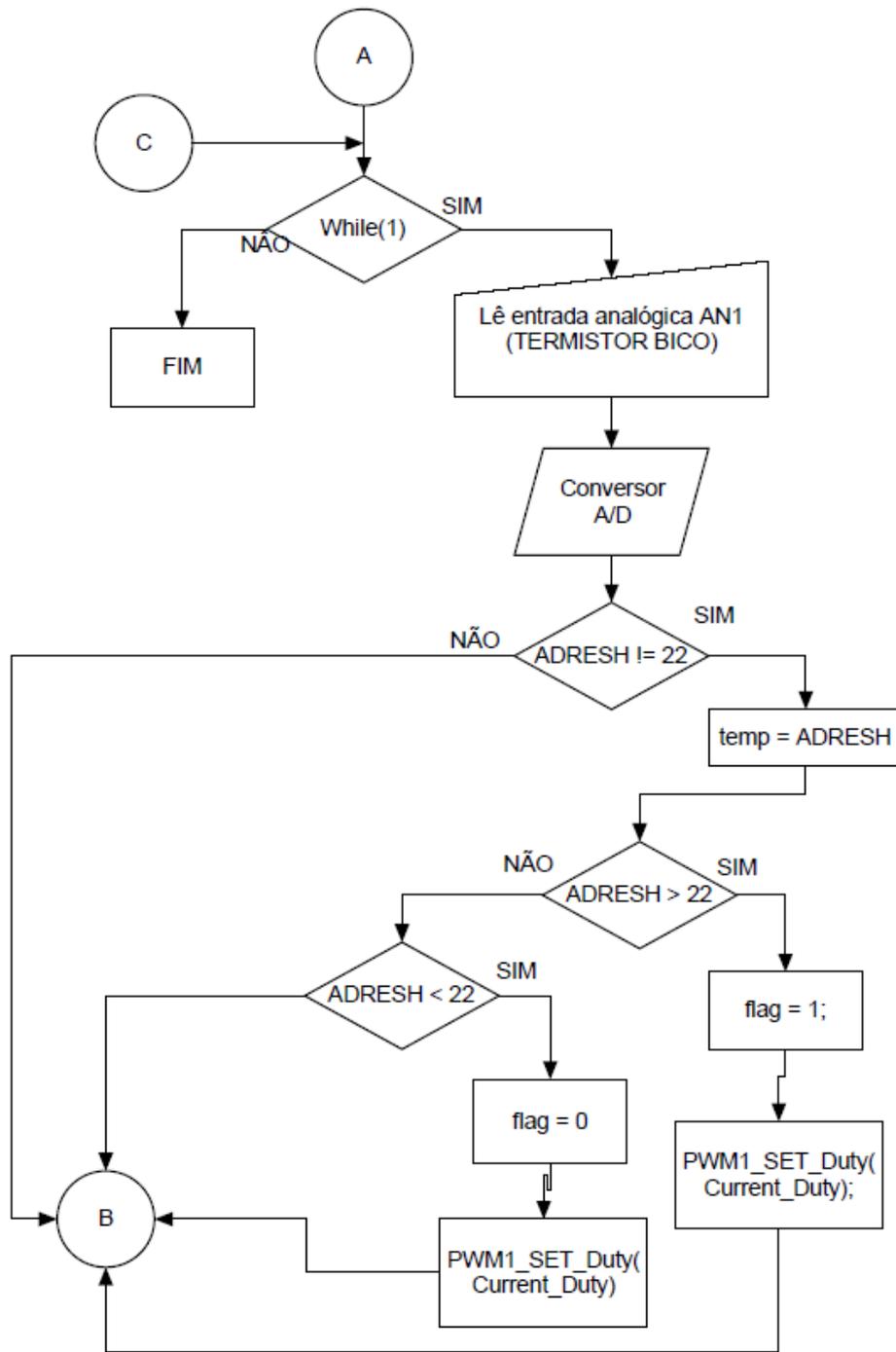


Figura 14 – Fluxograma. Controle de Temperatura, página 2

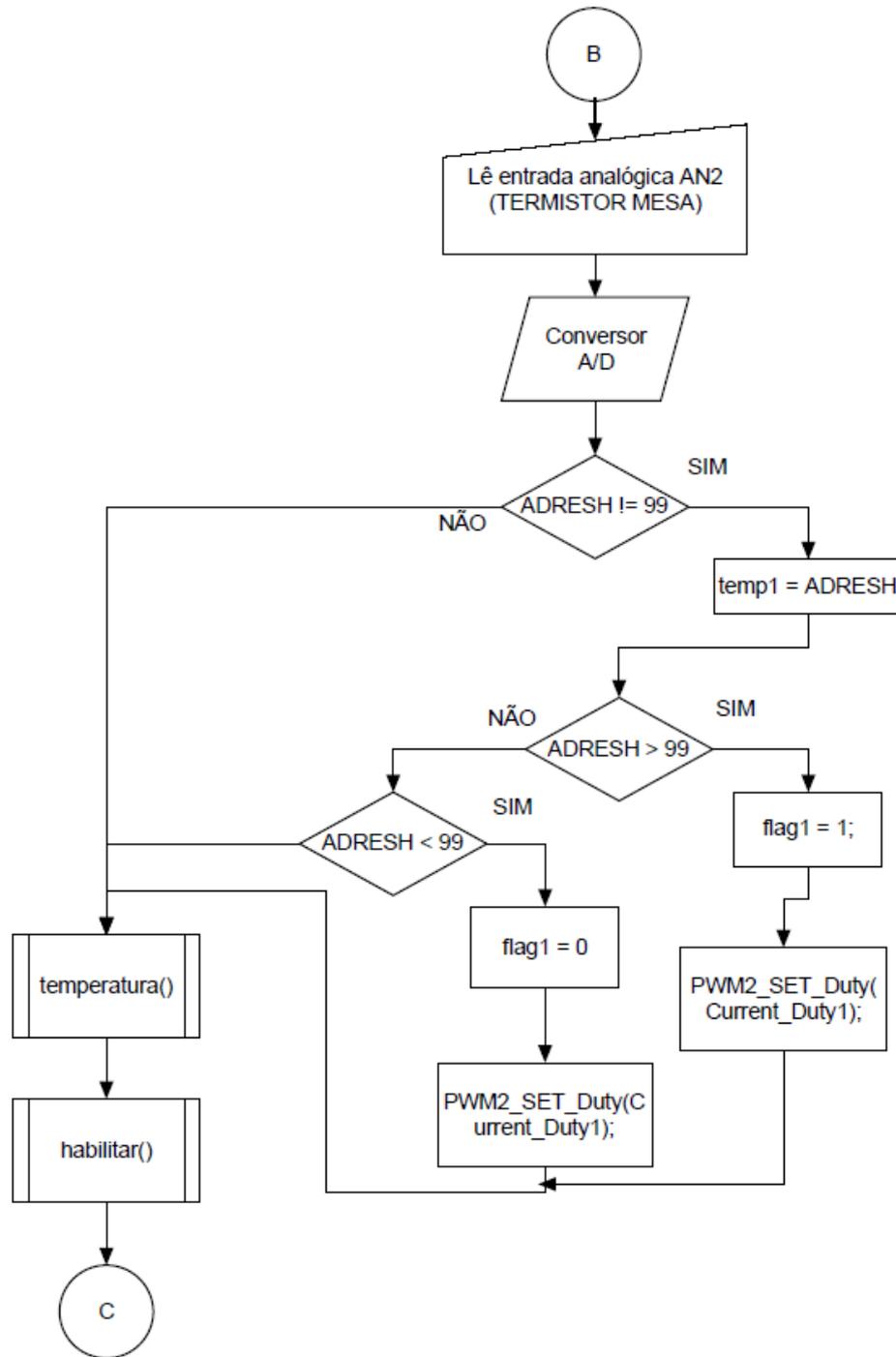


Figura 13 - Fluxograma. Controle de Temperatura, página 3

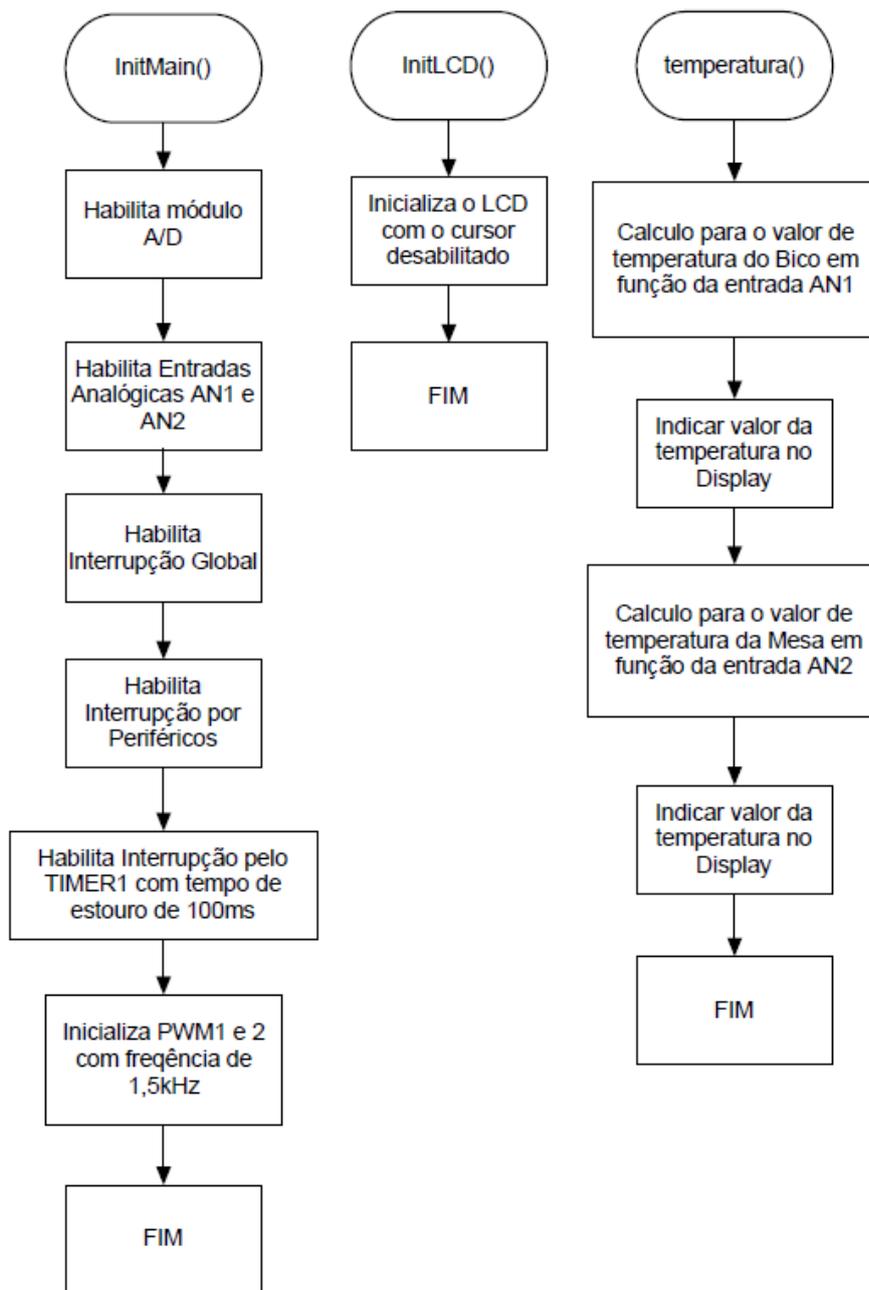


Figura 14 - Fluxograma. Controle de Temperatura, página 4

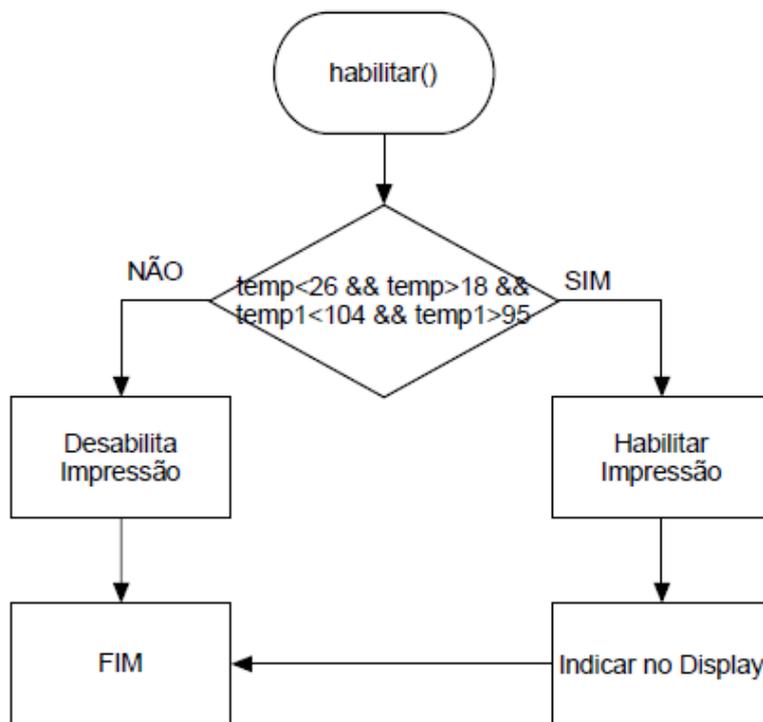


Figura 17 - Fluxograma. Controle de Temperatura, página 5

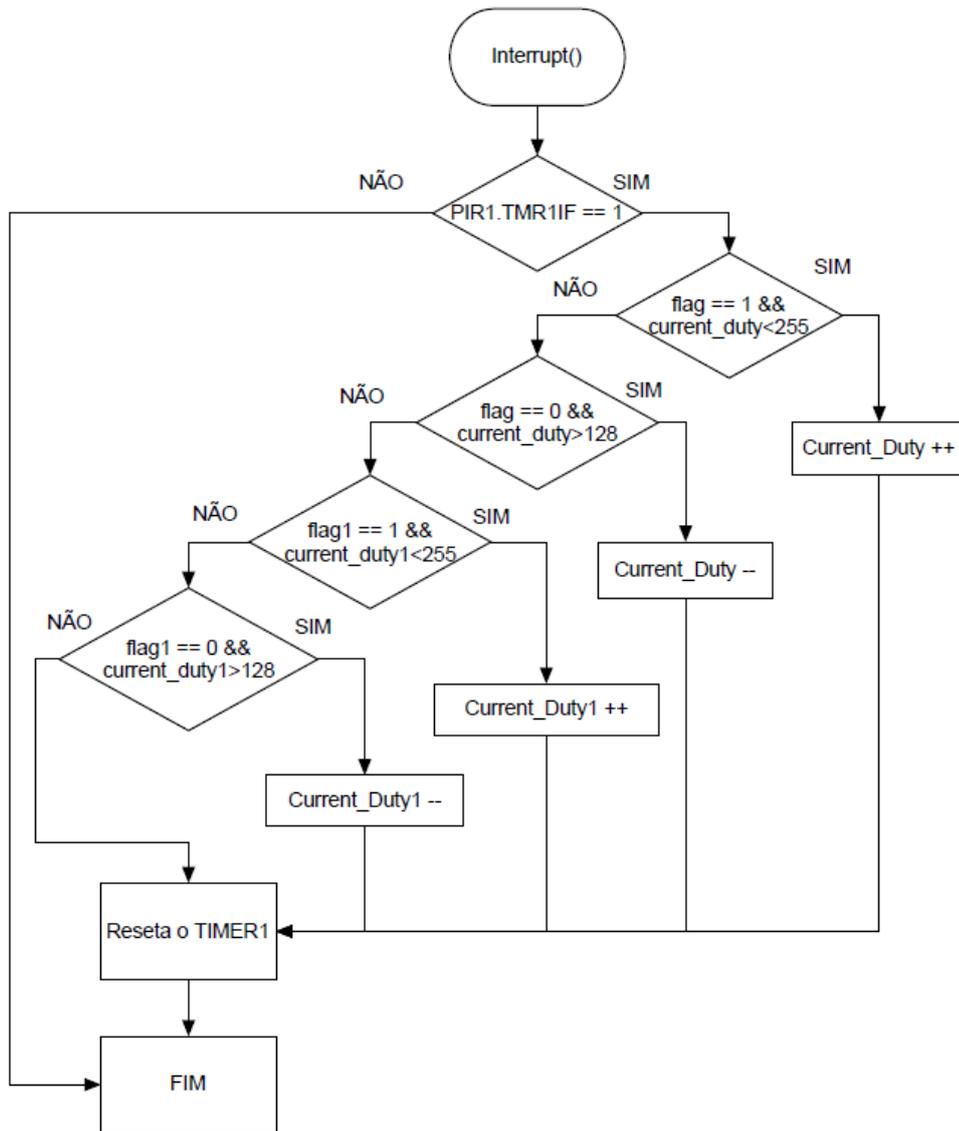


Figura 18 - Fluxograma. Controle de Temperatura, página 6

### 3.2.3. Microcontrolador PIC 18F4550

#### 3.2.3.1. Clock

O ciclo de *Clock* é a velocidade medida em Hz e seus múltiplos (kHz e MHz) que um microcontrolador opera.

Todo circuito sequencial, como um microcontrolador, necessita de um *clock* para funcionar, no caso dos microprocessadores esse *clock* é disponibilizado por um circuito oscilador interno.

O microcontrolador pode ter seu oscilador interno ou externo, dependendo da necessidade. Ou seja, em casos, onde possuímos necessidade de grande taxa de processamento, normalmente, opta-se por um oscilador externo com maior capacidade de frequência.

Para este caso em específico de aplicação do PIC 18F4550, a solicitação é de um *Clock* externo com uma frequência de 20MHz, neste caso fornecida por um oscilador de cristal de quartzo.

Nas Figuras 19 e 20, de forma simplista, é demonstrado o circuito esquemático do conjunto oscilador em um microcontrolador qualquer.

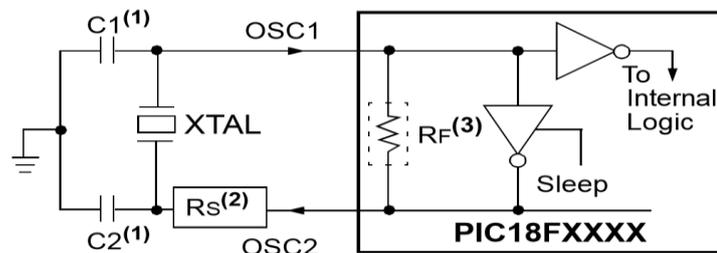


Figura 19 - Circuito simplificado do Oscilador



Figura 20 - Oscilador de Cristal de Quartzo

Conclui-se que a necessidade da frequência do oscilador parte da solicitação da velocidade requerida para que determinadas tarefas sejam executadas pelo microcontrolador em função do que foi programado nele e o que se deseja que ele faça.

### 3.2.3.2. USB

A porta USB do PIC se utiliza apenas de três pino, Vusb (tensão regulada de 3,3V proveniente de um regulador interno ao PIC para aplicações com 5V), D+ e D- (pinos do transceptor responsável pela comunicação em si).

Na Figura 21 temos os o diagrama geral para aplicações e opcionais com a porta USB do PIC.

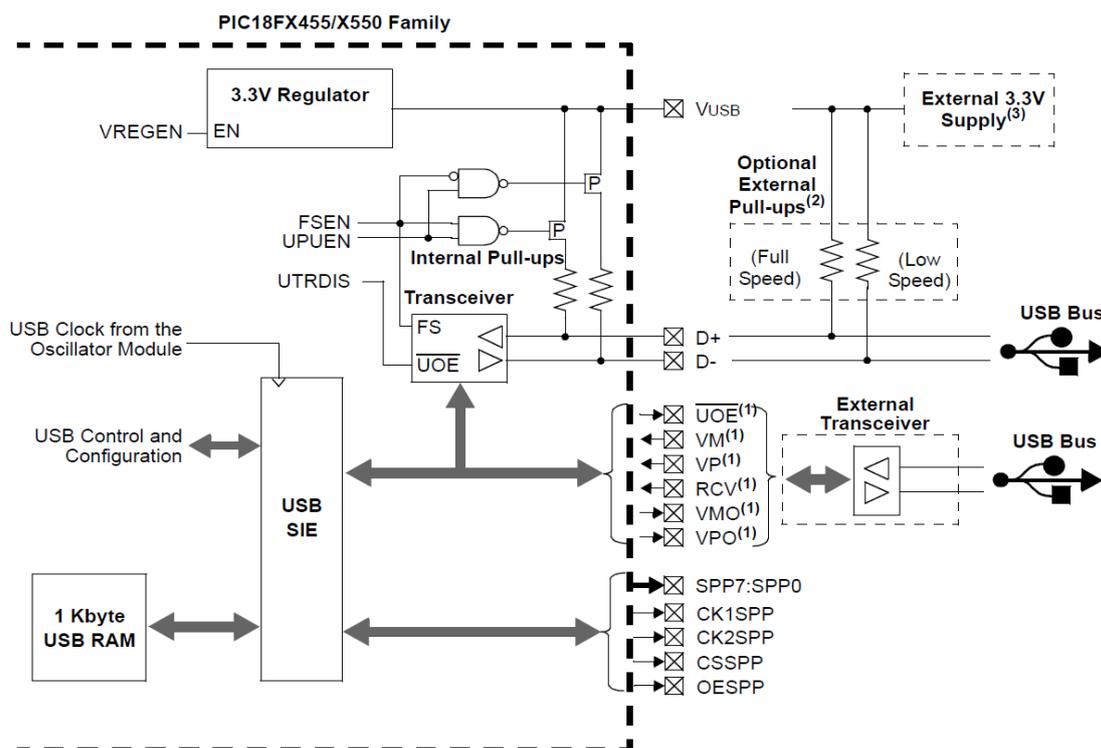


Figura 21 - Periféricos da Porta USB

Neste projeto, utiliza-se de um conector fêmea tipo B para USB na porta do PIC, conforme imagem da Figura 22. Respectivamente, pinos 1, 2, 3 e 4 transmitem, tensão de alimentação VCC, recebe dados (Data-), exporta dados (Data+), ponto comum da alimentação (GND).



Figura 15 - Padrões para conectores USB

### 3.2.3.3. Saídas de comando para os Drivers X, Y, Z e E

A impressora utilizada como base neste projeto possui três eixos controlados por quatro motores e uma extrusora atuada por um motor.

O microcontrolador possui os seguintes PORTS (Tabela 7) configurados para enviar sinais de comando para os Drivers de controle dos motores de passo.

Eixo				Aplicação	Pinos L297
Y	X	E	Z		
PORT					
RB	RB	RD	RD	Sinal para habilitar ou desabilitar o motor	10 e 20
RB	RB	RD	RD	Sinal para selecionar operação de meio ou passo completo	19
RB	RB	RD	RD	Sinal para selecionar rotação horária ou anti-horária	17
RB	RB	RD	RD	Sinal de Clock	18

Tabela 7 - Funções dos PORTS de saída do PIC

#### 3.2.3.4. *Circuito eletrônico com o Microcontrolador*

O diagrama da Figura 23 ilustra o *Hardware* de comando composto pelo Microcontrolador, a porta USB para comunicação com o computador, e os circuitos periféricos como o do *clock* e o *masterclear*.

Este projeto foi desenvolvido e simulado através do *software* Proteus 8 desenvolvido pela Labcenter Electronics.

O Proteus possui o recurso de gerar uma porta USB virtual, o que permite realizar simulações como se existisse uma verdadeira comunicação USB com o computador onde se está realizando as simulações (Na pasta do Proteus 8, no menu Iniciar do Windows é possível encontrar o instalador do Driver da porta USB Virtual).

Para que a simulação possa ser realizada, ainda é necessário que haja um *firmware* gravado na memória do PIC. Sendo que este *firmware*, tal como foi citado anteriormente, desenvolvido no *software* MikroC Pro for PIC da MikroElektronika.

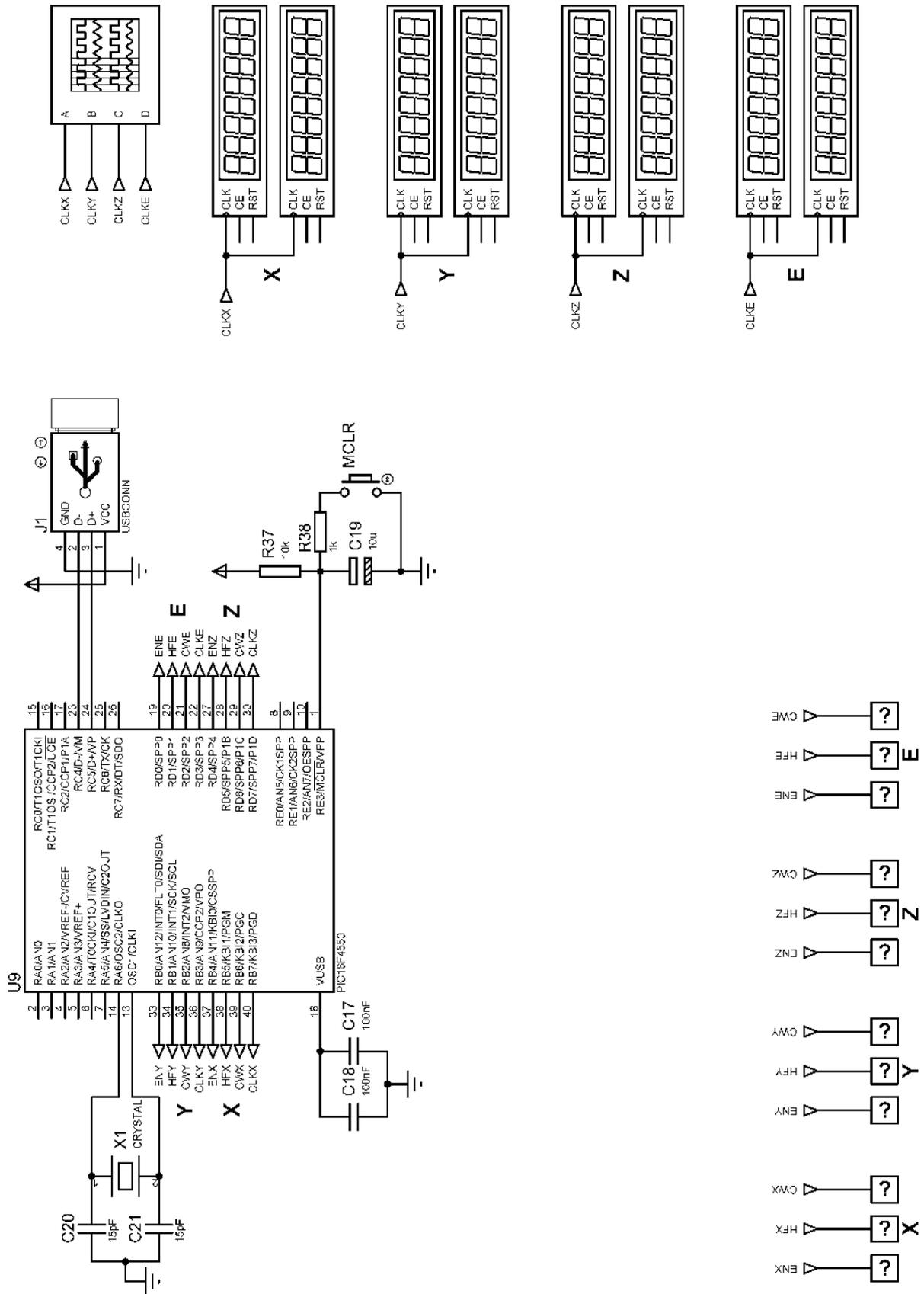


Figura 23 – Circuito utilizado no teste de comunicação USB e sinais para controle dos motores

### 3.2.4. PCI (Placas de Circuito Impresso)

O projeto das Placas de Circuito Impresso foi desenvolvido através da ferramenta ARES do *Software* Proteus 8 da Labcenter Electronics.

A escolha desta ferramenta está em função de o projeto e a simulação dos módulos eletrônicos utilizados neste trabalho serem desenvolvidos na ferramenta ISIS do Proteus 8. Desta forma, há um recurso que cruza as informações do ISIS com o ARES, possibilitando desta forma obter facilmente um leiaute de projeto.

Ainda, a ferramenta ARES possui as seguintes funções de auto-roteamento de trilhas, configuração de dimensões mínimas e máximas das trilha e ilhas e número de camadas da PCI.

#### 3.2.4.1. PCI do L298

Em função da complexidade do desenvolvimento de um leiaute para uma placa de circuito impresso para o L298, a princípio pela necessidade de um leiaute multicamadas, a equipe deste projeto optou pela compra desta PCI pronta no mercado.

Na figura 24 está o tipo de placa pré-montada utilizada neste trabalho.

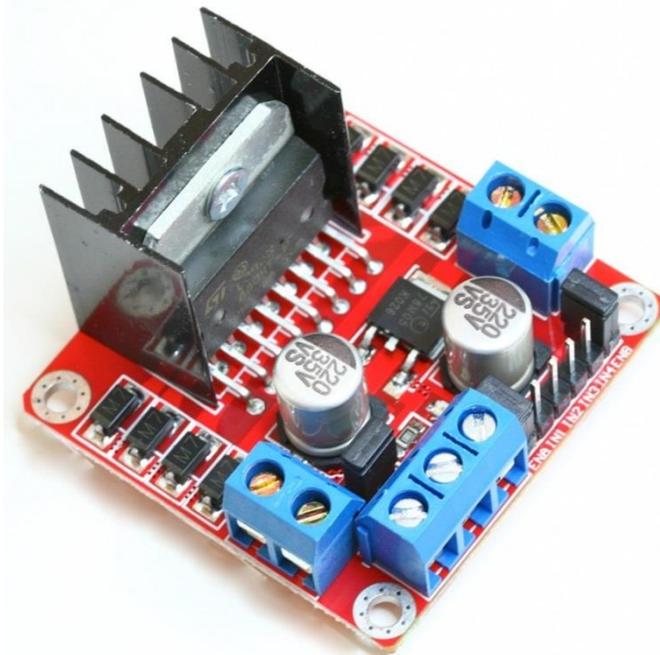


Figura 24 - PCI do L298

### 3.2.4.2. Lay-out da PCI do L297

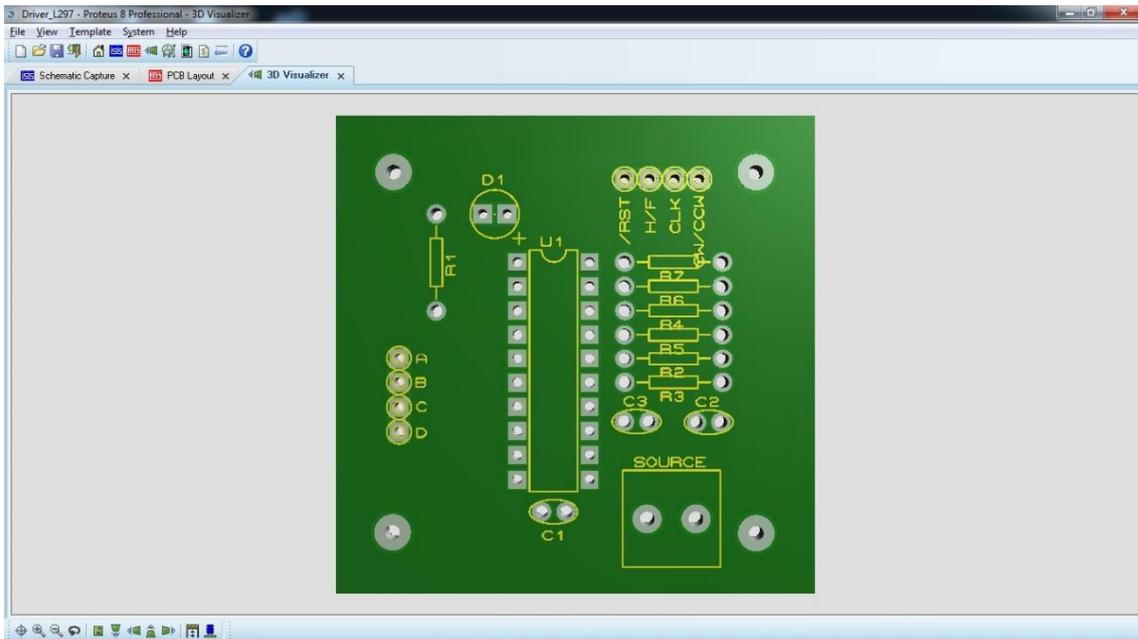


Figura 25 - Visualização 3D via Proteus 8: Face superior da PCI do L297

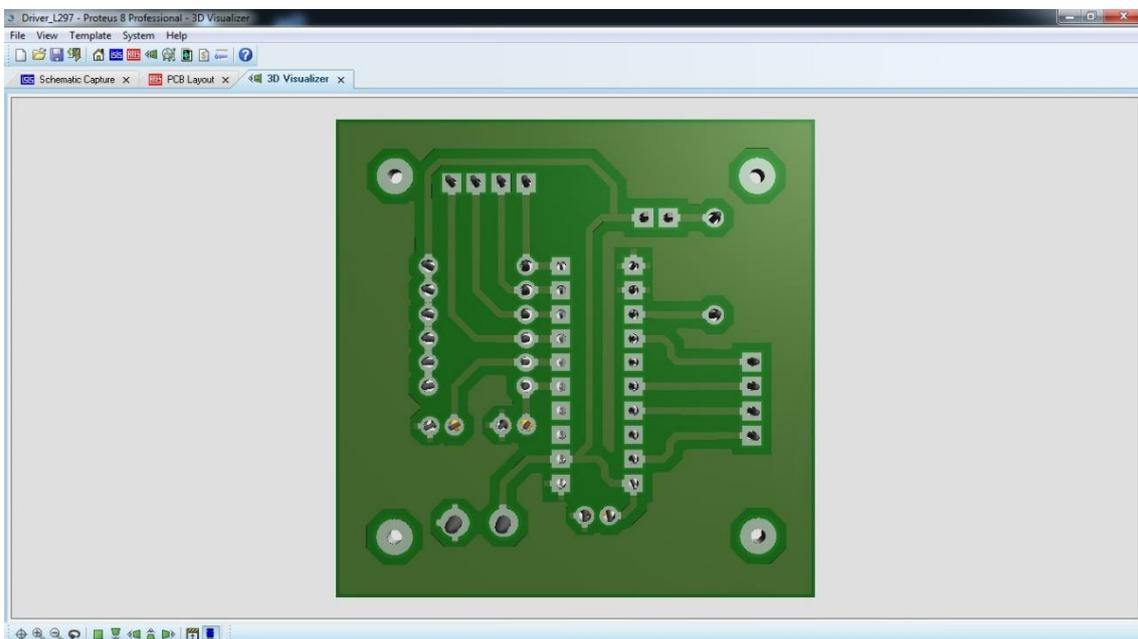


Figura 26 - Visualização 3D via Proteus 8: Face inferior da PCI do L297

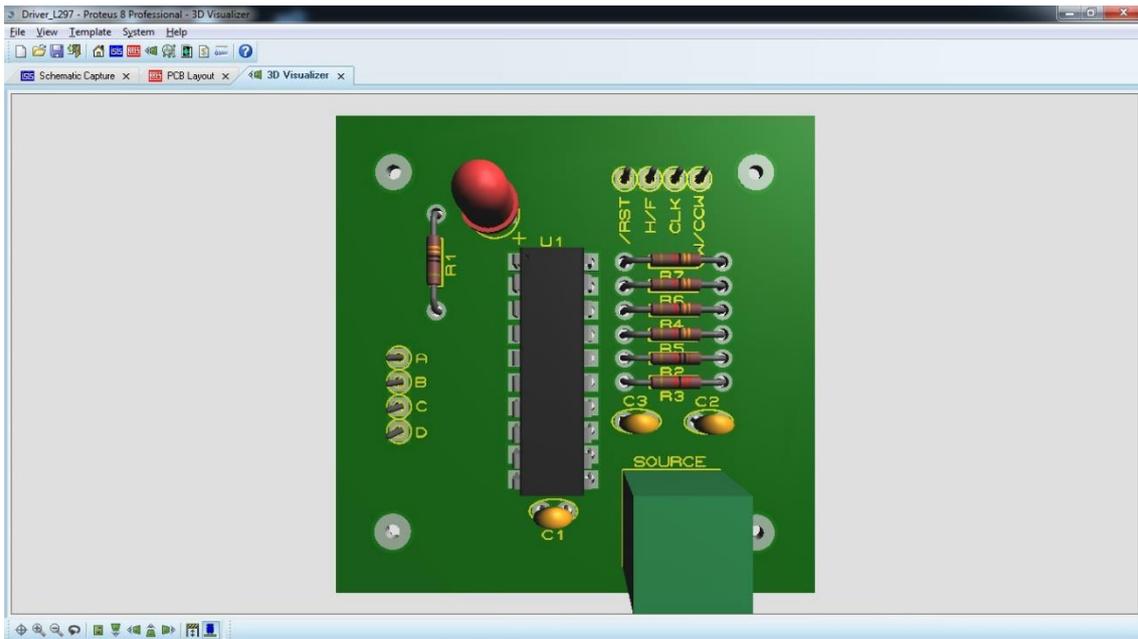


Figura 16 - Visualização 3D via Proteus 8: Face superior com componentes da PCI do L297

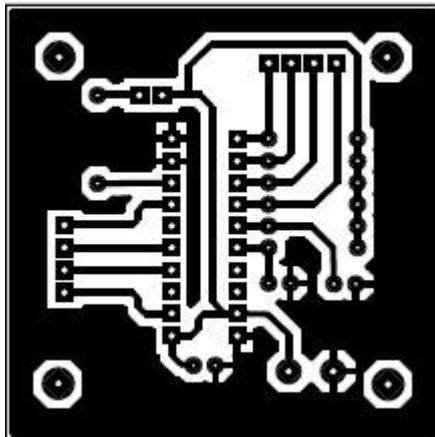


Figura 28 – Layout da PCI do L297

### 3.2.4.3. Lay-out da PCI do Controle de Temperatura

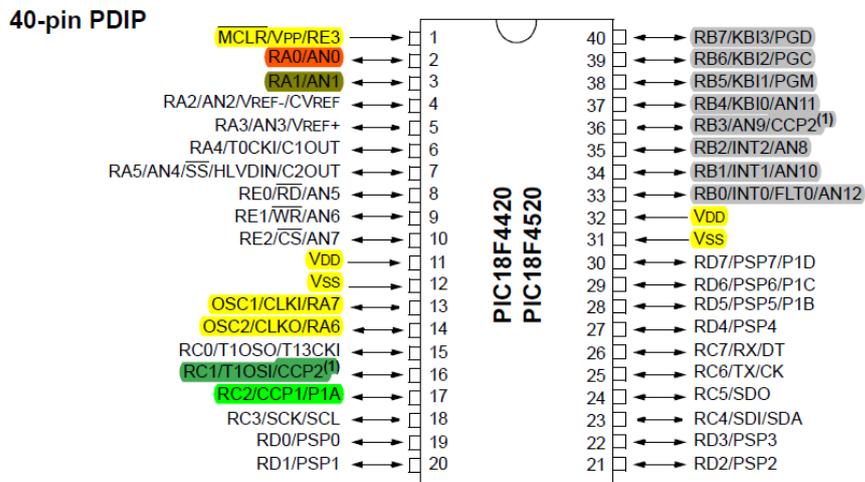


Figura 29 - Terminais e Funções do PIC utilizados no projeto

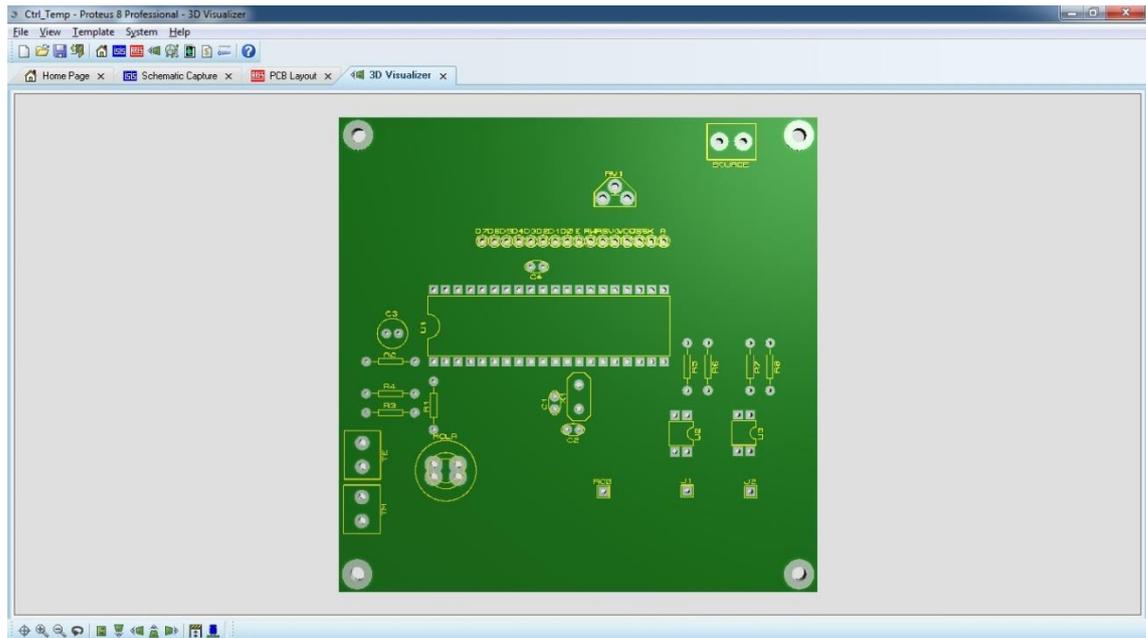


Figura 30 - Visualização 3D via Proteus 8: Face superior da PCI do Controle de Temperatura

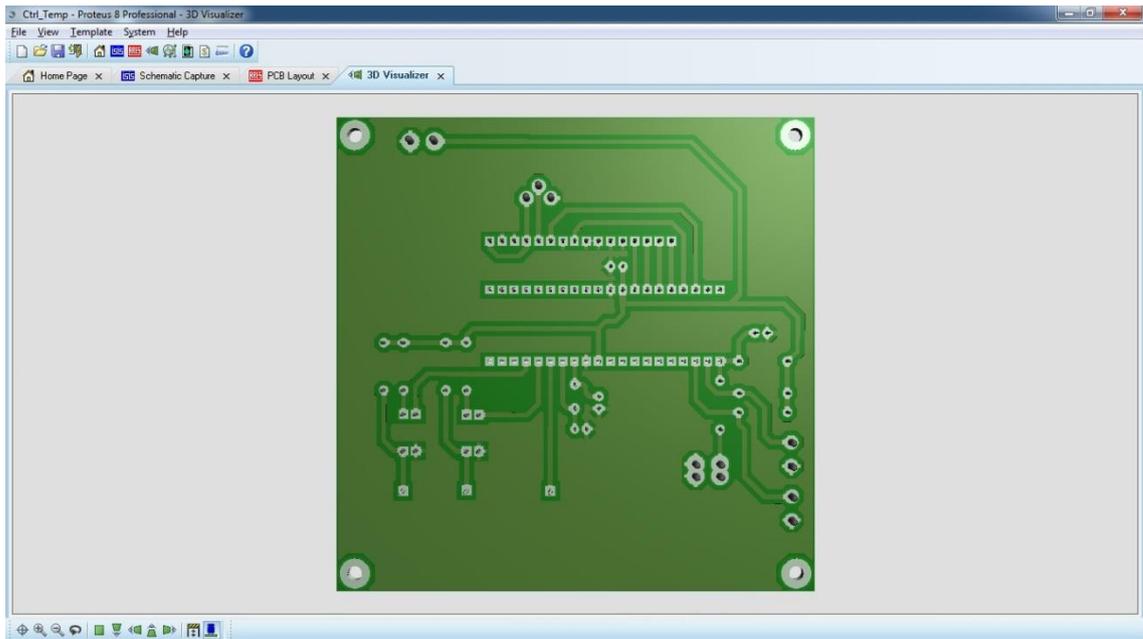


Figura 31 - Visualização 3D via Proteus 8: Face inferior da PCI do Controle de Temperatura

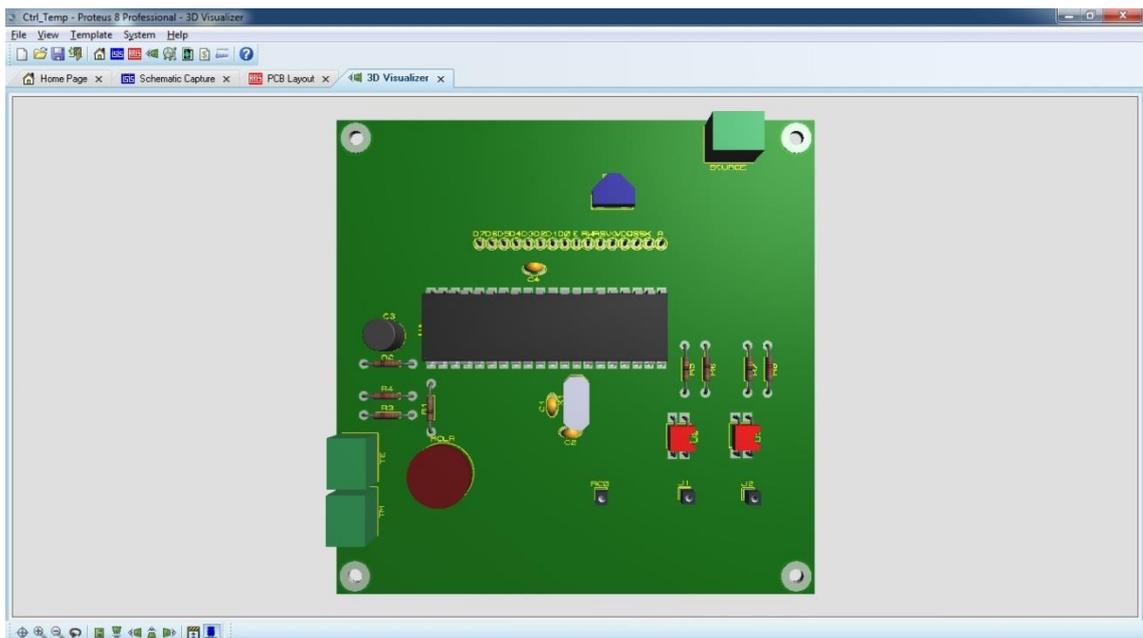


Figura 32 - Visualização 3D via Proteus 8: Face superior com componentes da PCI do Controle de Temperatura

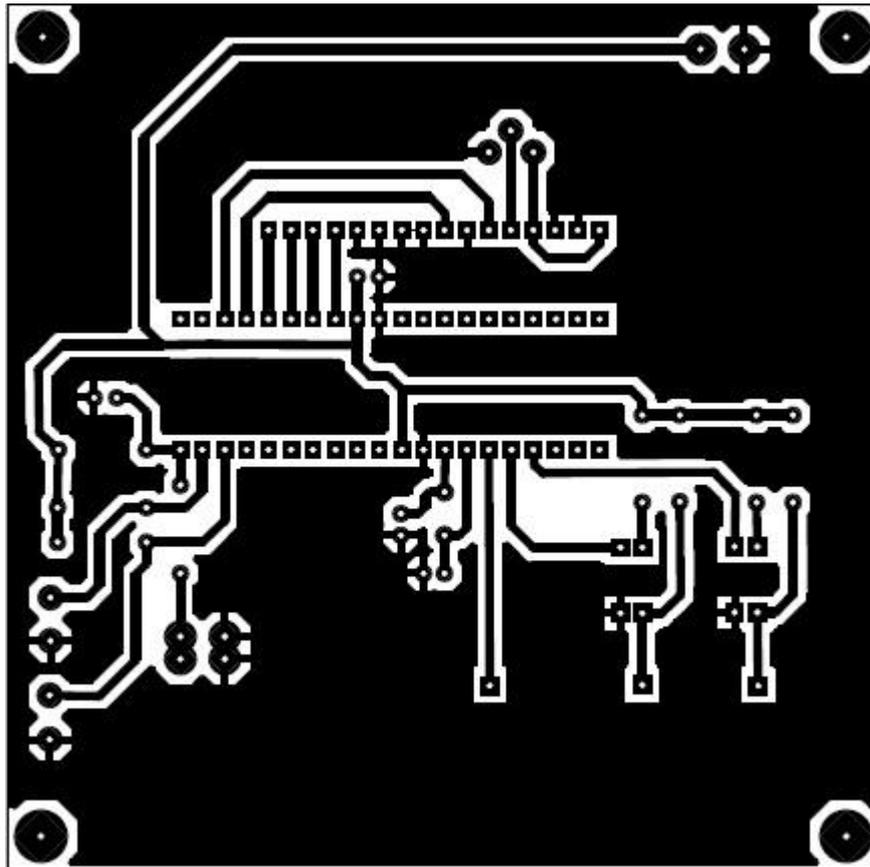


Figura 33 – Layout da PCI do Controle de Temperatura

### 3.2.4.4. Lay-out da PCI do Microcontrolador

#### 40-Pin PDIP

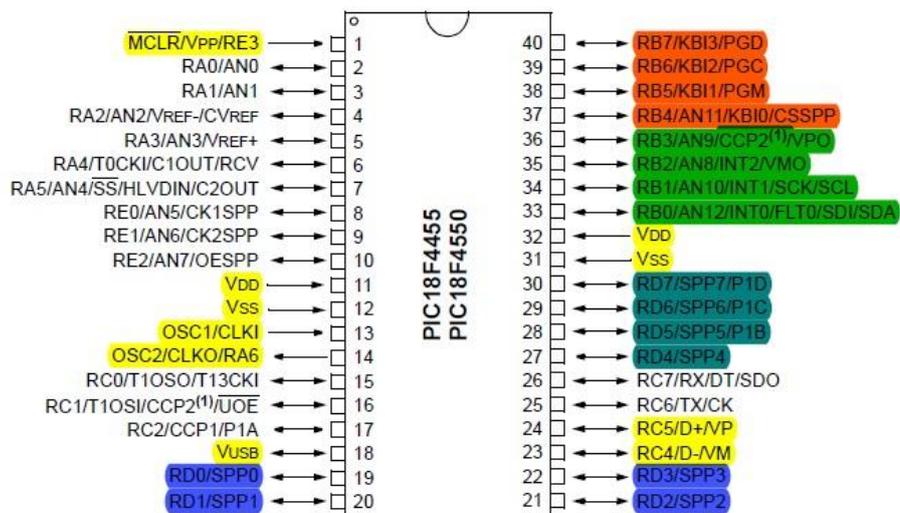


Figura 17 - Terminais e Funções do PIC utilizados no projeto

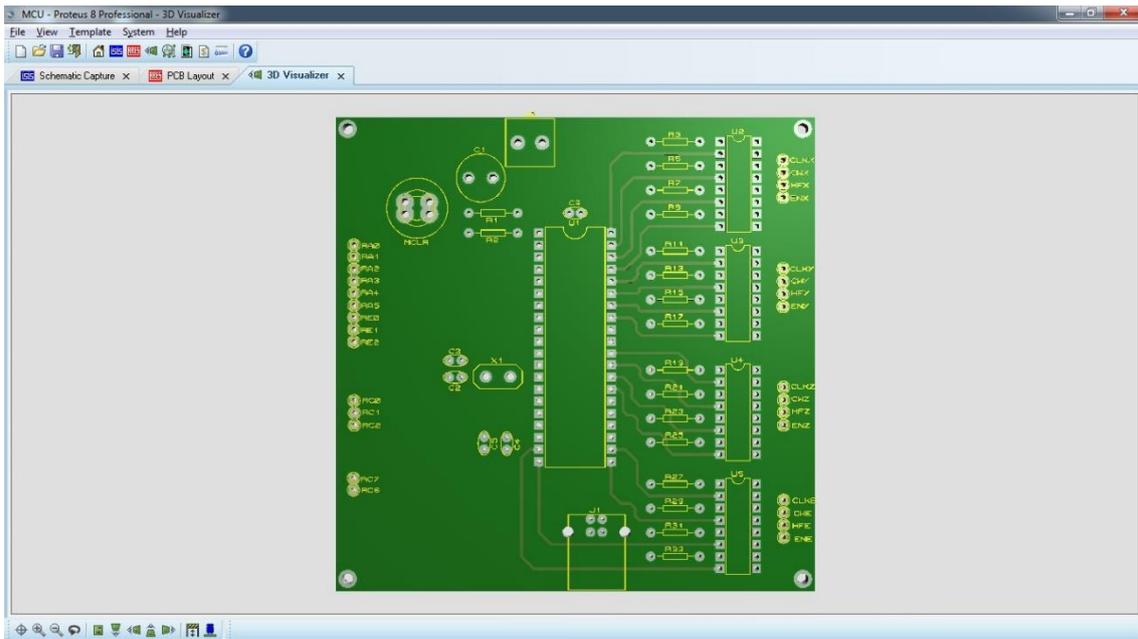


Figura 35 - Visualização 3D via Proteus 8: Face superior da PCI

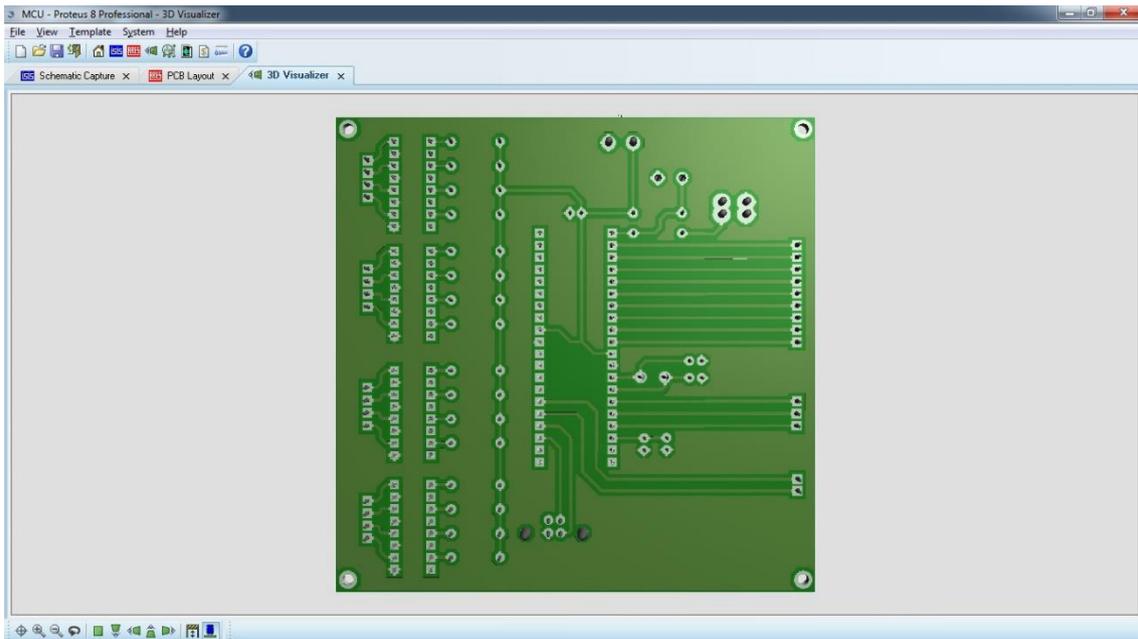


Figura 18 - Visualização 3D via Proteus 8: Face inferior da PCI

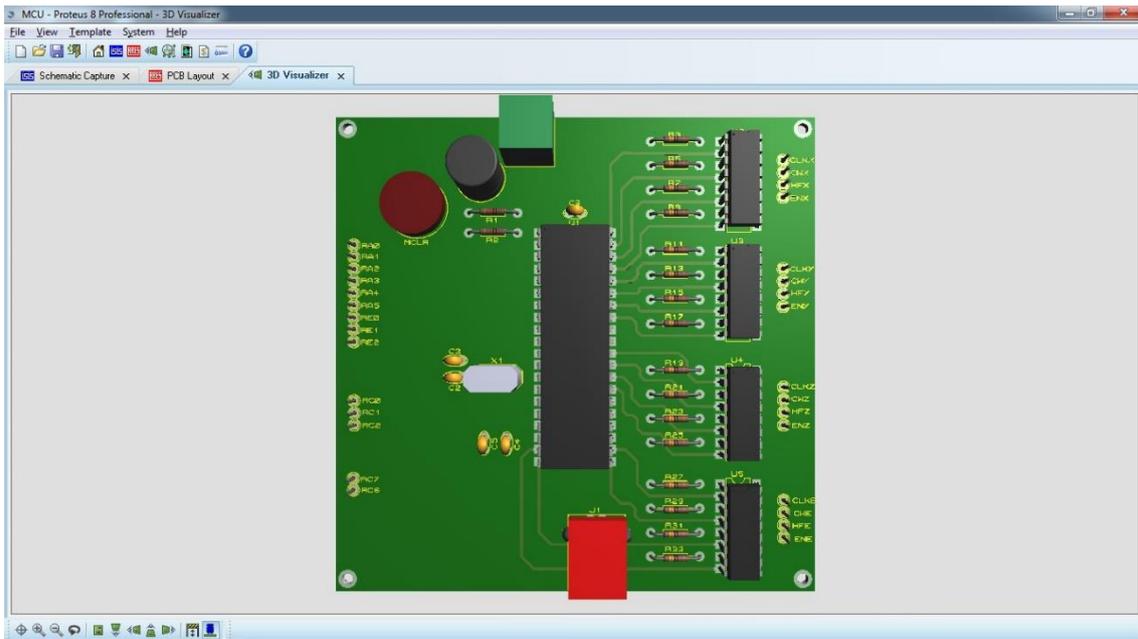


Figura 19 - Visualização 3D via Proteus 8: Face superior com componentes na PCI

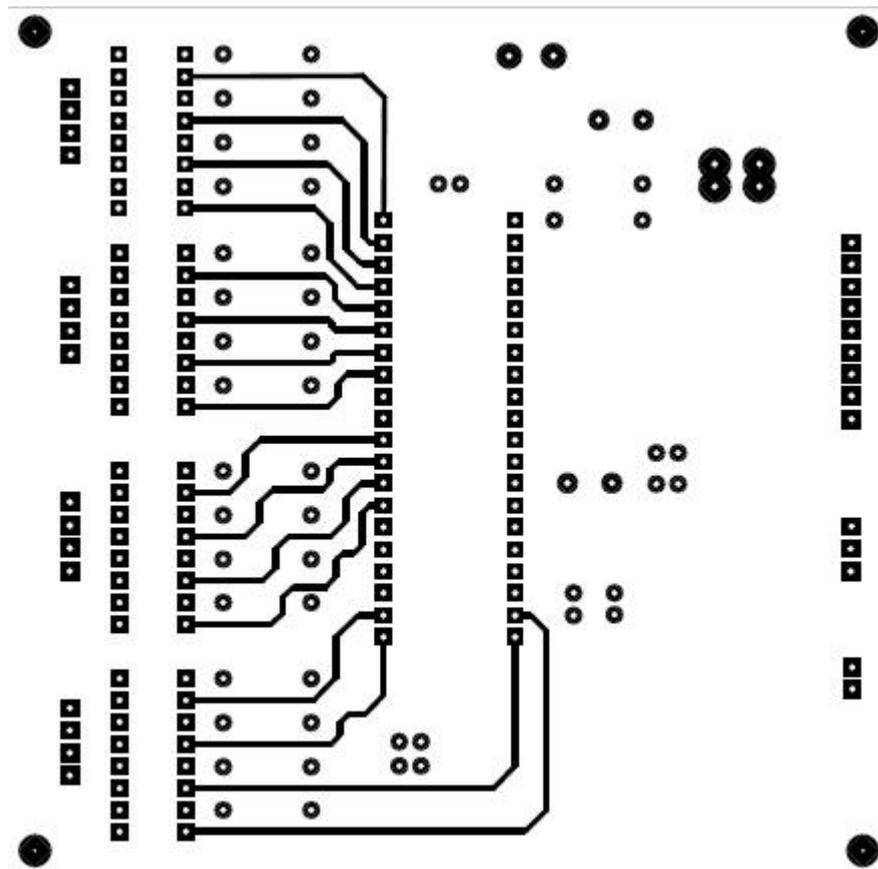


Figura 20 - Layout Superior da PCI

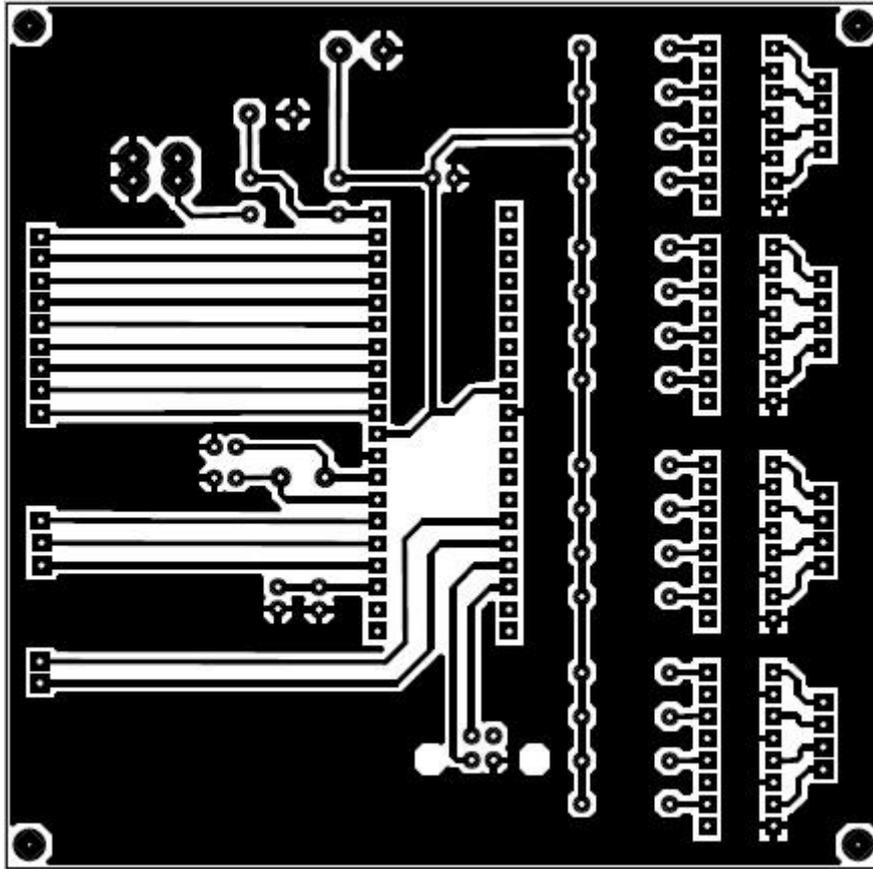


Figura 21 - Layout Inferior da PCI

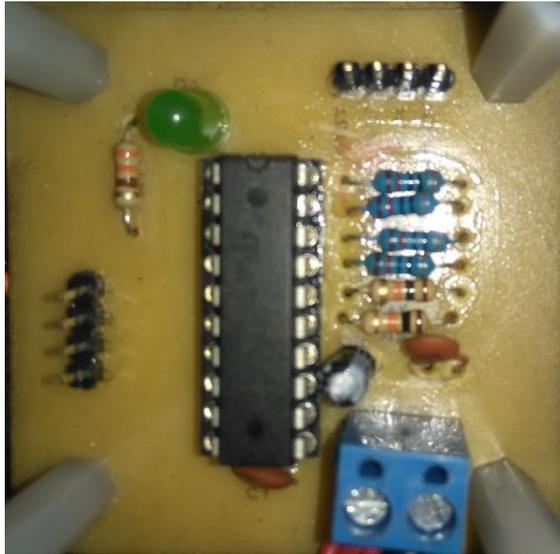
#### 3.2.4.5. Processo de fabricação

O processo de fabricação para todas as placas de circuitos impressos teve a mesma metodologia.

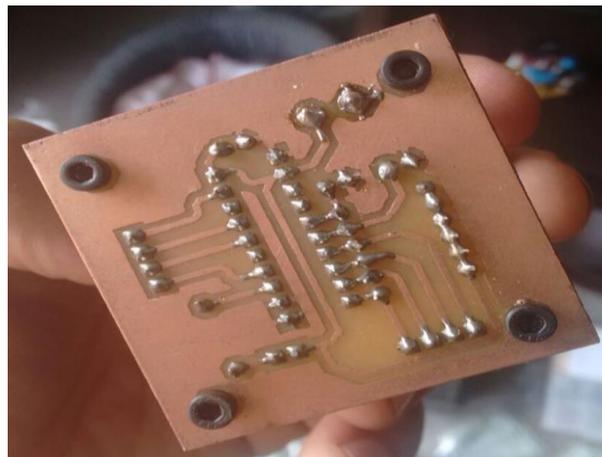
- Desenvolvimento do *lay-out* na ferramenta ARES do software Proteus 8;
- Impressão do laiaute em uma impressora a laser e em folha de papel glossy (papel fotográfico brilhante preferencialmente);
- Limpeza da superfície cobreada da placa de fenolite (remoção de gordura e poeira);
- Transferência térmica da imagem impressa para a face cobreada de uma placa de fenolite;
- Reforço manual das trilhas e ilhas com utilização de caneta piloto de tinta preta (se necessário);
- Corrosão por percloroeto de ferro da placa de cobre;

- Enxague com água corrente;
- Remoção do papel presente na PCI;
- Limpeza final, furação e soldagem dos componentes.

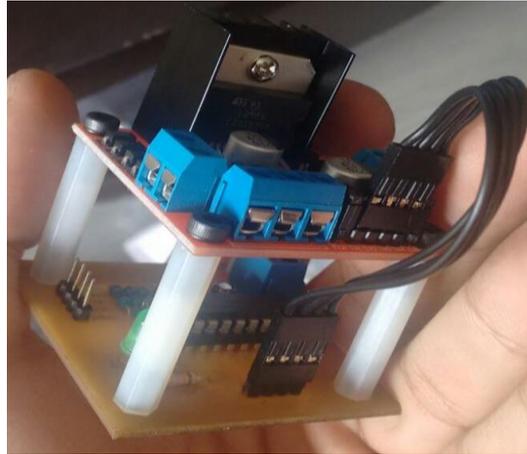
#### 3.2.4.6. PCI L297 e L298 Concluída



*Figura 40 - Lado superior do Modulo*

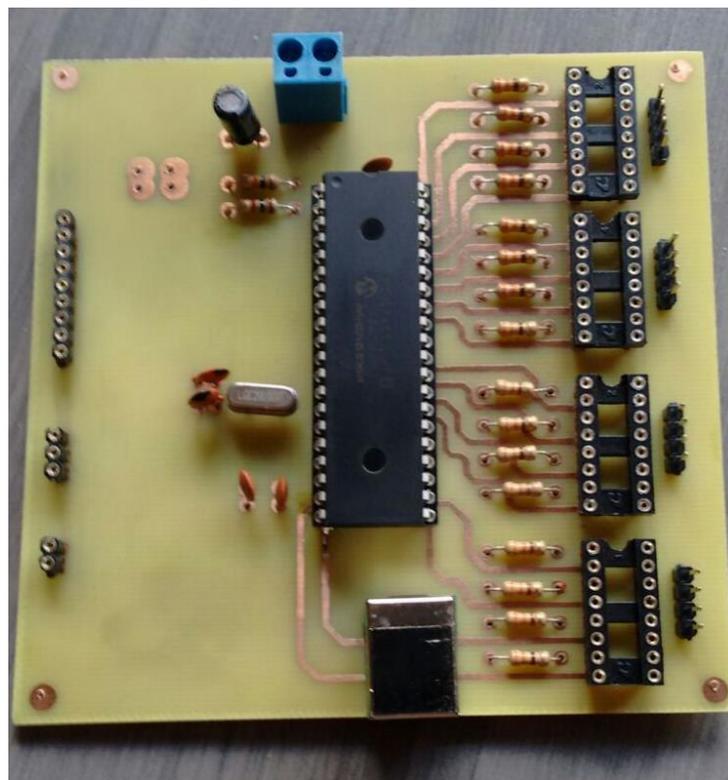


*Figura 22 - Lado inferior do Modulo*



*Figura 23 - Modulo Driver concluído*

#### 3.2.4.7. PCI do Microcontrolador Concluída



*Figura 24 - PCI do Microcontrolador - face dos componentes*

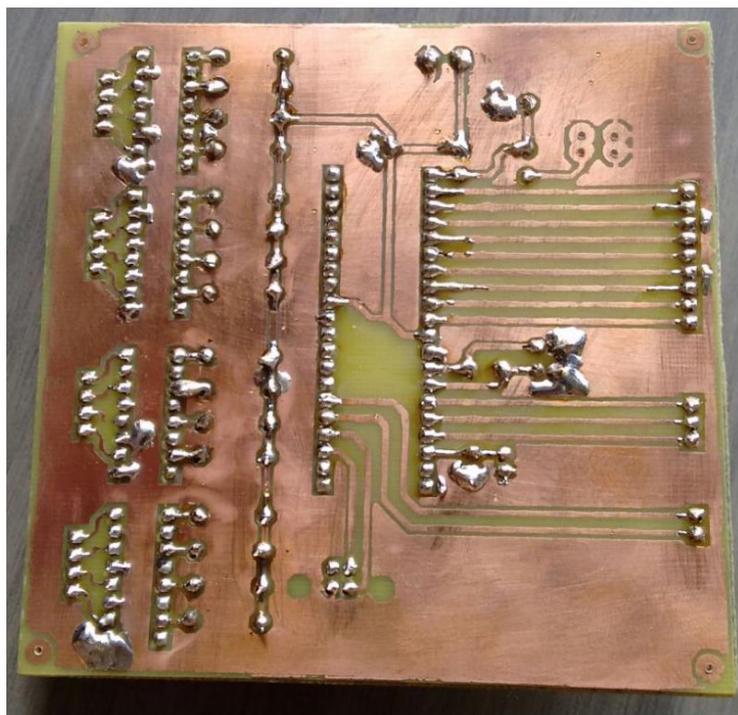


Figura 25 - PCI do Microcontrolador - face de soldagem

### 3.2.5. Lista de materiais eletrônicos

- 1x Barra de terminais fêmea
- 1x Barra de terminais macho
- 8x Borne 2 vias
- 4x Capacitor 1uF
- 2x Capacitor 10uF
- 4x Capacitor 10nF
- 4x Capacitores 100nF
- 4x Capacitores 22pF
- 1x Conector USB B Fêmea 90°
- 1x Conector Sindal 250V/ 3A
- 2x Cristal 20 MHz
- 1x Display LCD 16x2
- 4x L297
- 4x Led verde
- 2x PC817
- 1x PIC16F877a
- 1x PIC18F4550
- 2x Tecla
- 14x Resistor 330R
- 2x Resistor 1k
- 13x Resistor 10k
- 1x Resistor 20k
- 16x Resistor 30k
- 4x Soquete torneado 20 pinos
- 4x Soquete torneado 16 pinos
- 2x Soquete torneado 40 pinos
- Driver L298
- 1x Trimpot horizontal 10K

### 3.3. Firmware do Microcontrolador PIC18F4550

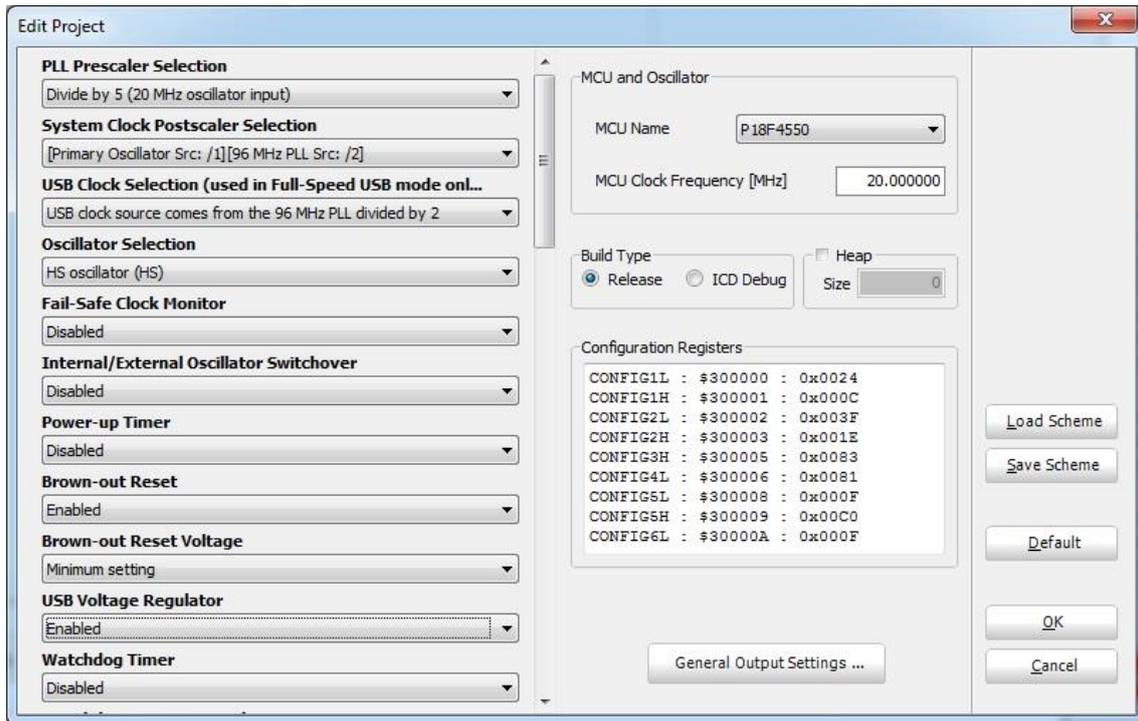


Figura 26 - Configuração do microcontrolador

#### 3.3.1. Fluxograma

Para facilitar o entendimento da programação feita no microcontrolador (disponível na mídia magnética) o seguinte fluxograma desenvolvido para tal finalidade possui todas as funções lógicas representadas em suas formas e arranjos.

Uma explicação detalhada sobre a sua lógica de funcionamento é dada nas Figuras 45 a 63.

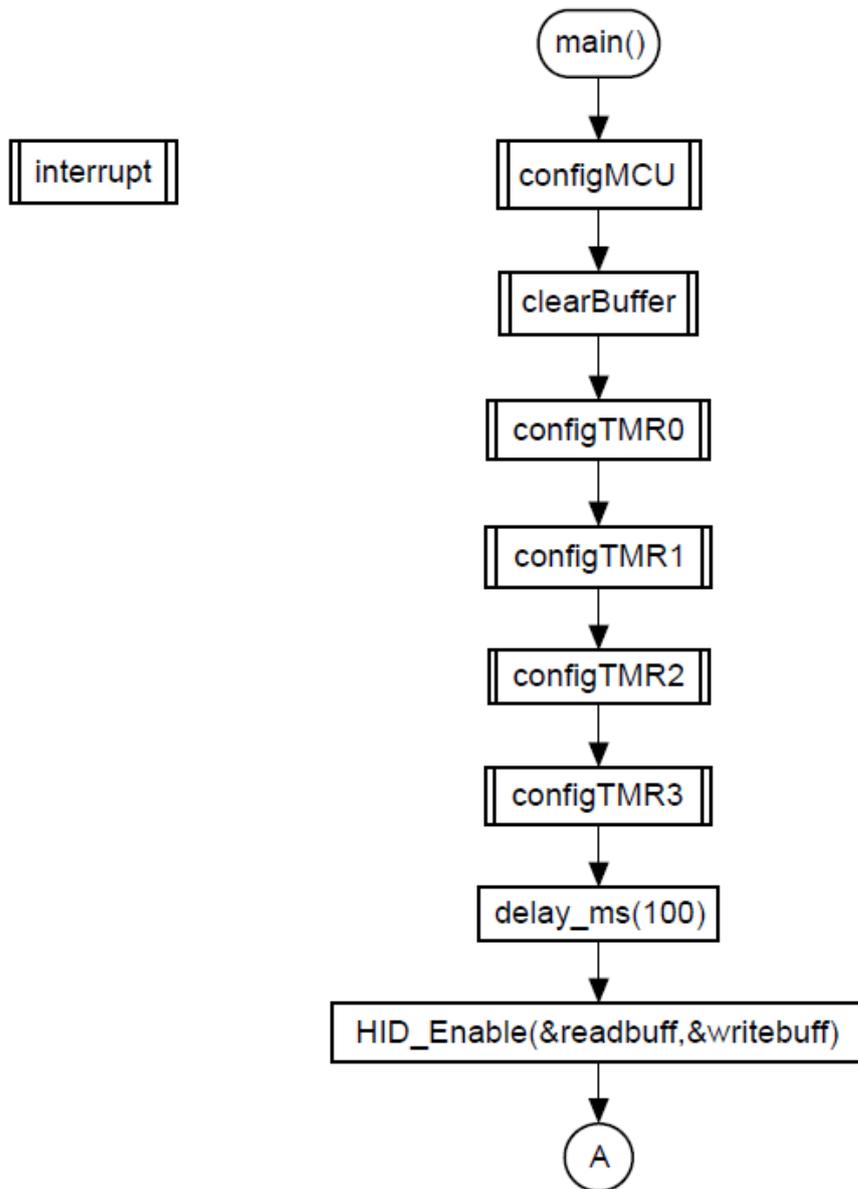


Figura 46 - Fluxograma, pagina 1

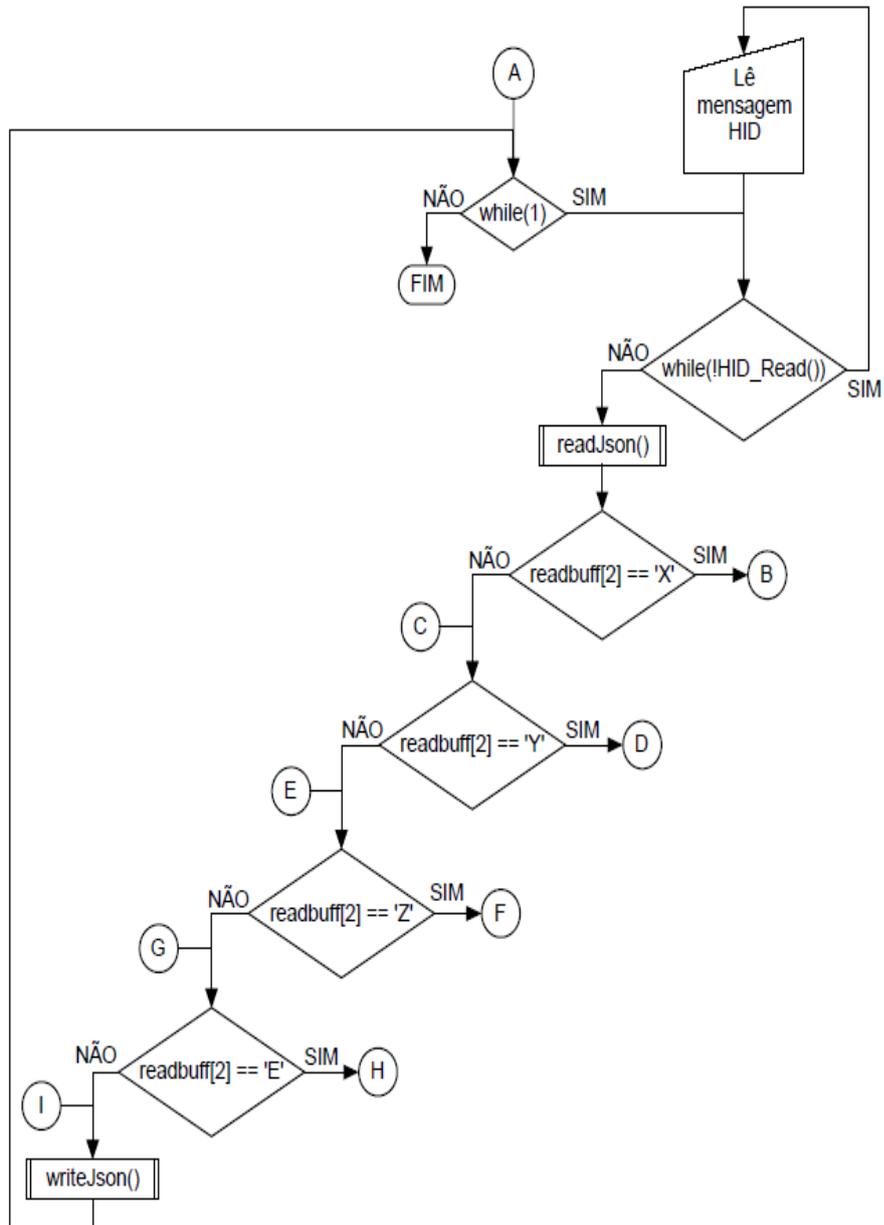


Figura 27 - Fluxograma, pagina 2

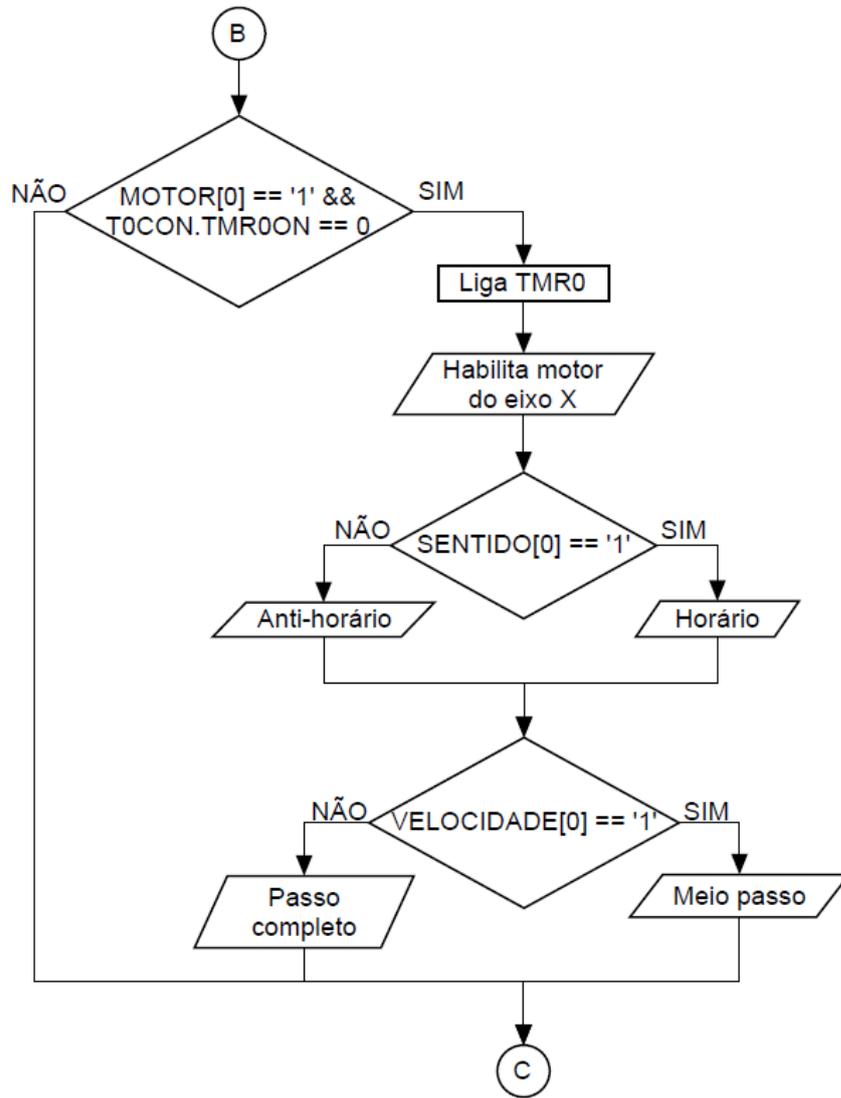


Figura 28 - Fluxograma, pagina 3

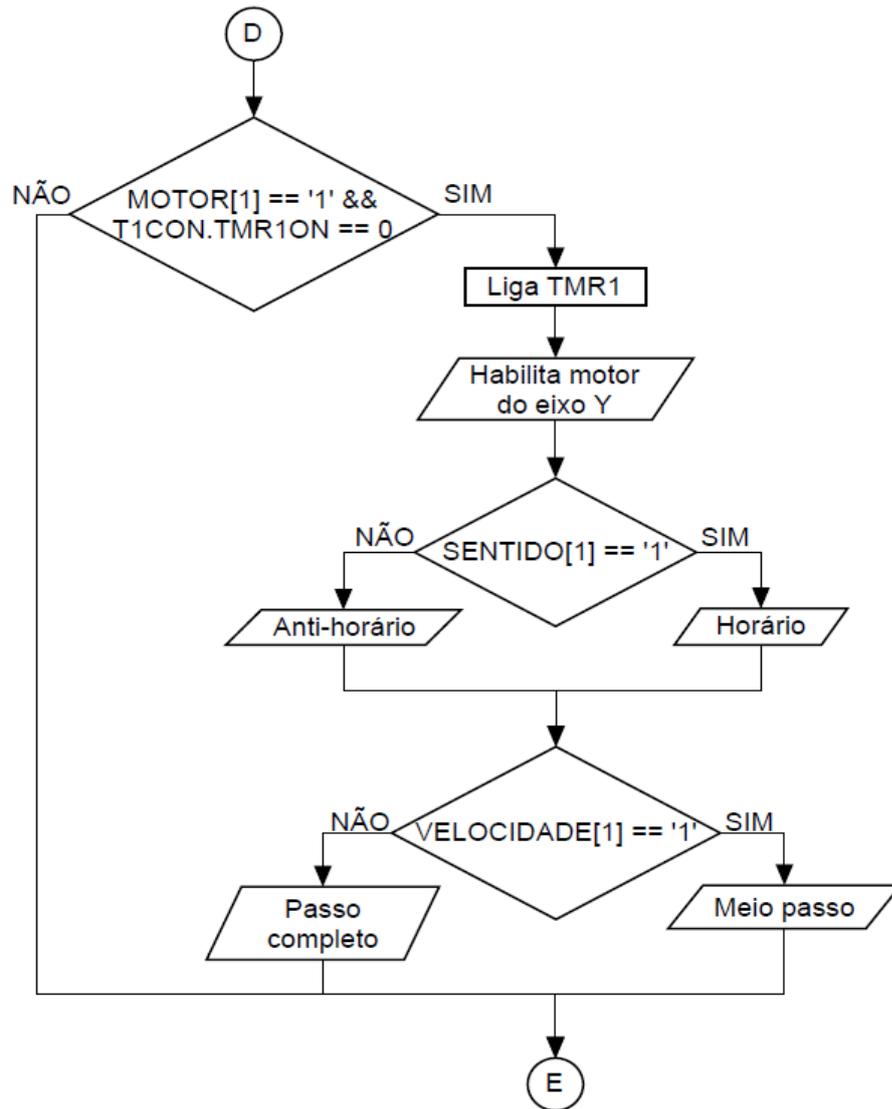


Figura 29 - Fluxograma, pagina 4

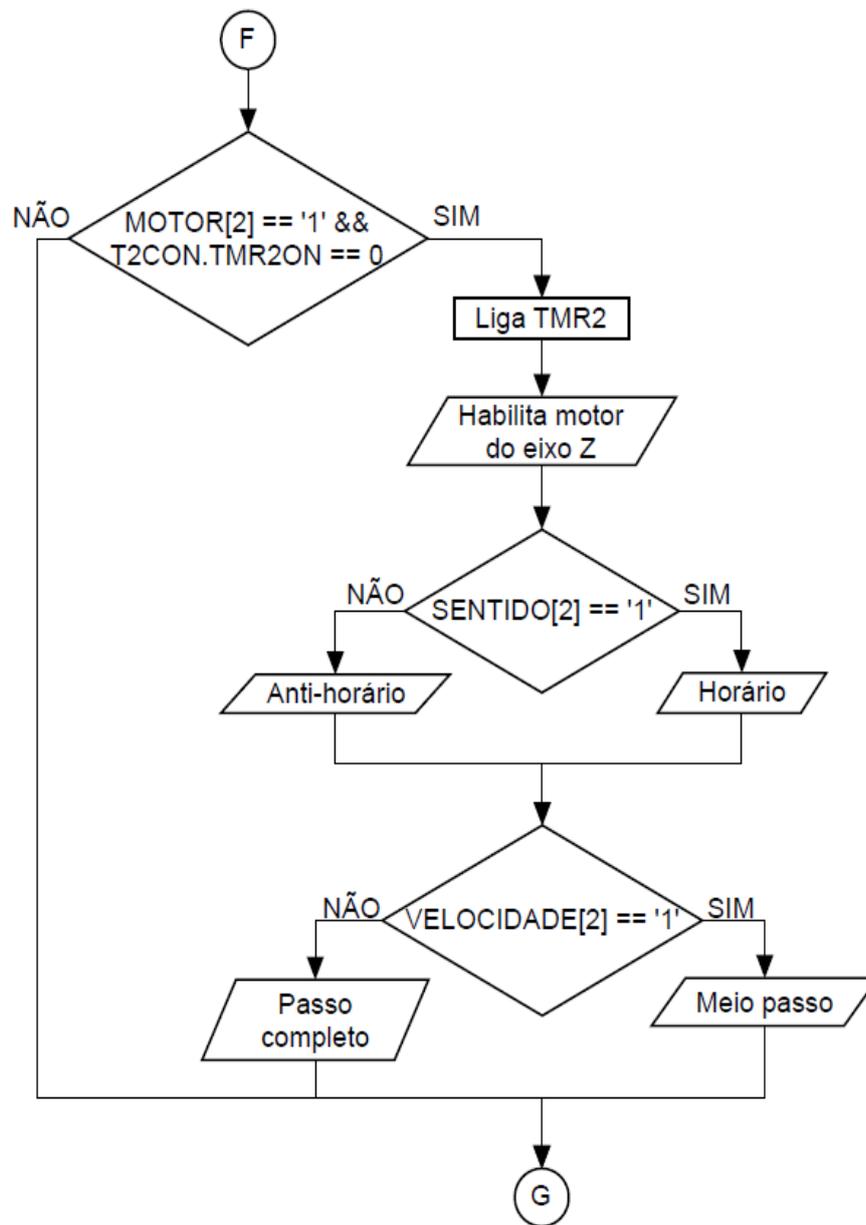


Figura 50 - Fluxograma, pagina 5

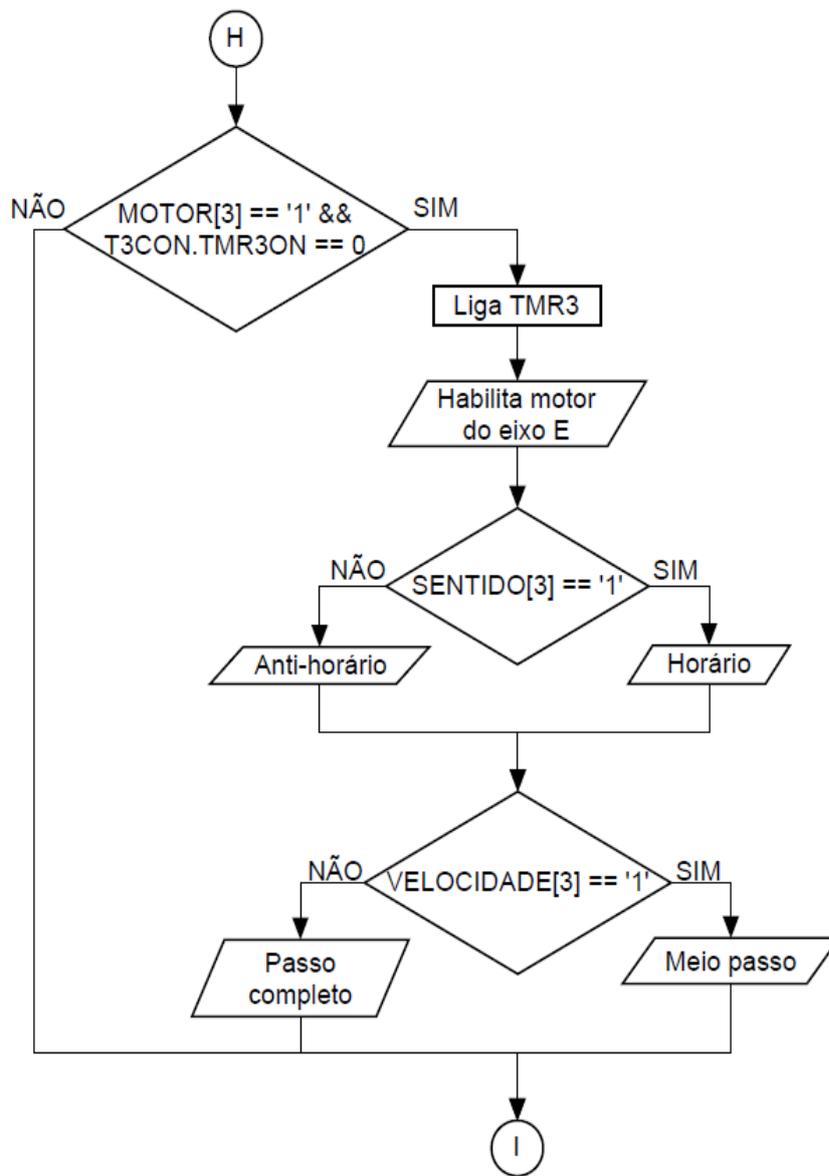


Figura 30 - Fluxograma, pagina 6

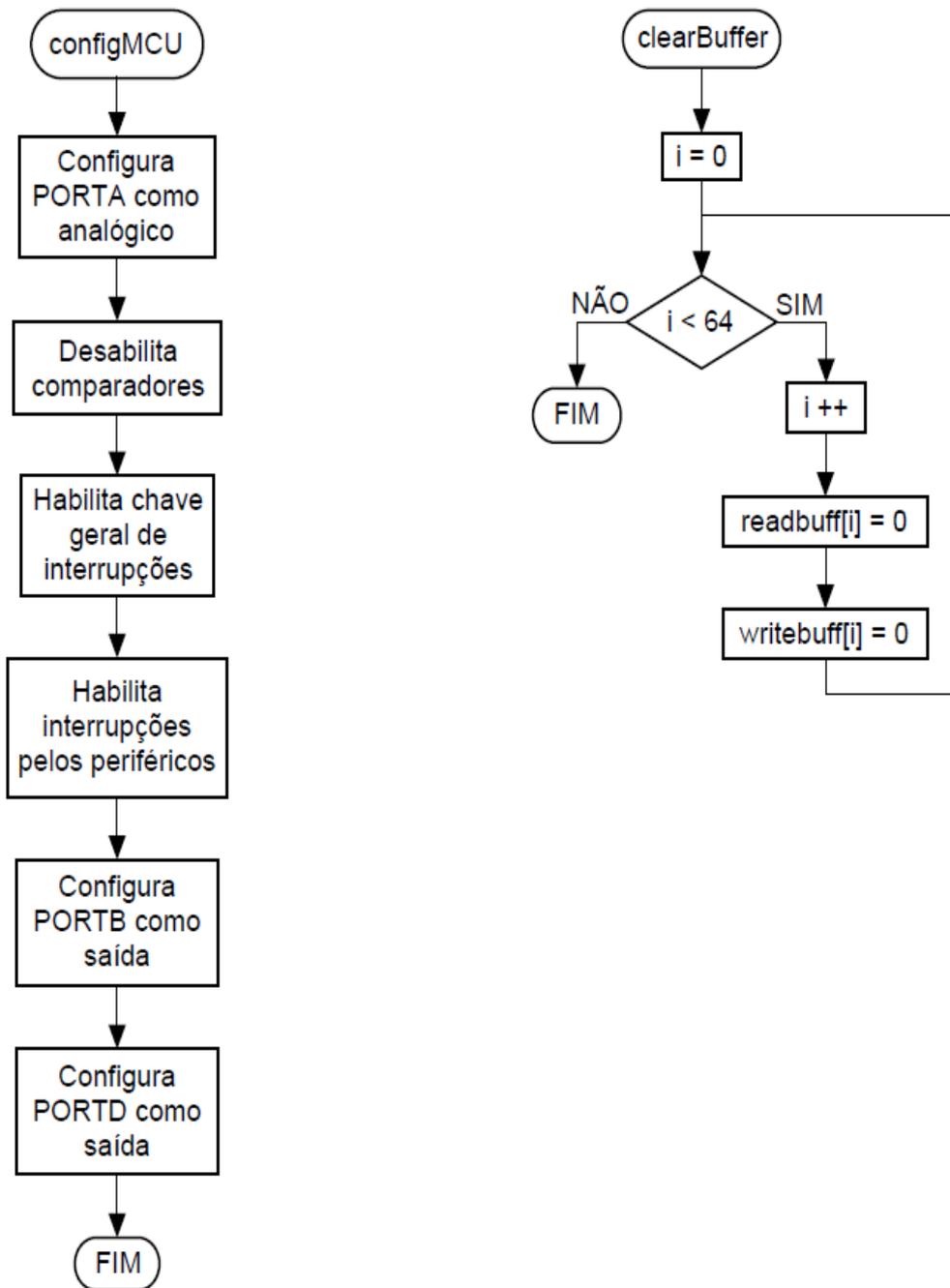


Figura 31 - Fluxograma, pagina 7

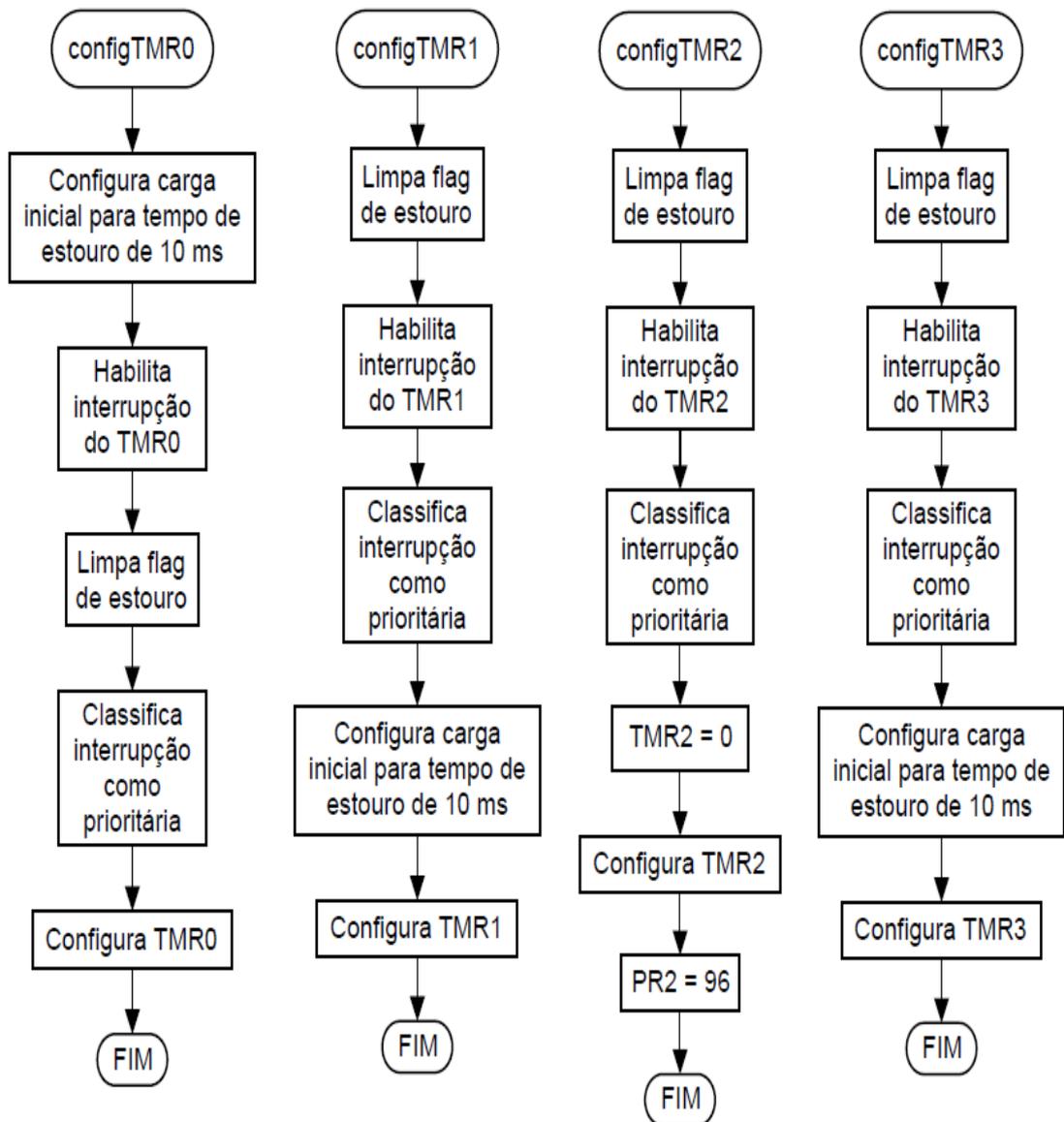


Figura 32 - Fluxograma, pagina 8

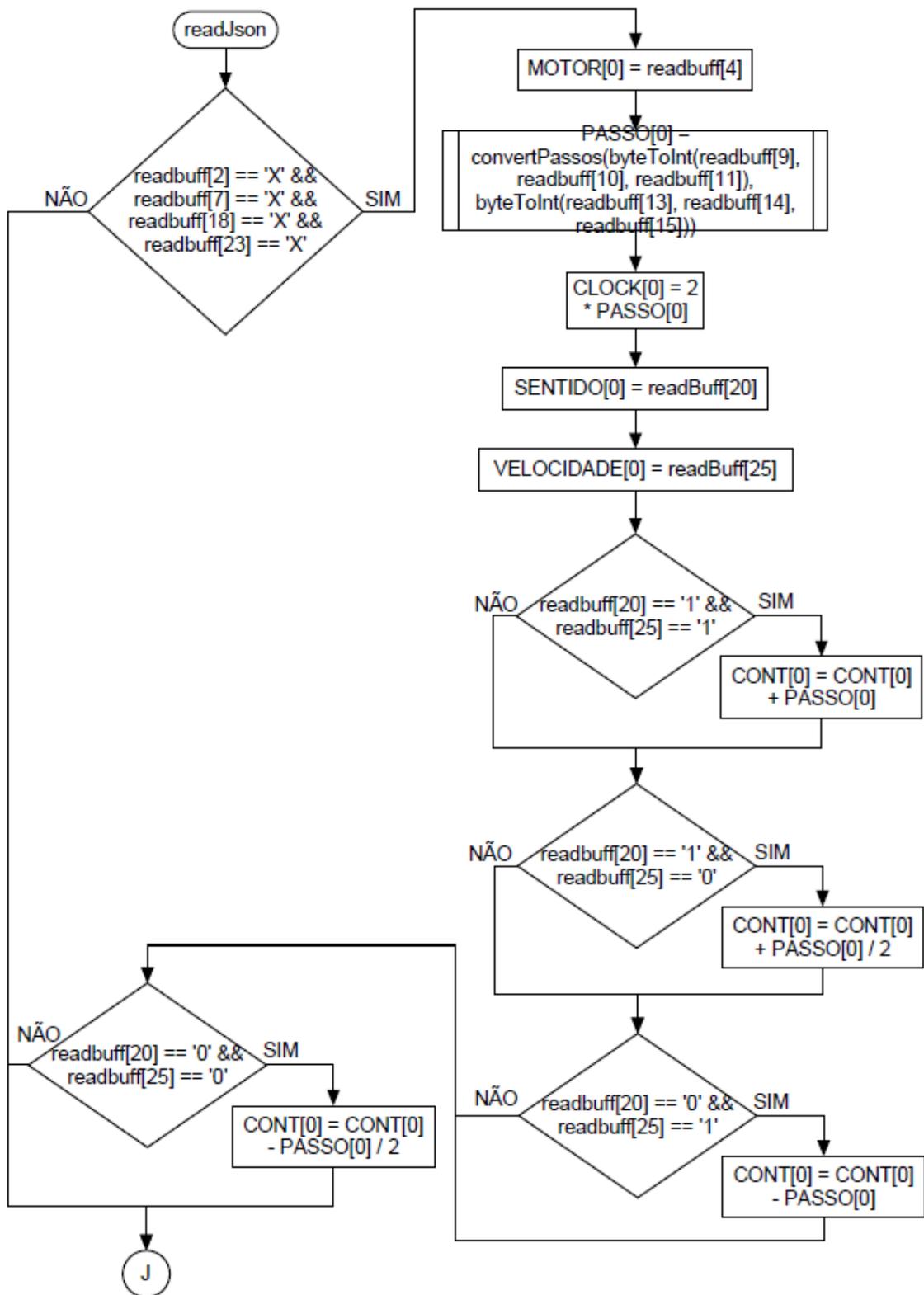


Figura 33 - Fluxograma, pagina 9

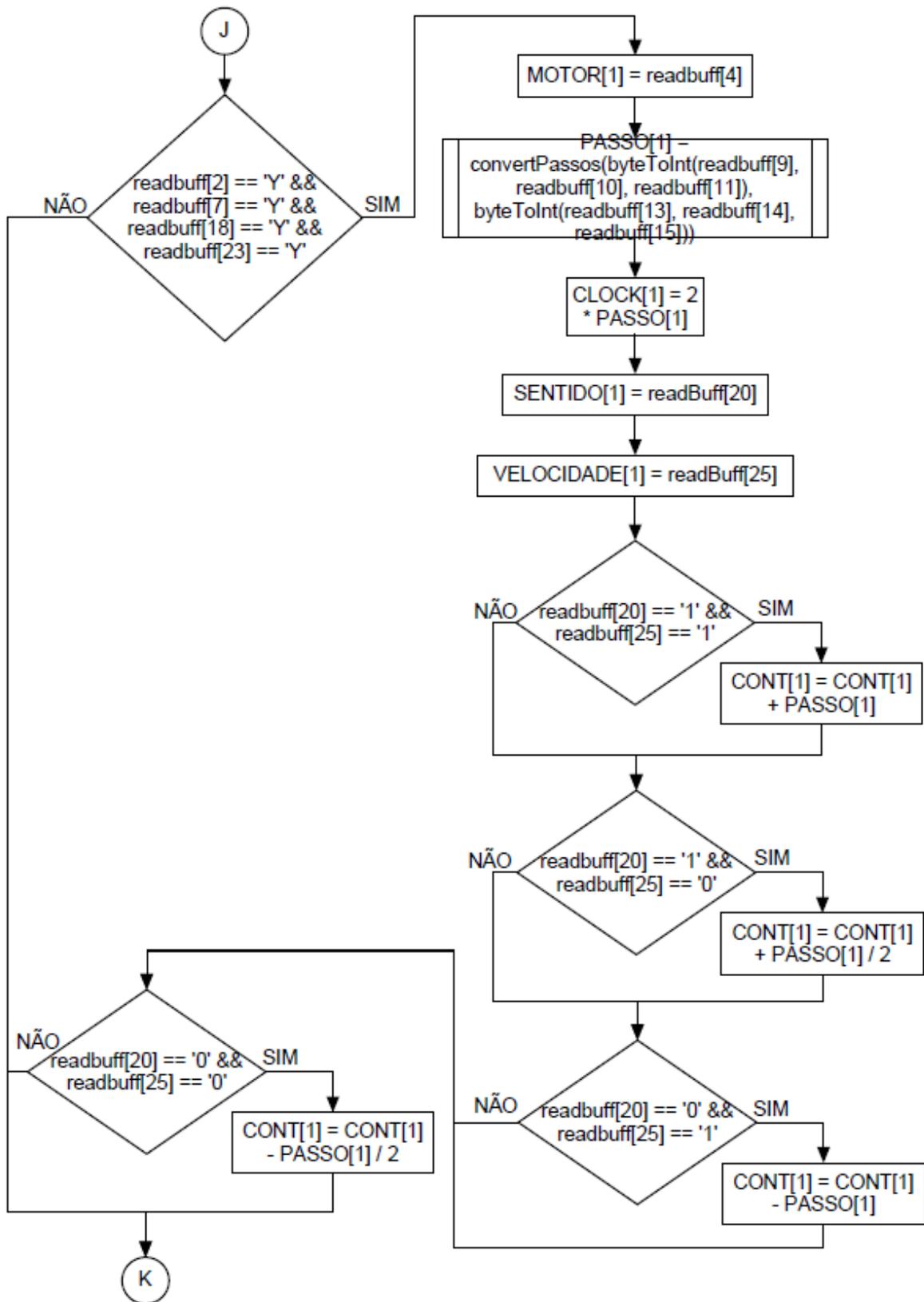


Figura 34 - Fluxograma, pagina 10

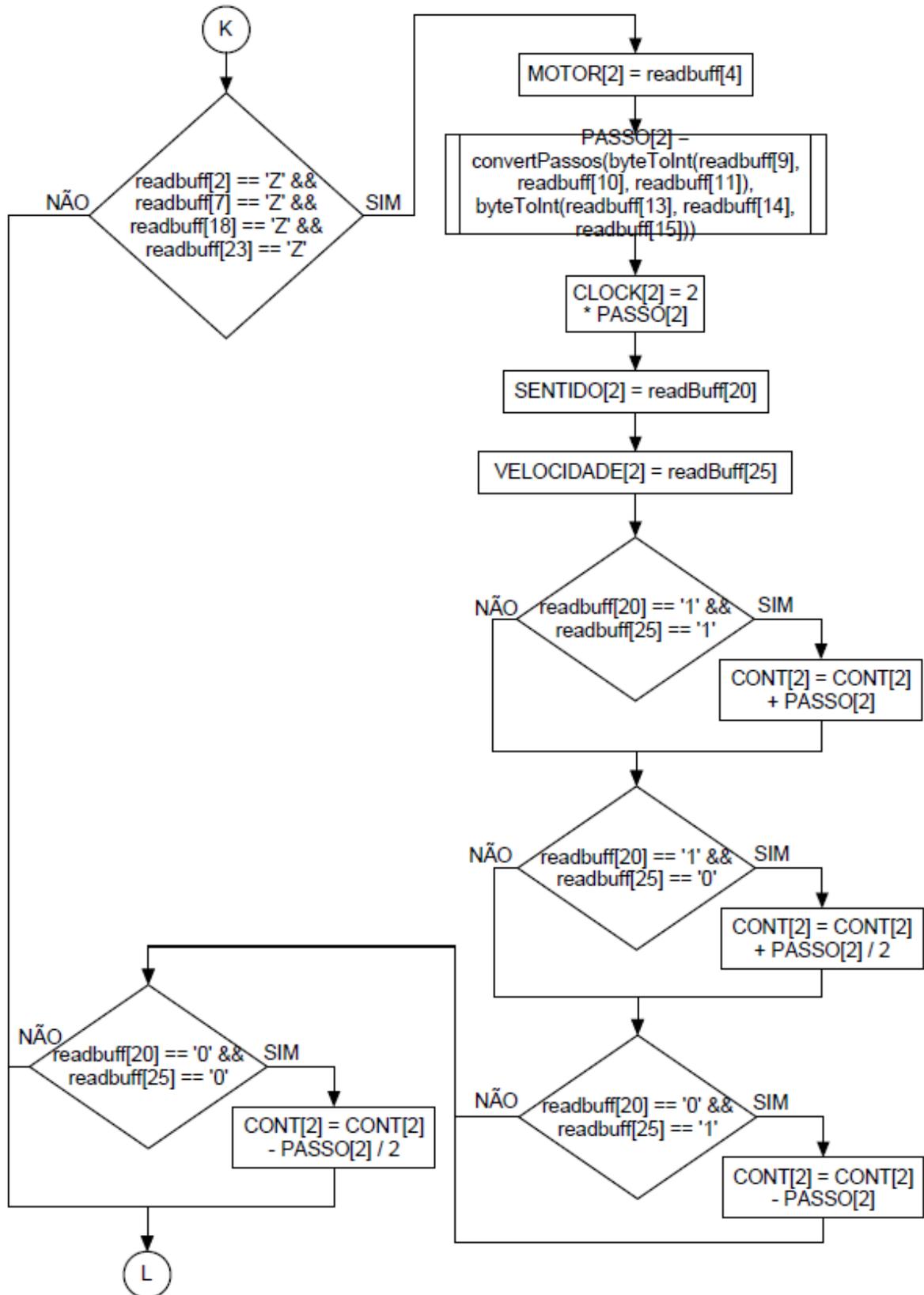


Figura 35 - Fluxograma, pagina 11

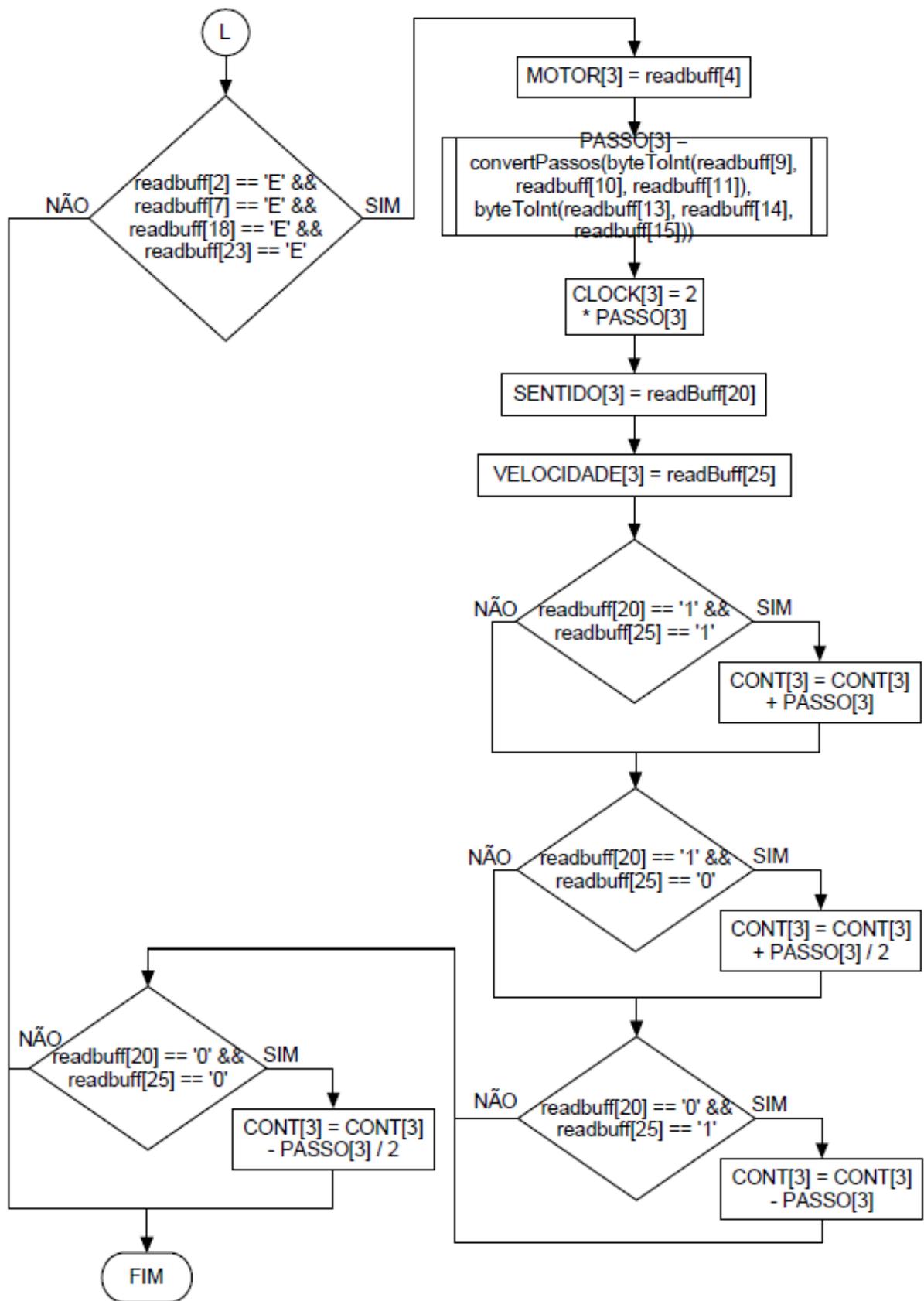


Figura 36 - Fluxograma, pagina 12

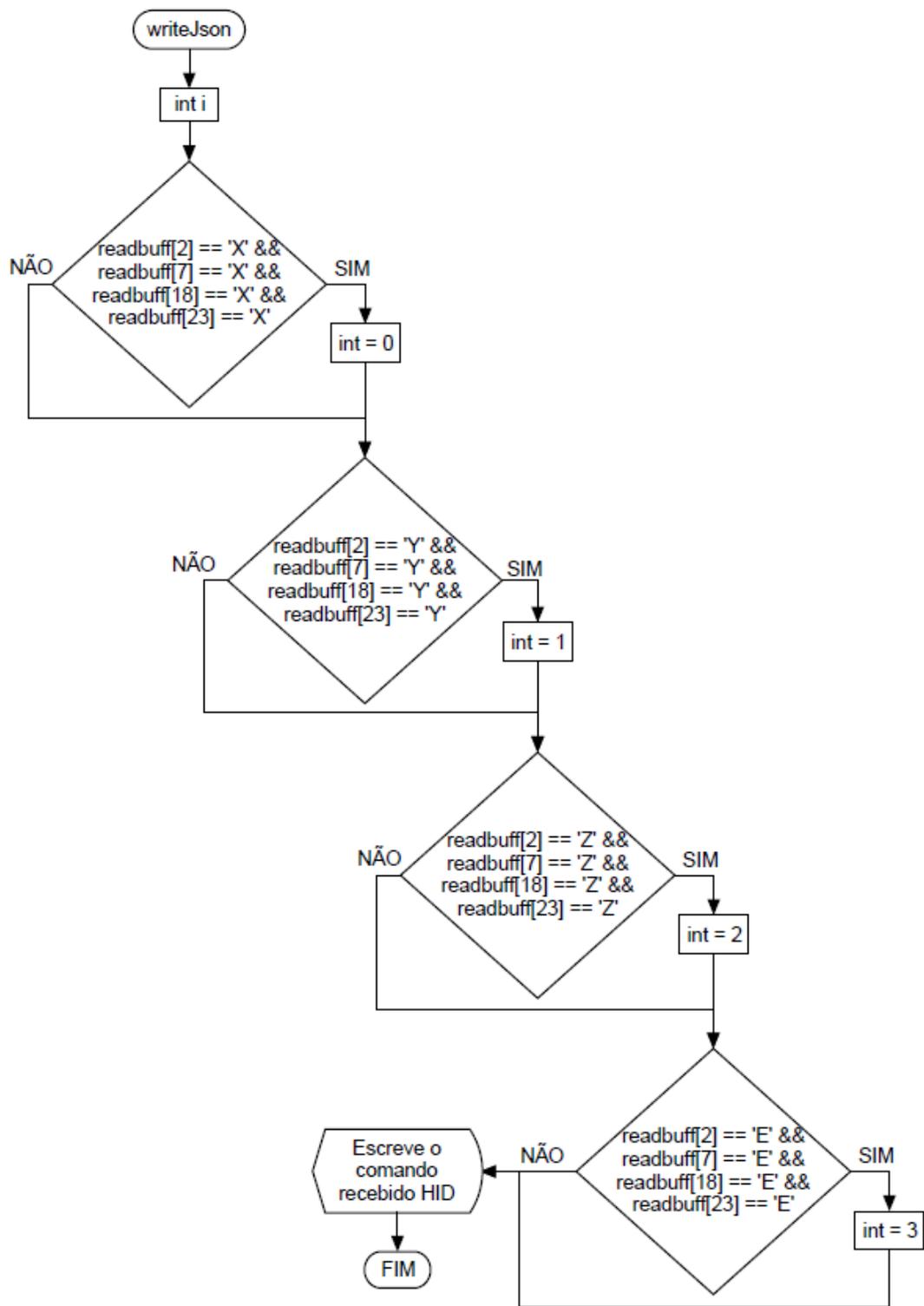


Figura 37 - Fluxograma, pagina 13

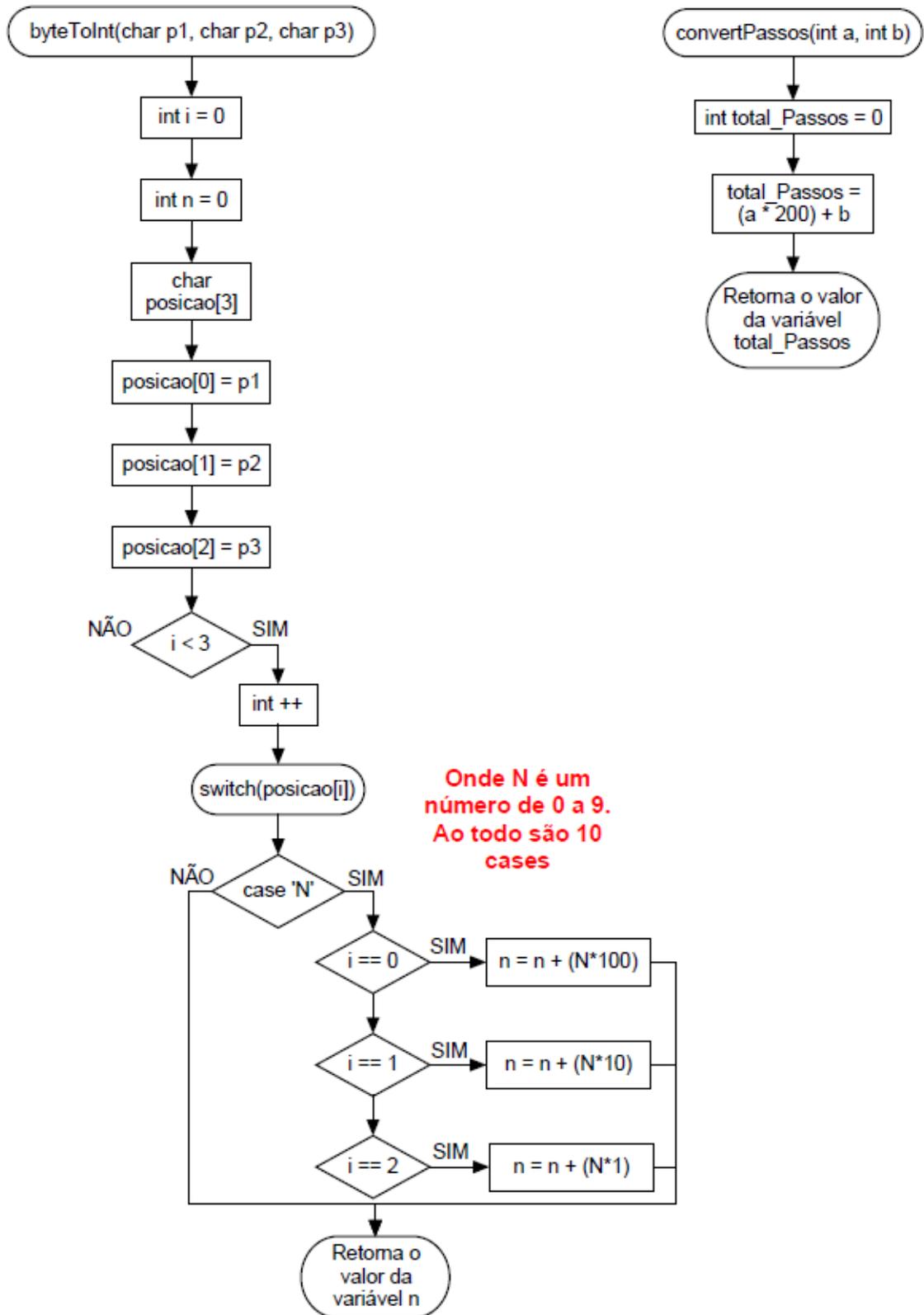


Figura 38 - Fluxograma, pagina 14

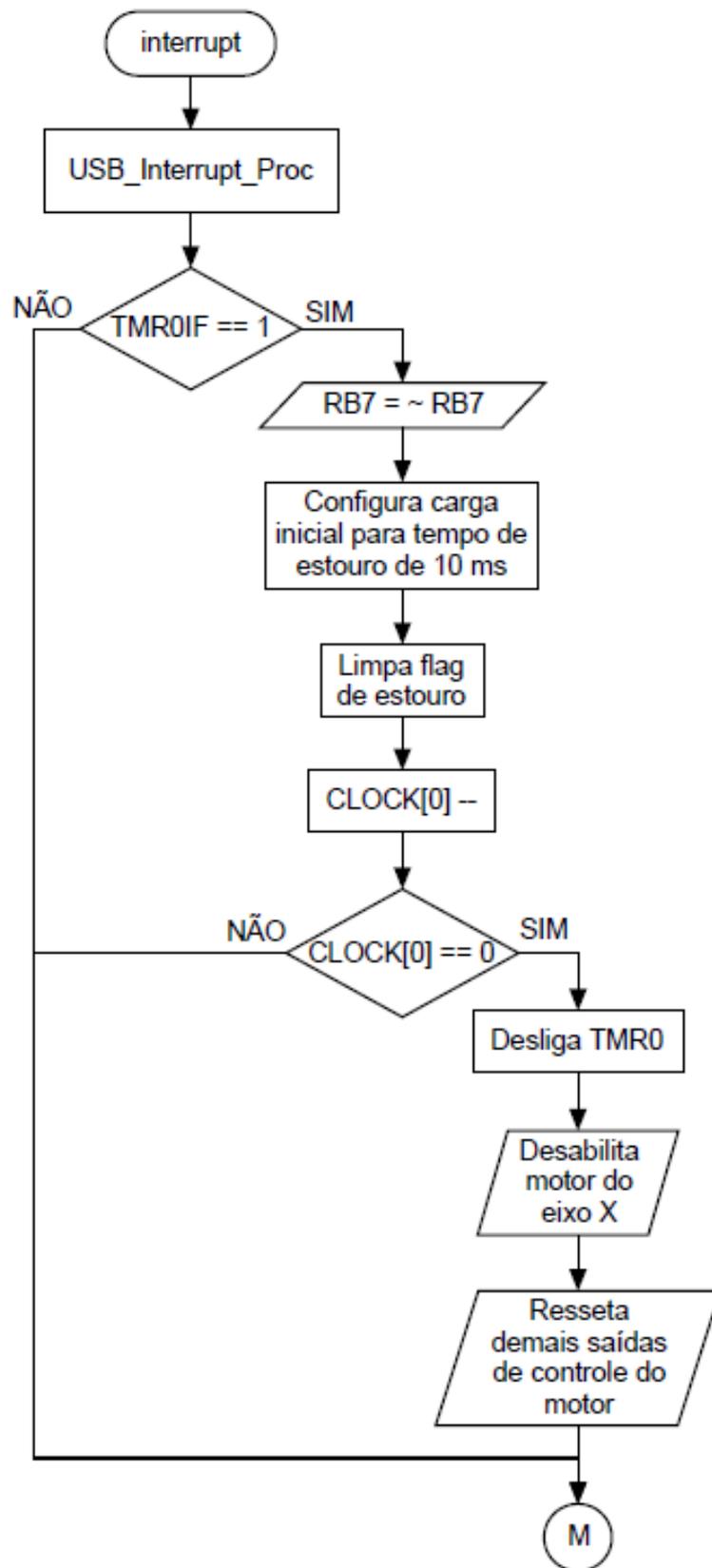


Figura 60 - Fluxograma, pagina 15

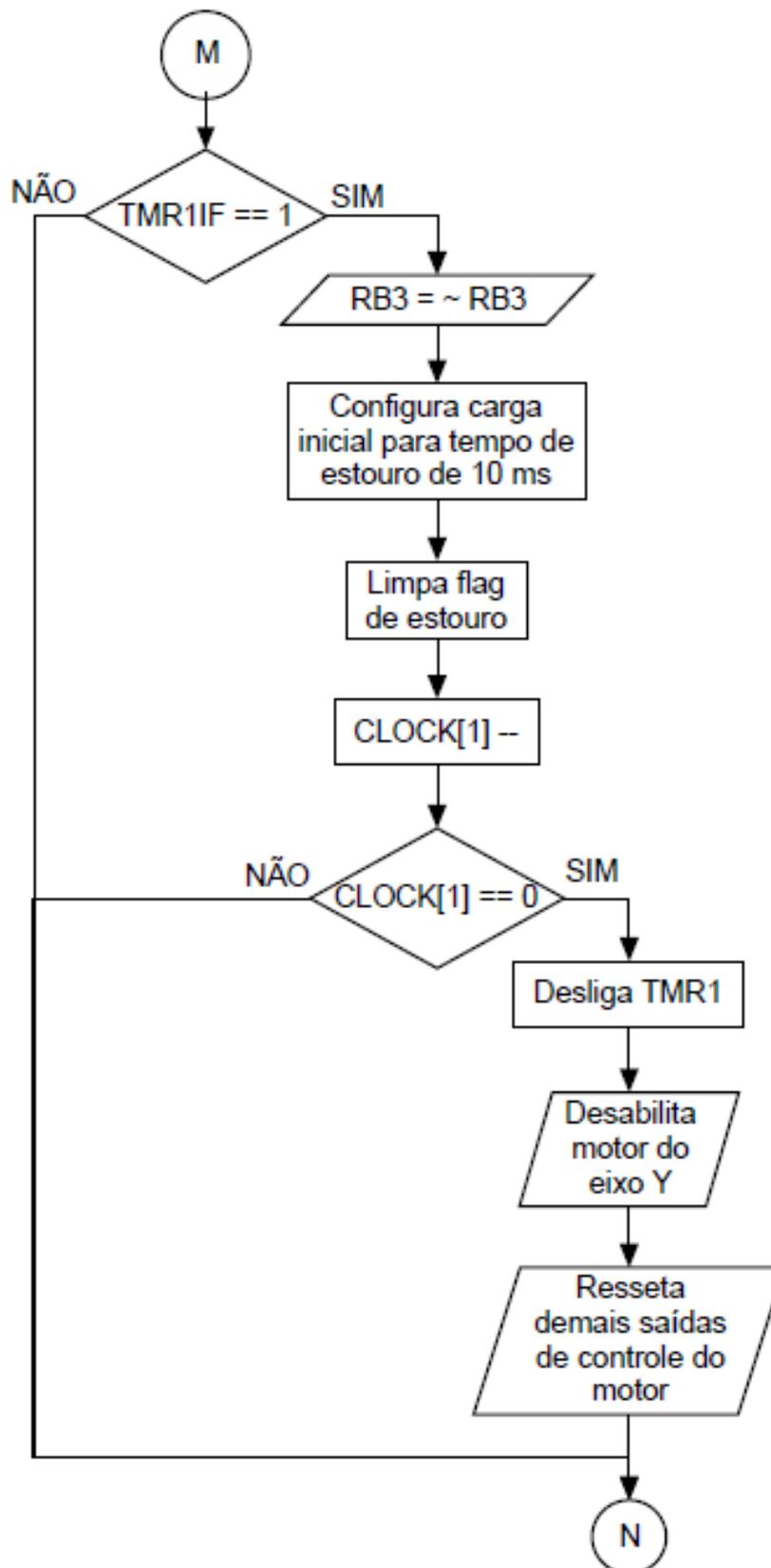


Figura 39 - Fluxograma, pagina 16

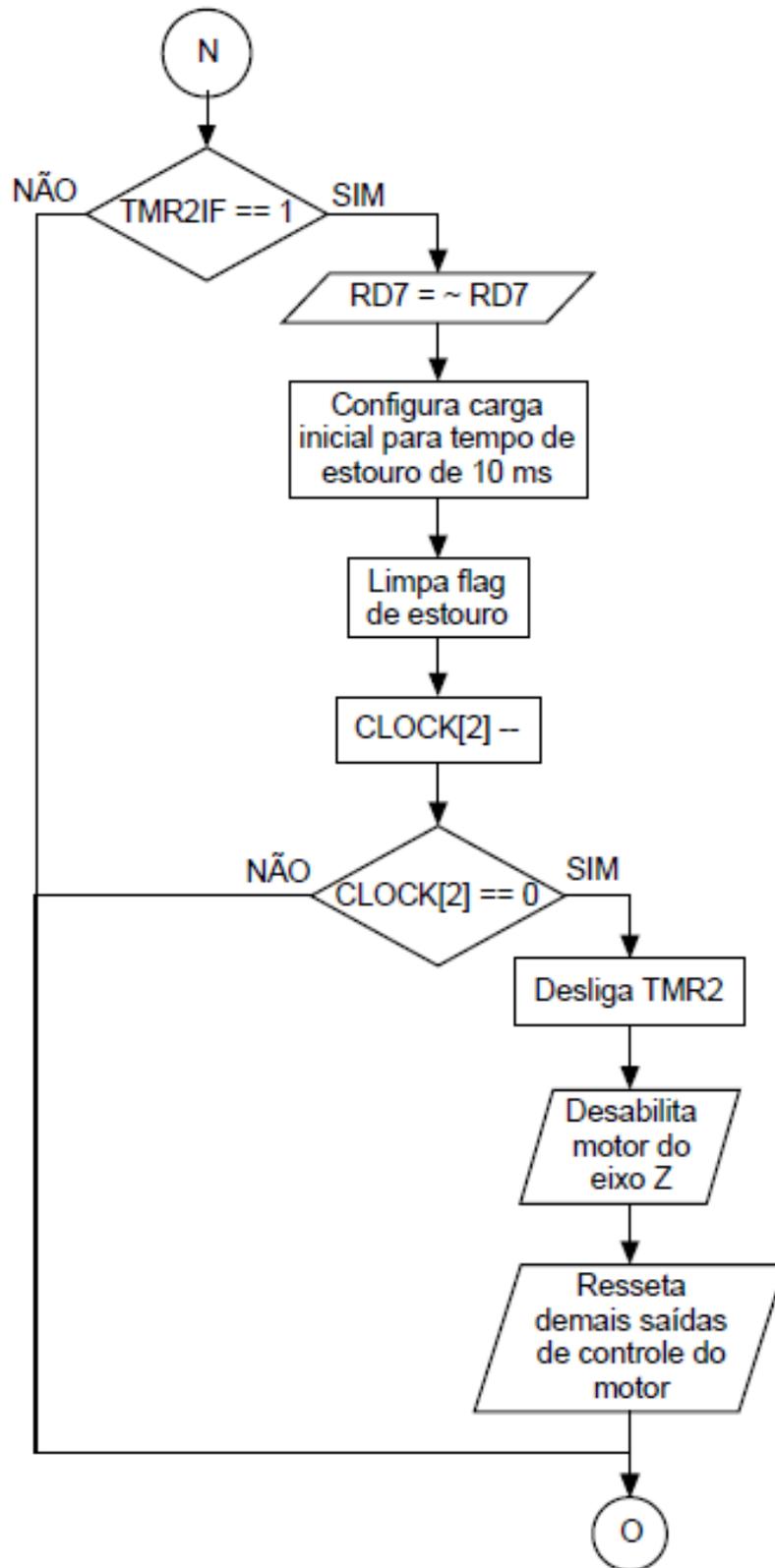


Figura 40 - Fluxograma, pagina 17

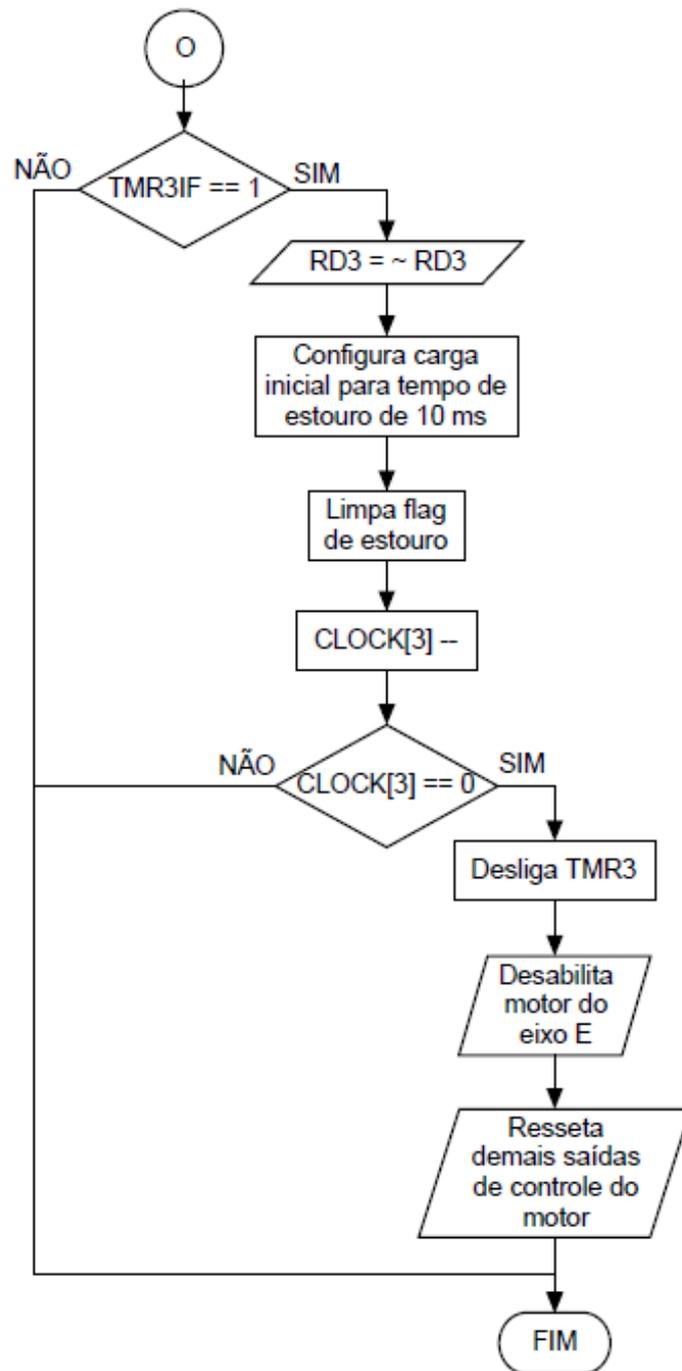


Figura 63 - Fluxograma, pagina 18

### 3.3.2. Lógica de funcionamento

Em princípio um computador envia dados de comandos via comunicação USB e, então, tais informações são recebidas pelo *buffer* do microcontrolador e disponibilizados para serem tratadas pelo mesmo.

As informações transmitidas são as seguintes, motor a ser acionado, quantidade de voltas e passos a serem dados, a precisão utilizada em meio passo ou completo e o sentido da rotação. Da mesma forma, o microcontrolador, após concluir a tarefa, envia uma resposta confirmando o serviço concluído.

A maior criticidade está em tratar os dados provenientes do HID do computador recebidos no Buffer do PIC, pois a informação é passada através de um protocolo, tal como a explicação a seguir.

#### 3.3.2.1. Comunicação USB via HID

O HID (Human Interface Device) é uma ferramenta disponibilizada pela MikroElektronika através de seu *software* mikroC PRO for PIC. Através deste recurso é possível realizar uma comunicação USB entre um computador e um dispositivo externo sem a necessidade de um *driver* instalado no primeiro. Esta comunicação é simples e somente transmite dados de baixa complexidade, tais como caracteres alfanuméricos.

Funções prontas, disponibilizadas pelo mikroC, facilitam muito a habilitação do módulo USB no PIC bem como sua utilização. Se encarrega de configurar esta porta de comunicação seguindo poucos passos.

As Figuras 64 e 65 mostram como o terminal HID é configurado e habilitado para realizar a conversação com o microcontrolador.

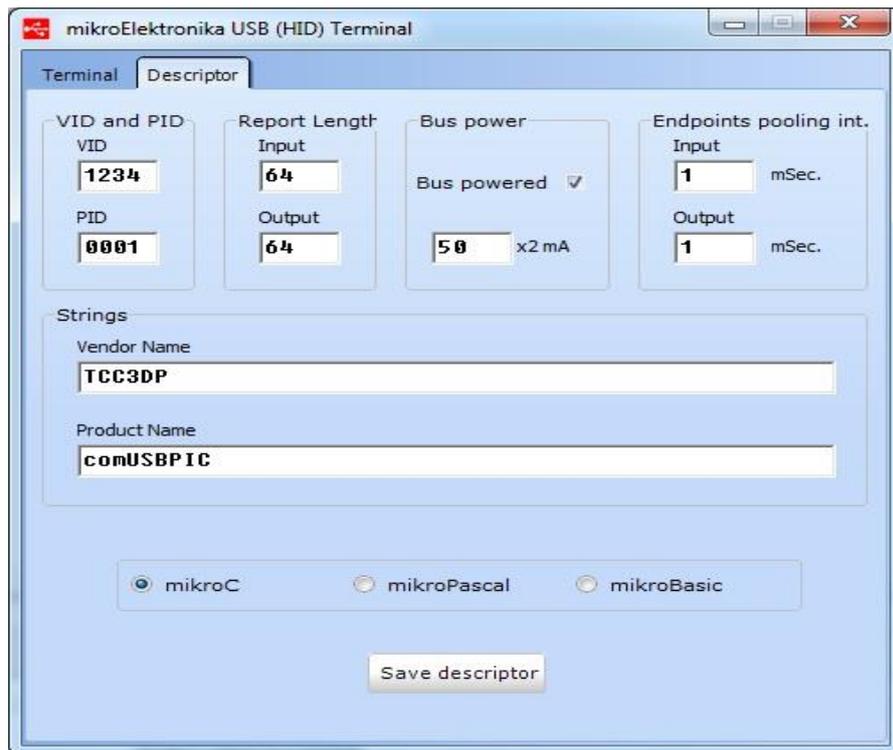


Figura 64 - HID Terminal

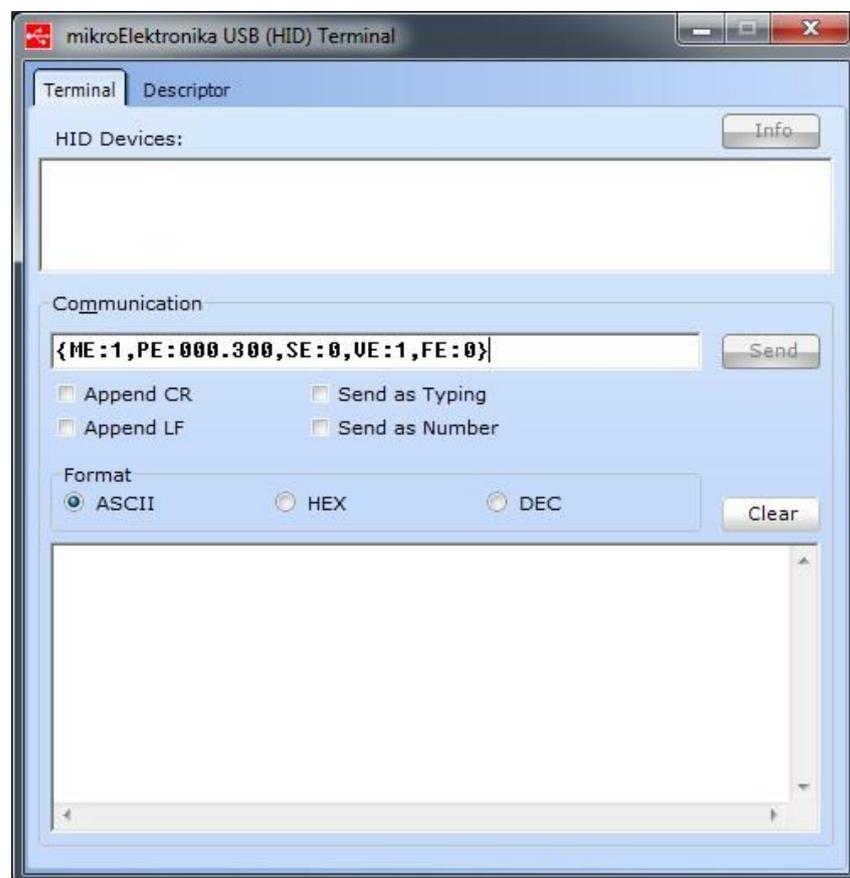


Figura 41 - Protocolo utilizado no HID Terminal

O protocolo descrito no *HID Terminal* é transmitido ao PIC e dentro deste uma série de conversões são realizadas, pois a informação que chegar ao Buffer é composta por variáveis do tipo String, sendo estas convertidas para bits possíveis de serem reconhecidos e processados pelo microcontrolador. Esta tradução do protocolo em informações binárias é bem expressa pelo fluxograma.

#### 3.3.2.2. Ações realizadas pelo PIC

Com as informações recebidas via USB traduzidas em bits o microcontrolador pode agora trabalhar, e então, com o protocolo com referência:

- “ME:1” o microcontrolador irá habilitar o funcionamento do motor-de-passo da extrusora;
- “PE:000.300” o microcontrolador irá contar 300 passos dados pelo motor antes de desativa-lo novamente;
- “SE:0” o microcontrolador irá configurar o motor para rotacionar em sentido horário;
- “VE:1” o microcontrolador irá configurar o motor para dar passos completos;
- “FE:0” o microcontrolador deve retornar “FE:1” indicando que o trabalho está concluído.

#### 3.4. Testes de Funcionamento

Com a conclusão da placa principal de controle, as placas dos drivers e a placa para controle de temperatura, dar-se-ão início aos testes de funcionamento das ações básicas da impressora através do controle realizado pelos módulos desenvolvidos neste trabalho.

##### 3.4.1. Movimentação dos eixos

Através da comunicação USB, comandos provenientes do *HID Terminal* são enviados ao módulo eletrônico de controle principal. Este por sua vez, ao receber os comandos em forma de protocolo (conforme item **3.3.2.2. Ações realizadas pelo**

**PIC)** os eixos passam a se movimentar na direção, sentido, velocidade e percurso determinado.

Ainda, dada a independência de cada eixo em função de haver um registrador *TIMER* na programação do microcontrolador para cada, é possível executar movimentos simultâneos nos eixos. Contudo, como o envio das instruções via HID é manual, o tempo necessário para a digitação de cada instrução cria uma falta de sincronia nos movimentos da impressora.

Mas os testes demonstraram que se possui total controle sobre a movimentação de qualquer eixo e da extrusora.

Na figura 66 os drivers estão conectados a placa principal de controle e esta por sua vez recebe informações via comunicação USB.



*Figura 42 – Placa principal de controle e drivers*

#### 3.4.1.1. Comandos/Protocolos e ligações para testes

- Necessário ligar MOTORES da seguinte maneira:
  - OUT1 - VERDE
  - OUT2 - AMARELO
  - OUT3 - CINZA
  - OUT4 - VERMELHO

- Nomenclatura:
  - M\_ = 1, HABILITA MOTOR
  - P\_ = VOLTAS. PASSOS (1 volta = 200 passos)
  - V\_ = 0, PASSO COMPLETO
  - V\_ = 1, MEIO PASSO
  
- Comandos:
  - Eixo X
    - {MX:1,PX:001.000,SX:0,VX:0,FX:0}
    - PXmax = 004.140
    - SX = 0, ESQUERDA
    - SX = 1, DIREITA
  
  - Eixo Y
    - {MY:1,PY:001.000,SY:0,VY:0,FY:0}
    - PYmax = 006.040
    - SY = 0, TRÁS
    - SY = 1, FRENTE
  
  - Eixo Z
    - {MZ:1,PZ:070.100,SZ:0,VZ:0,FZ:0}
    - SZ = 0, BAIXO
    - SY = 1, CIMA
  
  - Estrusora
    - {ME:1,PE:999.999,SE:1,VE:0,FE:0}
    - SE = 0, NÃO UTILIZAR
    - SE = 1, DEPOSITA

### 3.4.2. Controle de temperatura

Ao energizar a placa o sistema para controle da temperatura da mesa e do bico aquecido passa a atuar.

Via PWM, gradualmente a potência na mesa e no bico aumentam e respectivamente suas temperaturas. A monitoração das temperaturas em ambos dispositivos, feitas pelos termistores, e o processamento da informação passada pelos termistores ao PIC, garantem um controle proporcional via PWM.

Após atingir as temperaturas ideais, um sinal da placa de controle de temperatura é enviado à principal, habilitando a movimentação dos eixos para uma possível impressão.

As temperaturas em cada dispositivo são indicadas pelo Display de LCD, bem como se o sistema está habilitado a imprimir ou não.

Os testes demonstraram que se possui total controle sobre a temperatura calibrada como ideal para a mesa e bico aquecidos.

### 3.4.3. Simulação de impressão

Após todo o comissionamento da impressora, através dos testes de movimentação e aquecimento, se deu inícios aos testes de impressão.

Como este projeto não foca no desenvolvimento de um aplicativo capaz de transformar um desenho 3D em um objeto físico, o método utilizado para se tornar possível o movimento síncrono dos eixos, com a finalidade de construir um modelo em ABS, foi através da escrita de uma programação primitiva, dentro do próprio microcontrolador, com esta finalidade.

Tal programação é acionada quando a palavra “IINIT” e “PRINT” é escrita no “*HID Terminal*” e enviada para o PIC via USB. Então a impressora inicia seu trabalho e passa a desenhar a forma de três dimensões, um quadrado de multicamadas.

## 4. Resultados e discussões

### 4.1. Quanto ao controle via comunicação USB

A comunicação USB, diferente da comunicação serial, possibilita maior tráfego de informações e por tal motivo se torna ideal para este projeto.

Os testes realizados, onde os comandos escritos, em formato de protocolo, no *HID Terminal*, foram perfeitamente executados na movimentação dos eixos, o que caracteriza uma ótima programação para a interface USB e tradução do protocolo em sinais nos pinos do PIC e conquista do objetivo proposto no início deste trabalho.

#### 4.2. Quanto ao controle de temperatura

Através de um controle PID, as temperaturas no bico e mesa se mantem ao redor de um Offset pré estabelecido na programação do microcontrolador e após um determinado tempo para amortecimento e estabilização da temperatura, a impressão está habilitada para ser executada.

A estabilização da temperatura na mesa ocorre em torno dos 90°C e do bico em torno de 200°C.

A indicação via Display LCD atende perfeitamente ao que foi projeto, ou seja, pode-se visualizar o valor de temperatura de cada um dos pontos, ainda que haja um pequeno desvio do valor indicado para o valor real da temperatura, sendo que apenas o valor real é levado em consideração no controle da impressora.

#### 4.3. Quanto a impressão

Como já explicado anteriormente, a impressão é realizada através de uma programação primitiva no interior do PIC.

Conforme imagem abaixo, nota-se que a impressão, mesmo que simples, foi alcançada, e demonstra que, além dos objetivos propostos neste trabalho, pode-se realizar uma impressão 3D muito simples sem um software específico, em um computador, para executar tal função.

O aspecto do ABS modelado indica que o controle de temperatura está atuando bem, pois não há material queimado ou sem modelagem, ainda, indica que os eixos atuaram com precisão em seus movimentos e possibilitaram a formação de uma figura geométrica em três dimensões.

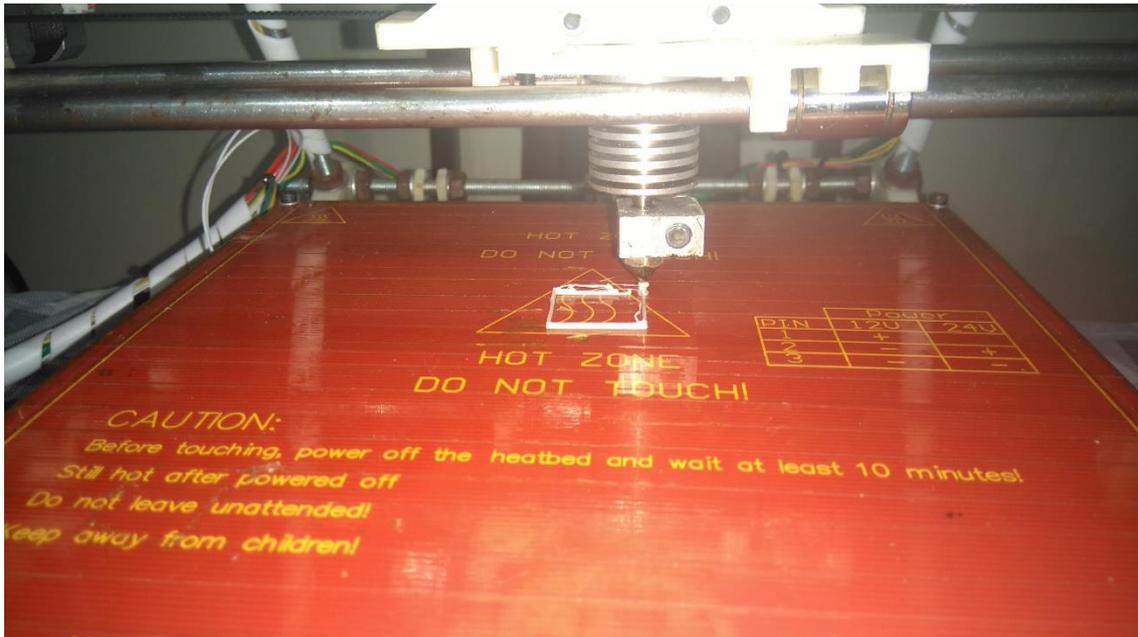


Figura 437 – Impressão em 3D de um objeto simples

## 5. Conclusão

### 5.1. Objetivo técnico

O objetivo técnico para este trabalho foi alcançado, pois os módulos eletrônicos desenvolvidos funcionaram de acordo com o esperado e permitiram o controle de uma impressora 3D do modelo Prusa Mendel V2.

Os testes de movimentação dos eixos, controle da extrusora e controle da temperatura do bico e mesa aquecidos, demonstraram bons resultados e qualificam os dispositivos, tema deste trabalho, para atuarem, desde que corretamente calibrados, com uma impressora 3D modelo Prusa.

A figura 66 demonstra todos os módulos eletrônicos desenvolvidos neste projeto. Na parte superior os drivers para acionamento dos motores de passo, abaixo do lado esquerdo, a placa de controle principal e abaixo ao lado direito as placas para controle das temperaturas da impressora.

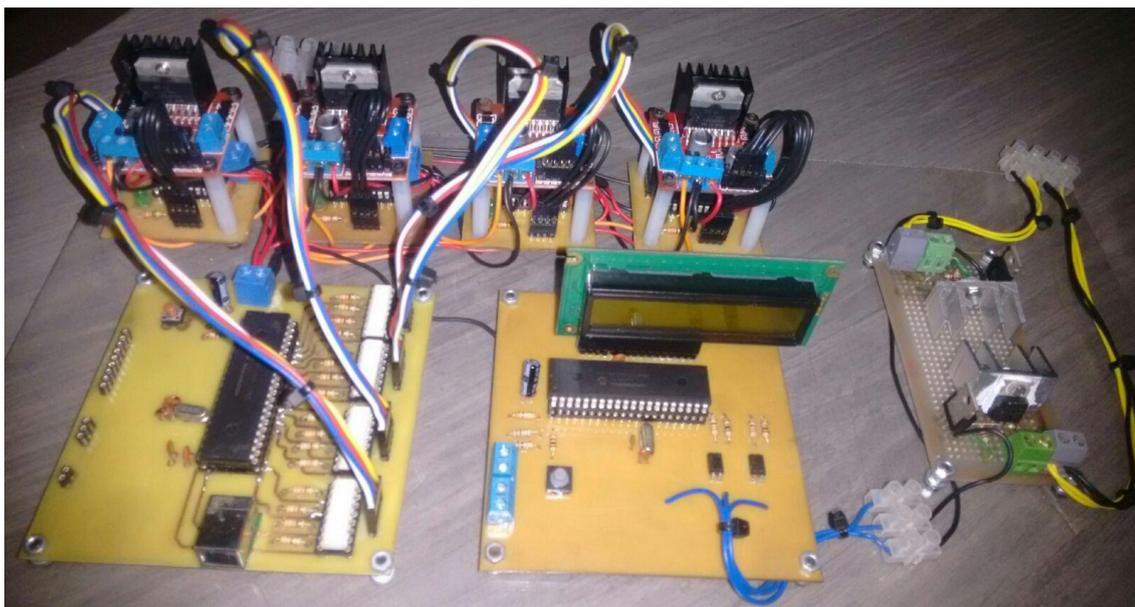


Figura 448 – Módulos eletrônicos para controle de impressora 3D

Na figura 68, tem-se a impressora, modelo Prusa Mendel V2, utilizada como referência neste projeto totalmente concluída para funcionamento. Os cabos de alimentação para as bobinas dos motores e os para o bico e mesa aquecidos estão transpassados pela estrutura mecânica e interligados aos módulos de controle.

Todos as funções básicas da impressora estão habilitadas permitindo, desta forma, que através de um software instalado em um computador instruções sejam enviadas a impressora, por fim, possibilitando a impressão do objeto que gerou os comandos.

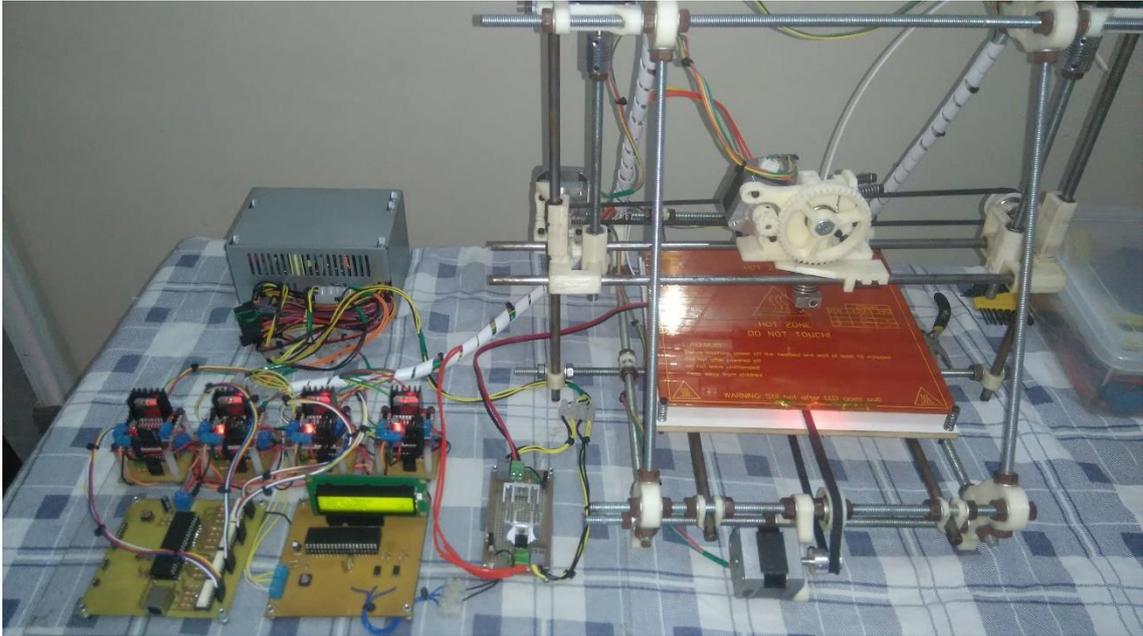


Figura 459 – Impressora 3D concluída

## 5.2. Empecilhos

Contudo, a impressora controlada por estes módulos não pode produzir objetos complexos, pois existem algumas limitações.

Em função da inexistência de um software separador e gerador de G-code, o envio de instruções para a impressora é manual, ou seja, cada movimento de eixo, cada passo de cada motor é controlado via *HID Terminal*, ou ainda, *é necessária uma programação complexa no próprio PIC para que se possa realizar a impressão de um objeto simples em 3D.*

Dado ao fato de, como a equipe responsável por este projeto não possui conhecimentos de como desenvolver softwares para tais funções, limita-se a capacidade da impressora por hora.

Além da tecnologia mecânica utilizada neste projeto, ramo tecnológico que não se aplica ao Curso de Tecnologia em Eletrônica Industrial.

## 5.3. Desafios futuros

Como um dos desafios futuros, o desenvolvimento de software capaz de atender as necessidades da impressora, possibilitando a transformação de um

desenho modelado em 3D em instruções possíveis de serem compreendidas pela eletrônica e assim permitindo a impressão do mesmo.

E ainda, dar continuidade e melhoria do firmware utilizado neste projeto, permitindo a exportação de diagnósticos da impressora, bem como receber comandos de coordenadas, velocidades variáveis, e precisões variáveis.

#### 5.4. Considerações finais

Com o decorrer desta monografia entende-se que os objetivos propostos pela mesma foram alcançados, pois possibilitasse através de alguns módulos microcontrolados por *PIC's*, programados em linguagem C, o controle (ainda que com limitações) dos movimentos e das temperaturas de uma impressora 3D de extrusão de plástico.

## Referências

MICROCHIP TECHNOLOGY. PIC18F2455/2550/4455/4550 Data Sheet. Agosto, 2008.

STMICROELECTRONICS. L297, Stepper Motor Controllers. Italia, 2001.

STMICROELECTRONICS. L298, Dual Full-Bridge Driver. Italia, 2001.

INTERNATIONAL RECTIFIER. IRF540N, HEXFET® Power MOSFET. USA, California, 2001.

NATIONAL INSTRUMENTS CORPORATION. Stepper Motors and Encoders. Dezembro, 2014.

REPRAP. Prusa Mendel Visual Instructions. Disponível em: <[http://reprap.org/wiki/Prusa\\_Mendel\\_Build\\_Manual](http://reprap.org/wiki/Prusa_Mendel_Build_Manual)> Acesso em: 27 jan. 2016.

REPRAP. Prusa Mendel (iteration 2). Disponível em: <[http://reprap.org/wiki/Prusa\\_Mendel](http://reprap.org/wiki/Prusa_Mendel)> Acesso em: 27 jan. 2016.

Termistor, Aplicação à disciplina: EE 317 - Controle e Automação Industrial. Disponível em: < <http://www.corradi.junior.nom.br/termistor.pdf>> Acesso em: 27 jan. 2016.

BOYLESTAD, Robert L.; NASHELSKY, Louis. Dispositivos Eletrônicos e Teoria de Circuitos. 11ª Ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2013.

DE AZEVEDO, Fabio Moriotto. **Estudo e projeto de melhoria em máquina de impressão 3D**. 2013. 48f. TCC(Curso de Engenharia Elétrica com Ênfase em Eletrônica) – Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos. Disponível em <[http://www.tcc.sc.usp.br/tce/disponiveis/18/180450/tce-16012014-152931/publico/Azevedo\\_Fabio\\_Mariotto.pdf](http://www.tcc.sc.usp.br/tce/disponiveis/18/180450/tce-16012014-152931/publico/Azevedo_Fabio_Mariotto.pdf)> Acesso em: 02 fev. 2016.